

BULLETIN
OF
TSUYAMA NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY
NO.55 (2013)
CONTENTS

Performance of Transmission Gear with Minimum Quantity Lubrication Method Daijiro KONISHI.....	1
Deformation Analysis of Steel Connector on Timber Frame Structures Hirohisa SHIOTA and Yoshiki FUJIMORI.....	9
The Judgments of UK Courts on "The Right of Life" In Armed Conflict outside its Territory No.2 The Case of Susan Smith Hajime OTA.....	15
Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project I Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI.....	25
Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project II Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI.....	31
Mathematics and Chemistry Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project III Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI.....	37
A Study on the Effects and the Challenges that Mandatory Participation in School Extracurricular Activities will Bring Koji YAMAMOTO and Kenji KAMINO.....	45
Flexible and High Efficient Thermoelectric Water Electrolysis System Using Hot Spring Water Shigeru TANABE, Yoshiaki SHIMIZU, and Yusuke TANIGUCHI.....	51
Long-term Evaluation of TNCT Independently Blocking of Spam E-mail Tadashi OKADA and Masato YONEZAWA.....	55
Construction and Operation of Near-real-time Congestion Information Providing System in Large-scale Events Takayuki TERAMOTO and Ryosuke FUKUTANI.....	59
Gemini 2 System and ASCOM Platform Yuji SASAI.....	63
<Abstracts of Other Research Reports>	69

津
山
工
業
高
等
専
門
学
校
紀
要

津山工業高等専門学校紀要

第 55 号

BULLETIN
OF
TSUYAMA NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY
NO. 55

第
五
十
五
号

2 0 1 3

二
〇
一
三
年

津山工業高等専門学校紀要 第55号 2013

目 次

論文

- 環境負荷低減を指向した微少潤滑歯車の潤滑・冷却効果……………小西大二郎…… 1
- 木質ラーメン構造物に用いる接続用金物の変形解析……………塩田祐久・藤森資希…… 9
- 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 ……………大田 肇……15
- 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト I
有本 茂・福田信幸・廣木一光・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・竹内 茂・横谷正明……25
- 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト II
有本 茂・福田信幸・廣木一光・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・竹内 茂・横谷正明……31
- 数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト III
有本 茂・福田信幸・廣木一光・村上達也・成木勇夫・斎藤恭司・竹内 茂・横谷正明……37
- 学校部活動への参加義務化がもたらす効果と課題に関する一考察……………山本浩二・神野賢治……45

研究調査報告

- 柔軟で高効率な熱電素子水分解システムの開発……………田辺 茂・清水日彬・谷口雄亮……51
- 津山高専における迷惑メール独自対策の長期検証……………岡田 正・米澤将人……55
- 大規模イベントにおける準リアルタイム渋滞情報提供システムの構築と運用
寺元貴幸・福谷遼祐……59
- ジェミニ2システムと ASCOM プラットフォーム ……………佐々井祐二……63

校外における研究発表等

- 校外における研究発表等……………69

論

文

環境負荷低減を指向した微少潤滑歯車の潤滑・冷却効果

小西 大二郎*

Performance of Transmission Gear with Minimum Quantity Lubrication

Method

Daijiro KONISHI

From an environmental point of view, a MQL (Minimum Quantity Lubrication) method should be adopted to gear transmission systems. This study aims to find a reliable MQL method and a design method for gears operated under high-speed driving conditions. The conclusions are as follows. First, the application of centrifugal lubrication method is able to pull out the full cooling performance of the lubricant. Second, the operation of gears with 30% specific sliding shows less heat generation than that of gears with 50% specific sliding. Third, combining the centrifugal lubrication method and the gears with 30% specific sliding is effective for reducing an environmental load of gear transmission systems.

Key words: Gear, MQL method, Gear design method, Centrifugal lubrication method, Specific sliding

1. 緒 言

高速・高負荷能化の歯車技術動向は歯車装置の運転温度を高める傾向にあり、歯車温度上昇はスカuffingの発生などにより熱定格として歯車装置の許容伝達動力を制限する¹⁾。このため一般に、歯車装置の発生熱を除去し耐スカuffing能を向上させるため極圧添加剤を含んだ多量の潤滑油が使用される。しかしこのことは使用後の廃油処理コストや環境問題の面から解決すべき問題と考えられる。動力伝達用歯車の潤滑に関する従来の国内外の研究をみると、地球環境保全のために歯車への潤滑油及び極圧添加剤の使用量を微少にする具体的な方法を検討した研究例はない。

本研究の目的は、使用潤滑油量削減や極圧添加剤の使用を避けることで歯車装置の環境負荷低減を図ることにより、次の二つの方法でこの目的を達成しようとしている。第一の方法は、高速運転条件下であっても潤滑油を歯車歯面に確実に到達させることができかつ少ない潤滑油量であっても効果的・効率的に歯車温度を低下させる潤滑方法を見出し、使用潤滑油量を低減すること。第二の方法は、歯車の最大すべり率を低く設計することで耐スカuffing能を高め、極圧添加剤の使用を避けることである。

本報では、微少量潤滑法、すなわち遠心潤滑法^{2,3)}あるいは噴霧潤滑法⁴⁾を適用することが潤滑油量低減に有効であることをジェット潤滑法の場合と比較しながら検討した結果を報告する。

2. 試験歯車および実験方法

歯車対を用いた負荷運転実験では歯面のかみあいによって発生する熱量は負荷荷重や運転速度以外にも歯面上の潤滑状態によって変化することになりこのときの歯車温度をもって潤滑法のもつ冷却性能の高低を評価できない。そこでモジュール 4、歯数 24、歯幅 20 mm の平歯車単体を回転させ、熱量一定条件下で歯車を電磁誘導加熱し、潤滑による歯車冷却の効果を調査する冷却性能実験を行った。Fig.1 に歯車冷却性能試験に用いた平歯車の

