

ISSN 0287-7066

# 津山工業高等専門学校紀要

## 第 56 号

BULLETIN  
OF  
NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, TSUYAMA COLLEGE  
NO. 56

2014

目 次

論文

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| オープンソースソフトウェアを活用した IPv4/v6 共存システムの実装と性能評価<br>岡田 正・安藤健人・山本恭平……                                                    | 1  |
| 国外での武力紛争における「生命に対する権利」に関するイギリス裁判所の判決その3<br>Catherine Smith 事件 ……………大田 肇……                                        | 9  |
| 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト IV<br>有本 茂・福田信幸・廣木一光・森島 績・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・<br>竹内 茂・Keith F. Taylor・横谷正明・Peter Zizler……………   | 17 |
| 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト V<br>有本 茂・福田信幸・廣木一光・森島 績・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・<br>竹内 茂・Keith F. Taylor・横谷正明・Peter Zizler……………    | 25 |
| 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VI<br>有本 茂・福田信幸・廣木一光・森島 績・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・<br>竹内 茂・Keith F. Taylor・横谷正明・Peter Zizler……………   | 33 |
| 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VII<br>有本 茂・福田信幸・廣木一光・森島 績・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・<br>竹内 茂・Keith F. Taylor・横谷正明・Peter Zizler……………  | 41 |
| 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VIII<br>有本 茂・福田信幸・廣木一光・森島 績・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・<br>竹内 茂・Keith F. Taylor・横谷正明・Peter Zizler…………… | 47 |
| 準静止衛星の軌跡……………佐藤 誠……                                                                                              | 55 |

研究調査報告

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 100 kHz 域を利用した誘導型無電極ランプシステム……………掛橋英典……                                | 61 |
| モンゴル語 - 日本語変換に関する基礎的検討<br>大平栄二・上谷恵里奈・Nurul Sakinah Binti Kamaruddin…… | 65 |
| 短周期食連星の測光観測……………佐々井祐二・岸部仁美・大嶋真以……                                     | 71 |

校外における研究発表等

|                  |    |
|------------------|----|
| 校外における研究発表等…………… | 77 |
|------------------|----|

論

文

# オープンソースソフトウェアを活用した IPv4/v6 共存システムの実装と性能評価

岡田 正\* 安藤健人\*\* 山本恭平\*\*\*

## Implementation and Performance Evaluation of an IPv4/v6 Interconnect System Using Open Source Software

Tadashi OKADA, Kento ANDO and Kyouhei YAMAMOTO

We implement an IPv4/v6 interconnect system in low specification hardware with open source software (OSS) as IPv6 network environment spread. The interconnect system is composed by adopting an IPv6-to-IPv4 transport relay translator (TRT), and using OSS such as FreeBSD, Jail, faithd and BIND. The performance of the system is evaluated by a viewpoint of a mutual packet transformation of IPv4 and IPv6 and a durability when flash memory is used. About the packet transformation, it is confirmed to operate normally by measuring packets in the system at a high load. In addition, the system durability that replaced a hard disk with a flash memory is evaluated by a continuous writing examination.

*Key Words:* IPv6, IPv4, Open Source Software, Packet Transformation, Flash Memory

### 1. はじめに

我々の研究室は、オープンソースソフトウェア (OSS) <sup>1)</sup>を活用することで、安全・安定な情報システムを安価に構築するための研究を行っている。地域支援の一環で構築した「津山瓦版」<sup>2)</sup>、学生向け情報を提示する「学内掲示板」<sup>3,4)</sup>など、実用的な情報システムを実現してきた。これらのシステムでは、必要最小限の機能のみを効率よく実装し、低機能のハードウェア上でも安全に運用できるよう工夫している。本論文では、同様の考え方で構築した IPv4/v6 共存システムを述べる。

本論文で取り上げるネットワーク専用機器は、IPv4 と IPv6 とのネットワークを相互接続して共存させるシステムである。これは、近年のインターネットの急激な普及に伴い、IPv4 アドレスの枯渇が現実問題となり <sup>5,6)</sup>、IPv6 ネットワークが徐々に拡

大していくなかで、既存の IPv4 資産を有効活用することができる IPv4/v6 共存システムが必要と考えたからである。

ネットワーク専用機器の開発にあたっては、OSS や適切な性能のコンピュータを用いることで、低コスト化と安定化を図っている。さらに、ネットワーク専用機器に安定性・省エネルギー性を実現する技術を実装し、高信頼性を実現することも行っている。今回は、低消費電力化・低発熱化と障害発生時の迅速な対応を目的に、フラッシュメモリを導入したときの耐久性を検討した。

本論文では、IPv6 の概要と IPv4/v6 共存システムについて 2 章で説明する。次にシステム評価として、3 章で IPv4/v6 共存システムのパケット交換時の性能について、4 章でフラッシュメモリ導入の耐久性について、それぞれの目的・方法と結果について述べる。

### 2. IPv4/v6 共存技術とシステム実装

#### 2.1 アドレス枯渇と IPv6

IP (Internet Protocol) は、経路選択や交換制御を行うための基礎を担い、TCP/IP ベースのネットワークを実現する上で、最も重要なプロトコルである。永らく 32 ビット長の IP アドレス (IPv6 が策定され

---

原稿受付 平成 26 年 9 月 1 日

\*情報工学科

\*\*専攻科電子・情報システム工学専攻平成 25 年度修了生

\*\*\*専攻科電子・情報システム工学専攻

たので、区別するため IPv4 と呼ばれる) が使われていた。しかし、インターネットの急激な拡大に伴い、アドレス数の不足が予想されたため、新しい IP として 128 ビット長の IPv6 が策定された<sup>7)</sup>。

IP アドレスの枯渇に関しては、2010 年 2 月 3 日、世界各地域に IP アドレスを分配する IANA (Internet Assigned Numbers Authority) は、IPv4 アドレスの在庫を全て払い出したと発表した<sup>5)</sup>。また、翌年の 2011 年 4 月 15 日に、アジア太平洋地域のアドレスを管理する APNIC (Asia-Pacific Network Information Center) が、IPv4 アドレスの在庫が底を尽きたとしている<sup>6)</sup>。在庫がなくなったからといって、直ちに IPv4 が使えなくなったり、IPv6 ネットワークに移行するわけではない。しかし、IPv4 空間の中に IPv6 空間が作られ、徐々に IPv4 空間が消えていくと予想される。

IPv6 ではアドレス長を 128 ビットにすることで、2 の 128 乗という事実上無限といえるアドレスが存在する。さらに、IPv6 はただ単にアドレス総数を増やすだけでなく、IP というプロトコル自体に下記のようなさまざまな機能が追加されている<sup>8)</sup>。

- ・IPSec の標準搭載によるセキュリティ向上
- ・IP アドレス自動構成機能による利用者・管理者ともに負担軽減可能
- ・個々の端末にグローバルアドレスを割り当てることで P2P (Peer to Peer) 通信が可能
- ・マルチキャスト方式による情報配信の実現
- ・アドレス構造の厳密な階層化により、インターネットバックボーンでの効率的なアドレス集約可能
- ・IPv4 ヘッダよりも簡素化された固定長の IPv6 ヘッダにより、ルータやスイッチが効率よく IPv6 パケットを処理可能

## 2. 2 IPv6 と IPv4 との共存技術

IPv4 と IPv6 は IP アドレス体系、IP ヘッダの違いにより互換性がなく、直接通信することができない。そこで、IPv6 共存システムを IPv4/IPv6 ネットワーク境界に配置することで、そのシステムを通過するパケットに対して何らかの処理を加え、IPv4/IPv6 間の通信を実現することになる。その処理は IPv4/v6 共存システムの種類によって異なり、次に 3 種類の共存技術が存在する<sup>8)</sup>。

### (1) デュアルスタック

デュアルスタックとは、単一の端末に対して IPv4/IPv6 の両方に対応させ、どちらのネットワークにも接続を可能にする。IPv4 と IPv6 の両方を有効にしておき、IPv4 で通信要求があれば IPv4 で応答し、IPv6 で通信要求があれば IPv6 で応答する仕組みである。IPv6 ネットワークと IPv4 ネットワークの境界に位置して、トンネリングやプロトコル変

換を行うデバイスは、必ずデュアルスタックデバイスである。

### (2) トンネリング

IPv4 ネットワークを経由して IPv6 の通信を行う仕組みである。IPv6 ネットワークや IPv6 ホスト同士が直接つながっていない場合に使用される。パケットを送信する際、トンネルの入口において IPv4 ヘッダが付加されることで、本来 IPv4 ネットワークで扱うことのできない IPv6 パケットを使用することができる。トンネルの出口に到達したパケットは IPv4 ヘッダを外され、IPv6 ヘッダ情報をもとにルーティングされる。そのため、ユーザ拠点と ISP (Internet Services Provider) をつなぐ回線上には、IPv4 パケットだけが流れることになる。また、この逆の IPv6 ネットワークを経由して IPv4 の通信を行うことも可能である。

### (3) トランスレータ

トランスレータは、IPv4/IPv6 パケットを相互変換することで IPv4/IPv6 間での通信を確立する。トランスレータには代表的な方式としてプロキシ方式と TRT (Transport Relay Translator) 方式があり、それぞれ変換する部分が異なる。

プロキシ方式では、アプリケーションレベルでの変換を行うので、従来のプロキシサーバと基本的に動作は同じで、IPv4/IPv6 ネットワーク境界に配置する。例えば IPv6 アドレスを設定したインタフェースから宛先ネットワークが IPv4 のパケットを受信すると、プロキシ型変換サーバが自身のインタフェースに設定された IPv4 アドレスを使用して代わりに宛先へ問い合わせを行い、宛先から応答が返ってくると送信元へそれを転送する。この方法では、プロキシ方式のトランスレータ上で、あらかじめ IPv4 アドレスと IPv6 アドレスを対応づけておく必要がある。

一方、TRT 方式は、トランスポート層レベルで変換する方式である。宛先 IPv4 アドレスを IPv6 アドレスに写像させることで、IPv4 アドレスと IPv6 アドレスを対応づける。そのため、プロキシ方式と異なり、IPv4 アドレスと IPv6 アドレスをあらかじめ対応づけておく必要がない。しかし、この方法はコネクション型の TCP 通信に限られてしまうという欠点がある。

## 2. 3 IPv4/v6 共存システムの実装

今回構築した IPv4/v6 共存システムには、トランスレータの TRT 方式を採用した。この理由としては、IPv4 端末と IPv6 対応端末がお互いにプロトコルの違いを意識せず通信することに利点があると考えたからである。デュアルスタックやトンネリングでは、IPv4 端末は IPv4 端末と、IPv6 端末は IPv6

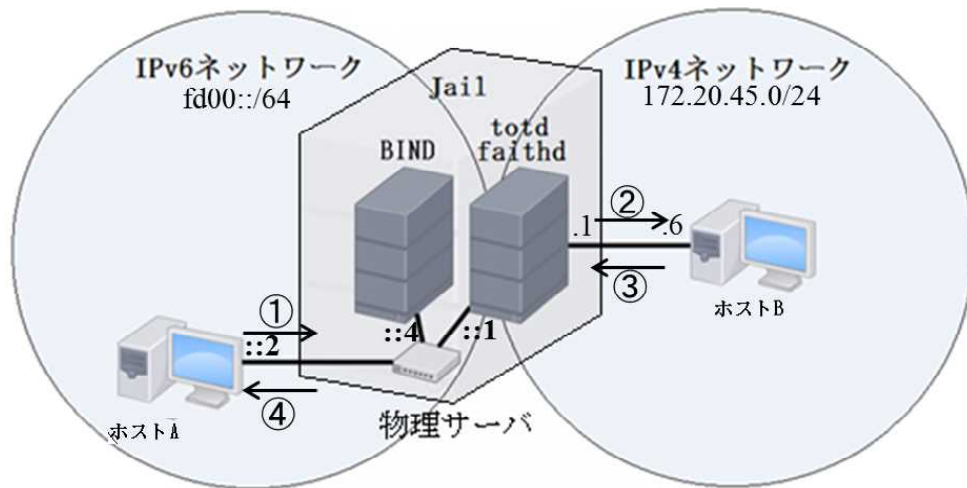


図1 IPv4/v6 共存システムの構成 (性能評価用情報を含む)

端末としか通信することができない。そのため、例えば IPv6 に移行すると既存の IPv4 サービスを利用することができない。TRT 方式トランスレータであれば、IPv6 へ移行したとしても、IPv6 と IPv4 のサービスの両方を利用することができるため採用した。

本システムは、図1 (この図には3章で使う性能評価用の情報が含まれている) に示すように OSS である FreeBSD・fai thd・BIND・Jail を用いて構成されている。OSS は、再頒布の自由、ソースコードの公開、個人やグループに対する差別の禁止などの特徴があり<sup>1)</sup>、また使用許諾料を必要としない。そのため、OSS を用いて本システムを構築することで、システム構築費用を削減でき、また今回構築したシステムを別の環境で、著作権を気にせず再現することも可能になる。これにより、地域の企業等に対するシステムの提供も容易になると考える。

TRT 方式トランスレータは、fai thd と totd で構成され、BIND と連携して動作する<sup>9)</sup>。fai thd は、FreeBSD にも標準搭載されているトランスレータ型のデーモンである。あらかじめルーティングテーブル上に、宛先 IP アドレスとして後述する fai thd プレフィックスと、出力インタフェースとして fai thd デーモンを対応付けたエントリを登録しておく。これで fai thd が IPv6 ホストから送信されたパケットを代理で受け取る。

その後 IP プロトコル変換を行い、宛先となっている IPv4 ホストへ転送する<sup>9)</sup>。トランスポート層レベルでの変換を行うので、運用では利用するポートごとに設定が必要となる。fai thd では、トランスポート層プロトコルとして TCP を使用するアプリケーションでなければ IP プロトコルの変換を行うことができない。また、IPv6 ネットワークに属する端末から通信を開始した場合に限り、パケットの送受信を行うことができる。

また、totd はプロキシ DNS と呼ばれ、IPv6 ホストが DNS サーバに問い合わせたとき、その問い合わせをプロキシ DNS サーバが受け取り、DNS サーバへ問い合わせを転送する。そして応答が IPv4 アドレスであれば、IPv6 アドレスへと変換して問い合わせ元に転送する<sup>10)</sup>。

IPv4 アドレスに 96 ビットの fai thd プレフィックスを組み合わせることで、128 ビットの IPv6 アドレスを形成する。そして、宛先 IP アドレスのプレフィックスが、fai thd プレフィックスのパケットを IP プロトコルの変換対象とする。

また、今回のシステムで利用する DNS サーバには BIND<sup>11)</sup> を用いた。BIND は最も普及している DNS サーバのソフトウェアで、ドメイン名 (コンピュータを識別する名称) と IP アドレスを対応させるアプリケーション層のプロトコルである。今回構築した IPv4/v6 共存システムにおいて、DNS サーバは Proxy DNS から受け取った DNS 問い合わせ要求 (URL) を IP アドレスへ対応させ、応答する。

しかし、totd と BIND は、どちらのサービスも同じポート番号で待機するので、同一サーバ上に実装することができない<sup>12)</sup>。そのため、仮想化システムを導入することで、この問題を解決した。仮想化システムとは、物理的なサーバ上に論理的なサーバを動作させるための仕組みである。今回は仮想化システムの方式として FreeBSD 上の Jail<sup>13)</sup> を導入し、fai thd と totd および BIND を同一サーバ上で実装した。

Jail は、FreeBSD 上に実装された仮想化システムである。Jail は、ファイルシステムやカーネルへのアクセスが制限されたプロセスの集合であり、Jail を使用することで、FreeBSD 内に本体とは独立して動作する別の FreeBSD システムを構築運用することができる<sup>14)</sup>。プロセス自体はホスト上のカーネルで動作するため、ホストと同じ速度で動作する。

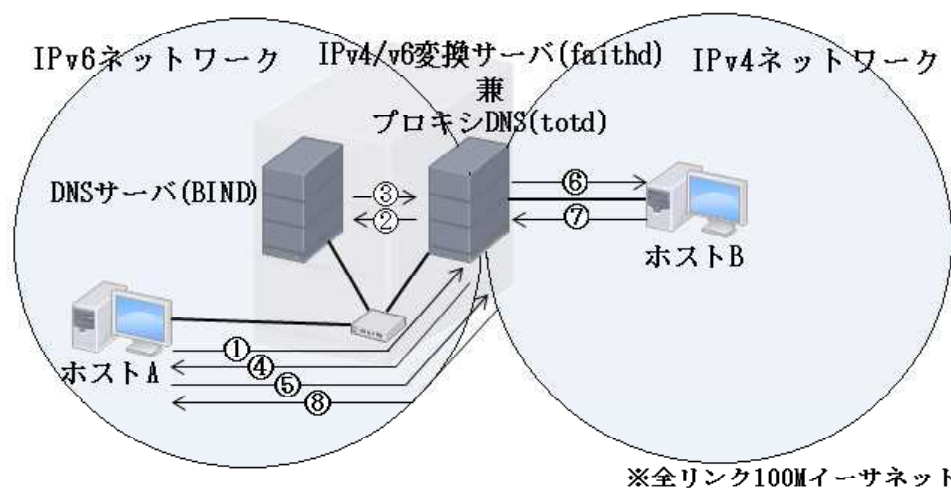


図2 TRT方式IPv4/v6システムの動作

さらに、Jail内で完結しているため、セキュリティが高く、管理も簡単である。

これにより、totdとBINDを同一ハードウェア上に実装すると同時に、稼働するサーバ数の削減によるランニングコストの削減、またIPv4/v6共存システムのためのハードウェア調達コストの削減を図ることができると思う。

### 3. IPv4/v6共存システムの性能評価

#### 3.1 性能評価の目的と動作

本システムはJailを用いることで、IPv4/v6共存機能とDNS機能を統合し、一つのサーバ上に実装した。構築に用いたサーバのハードウェア仕様を表1に示す。今回使用したハードウェアは性能の低いものであり、このハードウェア仕様で正常にサービスが提供できれば、ハードウェアを調達するときの指標が得られる。そこで、動作解析とパケット数測定を行い、問題なく動作しているかどうかの評価を行った。

表1 IPv4/v6共存システムのハードウェア仕様

|     |                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| CPU | Intel Celeron(R) CPU E1200 @1.60GHz                                                  |
| メモリ | Transcend DDR2-667 512MB                                                             |
| HDD | 日立 Deskstar80GB Serial ATA II300                                                     |
| NIC | ASUS P5GC-MX/1333 (10/100M) INTEL 945GC+ICH7<br>BUFFALO LGY-PCI-TXD (10/100M) PCI2.0 |

まず、図2によりTRT方式IPv4/v6共存システムの動作を述べる。

① ホストAは、入力されたURLからIPv6アドレスを取得するため、プロキシDNSとして動作し

ているサーバへ問い合わせを行う。

② 問い合わせを受けたサーバは、DNSサーバへ問い合わせを転送する。

③ DNSサーバはAAAAレコード(IPv6情報)があればそれを、なければAレコード(IPv4情報)を返す(今回DNSサーバにはAレコードのみ設定)。

④ プロキシDNSは受け取った応答がIPv4情報なので、あらかじめ設定した96ビットのfaithプレフィックスと32ビットのIPv4アドレスを組み合わせ128ビットのIPv6アドレスを形成し、ホストAへ転送する。

⑤ IPv6アドレスを受け取ったホストAは、その受け取ったアドレスと自身のインタフェースに割り当てられたIPv6アドレスを比較し、別ネットワークに所属していることがわかるので、デフォルトゲートウェイであるIPv4/v6変換サーバへデータ(HTTP要求)を送信する。その際受けとったアドレスを宛先IPアドレスとして送信する。

⑥ IPv4/v6変換サーバは、データを受け取るとルーティング処理を行う。ルーティングテーブルを参照し、宛先IPアドレスがfaithプレフィックス宛のデータを受け取ると仮想インタフェースであるfaithd0に転送する。

⑦ faithdがそのデータを受け取るとプロトコルを変換し、宛先IPアドレスにfaithプレフィックスを取り除いたIPv4アドレスをセットして転送する。

⑧ HTTP要求を受け取ったWebサーバは応答を返す。

⑨ IPv4/v6変換サーバはホストAへ中継する。

#### 3.2 検証の結果と考察

今回の検証は、IPv4/v6共存システムに最も負荷がかかる状況を作り、その際パケット数をカウント

し、通信が正常に行えているか確認する（検証に用いた構成は、前掲の図 1 参照）。

IPv6 の独自割り当て領域セグメント (fd00::/64) に属するホスト A (::2) から、IPv4 の学内アドレス空間 (172.20.45.0/24) に配置されたホスト B (172.20.45.6) へと、パケットを 100Mbps で転送し、その際 IPFW<sup>15)</sup>を用いて、共存システム (::1 & 172.20.45.1) への入出力パケット数を計測する。測定するのは図 1 の①から④の部分の 4 か所である。これら 4 か所の数値を比較することで、IPv4/v6 共存システムにて、パケットロスが起こるのか、また起こるとすればどれぐらいなのか測定できる。

また、IPv4/v6 共存システムの動作より、システムに対して最も負荷がかかるのは、単位時間当たりの変換対象となるパケットが最も多いこと、並びに帯域をすべて使い切るときであると考えた。変換対象となるパケットが最も多いのは、MTU (Maximum Transmission Unit) が最小の時である。IPv6 では IPv4 と異なり MTU の最小サイズが 1280 バイトと定められている。そのため MTU=1280 バイトで検証を行った。全リンクとも 100M イーサネットで接続されているため、100Mbps の帯域を使い切るようにデータ通信を行った。

全リンクとも MTU を 1280 バイトに設定し、計測を行った結果を図 3 に示す。

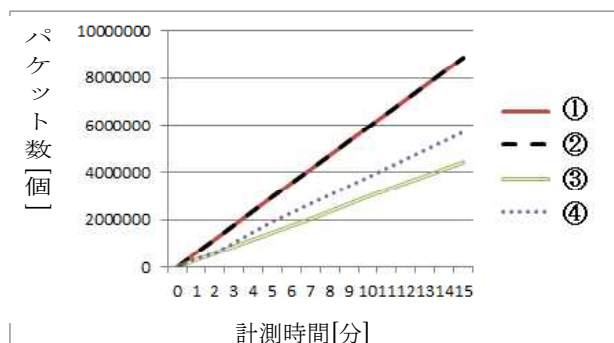


図 3 パケット数－計測時間の関係 (MTU=1280)

図 3 より、パケット数と時間は比例関係にある。ここで IPv4/v6 共存システムに対する入力帯域実効値を考える。15 分測定した際の IPv4/v6 共存システムが受信するパケット数は、8865911 個であった。そのため、1 秒当たりの平均パケット数は  $8865911 / 15 / 60 = 9851$  個となる。さらに、一つのフレームのサイズは、MTU が 1280 バイトであり、それにイーサネットヘッダとトレーラが付加されるので、 $1280 + 14 + 4 = 1298$  バイトとなる。このフレームが 9851 個あるので、総データ量は  $9851 \times 1298 = 12786598$  バイト =  $102292784$  ビット = 97.0M ビットとなる。これより IPv4/v6 共存システムに対する

入力帯域実効値は平均 97.0Mbps となり、100Mbps の帯域をほぼ使い切るようにデータ通信を行えていることがわかる。

次に、各部の通信フローをパケットキャプチャにて調べたところ、①で 11、②で 11、③で 6、④で 7 となった。ここで、①の地点ではパケットの損失は起こっていない（もし起こっていても IPv4/v6 共存システムは関与していない）と仮定し、図 3 の測定結果を、①のパケット数が 11 になるように正規化すると、表 2 のような結果が得られる。

表 2 MTU = 1280 の時の通信フロー (11 パケットで正規化)

|          |      | パケットの測定箇所 |          |         |         |
|----------|------|-----------|----------|---------|---------|
|          |      | ①         | ②        | ③       | ④       |
| 計測時間 [分] | 0.25 | 11        | 10.99651 | 5.50449 | 7.07334 |
|          | 0.5  | 11        | 10.99877 | 5.50232 | 7.07313 |
|          | 1    | 11        | 10.99792 | 5.50546 | 7.07792 |
|          | 2    | 11        | 10.99970 | 5.50177 | 5.50288 |
|          | 5    | 11        | 10.99860 | 5.50257 | 7.07303 |
|          | 7    | 11        | 10.99888 | 5.50216 | 7.07258 |
|          | 10   | 11        | 10.99873 | 5.50244 | 7.07305 |
|          | 15   | 11        | 10.99744 | 5.50431 | 7.07296 |

表 2 より 15 分の場合、②の地点では、0.02 % の減少、③の地点では、8.3 % の減少、④の地点では 1.04 % の増加という結果が得られた。この結果より、表 1 のハードウェア仕様でもシステムが正常に動作していると考えられる。しかし、戻りパケット、つまり TCP の確認応答の数に誤差がでた。これは、TCP では、全てのパケットに対する確認応答を送信するのではなく、ある程度まとめた範囲を指定し、確認応答を返している。その確認応答を送り返す条件は以下の通りであり、このためにパケット数のばらつきが発生したと考えられる。

- 1) 最後に確認応答を送ってから一定の個数パケットを受信した
- 2) 最後に確認応答を送ってから一定の時間 T が経過した

## 4. フラッシュメモリによる運用の耐久性

### 4.1 フラッシュメモリ導入の目的と対象

IPv4/v6 共存システムに対して、フラッシュメモリの導入を検討する。これにより、低消費電力化・低発熱化が図れる。さらにフラッシュメモリとして USB メモリを採用し、あらかじめ別の USB メモリにバックアップを作成しておけば、知識のない人でもディスクデバイスの取り替え作業が容易にできる。

今回開発した IPv4/v6 共存システムのように、常

時接続して運用するネットワーク機器は、耐久性が問題である。ハードウェアの再利用や安価なハードウェアで構築することができても、平均故障間隔が短ければ実際に運用することはできない。コンピュータ内部のパーツの故障率について、CPU：44%、メモリ：29%、ハードディスクドライブ(HDD)：16%、マザーボード：9%、電源：2%というデータがある<sup>16)</sup>。

このうち、簡単に交換可能で、ハードウェアの再利用の場面で重要な、HDDの故障率について検討する。2万5千台の一般消費者向けHDDを、24時間稼働させた時のHDDの生存率と経過年数の関係が調査されている<sup>16)</sup>。経過年数とともにHDDの生存率は低下し、4年後には生存率が約80%、6年後には生存率が50%になると予想されている。

そのため、HDDの代わりのディスクデバイスとしてフラッシュメモリを導入したとき、実用的な耐久性が得られるかどうか評価した。フラッシュメモリをIPv4/v6共存システムに導入したとき、まず書き換え回数の制約を検討しなければならない。フラッシュメモリはその原理上、書き込みや消去の際、絶縁体に高電圧をかけ電子つまりデータの格納、取り出しを行う<sup>17)</sup>。また、書き込みや消去を繰り返すと、酸化膜が次第に劣化し電子の格納ができなくなる。そのため、書き換え回数に制限がある。

また、フラッシュメモリは、書き込み/読み出しを「ページ」と呼ばれる単位で行なう一方、書き換えは、複数のページをまとめた「ブロック」という単位で行なう<sup>18)</sup>。これらのサイズは一般的にページが8KB、ブロックがページを64個集約した512KBとされている。あるブロック内の1ページの内容を書き換えるときは、ブロックの全内容を制御チップ内の作業用メモリに読み出して当該ページを更新し、作業用メモリの内容を別のブロックに書き出し、元のブロック全体を消去する。例えば、1ビットを上書きしても、ページ単位でなく書き換えをブロック全体で行わざるを得ない。

このように耐久性に不安を抱えるフラッシュメモリを、IPv4/v6共存システムに導入することが可能かどうか評価を行う。今回の検証では、フラッシュメモリとして安価で入手できるUSBメモリと対象とする。また、近年SSD(Solid State Drive)の価格も低下してきており、容量の少ないものであればHDDと同程度の価格で入手できるため、候補の一つと考え同様の検証を行う。

#### 4.2 IPv4/v6 共存システムのディスクアクセス

IPv4/v6 共存システムにフラッシュメモリを導入

するため、このシステムの単位時間当たりの書き込み回数と書き込み容量を測定する。また、フラッシュメモリの書き込み回数と書き込み容量を測定し比較することで、ディスクデバイスとしてフラッシュメモリを導入できるかどうか判断できると考えた。

IPv4/v6 共存システムのディスクアクセスを測定する方法として iostat を用いた。iostat は、1秒当たりの読み込み回数や書き込み回数、平均 I/O サイズなどの I/O に関する統計情報を取得することができるコマンドである。IPv4/v6 共存システムにおいて、crontab を用いて iostat を実行することで、1秒に1回統計情報を取得し、それを72時間行なった。その結果、下記の値が得られた。

平均書き込み回数：4.61 回/s

平均書き込み容量：58.72KB/s

この結果を1日当たりに変換すると、

平均書き込み回数：398304 回/日

平均書き込み容量：4924.8MB/日 = 4.81GB/日となる。

#### 4.3 フラッシュメモリの性能測定

フラッシュメモリの耐久性評価のために、実際に書き込むことで確認を行う。フラッシュメモリとして、8GBのUSBメモリ、16GBのSSDを使った。IPv4/v6共存システムのディスクアクセスは、一度システムを構築してしまうと、そのほとんどがログの書き込みであることが予測される。このことを考慮し、プログラムを作成した。

作成したプログラムは、評価対象となるデバイス上に1つのファイルを生成し、そのファイルにランダムアクセスで、ランダムな値を書き込んでいく。空き容量がなくなったら、そのファイルへ上書きしていき、これをエラーが出るまで繰り返す。そして、フラッシュメモリに書き込んだ容量、経過時間、SSDの容量分書き込んだ回数を、別のディスクデバイスへ保存する。この動作を行うプログラムを、およそ100行のC言語により作成した。

エラーが生じたときまでの、書き込み全容量と、フラッシュメモリ全容量分書き込んだ回数を、表3に示す<sup>†</sup>。

表3 フラッシュメモリのエラーまでのディスクアクセス

|                   | USB メモリ  | SSD       |
|-------------------|----------|-----------|
| 書き込み全容量[GB]       | 12319.45 | 258688.73 |
| メモリ容量分書き込んだ回数 [回] | 1727     | 14024     |

フラッシュメモリは同じブロックに書き込みを続

<sup>†</sup> SSDに関しては、原稿提出時までにエラーが発生せず、紀要発行までに表3と本文の数値を修正した。

けると、そのブロックのみ壊れてしまうことがある。しかし、SSD また近年の USB メモリでは、ウェアレベリングが実装されており、プログラムで同じ場所書き込んだとしても、自動的に書き込み頻度が低い場所に割り当てを行う。例えば、空き容量 1GB の SSD に、512MB のファイルを書き込んで消すのを 4 回繰り返したとしても、SSD の前半 512MB に 4 回書き込まれるのではなくて、全体の 1GB に 2 回書き込まれることになる。そのため、今回の検証で得られた SSD の容量分書き込んだ回数は、1 ブロックへの書き込み回数と同程度であると考えられる。

#### 4.4 フラッシュメモリ耐久性に対する考察

各ベンダはフラッシュメモリへの書き込みアルゴリズムに独自の工夫を凝らし長寿命化を図っているので、実際の書き込み量を知ることは困難である。このため、最悪の場合を想定し、一つの目安として評価する。また、書き込みデータ量と書き込み回数の 2 つから寿命を予測する。

(1) 書き込みデータ量からの推定

4.2 より、4.61 回/秒の書き込みがあり、すべて異なるブロックに書き込まれるとする。また、書き換えによるブロック単位の操作であり、ブロックサイズは 512KB とする。

- ・ 1 秒間の書き込み量は、 $512 \times 4.61 \div 2361\text{KB}$
  - ・ 1 日 24 時間電源を入れているとしたときの書き込み量は、 $2361\text{KB} \times 3600 \times 24 = 194.5\text{GB}$
- なので、

- ・ USB メモリの書き込み量が表 3 の値になる日数は、 $12319.45/194.5 = 63.3$  日
- ・ SSD の書き込み量が表 3 の値になる日数は、 $258688.73/194.5 = 1330.0$  日

(2) 書き込み回数からの推定

すべてのデータが異なるブロックへの書き込みであると仮定して、単位時間の書き込み数から寿命を推定する。また、書き換えによるブロック単位の操作であり、ブロックサイズは 512KB とする。

- ・ 1 秒間の書き込み回数は、4.61 回
  - ・ 1 日 24 時間電源を入れているとしたときの書き込み回数は、 $4.61 \times 3600 \times 24 = 398304$  回
  - ・ 8GB の USB メモリの総ブロック数は  $8192/0.512 = 16000$  個で、1 年当たり 1 ブロックへの平均書き込み回数は、 $398304/16000 \times 365 = 9086.3$  回/年
  - ・ 16GB の SSD の総ブロック数は  $16384/0.512 = 32000$  個で、1 年当たり 1 ブロックへの平均書き込み回数は、 $398304/32000 \times 365 = 4513.2$  回/年
- なので、

- ・ USB メモリの 1 ブロックへの平均書き込み回数が表 3 の値になるのは、 $1727/9086.3 = 0.190$  年 =

69.4 日

- ・ SSD の 1 ブロックへの平均書き込み回数が表 3 の値になるのは、 $14024/4513.2 = 3.107$  年 = 1134 日

書き込みデータ量と書き込み回数ともに、ほぼ同じ寿命を推定できている。この結果から、USB メモリの 2 ヶ月程度の寿命では、長期利用の共存システム導入するのは難しい。しかし、システムの停止期間を短くするため、システム情報を USB メモリに事前に書き込んでおき、短時間で置き換えためには利用可能である。

SSD に関しては、3 年以上は使えると予想できるので、HDD との正確な比較は困難なものの、実用レベルの耐久性を持っていると考えられる。消費電力の低減効果と価格の問題を考慮して、共存システムに対して適応することは可能である。

## 5. あとがき

本研究では OSS と低機能なコンピュータを活用し、Jail 環境を導入した TRT 方式の IPv4/v6 共存システムを構築した。実装したシステムに対して最も負荷のかかる状態で、各インターフェースに対する入出力パケットを測定した。その結果を比較することで低機能なコンピュータ上でも、問題ない動作を示すことができた。

また、コンピュータ利用の耐久性に関する問題を解決するために、フラッシュメモリ導入の検討と書き込み実験を通じた検証を行った。IPv4/v6 共存システムのディスクアクセス量と、フラッシュメモリに対して書き込みを行った結果をもとに、書き込みデータ量と書き込み回数から寿命を推定した。USB メモリを短時間でのシステム復旧に、SSD を HDD との置き換えに、それぞれ利用できることが予想できる。

IPv6 ネットワークの拡大に伴い、IPv4 と IPv6 とを共存させる必要性が増大するなかで、共存専用システムを簡単に安価に実現できた。本システムを実際に運用するためには、周辺部分を含めたセキュリティの検討が残っており、今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) The Open Source Initiative : <http://opensource.org/>
- 2) 田淵哲也, 佐野真澄, 岡田正 : Web サイト公開支援システムの構築とオープンソースの効果, 津山工業高等専門学校紀要 第 48 号, pp.55-60 (2006).
- 3) 宮岡樹, 衣笠昭弘, 岡田正 : Web ベース業務効率化システムのオープンソースソフトウェアによる構築, 津山工業高等

専門学校紀要 第46号, pp.59-66 (2004).

- 4) 福田大賀, 井上靖久, 岡田正: 学内掲示板システムの更新, 津山工業高等専門学校紀要 第52号, pp.73-77 (2010).
- 5) Available Pool of Unallocated IPv4 Internet Addresses Now Completely Emptied : <http://www.icann.org/en/news/press/releases/release-03feb11-en.pdf>
- 6) APNIC IPv4 Address Pool Reaches Final /8 : <http://www.apnic.net/publications/news/2011/final-8>
- 7) Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification : <https://www.ietf.org/rfc/rfc2460.txt>
- 8) Gene, 松田千賀: Cisco CCNP ROUTE テキスト: 日経 BP 社, (2011).
- 9) KAME Project : <http://www.kame.net/~suz/freebsd-ipv6-config-guide.txt>
- 10) The FreeBSD Project : <http://www.freebsd.org/cgi/ports.cgi?query=totd&stype=all>
- 11) Internet Systems Consortium : <http://www.isc.org/downloads/bind/>
- 12) 増田康人, 長橋賢吾, 有賀征爾: 使って学ぶ IPv6, ASCII, pp.129-143 (2002).
- 13) FreeBSD Handbook : [http://www.freebsd.org/doc/en\\_US.ISO8859-1/books/handbook/jails.html](http://www.freebsd.org/doc/en_US.ISO8859-1/books/handbook/jails.html)
- 14) 佐々木宣文, 後藤大地, 佐藤広生: 実践 FreeBSD サーバ構築・運用ガイド, 技術評論社, pp.118-158 (2012).
- 15) Chapter 29. Firewalls: [http://www.freebsd.org/doc/en\\_US.ISO8859-1/books/handbook/firewalls-ipfw.html](http://www.freebsd.org/doc/en_US.ISO8859-1/books/handbook/firewalls-ipfw.html)
- 16) 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies : [https://www.usenix.org/legacy/events/fast07/tech/schroeder/schroeder\\_html/index.html](https://www.usenix.org/legacy/events/fast07/tech/schroeder/schroeder_html/index.html)
- 17) Backblaze : <http://blog.backblaze.com/2013/11/12/how-long-do-disk-drives-last/>
- 18) 日経 PC : <http://pc.nikkeibp.co.jp/article/basic/20091109/1020283/?rt=ocnt>

# 国外での武力紛争における「生命に対する権利」に関する イギリス裁判所の判決 その3 Catherine Smith 事件

大田 肇\*

## The Judgments of UK Courts on “The Right of Life” in Armed Conflict outside its Territory No.3 The Case of Catherine Smith

Hajime OTA

The main purpose of this study is to analyze the transition of the judgments of UK courts on its jurisdiction when they applied the European Convention of Human Rights to the servicemen or servicewomen of Armed Forces who were dead or injured on duty outside its territory.