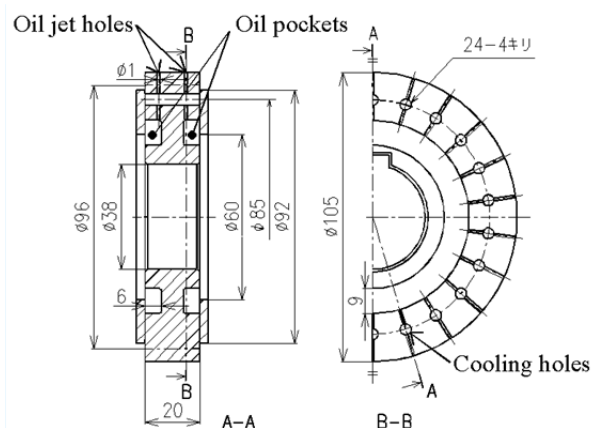


Fig.1 Tested spur gear

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*機械工学科

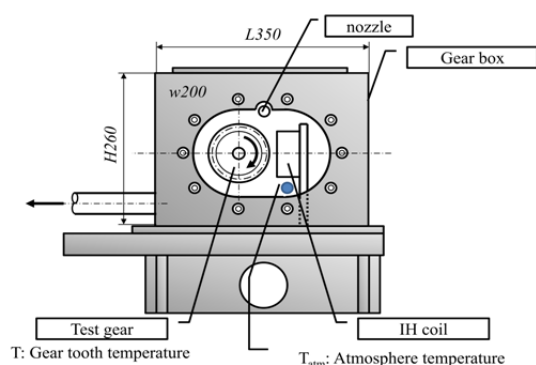


Fig.2 Test equipment

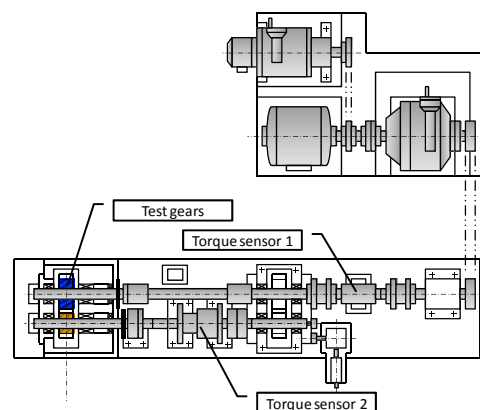


Fig.4 Power circulating gear testing machine

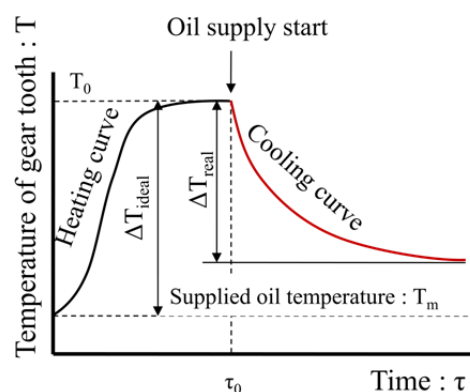


Fig.3 Diagram of cooling performance experiment

Table 1 Specifications of lubricant

Density(at 288 K) g/m ³	0.8667
Flash point K	413
Kinematic viscosity(at 313 K) mm ² /s	8.526
Kinematic viscosity(at 373 K) mm ² /s	2.323
Viscosity index, VI	78
Pour Point K	248
Sulfur content mass %	0.035
Thermal conductivity W/(m · K)	0.131 ⁹⁾

概略図を、Fig.2 に試験歯車箱の概略図をそれぞれ示す。なお、歯車と歯車軸とをベークライト製スリーブで断熱した。試験歯車には遠心潤滑が可能のように歯中心断面上に歯先面に通じる直径 1 mm の潤滑油噴出穴を一枚の歯に二箇所とそれぞれの歯の歯中心線上の歯元部に供給油を一旦歯内部に溜めて歯を冷却するための直径 4 mm の冷却穴を歯すじに平行に設けた。歯車本体温度測定のため、一枚の歯の歯側面から 3 mm 内側の基準円歯面上および歯幅中央断面位置の歯中心線上に設けた穴の内部の歯先から 5 mm の位置に、歯車ボス部側面から深さ 5 mm の穴内部にそれぞれ素線径 0.1

Table 2 Specifications of tested gear pair

Items	Gear pair I		Gear pair II	
	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Maximum specific sliding on approach contact %	-43.73	+30.43	-96.68	+49.16
Maximum specific sliding on recess contact %	+31.85	-46.73	+50.25	-100.99
Normal module	4			
Helix angle deg.	19			
Number of teeth	21	24	21	24
Tip diameter mm	86.5	98.6	87.5	99.5
Face width mm	30			



Fig.5 Photograph of tested gear wheels designed for centrifugal lubrication

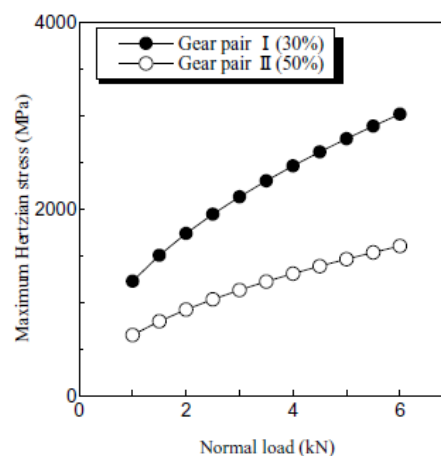


Fig.6 Relationship between normal load and Maximum Hertzian stress

mm の K 種熱電対をエポキシ系接着剤で取り付け、熱電対からの出力信号を回転アンプ、スリップリングを介してデータロガーに記録した。

冷却性能実験は Fig.3 に示すように、所定の回転速度一定条件の下、歯車の歯の温度が定常温度に達するまで無潤滑で回転させ、その後遠心潤滑法、噴霧潤滑法、ジェット潤滑法のいずれかの方法で給油し試験歯車を冷却させた。