Key Words: The Right to Life, European Convention of Human Rights, Jurisdiction, Armed Forces

### 1. はじめに

2003 年 3 月から始まったイラク戦争は予想外の早さで終わったが、その 5 月から始まったイラク占領は、これまた予想外の困難を伴うものとなり、多くのイラク市民とともにアメリカ・イギリス兵も殺害され、占領終結後も治安は不安定なままである。拙稿「国外での武力紛争における『生命に対する権利』に関するイギリス裁判所の判決 その1」<sup>1)</sup>では、犠牲となったイラク市民からの訴えを取り上げ、同じく拙稿「国外での武力紛争における『生命に対する権利』に関するイギリス裁判所の判決 その2 Susan Smith 事件」<sup>2)</sup>では、死傷したイギリス兵からの訴えを検討した。これらの訴訟での主たる争点の1つが、ヨーロッパ人権条約の管轄権の問題であった。ヨーロッパ人権条約が“ヨーロッパ”域外において適用されるのは、いかなる場合なのか、と。特にイギリス兵の場合、海外においても軍法に服しながら作戦行動に従事している兵士が、なぜヨーロッパ人権条約の適用からは外されるのか、が問題となっていた。2013 年 6 月の *Susan Smith* 事件・最高裁判決<sup>3)</sup>は、全員一致でイギリス兵への適用を認めたが、これは 2011 年 7 月の *Al-Skeini and others* 事件・ヨーロッパ人権裁判所判決<sup>4)</sup>によって、基地外で死亡したイラク市民にヨーロッパ人権条約の適用が

認められたことが大きく影響している。それ以前の、例えば 2010 年 6 月の *Catherine Smith* 事件・最高裁判決<sup>5)</sup>においては、イギリス兵への適用は否定されている。本稿は、地理的制約なく厳しい法的統制下にある兵士が、なぜヨーロッパ人権条約・1998 年人権法の適用から外れるのか、を巡るイギリス司法の判断を、*Catherine Smith* 事件の高等法院判決<sup>6)</sup>、控訴院判決<sup>7)</sup>、そして最高裁判決に沿って、紹介および検討をしようとするものである。

### 2. 事実経過

スミス二等兵は 1992 年に国防義勇軍に入隊し、2003 年 6 月にイラクでの作戦に派兵された。彼は、6 月 18 日にバスラに到着したが、同月 26 日までは環境に慣れるためにクウェート内の砂漠のキャンプで過ごした。その後、イラクの基地に移動したが、そこはテラス、事務所、宿泊施設を有する、コンクリート製の古い陸上競技場であった。彼に与えられた部屋は、大きく風通しがよかったが、エアコンはなかった。8 月に日陰の気温は 50℃を超えていた。

2003 年 8 月 9 日、彼は暑さに耐えられないと病気を報告した。それから数日にわたり、彼は基地の外で様々な任務を果たした。8 月 13 日の午後 7 時頃、彼は、同僚 2 人がいた部屋のドアの外で、顔を下にして倒れているところを発見された。彼

原稿受付 平成 26 年 9 月 1 日

\*一般科目

は呼吸が不足し不安定な状況であった。救急車が呼ばれ、医療施設の事故救急部に搬送されたが、心臓停止状態が続き午後8時10分に死亡が宣告された。

その後、死因調査のために調査局 (Board of Inquiry) が設けられた。調査局は、2004年5月24日に報告した。その調査は不十分と見なされ、再調査が行われ、8月23日に追加の報告書が作成された。公表は、追加の報告書だけであった。

その後、検屍審問にかけられ、2007年1月5日に検屍官 (Assistant Deputy Coroner for Oxfordshire) から審問報告書が出された。

### 3. 高等法院判決

スミス二等兵の母親 (Catherine Smith) は、3つの点に関し高等法院に訴えたが、本稿ではヨーロッパ人権条約第2条<sup>8)</sup>の適用に関する問題、つまり検屍官が、人権条約第2条に含意されている手続的義務は当該検屍には適用されないと判断したことは、間違っていたという母親の主張に関連し、その前提となるヨーロッパ人権条約の管轄権に関する議論を検討していく。

Collins 裁判官は、判決 (2008年4月11日) において以下のように述べた。

イギリス兵は常にイギリスの管轄権に服している。他国に派兵された兵士がその他国の管轄権に服すると考えることは、不自然である。

イギリス兵は、1998年人権法についてもイギリスの管轄権に服する。問題は、1998年人権法がイギリスの領域を越える効力を有し、その域外において適用されるか否かである。

*Al-Skeini* 事件・貴族院判決<sup>9)</sup>の中のRodger卿の、「1998年法の目的は、イギリスの公的機関によって人権を侵害された者に、国内法において救済方法を提供することである。他国の領域でのイギリス公的機関の行為に対するこのような救済措置は、その他国の主権に対する侵害とはならないであろう。したがって、1998年法第6条<sup>10)</sup>・第7条<sup>11)</sup>をイギリスの領域に限定する必要性を示すものは、国際法のより広い文脈においても存在しない」<sup>12)</sup>という意見は、1998年法が原告に適用されることを確実なものとする。

ヨーロッパ人権条約第2条は、国家機関による生命の剥奪に関するものであるが、生命を守る積極的な義務も課している。

兵士を戦闘あるいは秩序維持のために派兵することが兵士を死の危険にさらすようになることは、

当然である。人権条約上の保障を、域外での適用および生命を守る義務において拡張していくことを考えれば、海外へ戦闘あるいは秩序維持のために派兵されたとき、兵士の生命に絶対的な保障を与えることはできないと理解することは、人権条約第2条2項C号の文言に反しはしない。

しかし、兵士は敵対的な地域における危険な作戦行動に従事するからという理由だけで、すべての保障を喪失するわけではない。例えば、兵士を、欠陥のある装備でパトロールあるいは戦闘に送り出すことは、人権条約第2条違反になりうる。

人権条約第2条の保障は、兵士がどこにようと彼ら (彼女ら) に及ぼすことが可能であるが、及ぶか否かは、当該事件の状況に依るであろう。

スミス二等兵の死亡に関し、彼の生命を守るための十分なシステムが用意されていなかった、つまり軍隊の怠慢があったのではという懸念が生じていたことは、共通の認識である。

人権条約第2条違反を立証するためには、公的機関が知っていた、あるいは知っておくべきであった生命に対する真に差し迫った危険を回避するために、公的機関に期待される合理的なすべてのことをそれがしなかったことを示せばよい。人権条約第2条の手続的義務 (必要な調査を実施し必要な事実を発見すること) は、実体的義務が侵害された、あるいは侵害されたかもしれないことが明らかで、かつ公的機関が何らかの形で関わっている、あるいは関わっているかもしれないことが明らかな場合に生じる。つまり、手続的義務は生じやすいものである。

### 4. 控訴院判決

控訴院判決 (2009年5月18日) は、Clarke 記録長官によって下された。以下、ここでもヨーロッパ人権条約の管轄権に関する議論を検討していく。

#### [序文]

この控訴は、2つの別個の問題を扱う。第1の「管轄権問題」：イラクに従軍しているイギリス兵士がヨーロッパ人権条約によって保障される程度の問題、第2の「第2条問題」：検屍審問は人権条約第2条に合致するか否か。

#### [高等法院・Collins 裁判官の判決について]

上記の2つの問題は抽象的なもの (academic) であるが審理され、Collins 裁判官は結論を下した。裁判官は、2つの問題どちらも原告に有利に決定したが、国防大臣に控訴の許可を出した。

控訴院は、2つの問題に関する全面的な主張を聞き、それらを決定することに決めた。

#### [管轄権問題]

この問題は、スミス二等兵のようなイギリス兵がイラクの軍事作戦に従軍した場合、彼（彼女）は人権条約第1条の意味するイギリスの管轄権に服するか否か（服すれば1998年人権法に保障される権利を得ることが出来る）、である。この問題が抽象的なものである理由は、スミス二等兵はイラクのイギリス軍基地内の医療施設で死亡し、国防省は、軍基地内で死亡した兵士は人権法第1条の意味するイギリスの管轄権内で死亡したことになると主張したからである。

人権条約第1条は1998年人権法の付則に入っていないが、1998年人権法の管轄権の範囲と人権条約のそれとが同じであることに異論はない。したがって、問題は、人権条約の管轄権の範囲とは？ということになるが、それは“その管轄内にあるすべての者(everyone within their jurisdiction)”<sup>13)</sup>の正しい解釈から導かれる。

被上訴人（母親）は、第1条の管轄権は地理的管轄権を含んでいるがそれには限定されず、人的管轄権も含んでおり、軍の人的管轄権内にある兵士が、イラクに派兵された場合がこれに該当すると主張する。これに対し、上訴人（国防省）は、第1条の管轄権は地理的管轄権であり、イギリスはイラクにおいて幾らかの地理的管轄権を有しているがそれは、軍事基地、病院など実効的支配(effective control)を及ぼしている場所に限定されると主張する。

この問題に関する重要な事件が、*Bankovic* 事件、*Al-Skeini* 事件である。

*Bankovic* 事件において、ヨーロッパ人権裁判所は<sup>14)</sup>、本質的な問題は、原告およびその死亡した家族が域外の行為によって（被告の国々の域外への空爆によって）、被告の国々の管轄権内に入るか否かであるとした。そして、人権裁判所は、管轄権は本質的に領域にもとづくものであると考えたが、例外が存在することを認め、管轄権の行使にあてはまる域外の行為を考察し、それらの行為が効果(effect)を生じさせる場合にのみ認められるとした。最終的に、人権裁判所は、空爆の被害者と被告の国々との間の管轄権上の連結(link)を認めず、原告たちが管轄権に含まれることを否定した。

しかし、*Bankovic* 事件の事実は、本件のスミス二等兵に関する事実とは大きく異なっている。

*Al-Skeini* 事件・貴族院判決の多数意見は、一定の環境においては、1998年人権法が軍隊のよう

な公的機関の海外での行為にも、イギリス国内と同様に及ぶことを認めた。1998年人権法第7条に規定する被害者の地位を確保するためには、原告は、死亡者が人権条約の管轄権内にあったことを示さなければならない、とした。したがって、当該事件が生じた環境が、イラクに派兵されたイギリス兵は、その基地や病院にいるときだけでなく、その外にいたときでもイギリスの管轄権内にいると裁判所が決定することができるようなものなのか、ということが問題となる。Rodger 卿は被害者の立場および彼と当該締約国との関係の重要性に焦点をあてた。問題は、その被害者が管轄権に含まれるか否かである。この問題に関し、Rodger 卿は次のように述べている：1998年人権法第6条の域外での効果のための核心的問題は、公的機関は、それが海外で活動する場合、議会の立法目的範囲(legislative grasp)に入るか否か、である。対照的に、人権条約がイギリスの域外で適用されるか否かを決定するための核心的問題は、死亡者がそのときにイギリスと連結(link)していたか否か、である。その連結(link)が存在し、死亡者が当時イギリスの管轄権内にあった場合にのみ、イギリスは人権条約第2条の人権を保障する国際法上の義務を負い、その遺族は1998年人権法のもとづく権利を行使できる、と。*Al-Skeini* 事件においては、イギリス軍基地内で虐殺された Daoud Mousa のみが、必要な連結(link)を有していたということであろう。

本件が訴えられた時点では、それまでのヨーロッパ人権裁判所の判決の中で、締約国の兵士が海外での作戦行動に従事していた事例はなかった。

我々は、Rodger 卿の問い、つまり死亡したスミス二等兵とイギリスとの間に十分な連結(link)が存在していたか否かに答えるとすれば、明らかに存在していたと答える。Collins 裁判官が指摘したように、兵士は基地や軍の病院にいる限りでは保護され、その外に出た瞬間、保護されなくなると主張することには、一定の不自然さが伴う。人権条約第1条の管轄権の目的に関し、基地内の兵士と基地外の兵士との間に区別を設けるという原則には、説得力ある理由付けが必要であろう。我々は、そのような説得力ある理由付けは国防省によって示されなかったと判断する。

我々は、*Bankovic* 事件・ヨーロッパ人権裁判所判決にも *Al-Skeini* 事件・貴族院判決にも、イギリス兵とイギリスとの間に十分な連結(link)は存在していないとの結論を導く理由は示されていないと考える。どちらの判決も、本件で仮定されている事実を審理していないからである。

*Bankovic* 事件・ヨーロッパ人権裁判所判決にお

いて認定された特定の例外は、Rodger 卿が言及した連結(link)の諸事例である。そこで我々は、イラクに派兵された兵士が、もし基地や病院の中にいなかったとき、これらの例外に含まれるのか否かを、検討する。我々の結論は、含まれるである。なぜなら、既に述べたように、スミス二等兵はイギリス軍の一員として派兵されており、彼とイギリスとの間には明確な連結(link)が存在していたからである。

こうした考え方は、国外での外交官や領事官の活動にも適用できる。彼らはイギリスと十分な連結(link)を有し、彼らはイギリスの管轄権に含まれ、したがって人権条約が保障される、と。この保障は、彼らが大使館や領事館にしようといまいと、認められる。十分な連結(link)につき、外交官と軍人とを区別する理由はない。

以上から、仮定の事実にもとづき、スミス二等兵の立場にある兵士は、人権条約第 34 条<sup>15)</sup>の潜在的被害者であると結論を下す。

## 5. 最高裁判決

最高裁判決(2010年6月30日)には9人の裁判官が各自の判断を示している。ヨーロッパ人権条約締結国ではない国(例えばイラク)に従軍したイギリス兵が、イギリス軍基地の外で死亡した場合、その兵士は人権条約第1条の意味するイギリスの管轄権に服するか否か、の問いについて、6人の裁判官が否定し、3人の裁判官が肯定した。本稿では、否定意見の中から、他の裁判官から賛同され代表的意見と思われる Brown 卿の意見と Collins 卿の意見を取り上げる。

### Brown 卿の意見<sup>16)</sup>

ある者は言う、イギリス兵は勇敢な男たちと女たちであり、国内で勤務するうちはヨーロッパ人権条約の権利と自由を保障される、それがなぜ、海外において危険に向き合うよう召集されれば、それらを享受できなくなるのか? イギリス軍軍法に服し、イギリスの権力の下に留まり続けるのに、と。

別の者は言う、海外で戦闘行動に従事する兵士に、それらの権利と自由を付与することは、全く無意味であり、戦場での決断を抑制し、その戦闘能力を阻害するだけである、と。

この問題を容易に解決する主張を見出すことはできない。しかし、例外的な場合を除き、人権条約上の権利は、海外に派兵された兵士には付与されないと考える。

出発点を *Al-Skeini* 事件・貴族院判決におく。その判決の中で、私は、ヨーロッパ人権裁判所の人権条約第1条の範囲に関する判例を分析した。現在、この事件はヨーロッパ人権裁判所・大法廷において審議中である。もしその訴えが認められれば、この種の事件における人権条約第1条の範囲に関する我々の理解は、明らかに転換することになるだろう。しかしながら、それまでは、*Al-Skeini* 事件・貴族院判決が正しいものと想定されなければならない、さらには *Bankovic* 事件・ヨーロッパ人権裁判所大法廷判決がヨーロッパ人権裁判所の指導的判決と見なされなければならない。人権条約第1条の範囲に関連する最近(2009年、2010年)のヨーロッパ人権裁判所判決も、*Al-Skeini* 判決・*Bankovic* 判決に疑問を投げかけるものではない。そして本件での被上訴人(母親)の主張を支えるものは、*Al-Skeini* 判決・*Bankovic* 判決には見当たらないし、被上訴人によって主張された例外的な管轄権のための特別な正当事由は、これまで裁判所によって認められていない。

私が被上訴人の主張を却下する理由は、2つある。第1に、もし海外に派兵された兵士が管轄権に含まれることを認めれば、その地域の住民には認められていないので(*Al-Skeini* 事件・貴族院判決にもとづけば)、軍事行動の計画・執行の責任者は、生命に対する権利を保障する義務を、その兵士には負うが、その行動によって危険にさらされる住民には負わないということになる。これは、好ましくない状況であり、昨今の国内武力衝突に関するヨーロッパ人権裁判所判決と整合しない。トルコ、ロシアでの国内武力衝突事件において、ヨーロッパ人権裁判所判決は、軍事行動の計画・執行を細かく検討し、重装備兵器の使用を最小限にするようすべての努力がなされたのか否かを問うている。これらの事件でのヨーロッパ人権裁判所の関心は、住民の安全であるが、条約締結国領域内の住民のみが対象である。しかし、被上訴人の主張を認めれば、海外で活動中の兵士も含まれることになる。条約締結国域外であっても、締結国の軍隊が過度の危険にさらされていたか否かを決定するために、ヨーロッパ人権裁判所はその国の軍事行動の計画・管理を精査するべきであると、主張しているのだろうか? その際、ヨーロッパ人権裁判所は、陸上部隊の危険を最小限にするため、他の戦略あるいは戦術(空爆や遠距離砲撃など)がとられるべきであったと判断することになるのだろうか? それが地域住民の犠牲を拡大するものであっても。もし被上訴人の主張を認めれば、このジレンマを回避することは難しくなる。

第2の理由は、被上訴人の主張は、これまでの

ヨーロッパ人権裁判所判決を超えるものになるからである。特に人権条約第 1 条は、人権条約全体の人権保障制度が及ぶ範囲の確定に重要なものであり、“生ける文書”とみなされる他の条文とは異なる。

Collins 卿の意見<sup>17)</sup>

控訴院判決が認めたように、本件に関する人権条約第 1 条の管轄権の問題は、抽象的である。控訴院は、イラクでの軍事作戦に従軍しているイギリス兵は、その間、1998 年人権法の権利保障につながる、人権条約第 1 条の意味するイギリスの管轄権内にあるのか、またはイギリス軍基地等にいるときにのみその管轄権内にあるのか、の問題について、訴訟当事者双方の主張を聞き、判決を下すことに決めた。控訴院がこのような進め方をした理由は、高等法院がこの問題に判断を下し、当事者双方がこの問題を非常に重要なものと主張したからである。この問題が、判決とは無縁の、つまり抽象的な問題として既に下級審において決定され、この法廷においても決定されるだろうことは、残念なことである。正確な事実から離れ、架空の事実にもとづいて、勧告的意見にしかすぎないものを提示することには、明らかに危険が伴うからである。本件に関しては、特にそうである。

ヨーロッパ人権裁判所は、人権条約第 1 条に関するいくつかの判決において、海外の領域において国が行使した権限と支配の程度を検討してきた。本件に関し、イギリスがイラクにおいて行使した権限と支配の程度は、今も継続しているその長い期間の中で、変化してきた。スミス二等兵が死亡した 2003 年 8 月の時点では、イギリス軍はイラクの一部の軍事占領国であり、約 8000 名のイギリス軍に対し、占領地域には 270 万人を超えるイラク人が暮らしていた。イギリス軍はバスラおよびその近郊を、実効的支配(effective control)することはできていなかったし、当該地域の主権者またはその政府の同意、要請あるいは黙認なしで、活動していた。

被上訴人の主張は、スミス二等兵がイギリスの支配下にあった地域にいたという根拠ではなく、彼が軍の一員としてイギリスの管轄権に服していたという根拠にもとづいていた。しかし、イギリスの権限と支配の有無、あるいは当該地域の主権者の同意の有無という問題を避けることはできない。唯一の争点で、軍隊に対する管轄権が人権条約第 1 条の目的に十分かなうか否かであるというのは、残念である。

人権保障の域外適用について、アメリカ合衆国

の司法の対応を概観すれば、国外にいるアメリカ市民にもその人権が合衆国政府により侵害されれば、憲法上の保障が拡大される傾向にある。しかし国籍が重要であり、アメリカ国籍保持者以外の者には適用されない。さらに、軍事作戦に関する行為については、ほぼ政治部門に任されており、司法の調査や干渉からは免除されている。

本件では、“その管轄内の (within their jurisdiction)” という表現の意味と適用が問題となっている。この“管轄”という表現は、国際法では多くの意味で使われている。国際法上の“管轄”という表現のすべての使用が、人権条約第 1 条のそれと同一のものではない。例えば、国が海外の国民に法の支配を適用するという場合でも、その国民に管轄権を行使することになるが、このことは、すべてのイギリス人がどこにようと人権条約第 1 条の意味するイギリスの管轄権内にあることを意味したりはしない。

海外で勤務するイギリス軍は軍事法と規律に服し、国王に忠誠を誓い、海外に駐留するときは当該地域の主権者の同意を得て、その主権者との協定によって、受入国の民事・刑事裁判権から免除されている。この意味では、海外の軍隊がイギリスの管轄に服していることに疑問はないと言える。また、兵士が、人権条約上の権利とは別に、彼らに対する国王の義務を履行させる権利を持っていることも疑いない(1987 年国王訴訟手続(軍隊法))。

国際法上、管轄権は、立法管轄権(人や物を規律するための国内法令を制定する権限)、執行管轄権(それらの法令を実施する権限)、司法管轄権(具体的事案について法を適用する権限)の 3 種類に分けられる。執行管轄権に関しては、当該地域の主権者の同意なしでは、国は他国で公的活動をおこなうことも、正式な捜査活動をおこなうこともできないことになっている。

以上の事柄を考慮しながら、本件における問題を整理すれば、国が海外の軍隊に対して間違いなく有する“管轄権”が、その兵士が人権条約第 1 条の“その管轄内に”あることを意味するか否か、である。その問題解決の出発点は、ヨーロッパ人権条約は基本的にヨーロッパという領域に関わる条約であること、したがって域外への適用は例外であることである。ヨーロッパ人権裁判所はごく少数の例外を認めてきたが、それらの共通原則を抜き出すことは容易ではない。したがって、主要な問題は 3 つ、(1) 軍隊は、国際法上当該国家の管轄権に服するという事だけを根拠に、人権条約第 1 条の範囲内に入ることができるのか否か、(2) 軍隊は、国がそれらに“権限と支配”を行

使うことによって、人権条約第1条の範囲内に入ることができるのか否か、(3) 軍隊は、それらと国との間に“管轄権上の連結(link)”があれば、人権条約第1条の範囲内に入ることができるのか否か、である。これらの問いに答えるためには、*Bankovic* 事件・ヨーロッパ人権裁判所大法廷判決、およびそれ以前の判決・決定、さらにはその後の判決を検討しなければならない。

まず、それ以前の判決・決定においては、例外事由として、海外で他の人に影響を及ぼす公務員(official)の行為または海外において他の人に権限を行使する公務員が取り上げられ、それ以外に、海外のある地域の実効的支配も使われていた。

*Bankovic* 事件・ヨーロッパ人権裁判所大法廷における争点は、被上訴人である国の行為が人権条約締約国の域外で実行されたあるいは効果を生んだという事実が、上訴人が当該国の管轄権に入ることの意味するか否か、であった。大法廷判決は、人権条約第1条の中の“管轄”という表現によって何が理解されるのか、どこにも説明していない。域外の管轄権として“属人、国旗、外交上および領事関係、効果、保護、受動的属人、普遍主義”が含まれるとしたが、これは“属人、国旗、外交上および領事関係”グループと“効果、保護、受動的属人、普遍主義”グループとの混成であり、前者は船舶、飛行機、大使館および領事館の域外管轄権のフィクションであり、後者は刑事管轄権の領域的性質に対して一般的に認められてきた例外を表している。しかしながら、*Bankovic* 事件も本件も、これら2種類の域外の管轄権とは無関係であると言わなければならない。ここでの問題は、全く異なった意味の管轄権、つまり人権条約第1条の“その管轄内”にあるか否か、である。

*Bankovic* 事件・大法廷判決は、これまでの判決・決定から3つの例外を挙げた。(A) 国の機関による、その域外において効果を生み、または行使された行為、(B) 被上訴人である国が、軍事占領の結果、海外の関連の地域およびその住民への実効的支配を通じて、あるいはその地域の政府の同意、要請あるいは黙認を通じて、通常はその政府によって行使されるはずの公的権力の全部または一部を行使する場合、(C) 海外の外交機関、領事機関の活動およびその国に登録された航空機、船舶内での活動、である。大法廷判決はこれらの例外原則を従前の諸事件の事実にあてはめていき、実効的支配の例外事由に関しては、それはヨーロッパという法的空間(legal space)の中でのみ有効な例外であり、国の機関による、その域外において効果を生じさせた行為の例外事由に関しては、明確な見解を示さず、被害者の市民と被上訴人である国

との間の“管轄権上の連結(link)”はないと判断した。

*Bankovic* 事件判決以後のヨーロッパ人権裁判所判決においては、国の機関による“権限と支配”が例外事由として取り上げられた(この例外事由は、本件での、軍隊は国の“権限と支配”に服しているからその管轄権内にあるとの主張を支える可能性を有するものである)。この事由は、2003年の *Ocalan v Turkey* 事件<sup>18)</sup> と2004年の *Issa v Turkey* 事件<sup>19)</sup> において示されたが、前者は、国の機関が海外に行き、相手国の同意の下で、国内での裁判のため国民を強制的に移送したもので、当該国の管轄権が認められるのは常識に沿うものである。したがって、この判決は、国の機関の“権限と支配”による管轄権につき、一般的な基礎付けをしたものとは言えない。後者の判決は、国が軍事行動の結果、その域外の地域を実効的支配した場合、その国の責任が生じうるとしたが、そこから、例外事由として、その地域の実効的支配、あるいは地域住民に対する国の機関の行動を読み取ることが可能であった。判決は、トルコはその地域を実効的支配していなかったため、上訴人は管轄権内ではなかったと判断した。ここでの“権限と支配”の考えは、これまで判例の中に確固たる根拠を見出すことができないのみならず、この *Issa* 事件判決自体が人権条約の領域性と矛盾したもので、採用できない。直近の2009年の *Al-Saadoon and Mufdhi v United Kingdom(admissibility)*<sup>20)</sup> 事件判決と2010年の *Medvedyev v France*<sup>21)</sup> 事件判決にも、上記の見解を変更する要素は見いだせない。“管轄権上の連結(link)”については、*Bankovic* 事件判決はないと判定したが、その表現に関する説明はなかった。唯一、2006年の *Markovic v Italy* 事件判決<sup>22)</sup> がこの用語を使用しているが、この2つの判決はともに、“管轄権上の連結(link)”にもとづく独立した例外事由が存在することを主張していない。*Al-Skeini* 事件・貴族院判決においてRodger卿が述べたことは、関連した連結(link)の存在であり、単なる連結や何らかの連結ではないと解される。

以上から、例外事由として認められてきたのは、(D) ヨーロッパという法的空間(legal space)内において、締約国が国外で実効的支配をおこなう場合、(E) その国の領域の延長としての海外の建物(大使館など)と共通する軍隊基地などの場合、(F) 常識に照らして国家司法権の海外への延長と見なされる場合(*Ocalan v Turkey* 事件など)の3つだけである。本件は、ヨーロッパ人権裁判所が認めた上記の例外事由のどれにも該当せず、国が海外の軍隊に対して間違いなく有する“管轄権”

がその兵士が人権条約第1条の“その管轄内に”あることを意味するという主張を支える論拠は、その判例の中にも、原理の中にも見いだせない。海外のイギリス軍は、イギリスの“権限と支配”に服していること、あるいはイギリスとその軍隊との間の“管轄権上の連結(link)”の存在だけで、人権条約第1条の管轄権は成立しないのである。

## 6. ま と め

以上のように、イギリス最高裁判所裁判官は1998年人権法を適用するその前提として、ヨーロッパ人権条約の適用可能性を審理し、その際の判断において最も重視したのが、ヨーロッパ人権裁判所の判決、特に大法廷判決であり、その代表が*Bankovic* 事件判決であった。そうした議論の進め方は、控訴院のClarke記録長官のそれ、つまりヨーロッパ域外での軍事行動に関連して締約国の兵士が訴えた事例がヨーロッパ人権裁判所においてはそれまで皆無であった事実を踏まえ、イギリス兵と国防省との法的関係からその連結(link)の可能性を認め、基地内と基地外とで1998年人権法の適用に大きく差が出るものの問題性を意識し、それらを克服する「説得力ある理由付け」を国防省に求めた手法とは、大きく異なっていた。

Brown 卿も触れていたように、*Al-Skeini and others* 事件に関するヨーロッパ人権裁判所判決が2011年7月に下され、そこでは、*Bankovic* 事件判決から大きく転換し、代わってCollins 卿によって判例としての価値を否定されたIssa事件が重視され、国の機関による“権限と支配”が例外事由として認められた。この変更を受けて、2013年6月の*Susan Smith* 事件最高裁判決においては、イラクに派兵されたイギリス兵が人権条約第1条の管轄権内に入ることが全員一致で認められた。裁判での争点は、管轄権から、生命に対する権利の保障のあり方に移ったのである。

こうしたイギリス司法の動きをどう評価すればよいのか？ 政治的文脈では、イギリスでは制限されている受刑者の投票権についてヨーロッパ人権裁判所が人権条約違反と判定し、それに対しイギリス政府が激しく反発するなど、テロ容疑者拘束の違法性を巡る問題等も含め、ヨーロッパ人権裁判所とイギリス政府との軋轢は深まっている。保守党からはヨーロッパ人権条約の廃棄が主張され、その先にはEUからの脱退も視野に入っている。そうした意味では、本件における最高裁多数意見は、ヨーロッパ人権裁判所に「振り回さ

れる」イギリスの裁判所の姿を象徴的に示すものかもしれない。しかし、原理よりも現実的対応の積み重ねを重視するのが、約400年以上の歴史を有するイギリス法曹界の伝統である。イギリス社会において圧倒的な存在感を示すその法曹界が、遠回りをしながらも本格的に“軍事事件”に踏み込んでいくそのインパクトは、強烈であろう。「法と軍事」という未開拓な領域にどのような変化が生じるのか、今後も検討が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) 拙稿 津山工業高等専門学校紀要 第54号(2012年) pp15-30.
- 2) 拙稿 津山工業高等専門学校紀要 第55号(2013年) pp15-23.
- 3) *Smith & Others vs The Ministry of Defence* [2013]UKSC 41.
- 4) *Al-Skeini and others v The United Kingdom* [GC] Application no.55721/07.
- 5) *R(Smith) v Oxfordshire Assistant Deputy Coroner (Equality and Human Rights Commission intervening)* [2010] UKSC 29.
- 6) *R(Smith) v Oxfordshire Assistant Deputy Coroner (Equality and Human Rights Commission intervening)* [2008] EWHC 694(Admin).
- 7) *R(Smith) v Oxfordshire Assistant Deputy Coroner (Equality and Human Rights Commission intervening)* [2009] EWCA Civ 441.
- 8) ヨーロッパ人権条約 第2条(生命についての権利)
  - 1:すべての者の生命についての権利は、法律によって保護される。何人も、故意にその生命を奪われない。ただし、法律で死刑を定める犯罪について有罪の判決の後に裁判所の刑の言い渡しを執行する場合は、この限りでない。
  - 2: 生命の剥奪は、それが次の目的のために絶対に必要な、力の行使の結果であるときは、本条に反して行われたものとみなさない。
    - (a) 不法な暴力から人を守るため
    - (b) 合法的な逮捕を行い又は合法的に抑留した者の逃亡を防ぐため
    - (c) 暴動又は反乱を鎮圧するために合法的にとった行為にため
- (松井芳郎編「ベーシック条約集 2009」、東信堂、2009年、p238).
- 9) *Al-Skeini and others v Secretary of State for Defence* [2007]UKHL 26.
- 10) 1998年人権法 第6条 公的機関の行為(Acts of public authorities) .
- 11) 1998年人権法 第7条 司法救済(Proceedings) .
- 12) Paragraph 54 of *Al-Skeini and others v Secretary of*

*State for Defence* [2007] UKHL 26.

- 13) ヨーロッパ人権条約 第1条(人権を尊重する義務)

締約国は、その管轄内にあるすべての者に対し、この条約の第一節に定義する権利及び自由を保障する。

(松井芳郎編「ベーシック条約集 2009」、東信堂、2009年、p238)。

- 14) *Bankovic v Belgium* (2001) [GC] Application no. 52207/99.

- 15) ヨーロッパ人権条約 第34条(個人の申立)

裁判所は、締約国の一による条約又は議定書に定める権利の侵害の被害者であると主張する自然人、非政府団体又は集団からの申立を受理することができる。締約国は、この権利の効果的な行使を決して妨げないことを約束する。

(松井芳郎編「ベーシック条約集 2009」、東信堂、2009年、p238)。

- 16) 前掲5) para139 - para148.

- 17) 前掲5) para220 - para309.

- 18) *Ocalan v Turkey* (2003) 37 EHRR 238; (2005) 41 EHRR 985.

- 19) *Issa v Turkey* (2004) 41 EHRR 567.

- 20) *Al-Saadoon and Mufdhi v United Kingdom (admissibility)* (2009) 49 EHRR SE 95.

- 21) *Medvedyev and others v France* [GC] Application no. 3394/03.

- 22) *Markovic v Italy* (2006) 44 EHRR 1045 [GC].

# 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト IV

有本 茂<sup>1\*</sup> 福田信幸<sup>2\*</sup> 廣木一<sup>3\*</sup> 森島 績<sup>4\*</sup> 村上達也<sup>5\*</sup> 成木勇夫<sup>6\*</sup>

斎藤恭司<sup>7\*</sup> 竹内 茂<sup>8\*</sup> Keith F. Taylor<sup>9\*</sup> 横谷正明<sup>10\*</sup> Peter Zizler<sup>11\*</sup>

## Mathematics and Chemistry

## Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project IV

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA, Tatsuya MURAKAMI  
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI  
Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER

This is the fourth part of the series of articles that records and further develops essentials of the Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Symposium 2013 Tsuyama, whose main themes were symmetry, periodicity, and repetition. The symposium was held on April 5th and 6th in Tsuyama city, Okayama, Japan, in conjunction with the Fukui Project and was devoted to the memory of the late Professor Kenichi Fukui (1981 Nobel Prize) who initiated the project. The present series also provides challenging cross-disciplinary problems which are directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. Most of these problems are formulated using mathematical language of unique factorization domain (UFD) and related notions, which are not well known among chemists despite the importance of these notions in elucidating additivity and high-speed asymptotic phenomena in molecules having many repeating identical moieties.

**Key Words:** the Fukui conjecture, Memoir of Prof. K. Fukui, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

### 1. 緒 言

平成25年、4月5日(金)、4月6日(土)、津山高専において、「数学と化学の学際シンポジウム・2013・津山」と称する集会が開かれた。本論文シリーズは、この学際シンポジウムで発表された学術的内容を記録し<sup>1)3)</sup>さらに発展させると共に、福井予想及び最近のカーボンナノチューブ研究と関連し、

数学と化学の学際領域において重要性をもつ概念「一意分解整域(UFD)」と周辺をその定式化の中にもつ学際的基本問題を提起するものである。

上記学際シンポジウムは故福井謙一博士(1981年ノーベル化学賞)がカナダを本拠地として1992年開始した、国際的・学際的・世代交流的共同研究「福井プロジェクト」のグループ及び、津山市、津山市教育委員会の後援で、最近の福井予想証明とナノサイエンスに係る成果を記念する集会であった。第4部～8部の本論文シリーズにおいては、新しく、森島績京都大学名誉教授(京大付置福井謙一記念研究センター初代センター長)が参加し「私と福井謙一先生—回想録—」を執筆担当する。またカナダで福井プロジェクトに貢献した Dalhousie University, Keith F. Taylor 教授(Canadian Mathematical Society 前会長)と Mount Royal University, Peter Zizler 教授も新しく参加し、福井プロジェクト国際メンバーによる最近の論文4)-12)との連携に協力することになった。

原稿受付 平成26年8月28日

1\*, 3\*, 10\* 一般科目 2\* 一般科目非常勤講師

4\* 京都大学名誉教授

5\* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点(iCeMS)

6\* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

7\* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

8\* 岐阜大学 教育学部・数学科

9\* Dept. of Math. and Stat., Dalhousie University, Canada

11\* Dept. of Math., Phys., and Eng., Mount Royal University, Canada

上記シンポジウムでは数学と諸科学の交流の歴史、また最近のカーボンナノチューブ、ポリアセチレン学際研究を顧み、現在化学者にとって疎遠であるが今後重要性が増すと考えられる楕円関数、複素解析等の数学分野に関連した講演がなされた。

これらの講演の本質的部分を記録し、さらに補足発展させた本論文シリーズは New Frontier Project と称する福井プロジェクトの新しい局面展開に呼応するものである。「福井予想と New Frontier Project」に関連して本論文シリーズを補完する最近の論文 (13) と上述の論文 (4)-12) を読者は是非参照されたい。

## 2. 私と福井謙一先生 - 回想録 - I

京都大学名誉教授 森島 績

はじめに： 本プロジェクト主催者の有本君からわが師である福井謙一先生を語る小文を書いて欲しいとの依頼を受けた。丁度「私の研究遍歴」を執筆中であつたので、その初めの部分である福井研究室での学生時代、福井研究室から米澤先生が独立して研究室を担当され私がスタッフとなった頃のことを福井先生と関連づけて手直しし、さらに福井先生の念願であつた分子工学専攻設立の経緯、福井先生のノーベル賞受賞を機に設立された(財)基礎化学研究所ならびに福井先生亡き後、この研究所を京大に移管し京大付置福井謙一記念研究センターとして新たに発足させ、その初代センター長として務めた経緯を付け加えて有本君の依頼に応えたい。

### 1 京都大学工学部燃料化学科入学から福井謙一研究室での学生時代

私は 1959 年 (昭和 34 年) 京大工学部化学系 4 学科のうち燃料化学科に入学した。当時は石油化学、合成繊維など化学工業が花形産業であつた。他 3 学科 (工業化学科、繊維化学科 (後の高分子化学科)、化学機械工学科 (後の化学工学科) ではなく燃料化学科を選んだのは、2 才年上の兄の友人の京大生 (工業化学科) に著名な福井謙一教授が居られる燃料化学科を勧められたこと、灘高の化学の先生に化学を研究するなら京大工学部化学系学科に志願することを勧められたことがきっかけであつた。当時学部は 1、2 回生の教養課程と 3、4 回生の専門課程に別れており、1 回生は宇治分校 (現在は宇治キャンパスとして多くの研究所がある) で、2 回生は時計台のある吉田本部キャンパスと通りを隔てた三高時代の校舎の残っていた教養部キャンパスで学んだ。1 回生は必須科目でカリキュラムがぎっしり詰まっていた。授業は午前 8 時始まりで、1 時限目は大抵数学や物理学、ドイツ語などでサボることの

できない科目ばかりであつた。入学時のガイダンスで主任教授をされておられた福井先生は、燃料化学科の新入生に数学、物理学、語学をしっかりと勉強しておくようにと強調された。化学の勉強には特に触れられなかった。物理学の一般化には数学が、化学の一般化には物理学が、生物学の一般化には化学が重要であるとも言われた。当時工学部の教養課程には 10 クラスあり、私は T10 クラスに所属していた。今でもこのクラス会が数年おきに開催されている。電気、電子、機械、数理工学など数学を得意とする有志が「スミルノフの数学教程」を征服する会を立ち上げ、私もそれに参加した。全巻制覇はならなかったが。授業では教科書は用いられず、その時の 5~6 冊のノートは今でも書棚の手の届くところにある。今でも役に立つからだ。

2 回生になると選択科目が増えまた時間の余裕もできてきたので興味本位と上述の福井先生のご教示もあってフランス語とロシア語を必須語学 (英語、ドイツ語) 以外に履修した。フランス語は後年 1979 年南仏の片田舎で開催された国際学会への道中で少しは役立った。一昨年秋パリに家内と娘一家宅に一ヶ月居候し片田舎を旅行した際には私のフランス語はすっかり錆び付いて使い物にならなかった。フランス語特有の数の表現だけは覚えていたが。2 回生の授業で特に印象深かったのは必須科目の力学演習である。専門課程の助手の先生方が毎週多くの宿題を課して不意打ちに黒板で解答させられるという厳しいものであつた。このノートもその後ずいぶん役立った。

専門課程の 3 回生になると勉強の方は俄然忙しくなった。厳しい学生実験に加えて福井先生の熱力学の講義は精緻を極め難しかった。米澤先生 (当時は助教授) の物理化学演習は内容として電磁気学を易しく解説したもので私の好きな科目であつた。種本は岩波の物理学全集の中の小谷正雄著「電磁気学」であることを嗅ぎつけこの本も自ら勉強した。工業数学は他学科生と共に授業を受けた。内容はかなり高度でフーリエ変換、ラプラス変換などを含み、後々役立った。物理化学、有機化学、高分子化学、無機化学、工業化学概論、などの講義はあまり面白くなかった。荒木源太郎先生の原子核物理学概論は面白く、後に量子力学の勉強に役立った。当時は良い教科書が少なく大抵はノート講義が中心であつた。学生、院生時代の授業のノートは教養部時代も含めて今も手元にあるが、後に教官となって授業を受け持った時に随分参考にさせてもらった。4 回生になった時には当然福井謙一教授の研究室を選んだ。研究室は本部キャンパスの正門に入ってすぐ左側の赤レンガの建物 (現在は留学生会館などが入っている) の 1 階にあつた。5 人が配属されたが卒業論文研究は全員実験研究をテーマとするように言われた。3 回生の時に月刊誌「化学」に福井研究室共同執筆の「量子化学入門」が連載されており毎月購入して独力でこ

れをむさぼり読んでいた。習うより慣れろ式の筆致で書かれていた。Hückel 分子軌道法で有機化学反応や構造の諸特性が理論的計算により見事に説明されていることに感動すら覚えた。したがって卒論テーマも量子化学に関するものと思っていた。しかし先生は、学生は実験を通して化学のカンを身につけるべきだとの信念を持っておられた。各 4 回生は先輩の院生の指導のもとに多様な実験研究に従事した。私は博士課程院生の米田さん（博士号取得後合成化学科の助手、助教授を経て大阪府立大の教授になられたが 50 代半ばで亡くなられた）にハロゲン化アルキルの求核的置換反応の溶媒効果、特に非プロトン性極性溶媒（DMF, DMSO：これらは当時初めて市販された）が優れているのかを実験並びにその理由を調べよというテーマをあたえられた。当時、IR や紫外・可視分光器すらなかった実験室で電気伝導度測定によって多くの溶媒の  $R^+$ ,  $X^-$  への分極解離能を定量化し、これが反応速度（これも自ら測った）と相関することを見出し、溶媒の誘電率とは相関しなかった。更に溶媒分子の相互分極率（ $\pi rs$ ）を多くの  $\pi$  共役系アミド分子を自ら合成して Hückel 分子軌道法で手回し計算機で計算し、自ら測った求核的置換反応速度と相関することを見出した。福井先生には関心を持ってもらえなかったが、私自身が発想したこの卒論研究は翌年 3 月の日本化学会年会で発表し、日本化学会誌に論文として発表された。米田さんは私が勝手に自分のアイデアで研究するのを目のあたりにして以後は自分で研究をやれと突き放された。私はこのテーマから離れたかったので内心喜んだが、次のテーマさがしには苦しんだ。福井先生に相談しても好きなことをやれとしか言われなかった。研究室では当時輪読会と称して Eyring の「量子化学」、Van Vleck の「物質の磁性電気物性」、ランブルックの「統計力学」の勉強会が博士学位取得直後の諸熊圭治博士（2012 年度文化功労賞を受賞）の指導のもとで（有志のみ）行われ、4 回生にも各章ごとに解説を課せられた。また、「量子化学入門」がまだ連載中でもあり丁度  $d$  電子状態のところであったので 4 回生の私にいきなり Moffat のフェロセンの電子状態に関する論文を勉強して皆の前で解説せよと助手になっておられた諸熊博士に言いつけられた。これには群論を勉強し分子軌道法への適用を身につけねばならない。必死に勉強した。これは後々に鉄ポルフィリン錯体ならびにヘム蛋白質の研究に役立った。

これら輪読会、雑誌会以外にも Recent Topics と称する研究会があった。スタッフ（福井教授、米澤助教授、加藤助手、諸熊助手）、シニア院生、学内外の他分野の先生などが色々な話題についてのセミナーである。分からないまま聞き流すだけでもサイエンスの面白さだけは受け止めることができエキサイティングであった。修士課程での講義には「量子化学」はなく、

福井先生の「統計熱力学」という難しい講義があった。殆んど理解出来なかったが後にノートを読み返してみると極めて精緻な内容で難しい数式の導出も完璧であった。このノートも後々役立った。福井先生に量子力学はどのように勉強されたかを訊いたところ、湯川秀樹先生の「量子力学序説」を勉強したといわれ、私も今出川通の古本屋で入手して勉強した。

話は遡るが 1962 年夏、4 回生の半ばごろ京都会館で原子、分子の理論化学国際会議京都会議（本会議はこれに先立って日光で催された）が福井研究室の世話で開催され、スタッフ、学生全員がお世話することとなった。私は受付の役を割当てられた。世界一流の研究者例えば分子軌道法の創始者 R. S. Mulliken（後にノーベル賞受賞）、電子間反発項を考慮した  $\pi$  電子系分子軌道法の開拓者 R. G. Parr、NMR のスピン結合定数を量子力学を用いて定式化した M. Karplus（蛋白質のダイナミックスの理論計算法の開発で 2013 年度ノーベル賞受賞）、同化学シフトを定式化した J. A. Pople（後に ab initio 分子軌道計算法の開発でノーベル賞受賞）、原子・分子スペクトルの精密解析でノーベル賞を受賞した Herzberg、生物量子化学者 B. Pullman、東京大学の小谷正雄、長倉三郎先生などなど論文や著書で知っていた著名な方々のお顔を知って感激した。会議後私はパリ大学教授 Pullman ご夫妻の京都観光案内役を買って出た。片言のフランス語は通じず下手な英語で説明した。



写真 1. 学部卒業証書を手にした福井研究室配属学生。右から 3 人が筆者

大学院修士課程に入ると一人にほっておかれた私は研究テーマの模索に苦しみ続けた。諸熊先生と同室だったこともあり思い余って同先生に相談した。米澤先生は今パリの Pullman 教授のもとに留学されておられるが、NMR に興味を持っておられるので Pople 他著

「High Resolution NMR」を勉強しておいたらどうかと示唆してくださった。早速その本の海賊版（正規輸入版は極めて高価であった）を購入して猛勉強した。実

験、理論両面から化学者向けに書かれており面白かった。これをきっかけに私はNMRを本格的に自力で勉強した。NMRには電磁気学、統計力学、量子力学が全て詰め込まれていた。これらの再勉強は必須であった。理論式の導出だけで14冊のノートになり、今も残っている。福井先生にNMRを用いた研究をやりたいと申し出たところ、「単なる化学物質の分析手段としてではなく本質に迫る研究手法としてならやっても良い。しかし装置はない。どうするのだ？」と訊かれた。



写真 2. 福井研の研究室旅行で鳥取砂丘へ。福井先生の後ろで横を向いているのが筆者。修士課程1回生

大阪の塩野義製薬研究所、鎌倉の東レ基礎研究所には米国バリアン社製の高性能NMRがあり、東レでは福井研2年先輩の斉藤肇さんがNMR研究をされているのでこれらの装置を借りてやりたいと返答すると、先生は名刺に私を紹介した添え書きをして持って行って頼み込んで下さいと言われた。始めは塩野義研究所のNMR装置を使わせてもらった。限られた時間しか使えないため良く準備した測定計画、先方に対する礼儀作法、さらには先方のデータに対する理論的解釈を提供してgive and takeの関係や信頼関係を築くことが重要であることを身を以て学んだ。鎌倉にあった東レ基礎研究所の斉藤先輩にも随分御世話になった。限られた時間内にとったデータを舐めるように検討して最大の情報を取得することも身についた。テーマはプロトンNMRでDMFの自己会合状態、DMFによる溶質分子の分極状態など4回生の卒論に関係する課題や水素結合、電荷移動相互作用などについてプロトンNMRを用いて電子状態の観点から研究した。M2になって福井先生にNMR装置を導入して欲しいと申し出たところ、科研費機関研究申請書を書きなさいと言われた。修士の院生が研究費の最も高い科研費申請書を書くなど今では考えられないだろう。勿論先生と帰国された米澤先生に修正していただき、先生の知名度もあって採択された。1千万円以上だったと思う。京大で初めての高分解能NMR

が導入されるのだと感激した。私は米国Varian社製NMRの購入を希望していたがこの額ではプロトン専用機A60しか買えず、止むを得ず日本電子社にC-13 NMRも測定できる特注の60MHz NMRを注文した。当時はパルス・フーリエ変換(FT) NMRは無いいわゆるCW

(Continuous Wave)型NMRである。これで天然存在比1.1%のC-13核のNMR測定は極めて困難でドラム型計算機で積算してもノイズの中にシグナルらしきものが得られるという状態であった。しかも磁場の安定性は悪く、東京都昭島市の日本電子の工場に足繁く通い設計段階から厳しく注文を付けた。C-13 NMRにこだわったのは、福井研究室では飽和炭化水素の分子軌道計算が加藤博史先生、米澤先生によって盛んに行われていたこと、NMRの先進国である米国でも不飽和炭化水素のみのC-13 NMRがPaul Lauterber(後にMRIの原理の案出でノーベル賞受賞)によって発表され始めていたためである。京大特注NMRは特大の筐体と磁場安定化装置並びに初めてのinternal lock systemを備えていた。設置場所は赤レンガの建物内ではなく、新築間もない4号館の地階の一室を借りた。電磁石の設置については、当時今出川通を走っていた市電のスパークによるノイズの混入と磁場の不安定化を避けるように設置された。市電の影響を突き止めるために私自身が1週間にわたって昼夜を問わずに測定した。プロピレンオキサイドの60MHzプロトンNMRスペクトルは数十本のピークから成り、1回5分のスキャンを1週間連続して積算するのである。全てのピークが重なるまで磁石の位置、電源の安定化装置、スペクトロメーターの調整を行った。これもC-13 NMR測定のためには必要であった。この装置設置にさきがけ、福井先生は私にNMR恒温・恒湿室の設計をせよと言われた。これは業者が行なうのが常識であったが3回生で学んだ化学工学概論をベースに熱収支計算をせよというのだ。当時のNMRの電気回路は大部分が真空管を使用しており、一部のみがトランジスタ回路であった。日本電子株式会社技術部の人に教えてもらいながら設計書を福井先生に持って行った。先生は計算尺で大略計算し私の計算の誤りを指摘した。「森島君、僕は化学工学で学位をとったんだよ」と言われ驚いた。NMR室は結局専門業者によって設計施工されたことは言うまでもない。装置が稼働したのは1965年であった。

私は福井研究室の修士課程時代に東レから奨学金をもらっていた。M2の11月に就職か博士課程への進学か迷っていた。東レに博士課程での奨学金を引き続きいただけるか訊いたところ、修了後就職をするなら出す、という返答だった。私はいまからそんな約束はできない、と答え博士課程での奨学金は見事断られた。あの大東レが小さく感じられた。育英会の奨学金で博士課程進学を決意した。

私は修士課程において実験はNMR装置を借りながら

前述の分子間相互作用研究とその発展として常磁性金属錯体（2 価の Ni や Co アセチルアセトナート）とピリジンやアミン類、イミド類などの配位子分子との相互作用の研究を始めていた。速い交換系のもとで配位子分子の常磁性 NMR シフト（Fermi の核スピン-電子スピンコンタクト相互作用による）を測定し配位子分子にどのように不対電子密度（符号も含めて）が分布するのかを調べる研究である。後に大流行したランタニド系錯体をシフト試薬として用いる研究の先駆けとなった。一方、炭化水素の炭素と水素の NMR 化学シフト、間接スピン結合定数（J）を Hückel 分子軌道法を用いて計算する研究を始めた。理論式そのものは Pople, Karplus, MaConell らが量子力学的に導出したものを用いた。分子軌道計算も単純 Hückel 法から R. Hoffmann の開発した拡張 Hückel 法が諸熊先生によって可能となっていた。

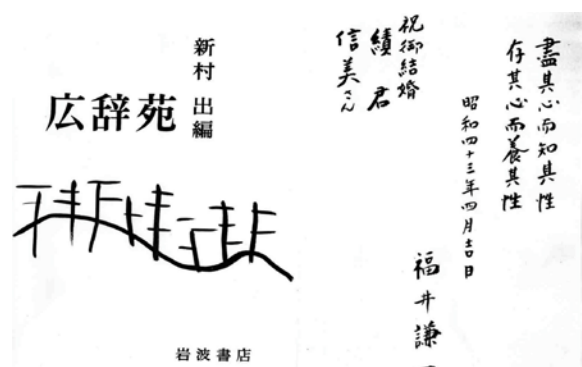


写真 3. 私の結婚式に主賓として福井先生ご夫妻にご出席いただき、その際に頂いた広辞苑の裏表紙にお祝いのお言葉を書いて頂いたもの。漢文は「心を尽くせば、それ、本質を知る」、「心あらばそれ心の働きが養われる」の意

ここで謹厳で近寄りがたい福井先生の意外な側面のエピソードを三つほど述べておこう。その一つは昼頃になると何処かに外出されたことが度々あった。秘書の方に聞いてもわからないと言う。問い詰めるとゴルフの打ちっ放しに行っておられるとのことだった。この間を利用して私は先生の書棚の本を探索した。その中で膨れあがった本を見るとわら半紙に数式の導出がぎっしり書き込まれていた。また、多くのファイルの背表紙に研究室所属の学生の名前が書いてあった。私のものもあった。私は無視されていないのだと嬉しくなった。二つ目は、修士課程修了間直に福井研究室 M2 全員を祇園の先生の馴染みのお茶屋に招待して下さり、お酒をふるまわれ一人一人に色紙に異なった外国語で文言を書いてくださった。ラテン語で書いてもらった者もいた。ドイツ語、漢文も含まれていた。その三つ目は私の結婚式に主賓として出席して下さいようお願いに先生のお宅を訪れたときのことだ。イギリス

の高級スピーカーメーカーであるタンノイ社の最高級のオートグラフが高級真空管アンプとともに目についた。学生時代からオーディオファンである私の垂涎の装置だ。奥様の話によると先生はよくハイドンの弦楽四重奏曲のレコードを楽譜を見ながら聴いておられるとのことであった。先生が身近に感じられた。福井先生はこのことは他人に話された事はなかった。

当時、分子科学夏の学校若手の会が催されており、M2 の時に京大が当番校になった。私と同級生の川村君、理学部化学教室の二人ほどで世話をすることになった。私が一計を案じてテーマを「化学反応理論と分子分光学ならびに磁気共鳴学」とし、最も基本的な原著論文を解説するもので、これらの分野に疎い研究室からの参加者に割り当てた。例えば振動分光学を専門とする東大理学部化学教室島内研究室には磁気共鳴学（NMR, ESR）を、東大物性研の長倉研には電子スピンの理論的導出、電子、核スピンの緩和の理論、福井研究室のわれわれは振動分光学の理論、福井先生のフロンティア軌道理論は大阪大学に、と言った具合であった。福井先生の幅広い知識に接して考えついた前例のない企画であった。夏休みのさなか信州の涼しい志賀高原の丸池で催された。私は毎年参加し、多くの友人をつくった。

## 2 米澤研究室発足、博士課程 1 回生を中退して助手に

1965 年 4 月に米沢先生が教授に昇任され、福井研究室の第 4 講座を担当された。当時福井先生は第 2 講座（高圧ポリエチレンの研究をされていた児玉教授が住友化学に転出されてから教え子の福井先生が担当されていた）も兼任されていたが、それまでの第 4 講座のスタッフ、学生を全て米澤先生に託され、ご自身お一



写真 4. 諸熊博士のハーバード大留学の壮行会。左から米澤、福井、諸熊、加藤先生

人第 2 講座の専任教授になられた。当然博士課程 1 回生の私は米澤研究室の学生となった。加藤先生は米澤研究室の助教授に、福井研究室で助手になられた諸熊先生はすでにハーバード大学 Karplus 先生のところに

留学されておられたが助手の籍は米澤研究室であった。アメリカに残る覚悟を決められた諸熊先生は京大を辞職され、11月に後任として博士課程1回生半ばの私が選ばれた。博士課程中退で助手になることのハンディは博士号取得に課程博士より1年遅らすという不文律であった。勿論種々の雑務をこなさねばならないことは言うまでもない。経済的には安定するというメリットはあるが。私は学位取得後の留学が遅れてしまうという不安があった。多少躊躇ののち助手就任を受諾した。この年の夏、東京で第一回国際NMR会議が開催され、米澤先生とD1の私が出席した。学会への申し込みは修士論文発表会の頃で福井先生に促されてのことだった。私の学会出席経費は福井先生が負担してくださった。米澤先生は私の行ったC-13 NMRの理論計算の成果を発表された。東京会議の後に大阪でも小規模の国際会議が大阪大学の先生のお世話で催され私も口頭発表することとなった。著名なSlichter教授ら十数名の外国人研究者の前でビシクロ系炭化水素のプロトン、C-13化学シフト、スピン結合定数の $\sigma$ 分子軌道法を用いた計算の研究成果を緊張して発表した。院生が発表したのは私一人であった。物理学者であるSlichter教授はF<sub>2</sub>のフッ素の化学シフトの理論計算で著名な論文を発表しておられ私も勉強していた。同教授からはげましの言葉をいただき感激した。

米澤研になって、米澤先生は研究の方針として理論と実験の融合を重視すると私に言われた。福井研究室ではこれらが乖離していたからだ。私は既にそのような方向で研究を進めていたので大いに賛同した。

私と同期の川村君はESRを用いてフリーラジカルの研究をしていた。当時理学部化学教室にはアメリカ留学帰りの出口先生がESR研究をされておりESR勉強会が毎週行われていた。川村君と私はこれに参加した。電子スピンの磁気共鳴であるESRと核スピンの磁気共鳴であるNMRとは理論的には共通点もあり、ここで電子スピンの緩和機構の理論を勉強した。私は電子スピンの緩和時間が短い系ではNMRスペクトルがあまりブロード化しないことを利用して常磁性分子のNMR研究ができると考えたのだ。ESRでは得られない情報が得られるのだ。安定ラジカルや常磁性金属錯体を含む溶液のNMR研究を本格的に続けようと決意した。先行研究はあったが、前述のようにこれらをシフト試薬的に用いて（このほうが極めて大きなシフトしたシグナルの帰属が簡単である）これらと相互作用する分子への電子スピン分布をNMR常磁性シフトから調べる研究は皆無であった。自分の60MHzプロトンNMR装置を用いて精力的に常磁性NMRシフトの実験をしたのは、イミド系分子、さらにピペリジンなどの環状飽和アミン類で窒素孤立電子対がアキシアルとエクアトリアル位置の平衡のどちら側に偏っているのか、あるいは半々の平衡にあるのかをNi(acac)<sub>2</sub>による常磁性シフトとMO

によるスピン密度計算によって説明した研究である。日本化学会欧文誌に投稿したところ、審査員の一人からMO計算による説明を省けばアクセプトするという。私は頭にきてそのままアメリカ化学会誌(JACS)に投稿したところすべての審査員が褒めてくれて無修正でアクセプトされた。この件以来日本の論文誌に投稿したことはない。アメリカでは有機化学者でも分子軌道法、福井先生のフロンティア軌道理論すら習得し講義に取り入れているのを後に知った。

(第V部に続く。)

### 3. Challenging Cross-disciplinary Problems Related to the Fukui Conjecture and to the Chemistry of Carbon Nanotubes I

Shigeru Arimoto, Nobuyuki Fukuda, Masaaki Yokotani and Peter Zizler

In this section, let  $\mathbb{Z}^+$  and  $\mathbb{R}$  denote respectively the set of all positive integers and real numbers. In what follows, we retain the notation given in the “Nanotube Series, parts I ~ III” published in the Journal of Mathematical Chemistry<sup>(4)-(6)</sup>. The reader is referred to refs. 15)-23) and references therein for the science and technology of carbon nanotubes.

Recall that in ref. 3) we formulated the following Problem AI using Propositions AI and AII with Note AI:

**Problem AI.** Is it possible to prove the following proposition via the Weierstrass Preparation Theorem or other methods?

**Proposition AI.** Let  $\varepsilon$  be a fixed positive real number. Let  $I = [-\varepsilon, 1+\varepsilon]$ . Let  $p \in C^\omega(I)[\lambda]$  be a monic polynomial of degree  $q \in \mathbb{Z}^+$  given by

$$p = \lambda^q + c_1 \lambda^{q-1} + \dots + c_q. \quad (1)$$

Suppose that for any  $\theta \in I$ , the polynomial

$$\text{Ev}_\theta(p) = \lambda^q + c_1(\theta) \lambda^{q-1} + \dots + c_q(\theta) \quad (2)$$

over the field  $\mathbb{R}$  has  $q$  real roots. Define the mapping  $f: I \rightarrow \mathbb{R}[\lambda]$  by

$$f(\theta) = \text{Ev}_\theta(p), \quad (3)$$

and let  $r_j(f(\theta))$  denote the  $j$ th root of  $f(\theta)$  counted with multiplicity, arranged in the increasing order, where  $j \in \{1, \dots, q\}$ . Let  $\varphi$  be a real-analytic function defined on  $\mathbb{R}$ . Let

$$E_N = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^q \varphi\left(r_j\left(f\left(\frac{k}{N}\right)\right)\right). \quad (4)$$

Then, there exist real numbers  $\alpha(\varphi), \beta(\varphi) \in \mathbb{R}$  such that

$$E_N = \alpha(\varphi)N + \beta(\varphi) + o(1) \quad (5)$$

as  $N \rightarrow \infty$ .

**Note AI.** The following proposition, which is easily established via Taylor's theorem, is fundamental in investigating Proposition AI.

**Proposition AII.** Let  $I = [0, 1]$ . Let  $C^1(I)$  denote the set of all continuously differentiable functions ( $C^1$  functions) defined on  $I$ . Let  $g \in C^1(I)$ . For each  $N \in \mathbb{Z}^+$ , let

$$E_N = \sum_{k=1}^N g\left(\frac{k}{N}\right). \quad (6)$$

Then, there exist real numbers  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$  such that

$$E_N = \alpha N + \beta + o(1) \quad (7)$$

as  $N \rightarrow \infty$ .

We formulate a new problem by changing the underlined part in the above Proposition AI. Our new challenging problem is:

**Problem BI.** Let  $\xi$  be any positive real number and let  $\eta$  be any real number, and let  $\varphi_{\xi, \eta}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  be a function defined by  $\varphi_{\xi, \eta}(x) = |x - \eta|^\xi$ . Recall the Practical Asymptotic Linearity Theorem (PALT)<sup>14)</sup>, and check if the following Proposition BI is true, and then investigate the asymptotic speed of  $E_N$ .

**Proposition BI.** Let  $\varepsilon$  be a fixed positive real number. Let  $I = [-\varepsilon, 1+\varepsilon]$ . Let  $p \in C^0(I)[\lambda]$  be a monic polynomial of degree  $q \in \mathbb{Z}^+$  given by

$$p = \lambda^q + c_1 \lambda^{q-1} + \dots + c_q. \quad (8)$$

Suppose that for any  $\theta \in I$ , the polynomial

$$\text{Ev}_\theta(p) = \lambda^q + c_1(\theta) \lambda^{q-1} + \dots + c_q(\theta) \quad (9)$$

over the field  $\mathbb{R}$  has  $q$  real roots. Define the mapping  $f: I \rightarrow \mathbb{R}[\lambda]$  by

$$f(\theta) = \text{Ev}_\theta(p), \quad (10)$$

and let  $r_j(f(\theta))$  denote the  $j$ th root of  $f(\theta)$  counted with multiplicity, arranged in the increasing order, where  $j \in \{1, \dots, q\}$ . Let  $\varphi = \varphi_{\xi, \eta}$ , where  $\varphi_{\xi, \eta}$  is defined in Problem BI. Let

$$E_N = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^q \varphi\left(r_j\left(f\left(\frac{k}{N}\right)\right)\right). \quad (11)$$

Then, there exist real numbers  $\alpha(\varphi), \beta(\varphi) \in \mathbb{R}$  such that

$$E_N = \alpha(\varphi)N + \beta(\varphi) + o(1) \quad (12)$$

as  $N \rightarrow \infty$ .

By Theorem 2 in 9), we know that the following Proposition BII is true. (We remark that Theorem 2 was derived from the

Asymptotic Linearity Theorem.)

**Proposition BII.** Let  $I = [0, 1]$ . Let  $AC(I)$  denote the set of all absolutely continuously functions defined on  $I$ . Let  $g \in AC(I)$ . For each  $N \in \mathbb{Z}^+$ , let

$$E_N = \sum_{k=1}^N g\left(\frac{k}{N}\right). \quad (13)$$

Then, there exist real numbers  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$  such that

$$E_N = \alpha N + \beta + o(1) \quad (14)$$

as  $N \rightarrow \infty$ .

Our next challenging problem is:

**Problem BII.** Let  $P(I)$  denote the set of all polynomial functions with real coefficients defined on  $I$ . Is it possible to prove the above Proposition BII using the same closure extension procedure from  $P$  to  $AC$  as we did in the proof of the Asymptotic Linearity Theorem?

## References

- 1) S. Arimoto, N. Fukuda, K. Hiroki, T. Murakami, I. Naruki, K. Saito, S. Takeuchi, and M. Yokotani, "Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project I", Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **55** (2013) 25-30.
- 2) S. Arimoto, N. Fukuda, K. Hiroki, T. Murakami, I. Naruki, K. Saito, S. Takeuchi, and M. Yokotani, "Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project II", Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **55** (2013) 31-35.
- 3) S. Arimoto, N. Fukuda, K. Hiroki, T. Murakami, I. Naruki, K. Saito, S. Takeuchi, and M. Yokotani, "Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project III", Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **55** (2013) 37-43.
- 4) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. I, J. Math. Chem. **41** (2007) 231.
- 5) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. II, J. Math. Chem. **43** (2008) 658.
- 6) S. Arimoto, M. Spivakovsky, M. Amini, E. Yoshida, M. Yokotani, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. III, J. Math. Chem. **50** (2012) 2606-2622.
- 7) S. Arimoto, M. Amini, M. Spivakovsky, J. LeBlanc, K.F. Taylor, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and Matrix Art, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **54** (2012) 31-38.
- 8) S. Arimoto, Fundamental notions for the second generation Fukui project and a prototypal problem of the normed repeat space and its super spaces, J. Math. Chem. **49** (2011) 880-893.
- 9) S. Arimoto, The Second Generation Fukui Project and a New Application of the Asymptotic Linearity Theorem, Bulletin of

- Tsuyama National College of Technology, **52** (2010) 49-56.
- 10) S. Arimoto, M. Spivakovsky, E. Yoshida, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. V, J. Math. Chem. **49** (2011) 1700-1712.
- 11) S. Arimoto, Tsuyama-castle Function and Matrix Art, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **53E** (2011) 1-5.
- 12) S. Arimoto, Multidimensional Magic Mountains and Matrix Art for the Generalized Repeat Space Theory, J. Math. Chem. **50** (2012) 1210-1223.
- 13) 有本 茂、「福井予想と New Frontier Project」化学(化学同人) Vol.**68** No.11, (2013) 24-27.
- 14) S. Arimoto and K.F. Taylor, Practical Version of the Asymptotic Linearity Theorem with Applications to the Additivity Problems of Thermodynamic Quantities, J. Math. Chem. **13** (1993) 265-275.
- 15) S. Iijima, Nature **354** (1991) 56.
- 16) K. Tanaka, H. Ago, T. Yamabe, K. Okahara, and M. Okada, Int. J. Quantum Chem. **63** (1997) 637.
- 17) K. Okahara, K. Tanaka, H. Aoki, T. Sato, and T. Yamabe, Chem. Phys. Lett. **219** (1994) 462.
- 18) T. Yamabe, Synthetic Metals **70** (1995) 1511.
- 19) K. Tanaka, T. Yamabe and K. Fukui, *The Science and Technology of Carbon Nanotubes* (Elsevier, 1999).
- 20) R. Saito, G. Dresselhaus and M.S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, (Imperial College Press, London, 1998).
- 21) T. Murakami, K. Tsuchida, M. Hashida, H. Imahori, Mol. Biosyst. **6** (2010) 789.
- 22) T. Murakami, W. Wijagkanalan, M. Hashida, K. Tsuchida, Nanomed. (Lond) **5** (2010) 867.
- 23) T. Murakami, H. Nakatsuji, M. Inada, Y. Matoba, T. Umeyama, M. Tsujimoto, S. Isoda, M. Hashida, H. Imahori, Photodynamic and Photothermal Effects of Semiconducting and Metallic-Enriched Single-Walled Carbon Nanotubes. J. Am. Chem. Soc. **134** (2012) 17862-17865.

# 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト V

有本 茂<sup>1\*</sup> 福田信幸<sup>2\*</sup> 廣木一 亮<sup>3\*</sup> 森島 績<sup>4\*</sup> 村上達也<sup>5\*</sup> 成木勇夫<sup>6\*</sup>

斎藤恭司<sup>7\*</sup> 竹内 茂<sup>8\*</sup> Keith F. Taylor<sup>9\*</sup> 横谷正明<sup>10\*</sup> Peter Zizler<sup>11\*</sup>

## Mathematics and Chemistry

## Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project V

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA, Tatsuya MURAKAMI  
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI  
Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER

This is the fifth part of the series of articles that records and further develops essentials of the Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Symposium 2013 Tsuyama, whose main themes were symmetry, periodicity, and repetition. The symposium was held on April 5th and 6th in Tsuyama city, Okayama, Japan, in conjunction with the Fukui Project and was devoted to the memory of the late Professor Kenichi Fukui (1981 Nobel Prize) who initiated the project. The present series also provides challenging cross-disciplinary problems which are directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. Most of these problems are formulated using mathematical language of unique factorization domain (UFD) and related notions, which are not well known among chemists despite the importance of these notions in elucidating additivity and high-speed asymptotic phenomena in molecules having many repeating identical moieties.

**Key Words:** the Fukui conjecture, Memoir of Prof. K. Fukui, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

### 4. 私と福井謙一先生 - 回想録 - II

京都大学名誉教授 森島 績

時は再び 1965 年に戻るが、JACS 誌に有名な Woodward-Hoffmann の法則の論文が速報で掲載された。福井研究室では大騒ぎとなった。ベースとなっているのは福井先生のフロンティア軌道理論である。わかり

やすい図を用いて閉環、開環反応の光および熱反応による立体選択性を見事に説明していた。早速工業化学教室野崎研究室の野依良治さん（当時助手、後にノーベル化学賞受賞）が私のところに飛んできて説明してくれという。野依さんは灘高の2年先輩で彼の弟とは高校で同級生であった。福井先生のところへお連れしましょうかと言うと恐れ多いから君が説明せよと言う。MO のイロハから説明した。これはノーベル賞級の仕事だと言われた。福井先生はこの論文に1年先立って Diels-Alder 反応をフロンティア軌道である HOMO、LUMO の位相で説明した論説を「A Tribute to Mulliken」という成書に1章分書かれていた。私は Hoffmann がこれを読んでいないと付け加えた。W-H 則は分かりやすいが定性的であり、福井先生のは定量的（摂動論を用いてエネルギー的に論じる事ができる）であるとも言った。

私は福井先生の理論を勉強する中である種の素朴な疑問を持っていた。それは HOMO とその下の対称性の異

---

原稿受付 平成 26 年 8 月 28 日

1\*, 3\*, 10\* 一般科目 2\* 一般科目非常勤講師

4\* 京都大学名誉教授

5\* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

6\* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

7\* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

8\* 岐阜大学 教育学部・数学科

9\* Dept. of Math. and Stat., Dalhousie University, Canada

11\* Dept. of Math., Phys., and Eng., Mount Royal University, Canada

なる next HOMO の軌道エネルギー差が小さく kT レベルの場合にはどうなるのかというものである。トルエンの  $\pi$  カチオンラジカルの ESR シグナルはブロードで、HOMO のラジカルとエネルギーの接近した next HOMO のラジカルとが平衡状態にあり、いわゆる exchange broadening を起こしているという論文を J. Chem. Phys. 誌に見つけた。このことはずっとのち鉄ポルフィリン  $\pi$  カチオンラジカル類 (多くのヘム酵素の反応中間体) の研究で ESR より NMR で研究できることの発見に繋がった。鉄及び 2 価ルテニウムポルフィリン  $\pi$  カチオンラジカルの HOMO (a<sub>1u</sub>) , next HOMO (a<sub>2u</sub>) はエネルギー的に近接して熱平衡状態にあり常時性 NMR が測定でき電子スピン密度も両者の平均値で酵素反応機構 (例えば酸素分子との反応部位) を説明できたのである。

プロトン常磁性 NMR シフトの研究は順調に進展していたが C-13 NMR の方は S/N が悪くあまり進展しなかったので日本電子社にプロトン核をデカップリングできるように装置の改良を申し出た。驚いたことに、プロトンデカップリングできる C-13 専用の NMR 装置を試作して私のところに無償で貸してあげましようと言って実際新装置を搬入してくれた。日本で最初に導入された。勿論、飽和炭化水素系化合物のデータが蓄積し始めた頃にアメリカカルフォルニア工科大学 J. D. Roberts 研究室から同様のデータが JACS に載った。がっくりしたが気を取り直して C-13 NMR 常磁性シフトの測定に世界で初めて成功し JACS の速報として発表された。JACS の速報はフルペーパーに比べて審査が厳しく日本からの論文は極めて少なかった。

プロトンならびに C-13 NMR が自由に使える環境で研究テーマが湧き水のごとく出てきた。上述のテーマ以外に液晶中で溶質分子を配向させ分子間相互作用、動的挙動、化学シフトの異方性の研究に取り掛かった。当時は液晶中の溶質分子の立体構造を直接スピン結合定数 (D) から決める研究がアメリカで盛んに行われつつあった。私はこれには見向きもしなかった。液晶分子はドイツから入手したものを数種類混合し室温でネマティック液晶になるものを探して用い液晶中での特異な分子間相互作用の研究成果は JACS の速報として発表された。液晶はまだ表示素子としては使われていなかった。

燃料化学科から石油化学科に改組され、教室として特別設備としてアメリカ Varian 社が開発直後の超伝導磁石を用いた CW 型 220MHz NMR (HR220) を申請しようとの動きがあった。私は早速資料収集などの調査を行った。アメリカでは Du Pont 社、イギリスでは ICI 社が導入して合成高分子の構造研究を開始していた。内外の大学にはまだ設置されていなかった。私のところには日本電子社が 100MHz NMR も無償で貸与してくれていた。(その理由は私が色々なアイディアを出して

装置の改良に寄与していた事と私のところをショールームとして国内の他の研究者に見学させるためであった) 3 台の NMR がフル稼働していた。教室内外の NMR 測定にも協力し、企業からの測定依頼にも有償で応じ装置の維持管理費の一助となっていた。超伝導 NMR 申請が万が一にも採択されたら一日おきに液体ヘリウムの調達はどうか (当時は極低温センターは無かった)。アメリカから横浜荷揚げで京都まで運んで来なくてはならない。費用も大変な額になる。これに見合う研究テーマは何か、などなど不安ばかりであった。予想外にもこの申請が通ったのだ。その後の血の滲むような悪戦苦闘が待ち受けていた。

米澤研究室では福井研究室以来の伝統的な勉強会が続けられていた (米澤、加藤先生らも参加)。これに加えて量子化学計算演習が新 4 回生にも課せられた。これは後になってスタッフとシニア院生が新規問題を回答付きで作って皆で検討する会へと発展し、化学同人から「量子化学演習」として刊行された。米澤研究室発足後しばらくは加藤博史先生の理論グループ、私の NMR グループ、私の半年後に助手になった川村君の ESR グループならびにスタッフはいなかったが福井研究室時代から種々の有機化学反応の研究を独力でやっている院生が数人いるグループから成り立っていた。研究室全体の研究会に加えて、各グループはそれぞれ輪読会をもっていた。理論グループでは拡張 Hückel 法から電子間反発項を考慮した半経験的 MO 計算法の開発を進めていた。新しく発足した合成化学科から中辻博君が米澤研究室の院生として加わった。一方、NMR グループには金沢大学理学部化学科青野研究室 (量子化学) から博士院生として遠藤一央君が入ってきた。当時は NMR 化学シフト、間接スピン結合定数と分子の構造との経験的相関関係が蓄積されていた。私はすでにいくつかの経験則例えば J カップリングでトランス > シス、C-13 NMR シフトの  $\gamma$  効果、などなどを Hückel MO 法で説明できることを発表していた (福井研究室時代)。気にしていた問題の一つに化学シフトにおける重原子効果があった。HX (X はハロゲン原子) のプロトンシフトが X=I でシフト-電気陰性度の相関関係から大幅にずれることである。CH<sub>3</sub>X の C-13 化学シフトについても同様であった。これを理論的に解明した先行研究は無かった。ただし日本の NMR 討論会で電通大の中川直哉教授がヨウ素原子の大きな軌道-スピン相互作用によるだろうと指摘していたこと、Slichter 著「Principle of Magnetic Resonance」に同様なことが指摘されてはいた。Pople の理論によると化学シフトは磁場中で電子の軌道角運動量を量子力学的に 2 次摂動論で求めるが、私は摂動をもう一つ増やし軌道-スピン相互作用 ( $\zeta$  LS) をも入れた 3 次摂動法で化学シフトを遠藤君と共に定式化した。かなり複雑な式を導いたが、要点はスピン-軌道相互作用が一重項基底状態に

三重項励起状態を混ぜて結合の電子スピン対を分極し、上に述べた常磁性シフト（フェルミのコンタクトシフト）を誘起するのである。閉殻分子でありながら常磁性シフトが誘起されるのである。我々の導いた式をHX分子に適用して計算したところX=Iでこのスピン分極シフトの寄与がかなり大きく、実験結果を説明できることが分かった。この計算にはしんどい積分計算が伴ったが遠藤君は根気よく計算してくれた。この研究はJ. Chem. Phys.に掲載された。この理論をさらに検証するためにCH<sub>3</sub>XのX=Iの場合にC-13化学シフトの異方性（ $\Delta\sigma = \sigma_{\text{平行}} - \sigma_{\text{垂直}}$ ）をPopleの理論に基づく計算値とスピン分極を考慮した我々の理論による計算値を比べると符号が逆転していた。CH<sub>3</sub>Iの $\Delta\sigma$ を実験的に求めるためにC-13をエンリッチしたCH<sub>3</sub>Iを液晶中で配向させてプロトンとC-13 NMRを測定したところ、我々の理論値と符号が一致し私は自信を深めた。この結果はChem. Phys. Lettersに掲載された。このスピン分極シフトは今では相対論を考慮した分子軌道計算で行われている。

私は次に安定なdi-tertButyl-nitric oxide (DTBN) ラジカルとメタノールなどのプロトン供与体との水素結合をNMR常磁性シフトからその共有結合性を定量的にかつ理論的計算の両面から詳細に調べる研究に従事した。私自身の実験結果と定性的理論的解釈はJACS誌に異例とも言われた3ページの速報として掲載された。審査員は全員褒めてくれていた。そもそもこの研究のアイディアは、川村君がDTBNラジカルのg値（NMRの化学シフトに対応する）の溶媒効果の研究がヒントになったのである。

### 3 大学紛争、世界で初めて大学に導入された超伝導NMR装置

博士課程修了ならば学位論文を提出できるところだが前述のように1年待たねばならなかった。翌年、東大医学部で始まった学園紛争が京大に飛び火した。しかもレンガ建屋の石油化学教室に火炎ビンが投げ込まれ、これが紛争の火元となったのだ。これが瞬く間に全学に拡大した。学生たちは講座制の解体、学者の専門バカ呼ばわり、大学改革、講義のボイコット、などを叫び奥田総長を吊り上げた。この学生紛争に続いて臨時職員闘争がまたしても石油化学科から勃発した。福井先生は工学部長を務められ随分苦労された。福井先生のお宅の塀は落書きで汚された。時計台も占拠された。多くの研究がストップしたが、我々のNMR装置は4号館の地下階に間借りしていたので、ここにこもって実験を続けた。ある日午前4時ごろに測定を終えて館外に出ると本部キャンパスの周りはバリケードで閉鎖されていた。私はこれを超えた時警官に捕まって尋問された。職員証を見せて事情を説明して程な

く解放された。私は学生にこういう時にも研究を中断してはならないと述べた。大学の閉鎖性、論文には教授の名前が自動的にトップにくる、など私にも批判的意見は持っていた。学生の主張する意見のなかに尤もなものもあったが私は中立の立場を貫いた。家では学位論文を書き続けタイプライターを打ち続けた。400ページにもなっていた。課程博士から1年後に提出し1970年1月に学位を取得した。論文名は「Studies on the Electronic Structures of Molecules and the Intermolecular Interactions by Nuclear Magnetic Resonance」であった。

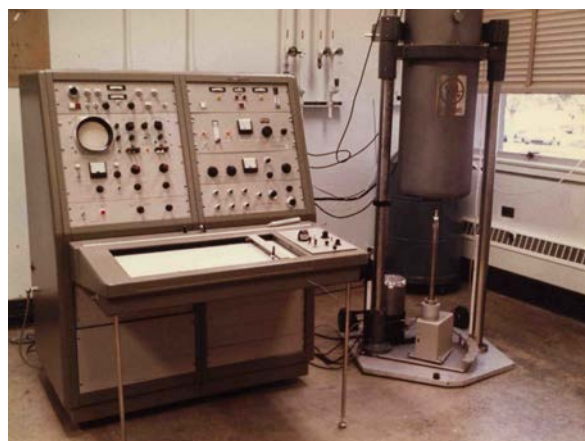


写真 5. 本文に出てくる超伝導 220MHz NMR 装置

石油化学科新館が9号館として竣工間近に超伝導NMR装置の設置部屋を用意するために、新館地階の2、3号室の改造を行わなければならなくなった。コンクリート打ちが終わっていたのを数メートル掘り下げ地盤固めの工事、恒温恒湿度設備の設置、液体窒素供給配管、液体ヘリウムのクエンチに備えた排気装置、などが緊急に行われた。1970年には新館への移転が行われ、HR220 NMRが設置された。設置に当たってはVarian社から超伝導マグネット、細くて背の高いデュアー、分光器などが届き、一人の技術者が米国Varian社から来た。裸の超伝導マグネットを見るのは勿論初めてで、これをクレーンで吊り上げデュアー内に吊り下げて収めるのである。今では設置現場で組み立てることはない。大部の英文マニュアルを渡され明日までに読んでこいという。その理由は翌日に分かった。まず液体窒素でマグネットを予備的に冷却し、その外側にさらに液体窒素を充填する。次に苦労して入手した液体ヘリウムを充填するのだ。これを私達にやらせた。技術者は見ただけだった。つぎは外部電流を供給するのだが、ゆっくりと25アンペアまで上げてゆくのだ。下手をするとクエンチが起こり液体ヘリウムは一挙にヘリウムガスになってしまう。最大電流になってからが大変だった。外部電流を切って永久電流にするのだ

がこの切離しの時にトータルクエンチが起こると約30Lの液体ヘリウムが一挙にガス化してしまうのだ。永久磁石にする前に均一磁場を作らねばならない。小さな幾つかの調整磁場コイルに電流を流してdish型の磁場を微調整しながら作るのだ。何時間もかかるしんどい作業だ。これが終わるといよいよ外部電流を切って永久電流の状態にするのだ。ここでトータルクエンチが起こると全て最初からやり直さねばならない。丸半日以上はかかった。このトータルクエンチを何度経験したことか!!この作業を我々にやらせた意味が後に分かったのである。しかも液体窒素は毎日、液体ヘリウムは1~2日おきに充填しなければならない。液体ヘリウムも購入費用は特別設備の維持費ではまかないきれない。膨大な借金を背負うことになった。正月休みには技官の人には休みをとってもらい私自身が液体ヘリウムと液体窒素を補給した。ついでにNMRスペクトルの測定も行った。家では母子家庭の状態であった。アメリカから横浜荷揚げ、開通後の東名、名神をへて京都に届くはずの液体ヘリウムが東名での事故で大幅に遅れるという事態にも遭遇した。間に合わなければクエンチしてしまう。泣く泣く永久電流を外部電流に切り換え、電流をゼロに落とすということも経験した。また、何の理由か分からないが朝HR220 NMR室にゆくと磁場が無くなっていたことが何度かあった。夜中にクエンチしたのだろう。私は測定室前室にあるドライバーをしっかりと握ってマグネットに近づけて異常がないかを確かめるのが日課となった。この超伝導NMR装置の京大への導入は新聞紙上デカデカと報じられた。米澤先生、武上先生の写真と一緒に。私は密かにこの220MHzプロトンNMRを蛋白質の研究に利用することを考えていた。多くの大学や企業の研究者が利用させて欲しいと要請してきた。製薬会社や企業のポリマー研究者が多かった。塩野義製薬研究所、三井石油化学からは格別の利用負担料を頂き維持費の一部として利用させてもらった。大学研究者には共同研究を条件にしないで利用してもらった。何を測定したいかが私の関心の的であった。液体ヘリウムの調達で8千万円の借金が米澤研究室に負担としてのしかかった。私は米澤先生の退官までにゼロにすると約束した。事実これを果たした。私のNMRグループの学生諸君は昼夜を問わず測定に没頭した。そのうちヘリウムガス液化装置を導入して自前で液体ヘリウムを製造することになり、Varian社に相談すると不賛成の返事がきた。アメリカでは液体ヘリウムの価格が日本の十分の一でありガスを回収しないのであった。不賛成の理由はガス回収液化装置(住友重機製)を設置してすぐにわかった。回収ヘリウムガスをバルーンに貯め液化装置(コンプレッサー)が稼働すると超伝導マグネットの液体ヘリウムがクエンチしてしまったのだ。コンプレッサーの脈動が回収パイプを通して超伝導磁石内の液体ヘ