用いた潤滑油は極圧添加剤を含まない鉱油基油 ISO VG10 で、温度 313 ± 2 K 一定条件下で給油量 $Q_{oil}=150$ mL/min の割合で給油・冷却し、回転速度と歯車の歯の温度との関係を調べた。なお、噴霧潤滑法を用いた試験では、噴霧ノズル部で鉱油基油を圧縮空気 $Q_{air}=31$ NL/min と混合させた。また、ジェット潤滑法と噴霧潤滑法ではそれぞれノズルから歯車回転中心に向けて潤滑油を噴出させた。Table 1 に供試鉱油基油 ISO VG10 の諸元を示す。

冷却性能実験の実施後に、潤滑油の耐スカuffing 能に及ぼす潤滑油粘度の影響が小さくなるように小歯車の歯先での最大すべり率 σ_{max} を約 30% に歯形設計し⁶⁾、かつ確実に歯面に潤滑油を到達させることのできる遠心潤滑法を採用することで歯車温度やスカuffing 発生を抑制することができるかを評価・確認するため負荷実験を行った。

用いた試験歯車は歯直角方式はすば歯車で、小歯車の歯先での最大すべり率 σ_{max} がそれぞれ約 30%、50% となる歯車対 I、II を用いた。Fig.4 に負荷実験に用いた試験機の概略図を示す。また、Table 2 に供試はすば歯車の諸元を、Fig.5 に大歯車の写真をそれぞれ示す。大歯車には遠心潤滑が可能のように歯中心断面上に歯先面に通じる直径 2 mm の潤滑油噴出穴を一枚の歯に二箇所とそれぞれの歯の歯中心線上の歯元部に歯を冷却するための直径 4 mm の冷却穴を歯すじに平行に設けた。大歯車に設けた冷却穴が歯車の歯の温度に及ぼす影響を調べるため歯車対 II の場合で冷却穴のない供試大歯車を用いた実験も行った。

また Fig.6 には、歯面法線荷重と最大ヘルツ応力の関係を示す。供試歯車対によって正面かみあい率、歯面曲率が異なるため、歯車対 I の最大ヘルツ応力は歯車対 II と比較して 1.9 倍高い。

歯車の歯の温度測定のため、大小歯車それぞれ一枚の歯に歯中心線上歯先から 2 mm の歯側面表面に素線径 0.1 mm の K 種熱電対をエポキシ系接着剤で取り付け、熱電対からの出力信号を回転アンプ、スリップリングを介してデータロガーに記録した。

負荷実験は所定の大歯車回転速度 $n=2500$ min⁻¹ 一定条件の下、歯面法線荷重を 1.0 kN から 0.5 kN

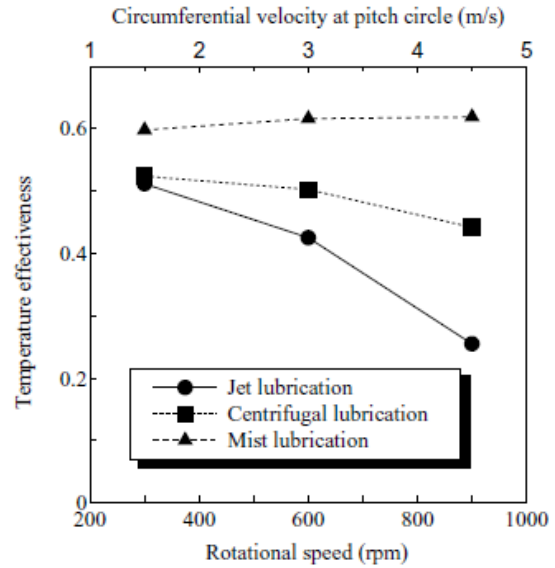


Fig.7 Temperature effectiveness change

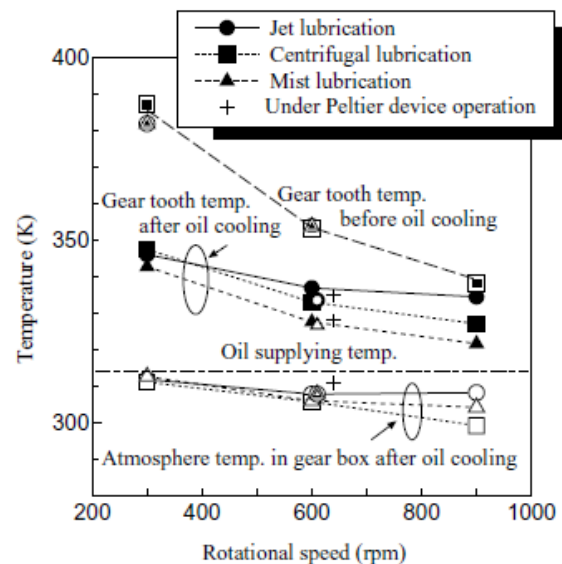


Fig.8 Temperature change

ごとに増加させるステップストレス試験とし、各荷重段階の運転時間は 600 s とした。試料油には冷却性能実験同様、ISO VG10 鉱油基油を温度 313 ± 2 K 一定条件下で給油量 $Q_{oil}=150$ mL/min の割合で給油し、歯面法線荷重と歯車の歯の温度との関係を遠心潤滑法とジェット潤滑法の場合とで調べた。

3. 実験結果および考察

3. 1. 冷却性能実験

各潤滑条件下での歯車冷却性能を、まず以下の式(1)で示される温度効率 η により比較することで調査した。加えて、ペルチェ素子モジュールユニ

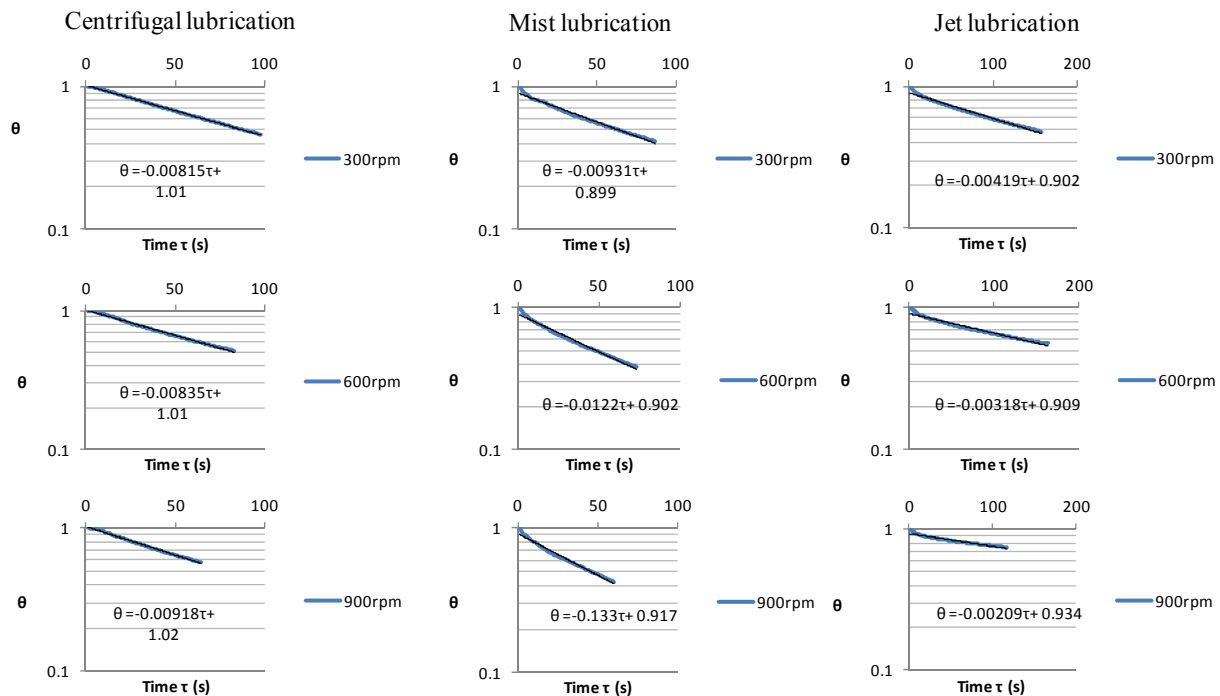


Fig.9 Changes of temperature drop rate in each cooling performance experiment

ット（容量：64.8 W）を用いて歯車箱を強制的に冷却する方法が歯車の歯の温度に及ぼす影響も調査した．なおこの場合，ペルチェ素子モジュールユニット伝熱面を，純銀粒子を含む熱伝導性グリースを介して歯車箱側面中央位置にねじで機械的に結合した．

$$\eta = \frac{\Delta T_{real}}{\Delta T_{ideal}} = \frac{T_0 - T_{steady}}{T_0 - T_m} \quad (1)$$

T_0 : 給油前の歯の定常加熱温度[K]

T_{steady} : 給油後の歯の定常温度[K]

T_m : 給油温度[K]

冷却性能実験結果を Fig.7, 8 にそれぞれ示す．なお，ここで歯車の歯の測定温度は，一枚の歯の歯幅中央位置の歯中心線上に設けた穴の内部の歯先から 5 mm の位置に固定した熱電対で計測した温度を用いた．

Fig.7 から温度効率は，どの運転速度においても噴霧潤滑法の場合が最も高く，以下遠心潤滑法，ジェット潤滑法を採用した場合の順であった．特に，歯車装置に一般的に採用されるジェット潤滑法では，高速運転になるほど歯車の回転に抗して潤滑油を歯元まで確実に到達させることは難しくなり，基準円での回転周速度がノズルからの潤滑油噴出流速 3.1 m/s を越える速度域で温度効率が大きく低下した．一方，遠心潤滑法では歯車の歯内部に潤滑穴を半径方向に設け歯先面から潤滑油を

噴出する方法を採用したので，かみあい直前にある相手駆動歯車の作用歯面の歯先から歯元まで噴出潤滑油を確実に到達させることができる²⁾．加えて，潤滑油が歯車本体と歯内部を通過するため直接歯車を冷却することができるので，比較的少ない油量で運転歯車温度の上昇を抑制できたといえる．

Fig.8 から，採用する潤滑法によって回転速度が増すほど歯車温度の差が大きくなることがみとれる．また，高速回転域で噴霧潤滑法の場合よりも遠心潤滑法で歯車箱内雰囲気温度の上昇を抑制している点が注目される．ペルチェ素子モジュールユニットで歯車箱を強制的に冷却する方法を併用しても，歯車箱内の空気の熱伝導率が潤滑油のものより低いため歯車温度・歯車箱内雰囲気温度に及ぼす影響は小さかった．したがって，歯車箱外側にフィンなどを設けた設計例では歯車箱の冷却は可能であっても歯車箱内に収納される歯車自身の効果的な冷却は困難であることが明らかになった．