リウムに伝わってクエンチしたものと想定し、回収パイプの中間にチャコールを詰め込んだ自動車用マフラーを繋いだところ、クエンチは起こらず、ついにヘリウムの自動回収液化システムが完成した。前例のない快挙であった。この間、東大や名古屋大学からHR220 NMRの導入を計画されていた先生方が我々のところに見学に来られたが、余りにも大変な装置であることを知り、機種を100MHz NMRに変更された。本邦2台目の超伝導NMR装置が東大に導入されたのはドイツBruker社のパルス・フーリエ変換型270MHzで7年後のことであった。アメリカではHR220は京大の後にNIH、ベル研究所、イリノイ大学など次々に導入された。ヘリウム回収液化装置をつけたものは京大の装置のみであった。私は間髪をおかずHR220をパルス・フーリエ変換装置に改良し(東レ科学財団からの助成金を使って)、更に後に最新の300MHzパルス・フーリエ変換NMRも導入した。私は以上述べた努力を研究成果で回収すべく常磁性NMRの研究を大きな分子に広げた。鉄ポルフィリンを活性中心に含むヘム蛋白質類である。多くのアミノ酸残基に囲まれて発揮するヘム(鉄ポルフィリン)の多種多様な機能を蛋白質の構造だけでなく電子レベルで解明しようと決意したのだった。ヘム酵素のうち、酸素添加ヘム酵素については医学部医化学教室の早石修教授の研究室に出向いて学んだ。早石先生は福井先生の旧制大阪高校の数年後輩で、福井先生から一声かけていただいていた。早石先生もノーベル賞候補者として世界中に名を知られていた。早石先生には後に(財)基礎化学研究所の理事になっていただいた。

#### 4 30才で助教授になり蛋白質の研究を始める

私はヘム蛋白質の研究に取り組み始めると同時に、炭化水素骨格が固定されたキヌクリジンなどのアザビシクロ系アミン類の常磁性コンタクトシフトを用いて電子スピン分布が $\sigma$ 結合の立体構造にどのように依存するのか、MO計算を併用して調べるテーマを学生に与えた。勿論HR220 NMRが威力を発揮した。C-13 NMRコンタクトシフトも測定し多くの化合物は合成した。アザアダマンタンだけはオランダの研究者から提供してもらった。窒素孤立電子対が $\sigma$ 結合を通してどのように非局在化しているのかが手に取るようにわかった。この研究は直ぐにJACSのフルペーパーとなった。同じ頃R. Hoffmann教授が「through-bond, through-space」の概念を拡張Hückel MOで展開していた。我々の研究はいわばその実験版とも言えよう。7-アザノルボルネン、7-アザベンゾノルボルナジエンなどを合成し、これらにおいて窒素孤立電子対の配向性を常磁性シフトで決めるとともに、日本分光株式会社が試作しつつあった光電子分光器を使わせてもらってこれらの化合物のイオン化ポテンシャルを測り、HOMO-LUMO相互作用

で説明できることを示した。この研究も JACS のフルペーパーとなった。これらの成果は福井謙一先生の著書「電子軌道と化学反応」に引用されている。福井先生には 2 講座に移られてから私の研究についてお話をしたことはなかったが、私たちの論文は良く見られていたようである。これまでにコンタクトシフトに関する MO 計算は非制限 SCF (UHF) 法を用いて電子スピン密度を計算していた。ラジカルあるいは常磁性 Ni(acac)<sub>2</sub> から相互作用している分子への電子スピン移動と分子内分布には、結合電子対のスピン分極と電子スピンの非局在化の二つの機構がある。前者は + ( $\alpha$  スピン)、− ( $\beta$  スピン) と交互に伝達する。一方後者は相互作用分子の HOMO を使って非局在化し、全ての原子上に正のスピン密度が分布するのである。これは制限 SCF (RHF) 法で計算できる。理論家の中辻氏に協力していただいて両機構の割合を定量的に算出した。この実験と理論計算の研究は JACS のフルペーパーとして発表された。

私はこれらの常磁性 NMR の研究で日本化学会から若手研究者に与えられる進歩賞を受賞した。その授賞式でハプニングが起こった。私は米澤先生とおしゃべりしていて授与との時刻を忘れていたのだ。日本化学会には殆ど出席されない福井先生と講師の清水先生が授与式に出席されていた。清水先生が私の代理として賞状を受け取ってくださった。福井先生にこっぴどく叱られたことは言うまでもない。

## 5 分子工学専攻の設立と福井先生

1978 年頃、福井先生は石油化学教室から物理化学系講座を分離し大学院のみの分子工学専攻 (Department of Molecular Engineering) の創設を構想された。実は福井先生は 32 歳の若さで燃料化学科の教授になられた頃、既に分子工学科の案を作っておられたのだ。その原案を米澤先生に見せてもらった。分子科学系講座に加えて電子工学系講座も入っていたのには驚いた。燃料化学科には他の化学系学科にはない電気工学実験が必須科目となっていた。先生には分子エレクトロニックスの時代を見据えておられたのだろう。そこで米澤先生を中心として分子工学専攻の案作りが始まった。私を含めて物理化学系講座の助教授も加わって新たな原案作りが始まった。分子設計学、分子エネルギー工学、分子触媒工学、分子物性工学、協力講座として工業化学科から 1 講座と化学研究所か 2 講座ずつ出してもらう案だった。福井先生はこの案を携えて文部省に交渉に行かれた。その際、書類持ちとして最も若い助教授の私に同行するようと言われた。先輩の助教授を差し置いて何故私に依頼されたのかは分からない。文部省での交渉の場に同席した。話し合いは不調に終わった。京大に分子工学専攻を設置すれば全国の国立

大学全部に設置しなければならないと、屈辱的な返答であった。あの穏便な福井先生の怒りは想像に絶するものであった。私は交渉相手がノーベル賞候補にもなっておられる福井先生のことを知らないのだと推測した。私はあくまで抱持の身なので発言を控えた。ただし一言私は付け加えた。分子工学と名づけられた学科及び大学院専攻は世界中どこにもないと。これは米澤先生に頼まれて東京の先進国の大使館の科学官に問い合わせ確認していたのである (今ならインターネットで直ぐ調べられるが)。帰り際福井先生は怒りが収まらないようであった。

私は一企業家である義父から、文部省で催される月一回の日本文化会議で文部事務次官を辞されておられた木田 宏氏 (京大法卒) と隣席している。現役次官でないのに誰に頼めば良いのか聞いてみよう、と聞かされた。そのキーマンの名前や地位がわかり米澤先生に伝えた。米澤先生が動いた。福井先生がノーベル賞の有力候補であることを文部省は初めて知ったのである。果たして 1981 年度のノーベル化学賞は福井先生と R. Hoffmann 教授が受賞されたことは誰もが周知のことだ。文部省も準備を整えていた。これが直接の契機となって分子工学専攻が認められたのである。1983 年 4 月のことである。教授人事は福井、米澤研究室の拡張を避けて東大生産研から本多健一先生、イギリスのノッティンガム大から理論化学者の George G. Hall 先生を迎えた。Hall 先生を戦後初の国立大学の正式の教授として任用するために議員立法が適用された。

## 6 (財)基礎化学研究所から京大福井謙一記念研究センターへ

日本で初のノーベル化学賞を受賞された福井先生のために財界からの寄付金で財団法人基礎化学研究所が設立された。1985 年のことである。毎年公開講演会が催された。数学、物理学、基礎医学、生物学、合成化学など幅広い分野の著名な研究者ばかりでなく私までもが講演者に連なった。私は日本化学会賞受賞講演とほぼ同じ演題「ヘム蛋白質の構造と機能に関する分子工学的研究」で種々のヘム蛋白質の構造・機能解析、人工ヘム蛋白質の分子進化的設計などを一般的聴衆者向けに易しく話した。講演会後の懇親会で福井先生から昔君から NMR を導入して欲しいと頼まれ、それがここまで発展して良かったね、と始めて褒めてくださった。私はこの公開講演会には他の行事と重ならない限り出席した。懇親会はまるで福井研究室の同窓会のようであった。基礎化学研究所の運営方針には私を含めて批判的な人もかなりいた。福井先生が 79 歳の若さでお亡くなり、また、財政的に困難な状況になってきたので研究所を京大に寄付して存続させようと理事会で決まった。私も理事の一員となっていた。西島元総長

に説得され私が文部省と交渉することになった。文部省は当時国立大学の附置研究所の統廃合を進めていたので、この方針に逆行すると言って難色を示した。私は京大全部局から成る新しい組織、運営方針を示して助教授2名を要求した。何回もの交渉の末、全部局から助手1名を差し出すなら助教授1名を新たに付けると言って譲らなかった。結局私の講座の助手席を差し出さざるを得なかった。当時私の講座の助手に阪大蛋白質研究所の助教授に応募してもらっており幸いにも採用された。綱渡りであった。研究所は新たに京大附置福井謙一記念研究センターとして発足し、初代センター長には私が選ばれた。助教授は全国公募して全部局から選ばれたアドバイザーから成る選考委員会で決定された。私はセンターを京大内外に開かれ全世界から優れた若手をポストクとして受け入れるようにした。異分野交流もできるように制度をつくった。ポストクにも競争的外部研究資金を取るよう促した。

現在、センターにはアメリカ・エモリー大学名誉教授諸熊先生がシニアフェローとして多くの外国人ポストクとともに巨大分子酵素蛋白質の触媒機能の量子化学的解析の研究を活発に行っておられる。

おわりに

私は結局福井先生から直接研究指導を受けていないが、間接的には大きな影響を受けていると思っている。分子工学専攻の教授となって以来、NMR以外に多種多様の物理化学的手法に加えて分子生物学、遺伝子工学手法を取り入れて生命現象と言う究極の複雑系でもシンプルな真理が隠されていると言う信念を持ってヘム蛋白質の研究を幅広く続けてきたのは福井先生の影響かもしれない。

## 5. Fourier Analysis of NMR Data at the Saskatchewan Structural Science Centre (SSSH) in Canada

Shigeru Arimoto

In connection with the Fourier integral representation of the  $\alpha$  term appearing in the Fukui conjecture, the author of this section (SA) has been interested in Fourier analysis. At SSSH (nicknamed Church of NMR) in Canada, the author conducted a computational research of Fourier frequency analysis of NMR signals and of their visualization and sonification. This experience helped him a great deal in the 'Research and Educational Program Linking Science with Visual-audible Art' in the Fukui Project. The details of this program and of the accompanying software system

developed in Canada and called 'Rosetta' shall be published elsewhere.

## 6. Biomedical Applications of Single-Chirality-Enriched Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes

Tatsuya Murakami

Single-walled carbon nanotubes (SWNTs) are graphene sheets rolled up into cylinders, and based on the direction of the roll up, i.e., chirality index ( $n,m$ ), they are divided into two main classes, metallic and semiconducting ones (m- and s-SWNTs). From a biomedical point of view, s-SWNTs are particularly important because of their relatively efficient absorption of near-infrared (NIR) light, which is derived from  $S_{11}$  and  $S_{22}$  van Hove transitions. As the absorbed energy from NIR photon is efficiently converted to heat by SWNTs, many researchers have observed photothermal ablation of cancer cells by SWNTs.<sup>1-4</sup> On the other hand, we reported that s-SWNTs, which were enriched from SWNTs by a gel chromatography, were capable of generating reactive oxygen species (ROS) as well as heat under NIR illumination.<sup>5</sup> This observation indicates that the chirality enrichment of s-SWNTs is a very useful way to clarify the function of s-SWNTs as NIR-responsive nanomaterials. This short review summarizes recent findings of how chirality enrichment of SWNTs is performed and how the chirality-enriched s-SWNTs are utilized *in vitro* and *in vivo*.

Separation into m- and s-SWNTs was first reported by Collins et al. in 2001.<sup>6</sup> They performed electrical breakdown of multi-walled carbon nanotubes, resulting in the loss of individual carbon shell from the nanotubes to yield SWNTs. After this report, instrumental platforms<sup>7, 8</sup> and selective surface modification processes<sup>9-11</sup> for the separation have been developed. In terms of purity, yield, and throughput, however, these procedures were insufficient. In this context, a pioneering work using agarose gel was reported by Kataura and colleagues.<sup>12</sup> When SWNTs were dispersed in an aqueous sodium dodecyl sulfate (SDS) solution by sonication and electrophoresed in an agarose gel, only m-SWNTs were mobile, and then m- and s-SWNTs were easily obtained. The principal of this procedure is thought to be difference in affinity of SDS between m- and s-SWNTs.<sup>13</sup> In particular, m-SWNTs are wrapped by SDS at a higher density than s-SWNTs, which makes the affinity of m-SWNTs to agarose gel weaker. They have further advanced this procedure for easier and more efficient separation of m- and s-SWNTs.<sup>14, 15</sup>

Procedures for single ( $n,m$ ) sorting of s-SWNTs have also

been reported by several groups. Ghosh et al. succeeded in sorting of ten different  $(n,m)$  species by using nonlinear density-gradient ultracentrifugation.<sup>16</sup> Liu et al. developed sophisticated gel chromatography procedures based on the findings that the adsorbability of each  $(n,m)$  species to a Sephacryl S-200 gel is dependent on the tube diameter<sup>17</sup> and also controllable by varying temperature of the gel.<sup>18</sup> More recently, aqueous two-phase extraction for  $(n,m)$  sorting was reported by Fagan et al.<sup>19</sup> They used aqueous mixtures of polyethylene glycol and dextran, which had the nature of spontaneous decomposition into two phases. In this aqueous mixtures, each  $(n,m)$  species showed a different partition profile upon addition of SDS, sodium deoxycholate, or sodium cholate at various concentrations. The advantages of this method are rapid sorting (a few minutes), no requirement of expensive capital equipment, and amenability to greater mass throughput.

To date, there have been three reports describing biomedical applications of single- or double-chirality-enriched s-SWNTs. Dai and colleagues utilized the second NIR photoluminescence of (7,6), (6,5), and (12,1)/(11,3) SWNTs for biological imaging. The second NIR photoluminescence is favorable for deep tissue imaging due to the low indigenous tissue autofluorescence and the much reduced photon scattering. By utilizing NIR fluorescence enhancement for (7,6) SWNTs on plasmonic gold substrates, tracking cellular internalization of the single tube became possible.<sup>20</sup> Blood vessels in xenograft tumor in mice were visualized after intravenous administration of (12,1)/(11,3) SWNTs.<sup>21</sup> (6,5) SWNTs were capable of simultaneous tumor imaging and photothermal therapy in mice.<sup>1</sup> In this way, single-chirality enrichment of s-SWNTs can significantly increase the biomedical utilities of SWNTs. This also leads to reduction of s-SWNTs applied to biological systems, which means decrease in any potential adverse effects of s-SWNTs.

Finally, the possibility of single-chirality-enriched s-SWNTs as photodynamic agents is discussed based on the recent photochemical studies of SWNTs. The photodynamic activity of photosensitizers is based on photooxidative reactions, which involve activation to a short-lived excited singlet state, intersystem crossing to a long-lived triplet state, and energy/electron transfer to the triplet ground state of  $O_2$ . While the excited triplet state of s-SWNTs has been characterized theoretically since 2005,<sup>22</sup> its experimental elucidation was reported in 2011 for the first time by femtosecond-to-microsecond time domain pump-probe transient absorption spectroscopy.<sup>23</sup> In this study, (6,5) SWNTs exhibited rapid  $S_1$ -to- $T_1$  intersystem crossing ( $\tau \approx 20$  ps;  $\phi \approx 3$ –5%) and a substantial triplet excited state lifetime ( $\tau$

$\approx 15$   $\mu$ s). Then, a similar observation for (6,5) SWNTs ( $\tau = 30 \pm 10$  ps;  $\phi = 5 \pm 2\%$ ) was made by the other group.<sup>24</sup>  $^1E_{11}$  energy of (6,5) SWNTs is 975 nm (1.27 eV),<sup>25</sup> and  $^3E_{11}$  state is theoretically indicated to lie  $\sim 0.03$  eV below the  $^1E_{11}$  state.<sup>22</sup> Thus,  $^3E_{11}$  energy of (6,5) SWNTs can be calculated to be 1000 nm (1.24 eV), which is sufficiently higher than the energy required for  $^1O_2$  generation (1274 nm, 0.97 eV).<sup>26</sup>  $^1O_2$  generation by SWNTs has been observed under UV<sup>27</sup> or visible light irradiation.<sup>28</sup> These photochemical studies of s-SWNTs support our observation that NIR light (808 nm) was sufficient to generate  $^1O_2$  with s-SWNTs. Under this 808-nm illumination, (9,8) SWNTs ( $\lambda_{22}$ , 809 nm) may be responsible for its generation. Our success relied on enrichment of individually isolated s-SWNTs because s-SWNTs would be quenched *via* aggregation and energy transfer to nearby m-SWNTs. It will be interesting to compare the photodynamic effect of each single-chirality-enriched s-SWNTs.

In summary, single-chirality enrichment of s-SWNTs is a rapidly emerging technology, which has enabled their detailed photochemical evaluation. The NIR responsiveness of s-SWNTs *via* the van Hove transitions, such as luminescence, and heat and ROS generation, is certainly valuable in the field of biology and medicine, and single-chirality enrichment of s-SWNTs will further advance their theranostic abilities in near future.

## References

- 1) Antaris, A. L.; Robinson, J. T.; Yaghi, O. K.; Hong, G.; Diao, S.; Luong, R.; Dai, H., Ultra-Low Doses of Chirality Sorted (6,5) Carbon Nanotubes for Simultaneous Tumor Imaging and Photothermal Therapy. *ACS Nano* **2013**, *7*, 3644–3652.
- 2) Burke, A.; Ding, X.; Singh, R.; Kraft, R. A.; Levi-Polyachenko, N.; Rylander, M. N.; Szot, C.; Buchanan, C.; Whitney, J.; Fisher, J.; Hatcher, H. C.; D'Agostino, J., R.; Kock, N. D.; Ajayan, P. M.; Carroll, D. L.; Akman, S.; Torti, F. M.; Torti, S. V., Long-Term Survival Following a Single Treatment of Kidney Tumors with Multiwalled Carbon Nanotubes and Near-Infrared Radiation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2009**, *106*, 12897–12902.
- 3) Hashida, Y.; Tanaka, H.; Zhou, S.; Kawakami, S.; Yamashita, F.; Murakami, T.; Umeyama, T.; Imahori, H.; Hashida, M., Photothermal Ablation of Tumor Cells Using a Single-Walled Carbon Nanotube-Peptide Composite. *J. Controlled Release* **2014**, *173*, 59–66.
- 4) Kam, N. W. S.; O'Connell, M.; Wisdom, J. A.; Dai, H., Carbon Nanotubes as Multifunctional Biological Transporters and Near-Infrared Agents for Selective Cancer Cell Destruction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2005**, *102*, 11600–11605.
- 5) Murakami, T.; Nakatsuji, H.; Inada, M.; Matoba, Y.; Umeyama, T.; Tsujimoto, M.; Isoda, S.; Hashida, M.; Imahori, H., Photodynamic and

- Photothermal Effects of Semiconducting and Metallic-Enriched Single-Walled Carbon Nanotubes. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 17862–17865.
- 6) Collins, H. A.; Khurana, M.; Moriyama, E. H.; Mariampillai, A.; Dahlstedt, E.; Balaz, M.; Kuimova, M. K.; Drobizhev, M.; Yang, V. X. D.; Phillips, D.; Rebane, A.; Wilson, B. C.; Anderson, H. L., Blood-Vessel Closure Using Photosensitizers Engineered for Two-Photon Excitation. *Nature Photonics* **2008**, *2*, 420–424.
  - 7) Krupke, R.; Hennrich, F.; Löhneysen, H. v.; Kappes, M. M., Separation of Metallic from Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes. *Science* **2003**, *301*, 344–347.
  - 8) Arnold, M. S.; Green, A. A.; Hulvat, J. F.; Stupp, S. I.; Hersam, M. C., Sorting Carbon Nanotubes by Electronic Structure Using Density Differentiation. *Nat. Nanotechnol.* **2006**, *1*, 60–65.
  - 9) LeMieux, M. C.; Roberts, M.; Barman, S.; Jin, Y. W.; Kim, J. M.; Bao, Z., Self-Sorted, Aligned Nanotube Networks for Thin-Film Transistors. *Science* **2008**, *321*, 101–104.
  - 10) Li, H.; Zhou, B.; Lin, Y.; Gu, L.; Wang, W.; Fernando, K. A. S.; Kumar, S.; Allard, L. F.; Sun, Y.-P., Selective Interactions of Porphyrins with Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 1014–1015.
  - 11) Zheng, M.; Jagota, A.; Semke, E. D.; Diner, B. A.; Mclean, R. S.; Lustig, S. R.; Richardson, R. E.; Tassi, N. G., DNA-Assisted Dispersion and Separation of Carbon Nanotubes. *Nat. Mater.* **2003**, *2*, 338–342.
  - 12) Tanaka, T.; Jin, H.; Miyata, Y.; Kataura, H., High-Yield Separation of Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotubes by Agarose Gel Electrophoresis. *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *1*, 114001.
  - 13) Tanaka, T.; Jin, H.; Miyata, Y.; Fujii, S.; Suga, H.; Naitoh, Y.; Minari, T.; Miyadera, T.; Tsukagoshi, K.; Kataura, H., Simple and Scalable Gel-Based Separation of Metallic and Semiconducting Carbon Nanotubes. *Nano Lett.* **2009**, *9*, 1497–1500.
  - 14) Tanaka, T.; Urabe, Y.; Nishide, D.; Kataura, H., Continuous Separation of Metallic and Semiconducting Carbon Nanotubes Using Agarose Gel. *Appl. Phys. Express* **2009**, *2*, 125002.
  - 15) Liu, H.; Feng, Y.; Tanaka, T.; Urabe, Y.; Kataura, H., Diameter-Selective Metal/Semiconductor Separation of Single-Wall Carbon Nanotubes by Agarose Gel. *J. Phys. Chem. C* **2010**, *114*, 9270–9276.
  - 16) Ghosh, S.; Bachilo, S. M.; Weisman, R. B., Advanced Sorting of Single-Walled Carbon Nanotubes by Nonlinear Density-Gradient Ultracentrifugation. *Nat. Nanotechnol.* **2010**, *5*, 443–450.
  - 17) Liu, H.; Nishide, D.; Tanaka, T.; Kataura, H., Large-Scale Single-Chirality Separation of Single-Wall Carbon Nanotubes by Simple Gel Chromatography. *Nat. Commun.* **2011**, *2*, 309.
  - 18) Liu, H.; Tanaka, T.; Urabe, Y.; Kataura, H., High-Efficiency Single-Chirality Separation of Carbon Nanotubes Using Temperature-Controlled Gel Chromatography. *Nano Lett.* **2013**, *13*, 1996–2003.
  - 19) Fagan, J. A.; Khripin, C. Y.; Silvera Batista, C. A.; Simpson, J. R.; Haroz, E. H.; Hight Walker, A. R.; Zheng, M., Isolation of Specific Small-Diameter Single-Wall Carbon Nanotube Species via Aqueous Two-Phase Extraction. *Adv Mater* **2014**, *26*, 2800–4.
  - 20) Hong, G.; Zu, J. Z.; Robinson, J. T.; Wang, H.; Zhang, B.; Dai, H., Three-Dimensional Imaging of Single Nanotube Molecule Endocytosis on Plasmonic Substrates. *Nat. Commun.* **2012**, *3*, 700.
  - 21) Diao, S.; Hong, G.; Robinson, J. T.; Jiao, L.; Antaris, A. L.; Wu, J. Z.; Choi, C. L.; Dai, H., Chirality Enriched (12,1) And (11,3) Single-Walled Carbon Nanotubes for Biological Imaging. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 16971–16974.
  - 22) Perebeinos, V.; Tersoff, J.; Avouris, P., Radiative Lifetime of Excitons in Carbon Nanotubes. *Nano Lett.* **2005**, *5*, 2495–2499.
  - 23) Park, J.; Deria, P.; Therien, M. J., Dynamics and Transient Absorption Spectral Signatures of the Single-Wall Carbon Nanotube Electronically Excited Triplet State. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 17156–17159.
  - 24) Stich, D.; Späth, F.; Kraus, H.; Sperlich, A.; Dyakonov, V.; Hertel, T., Triplet-Triplet Exciton Dynamics in Single-Walled Carbon Nanotubes. *Nature Photonics* **2014**, *8*, 139–144.
  - 25) Bachilo, S. M.; Strano, M. S.; Kittrell, C.; Hauge, R. H.; Smalley, R. E.; Weisman, R. B., Structure-Assigned Optical Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Science* **2002**, *298*, 2361–2366.
  - 26) Macdonald, I. J.; Dougherty, T. J., Basic Principles of Photodynamic Therapy. *J. Porphyrins Phthalocyanines* **2001**, *5*, 105–129.
  - 27) Chen, C.-Y.; Jafvert, C. T., Photoreactivity Of Carboxylated Single-Walled Carbon Nanotubes in Sunlight: Reactive Oxygen Species Production in Water. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44*, 6674–6679.
  - 28) Grandra, N.; Chiu, P. L.; Li, W.; Anderson, Y. R.; Mitra, S.; He, H.; Gao, R., Photosensitized Singlet Oxygen Production upon Two-Photon Excitation of Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Functionalized Analogues. *J. Phys. Chem. C* **2009**, *113*, 5182–5185.

# 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VI

有本 茂<sup>1\*</sup> 福田信幸<sup>2\*</sup> 廣木一<sup>3\*</sup> 森島 績<sup>4\*</sup> 村上達也<sup>5\*</sup> 成木勇夫<sup>6\*</sup>

斎藤恭司<sup>7\*</sup> 竹内 茂<sup>8\*</sup> Keith F. Taylor<sup>9\*</sup> 横谷正明<sup>10\*</sup> Peter Zizler<sup>11\*</sup>

## Mathematics and Chemistry

## Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VI

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA, Tatsuya MURAKAMI  
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI  
Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER

This is the sixth part of the series of articles that records and further develops essentials of the Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Symposium 2013 Tsuyama, whose main themes were symmetry, periodicity, and repetition. The symposium was held on April 5th and 6th in Tsuyama city, Okayama, Japan, in conjunction with the Fukui Project and was devoted to the memory of the late Professor Kenichi Fukui (1981 Nobel Prize) who initiated the project. The present series also provides challenging cross-disciplinary problems which are directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. Most of these problems are formulated using mathematical language of unique factorization domain (UFD) and related notions, which are not well known among chemists despite the importance of these notions in elucidating additivity and high-speed asymptotic phenomena in molecules having many repeating identical moieties.

*Key Words:* the Fukui conjecture, Memoir of Prof. K. Fukui, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

### 7. Answers to Questions of Professor Arimoto Related to Fukui Conjecture

Kyoji Saito

ABSTRACT. We show that certain ring of real functions on the interval  $[0, 2\pi]$  is a Dedekind domain, but not a unique factorization domain (UFD). The problem arose in a study of the Fukui Conjecture and the chemistry of carbon nanotubes.

### 1. INTRODUCTION

Professor Shigeru Arimoto, in a correspondence to the author dated at July 7, 2014, asked the following two questions, which arose in connection with the Fukui Conjecture and the chemistry of carbon nanotubes (see Arimoto 1), Arimoto-Spivakovsky-Amini-LeBlanc-Taylor-Yoshida-Yokotani-Yamabe 2)-4)).

In the present note, we first recall the questions of Arimoto, then give answers on a broad basis, independently of specific applications.

Let  $I = [0, 2\pi]$  be a real interval and let  $C^\omega(I)$  be the ring of real analytic functions on  $I$ , (see Def. I, Note 1 in Sect. 8 for details of  $C^\omega(I)$ ). Let us consider the subring:

$$C_0^\omega(I) := \{f \in C^\omega(I) : \exists g \in \mathbb{R}[x, y] \\ \text{s.t. } f(\theta) = g(\cos(\theta), \sin(\theta))\}.$$

---

原稿受付 平成 26 年 8 月 28 日

1\*, 3\*, 10\* 一般科目 2\* 一般科目非常勤講師

4\* 京都大学名誉教授

5\* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

6\* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

7\* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

8\* 岐阜大学 教育学部・数学科

9\* Dept. of Math. and Stat., Dalhousie University, Canada

11\* Dept. of Math., Phys., and Eng., Mount Royal University, Canada

---

The author expresses his gratitude to Professor Shigeru Arimoto for inviting him to contribute to the present volume.

**Question 1.** The ring  $C_0^\omega(I)$  may conjecturally not be a UFD. Is this true?

**Question 2.** Can one transplant the degree function on the ring  $\mathbb{R}[x, y]$  to the ring  $C_0^\omega(I)$ ?

## 2. AN ANSWER TO QUESTION 1

In the following two propositions, we explain the proof.

**Proposition 2.1.** *The correspondence  $g \mapsto f$  in the definition of  $C_0^\omega(I)$  induces an isomorphism*

$$\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1) \simeq C_0^\omega(I)$$

of the rings.

*Proof.* The correspondence  $g \mapsto f$  is obviously a surjective ring homomorphism. Clearly,  $x^2 + y^2 - 1$  is an element in the kernel of the homomorphism. Let  $P \in \mathbb{R}[x, y]$  be an arbitrary element in the kernel of the homomorphism. Regarding  $P$  as a polynomial in  $x$ , we apply the Euclid division algorithm (Division theorem). Namely, we divide  $P$  by  $x^2 + y^2 - 1$  as polynomials in  $x$  and obtain the quotient  $A$  and the residues  $B$  and  $C$  in the following expression

$$P(x, y) = A(x, y)(x^2 + y^2 - 1) + B(y)x + C(y) \quad (1)$$

for some  $A \in \mathbb{R}[x, y]$  and  $B, C \in \mathbb{R}[y]$ . Suppose  $B \neq 0$ . Then,  $B(\cos(\theta))$  cannot be identically zero (since a polynomial  $B$  can have only finite number of roots, but  $\cos(\theta)$  takes infinitely many values. On the other hand, applying to (1) the fact that  $P$  belongs to the kernel of the homomorphism, one gets a relation

$$B(\cos(\theta)) \cdot \sin(\theta) + C(\cos(\theta)) = 0.$$

This implies the relation

$$\sin(\theta) = -C(\cos(\theta)) / B(\cos(\theta))$$

for  $\theta$  in  $I$ , but it is clear (by analytic continuation) that the relation holds for all real value  $\theta \in \mathbb{R}$ . This is a contradiction, since the left hand side is a nonzero odd function and the right hand side is an even function. Thus  $B(y) = 0$ . Again, applying to (1) the fact that  $P$  belongs to the kernel, we obtain  $C(\cos(\theta)) = 0$ . This implies  $C = 0$  for the same reason as before. This completes a proof.  $\square$

As a consequence of the proposition, the ring  $C_0^\omega(I)$  is

isomorphic to a ring of an irreducible affine algebraic curve  $x^2 + y^2 - 1 = 0$  over the real number field. In general such ring of regular functions on an affine algebraic curve is well-known to be a Dedekind domain, where any ideal is uniquely decomposes into a product of prime ideals. It is also well-known that a Dedekind domain is a unique factorization domain if and only if its any (prime) ideal is generated by a single element 5), 6). If the coefficient field is the complex number field, then any prime ideal can be generated by a single element, that is, the unique factorization can be shown. For instance, over the complex number field, we have the decomposition

$$x^2 + y^2 = (x + \sqrt{-1}y)(x - \sqrt{-1}y).$$

Then, putting  $u = x + \sqrt{-1}y$ , we have

$$u^{-1} = x - \sqrt{-1}y$$

in the ring  $\mathbb{C}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ . Therefore, we have

$$\mathbb{C}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1) \simeq \mathbb{C}[u, u^{-1}]$$

which is easily seen to be a UFD (since any element is uniquely decomposed into a form  $c \prod \frac{(u - a_i)}{(u - b_j)}$  for suitable

$a_i, b_j, c \in \mathbb{C}$  such that there is no pair  $(i, j)$  with  $a_i = b_j$ ). However, over the real number field, not all prime are generated by single element so that the ring is not a unique factorization domain. Let us confirm this fact explicitly for the ring of the curve  $x^2 + y^2 - 1 = 0$ .

**Proposition 2.2.** *The ring  $\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$  is not a unique factorization domain. More precisely, the ideal  $(x, y - 1)$  is not singly generated.*

*Proof.* We first note that  $x$  is an irreducible element in

$\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ . Actually, in

$\mathbb{C}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ ,  $x$  decomposes as

$$(u + u^{-1}) / 2 = (u + \sqrt{-1})(u - \sqrt{-1}) / 2u$$

where  $u$  is a generator of the units of the ring. Therefore, if  $x$  decomposes into a product of non-unit elements in  $\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ , then each factor should be a unit multiple of  $u \pm \sqrt{-1}$ . However, this is impossible, since any unit of the ring is of the form  $cu^m$  for a non-zero constant  $c \in \mathbb{C}$  and an integer  $m \in \mathbb{Z}$ . But it may be clear that no element of the form  $cu^m(u \pm \sqrt{-1})$  can belong to the real coefficient subring

$\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ . That is,  $x$  is irreducible.

Suppose the ideal  $(x, y - 1)$  is generated by single element, then the generator should divide  $x$  and  $y - 1$ . So, irreducibility of  $x$  implies that  $x$  may be the generator, and that  $x$  divides  $y - 1$ . The last relation can be expressed in terms of the  $\mathbb{R}[x, y]$  that there exists polynomials  $A, B \in \mathbb{R}[x, y]$  such that

$$x \cdot A(x, y) + B(x, y)(x^2 + y^2 - 1) = y - 1. \quad (2)$$

Substituting  $x = 0$  in the relation, one obtains

$$B(0, y)(y^2 - 1) = y - 1$$

in  $\mathbb{R}[y]$ . This is impossible, since the left hand side can be either identically 0 or a nonzero polynomial in  $y$  of degree at least 2. Thus, the ideal  $(x, y - 1)$  is not generated by a single element.  $\square$

### 3. TWO ANSWERS TO QUESTION 2

Question 2 itself is generic and the answer depends on what is meant by “degree function”, and on what applications are in one’s mind. In the knowledge of the author, there is not an immediate transplant of the degree function from  $\mathbb{R}[x, y]$  to  $\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$  in a naive sense. Here, we have two possible suggestions of completely different nature. What I write below are general answers independent of any specified applications.

#### 1. Remember the following inclusion map

$$\begin{aligned} & \mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1) \\ & \subset \mathbb{C}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1) \simeq \mathbb{C}[u, u^{-1}] \end{aligned}$$

where the right hand side is the ring of Laurent polynomials in  $u := x + \sqrt{-1}y$ . Then, we can talk about whether some element is homogeneous of degree  $n \in \mathbb{Z}$  in the variable  $u$ , i.e. those elements of the form  $cu^n$  ( $c \in \mathbb{C}$ ) where  $n$  may be also negative. Then, for a non-negative integer  $d$ , define

$$\begin{aligned} \mathbb{C}[u, u^{-1}]_{\leq d} &:= \text{the linear combination of elements} \\ & \text{of degree } n \text{ s.t. } |n| \leq d \\ &= \mathbb{C}u^{-d} + \mathbb{C}u^{-d+1} + \cdots + \mathbb{C}u^{-1} \\ &+ \mathbb{C} + \mathbb{C}u + \cdots + \mathbb{C}u^{d-1} + \mathbb{C}u^d. \end{aligned}$$

Then, we further can consider the subspace

$$\begin{aligned} & (\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1))_{\leq d} \\ &:= (\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)) \cap \mathbb{C}[u, u^{-1}]_{\leq d}. \end{aligned}$$

So, using  $C_0^\omega(I) \simeq \mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$ , we can define the corresponding subspace

$$C_{0, \leq d}^\omega(I) \subset C_0^\omega(I).$$

This space seems to be close to the intended applications.

2. In algebraic geometry, degree of a line bundle means the first Chern class, which can be counted by the number of the zeros of its section. Therefore, over the affine algebraic curve  $x^2 + y^2 = 1$ , one can introduce the following degree function on  $\mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1)$  as follows:

$$\deg : \mathbb{R}[x, y] / (x^2 + y^2 - 1) \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0},$$

$$g \mapsto \dim_{\mathbb{R}} \mathbb{R}[x, y] / (g, x^2 + y^2 - 1).$$

But this number does not satisfy the usual properties, expected for the degree operator so that the author is not sure whether this approach has a meaning.

**Acknowledgement:** The author is partially supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (A) No. 25247004.

### REFERENCES

- 1) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. I, J. Math. Chem. **41** (2007) 231.
- 2) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. II, J. Math. Chem. **43** (2008) 658.
- 3) S. Arimoto, M. Spivakovsky, M. Amini, E. Yoshida, M. Yokotani, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. III, J. Math. Chem. **50** (2012) 2606-2622.
- 4) S. Arimoto, M. Amini, M. Spivakovsky, J. LeBlanc, K.F. Taylor, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and Matrix Art, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **54** (2012) 31-38.
- 5) N. Bourbaki, *Commutative Algebra* (Addison-Wesley, 1972).
- 6) K. Watanabe, S. Goto, *Commutative Ring Theory* (Nihon Hyouronsha, in Japanese, 2011).

KAVLI INSTITUTE FOR THE PHYSICS AND MATHEMATICS OF THE UNIVERSE (WPI), TODAI INSTITUTES FOR ADVANCED STUDY, THE UNIVERSITY OF TOKYO, 5-1-5 KASHIWA-NO-HA, KASHIWA CITY, CHIBA 277-8583, JAPAN

E-mail address: kyoji.saito@ipmu.jp

## 8. Challenging Cross-disciplinary Problems Related to the Fukui Conjecture and to the Chemistry of Carbon Nanotubes II

Shigeru Arimoto, Nobuyuki Fukuda, Keith F. Taylor,  
Masaaki Yokotani and Peter Zizler

This is the direct continuation of section 3 of the preceding part IV of this series of papers.

In this section, let  $\mathbb{Z}^+$  and  $\mathbb{R}$  denote respectively the set of all positive integers and real numbers. In what follows, we retain the notation given in the “Nanotube Series, parts I ~ III” published in the Journal of Mathematical Chemistry<sup>(1)–(3)</sup>. The reader is referred to refs. 4)–7) for cross-disciplinary investigations related to the Fukui Conjecture and to the chemistry of carbon nanotubes. The reader is also referred to refs. 8)–16) and references therein for the science and technology of carbon nanotubes.

**Definitions I.** Let  $a, b \in \mathbb{R}$  with  $a < b$  and let  $I = [a, b]$ . A real-valued function on a subset  $S \subset \mathbb{R}$  is called *real analytic* on  $S$  if it is the restriction to  $S$  of a function which is real analytic on some open set  $O \supset S$ .

$C^\omega(I)$ : the unique factorization domain (UFD) of all real analytic functions defined on  $I$ .

[**Note 1:** If  $a, b \in \mathbb{R}$  with  $a < b$  and if  $I = [a, b]$ , the unique factorization domain  $C^\omega(I)$  can be equivalently and more practically defined by the following:

$$C^\omega(I) = \{f|_I : \exists \varepsilon > 0 \text{ s.t. } f \text{ is real analytic} \\ \text{on an open interval } (a - \varepsilon, b + \varepsilon)\},$$

where  $f|_I$  denotes the restriction of the function  $f$  to the closed interval  $I$ .

It is essential that  $I$  is a compact interval for the ring  $C^\omega(I)$  to be a UFD. Notice that  $f \in C^\omega(I)$  implies that the set of zeroes of  $f$  on the compact interval  $I$  is, either the whole domain  $I$ , or a finite subset of  $I$ . In the latter case, observe that  $f$  is factored uniquely into irreducible linear terms as follows:

$$f(\theta) = u(\theta) \prod_{j=1}^n (\theta - \theta_j)^{m_j},$$

where  $u$  is a unit in  $C^\omega(I)$ , i.e.,  $u$  is an invertible function real analytic and with no zeroes on  $I$ ,  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  is the finite set of zeroes of  $f$  on  $I$ , and  $m_j \in \mathbb{Z}^+$ .

The idea of using the unique factorization domain  $C^\omega(I)$  for the proof of the Piecewise Monotone Lemma (PML) [cf. ref. 17) and references therein] dates back to the 1980s and this idea together with the concrete idea for proving the PML via UFDs is due to Professor Kyoji Saito, then the Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS), Kyoto University. All versions of the Asymptotic Linearity Theorems, from which the validity of the Fukui conjecture immediately follows, have needed one of several versions of PMLs. See refs. 17)–21) for details. One of the authors of this section (S.A.) expresses his sincere thanks to Professor Kyoji Saito, Professor Isao Naruki, and Professor Mark Spivakovsky, at RIMS in the 1980s, who provided him with PMLs.]

$C^\omega(I)[\lambda]$ : the polynomial ring (UFD) over  $C^\omega(I)$  in the indeterminate  $\lambda$ .

$\mathbb{R}[\lambda]$ : the polynomial ring (UFD) over  $\mathbb{R}$  in the indeterminate  $\lambda$ .

$\mathbb{R}[x_1, x_2]$ : the polynomial ring (UFD) over  $\mathbb{R}$  in the indeterminates  $x_1, x_2$ .

$C_0^\omega(I)$ : the subring of  $C^\omega(I)$  defined by

$$C_0^\omega(I) := \{f \in C^\omega(I) : \exists g \in \mathbb{R}[x_1, x_2]$$

$$\text{such that } \forall x \in I \quad f(x) = g(\cos x, \sin x)\}.$$

$C_0^\omega(I)[\lambda]$ : the polynomial ring over  $C_0^\omega(I)$  in the indeterminate  $\lambda$ .

The following is a pedagogical proposition, which is related to the proof of the Fukui conjecture. This proposition and analogous propositions have been introduced in a Challenging seminar for the third graders in Tsuyama National College of Technology (TNCT) in conjunction with a Fourier (frequency) analysis of various sound data. It is not difficult to show that any finite Fourier series function defined on  $I = [0, 2\pi]$ , which is expressed in terms of a linear combination of  $\cos n\theta$  and  $\sin n\theta$  functions, is an element of  $C_0^\omega(I)$ . In the Challenging seminar in TNCT, the derivative of a finite Fourier series function  $f$ , which is again a finite Fourier series function, was discussed and the monotonicity number of  $f$  and the number of zeroes of its derivative  $f'$  were explained by using a computer program called “Graphing Calculator” and by referring to the following proposition:

**Proposition A.** Let  $\phi \in \mathbb{R}[x_1, x_2]$  be a polynomial of two

indeterminates  $x_1$  and  $x_2$  with real coefficients. Let  $m \in \mathbb{Z}^+$ . Suppose that

$$\deg(\phi) \leq m.$$

Then, we have

$$(i) \text{ Card } \{\theta \in [0, 2\pi]: \phi(\cos\theta, \sin\theta) = 0\} \leq 4m.$$

Moreover, if  $u(\theta) := \phi(\cos\theta, \sin\theta)$  is an even function, we have

$$(ii) \text{ Card } \{\theta \in [0, 2\pi]: \phi(\cos\theta, \sin\theta) = 0\} \leq 2m.$$

*Proof.* Part (i): Let  $v_j$  be polynomials of indeterminate  $x$  with real coefficients such that

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^m v_j(x) y^j.$$

Then,  $\deg(\phi) \leq m$  implies that

$$\deg(v_j) \leq m - j$$

for all  $0 \leq j \leq m$ .

If  $m$  is an odd number and if  $m = 2N + 1$ , then we have

$$\phi(\cos\theta, \sin\theta) =$$

$$\sum_{j=0}^N v_{2j+1}(\cos\theta) \sin^{2j+1}\theta + \sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta$$

$$= (\sin\theta) \left( \sum_{j=0}^N v_{2j+1}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta \right) + \sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta$$

$$= (\sin\theta) \left( \sum_{j=0}^N v_{2j+1}(\cos\theta) (1 - \cos^2\theta)^j \right) +$$

$$\sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) (1 - \cos^2\theta)^j.$$

Similarly, if  $m$  is an even number and if  $m = 2N$ , then we have

$$\phi(\cos\theta, \sin\theta) =$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} v_{2j+1}(\cos\theta) \sin^{2j+1}\theta + \sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta$$

$$= (\sin\theta) \left( \sum_{j=0}^{N-1} v_{2j+1}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta \right) + \sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) \sin^{2j}\theta$$

$$= (\sin\theta) \left( \sum_{j=0}^N v_{2j+1}(\cos\theta) (1 - \cos^2\theta)^j \right) +$$

$$\sum_{j=0}^N v_{2j}(\cos\theta) (1 - \cos^2\theta)^j.$$

Thus, there are polynomials  $A$  and  $B$  with real coefficients such that for all  $\theta \in [0, 2\pi]$ ,

$$\phi(\cos\theta, \sin\theta) = (\sin\theta)A(\cos\theta) + B(\cos\theta),$$

and such that

$$\deg(A) \leq m - 1,$$

$$\deg(B) \leq m.$$

Note that

$$\begin{aligned} & \{\theta \in [0, 2\pi]: \phi(\cos\theta, \sin\theta) = 0\} \\ &= \{\theta \in [0, 2\pi]: (\sin\theta)A(\cos\theta) = -B(\cos\theta)\} \\ &\subset \{\theta \in [0, 2\pi]: (1 - \cos^2\theta)(A(\cos\theta))^2 = (B(\cos\theta))^2\}. \end{aligned}$$

Let

$$P(x) = (1 - x^2)A(x)^2 - B(x)^2$$

so that the degree of the polynomial  $P(x)$  is less than or equal to  $2m$ :

$$\deg(P) \leq 2m.$$

Since  $\theta \mapsto \cos\theta$  is a bijection on  $[0, \pi]$  and  $[\pi, 2\pi]$ , we see that

$$\text{Card } \{\theta \in [0, \pi]: P(x) = 0\} \leq 2m,$$

$$\text{Card } \{\theta \in [\pi, 2\pi]: P(x) = 0\} \leq 2m,$$

from which the inequality (i) follows.

Part (ii): Suppose that  $u(\theta) := \phi(\cos\theta, \sin\theta)$  is an even function with the domain being analytically extended to  $\mathbb{R}$ . Then, by Part (i), we see that there are polynomials  $A$  and  $B$  with real coefficients such that for all  $\theta \in [0, 2\pi]$ ,

$$u(\theta) - B(\cos\theta) = (\sin\theta)A(\cos\theta).$$

Notice that the left-hand side is an even function and that the right-hand side is an odd function. The function that is both even and odd is the constant zero function, i.e., the function that vanishes throughout the domain.

Therefore, we have

$$u(\theta) = B(\cos\theta).$$

By the argument in Part (i), we see that the conclusion of Part (ii) is true.  $\square$

In what follows we recall a Lemma called Piecewise Monotone Lemma<sup>(17)-(21)</sup>, which played an essential role for the proof of the Fukui conjecture. Before recalling this lemma, we need some preparation:

**Definitions II.** Let  $S_1$  and  $S_2$  be nonempty subsets of  $\mathbb{R}$ . A function  $f: S_1 \rightarrow S_2$  is said to be *nondecreasing* if  $x_1 \leq x_2$  implies  $f(x_1) \leq f(x_2)$  for all  $x_1, x_2 \in S_1$ . A function  $f: S_1 \rightarrow S_2$  is said to be *nonincreasing* if  $x_1 \leq x_2$  implies  $f(x_2) \leq f(x_1)$  for all  $x_1, x_2 \in S_1$ . A function  $f: S_1 \rightarrow S_2$  is said to be *monotone* if it is either nondecreasing or nonincreasing.

Let  $a, b \in \mathbb{R}$  with  $a < b$  and let  $I = [a, b]$ . A function  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$  is said to be *piecewise monotone* if there exists a finite partition

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b \quad (n \in \mathbb{Z}^+)$$

of the interval  $I$  such that the restriction  $f|_{[x_{i-1}, x_i]}$  is monotone for all  $i \in \{1, \dots, n\}$ . In this case,  $f$  is said to have  $n$ -partition of monotonicity.

If  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$  is piecewise monotone, let

$\text{Mo}(f) := \min \{n \in \mathbb{Z}^+ : f \text{ has } n\text{-partition of monotonicity}\}.$

The  $\text{Mo}(f)$  is called the *monotonicity number* of  $f$ .

If  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$  is not piecewise monotone, let  
 $\text{Mo}(f) = \infty$ .

$C(I)$ : the ring of all real-valued continuous functions defined on  $I$ .

$C(I)[\lambda]$ : the polynomial ring over  $C(I)$  in the indeterminate  $\lambda$ .

For each  $\theta \in I$ , let  $\text{Ev}_\theta: C(I)[\lambda] \rightarrow \mathbb{R}[\lambda]$  be the ring homomorphism defined by

$$\begin{aligned} \text{Ev}_\theta(c_0\lambda^n + c_1\lambda^{n-1} + \dots + c_n) \\ = c_0(\theta)\lambda^n + c_1(\theta)\lambda^{n-1} + \dots + c_n(\theta). \end{aligned}$$

Now, we are ready to recall the Piecewise Monotone Lemma (version 1)<sup>17)</sup>:

#### Lemma A (Piecewise Monotone Lemma (PML))

Let  $a, b \in \mathbb{R}$  with  $a < b$  and let  $I = [a, b]$ . Let  $p \in C^\omega(I)[\lambda]$  be a monic polynomial of degree  $q \in \mathbb{Z}^+$  given by

$$p = \lambda^q + c_1\lambda^{q-1} + \dots + c_q.$$

Suppose that for any  $\theta \in I$ , the polynomial

$$\text{Ev}_\theta(p) = \lambda^q + c_1(\theta)\lambda^{q-1} + \dots + c_q(\theta)$$

over the field  $\mathbb{R}$  has  $q$  real roots, which we denote by  $\lambda_1(\theta) \leq \lambda_2(\theta) \leq \dots \leq \lambda_q(\theta)$ . Then, all the  $\lambda_j$ 's are piecewise monotone, i.e.,

$$\text{Mo}(\lambda_j) < \infty$$

for all  $j \in \{1, \dots, q\}$ .

Our challenging cross-disciplinary problems are as follows:

**Problem I.** Let  $q$  and  $r$  be positive integers. In the above lemma, assume that  $I = [0, 2\pi]$ ,  $p \in C_0^\omega(I)[\lambda]$  and that

(a) there exist  $g_1, g_2, \dots, g_q \in \mathbb{R}[x_1, x_2]$  such that for all  $j \in \{1, \dots, q\}$ ,

$$\deg(g_j) \leq r,$$

$$c_j(\theta) = g_j(\cos\theta, \sin\theta) \quad \text{for all } \theta \in I,$$

(b)  $p$  is factored into first degree monic polynomials:

$$p = (\lambda - d_1)(\lambda - d_2) \dots (\lambda - d_q),$$

where  $d_1, \dots, d_q \in C^{\omega*}(I)$ .

Then, our problem is to get an estimate of  $\text{Mo}(d_j)$  of the form:

$$\text{For all } j \in \{1, \dots, q\} \quad \text{Mo}(d_j) \leq \mu(q, r),$$

where  $\mu$  is a constant function of positive integers  $q$  and  $r$ .

**Problem II.** Is it possible to streamline statement (a) in the above Problem I by introducing a 'degree function' or its

conceptual analogue to  $C_0^\omega(I)$ ?

**Problem III.** In the investigations of carbon nanotubes using the repeat space theory, several analytic formulas concerning energy band curves have been obtained. Is it possible to analyze the monotonicity number of these curves without depending on concrete analytic expressions?

**Problem IV.** The Fukui Project is international, interdisciplinary, and inter-generational. In connection to the inter-generational aspect of the project, we have been utilizing Matrix Art and Math Art as interfacing and heuristic tools for educational and cross-disciplinary communications. These tools have been mainly visual. Can we proceed further to involve music and other forms of audible art for the same purpose of enriching educational and cross-disciplinary communication?

#### References

- 1) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. I, J. Math. Chem. **41** (2007) 231.
- 2) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. II, J. Math. Chem. **43** (2008) 658.
- 3) S. Arimoto, M. Spivakovsky, M. Amini, E. Yoshida, M. Yokotani, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. III, J. Math. Chem. **50** (2012) 2606-2622.
- 4) S. Arimoto, M. Amini, M. Spivakovsky, J. LeBlanc, K.F. Taylor, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and Matrix Art, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **54** (2012) 31-38.
- 5) S. Arimoto, Normed repeat space and its super spaces: fundamental notions for the second generation Fukui project, J. Math. Chem. **46** (2009) 586-591.
- 6) S. Arimoto, Fundamental notions for the second generation Fukui project and a prototypal problem of the normed repeat space and its super spaces, J. Math. Chem. **49** (2011) 880-893.
- 7) S. Arimoto, Multidimensional Magic Mountains and Matrix Art for the Generalized Repeat Space Theory, J. Math. Chem. **50** (2012) 1210-1223.
- 8) S. Iijima, Nature **354** (1991) 56.
- 9) K. Tanaka, H. Ago, T. Yamabe, K. Okahara, and M. Okada, Int. J. Quantum Chem. **63** (1997) 637.
- 10) K. Okahara, K. Tanaka, H. Aoki, T. Sato, and T. Yamabe, Chem. Phys.

- Lett. **219** (1994) 462.
- 11) T. Yamabe, *Synthetic Metals* **70** (1995) 1511.
- 12) K. Tanaka, T. Yamabe and K. Fukui, *The Science and Technology of Carbon Nanotubes* (Elsevier, 1999).
- 13) R. Saito, G. Dresselhaus and M.S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, (Imperial College Press, London, 1998).
- 14) T. Murakami, K. Tsuchida, M. Hashida, H. Imahori, *Mol. Biosyst.* **6** (2010) 789.
- 15) T. Murakami, W. Wijagkanalan, M. Hashida, K. Tsuchida, *Nanomed. (Lond)* **5** (2010) 867.
- 16) T. Murakami, H. Nakatsuji, M. Inada, Y. Matoba, T. Umeyama, M. Tsujimoto, S. Isoda, M. Hashida, H. Imahori, Photodynamic and Photothermal Effects of Semiconducting and Metallic-Enriched Single-Walled Carbon Nanotubes. *J. Am. Chem. Soc.* **134** (2012) 17862–17865.
- 17) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. I, *J. Math. Chem.* **37** (2005) 75-91.
- 18) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. II, *J. Math. Chem.* **37** (2005) 171-189.
- 19) S. Arimoto, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. III, *J. Math. Chem.* **47** (2010) 856-870.
- 20) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. IV, *J. Math. Chem.* **48** (2010) 776-790.
- 21) S. Arimoto, M. Spivakovsky, E. Yoshida, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. V, *J. Math. Chem.* **49** (2011) 1700-1712.

# 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VII

有本 茂<sup>1\*</sup> 福田信幸<sup>2\*</sup> 廣木一<sup>3\*</sup> 森島 績<sup>4\*</sup> 村上達也<sup>5\*</sup> 成木勇夫<sup>6\*</sup>

斎藤恭司<sup>7\*</sup> 竹内 茂<sup>8\*</sup> Keith F. Taylor<sup>9\*</sup> 横谷正明<sup>10\*</sup> Peter Zizler<sup>11\*</sup>

## Mathematics and Chemistry

## Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VII

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA, Tatsuya MURAKAMI  
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI  
Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER

This is the seventh part of the series of articles that records and further develops essentials of the Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Symposium 2013 Tsuyama, whose main themes were symmetry, periodicity, and repetition. The symposium was held on April 5th and 6th in Tsuyama city, Okayama, Japan, in conjunction with the Fukui Project and was devoted to the memory of the late Professor Kenichi Fukui (1981 Nobel Prize) who initiated the project. The present series also provides challenging cross-disciplinary problems which are directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. Most of these problems are formulated using mathematical language of unique factorization domain (UFD) and related notions, which are not well known among chemists despite the importance of these notions in elucidating additivity and high-speed asymptotic phenomena in molecules having many repeating identical moieties.

**Key Words:** the Fukui conjecture, Memoir of Prof. K. Fukui, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

### 9. 複素多様体の局所環の UFD 性

成木勇夫

複素多様体  $\Omega$  の各点  $p \in \Omega$  に対して,  $p$  における局所環  $\mathcal{O}_p$  は,  $p$  を定義域の中に含む正則関数の間の,

次のような同値関係  $\sim_p$  の同値類全体のなす環として定義される:

$f \sim_p g \Leftrightarrow$  (その上で  $f$  と  $g$  が一致する  $p$  の近傍が存在する).

関数  $f$  の属する同値類は  $f$  の ( $p$  における) 芽 (germ) と呼ばれる. 関数の間の算法によって  $\mathcal{O}_p$  は自然な環構造を持ち, 写像  $f \mapsto f(p)$  は  $\mathcal{O}_p$  から体  $\mathbb{C}$  の上への準同型を導き, この準同型の核  $m_p$  は  $\mathcal{O}_p$  の最大イデアルとなる. 実際, 補集合  $U_p := \mathcal{O}_p - m_p$  は  $\mathcal{O}_p$  の単元 (units) 全体だからである.

この局所環の代数的性質については次の定理が知ら

---

原稿受付 平成 26 年 8 月 28 日

1\*, 3\*, 10\* 一般科目 2\* 一般科目非常勤講師

4\* 京都大学名誉教授

5\* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

6\* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

7\* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

8\* 岐阜大学 教育学部・数学科

9\* Dept. of Math. and Stat., Dalhousie University, Canada

11\* Dept. of Math., Phys., and Eng., Mount Royal University, Canada

れている:

$$C_r \times \{z' \mid |z'| \leq \rho\}$$

定理 I: 「局所環  $\mathcal{O}_p$  は UFD (一意分解整域) である。」

この定理は通常 UFD についての次の基本的定理を応用して証明される:

定理 A: 「整域  $R$  が UFD であるならば,  $R$  を係数環とする一変数多項式環  $R[X]$  はまた UFD となる。」

(この定理の証明などについては前年度の論説<sup>1)</sup> 参照.)

定理 I の証明に定理 A を応用できる状況に持ち込む道具として有名なワイヤストラスの予備定理 (Weierstrass Preparation Theorem) がある. この定理を直接述べると長くなるので次のような準備的な考察を行う:

まず  $f = f(z_1, z_2, \dots, z_n)$  は原点  $p = (0, 0, \dots, 0)$  の近傍で正則な関数であり

$$f(0, 0, \dots, 0) = 0$$

ではあるが, 一変数関数

$$\varphi(z_1) := f(z_1, 0, \dots, 0)$$

は  $z_1 = 0$  の近傍で恒等的に 0 ではないと仮定する. このとき, 一変数正則関数に対する零点孤立の定理により, 正数  $r$  を閉円板  $D_r := \{z_1 \mid |z_1| \leq r\}$  は  $\varphi$  の定義域に含まれ, また,  $D_r$  の上の  $\varphi(z_1)$  の零点は  $z_1 = 0$  のみであるように取ることが出来る. 従って円周  $C_r := \{z_1 \mid |z_1| = r\}$  上で絶対値  $|\phi(z_1)| = |f(z_1, 0, \dots, 0)|$  の最小値  $a (> 0)$  が存在し, さらに  $|f(z_1, z_2, \dots, z_n)|$  の連続性により, 正定数  $\rho$  を十分小さく選べば, 直積集合

$$D_r \times \{z' = (z_2, \dots, z_n) \mid |z'| \leq \rho\}$$

$$\left( \text{但し, } |z'| = \sqrt{\sum_{j=2}^n |z_j|^2} \right)$$

が  $f$  の定義域に含まれ, さらに, その部分集合

上での  $|f(z_1, z_2, \dots, z_n)|$  の値が常に  $a/2$  を下回ることがないように出来る.

このような状況の下で, 変数  $z_1$  を特別視して, これを表す文字を  $w$  に換え, 残りの変数の組  $z' = (z_2, \dots, z_n)$  はパラメーターと見る. すなわち関数  $f(z_1, z_2, \dots, z_n) = f(z, z')$  を, パラメーター  $z'$  に (正則に) 依存する, 変数  $w$  の一変数正則関数  $f(w, z')$  であると考えるのである.

ここでさらに  $f(w, z')$  の定義域が,  $\hat{r} (> r)$  を十分  $r$  に近く取って, 直積開集合

$$\hat{U} := \{(w, z') \mid |w| < \hat{r}, |z'| < \rho\}$$

を含んでいるようにすることが出来るので, この  $\hat{U}$  を  $f$  の新しい定義域であると考えことにしよう.

この新しい仮定の下で, 変数  $w$  が円周

$$C_r = \{w \mid |w| = r\}$$

に留る限り,  $|z'| < \rho$  を満たすすべてのパラメーター  $z'$  に対して不等式

$$|f(w, z')| \geq \frac{a}{2} (> 0)$$

が満たされる. 従って, 線積分

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{C_r} \frac{f_w(w, z')}{f(w, z')} dw \quad (\text{但し, } f_w = \frac{\partial f}{\partial w})$$

が定義され, これはパラメーター  $z'$  に依存する正則関数  $f(w, z')$  の円板  $D_r$  内にある零点の個数を表す. この積分値はパラメーター  $z'$  に正則に依存するが, 値は整数なので, 実整数となる. 結局,  $\phi(w) = f(w, 0)$  の零点  $w = 0$  の重複度  $m$  と一致する.

では,  $z'$  に依存する正則関数  $f(w, z')$  の円板  $D_r$  内の重複度も込めて数え上げた零点集合の基本対称式も適当な線積分を用いて表現できるであろうか?

答は肯定的である. 実際, 零点の  $j$  乗和は線積分

$$T_j := \frac{1}{2\pi i} \oint_{C_r} w^j \frac{f_w(w, z')}{f(w, z')} dw$$

によって計算され、また零点のベキ和

$$T_j \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

と零点の基本対称式

$$S_j \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

の間には、一般的な有理係数変換公式が存在する。例えば

$$\begin{cases} T_1 = S_1, & T_2 = S_1^2 - 2S_2, \\ T_3 = S_1^3 - 3S_1S_2 + 3S_3, \\ T_4 = S_1^4 - 4S_1^2S_2 + 2S_2^2 + 4S_1S_3 - 4S_4, \text{ etc.} \end{cases}$$

また反対に

$$\begin{cases} S_1 = T_1, & S_2 = \frac{1}{2}(T_1^2 - T_2), \\ S_3 = \frac{1}{6}(T_1^3 - 3T_1T_2 + 2T_3), \\ S_4 = \frac{1}{24}(T_1^4 - 6T_1^2T_2 + 3T_2^2 + 8T_1T_3 - 6T_4), \text{ etc.} \end{cases}$$

などとなる。(このような変換公式の一般化にはこれ以上は深入りしない)

パラメーター  $z'$  の正則関数としての基本対称式  $S_j$

を  $S_j(z')$  で表し

$$P(w, z') := w^m - S_1(z')w^{m-1} + \dots + (-1)^m S_m(z')$$

と置く。作り方から  $P(w, z')$  は直積開集合

$$U := \{(w, z') \mid |w| < r, |z'| < \rho\}$$

内で  $f(w, z')$  と (重複度を込めて) 同じ零点集合を持つ。

すなわち商

$$u(w, z') := f(w, z') / P(w, z')$$

は零点を持たない  $U$  上の正則関数となる。

ここで、今まさに証明されたことをまとめ直して見よう：

$C^n : (w, z_2, \dots, z_n)$  の原点  $(0, 0, \dots, 0)$  の近傍  $V$  で定義された正則関数

$$f(w, z_2, \dots, z_n)$$

が (他と区別されている) 座標  $w$  に関して、次の条件

「 $\varphi(w) := f(w, 0, \dots, 0)$  は  $w = 0$  の近傍で恒等的には 0 ではない」

が満たされているとき、関数  $f$  は  $w$  に関して正常であると言う。

また  $w$  以外の座標をまとめて

$$z' = (z_2, \dots, z_n)$$

と置き

$$(w, z_2, \dots, z_n) = (w, z')$$

$$f(w, z_2, \dots, z_n) = f(w, z')$$

などと略記する。

定理 W: 「上の用語、記号のもとで、正則関数  $f(w, z')$

は  $w$  に関して正常であると仮定する。また、 $w = 0$  は  $\varphi(w)$  の零点であると仮定し、この零点の重複度を  $m$  とする。このとき  $f$  の定義域  $V$  の中に直積型近傍

$$U = \{(w, z') \mid |w| < r, |z'| < \rho\}$$

$$(r > 0, \rho > 0, |z'| \leq \sqrt{\sum_{j=2}^n |z_j|^2})$$

が存在して、関数  $f$  は  $U$  上で

$$f(w, z') = u(w, z')P(w, z') \quad ((w, z') \in U)$$

と分解する。ここで  $u(w, z')$  は値 0 を取らない関数、

$P(w, z')$  は  $m$  次のワイヤストラス多項式である。すなわち

$$P(w, z') = w^m + \sum_{j=1}^m c_j(z')w^{m-j}$$

と書ける。但し、 $c_j(z')$  ( $1 \leq j \leq m$ ) は  $\{z' \mid |z'| < \rho\}$

上の正則関数であって、原点  $z' = 0$  で値 0 を取る。

もちろん、ここで  $P$  の係数は

$$c_j(z) = (-1)^j S_j(z)$$

と置いて得られるものである。」

さて、いよいよ定理 W が、どのようにして定理 I の証明に定理 A を応用することを可能にするか、について解説して見よう。

まず、関数の正常性が局所的なものであることに注意しよう。一点  $p \in \Omega$  での局所座標系において一つの変数を他の変数から区別し、この区別のもとで正則関

数の正常性が定義されるが、この概念は同値関係 $\sim_p$ を通行する。すなわち同値な二つのものの一方が正常であれば他方も正常である。従って局所環 $\mathcal{O}_p$ の元の正常であるかないかが既に自然に定義されている。

上のように、区別を付けられた局所座標系を記号

$$(w, z') \quad (\text{但し, } z' = (z_2, \dots, z_n))$$

で表すとき、この区別にもとづくワイヤストラス多項式概念も次のように局所化される：

まず $\mathbb{C}^{n-1} : (z_2, \dots, z_n)$ の原点 $z_2 = \dots = z_n = 0$ を記号 $p'$ で表わし、 $p'$ における $\mathbb{C}^{n-1}$ の局所環を $\mathcal{O}_{p'}$ で、またその最大イデアルを $m_{p'}$ で表すならば、射影

$$(w, z') \rightarrow z'$$

による関数の引き戻し作用によって、環の埋め込み

$$\mathcal{O}_{p'} \rightarrow \mathcal{O}_p$$

が引き起こされる。これによって $\mathcal{O}_{p'}$ を $\mathcal{O}_p$ の部分環と見なすならば

$$m_{p'} = m_p \cap \mathcal{O}_{p'}$$

と自然な関係も成り立っている。

多項式環 $\mathcal{O}_{p'}[X]$ の不定元 $X$ に変数 $w$  (の germ) を対応させれば埋め込み

$$\mathcal{O}_{p'}[X] \hookrightarrow \mathcal{O}_p$$

が得られ、この埋め込みの像は $\mathcal{O}_{p'}[w]$ と表すべきである。多様体の次元に関する帰納法の仮定から、この像はUFDであり、定理Wは正常な $m_p - \{0\}$ の元は単元乗法因子を無視すれば、すべてこのUFDの中にあると思ってよいことを示しているのである。従って、 $m_p - \{0\}$ の任意の有限個の元に対して、それらをすべて正常にする局所座標系 $(w, z')$ が存在することを示せば、定理Iの証明が完了するのである。

もう少し詳しく説明すると次のようになる。最大イデアル $m_p$ の有限個の非零元に対してそれらがすべて正常であるような局所座標系 $(w, z')$ が存在することは、

次のように示される。

まず、それらの元の代表元が、共通に定義されている $p$ の近傍 $V$ があり、 $V$ 上に $p$ を原点とする局所座標系が与えられているとしてよい。この座標系により $V$ は $\mathbb{C}^n$  ( $n = \dim \Omega$ )における原点 $O$  ( $\in \mathbb{C}^n$ )の近傍と同一視される。必要ならば $V$ をさらに十分小さいものに取り換えれば、 $V$ は線形空間 $\mathbb{C}^n$ の凸集合であるとしてよい。その上で $V - \{0\}$ の一点 $q$ を、代表元の $q$ での値がすべて0でないように選ぶ。さらに適当な線形変換によって $\mathbb{C}^n$ の座標系 $(w, z')$ を、 $0$ と $q$ を結ぶ(複素)直線が $z' = 0$  (i.e.  $z_2 = \dots = z_n = 0$ )と与えられるように取り換えれば、 $m_p - \{0\}$ の与えられた有限個の元は、この $(w, z')$ に関して、すべて正常となるのである。もう一つの重要なポイントは、与えられた元とともにそれらの任意の公約元も、座標系 $(w, z')$ に関して正常であることである。すなわち、そのような公約元も、単元乗法因子を除けば、多項式環

$$\mathcal{O}_{p'}[w] \quad (\approx \mathcal{O}_{p'}[X])$$

の中にあると考えてよいことが判る。この( $\mathcal{O}_{p'}$ 係数の)多項式環は帰納法の仮定によってUFDであるので、 $m_p - \{0\}$ の任意の有限個の元に対して、それらの最大公約元が、(単元乗法因子を除いて)一意的に定まることが示された。

この性質はUFDを特徴付けるものであり、定理Iの証明は完了する。

この証明からも明らかなように、 $\mathcal{O}_p$ の代数的構造は点 $p$ に依らず、定理Iの内容は「複素変数の収束ベキ級数環はUFDである」と言い直すこともできる。

## 10. セレンディピティの本質

廣木一亮

大発見・大発明の起源はセレンディピティ (serendipity) による事が多い。付箋紙「ポスト・イット」、一般にマジックテープやベルクロと呼ばれる面ファスナー、自動車用の飛散防止ガラスなど日常よく

目にする製品から、導電性高分子の発明やカーボンナノチューブの大量合成法の開発まで化学におけるセレンディピティの発現は枚挙に暇がないほどだ。

そもそもセレンディピティとは「幸運な偶然によって画期的な発見・発明をする潜在的な能力」をさす。セレンディピティによる発見のきっかけは偶然や勘違い、時にはアクシデントであり、多くは本来の研究目的とは違ったところに真の価値を見出し、発展させた結果という例が多い。そこでセレンディピティの本質とは何か、論じてみたい。

例にポスト・イットを挙げよう。今やこの付箋紙は知らない人があるだろうかと思えるほどに普及している。意外な事かもしれないが、この発明は「付箋紙」の開発ではなく、化学会社 3M の研究者 スペンサー・シルバーのある失敗に端を発している。彼は「強力接着剤」の開発中に「確かによく着くが、すぐにはがれ落ちてしまう奇妙な接着剤」を偶然合成してしまう。当初の目的からすれば、これは明らかな「失敗」であるが、彼のすごさは「失敗ではあるが、何か別の用途があるのでは？」と閃いたことだ。そうは言っても自分では用途が思いつかないので、この奇妙な接着剤のことを他の研究者や知り合いに話しくった。自らの失敗をまるで自慢するかのような行動をとるシルバーは確かに変わり者かもしれないが、これの積極性が思わぬ幸運を産むのである。

この接着剤の話聞いた一人にアート・フライがいる。彼は聖歌隊の一員であったのだが、いつも楽譜から抜け落ちる付箋紙にイライラしていた。その日も例によって付箋紙は落ちた。「またか！」とそれを拾おうとした瞬間、彼は閃くのである。「そうだ、スペンサーの接着剤を紙切れに塗れば、抜け落ちない付箋紙ができるぞ！」彼はシルバーのもとにそのアイデアを持ち込み、ほどなく試作品が完成する。二人は大ヒットを目論んだかもしれないが、世間はそんなに甘くなかった。楽譜ならいざ知らず、普通の本に挟む付箋なら紙きれで十分。紙きれで済むものにお金を払おうという人は稀だったのだ。

ところが二人はくじけない。「どうせ売れないなら、得意先にでも配ってしまえ」と彼らが発明した付箋紙を無料で配ったのである。これが大反響を巻き起こし、使用者は口々に便利だと称賛した。発明者の二人は、その使い方を見て驚いた。付箋紙に文字が書いてあったのだ。つまり彼らが発明したのは単なる「接着剤つき付箋紙」ではなかった。その真価は「貼ってはがせる便利なメモ用紙」だったのであり、この瞬間こそ「ポスト・イット」誕生の瞬間だったのである。

ポスト・イットで面白いのは、接着剤の発明者（スペンサー・シルバー）、製品の発案者（アート・フライ）、真の使い道の発見者（得意先）と、立場も考え方も違う三者が、半ば偶然的だが、段階的・進取的に開発を

行ったことである。シルバーの先見性と積極性、フライの問題意識と閃き、得意先の「付箋紙」という初期の用途にとらわれない自由な発想と応用力、どれが欠けてもこの発明はなされなかった。

ではもっと純粋な意味での化学におけるセレンディピティの場合はどうだろうか。2000 年にノーベル化学賞を受賞した「導電性高分子」が良い例であろう。

ポリアセチレンの研究をしていた白川英樹が偶然（指導していた研究生が触媒濃度を間違えたのではないかとされている）、だれも合成できなかったポリアセチレン薄膜を得たことに端を発している。純粋な有機化合物でありながら、ポリアセチレン薄膜は光沢を有していたことから、導電性があるのでは？と閃き、研究は重ねられていく。これまた偶然出会った無機化学者：マクダイアミッド、固体物理学者：ヒーガーと 3 人で研究をし始めた結果、化学ドーピングという手法でポリアセチレンは金属にも匹敵する世界初の導電性高分子になった。

ポスト・イットの例と比べてもらいたいのだが、ここでもやはり誰も作り得なかった薄膜の合成者（白川）、その価値を見抜いた者（マクダイアミッド）、導電性を飛躍的に向上させる化学ドーピングの提案者（ヒーガー）と 3 人の科学者がそれぞれの役割を演じている。

注意してもらいたいのはセレンディピティが単なる偶然ではないと言う点である。いつも問題意識を持って、注意深く観察し、正しい知識に基づいた精神が、ある偶然と遭遇した時、だれも考え付かないような発明・発見となる。果たして「良く着くが、すぐにはがれ落ちてしまう奇妙な接着剤」は合成しようと思って合成できるものだろうか？ 筆者も有機化学を研究しているが、皆目見当もつかない。また高分子は絶縁体というのが当たり前の時代に、果たして導電性高分子などという発想ができるだろうか。そう夢見ることはできても、実現は困難であったろう。所詮、人の考え付くことには限界がある。だからこそ予期せぬ偶然を正しく捉え、うまく利用することで、画期的な発明は生まれる。

上記を念頭に置くと、津山高専 50 周年記念行事で講演した白川英樹の次の言葉は、極めて示唆的である。

「よく観て、よく記録し、しっかり考えよう」  
子供相手の実験教室でも彼がよくいう一節だが、これを常に心がけることこそ、セレンディピティを発揮する第一歩であると筆者は考える。最後にルイ・パストゥールの言葉を紹介して結びとしたい。

「幸運の女神は準備された心の中に微笑みかける」

## 11. Cross-disciplinary Research and Proactive Serendipity

Shigeru Arimoto

On the 50th anniversary of the Tsuyama National College of Technology (TNCT) in 2013, Professor Hideki Shirakawa (Nobel Chemistry Prize 2010) mentioned the importance of proactive attitude in creating a new path in science. In recalling the cross-disciplinary research related to the Fukui conjecture, the author of this section is convinced that what might be called 'Proactive Serendipity' played a remarkable role in the proof of the Fukui conjecture via the resolution of singularities and related methods<sup>2)-4)</sup>. The phrase 'Proactive Serendipity' does not seem to exist in current English, however, the author recalls the late well-known engineer Dr. Hideo Itokawa referred to the idea approximately corresponding to what might be called Proactive Serendipity in one of his books.

Bearing in mind both Dr. Itokawa's remarks and Professor Shirakawa's lecture mentioned above, the author would like to record here a remarkable case of Proactive Serendipity. In the mid 1980s, the author visited the Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS), Kyoto University, after contacting Professor Heisuke Hironaka for his help in resolving whether or not the Fukui conjecture was true. To make a long story short, his student Professor Mark Spivakovsky and his colleagues Professor Kyoji Saito and Professor Isao Naruki gave helping hands to the author immediately after Professor Hironaka returned to Harvard University leaving his student Spivakovsky in Kyoto. No one imagined at that time the Fukui conjecture had something to do with the specialized research field of Professor Spivakovsky and his teacher Professor Hironaka: Resolution of Singularities. One afternoon in the mid 1980s, when Professor Spivakovsky had left for America and Professor Naruki happened to be absent, at the Northern Restaurant in Kyoto University, the author asked Professor Saito and his colleagues at a lunch table a question about factorization with a rather imprecise formulation of the problem. The author talked about his conjecture directed towards what is known as the 'Piecewise Monotone Lemma' (version 2) recalling the visual impression from many examples of energy band calculations, which the author proactively undertook himself and collected from others' publications over a period of several months. Professor Saito was the first to provide a counter example to negate the author's conjecture. However, after the author restated his conjecture more precisely, Professor Saito agreed to the likely truth of the conjecture, which was later proved in refs.

2)-6). Hearing the statement of Professor Saito, Professor Naruki, who is the author of Section 9, gave a crucial initial step towards the then absolutely unexpected application of resolution of singularities to the research of the Fukui conjecture. Later, Professor Spivakovsky revisited Kyoto from America, and Professor Saito and Professor Spivakovsky also helped the author in the application of resolution of singularities to the Fukui conjecture. [See ref. 7) for the author's communications with Professor Kenichi Fukui concerning his conjecture and its related theorems.]

### Acknowledgements

The author of section 11 (S.A.) would like to express his sincere thanks to his former classmate at Kyoto University, Katsuhisa Ohta, now Professor at Muroran Institute of Technology, who suggested to the author to attend the 'Open Mathematics Lectures', by Professor Heisuke Hironaka, Professor Masaya Yamaguti and others in the RIMS, Kyoto University in the late 1970s. At this suggestion, the author attended the open lectures and thereafter proactively continued to study topics related to the lectures. This later paved a way to lucky and serendipitous encounters with Professor Saito, Professor Naruki, and Professor Spivakovsky, at the RIMS, Kyoto University, in 1980s.

### References

- 1) S. Arimoto, N. Fukuda, K. Hiroki, T. Murakami, I. Naruki, K. Saito, S. Takeuchi, and M. Yokotani, "Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project II", Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **55** (2013) 31-35.
- 2) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. I, J. Math. Chem. **37** (2005) 75-91.
- 3) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. II, J. Math. Chem. **37** (2005) 171-189.
- 4) S. Arimoto, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. III, J. Math. Chem. **47** (2010) 856-870.
- 5) S. Arimoto, M. Spivakovsky, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. IV, J. Math. Chem. **48** (2010) 776-790.
- 6) S. Arimoto, M. Spivakovsky, E. Yoshida, K.F. Taylor, and P.G. Mezey, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. V, J. Math. Chem. **49** (2011) 1700-1712.
- 7) S. Arimoto, Note on the repeat space theory - its development and communications with Prof. Kenichi Fukui -, J. Math. Chem. **34** (2003) 253-257.

# 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト VIII

有本 茂<sup>1\*</sup> 福田信幸<sup>2\*</sup> 廣木一<sup>3\*</sup> 森島 績<sup>4\*</sup> 村上達也<sup>5\*</sup> 成木勇夫<sup>6\*</sup>

斎藤恭司<sup>7\*</sup> 竹内 茂<sup>8\*</sup> Keith F. Taylor<sup>9\*</sup> 横谷正明<sup>10\*</sup> Peter Zizler<sup>11\*</sup>

## Mathematics and Chemistry

## Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VIII

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA, Tatsuya MURAKAMI  
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI  
Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER

This is the eighth part of the series of articles that records and further develops essentials of the Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Symposium 2013 Tsuyama, whose main themes were symmetry, periodicity, and repetition. The symposium was held on April 5th and 6th in Tsuyama city, Okayama, Japan, in conjunction with the Fukui Project and was devoted to the memory of the late Professor Kenichi Fukui (1981 Nobel Prize) who initiated the project. The present series also provides challenging cross-disciplinary problems which are directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. Most of these problems are formulated using mathematical language of unique factorization domain (UFD) and related notions, which are not well known among chemists despite the importance of these notions in elucidating additivity and high-speed asymptotic phenomena in molecules having many repeating identical moieties.