さらに各潤滑条件下での歯車冷却性能を伝熱特性数(平均ヌセルト数 Nu_r と回転レイノルズ数 Re_r) との関係を用いてに比較することを考える．ここで試験歯車の一枚の歯に設置した各熱電対の加熱後の定常温度の温度差は ± 0.5 K であり，歯車の歯内部に温度勾配はなく，歯内部温度は一樣であったので回転歯車に対して集中熱容量モデルが適用できると考えられた．ここで，非定常熱伝達の冷

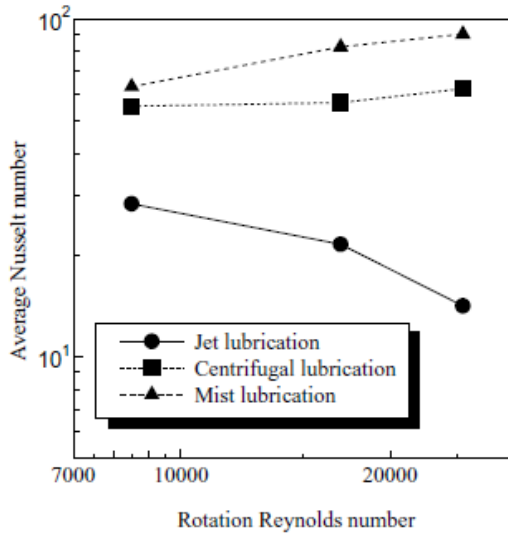


Fig.10 Relationship between dimensionless numbers

却曲線は次の式(2)で示されるニュートンの冷却方程式で表現できる．さらに式(2)を変数分離して積分すれば式(3)を得ることができる．

$$-C \frac{dT}{d\tau} = hS(T - T_m) \quad (2)$$

$$\ln \theta = -\frac{hS}{C}(\tau - \tau_0) \quad \text{ただし、} \theta = \frac{T - T_m}{T_0 - T_m} \quad (3)$$

C : 熱容量[J/K]

T : 冷却中の歯の温度[K]

τ : 時間[s]

h : 熱伝達率[W/(m²·K)]

S : 歯車の伝熱表面積[m²]

τ_0 : 給油開始時間[s]

Fig.9に冷却中の歯の温度が給油を開始して時定数に達するまでの温度降下割合 θ と時間 $\tau - \tau_0$ との関係を片対数グラフ上に示した．ただし，Fig.9中の時間軸は時間 $\tau - \tau_0$ を改めて τ と表示しなおしてある．測定データから求めた θ と $\tau - \tau_0$ の関係はすべて片対数グラフ上で直線関係にあり，この直線の傾きから熱伝達率 h を求め，伝熱特性数である平均ヌセルト数 Nu_r と回転レイノルズ数 Re_r の算出をおこなった．なお，試験歯車の熱容量及び伝熱表面積は，直径が基準円直径，幅が歯幅の仮想円板を考え，歯車材料の密度を7860 kg/m³として求めた．

ここで，平均ヌセルト数 Nu_r と回転レイノルズ数 Re_r は以下のように定義される．

$$Nu_r = \frac{hr}{\lambda}, Re_r = \frac{\omega r^2}{\nu}$$

r : 歯車の基準円半径[m]

λ : 潤滑油の熱伝導率[W/(m·K)]

ω : 角速度[rad/s]

ν : 動粘度[m²/s]

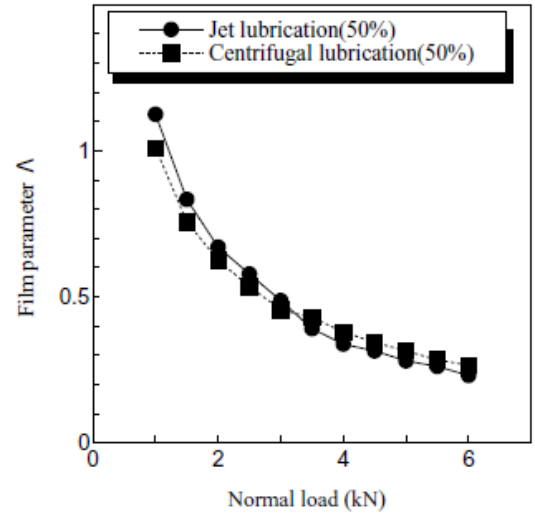

 Fig.11 Film parameter change with normal load ($\sigma_{\max}=50\%$)

Table 3 Surface roughness on tooth flank of test gears

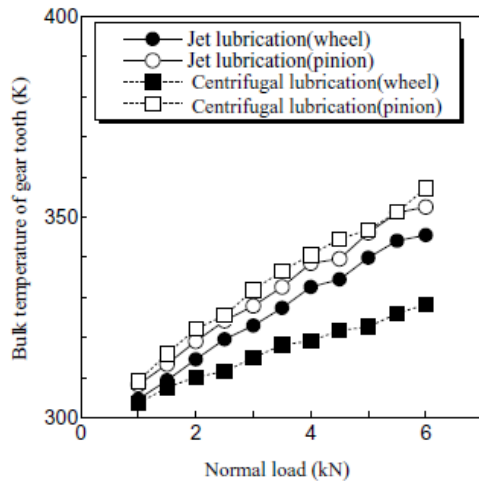
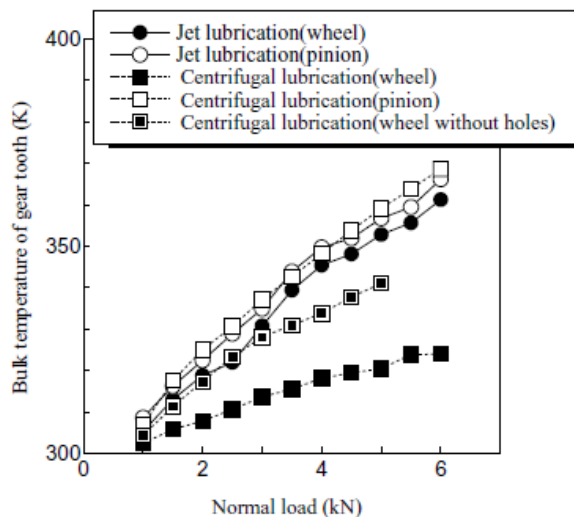
Items		Gear pair I		Gear pair II	
		Pinion	Gear	Pinion	Gear
Before test	Arithmetic average roughness R_a μm	0.162	0.194	0.162	0.209
	Root mean square roughness R_q μm	0.237	0.270	0.241	0.281
After test	Arithmetic average roughness R_a μm	0.168	0.203	0.117	0.148
	Root mean square roughness R_q μm	0.235	0.255	0.165	0.210