**Key Words:** the Fukui conjecture, Memoir of Prof. K. Fukui, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

### 12. 数学と芸術、音楽

竹内 茂

はじめに：前回、数学と化学について短文を寄せたが、その続編として、本プロジェクト主催者の有本教授の勧めに従って、今回は数学と音楽について少し述

べてみたいと思う。趣旨としてはサーベイであるが、学際的分野を取り上げているために、関連する文献は膨大なものになる。また音楽史に関するものは、一次資料にアクセスすることが極めて困難であり、また本来引用すべき原典に近い初出資料と、そうでないものとの区別が容易でない、などの理由で、具体的に挙げることはしない。読者諸氏は適当なキーワードによって、ウェブサイトで容易に参考文献を検索できるであろう。今回の所論が人類の数千年の精神・文化史を背景にしたものであることは、論を待たない。前回の所論との関係について、ごく簡単に触れておくと、前回は現代数学の特徴を集合論に立脚する論理体系と捉えることによって、原子や分子をその物理的・化学的特性まで含めて（数学的に）理解することが可能になって来ていると（総論的なことを）述べた。紙数の関係でナノ化学を例示するだけで、具体的な応用例に触れる余裕がなかったが、自然界の物質的な存在形式を数学的に理解するとはどのようなことかを、おぼろげな

---

原稿受付 平成 26 年 8 月 28 日

1\*, 3\*, 10\* 一般科目 2\* 一般科目非常勤講師

4\* 京都大学名誉教授

5\* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

6\* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

7\* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

8\* 岐阜大学 教育学部・数学科

9\* Dept. of Math. and Stat., Dalhousie University, Canada

11\* Dept. of Math., Phys., and Eng., Mount Royal University, Canada

がらでも感得していただければ、目的の一端は達したといえるのではないだろうか？それに対して今回の試みは、人間存在も自然の一部であるとの認識のもと、芸術的なもの、特に音楽的な美意識が科学の探求同様、人間の精神的活動の典型的なものであるにも関わらず、数学的な根拠を以って（ある程度）説明可能であることに踏み込む。実際、音楽理論、作曲理論の専攻論文の中には、（例えば）バッハやショパンの作品の特徴を、数学的手法で解明しようとしているものも近年見られるが、ここではそれらの論点について詳論する余裕はない。ごく簡潔に要点を述べれば、和声の構造やフレーズ・モチーフなどの音楽的特徴を、変換群を用いて対称性を理解する幾何学的、或いは位相的・計量的方法で捉えようとしていると言えるであろう。その過程で一つの曲が時系列的にはある空間の中の点列と解釈されるとして、数学的概念を導入するなどの方法がとられていたりする。それまでの古典的な音楽学では、作曲家の特徴を概念的、主観的に捉えていたのに対して、代数的、計量的にとらえることによって、客観性が増して、より科学的に音楽家或いは音楽そのものを把握、理解できるようになったと言えるであろう。今回の所論はそれらの潮流とも関係しているが、むしろ将来的にはパターン認識など認知科学との関連が強いように思う。

## 1. ギリシア数学と音楽、ピタゴラス学派

音楽の数論的特徴に、人類の歴史で最初に気づいたのは、ギリシアの数学者達であろう。特にピタゴラス学派は数論にのめり込んでいたために、整数、特に素数の性質に異常なまでに興味をもち、ついには神秘化するにいたる。それによって、自然界の諸現象を説明できると信じていたようだ。天体の運動、元素の性質、音楽も含まれる。七曜の起源と太陽系の惑星、衛星の関係や、プラトンの正多面体論など古くから、数の神秘性と結びついている。完全数が6、28しか知られていなかった頃は、安息日や月の回転周期と完全数の符合が、神学にまで影響を与えているようである。プラトン以来の古典的な学問体系として知られている自由七科が、三学四芸に分かれ、前者が trivium、後者が quadrivium と呼ばれて中世に至ったのは、前回も触れた通りである。数論、図形学、天文学、和声学は勿論後者に属し、その四学全体を指して数学 (mathesis) と呼んだのは、ピタゴラス学派であると哲学・数学史はいふ。音楽 (music) の用語をそこでは用いていないが、ここという和声（調和）は現代的な感覚からすれば、音楽を指していると理解するのが自然であろう。語源的には、ギリシア神話の女神ミューズから派生している music は、現代的な音楽より広い範囲の芸術を指していると理解すべきなのである。それに対して

四芸の中の和声は音楽の中でも、ハーモニーのように限定的な意味になる。しかし、本論ではピタゴラスに倣い、数学が音楽を包含する概念だと考えて、所論を進めていくことにする。

## 1-0. 数学的準備

次節以降で音階論を述べるために、「純音」の集合を1オクターブの周波数の範囲内の音で代表元をとり、乗法に関して可換群をなす正の有理数（または実数）集合  $K$  にオクターブ違いを無視することによる同値関係を入れ、その関係で割った商群  $M(K)$  を（一次元）音階群 (musical scale group) と呼ぶ。個々の元（同値類）をここでは単に（純）音と呼ぶことにする。2項演算として数の乗法演算  $\times$  が、そのまま商群に引き継がれて（\*と表記する）、2音の乗法が定義可能である。例えば  $1 \times 3/2 = 3/2$ ,  $3/2 \times 3/2 = 9/8$  等である。但し表記を簡略化するために、同値類の記号  $[]$  を省略して  $[1]$  のことを単に 1 と表記しても、誤解の恐れはないであろう。また商群である以上、単位元や逆元が存在と一意性、また演算が交換、結合等の法則を満たしていることは、代数系の一般論から容易に分かる。それらの演算や、その諸結果の音楽的意味にも触れるべきであろうが、ここでは単に数学的演算とその記号化の導入だけを行う。因みに音の乗法は定義されても、加法は定義されない。後節で、ピタゴラス音律、純正律、平均律それぞれの特性（長所、短所）を論ずる際に、音の高さが周波数比で比べられるので、本来は乗法を基礎にするべきであろうが、暗算で計算する際には加法の方が便利なので、指数写像、またはその逆写像である対数写像を用いて、 $M(K)$  を加法群  $M_{+}(K)$  と同一視することもある。次節で述べるように、一般に演奏される音楽においては、純音を聴く機会は殆ど無いので、高次元化された音階群を導入する必要がある。

注）本来  $M(K)$  やその上の二項演算、指数写像等の数学的道具を用いて、音階・音律論や和声について本小論で述べる予定であったが、紙数の関係で、ここでは単なる導入のみに留め、それらの理論の深化と音楽理論、作曲・演奏・鑑賞等への応用はまた別の機会にゆずる。

## 1-1. 楽音（旋律）と和音

前節で述べた（一次元）音階群に値をとる時間変数の関数としての「純音関数」とは別に、ここでは、物理的に空気の振動として知覚される音楽的な「音」を、区別して楽音と呼ぶこととする。今後、「音」といえば、所謂楽音のみを考えるが、現代では楽音と非楽音を区別するのは、無意味と考える専門家集団も存在する。その四要素として、高さ (pitch)、音色 (tone)、大きさ（強さ intensity）、持続時間（長さ）がある。物理的

には二階の定数係数線形偏微分方程式の境界値問題の解として、周期関数であることから、これらのうち長さを除く三要素が各々、周波数（振動数）、波形（スペクトル表現、フーリエ展開）、振幅を表すパラメーターとして、登場する。但し、大きさと強さは物理的な意味、定式化は異なるが、ここでは区別せず、長さ（持続時間）も無視する。またそこに現れる方程式の（周期性によって）、解が周期性をもつことや、（線形性によって）解が加法性、線形性をもつことも容易に分かる。

（１）楽音の定義とその属性を述べる。一般的な表現をすれば、声楽、器楽等によって演奏される音曲の中に現れる音を指しているが、旋律まで含めて、数学的に表現するとすれば、上述の三要素が時間の関数として明確で、一定または、なだらか(moderate)に変化していくもののうち、（主観的表現であるが）聴覚に好意的に作用するものをさすと考えてよいであろう。但し、ここでなだらかな変化とは、特に高さについては、連続とか微分可能という意味ではない。次節において問題にするように、特に楽器音については、物理的・技術的な理由によって、一般に高さは不連続に変化するが、音階の制約を受けている。単一の音源から発している音を単音と呼ぶことにすると、対立する概念として、複（合）音や、また純音という前述の概念もある。単一の音源とは、単一楽器または、一人の音声がある特定の（物理的、生理的）状態で発する音というべきであり、その状態が規定しているのは、方程式、境界条件等を決定するいくつかのパラメーターである。しかし楽器にせよ、音声にせよ、純音の生成のように条件は単純でない。そのため単音であっても、波形は複雑になっている。人間の音声でいえば、同じ人間が高さや大きさを変えて発声できるが、（声紋分析が示すように）音色まで変えるのは一般には容易でない。楽器で言えば、特定のキーを叩いた時のピアノ音である。同一ピアノでは音色まで変わることは余りないが、バイオリンでは同じ楽器であっても、演奏次第で音色までが変化する。実際後述のように、波形を調べればバイオリンの波形は非常に複雑であり、多くの倍音が含まれているので、奏法によって、（バイオリン特有の波形的特長は保ちつつ）倍音の構成比もかなり変化する。他方複（合）音とは、複数の音源（楽器等）が同時に発する音の和である。これは、ユニゾンのこともあるが、一般には異なる高さ、音色の音の和であり、以下の節で述べるように、和音と不協和音とに分ける区別が古くから続いている。三要素を表すパラメータが、数学的にどう表現されているかは、その音を表す解析的表現であるフーリエ級数を調べる必要がある。視覚的には今日ではチューナーによる周波数の検出や、オシロスコープによる音の波形分析、スペクトルスコ

ープによる音波の成分のスペクトル分解などを容易に見ることができる。物理方程式の（連続な）解である周期関数によって表される音の、任意の周期は最小周期の整数倍になっている。誤用を避けるため、今後は音の周期とは最小周期のみを指すことにして、他は必要があれば、「広義の周期」と呼ぶことにする。周期の逆数が周波数（振動数）である。基音とはその周波数の音をさすが、多くの場合その整数倍の周期をもつ音（倍音）が数多く含まれている。その構成比を調べるには、発生音のスペクトル分解を見る必要があるが、そのことは、解析的にはフーリエ係数を比較しなければならない。音楽として鑑賞する上では、直接耳で聴いてその音色で違いを判断するのが一番早道であるが、楽器の性能・価値を科学的に正確に裏付けるには、機器によって数値的または視覚的に、スペクトル分解を調べる方法がある。実際ボーカル、バイオリン、ピアノ、フルートで音色の違いは、波形の複雑さの違いとして、オシロスコープで見の方がスペクトルスコープで確かめるより視覚的には理解しやすい。複雑さの程度は順に下がっていく。音叉の音の表す波形は、ほぼ正確な正弦曲線になり、最も単純な音であり、倍音は検出不可能という意味で純音である。実際に耳で聴く際は、（３次元）空間を縦波（粗密波）として音源から伝播して、鼓膜に到達するわけだが、オシロスコープで見ているのは、横軸に時間を取り、縦軸に空間での波動の変位を１次元化してみている。音波が重力の影響を受けず、音源を球の中心として、球面の各法線に沿って等方的(axially symmetric)に進むことは、音の波動方程式から導かれることだが、この等方性によって、一次元化してみることが合理化される。一定時間持続する楽音が、楽曲(tune)とし認識されるには、（一定の条件を満たしながら）時間的に変化する必要がある。複数音が同時、または一定の時間的なズレのもとに生成する場合は、更に複雑な条件が必要になる。ここでは先ず前者（２）の場合を考える。後者は（３）で論ずる。

（２）単一楽音が変化して所謂「旋律」を構成する場合、個々の音の三要素が時間とともにどう変化するかが、問題となる。作曲・演奏・鑑賞する場合は、この三要素全てが対象であるが、ここでは高さだけを論ずる。旋律として心地よいのは、高さの比が簡単な整数比になっている場合であることを発見したのが、ピタゴラス学派の貢献であろう。数学的にこのことを明瞭に述べたために、後世ピタゴラス音階と呼ばれることになるが、その基本は、５度と呼ばれるＣとＧの間の音程である。西洋音階だけでなく、世界的に見ても、同様な音階は広く分布している。後述する平均律音階では少しずれがあるが、ピタゴラス音律または（その修正版である）純正律では正確に２：３の周波数比に

なっている。モノフォニー的旋律とは、単音が一定の長さ（拍数）とともに、変化していくことであり、楽曲としては一定の強弱のリズムを伴っていることが多い。

（3）和音：複数音が時間的に（旋律として）、または空間的に変化していくとき、楽音としては、協和音と不協和音の二つに分類がされて来た。古代から経験的に簡単な整数比で周波数比が表されるような（純正律的）音程を協和音と呼んでいる。典型例は所謂C E Gで表される4:5:6、またはG C Eで表される3:4:5があげられる。正確に平均律で調律された（とすれば）ピアノでは基準音が異なるだけで、図形的にこれらと相似な協和音は他にもあるが、絶対音感の個人差のもと、一般には相似的な和音が同一に感じられる訳ではない。実際にピアノでも（個人差はあるだろうが）別種の和音として聞き分けられる。その原因として、一つは基準音の違い、更には、調律そのものが妥協の産物であって、正確な平均律から意図的な補正がなされていることもある。ましてや、純正律で調律された弦楽器等で異なる調性の和音を弾けば、中世以来多くの作曲家、楽人が悩んだように、全音半音の不統一のために、同じ度数であっても、至る所で「不協和音」が生じた。（不）協和音の概念が、空間や時間を超越した普遍的なものかどうかは、歴史的に見る限り未解明である。次節でも関連した話題について述べるが、これらの議論には具体的な物理的・数学的証明と、（耳、脳による）音声認識機能特性の検証が必要であるので、別の機会に述べたい。

## 2. 純正律と平均律

### 2-1. 純正律

古代のピタゴラス音律とその修正版である純正律が、近世になって平均律として生まれ変わり、バッハなどに代表される近代音楽として発展していく中で、古典的な純正律とどう調和し、また、矛盾を今日に至るまで引きずってきたか？また今後どうなっていくのか？古来、各音律の長所・短所について、不協和音の程度が、具体的な数値をセント単位で比較して、論じられてきているが、最近ではウェブ上で実演までして、各音律ごとの詳細な比較を行っているの、ここでは具体的な数値やその評価には触れない。前節で述べたように、ピタゴラス学（楽）派は彼らの音律・音程に則り、5度の音程によって次々と新しい音を作り出して行った。Cを1とすれば  $G=3/2$ 、次に  $(3/2) \cdot (3/2)=9/8=D$  となり、その次は  $(9/8) \cdot (3/2)=27/16=A$ 、その次は  $(27/16) \cdot (3/2)=81/64=E$  などと、一応全て対応する音を近似的に、現代の平均律で表すこと

は可能ではある。しかし、逆にこの方法で現在の平均律で可能な全ての音を（近似的に）表すことは可能であろうか？これは正に初等数論の問題であるが、数の神秘性に魅せられた彼らピタゴラス学派の人々は、これ以外の音の変化律を認めようとはしなかった。無理数は数でないとする彼らにとってはそうするより他に仕方がなかったのであろう。ただこのことから、当時実際に人々が愛好した歌舞音曲が、全てピタゴラス音階によると考えるのは早計である。弦楽器、管楽器が古代から洋の東西を問わず、最初に広く使われた楽器であると考えれば、音程を1:2から始まって、2:3以外の簡単な整数比、3:4や4:5等で生み出す、純正律的な原理に気づき、その利点に基づく音階が、早くから流布していたと考える方が自然であろう。純正律では他にもいくつか協和音程が得られるが、これらも全て、正確に簡単な整数比8:9や9:10などで表され、全音5つと半音2つで構成される現行（に近い）1オクターブ音程が得られた。

### 2-2. 平均律

一方1オクターブを（周波数比で）12等分した平均律では、一般にどの三つの異なる音をとっても、それらの周波数比は、2の12乗根の冪で表される無理数比であり、ピタゴラス或いは純正律の立場からすれば、協和音ではなくなる。しかし、その音程は周波数比でみたとき、前節でも述べたように純正律との違いは微細である。ただこの違いを過大視するか、過小視するか結論は出ていない。簡単な整数比でないときに、複数音の（合成音）和が、聴くに耐えないような音かどうか、音楽的に（或いは数学的に）十分解明されたとは言えないのではないだろうか？実際現在でもどちらが優れているか論争は続いている。平均律の「発明」以来4世紀が経過している現代、今一度考えて見る価値はある。現状は種々の理由から、平均律が楽器の調律、演奏、（作曲）、音楽教育の場で主流だと思われるが、一方で弦楽器の調弦では、技術的に純正律的調弦が今も大きな役割を果たしている。歴史的には皮肉なことだが、16世紀頃から平均律は、弦楽器演奏家の間で試みられていたようである。それほど純正律の不協和音に悩まされていたわけだが、三角関数の加法定理などまだ広く普及していない中で、正弦関数、余弦関数の合成関数がどうなるか公式を知らない音楽家たちが、うなりを基にして正確に平均律に調弦することは、試行錯誤の大変な作業であったろうと思われ。数学的な理論として、単に音階・音律としてだけでなく、和音、メロディ、音色についても、三角関数の合成、重ね合わせ、フーリエ級数展開などの応用として論じる価値はあるが、学際的領域のため、前述のように、過去数学者が本格的に取り組んで来た形跡は

ない。音楽理論家も、数学は勿論、心理学や認知科学の立場からの解明や実験による検証が必要なため、音階・音律論の将来について、十分踏み込めていないのが実情である。

## 2-3. 楽譜

音律理論を正確かつ厳密に展開する上で、楽譜の存在は極めて重要な役割を果たしている。ピタゴラスの頃は、音の波動としての科学は未成立の中、振動数の概念はなくとも、耳で聴いてその高さが、弦楽器であれば、弦の張りの強度や、弦の長さに依存していることは当然理解されていたであろう。また同じ理由で全音、半音の区別も可能だし、それを（弦の長さの）比で比較する数学的方法も明らかにされていたと考えられる。職業的作曲家、演奏家が存在する以前の、中世前半においては、現代のような楽譜に楽曲を記述した記録が残っていないようである。しかし10～11世紀頃には、現代に近い記譜法が使われ始めたようで、作曲や演奏が専門家集団によって行われ始めた証拠と考えられる。それによって、音階を正確に表すことが可能となり、どこに半音があるか、またその必然性などが考えられ、音律や調性を本格的に問題にする時代がやってきた。歴史的には、教会音楽の束縛から、もっと自由な音楽へと発展していくルネッサンスの機運が、純正律から平均律へと改革する運動を後押ししたとみることができる。

## 3. シェーンベルク12音階学派と無調派、現代音楽

18世紀以降、平均律にもとづくクラシック音楽の発展が、2世紀にわたって続く中で、20世紀以降所謂現代音楽の潮流が始まる。それは12音階から始まって、無調音階へと過激な歩みを進めているが、大衆的な支持を得られているのであろうか？またクラシックと非クラシックとの区別は現在・将来も存在し続けるのであろうか？歴史的に見て、平均律の目的（のひとつ）が転調を容易にすることであったというのは、多くの専門家が同意するところであろう。実際バッハの有名な平均律クラヴィア曲集第一巻は、転調を自在にまた、効果的に用いてフーガを作曲した。他にも純正律やその修正版である中全音律がもつ、不協和音の解消という目的もあった。各音律毎に異なる細かい音程の差が、どのように解消されるかなどの一覧表は、多くの専門書に詳しく掲載されているので、ここでは逐一取り上げることはしない。またそれは簡単な数学的原理に基づいてすぐ計算できることでもある。バロック、古典派からロマン派にかけて、転調の技術は高度化し、それを支えたのが12平均律であった。

作曲家はひどい不協和音に悩まされることなく、必要に応じていつでも転調し、また元に復調した。しかしルネサンス以来の調性感は、平均律が普遍化する18世紀以後も続いていた。実際五線譜でフラットやシャープがいくつもつけられ、作曲家だけでなく、評論家たちも曲の紹介をするとき必ず変ホ長調の曲であると述べたりするのは、正にその証拠に違いない。中世以来和声学者、音楽理論家は個々の協和音だけでなく、一連の順序付けられた集合としての和音の列を問題にして、調性を特徴付けてきた。いわば音楽・楽曲の組織化、構造化である。だがそれを数学的構造と見て、近現代の数学者が研究した例は寡聞にして知らない。音律そのものは、調性とは独立に、古くはピタゴラス、近世になってからは、数論でよく知られているメルセンヌなども取り組んでいる。しかし、調性そのものまでは、踏み込んでいないし、また調性自体、近世以降の問題でもあろう。調性が作曲上の制約であったとすれば、それらを打ち破ってもっと自由でありたいと思うのは当然の流れかも知れない。時代とともに、音律、協和音は変化し、皮肉なことに、当初転調を目的としていたはずの平均律が、調整を不要・無用なものとして、作曲家が無視・軽視するのを助けている。その先鞭をつけたシェーンベルクとその後継者たちが、今後現代・将来の音楽に大きな転換点をもたらすのか、注視していきたいと思う。

## 4. 音楽の将来、民族性と普遍性

今まで主として西洋音楽の立場から考察して来たが、歴史的、地理的に考えると、時代毎また民族毎に、それぞれ個性的な音楽が存在する。音階も12音階や7音階だけでなく、5音階や、更にはオクターブの概念すらない例もある。半音全音の区別だけでなく、三分音、四分音などを取り入れた音楽が、西欧においても民族音楽として存在する。西欧の（理論化された）音楽が、科学技術同様、現代世界に支配的な影響を及ぼしていることは事実であるが、それが普遍的性格をもつ故であることも、また認めざるを得ない。実際、平均律の考え方は音楽史の研究によれば、古代中国でも試みられていたようである。ただ西欧のように、ピアノなど鍵盤楽器の進歩・発達という好機に巡り合せなかったために、現実に普及するにはいたらなかったのであろう。またそれは、数学的・科学的思考の産物でもあり、ギリシア以来の哲学的・論理的思考の伝統が背景にある。

## 謝 辞

原稿準備の最終段階で目を通していただき、貴重なご意見・ご指摘を頂いた有本教授と山梨大学の鈴木俊

夫名誉教授に、この場でお礼申し上げます。(2014. 8. 24)

### 13. Challenging Cross-disciplinary Problems Related to the Fukui Conjecture and to the Chemistry of Carbon Nanotubes III

Shigeru Arimoto, Nobuyuki Fukuda, Masaaki Yokotani and  
Peter Zizler

In ref. 1), the following Challenging Problem F was given. This problem is related to absolutely continuous functions (generally highly irregular) and to their Fourier expansions.

Let us recall that Challenging Problem F is closely related to the Asymptotic Linearity Theorems (ALTs) in the repeat space theory (RST). The reader is referred to 2)-7) for the ALTs and for the definitions of the original alpha space  $X_\alpha(q)$  and of other symbols given in the following conjecture.

**Conjecture OALT-1.** (OALT- $X_\alpha(q)$  AC(I) version). Let  $q \in \mathbb{Z}^+$ , let  $s \in \mathbb{Z}$ , let  $\{A_N\} \in X_\alpha(q)$ , and let  $I$  be a closed interval compatible with  $\{A_N\}$ . Then, for any  $\varphi \in AC(I)$ , there exists an  $\alpha_s(\varphi) \in \mathbb{R}$  such that

$$\text{Tr}[(P_N^s \otimes I_q)(\varphi(A_N))] = \alpha_s(\varphi)N + o(1) \quad (1)$$

as  $N \rightarrow \infty$ . Moreover the real number  $\alpha_s(\varphi)$  is represented by the integral given by

$$\alpha_s(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(is\theta) \text{Tr} \varphi(F(\theta)) d\theta. \quad (2)$$

**Challenging Problem F.** Prove or disprove Conjecture OALT-1.

Let  $P(I)$  denote the subspace of  $AC(I)$  of all the polynomial functions with real coefficients. The Conjecture OALT-1 with  $AC(I)$  replaced with  $P(I)$  is called Off-diagonal ALT, OALT- $X_\alpha(q)$ ,  $P(I)$  version. The reader is invited to prove or disprove this simpler version first. The reader is also invited to the following

**Challenging Problem G.** Prove or disprove the following Conjecture OALPHA-1.

**Conjecture OALPHA-1.** (OALPHA- $X_\alpha(q)$  AC(I) version). Let  $q \in \mathbb{Z}^+$ , let  $s \in \mathbb{Z}$ , let  $\{A_N\} \in X_\alpha(q)$ , and let  $I$  be a closed interval compatible with  $\{A_N\}$ . Then, for any  $\varphi \in AC(I)$ , there exists an  $\alpha_s(\varphi) \in \mathbb{R}$  such that

$$\text{Tr}[(P_N^s \otimes I_q)(\varphi(A_N))] / N \rightarrow \alpha_s(\varphi) \quad (3)$$

as  $N \rightarrow \infty$ . Moreover the real number  $\alpha_s(\varphi)$  is represented by the integral given by

$$\alpha_s(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(is\theta) \text{Tr} \varphi(F(\theta)) d\theta. \quad (4)$$

### 14. Concluding Remarks

Shigeru Arimoto

On behalf of the co-authors and myself, I would like to express sincere gratitude to all who helped in enhancing the Fukui Project. Special thanks are due to Professor M. Spivakovsky, Professor M. Amini, Professor J. LeBlanc, Professor T. Yamabe, who have been recent collaborators in the program related to the Fukui conjecture, carbon nanotube, and visual Matrix Art. In the present series of papers, as a complementary aspect opposed to the visual Matrix Art, we are currently targeting heuristic and innovative sonification (audiolization) of various scientific data using Fourier analysis with the help of computer scientists and musicians.

However, by the 100<sup>th</sup> anniversary of the birth of Professor Kenichi Fukui, which is 2018, heuristic visualization and sonification programs in the Fukui Project currently separated as modular units shall be united.

### Acknowledgements

On behalf of the authors of this series of papers, the first author (S.A.) would like to express sincere gratitude to Dr. T. Noritsugu, President of Tsuyama National College of Technology, and his predecessor Dr. H. Inaba, now President of Shujitsu University, for their help in holding our Symposium 2013 Tsuyama and promoting our cross-disciplinary and international collaborations.

### References

- 1) S. Arimoto, M. Amini, M. Spivakovsky, J. LeBlanc, K.F. Taylor, T. Yamabe, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and Matrix Art, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **54** (2012) 31-38.
- 2) S. Arimoto and M. Spivakovsky, The Asymptotic Linearity Theorem for the Study of Additivity Problems of the Zero-point Vibrational Energy of Hydrocarbons and the Total Pi-electron Energy of Alternant Hydrocarbons, J. Math. Chem. **13** (1993) 217-247.
- 3) S. Arimoto and K.F. Taylor, Aspects of Form and General Topology: Alpha Space Asymptotic Linearity Theorem and the Spectral Symmetry of Alternants, J. Math. Chem. **13** (1993) 249-264.

- 4) S. Arimoto and K.F. Taylor, Practical Version of the Asymptotic Linearity Theorem with Applications to the Additivity Problems of Thermodynamic Quantities, J. Math. Chem. **13** (1993) 265-275.
- 5) S. Arimoto, New proof of the Fukui conjecture by the Functional Asymptotic Linearity Theorem, J. Math. Chem. **34** (2003) 259.
- 6) S. Arimoto, The Functional Delta Existence Theorem and the reduction of a proof of the Fukui conjecture to that of the Special Functional Asymptotic Linearity Theorem, J. Math. Chem. **34** (2003) 287-296.
- 7) S. Arimoto, The Second Generation Fukui Project and a New Application of the Asymptotic Linearity Theorem, Bulletin of Tsuyama National College of Technology, **52** (2010) 49.

# 準静止衛星の軌跡

佐藤誠\*

## Trajectory of quasi-geostational satellites

Makoto SATO

A procedure for calculating trajectory of quasi-geostational satellites is demonstrated. Satellite orbit is calculated based on the Kepler's law. A way of obtaining trajectory of the orbit in the sky observed from arbitrary point on the Earth is explained. Influence on the trajectory by orbit eccentricity and tilting angle to equatorial plane is under consideration.

*Key Words* : Kepler's law, Quasi-zenith satellite, Geostational satellite, Orbit, Trajectory

### 1. はじめに

全地球測位システム (GPS) はスマートフォン上のマップや車載ナビゲーションなどのサービスを支える馴染みの深い社会インフラの一つである。元来, GPS は米国の軍事用衛星測位システムであり, 民間に開放された暗号化されていない C/A コードのデータを用いる場合, 10m 程度の座標精度しか得られない。日本政府は自前の衛星測位の確立を目指し, GPS を補完して測位精度を高める目的で, 2010 年 9 月に準天頂衛星「みちびき」を打ち上げ, システムの有効性の検証を進めている。今後, 2019 年までに衛星 3 基を追加で打ち上げ, 最終的には 4 機体制で運用する計画のようである。この準天頂衛星の天空上での見かけの軌道は北側がすぼんだ 8 の字型で, 日本上空に長く留まると説明されている<sup>1)</sup>。しかしながら, この準天頂衛星の動きの地上からの見え方を直ちに理解できる人はおそらくいないだろう。

人工衛星の軌道については, 高専3年生の物理で万有引力を取り扱う際に学習する。基本的にはケプラーの3法則で記述できるが, 教科書内で扱われる題材は, もっとも単純でかつ実用性の高い静止衛星軌道に限定されている。静止衛星軌道は円軌道で赤道上空に位置し, 衛星は 23 時間 56 分の周期 (地球自転の角速度と同じ角速度と向き) で周回している。そのため地上から見ると空の一点に固定されたように見え, 静止衛星と呼ばれる理由である。気象衛星や通信放送衛星として日常の生活に直結した重要な人工衛星である。軌道半径は地球半径の 6.6 倍と意外に遠く, 力学の演習問題などで良く扱われる。

ステラナビゲータなどの天体運行シミュレータには人工衛星の軌道データも含まれており, 静止衛星を表示させると, 天球上で予想外に動き回っていることが分かる。また, 当たり前のことではあるが, 日本から観察する場合, 静止衛星軌道は天の赤道より南側に5度程度ずれる。現実の静止衛星は, 理想的に南天の一点に留まっているわけではなさそうである。地球自転と同じ周期と方向で周回する人工衛星 (以下, 準静止衛星と呼ぶことにする。静止衛星や準天頂衛星はこの準静止衛星の特殊な例である) が天空に描く見かけの軌道 (軌跡) は, 軌道の赤道面からの傾斜角や軌道の離心率とどのような関係にあるのであろうか。地上の観測者も地球自転とともに回転し, 衛星も傾斜した楕円軌道上を回転する。赤道上から観察する場合はまだしも, 高緯度から観察する場合は, 軌跡の形や軌跡上の衛星の動きを直感的に把握することは極めて困難である。

本報告では, 準静止衛星の天空上での見かけの軌跡をケプラーの法則を用いて算出する方法とその結果を示す。

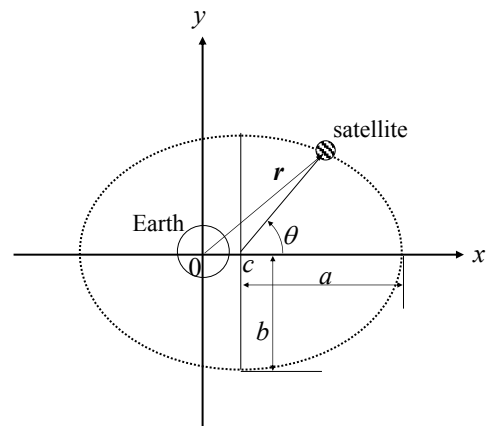


Fig. 1 An orbit of a quasi-geostational satellite.

原稿受付 平成26年9月1日

\*一般科目 satom@tsuyama-ct.ac.jp

## 2. ケプラーの法則による軌道計算

もちろん万有引力の法則を運動方程式に入れ、微分方程式を解くことで解析的に軌道計算することもできる。ここでは、ケプラーの3法則、すなわち第1法則：軌道は楕円で焦点の一つが地球の中心、第2法則：面積速度一定、第3法則：周回周期の2乗と半長軸の3乗の比が一定、を用い代数的に算出する。

手順は以下の通りである。

まず、図1のように  $z$  軸を北に、 $x$ - $y$  平面に赤道面を置き、軌道傾斜角が  $0^\circ$  の楕円軌道を求める。ケプラーの第3法則から、半長軸の長さ  $a$  は静止衛星の軌道半径に等しい。半長軸を  $x$  軸上に置き、 $x$  座標の値が小さい側の焦点を原点に置く。すなわち地球の中心位置を原点にする。楕円の離心率は  $e = c/a$  である。ここで  $c$  は楕円の中心からの焦点までの距離である。楕円の半短軸の長さ  $b$  とは、 $a^2 - b^2 = c^2$  の関係があるので、 $b^2 = (1 - e^2) a^2$  である。軌道上の点  $\mathbf{r}$  は媒介変数を  $\theta$  として次式に表される。

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} c + a \cos \theta \\ b \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に、赤道面に対する軌道傾斜角を  $\phi$  として、もう一つの焦点が北側になるよう軌道を回転させる。 $y$  軸周りを  $-\phi$  回転となる。図2では  $y$  軸は紙面の表から裏の方向なので時計回りとなる。したがって、傾斜した軌道上の点  $\mathbf{r}'$  は次式に表される。

$$\mathbf{r}' = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \mathbf{r} \quad (2)$$

ここまでのケプラーの第1法則の適用である。次に第2法則である面積速度一定から、

$$\frac{dS}{dt} = \left| \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{2} \right| = \text{const.} \quad (3)$$

となる。ここで  $\mathbf{v}$  は衛星の速度であり、 $\mathbf{r}$  の時間微分である。角運動量  $\mathbf{L}$  は、 $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m \mathbf{v}$  でなので、

$$\frac{dS}{dt} = \left| \frac{\mathbf{L}}{2m} \right| \quad (4)$$

面積速度は一周回の積分で楕円の面積になる。地球自転の周期を  $T$  として、

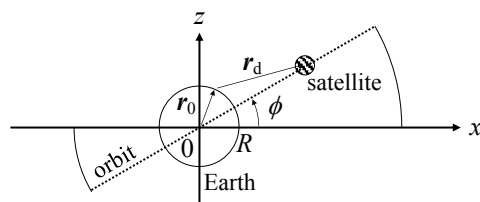


Fig. 2 Tilted orbit of a quasi-geostationary satellite.

$$\begin{aligned} \int_T dS &= \frac{1}{2} \int_T \frac{L}{m} dt \\ \pi a b &= \frac{1}{2} \frac{L}{m} T \\ L &= \frac{2\pi m a b}{T} \end{aligned} \quad (5)$$

一方、 $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m \mathbf{v}$  より、

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \begin{pmatrix} c + a \cos \theta \\ b \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} \times m \begin{pmatrix} -a\omega \sin \theta \\ b\omega \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= m b (a + c \cos \theta) \omega \mathbf{k} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで  $\omega$  は軌道の中心から見た角速度で、 $\theta$  の時間微分である。また、 $\mathbf{k}$  は  $z$  方向の単位ベクトルである。式(5)と(6)より、次の微分方程式が得られ、両辺を  $t$  で積分することで、媒介変数  $\theta$  と時刻  $t$  の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \frac{2\pi a}{(a + c \cos \theta) T} \\ t &= \frac{T}{2\pi a} (a\theta + c \sin \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

計算手順上は媒介変数  $\theta$  を時刻  $t$  の関数として表すことが望ましいが、単純な式にはならないので諦め、この関係式を用いて数値的に任意の時刻の  $\theta$  を求めることにする。これでケプラーの第2法則を適用したことになる。

最後に、地上の観測者から見た見かけの位置  $\mathbf{r}_d$  を計算する。観測者の緯度を  $\eta$  とすると、観測者の位置  $\mathbf{r}_0$  は、地球半径を  $R$  として、次式で表せる。

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} R \cos \eta \cos \theta' \\ R \cos \eta \sin \theta' \\ R \sin \eta \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで媒介変数  $\theta'$  は、 $\theta' = 2\pi t / T$  である．観測者から見た衛星の相対位置  $\mathbf{r}_d$  は、 $\mathbf{r}_d = \mathbf{r}' - \mathbf{r}_0$  である．観測者から見える方向は  $\mathbf{r}_d$  を  $z$  軸周りに  $-\theta'$  回転させ、 $x$  成分と  $z$  成分の比、および  $x$  成分と  $y$  成分の比から、赤緯  $\alpha_z$  と時角  $\alpha_y$  が求まる．

$$\mathbf{r}'_d = \begin{pmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' & 0 \\ -\sin \theta' & \cos \theta' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{r}_d \quad (9)$$

$$\alpha_z = \tan^{-1} \frac{(r'_d)_z}{(r'_d)_x} \quad (10)$$

$$\alpha_y = -\tan^{-1} \frac{(r'_d)_y}{(r'_d)_x} \quad (11)$$

ここで各添え字は成分を表す．

なお、赤緯、時角は観測者に固定された天の座標で、真南が時角  $0^\circ$ 、天の赤道が赤緯  $0^\circ$  となる．赤緯は北方向が正、時角は西方向が正である．準静止衛星の軌跡を表す場合、この赤緯と時角を用いて表せば実際の見え方に近くなる．

数値計算する際は、軌道の半長軸の長さ  $a$  と地球半径  $R$  の比を代入する． $a$  は静止衛星の軌道半径に等しい．重力が向心力であることから次の関係式

$$G \frac{mM}{a^2} = ma \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad (12)$$

より、 $a = 6.6R$  と求まる． $G$  は万有引力定数、 $m$  は

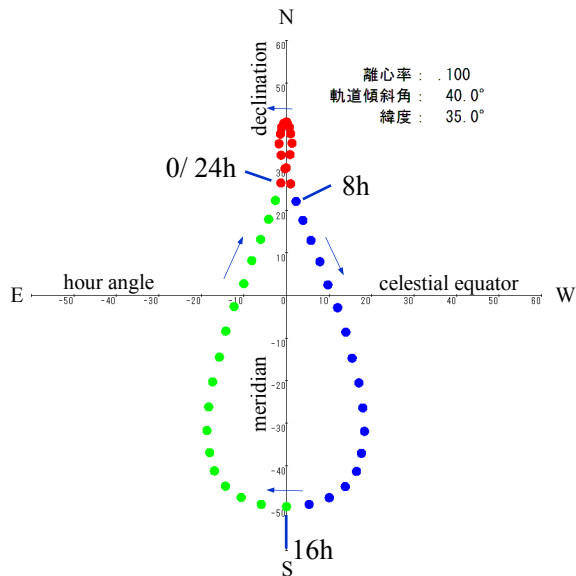


Fig. 3 Calculated trajectory of the quasi-zenith satellite 'Michibiki' with tilt angle of 40deg, and eccentricity of 0.1. Dots represent the

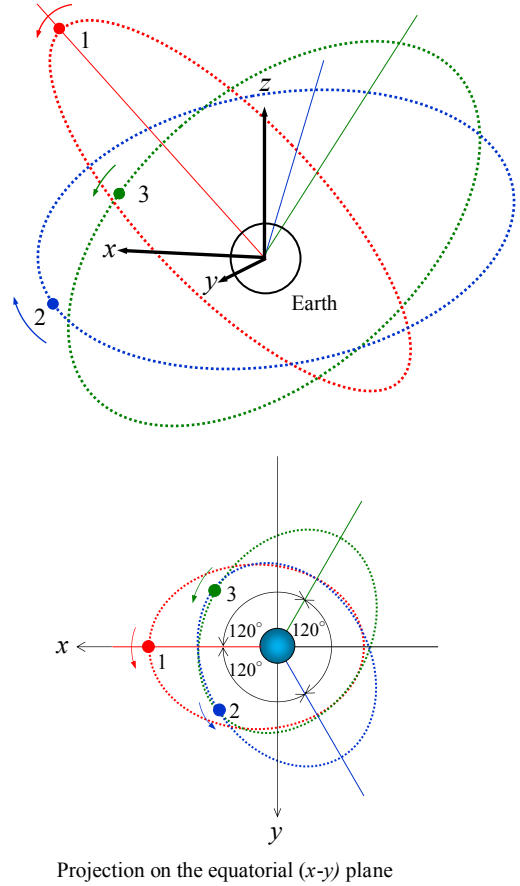


Fig. 4 Orbits of three quasi-zenith satellites. The eccentricity of orbit ellipses is exaggerated for easy understanding.