Fig.10に示した回転レイノルズ数 Re_r と平均ヌセルト数 Nu_r との関係曲線において，噴霧潤滑法と遠心潤滑法の場合には回転レイノルズ数 Re_r 増大にともない平均ヌセルト数 Nu_r が単調増加したのに対して，ジェット潤滑法の場合には単調減少する傾向を示した．ジェット潤滑法を用いた場合，回転周速度を噴出潤滑油流速より高くすると伝熱挙動が変化し歯車冷却性能を極端に低減させた．遠心潤滑法の場合では伝熱挙動の変化はほとんどなかった．これらに対して噴霧潤滑法では，回転速度とともに伝熱挙動が向上しており，歯車を効果的に冷却できることがわかった．

以上のことから，潤滑油量が極端に少ない条件下であっても遠心潤滑法と噴霧潤滑法では歯車表面の熱コンダクタンスの低下がなく，高速運転歯車の潤滑法として適していると判断される．

3. 2. 負荷実験

どの運転条件下であっても運転試験によってスカフティング損傷が発生することはなかった．供試はすば歯車の潤滑状態を推測するために最小油膜厚さ $h_{\min}^{(7)}$ と歯車歯面上の合成粗さ $(R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{1/2}$ との比，すなわち膜厚比 $A^{(8)}$ の計算を行った．後述のように歯車対Ⅰの場合よりも歯車の歯の温度が高温であった歯車対Ⅱの場合で冷却穴を有する大歯車と小歯車と

Fig.12 Temperature change with normal load ($\sigma_{max}=30\%$)Fig.13 Temperature change with normal load ($\sigma_{max}=50\%$)

を組合せた場合の計算結果を Fig.11 に示す。なお、最小油膜厚さ h_{min} の計算に際して、油膜温度に大・小歯車でそれぞれ計測した歯の温度を平均した温度を使った。また、負荷試験前後で測定した歯車歯面上の表面粗さを Table 3 に示す。Fig.11 から歯面法線荷重 1.0 kN 以外の場合において A は 1 よりも小さな値となり、互いにかみあう歯面間の潤滑状態は境界潤滑条件下にあったといえる⁸⁾。

負荷実験結果を Fig.12, 13 にそれぞれ示す。Fig.13 に示したように遠心潤滑法を採用した場合、大歯車の冷却穴の有無が歯車の歯の温度に及ぼす影響については、冷却穴を有する場合の方が歯車の歯の温度は低かった。加えて冷却穴を有する大歯車と小歯車とを組合せた歯車対Ⅱで遠心潤滑法を採用した場合のみ、歯面法線荷重増加に対する大歯車の歯の温度上昇割合が低く、小歯車の歯先での最大すべり率 σ_{max} が異なっても歯面法線荷重が同じであれば

大歯車の歯の温度はほぼ同じで摩擦損失動力の大小による影響は小さかった。これらのことは大歯車内部を潤滑油が通過する際に熱交換された結果といえ、さらに歯車対を低すべり率に設計すれば、歯車の歯の温度上昇を抑制できることがわかる。

どの運転条件下であっても大歯車よりも小歯車の歯の温度が高く、採用する潤滑法による影響は小さかった。小歯車の歯の温度を上昇させたのは歯車かみあいの際に歯面上で生じた摩擦損失動力によるもので、歯面上の摩擦係数が一定であれば、歯車の歯の温度上昇と歯面法線荷重増加の関係は比例するはずであり、負荷実験結果も歯面法線荷重が増えるにしたがって小歯車の歯の温度は上昇した。すなわち歯のかみあいによって歯面上に酸化膜が形成され⁹⁾、歯面上の動摩擦係数を低下させ、その結果として歯面法線荷重増加割合に対して歯車の歯の温度上昇割合が低下するようなことはなかった。

4. 結 言

給油量が極端に少ない一定給油量条件下で運転条件を変化させて冷却性能実験・負荷実験をおこなった結果、以下のことがわかった。

1. 遠心潤滑法と噴霧潤滑法では、回転数増加に対して歯車表面の熱コンダクタンスの低下がなく、高速運転歯車の潤滑法として適していると判断された。

2. 噴霧潤滑法では、潤滑油のみによる潤滑法(遠心潤滑法とジェット潤滑法)の歯車冷却能を上回る性能を示した。しかし、噴霧潤滑法では、歯車冷却のための空気圧送のための補機を要することによるコスト増やノズルからのミスト噴出音やミスト状の噴出油による環境汚染の問題があり、噴霧潤滑法を歯車装置に採用することは実用上好ましくないと考えられる。

3. 歯車温度・歯車箱内温度の低減は歯車箱冷却による方法では期待できない。すなわち、歯車箱外側にフィンなどを設けた設計例では歯車箱の放熱は可能であっても歯車箱内に収納される歯車自身の効果的な冷却は困難であると考えられた。