衛星の質量、 $M$  は地球の質量を表す．

衛星が天空に描く軌跡を求めるには方位だけの情報で十分なので、具体的な計算を行う際は、 $a = 1$ 、 $b = (1-e^2)^{1/2}$ 、 $c = e$  として簡略化した．

### 3. 軌跡の計算結果

JAXA のサイトによると準天頂衛星「みちびき」の軌道傾斜角は  $40^\circ$ 、離心率 0.1 である<sup>1)</sup>．「みちびき」の軌跡を計算した結果を図 3 に示す．観測者の緯度条件は  $35^\circ$  である．図では横軸が天の赤道、縦軸が子午線を表す．

計算で得られた軌跡を見ると北側がすぼんだ 8 の字型になっていることがわかる．位置算出の時間間隔は 30 分である．点が密集している北側のループではゆっくり移動して、天頂付近に長く留まっていることが分かる．詳しく見ると、周期の約 1/3 は北側のループに留まっていることがわかり、準天頂衛星の名称がついている由縁である．3 基の衛星を、赤道面との昇交点を  $120^\circ$  づつ変えた軌道に配置すれば、常に一基は天頂付近に存在することになる．この様子を図 4 に示す．JAXA の計画では、最終的には 4 基で構成する予定のようである．その場合、

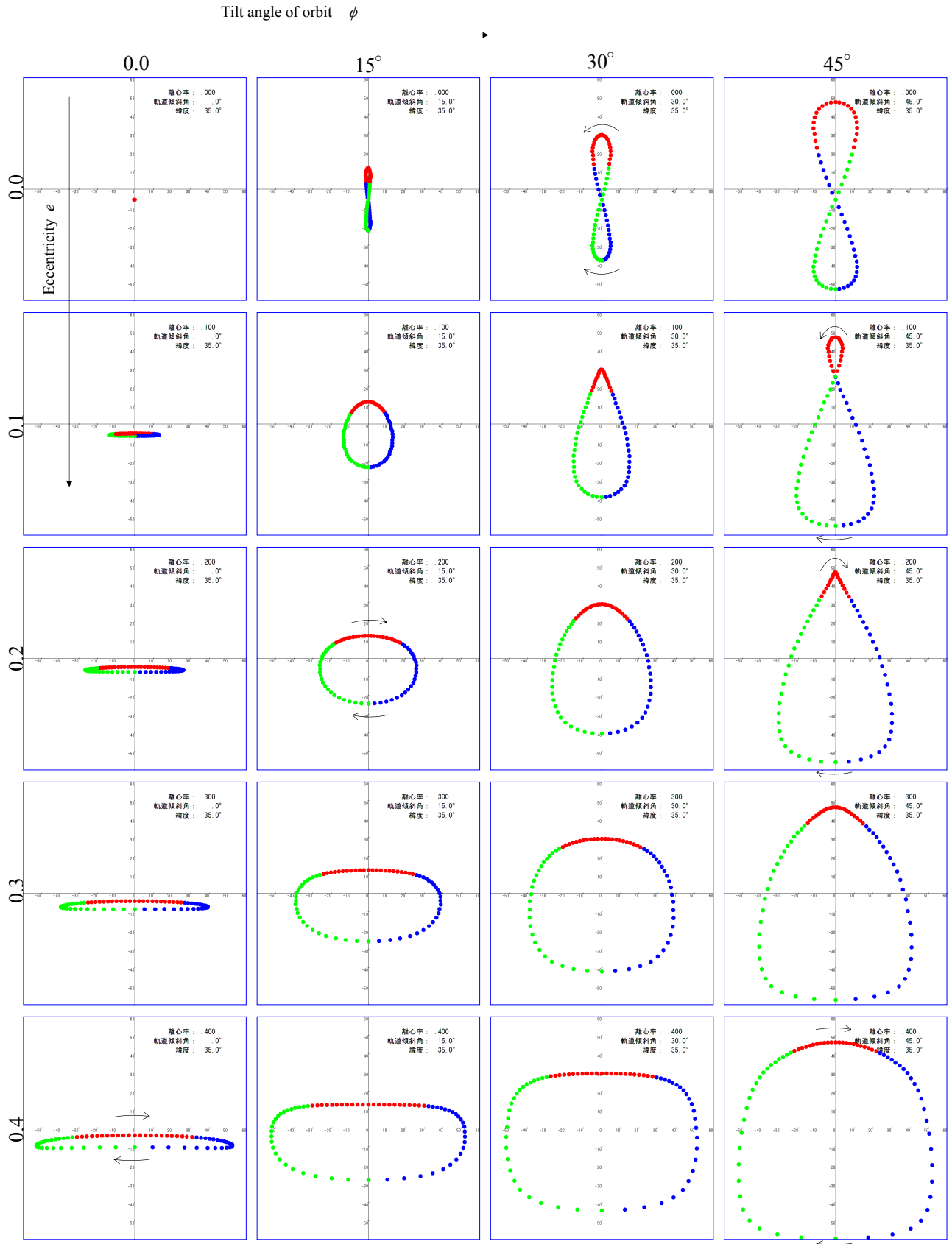


Fig. 5 Calculated trajectories of quasi-geostationary satellites

一基は静止軌道に置く計画のようである．なお，図4の軌道は正確ではなく3つの軌道の相対的な関係を把握するためにあえて離心率を大きく描いてある．離心率  $e = 0.1$  の軌道はほぼ真円で，赤道面への射影は地球を中心にしたときの動径方向につぶれた楕円になるのが正しい．

軌道傾斜角  $\phi$  を  $0^\circ$ ， $15^\circ$ ， $30^\circ$ ， $45^\circ$ ，離心率  $e$  を  $0$ ， $0.1$ ， $0.2$ ， $0.3$ ， $0.4$  と変化させた場合の準静止衛星の軌跡を算出して一覧にまとめたのが図5である．計算の時間間隔は  $20$  分で，観察者の緯度は北緯  $35^\circ$  である．軌道傾斜角や離心率の条件によって天頂付近に留まる時間が変化することを分かり易く示すため，8時間おきに衛星位置を表す点の色を変えて描画してある．

軌道傾斜角が  $0^\circ$ ，離心率が  $0$  は，静止衛星に対応するので，軌跡は南天の一点に静止する．計算結果は時角  $0^\circ$ ，赤緯  $-5^\circ$  の点であり，本計算の妥当性が確認される．

軌道傾斜角が  $0^\circ$  では軌道は赤道面に存在するので，軌跡を赤道上から観察すると天の赤道を東西方向に往復するように見える．高緯度側から見ると離心率が増すにしたがい遠地点と近地点までの距離の差が大きくなるので遠地点側は北へ，近地点側は南へずれ，南北につぶれた輪を描く．遠地点側は速度が低下するので，滞留時間が長く，近地点側では速度が増す．そのため南側は西から東，北側は東から西へと時計回りに軌跡を描く．

赤道上から観察する場合でも，軌道が赤道面から傾斜すると，赤緯方向に往復する動きが重なる．離心率が  $0$  でも，軌道が傾斜していると，赤緯の絶対値に対応して相対角速度が変わるため軌跡は赤緯方

向にも動きがみられ，軌跡は8の字を描く．軌道が赤道面を通過する際には斜めに横切るため，地球の自転に対する相対角速度は負になる．したがって赤道面を通過する際の軌跡は東から西の方向になる．8の字の北側のループは反時計回り，南側のループは時計回りとなる．

離心率が増すにしたがい，南北での軌跡の対称性が崩れ，北側にもう一つの焦点がある場合，北側のループが縮小する．離心率が  $0.2$  以上では北側のループは失われ，涙型に変形し，さらにおむすび型に変わる．

なお，本報告における計算は，描画も含めすべて十進BASIC<sup>2)</sup>を用いて行った．

#### 4. まとめ

高専3年生で学ぶケプラーの法則をもとに，地上から観察する際の準静止衛星（周回周期が地球自転周期に一致する衛星）が天空に描く軌跡を計算する方法を示した．

衛星と観察者がともに回転しているため天空に観測される軌跡を直感的に把握することは困難である．軌道傾斜角，離心率をパラメータに系統的に軌跡を求め一覧にすることで，見通し良く，衛星の軌跡の特性を把握することが可能になった．

#### 参 考 文 献

- 1) JAXA「みちびき」Webページ：<http://qz-vision.jaxa.jp/>
- 2) 「十進BASIC」Webページ：<http://hp.vector.co.jp/authors/VA008683/>

# 研 究 調 查 報 告

# 100kHz 域を利用した誘導型無電極ランプシステム

掛 橋 英 典 \*

## Induction-Coil Electrodeless Lamp System Using 100kHz Order Frequency

Hidenori KAKEHASHI

Induction-coil electrodeless Lamp systems provide some essential advantages compared to general fluorescent lamps , i.e. extremely long life, instant starting, and high system output. However, the conventional electrodeless Lamp system with outside wire winding is not sufficient for total efficiency because of using 13.56MHz frequency. So, the new electrodeless Lamp system that consists of a bulbous lamp with a re-entrant cylindrical cavity, a solenoid induction-coil with a ferrite magnetic core and 135kHz driving inverter, is proposed. This paper reports the structure and performance of the new system.

**Key words:** Induction-coil, electrodeless Lamp, re-entrant cylindrical cavity

### 1. はじめに

無電極ランプはランプ内部に電極を持たないため本質的に長寿命の特長をもち省メンテナンス、省資源に合致した次世代環境配慮光源として期待されている。誘導型無電極ランプは1990年に初めて外巻コイル方式の形態で一般照明用へ実用化され、駆動周波数は通信と競合しない国際的なISM (Industrial, Scientific, Medical) バンドである13.56 MHz が採用されていた<sup>1)</sup>。橋梁照明や壁面イルミネーションなどへ応用されているが、MHz 領域の点灯周波数を使用していたため損失が大きく総合効率は約70 lm/W 程度に留まっていた<sup>2)</sup>。その後、駆動周波数を低減する試みがなされ2.65 MHz や480 kHz、250 kHz など様々な周波数が検討された<sup>3)~5)</sup>。近年になって登場した135 kHz の誘導型無電極ランプシステムは、球状バルブの中心にフェライトコアコイルを配置した内巻コイル方式ランプにスイッチング動作を行う点灯回路を適用することによって高い総合効率を達成している<sup>6)~8)</sup>。今回、そのシステムのランプ構造、回路構成と性能について報告する。

### 2. 誘導型無電極ランプ

提案する誘導型無電極蛍光ランプシステムは、図1のようにランプとインバータ点灯回路から構成され、ランプは内壁面に蛍光体が塗布されたバルブと誘導コイルからなっている。バルブの中央にはキャビティと呼ばれる空間が設けられており誘導コイルはキャビティに内接するように配置されている。キャビティの中心にはバルブ形成過程で内部ガスを置換するためのガラス製排気管がバルブ空間から下方へ突出している。誘導コイルは、

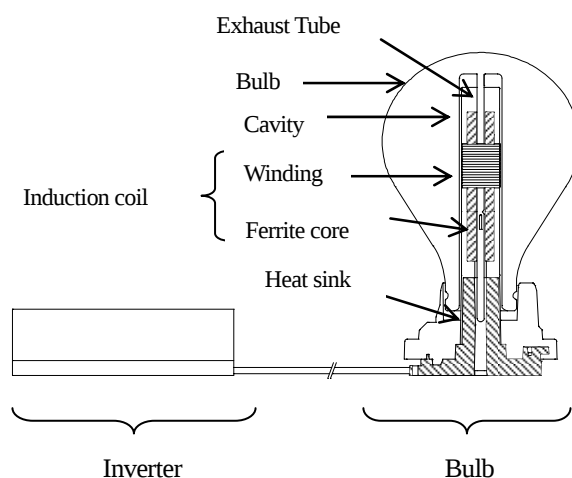


図1 システム構成

原稿受付 平成26年8月5日

\* 電気電子工学科

バルブからの熱を排出するために金属放熱体と放熱体に装着された円筒状フェライトコアおよびコア外周の巻線から構成され、コアの軸方向と巻線軸方向は一致するため開磁路のコイル構造となっている(図2)。インバータからの高周波出力で誘導コイルが励磁され、誘導磁気結合によってバルブ中のプラズマにうず電流が形成される原理で電力が供給される。

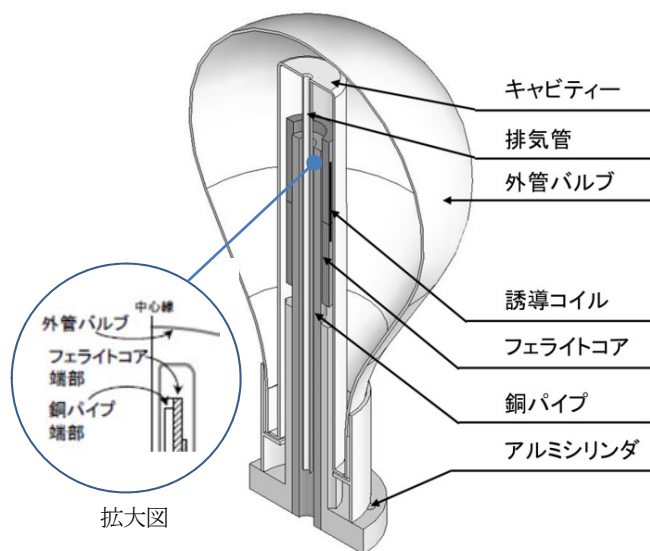


図2 バルブ断面図

駆動周波数の選択については、点灯回路の効率、無電極ランプの発光効率、無電極ランプの始動性、輻射ノイズなどを考慮する必要がある。点灯回路に関し、駆動周波数を従来の 13.56 MHz から数十 kHz～数百 kHz まで下げるによりスイッチング動作を行うインバータ回路の適用が可能となり半導体や共振用インダクタで発生する損失が大幅に低減されることにより回路効率は大きく向上する。次に、無電極ランプの発光効率について駆動周波数との関係を図3に示す。ここで無電極ランプの発光効率とは、ランプ光出力を誘導コイルに供給する電力で割ったものと定義している。駆動周波数が 130 kHz より低くなると急激に発光効率が低下しており、誘導電界の減少に伴うランプインピーダンスの変化や誘導コイルにおける損失増加の影響と推測される。

図4は無電極ランプの始動電圧について駆動周波数をパラメータとして示したもので、150 kHz 以下に周波数を下げると始動電圧が急激に高くなっていることがわかる。この現象は、周波数が高い場合は誘導性放電開始電圧が支配的であるため始動電圧が比較的低い値を保っているのに対し、周波数が低くなると容量性放電開始電圧が支配的

になって始動電圧が高くなったためとみられる。

輻射ノイズについては、ラジオ放送で用いられる周波数帯域 500 kHz～数 MHz への影響を避ける必要がある。とくに駆動周波数の 3 倍波がこのラジオ周波数帯に干渉しないことを考えると 150 kHz 以下が望ましい。

以上、回路効率、発光効率、ランプの始動性、輻射ノイズの観点から無電極ランプの駆動周波数として 135 kHz を選択している。

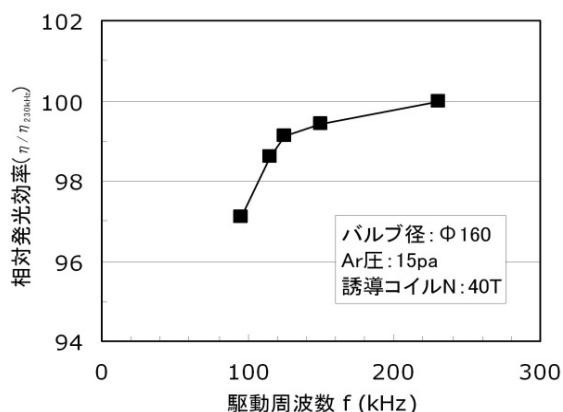


図3 駆動周波数と発光効率

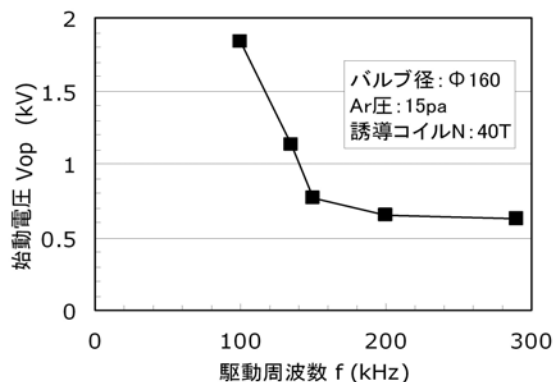


図4 駆動周波数と始動電圧

誘導コイルは球状バルブの中央に位置するため点灯中に周囲に発生する放電プラズマからの熱を受け百数十℃を超える高温環境に曝される。図2において誘導コイルに入るプラズマからの定常的な熱流は銅パイプ、アルミシリンダを経て熱伝導により外部へ排熱される構造としている。誘導コイルコアはそのキュリー温度が十分高く動作温度において高い飽和磁束密度を有することが必要である。また、駆動周波数 135kHz における高温域でのコアロスが低いことが望まれ、Mn-Zn 系フェラ

イトを採用した．銅パイプを取り囲む形で半円筒形のフェライトを突き合せて銅パイプに平行して軸方向に長い開磁路コアを形成している．誘導コイルの定常電流によりコアの磁力線は開磁路コアの内部では軸方向に沿い，外部ではコア片端部から他端へ向かってバルブ空間を通る連続したループを描く．この状態では，コア端部において磁束が空間に拡がるため金属が近接すると金属に垂直な磁束成分が顕著となる．この成分は金属中にうず電流を生じ結果的に大きな損失の要因となる．したがって，フェライトコアと銅パイプの位置関係は重要である．試作検討の結果，図2の誘導コイル上側において銅パイプの端部よりもフェライトコアの端部を上方に配置させることにより損失が低減できることがわかった<sup>9)</sup>．(拡大図参照)

誘導コイルの巻線については，動作温度よりも高い耐熱温度をもつ絶縁被覆材料を用いて信頼性を確保した．駆動周波数 135kHz で開磁路コイルで磁束はバルブ空間に広く分布することから表皮効果や近接効果の影響を考慮し，巻線交流損失を低減するために細線を束ねたリッツ線を用いることとした．

### 3. インバータ

図5にインバータ回路のブロック図を示す．無電極ランプを点灯するインバータ回路の基本機能として，ランプ始動のために高電圧を発生させること，点灯中に安定した電力を供給することの2点が挙げられる．始動における高電圧発生は誘導コイルを含む共振回路に依っているが，低周波であることを考慮すると回路には高い昇圧性能が要

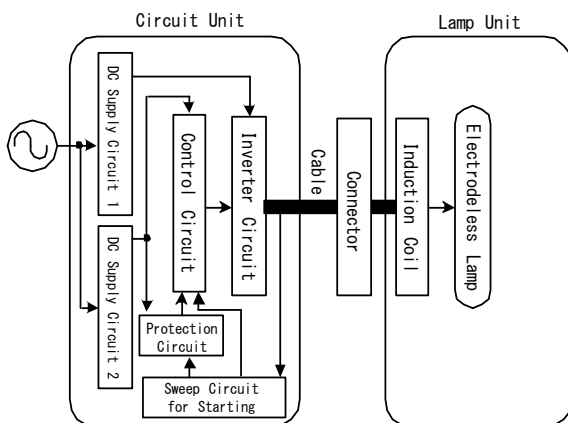


図5 インバータ回路のブロック図

求され結果的に共振周波数近傍の動作点が利用される．ところが，回路を構成する素子にばらつきがあるため駆動周波数を上記動作点に固定するこ

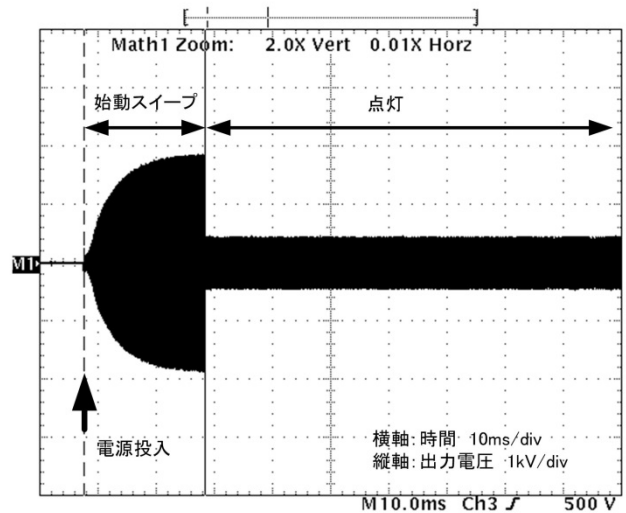


図6 始動時のインバータ出力電圧波形

とは実用上困難であり<sup>10)</sup>，始動時には，高い周波数から点灯中の周波数へ駆動周波数を徐々にシフトさせて動作点に漸近させていく始動スweep方式を採用している（図6）．この回路の採用により駆動周波数 135 kHz でもランプ始動の安定動作が可能となった．

### 4. 調光回路

駆動周波数の切替制御を行い，無電極ランプが点灯、消灯を繰り返す点滅調光方式を採用している．図7は調光動作の誘導コイル電圧を示しており，点灯期間  $T_{on}$  では駆動周波数  $f_{on}$  (135kHz)、消灯期間  $T_{off}$  では駆動周波数  $f_{off}$  ( $>135kHz$ )として周期的に駆動周波数を切り替えている．なお点灯期間の駆動周波数  $f_{on}$  は，誘導コイルを含む共振回路の共振周波数付近に選択され，消灯期間の駆動周波数  $f_{off}$  は無電極ランプが点灯維持できない範囲に設定される．また，点滅の繰り返し周波数はちらつきを感じない周波数が選択され，点

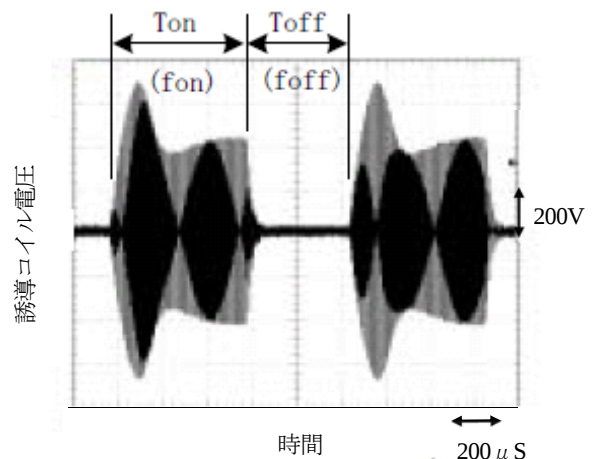


図7 調光時の誘導コイル両端電圧波形

灯期間 Ton、消灯期間 Toff のデューティー比は所定の調光出力となるように決定されている。この点滅調光方式により 50% 段調光タイプの 50W 無電極ランプシステムを試作したところ安定して調光動作が可能であることを確認できた。調光機能を有することによりセンサやタイマと組み合わせることで、さらに省エネルギーに寄与するものと考えられる。

## 5. システムの性能

誘導型無電極蛍光ランプシステムの外観を図 8 に性能を表 1 に示す。電源電圧 AC100(200)～242 V の広範囲な入力電圧に対応でき、また駆動周波数を 135 kHz に選択してスイッチング回路を適用したことにより、50W において 80lm/W を超える誘導型無電極ランプとして世界最高の総合効率が得られている。高い総合効率を達成できたことにより、照明機器のランニングコストをさらに低減できるとみられる。同等出力の水銀灯を置き換えるとシステム電力を大幅に低減でき一層の CO<sub>2</sub> 排出削減に貢献できる。

表 1 システムの性能

|        | 新方式      | 従来方式      |
|--------|----------|-----------|
| 駆動周波数  | 135kHz   | 13.56MHz  |
| 発振回路   | CR発振方式   | 水晶発振方式    |
| 回路効率   | 91%      | 78%       |
| 総合効率   | 82.7lm/W | 71.1 lm/W |
| 始動スロープ | あり       | なし        |

## 6. ま と め

従来の外巻コイル方式からフェライトコアを用いた内巻コイル方式に変更し、駆動周波数を 13.56 MHz の約 100 分の 1 である 135 kHz にまで下げてスイッチング技術を適用することにより点灯システムの損失を大幅に低減できることがわかった。その結果、光出力 50W で 80 lm/W を越える総合効率を有する誘導型無電極ランプシステムを実用化することができた。加えて、さらなる省エネルギーニーズに対応するために無電極ランプ固有の点滅調光技術も開発できた。この誘導型無電極ランプシステムは、高効率であるとともに 6 万時間という長寿命を実現しているため一般の蛍光灯や

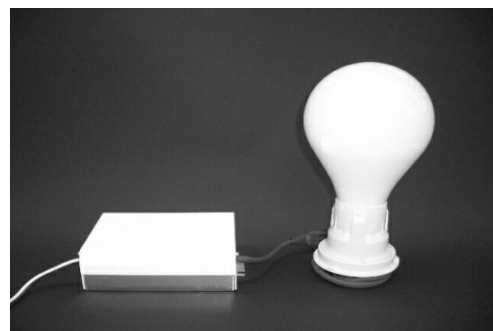


図8 誘導型無電極ランプシステム外観

水銀灯と比べてランプ交換の頻度も少なくかつ産業廃棄物も減少し、省エネルギー・省メンテナンス・省資源に広く貢献できる。今後街路灯・トンネル灯など、景観照明や交通照明をはじめ様々な用途への展開普及が期待される。

## 参 考 文 献

- 1)Shinomiya et al. : The Electrodeless Fluorescent Lamp “Everlight”, Technical Report of Matsushita Electric Works, vol.47, pp. 3-7 (1994) .
- 2)Masumoto et al. : Development of lighting system for high power electrodeless fluorescent lamps, Proc. of 2000 Annual Conf. of IEIJ, pp.59 (2000) .
- 3)Shinomiya: Electrodeless Fluorescent Lamps, J. Illum. Engng. Inst. Jpn., vol. 82-6, pp.394-7 (1998) .
- 4)Beppu : New Lighting of Town — The Trend of Lighting Fixture —, J. Illum. Engng. Inst. Jpn., vol. 84-9, pp. 694-7 (2000) .
- 5)Arakawa et al. : Low Frequency (480kHz) Driver Electrodeless Self-Ballasted Fluorescent Lamps, J. Illum. Engng. Inst. Jpn.,vol. 87-12, pp. 746-750 (2003) .
- 6)Kido et al. : High Efficacy & Low Frequency Electrodeless Lamp System ‘Ever light’, Technical Report of Matsushita Electric Works, vol.53. No.1, pp. 10-15 (2005) .
- 7)Hiramatsu et al. : High-Output Electrodeless Fluorescent Lamp System, Technical Report of Matsushita Electric Works, vol.55. No.3, pp. 18-22 (2007) .
- 8)Makimura et al. : A study of electronic ballast for low frequency, low power electrodeless lamp, Proc. of 2007 Annual Conf. of IEIJ, pp.67 (2007) .
- 9)H.Kakehashi,K.Hiramatsu,S.Hizuma,O.Popov,R.Chandler and J.Maya, : Effect of Induction Coil Factor on Efficacy of ~ 100kHz Electrodeless Fluorescent Lamps”, Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, pp.441-442, (2004) .
- 10)Kurati et al. : Operating Frequency Control for Low-frequency Electrodeless Discharge Lamp Ballast, Proc. of 2003 Annual Conf. of IEIJ, pp.37 (2003) .

# モンゴル語 - 日本語変換に関する基礎的検討

大平 栄二\* 上谷 恵里奈\*\* Nurul Sakinah Binti Kamaruddin\*\*\*

## A basic study on Mongolian-Japanese translation

Eiji OHIRA, Erina JOTANI and Nurul Sakinah Binti Kamaruddin

From December 2009, Tsuyama National College of Technology has signed an international exchange agreement for research exchange with Mongolian National University of Science and Technology, Uburuhangai University. As a part of the agreement, in this laboratory, a research about translating Mongolian language into Japanese language was started.

Both Mongolian and Japanese are known as agglutinative language which means a language that the back of each word is continued by a particle or a suffix, and they also follow the same type of sentence structure that called SOV. But, if Mongolian's noun and any particle are attached together, the noun will change according to the particle and letter elimination. First, this research only focuses on creating a Mongolian morphological analysis method and a Mongolian-Japanese word dictionary database using a Mongolian sightseeing guidebook. Then, the system that converts Mongolian to Japanese is created. A total of 665 words in the guidebook were used for the experiments. Experiments confirmed the validity of morphological analysis of Mongolian noun phrase using the knowledge of this research.

**Key words:** Mongolian, Japanese, Translation, morphological analysis

### 1. はじめに

本校では、2009 年 12 月からモンゴル国立科学技術大学、同大学ウブルハンガイ校と国際交流協定を締結し、研究の交流を開始した。その一環として、本研究室では、2012 年度から、モンゴル語 - 日本語変換の研究を開始した<sup>1)</sup>。モンゴル語は、日本ではあまり研究が進んでおらず、資料が少ないため、翻訳した結果が正しいかどうか判断することが難しい。そのため、まずモンゴル語から日本語への変換法に対する検討から開始した。

モンゴル語<sup>2)</sup>はいわゆる「アルタイ語族」に属し、文法構造の面で日本語に類似するところが多く、日本語と同様に語順類型が SOV である。また、語幹に語尾や接頭辞をつけてどんどん拡大していくタイプの言語であり、類型的にも日本語と同じ膠着言語である。膠着言語とは、文法的な意味を表す助詞や活用語尾などの接辞が、実質的な意味を表す名詞

や活用語の語幹などの語に膠着する言語のことである。したがって、1 つ 1 つの単語を直訳することでモンゴル語から日本語にある程度翻訳できるのではないかと考えた。

このため、本研究では、まずモンゴル語の形態素解析を実現し、切り出された形態素に日本語見出し語を付与するシステムの実現を目的とする。前述したように、モンゴル語は、日本ではあまり研究が進んでおらず、資料が少ない。このため、本校モンゴル留学生の協力を得て、モンゴル語テキスト<sup>3)</sup>の翻訳を行い、文法規則の整理・確認を行った。また、本システムを実現するためには、辞書データベースが不可欠である。本研究では、共同研究先のウブルハンガイ校が作成した、約 1 万語のモンゴル語 - 英語辞書データベースを用いて、日本語見出し語の追加や、正規化を行うことにより、日本語とモンゴル語の単語辞書データベースを作成することにした。

### 2. モンゴル語について

#### 2.1 モンゴル語文法

モンゴル語の表記は、ロシア語のアルファベットにモンゴル語特有の 2 文字「ө」と「γ」を加えたものであり、母音 13 字、子音 20 字の計 33 文字と記

原稿受付 平成 26 年 8 月 31 日

\* 情報工学科

\*\* 情報工学科 平成 25 年度卒業生

\*\*\* 情報工学科 平成 24 年度卒業生

号文字「**ь** (硬音符)」と「**ь** (軟音符)」の2つからなる<sup>4)</sup>。母音と子音を以下に示す。

母音 : **а, о, у, э, ө, ү, е, и, ю, я, е, ё, ю**

子音 : **б, в, г, д, ж, з, п, р, с, т, ф, з, к, л, м, н, х, ц, ч, ш, щ**

前述したように、モンゴル語と日本語の共通点の一つは語順類型がSOVである。他の言語、例えば英語 (語順類型はSVO) との比較のため、以下に例を示す。

(例)

モンゴル語 : **би номыг авав**

日本語 : 私は本を買った

英語 : I bought a book

上記において**би**は「私」、**номыг**は「本を」、**авав**は「買った」に対応する。述語が必ず文の最後に置かれ、修飾語は必ず被修飾語の前に置かれる。また、モンゴル語と日本語は膠着言語であり、名詞などの語幹に、格を表す語尾 (「は」や「を」) や、数を表す語尾が接続され名詞句を形作る。以下に、その例を示す。

(例)

- 「**номыг**」本を  
= 語幹「**ном**」本 + 「**ыг**」を
- 「**өдрийн**」日の  
= 語幹「**өдөр**」日 + 「**ийн**」の
- 「**хүүхдүүд**」子どもたち  
= 語幹「**хүүхэд**」子ども + 「**үүд**」複数形

## 2.2 名詞句における変形

前述したように、モンゴル語は、語幹にさまざまな語尾を付けて名詞句等を形作る膠着言語である。しかし、日本語と異なり、語尾が接続すると名詞の形が変形することがある<sup>3)7)</sup>。その変形は、一定の規則にしたがって起こる。表1に代表的な表層格の観点から名詞の変形について整理した結果を示す。

表1において、○はその変形が生じることを示す。以下にその詳細について説明する。なお、日本語では主格助詞として、「は」または「が」が使われるが、モンゴル語では、主格の語尾は、形のないゼロ

表1 語尾の分類の一覧

| 語尾の分類 | モンゴル語                          | 日本語  | г交代 | н交代 | 脱落 | 追加 |
|-------|--------------------------------|------|-----|-----|----|----|
| 主格    | なし                             | は、が  | ×   | ×   | ×  |    |
| 対格    | <b>ыг, г, ийг</b>              | を    | ○   | ×   | ○  |    |
| 属格    | <b>ын, ы, н, ийн, ий, (нь)</b> | の    | ○   | ○   | ○  |    |
| 与位各   | <b>д, т</b>                    | に    | ×   | ○   | ×  |    |
| 奪格    | <b>аас, оос, эс, өөс</b>       | から   | ○   | ○   | ○  |    |
| 造格    | <b>аар, оор, ээр, өөр</b>      | で    | ○   | ×   | ○  |    |
| 共同格   | <b>тай, той, тэй</b>           | と    | ×   | ×   | ×  |    |
| 方向格   | <b>руу, луу</b>                | へ    | ×   | ×   | ×  |    |
| 欠如格   | <b>гүй</b>                     | なしで  | ×   | ×   | ×  |    |
| 様態格   | <b>ийг</b>                     | のように | ×   | ×   | ×  |    |

語尾である。すなわち、語幹には何も付かない。この点は英語と似ている。

### (1) 語幹の交代

モンゴル語では、特定の語尾を接続するときだけに現れる別の形の語幹を交代語幹と呼ぶ。交代語幹には、「**хөдөөн**」や「**уулан**」のように末尾に「**н**」が出てくるH交代語幹と、「**санг**」のように末尾に「**г**」が出てくるG交代語幹とがある。

#### (a) H交代 :

- 「**хөдөөнөөс**」田舎から  
= 「**хөдөө**」田舎 (H交代語幹 : **хөдөөн**) + 「**өөс**」から
- 「**ууланд**」山に  
= 「**уул**」山 (H交代語幹 : **уулан**) + 「**д**」に  
ただし、以下のように、H交代語幹を持つにも関わらず、属格の場合にだけ交代しない語がある。このように、不規則な活用をするため規則性がなく、ひとつずつ覚えるほかない。
- 「**ханын**」壁の  
= 「**хана**」壁 (H交代語幹 : **ханан**) + 「**ын**」の
- 「**асуултын**」質問の  
= 「**асуулт**」質問 (H交代語幹 : **асуулт**) + 「**ын**」の

#### (b) Г交代 :

- 「**сангаас**」募金から  
= 「**сан**」基金 (G交代語幹 : **санг**) + 「**аас**」から
- 「**шуудангийн**」郵便局の  
= 「**шуудан**」郵便局 (G交代語幹 : **шууданг**) + 「**ийн**」の

対格において、「**г**」が接続するとき、**г**交代語幹の末尾の「**г**」は助詞「**г**」が接続するときに脱落する。また、G交代において、元の語幹にそのまま語尾「**г**」を接続したのと同じ綴りになる。例えば、

- 「**дэнг**」ランプを  
= 「**дэн**」ランプ (G交代語幹 : **дэнг**) + 「**г**」を (г脱落)

交代語幹<sup>8)</sup>は、古いモンゴル語の形の名残であるため、現代ではあまり使用されていない語である。現代のモンゴル語では、ふつうの語幹ではなく交代語幹を使うことによって語の意味を区別したりする新たな用法が発達しているようである。交代語幹は、変形の仕方が不規則であるため、あらかじめ辞書データベースに交代語幹を登録する必要があると現時点では考えている。

### (2) 末尾母音の脱落

対格、属格、奪格、造格語尾が付く際には、末尾の母音が脱落する<sup>7)</sup>。これは、末尾母音の脱落と呼ばれ、「**и**」以外の短母音で終わる単語に長母音で始

まる語尾が接続される際は、最後の母音が脱落する。用法の例を以下に示す。

(例)

- ・「чаргаар」そりで  
= 「чарга」そり + 「аар」で (a 脱落)
- ・「хөрөнгийн」財産の  
= 「хөрөнгө」財産 + 「ийн」の (ө 脱落)
- ・「ханаар」壁で  
= 「хана」壁 + 「аар」で (a 脱落)

### (3) 未聞母音の脱落

未聞脱落とは、子音で終わる単語に、長母音で始まる語尾が接続される際に、末尾（子音）の前の母音である未聞母音が脱落する変形である<sup>7)</sup>。用法の例を以下に示す。

(例)

- ・「олноос」多数より  
= 「олон」多数 + 「оос」より (o 脱落)
- ・「авраад」助けてから  
= 「авар」助けて + 「аад」から (a 脱落)
- ・「хөгжмийг」楽器を  
= 「хөгжим」楽器 + 「ийг」を (и 脱落)

### (4) 末尾短母音の追加

語尾の接続により、文字の脱落のみでなく、文字が追加される場合がある。これは、末尾母音の脱落や未聞脱落と同様に脱落母音の規則に含まれる。今回のテキスト中では、次の与位格語尾が付く際に追加されることがわかった。

(例)

- ・「улсад」国に = 「улс」国 + 「д」に (a 追加)
- また、子音で終わる単語に子音で始まる語尾を付ける際は、子音の前の母音が脱落されて、最後に短母音が追加される<sup>8)</sup>。用法の例を以下に示す。

(例)

- ・「гэрийнхнь」家の  
= 「гэрийн」家 + 「нь」の (x 追加)
- ・「сурагчдад」生徒たちに  
= 「сурагчид」生徒たち + 「д」に (a 追加)

### (5) その他の変形

上記で説明した変形規則以外に、名詞の変形として複数形（「語幹」 + 「複数形」）の場合があり、脱落のみでなく、母音の追加が生じる場合もある。後述する実験で用いたテキスト中に現れた複数形を含んだ名詞の変形を表2に示す。

表2 その他の変形

| 変形後のモンゴル語           | 語幹 + 複数形 + 語尾                   | 脱落・追加 |
|---------------------|---------------------------------|-------|
| 「аймгуудыг」民族を      | 「аймаг」民族 + 「ууд」複数形 + 「ыг」を    | 「а」脱落 |
| 「Монголчуудын」モンゴルの | 「Монгол」モンゴル + 「ууд」複数形 + 「ын」の | 「ч」追加 |

## 2.3 動詞句における変形

動詞は、その語基に「-х、-ах」などが接続されたものが見出し語として辞書に登録される。これを不定形と呼ぶ。今回利用したウブルハンガイ校のモンゴル語 - 英語の辞書データベースでも不定形が見出し語として登録されている。以下に例を示す。

(例)

гүй-х 走る      алх-ах 歩く  
унш-их 読む      ид-эх 食べる

動詞句<sup>9)-11)</sup>も日本語と仕組みが似ており、「語基」 + 「語尾」で構成される。日本語の動詞「する」が、「した」、「している」、「すれば」と活用するように、モンゴル語もさまざまな形に変形する。「食べる」の不定形「идэх」を例に説明する。

(例)

|      |             |       |
|------|-------------|-------|
| 現在   | ид-нэ       | 食べる   |
| 過去   | ид-сэн      | 食べた   |
| 現在進行 | ид-эж байна | 食べている |
| 疑問   | ид-эх үү    | 食べるか  |
| 否定   | ид-эхгүй    | 食べない  |
| 意志   | ид-ье       | 食べよう  |
| 仮定   | ид-вэл      | 食べれば  |

「食べる」の語基「ид」に対して、現在を表す語尾や仮定を表す語尾などが接続する。モンゴル語では、動詞は活用した形で使われ、不定形のまま使われることはほとんどない。動詞語基に接続する動詞語尾の分類を表3に示す。以下では、このうち、今回検討したテキスト中で確認できた動詞句を中心に、代表的な動詞語尾の観点から整理した結果の概要を示す。詳細は、文献12を参照いただきたい。なお、活用の変化は次の形式で記述する。

- ・「モンゴル語動詞句」日本語  
= 「不定形（語基）」日本語 + 「語尾」
- (例)
- ・「очсон」訪問した  
= 「очих (оч-)」訪問する + 「сон」一般過去

表3 動詞語尾の分類の一覧

| 語尾の分類       | モンゴル語                                               | 日本語      |
|-------------|-----------------------------------------------------|----------|
| 過去          | сан, сэн, сон, сөн, чээ, жээ, в, лав, лээ, лоо, лөө | ～した      |
| 現在・未来       | на, нэ, но, нө                                      | ～する      |
| 現在進行形・許可・依頼 | ч, ж, н                                             | ～して      |
| 習慣          | даг, дог, дэг, дөг                                  | (いつも)～する |
| 否定          | гүй, аагүй, сангүй, хүй                             | ～(し)ない   |
| 仮定          | бал, бэл, бол, бөл, вал, вэл, вол, вөл              | ～すれば     |
| 意志          | я, е, ё                                             | ～(し)よう   |
| 願望          | маар, моор, мээр                                    | ～したい     |
| 依頼          | аарай                                               | ～してください  |

## (1) 過去

モンゴル語では、過去を表す時制として一般過去、伝聞過去、体験過去、文書的な過去の4種類がある。

(a) 一般過去は、「動詞語基」+「сан (сэн、сон、сөн)」で構成される。用法例を以下に示す。

(例)

・「ирсэн」来た

= 「ирэх (ир-)」来る+「сэн」一般過去

(b) 伝聞過去は、自分が体験していない他人から伝聞した動作や歴史的な出来事などを表すために用いられる。「語基」+「жээ (чээ)」で構成され、「жээ」は、「-л、м、в、нгおよび母音」で終わる動詞語幹の場合に接続される。また「чээ」は、「-б、г、р、с、д」の子音で終わる動詞語幹の場合に接続される。用法例を以下に示す。

(例)

・「иржээ」来たようだ

= 「ирэх (ир-)」来る+「жээ」過去

(c) 体験過去は、「語基」+「лаа (лээ、лоо、лөө)」で構成され、話し手がその動作を自身で体験や見聞したことを表す。

(例)

・「сонслоо」聞いた

= 「сонсох (сонс-)」聞く+「лоо」過去

・「нүүх боллоо」引越しをすることになった

= 「нүүх (нүү-)」引越しする+

「боллоо」(「бол」なる+「лоо」体験過去)

後者の例に示すように「不定形」+「боллоо」で、日本語の「何々をすることになった」という意味を表す。このような場合には、不定形が使われるようである。

(d) 文書的な過去は、「語基」+「в」で構成され、比較的中立的で客観的な文章の過去または近い過去に起こった動作を表す。

(例)

・「харав」見た

= 「харах (хара-)」見る+「в」過去

## (2) 現在・未来

モンゴル語では、現在と未来の区別はなく、過去ではないものは非過去と呼び、同じ語尾「на (нэ、но、нө)」が接続する。それゆえ、非過去の終止形は、すべて形の上で過去以外の時制を区別しない。

(例)

・ Энэ загас мах иднэ. : この魚は肉を食べる。

(恒常的な動作)

・ Аав маргааш ирнэ. : お父さんは明日来る。

(未来)

## (3) 否定

他の語尾では、語基の変形はなかったが、否定形の語尾では、語基が変形する場合がある。否定形の

語尾は3つあり、過去の否定には、「-аагүй」と「-сангүй」がある。「-аагүй」は単純な過去の否定に用いられ、「-сангүй」は「起こるはずの出来事が最終的に起こらなかった」という価値判断を含んだ否定を表す。また、非過去の否定形は「-хгүй」語尾を用いる。語幹の種類によっては、以下のように語基や語尾に変形が生じる。