4. 遠心潤滑法を採用し低すべり率に歯車を設計すれば、歯車の歯の温度を抑制することができた。具体的には、小歯車の歯先での最大すべり率 σ_{max} を約 50% とした場合で遠心潤滑法を採用すれば、ジェット潤滑法の場合よりも最大約 37 K の大歯車の歯の温度の低減が、小歯車の歯先での最大すべり率を約 30% とした場合で最大約 17 K の大歯車の歯の温度の低減ができた。また本実験範囲において、互いにかみあう歯面間の潤滑状態が境界潤滑状態にあったと推測されたにもかかわらずスカッ

フィング損傷は発生しなかった。

以上のことから、歯車装置の微少量潤滑法として遠心潤滑法を適用することが潤滑油量の低減や耐スカuffing能向上に有効であるということがいえ、本研究により地球環境保全を指向した動力伝達用歯車の潤滑法と設計法に対して指針を与えることができたと考えている。

本研究は科研費(21560158)の助成を受けたものであることを付記しておく。

最後に、研究遂行のため真摯に労をとってくれた当時の卒業研究学生諸君に感謝の意を述べる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、松本 将・東崎康嘉・福富正稔：高周速で運転される歯車の温度分布，日本機械学会論文集，65-630，C (1999)708-713.
- 2) 小幡文雄・小西大二郎：歯車の遠心潤滑，トライボロジスト，42，11(1996)835-840.
- 3) 小西大二郎：歯車のトライボロジー，月刊トライボロジー，6-226，(2006)20-22.
- 4) 小西大二郎：平歯車の温度上昇，損失及び騒音に及ぼす給油法の影響，トライボロジー会議予稿集 東京，(1992)635-638.
- 5) 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，養賢堂，(2001)613.
- 6) 小幡文雄・竹平昭暢・松尾公平・佐伯 親：精密研削面における鉱油基油の耐焼付き能，日本機械学会論文集，58-554，C (1992)3108-3115.
- 7) T. E. Tallian: On Competing Failure Modes on Rolling-Contact, ASLE Trans., 10-4, (1967)418-439.
- 8) D. Dowson and G. R. Higginson: Elasto-hydrodynamic Lubrication, (1966), Pergamon Press, 1-235.
- 9) 例えば、藤井正浩・小幡文雄・吉田 彰・松田 浩：平歯車の耐スコーリング負荷容量に及ぼす動荷重の影響，日本機械学会論文集，56-523，C (1990)750-757.

木質ラーメン構造物に用いる接続用金物の変形解析

塩田 祐久* 藤森 資希**

Deformation Analysis of Steel Connector on Timber Frame Structures

Hirohisa SHIOTA and Yoshiki FUJIMORI

The deformation analysis was performed for the box-type steel connector on timber frame structures using the elastic-plastic finite-element method(FEM). The development of the plastic deformation zone was shown through the FEM analysis. The results indicated that the load vs. displacement relationship of the connector was markedly influenced by the base-plate thickness. Moreover, for optimum design of this connector, it was important that the side-plate thickness was almost the same as the base-plate thickness.

Key words: Timber frame structure, Box-type steel connector, Finite-element method

1. はじめに

近年、集成材技術の進歩により体育館や公民館などの中規模施設が木質構造物で建てられている。このような施設は多人数で使われることが多いため、筋かいや耐力壁のない柱と梁のみで構成されたラーメン構造を使って建物の出入口に大開口部が作られる。ところで、ラーメン構造では梁と柱の間でモーメントを伝達する必要があるため、それに耐え得る接合部が必要となる。一方で、建物の施工に際して接合部は作業の手間にかかる箇所であるため、簡単に組み付けができるものでなくてはならない。そのような要求のもと、ラーメン構造用の接合部品としてラグスクリュウボルト（以下、LSB）が開発された¹⁾。LSBは施工性が良く、いろいろな接合金物を使用できるという特徴があり、今後さらに実用化が広がると思われる。ところで、LSBを使用した接合部における破壊としては、集成材の割裂破壊²⁾、LSBの引抜け³⁾、LSBと接合金物を締結するボルトの破断などに起因することが考えられており、これらはいずれも構造物としては脆性的な破壊であるため、実用上問題視されている。このため現在、LSBを保持する接合金物を工夫することにより、このような脆性的な破壊が起こる前に接合金物を変形させ、接合部で変形とエネルギー吸収を起こさせることが試みられており⁴⁾、テーパナットとちぎり金物を組み合わせた金具⁵⁾、箱型金物⁴⁾、せん断抵抗棒と連結金物を使用したもの⁴⁾などが提案されている。

これらの中で大きな変形能を持つと考えられるのが箱型金物である。これは鋼板を箱状に溶接したもので、接合する木材間に挿入し、木材にねじ込んだLSBの他端をこの金物に固定するというものである。これによりLSBによる固定作業が簡単になるとともに、構造物に大きな変形が生じたとき箱型金物が塑性変形することで脆性的破壊が起こる前に変形量を稼ぐことが期待できる。しかし、上述した脆性的な破壊を起こす荷重に対して箱型金物が適当な塑性変形を起こすためには、金物を適切な材料と板厚で作製しておく必要がある。

このような背景のもと、これまで箱型金物を構成する材料の特性と板寸法を使って、引張力が作用したときの金物全体の初期剛性や耐力を予測する試みがなされている⁴⁾。しかし、金物の塑性変形を考慮したうえで板厚の適性を調べた報告はない。

そこで本研究では、箱型金物について有限要素法による弾塑性解析を行い、金物における荷重と変形量の関係と変形の様相を調べ、それらに影響を及ぼす因子について考察し、板厚の選定に関する指針を検討する。