(a) 否定形 -аагүй が接続する場合

1) 短母音で終わる語基の場合は、その短母音を脱落させたうえで接続する。

・「санаагүй」思わなかった

= 「санах (сана-)」思う+「аагүй」

(a 脱落)

2) я・ё で終わっている語基の場合は、「-аагүй」

の形を「-агүй」とする。

・「хаяагүй」捨てなかった

= 「хаях (хая-)」捨てる+「агүй」

3) 長母音または二重母音で終わる語基の場合は、子音 г が繋ぎとして現れる。

・「ороогогүй」包まなかった

= 「ороох (ороо-)」包む+「оогүй」

(г 追加)

4) ь で終わる語基の場合は、「-аагүй」を接続した際にできる綴り「-ьяагүй」の ья の部分を母音字 и に変え「-иагүй」にする。

・「тавиагүй」置かなかった

= 「тавиагүй」

= 「тавих (тавь)」置く+「аагүй」

(b) 否定形 -хгүй が接続する場合

1) 子音で終わる語基の場合は、それら語尾の直前に必ず短母音を挟む。

・「уншихгүй」読まない

= 「унших (унш-)」読む+「хгүй」

2) ь で終わる語基の場合は、語基末の ь が и に変わる。

・「урихгүй」招かない

= 「урих (урь-)」招く+「хгүй」

## 3. 評価実験

## 3.1 システム概要

本システムの概要を図1に示す。まず、入力されたモンゴル語テキスト(図2参照)を1行ずつに読み込み、スペースやカンマ(,)で1単語ずつ切り出す。そして、切り出された単語で辞書データベースを検索し、辞書にマッチングする単語があれば、その日本語見出し語を出力する。辞書に該当する単語がない場合は、単語の末尾に助詞が付いているか調

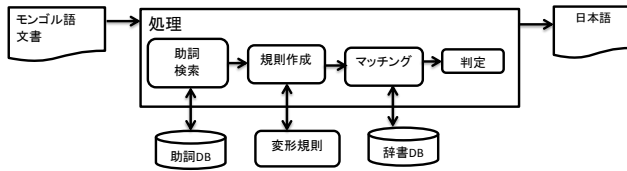


図1 システムの概要

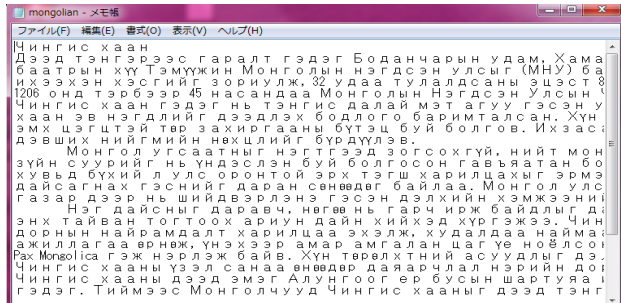


図2 モンゴル語テキスト

べ、助詞の削除を行う。名詞句の場合は、名詞に助詞が付くと、名詞の形が変形する場合がある。そのため、変形規則を作成し、マッチング処理部で、変形規則に基づいて辞書データベースから単語を検索して、日本語の単語見出し語を出力する。今回、変形規則は、末尾母音と未聞母音の脱落のみに対応している。本システムは Visual Basic (以下 VB と略す) で作成した。

### 3.2 辞書データベース

本研究で用いた辞書データベースは、表 4 に示す共同研究先のモンゴル国立科学技術大学のウブルハンガイ校が作成した辞書データベースを基にしている。この辞書データベースは、英語 - モンゴル語のみの辞書であるため、日本語の見出し語は登録されていない。また、モンゴル語の欄は、1 行に対して複数の単語が入っており、第 1 正規化を満たしていない。そのため、表 5 に示すように、日本語の見出し語の登録および正規化を行い、辞書データベースを作成する。現在、辞書データベースには、約のべ 2 万単語が登録されており、現時点で約 80% の日本語の見出し語登録および正規化が完了した。

### 3.3 実験と考察

今回対象とした観光ガイドブックのテキスト 3) の

表 4 元の辞書データベース

| english | short_name | japanese | japanese2 | mongolian  | parts_of_spe |
|---------|------------|----------|-----------|------------|--------------|
| fact    |            | 事実       |           | тнэн учир  | 0            |
| fact    |            | 事実       |           | тнэн байдл | 0            |
| fact    |            | 事実       |           | факт       | 0            |
| factor  |            | 要因       |           | нөхцөл     | 0            |
| factor  |            | 要因       |           | хүчин зүйл | 0            |
| factor  |            | 要因       |           | хичин зүйл | 0            |
| factor  |            | 要因       |           | тржилэгч   | 0            |
| factory |            | 工場       |           | йлдвэр     | 0            |
| factory |            | 工場       |           | фабрик     | 0            |
| factory |            | 工場       |           | завод      | 0            |
| factual |            | 事実の      |           | тнэн       | 3            |
| factual |            | 事実の      |           | баримттай  | 3            |
| faculty |            | 能力       |           | чадал      | 0            |
| faculty |            | 能力       |           | чадвар     | 0            |

表 5 日本語見出し語入力および正規化後の

辞書データベース

| english | short | japanese | japanese2 | mongolian  | parts_of_spe |
|---------|-------|----------|-----------|------------|--------------|
| fact    |       | 事実       |           | тнэн учир  | 0            |
| fact    |       | 事実       |           | тнэн байдл | 0            |
| fact    |       | 事実       |           | факт       | 0            |
| factor  |       | 要因       |           | нөхцөл     | 0            |
| factor  |       | 要因       |           | хүчин зүйл | 0            |
| factor  |       | 要因       |           | хичин зүйл | 0            |
| factor  |       | 要因       |           | тржилэгч   | 0            |
| factory |       | 工場       |           | йлдвэр     | 0            |
| factory |       | 工場       |           | фабрик     | 0            |
| factory |       | 工場       |           | завод      | 0            |
| factual |       | 事実の      |           | тнэн       | 3            |
| factual |       | 事実の      |           | баримттай  | 3            |
| faculty |       | 能力       |           | чадал      | 0            |
| faculty |       | 能力       |           | чадвар     | 0            |

665 単語のうち、形態素解析できた単語は約 80%

(名詞句 73%、動詞句 7%) で、全く解析できない単語が残り 20%であった。ここで、今回形容詞や副詞の活用はなかったため、名詞句に含めてカウントしている。解析できた動詞句は、すでに活用した形式で辞書に登録されていたケースと、過去形で例に示した不定形のままの形で使われていたケースである。名詞句の解析結果の詳細を以下に示す。

(1) 交代語幹: 今回、テキストを調べた結果、交代語幹は次の 1 例のみであった。

- ・「Хүннүгийн」フンスの  
=「Хүннү」フンス (Г 交代語幹: Хүннүг)  
+「ийн」の (г 追加)

「Хүннү」フンスは、昔の地名であることから、このような交代が利用されていると推察される。

(2) 末尾母音の脱落: テキストの翻訳をとおして確認できたのは、表 6 に示す 2 単語のみであった。

表 6 末尾母音の脱落

| 変形後のモンゴル語    | 語幹+語尾            | 脱落文字  |
|--------------|------------------|-------|
| 「дорнын」西の   | 「дорно」西+「ын」の   | 「о」脱落 |
| 「суурийг」基礎を | 「суурь」基礎+「ийг」を | 「ь」脱落 |

(3) 未聞母音の脱落: テキストの中では、表 7 に示す未聞母音の脱落が 16 単語と多くみられた。共同研究先のウブルハンガイ校の教員からも、この変形が多く見られるとのコメントを頂いた。

表 7 未聞母音の脱落の例

| 変形後のモンゴル語           | 語幹+語尾                   | 脱落文字  |
|---------------------|-------------------------|-------|
| 「Амьтны」動物の         | 「Амьтан」動物+「ы」の         | 「а」脱落 |
| 「баатрын」勇士の        | 「баатар」勇士+「ын」の        | 「а」脱落 |
| 「сансрын」宇宙の        | 「сансар」宇宙+「ын」の        | 「а」脱落 |
| 「нийгмийн」社会の       | 「нийгэм」社会+「ийн」の       | 「э」脱落 |
| 「Хүн төрөлхтний」人間の | 「Хүн төрөлхтөн」人間+「ий」の | 「ө」脱落 |
| 「үндэстний」民族の      | 「үндэстэн」民族+「ий」の      | 「э」脱落 |
| 「баатрын」部分を        | 「хэсэг」部分+「ийг」を        | 「э」脱落 |
| 「аймгийг」藩を         | 「аймаг」藩+「ийг」を         | 「а」脱落 |
| 「эв нэгдлийг」平和を    | 「эв нэгдэл」平和+「ийг」を    | 「э」脱落 |
| 「шавжийг」虫を         | 「шавьж」虫+「ийг」を         | 「ь」脱落 |
| 「нөхцлийг」条件を       | 「нөхцөл」条件+「ийг」を       | 「ө」脱落 |
| 「угсаатныг」民族を      | 「угсаатан」民族+「ыг」を      | 「а」脱落 |
| 「асуудлыг」問題を       | 「асуудал」問題+「ыг」を       | 「а」脱落 |
| 「дайсныг」敵を         | 「дайсан」敵+「ыг」を         | 「а」脱落 |
| 「асуудлыг」問題を       | 「асуудал」問題+「ыг」を       | 「а」脱落 |
| 「улс орно」国を        | 「улс орон」国+「оо」を       | 「о」脱落 |

## 4. おわりに

モンゴル語の文法を調査するとともに、観光ガイドブックのテキストを翻訳することで、名詞句や動詞句の文法構造や変形の仕方を調べた。その結果、名詞句では、子音前の未聞母音が脱落される未聞母音の脱落が多く見られることがわかった。また、多くの参考文献では、変形の代表例として交代語幹が取り上げられていたが、今回のテキストでは、ほとんど現れなかったことから、現代ではあまり使われていないと思われる。

Visual Basic を用いて未聞母音および末尾母音の脱落を考慮した変換プログラムを作成し、今回題材とした 665 単語のテキストのうち、約 73% の名詞句を形態素解析できた。

一方、動詞句は日本語と同様に、動詞の見出し語そのものではなく、語基に語尾が接続することで構成されることがわかった。このため、辞書データベースに見出し語に加えて語基を登録する必要がある。このためには、まず、一通り日本語の見出し登録および正規化を完了させる必要がある。動詞句は、活用や変形の種類が非常に多いため、形態素解析率を向上させていくことを当面の目標とする。

現段階で、交代や末尾短母音が追加される場合の名詞句には対応できていない。今回用いたテキストでは、これらの出現頻度は少なかったため、解析を規則で行う方が良いか、変形後の単語を辞書データベースに登録した方が良いのかの検討を進めていく予定である。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、電気電子工学科トゥメンバイラル ビヤムバドルジ (TUMENBAYAR BYAMBADÖRJ) さん、電気制御工学科ムンフツォグ ムンフズル (MUNKHTSÖG MUNKHZUL)

さんには、モンゴル語のテキスト入力や翻訳に関して多大なる協力をいただいた。心より感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Nurul Sakinah Binti Kamaruddin : モンゴル語 - 日本語の言語変換法の検討、平成 24 年度卒業研究報告書、津山高専 (2012).
- 2) 橋本勝、エルデネ、プレブジャブ : 現代日本語モンゴル語辞典、春風社 (2001).
- 3) CH.MONKHBAYAR : *Mongolian 108 Wonders*、Publisher N. Batjargal. (2005).
- 4) モンゴル語正書法 : [http://homepage3.nifty.com/itako/mon\\_jiten019.html](http://homepage3.nifty.com/itako/mon_jiten019.html).
- 5) モンゴル語文法 : <http://www.coelang.tufs.ac.jp/modules/mn/gmod/index.html> (2004).
- 6) 江原暉将、早田清冷、木村展幸 : 茶筌を用いたモンゴル語の形態素解析、言語処理学会第 10 回年次大会論文集 (2004).
- 7) Enkhbaya Sanduijav、宇津呂武仁、佐藤理史 : 音韻論的・形態論的制約を用いたモンゴル語句生成、情報処理学会研究報告 2004(2004-NL-162)、87-93 (2004).
- 8) アルタイ : <http://ameblo.jp/kharkhorin/> (2010).
- 9) Mongolian English Dictionary : <http://www.bolor-toli.com/> (2009).
- 10) モンゴル語実践会話入門 : <http://www.aa.tufs.ac.jp/documents/training/ilc/textbooks/2008mongolian.pdf> (2009).
- 11) 川越有希子 : ここ以外のどこかへ！旅の指さし会話帳®モンゴル、株式会社情報センター出版局(2012).
- 12) 上谷 恵里奈 : モンゴル語－日本語変換における名詞句変換に関する研究、平成 25 年度卒業研究報告書、津山高専 (2013).

# 短周期食連星の測光観測

佐々井祐二\*, 岸部仁美\*\*, 大嶋真以\*\*

## Photometric Observation of Short-Period Eclipsing Binary Star

Yuji SASAI, Hitomi KISHIBE and Mai OSHIMA

The apparent luminosity of the eclipsing binary star changes periodically, which consists of two stars hidden by each other. We took a series of pictures of the short-period V1191 Cyg using the 50cm-diameter telescope of Bisei Spaceguard Center on August 6th, 2013, and also took a series of pictures of the short-period V0523 Cas using the 101cm-diameter telescope of Bisei Astronomical Observatory on October 12th, 2013. We then reduced the data and performed a photometric analysis using image reduction and analysis facility (IRAF) software. We estimated the periods of luminosity variation by drawing the light curves. We also summarized the procedure of the image reduction and the photometric analysis using IRAF.

*Key Words* : Eclipsing Binary Star, Photometric Observation, IRAF

### 1. 緒 言

変光星は時間とともに明るさが変化する恒星である。変光星の種類には大きく分けると、連星が互いに隠し合いをする食現象が起こり見かけの明るさが変化する食変光星<sup>1)</sup>(食連星)、恒星自身が周期的に膨張・収縮を繰り返すことで明るさが変化する脈動星、急激な光度変化を見せる爆発変光星とに分けることができる。この中でも、特に食連星は測光観測と分光観測の結果の分析により、星の質量、半径、光度、温度などの物理量を決定することができるので、天体物理学上たいへん重要である。

本取組では、2013年8月6日に美星スペースガードセンターの口径50cm望遠鏡ではくちょう座V1191を撮影し、2013年10月12日に美星天文台の口径101cm望遠鏡でカシオペア座V0523<sup>2)</sup>を撮影した。この撮影画像を測光解析し、光度曲線を求めることにより各食連星の公転周期と大小関係を推定する。これらの食連星については天文学者により研究されていることではあるが、解析例も多いわけではなく、本取組はデータ蓄積の意味もある。また、天文学者が使用しているCygwin環境上のIRAFでデータ解析を行った。IRAF<sup>3), 4)</sup>はアメリカ国立光学天文台のプログラマーによって書

かれたソフトウェアの集合体である。このソフトウェアにより、CCDカメラなどの検出器により得られたピクセル配列フォームの天体画像データを解析することができる。しかし、測光解析にも分光解析にも利用できる反面、使用方法の敷居が高く、それぞれの用途で使用するためには入念な調査が必要である。本稿ではIRAFを用いるデータ整約(ノイズを取り除く画像処理)と連続測光についてもまとめた。

### 2. 観測方法

V1191 Cyg に対しては、8月6日(火)の22:00～翌4:00の間に、露出時間30秒と60秒、70秒で計277枚撮影した。大気の状態変化に合わせて露出時間を変更している。この時使用した観測機器は、美星スペースガードセンターの50cm望遠鏡(図



図1 美星スペースガードセンター50cm望遠鏡(HPより引用)



図2 美星天文台101cm望遠鏡

原稿受付 平成26年9月1日

\*専門学科共通科目 sasai@tsuyama-ct.ac.jp

\*情報工学科4年生

1), CCD カメラは画素数 2048×2048 pixel で視野 100 分×100 分, フィルターは Wi (5880-9380 Å) である.

V0523 Cas に対しては, 10 月 12 日(土)の 23:00 ~翌 5:00 の間に, 露出時間 40 秒と 60 秒で計 239 枚撮影した. この時使用した観測機器は, 美星天文台 101cm 望遠鏡 (図 2), CCD カメラは画素数 1024×1024 pixel で視野 6.8 分×6.8 分, フィルターは R (1380-6380 Å)である.

### 3. データ解析

変光星の光度変化を調べるためには, 光度変化しない比較星が必要である. V1191 Cyg については HD228695(A0), V0523 Cas については USNO-A2.0 1350- 00691230 を使用した. 以下の手順でデータを解析した.

- ① IRAF を用いてオブジェクト (天体) 画像からダーク (暗電流によるノイズ) とバイアス (読み出しノイズ) を引き, フラットで割る. ダークとバイアスを引くことによってオブジェクト画像のノイズを減らし, フラット画像で割ることによりオブジェクト画像の周辺減光を補正することができる.
- ② IRAF 上で整約済みの各画像の変光星と比較星の画像上の位置情報を取得し, パラメータを設定の上, 連続測光を行う.
- ③ 変光星と比較星のフラックス (輝度) を測定し, 次のポグソンの式を用い Excel 上で等級差を求める.

$$\Delta m = 2.5 \times \log_{10} \frac{L_1}{L_2}$$

ここで,  $\Delta m$  は比較星に対する等級差,  $L_1$  は比較星のフラックス,  $L_2$  は変光星のフラックスである.

- ④ Excel 上で測光データをグラフ化することで光度曲線が得られる.

#### 3-1. 1 次処理

上記①の作業を 1 次処理といい, 処理後の画像を整約済画像という. 変光星 V0523 Cas と比較星 USNO-A2.0 1350-00691230 IRAF について, 上の作業を具体的に見ていく (図 3). なお, 「ecl>」は IRAF のプロンプト, 「\$」は kterm のプロンプトである. 内部コマンドの種類によっては, kterm 上で作業することもある. また, ファイルリストの内容はサンプル的に掲載する.

##### (1) ファイルリスト作成

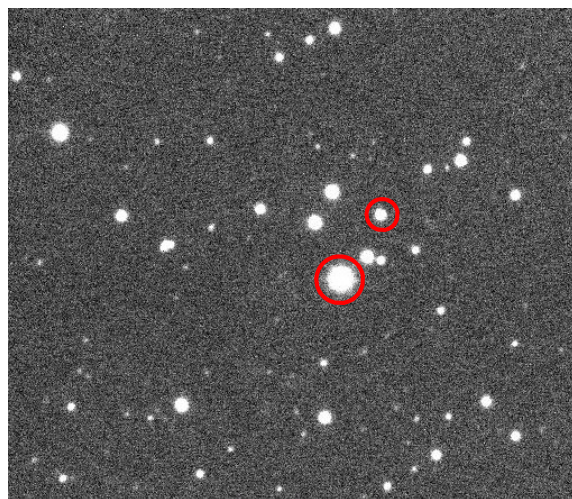


図3 変光星 V0523 Cas (下の○内) と比較星 USNO-A2.0 1350-00691230 (上の○内)

作業のために以下のファイルリストを作成する.

dark10sec.list : 露光 10 秒のダークファイル

内容 dark10s\_001.fit  
dark10s\_002.fit  
dark10s\_003.fit  
dark10s\_004.fit  
dark10s\_005.fit

dark40sec.list : 露光 40 秒のダークファイル

dark60sec.list : 露光 60 秒のダークファイル

flat.list : フラットファイル

内容 flat\_001.fit  
.....  
flat\_010.fit

##### (2) 統計量調査

画像に宇宙線などが写り込み, 不都合な画像となっていることがある. ピクセル数, カウントの平均値, 標準偏差, 最小値, 最大値を調べる「imstat」コマンドを用いると, その異常に気がつき易い. 10 秒露光のダークファイル 5 個を調べると以下ようになった.

```
ecl> imstat @dark10sec.list
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
dark10s_001.fit 1048576 1900. 15.6 1849. 9042.
dark10s_002.fit 1048576 1901. 15.63 1848. 9376.
dark10s_003.fit 1048576 1901. 15.28 1852. 9243.
dark10s_004.fit 1048576 1901. 15.32 1856. 9102.
dark10s_005.fit 1048576 1901. 14.99 1852. 9262.
40 秒露光のダークファイル 6 個, 60 秒露光のダークファイル 5 個に異常がないかチェックする.
ecl> imstat @dark40sec.list
ecl> imstat @dark60sec.list
```

##### (3) フラット画像処理

フラット画像の補正用ダーク画像を合成する.

フラット画像は 10 秒露光なので、同じ露光時間のダークファイルを合成してファイル dark10sec.fit を得る。

```
ecl> imcombine @dark10sec.list dark10sec.fit combine=median
```

それぞれのフラットファイルからダークファイルを引いたファイル名のフラットサブリストは以下のコマンドで得られる。

```
ecl> !cat flat.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > flat-sub.list
```

flat-sub.list : フラットサブリスト

内容 flat\_001s.fit

.....

flat\_010s.fit

#### フラット画像からダーク画像の減算

各フラット画像からダーク画像を差し引き、別名で保存する。例えば、フラット画像 flat\_001.fit から dark10sec.fit を引いた fit ファイルをファイル flat\_001s.fit として保存する。

```
ecl> imarith @flat.list - dark10sec.fit @flat-sub.list
```

さらに、統計量を調査しておくが良い。

```
ecl> imstat @flat-sub.list
```

```
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
```

```
flat_001s.fit 1048576 493.3 31.68 323. 2874.
```

.....

#### フラット画像の規格化

フラット画像毎にカウントの平均値が異なるので、これを 1 に規格化する。

```
ecl> normalize @flat-sub.list
```

統計量は次のように変化する。

```
ecl> imstat @flat-sub.list
```

```
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
```

```
flat_001s.fit 1048576 1. 0.06422 0.6548 5.826
```

.....

#### フラット画像の合成

S/N 向上のため、規格化した 10 個のフラット画像をメディアン（中央値）で合成し、ファイル flat.fit を得る。

```
ecl> imcombine @flat-sub.list flat.fit combine=median
```

#### (4) オブジェクト画像補正

##### オブジェクト画像補正用ダーク画像合成

40 秒露光と 60 秒露光のオブジェクト画像補正用ダーク画像をメディアンで合成し、ファイル dark40sec.fit と dark60sec.fit を得る。

```
ecl> imcombine @dark40sec.list dark40sec.fit combine=median
```

```
ecl> imcombine @dark60sec.list dark60sec.fit combine=median
```

#### ダーク補正済オブジェクトリストの作成

オブジェクトファイル名 001001.fit に「s」を付けて、補正済みファイル名 001001s.fit とするよう、ダーク補正済オブジェクトリストを作成する。

```
ecl> !cat object40sec.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > object40sec-sub.list
```

```
ecl> !cat object60sec.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > object60sec-sub.list
```

ここで、40 秒用には 232 個、60 秒用には 12 個のファイル名が入っている。

#### ダーク画像の減算

すべてのオブジェクト画像からダーク画像を差し引く。ただし、同じ露出時間どうしで行う。

```
ecl> imarith @object60sec.list - dark60sec.fit @object60sec-sub.list
```

```
ecl> imarith @object40sec.list - dark40sec.fit @object40sec-sub.list
```

#### フラット補正済オブジェクトリストの作成

オブジェクトファイル名 001001.fit に「f」を付けて、ダークとフラット補正済みファイル名 001001f.fit とするよう、フラット補正済オブジェクトリストを作成する。

```
!cat object40sec.list | sed -n 's/.fit/f.fit/p' > object40sec-flat.list
```

```
!cat object60sec.list | sed -n 's/.fit/f.fit/p' > object60sec-flat.list
```

ここで、40 秒用には 232 個、60 秒用には 12 個のファイル名が入っている。

#### フラット補正

合成済みのフラット画像 flat.fit で、すべてのダーク補正済オブジェクト画像を割る。

```
ecl> imarith @object60sec-sub.list / flat.fit @object60sec-flat.list
```

```
ecl> imarith @object40sec-sub.list / flat.fit @object40sec-flat.list
```

### 3-2. 測 光

コマンド「epa phot」による対話モード測光が可能である。画像表示ソフト ds9 の画面の比較星にマウスカーソルを当てて、スペースキーを押すと星像のプロファイルが表示され、「a キー」を押すと、xgterm に簡単な測定結果が表示される。さらに、同一画像データ上で、変光星についても同様の操作で測定を行う。全ての整約データについて、比較星の測光を行うが、ファイル名の入力が目まぐるしく時間がかかるので、自動化したい。

#### (1) 画像の位置情報取得

多数の整約済ファイルについて、パラメータを

変更して繰り返す測光作業を自動化する。そのため、変光星と比較星の画像上での位置情報を取得する必要がある。

#### 整約済オブジェクト画像のリスト作成

```
$ ls *.fit > filelist.txt
```

この filelist.txt をエディタで開き、時系列に並べなおす。xgterm 上で

```
ec1> imexa @filelist.txt 1 keep+ log=coords-data.txt
```

を入力後、画像表示ソフト ds9 上で、最初に比較星の上で「a」を押下し、次に変光星の上で「a」を押下する。「n」を押下し次の画像を表示させ、同じ作業を続けていく。これらの結果はファイル「coords-data.txt」に保存される。終わるときは「q」を2回押下する。これらの結果は「cmp-coords.txt」という名前のファイルに保存されていき、内容は以下ようになる。

```
$ more coords-data.txt
```

```
# [1] 231735f.fit -
```

```
#COL LINE COORDINATES . . .
```

```
600.07 653.40 600.07 653.40 . . .
529.48 539.81 529.48 539.81 . . .
```

この imexa の結果 (coords) は 3,4 列が簡易測光した重心座標の x,y 座標に対応している。簡易測光の場合これは押下した x,y 座標と同じである。1行が比較星、2行が変光星の位置情報であるが、別ファイルに保存するよう測光する方が簡単かも知れない。

#### ファイル名と比較星の座標の対応リスト作成

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 2){ print fname, $3, $4; } }' > coords-data-r1.txt
```

内容は以下のとおりである。

```
$ more coords-data-r1.txt
```

```
231735f.fit 600.07 653.40
```

```
. . . . .
```

#### 座標ファイル名と座標の対応リスト作成

```
$ cat coords-data-r1.txt | sed -n 's/.fit/.coo.r/p' > coords-data-r2.txt
```

内容は以下のとおりである。

```
$ more coords-data-r2.txt
```

```
231735f.coo.r 600.07 653.40
```

```
. . . . .
```

#### 座標ファイルに座標を書き出し

```
$ cat coords-data-r2.txt | awk '{ print $2, $3 > $1 }'
```

#### 座標ファイル名のリスト作成

```
$ cat coords-data-r2.txt | awk '{ print $1 }' > coords-r.list
```

同様にして、変光星のリストを作成する。「r」

が「v」に変わることには注意する。

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 0){ print fname, $3, $4; } }' > coords-data-v1.txt
```

```
$ cat coords-data-v1.txt | sed -n 's/.fit/.coo.v/p' > coords-data-v2.txt
```

```
$ cat coords-data-v2.txt | awk '{ print $2, $3 > $1 }'
```

```
$ cat coords-data-v2.txt | awk '{ print $1 }' > coords-v.list
```

#### (2) アパチャ測光の半値幅 (FWHM) の決定

天体を中心とする測光範囲の指定のため半値幅 FWHM (Full Width at Half Maximum) を決定する必要がある。ここでは比較星について吟味する。

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 2){ print fname, $13, $14, $15; } }' > FWHM-r.txt
```

「FWHM-r.txt」の内容を見ると、ENCLOSED, MOFFAT, DIRECT の値とも、032233f.fit の後に行ったピント変更により大きく変化していく。そこで「235233f.fit～000623f.fit」(60 秒露光)

「001001f.fit～032233f.fit」(ピント変更前, 40 秒露光) と「032842f.fit～043822f.fit」(ピント変更後, 40 秒露光) に分けて、より実際の星像に近いプロファイルである MOFFAT の値で FWHM を吟味する。ここでは「001001f.fit～032233f.fit」の比較星について吟味する。

```
$ cp FWHM-r.txt FWHM-r-2.txt
```

「FWHM-r-2.txt」の内容を「001001f.fit～032233f.fit」(ピント変更前) にする。FWHM として、154 個の MOFFAT の平均を使用することにする。

```
$ cat FWHM-r-2.txt | awk '{ sum += $3; num++; } END{ print "sum=" sum; print "average=" sum/num; }'
```

```
sum=1000.54
```

```
average=6.49701
```

これより

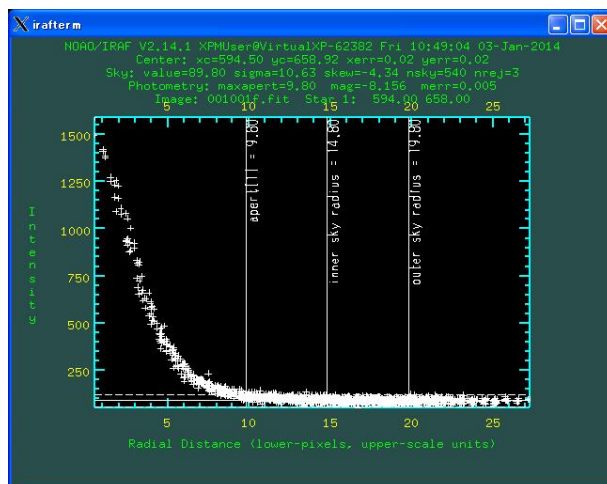


図4 比較星 USNO-A2.0 1350-00691230IRAFn の星像プロファイル

fwhmpsf=6.5 (FWHM)  
 cbox=13 (FWHM の 2 倍程度)  
 annulus=14.8 (スカイの内径, apertur+1.0 だが,  
 +5.0 にする)  
 apertur=9.8 (FWHM の 1.5 倍)  
 ようにパラメータを設定する. 比較星の星像プロファイルを図 4 に示す.

その他の時間帯の画像データファイルと変光星の場合についても同様に吟味する.

### (3) 測 光

比較星, 変光星の FWHM の値が同じであるので, 露出時間, ピント変更で分けて, 測光する. そのためのファイルリストを作成する.

```
ecl> cp filelist.txt filelist-1.txt
      235233f.fit~000623f.fit (露出 60 秒) 7 個
ecl> cp filelist.txt filelist-2.txt
      001001f.fit~032233f.fit (露出 40 秒, ピント
      変更前) 154 個
ecl> cp filelist.txt filelist-3.txt
      032842f.fit~050543f.fit (露出 40 秒, ピント
      変更後) 78 個
```

測光用の比較星座標リスト  
 \$ cp coords-r.list coords-r-1.list  
 \$ cp coords-r.list coords-r-2.list  
 \$ cp coords-r.list coords-r-3.list  
 測光用の変光星座標リスト  
 \$ cp coords-v.list coords-v-1.list  
 \$ cp coords-v.list coords-v-2.list  
 \$ cp coords-v.list coords-v-3.list  
 の内容をファイルリストに合わせる.

ファイルリスト「filelist-2.txt」の変光星の測光

```
ecl> epa phot
「image」に「@filelist-2.txt」, 「coords」に
「@coords-v-2.list」, 「interac」を「yes」から
「no」, fwhmpsf=6.5, itime=40 (秒), cbox=13,
annulus=14.8, apertur=9.8, zmag=22
としてパラメータ設定と連続測光を行う.
```

### (4) 測光結果の取り出し

比較星

```
ecl> txdump *.mag.1 IMAGE,XINIT,YINIT,XCENT
ER,YCENTER,OTIME,FLUX,MAG, MERR yes >
r-result-1.txt
```

変光星

```
ecl> txdump *.mag.2 IMAGE,XINIT,YINIT,XCENT
ER,YCENTER,OTIME,FLUX,MAG, MERR yes >
v-result-1.txt
```

時系列に並べ替えたファイルを「r-result-1.txt」  
 「v-result-1.txt」とする.

ファイル名と時刻 (UT), フラックス, 機械等級,  
 誤差の取り出し

比較星

```
$ cat r-result-1.txt | awk '{ print $1",",$6",",$7",",
$8",",$9 }' > r-result-2.txt
```

変光星

```
$ cat v-result-1.txt | awk '{ print $1",",$6",",$7",",
$8",",$9 }' > v-result-2.txt
```

### 改行コードの変換

Windows のテキストファイルの改行コードは CRLF (=0x0d,0x0a) であるが, UNIX では LF (=0x0a) である. そこで, Windows 用に改行コードを変換する.

比較星

```
$ cp r-result-2.txt r-result-3.txt
```

```
$ unix2dos r-result-3.txt
```

変光星

```
$ cp v-result-2.txt v-result-3.txt
```

```
$ unix2dos v-result-3.txt
```

次に Excel を用いて, これら測光結果から光度曲線を描く.

## 4. 解析結果

比較星に対する等級差をグラフにしたものを図 5 と図 6 に示す. 縦軸は比較星に対する等級差  $\Delta m$  で横軸は世界時刻 UT である.

光度曲線には, くだらかに変化する部分やあま

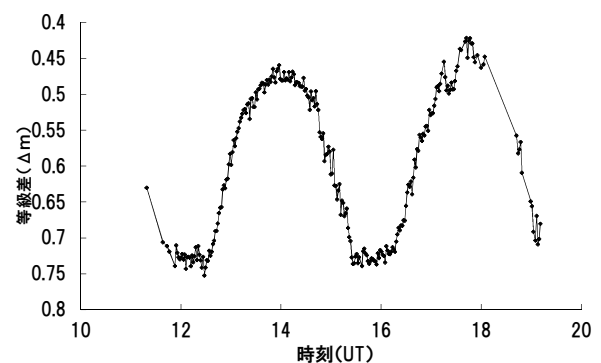


図5 V1191Cygの光度曲線

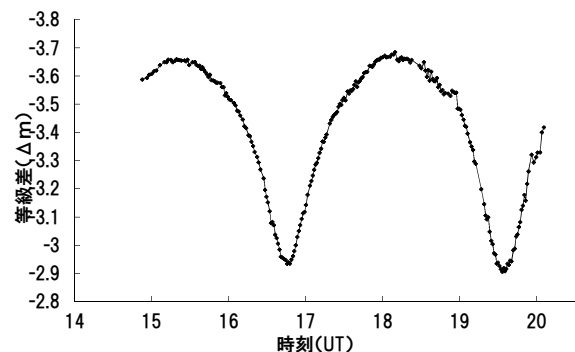


図6 V0523Casの光度曲線

り変化のない部分, 急激に変化している部分があることが分かる. また, 次の変光の半周期を求める.

① 極大時のピークから次のピークまでの間

② 極小時のピークから次のピークまでの間

光度曲線の山あるいは谷のグラフをベキ近似により数式化し, 数式処理ソフトを用い極大・極小の時間を求める. ①と②の時間の2倍の平均をとることで変光星の周期を求める. 公転周期は V1191 Cyg が7時間23分(図5)で, V0523 Cas は5時間37分(図6)となった.

## 5. 考察

両変光星とも光度曲線に同様な特徴があり, 以下のように仮定することで, その説明ができる.

仮定1: 公転面上に地球がある

仮定2: 星が接近している

仮定1より, 地球から見た星の断面積が食によって変化すること, 仮定2より, 星の明るさは極大極小時に連続的に変化し, 平坦な部分がないことが説明できる.



図7 連星大小関係推定(左: V1191 Cyg, 右: V0523 Cas)

### V1191 Cyg の場合

さらに, 仮定3: 星の大きさは近いがやや異なる(図7左), をおくことにより, 星の明るさは極小時に変化しない時間帯が短時間あることが説明できる. そして, 文献データ<sup>5)</sup>として, この食連星タイプは, 共通の大気を持ち, 近い大きさの連星系であるおおぐまW型(EW)である. 周期は7時間31分であるから, 分析結果はほぼ一致している.

### V0523 Cas の場合

さらに, 仮定4: 二つの星の大きさはほぼ等しい(図7右), をおくことにより, 星の明るさは極小時に急激に変化することが分かる. そして, 測定誤差を考慮しても, 図6よりわずかであるが主極小(図6右側), 副極小(図6左側)があることが判断できるので, 二つの星の明るさがやや異なる可能性がある. また, 文献データ<sup>5)</sup>として V0523 Cas もおおぐまW型(EW)であり, 周期は5時間31分であるから, 分析結果はほぼ一致している.

## 6. 結 言

短周期食連星を測光観測し光度曲線を作成した. その光度曲線から公転周期と星の大小関係を考察した. V1191 Cyg は極小が平坦で, V0523 Cas は極大と極小がはっきりしていた. V1191 Cyg の極小は平坦ではあるが滑らかではなく, V0523 Cas のデータに比べての精度が不足している. この精度不足は V1191 Cyg の近くに恒星があることによる測光の難しさと, 使用した望遠鏡の広視野(スペースデブリ発見のため100分×100分)と分解能が原因ではないかと考えられる.

本取組では, 新しい食連星を発見しているわけではない. 地上で行われる科学実験と違い天体の観測データは多数あるわけではなく, 本取組により, 短周期食連星 V1191 Cyg, V0523 Cas に対して観測データと解析を追加することができた.

また, IRAF はコマンド入力により, データ整約や解析を行う非常に有用なソフトウェアであるが, 初学者にとっては敷居が高い. そこで, 本稿ではデータ整約と連続測光の具体的な方法をまとめた.

連星間距離などの物理量を引き出すには分光観測を併用しなくてはならない. 今後は測光観測と分光観測について, 美星天文台の装置に加え本校の天体観測システムにて行い, 食連星の調査を進めたい.

今回の観測について, 星の学校2013スタッフ, 美星天文台, 美星スペースガードセンターの皆様にお世話になりました. ここに深謝致します. なお, 本取組と調査は科学研究費補助金(佐々井, 23501047)を受けて行ったものであり, ここに謝意を表します.

## 参 考 文 献

- 1) J. Kallrath and E. F. Milone : *Eclipsing Binary Stars: Modeling and Analysis*, Second Edition, Springer (2009).
- 2) 永井和男の食変光星観測のページ : <http://eclipsingbinary.web.fc2.com/>
- 3) 川端哲也, IRAF による分光データ整約のすすめ 第1版 (2005年5月) : <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/manual/index.html>
- 4) ライトカーブ解析の手引き : [http://www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/ana\\_guide.html](http://www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/ana_guide.html)
- 5) SIMBAD Astronomical Database : <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

## 校 外 に お け る 研 究 発 表 等

教員の校外における研究発表等につきましては、「教育研究業績」として本校ホームページで公開しておりますので、下記URLからご参照くださいますようお願いいたします。

津山高専ホームページ > 教員の活動状況 > 教育研究業績の公開内容  
<http://www.tsuyama-ct.ac.jp/honkou/gijutsu/naiyou.htm>

編 集 ワーキング・グループ

座長 稲 田 知 己

(五十音順)

|         |         |
|---------|---------|
| 大 田 肇   | 大 平 栄 二 |
| 掛 橋 英 典 | 佐々井 祐 二 |
| 福 田 昌 准 | 山 本 吉 範 |

津 山 工 業 高 等 専 門 学 校 紀 要  
第 56 号

平成27年 2 月28日 発 行

発行者／独立行政法人 国立高等専門学校機構  
津 山 工 業 高 等 専 門 学 校  
津山市沼 6 2 4 - 1

印刷所／株式会社 廣 陽 本 社  
津山市田町 2 2

# BULLETIN OF NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, TSUYAMA COLLEGE NO. 56 (2014) CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Implementation and Performance Evaluation of an IP v4/v6 Interconnect System<br>Using Open Source Software<br>Tadashi OKADA, Kento ANDO and Kyouhei YAMAMOTO.....                                                                                                                     | 1  |
| The Judgments of UK Courts on "The Right of Life" in Armed<br>Conflict outside its Territory No.3 The Case of Catherine Smith<br>Hajime OTA.....                                                                                                                                      | 9  |
| Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project IV<br>Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA,<br>Tatsuya MURAKAMI, Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI<br>Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER.....   | 17 |
| Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project V<br>Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA,<br>Tatsuya MURAKAMI, Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI<br>Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER.....    | 25 |
| Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VI<br>Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA,<br>Tatsuya MURAKAMI, Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI<br>Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER.....   | 33 |
| Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VII<br>Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA,<br>Tatsuya MURAKAMI, Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI<br>Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER.....  | 41 |
| Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project VIII<br>Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Isao MORISHIMA,<br>Tatsuya MURAKAMI, Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI<br>Keith F. TAYLOR, Masaaki YOKOTANI and Peter ZIZLER..... | 47 |
| Trajectory of quasi-geostationary satellites<br>Makoto SATO.....                                                                                                                                                                                                                      | 55 |
| Induction-Coil Electrodeless Lamp System Using 100 kHz Order Frequency<br>Hidenori KAKEHASHI.....                                                                                                                                                                                     | 61 |
| A basic study on Mongolian-Japanese translation<br>Eiji OHIRA, Erina JOTANI and Nurul Sakinah Binti Kamaruddin.....                                                                                                                                                                   | 65 |
| Photometric Observation of Short-Period Eclipsing Binary Star<br>Yuji SASAI, Hitomi KISHIBE and Mai OSHIMA.....                                                                                                                                                                       | 71 |
| <Abstracts of Other Research Reports> .....                                                                                                                                                                                                                                           | 77 |