2. 箱型金物とLSBを組み合わせた接合方法

図1に箱型金物の実物写真とモデル図を示す。以後、ボルト穴の開いた2面の板をベースプレート（BP）、それらの側面に位置する面のうち底面を除く2面の板をサイドプレート（SP）、底面の板を底板と呼ぶ。また、図2に箱型金物とLSBを組み合わせた梁と柱の接合状態を模式的に示す。このような接合方法は木質構造物以外では一般的ではないので、以下に概要を説明する。梁と柱を接続する前に、LSBを梁および柱にねじ

原稿受付 平成25年8月30日

*機械工学科

**津山工業高等専門学校専攻科 平成24年修了生

(現 マツダ株式会社)

込んでおく。このときボルトの他端は木材から出た状態になっている。次に、箱型金物の穴に木材から出ている LSB の端を通し、ナットで固定する。一般に、梁および柱どちらに対しても LSB を 4 本使用する。このように金物を介して梁と柱を接続する手法である。

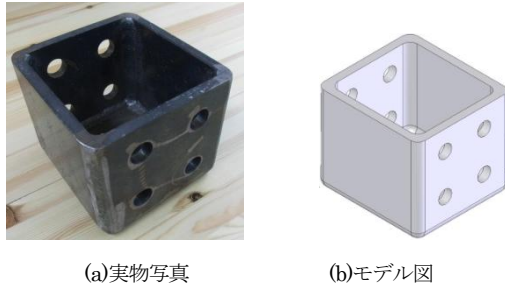


図1 箱型金物

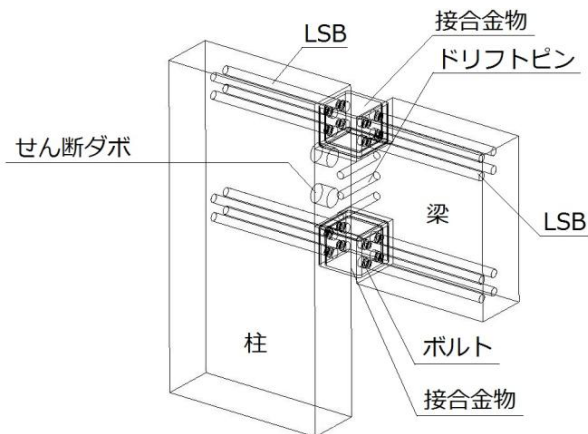


図2 箱型金物と LSB の取付模式図

3. 解析方法

3. 1. 解析条件

有限要素法解析ソフトとして ANSYS 12.0 Workbench を使用し、弾塑性解析を行った。また、実物の接合金物を用いた引張試験の結果⁹⁾と比較することを考慮し、解析でも箱型金物を引張試験用治具に取り付けた状態で引張負荷を加えた。

解析は BP および SP の板厚を変えた接合金物に対して行った。解析に用いた板厚の組み合わせを表 1 に示す。なお、板厚を変えときは、Model A を基準として箱型金物の内寸は変えず、箱の外寸を変化させた。

表1 箱型金物の板厚の組み合わせ (単位:mm)

Model	A	B	C	D	E	F
BP	9	9	16	30	12	9
SP	9	12	9	12	30	30

箱型金物に使用する材料の力学特性を表 2 に示す。ヤング率、降伏応力および引張強さは本研究で同じ材料の引張試験を行って得られた値である。また LSB に用いられている材料の力学特性を表 3 に示す。

表2 箱型金物に用いた材料の力学特性

材質	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]
SS400	206	0.3	337	460

表3 LSB の材料の力学特性

材質	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]
SCM435	206	0.33	1100	1200

3. 2. 解析モデル

箱型金物を引張用治具に取り付けた全体図を図 3 に示す。実際の解析は対称性を考慮して 4 分の 1 部分について実施した。なお、箱型金物の板のない面を開口側と呼ぶ。治具先端部の穴をピン拘束し、単軸引張負荷を加えた。穴は治具の長手方向にのみ直進するように拘束し、ピン穴中心の回転は自由とした。

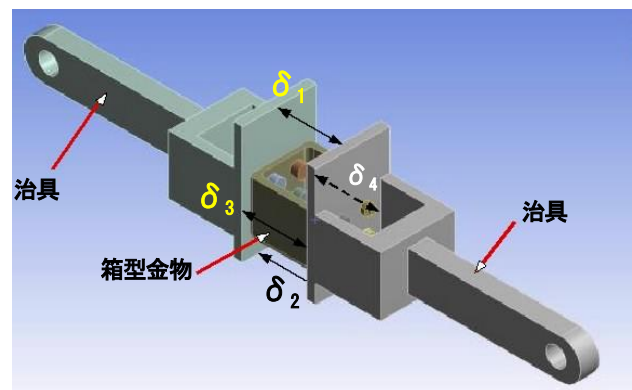


図3 箱型金物と治具を接合した全体図

図 3 の解析モデルにおいて治具の両端に引張負荷を加えると、開口側の変形が底板側より大きくなるように回転する。そこで、箱型金物全体の変形量として、回転のみによって生じる伸びを除いた変位 δ を下の式から求めた。

$$\delta = (\delta_3 + \delta_4) / 2 - \delta_R$$

ここで、

$$\delta_R = (\delta_1 + \delta_2) \times a / 234$$

$$a = 92 - (\delta_2 / (\delta_1 + \delta_2)) \times 234$$

δ_1 および δ_2 は治具の突出部分先端の距離の変化であり、 δ_1 は開口側、 δ_2 は底板側である。 δ_3 および δ_4

は両 SP 側の治具間距離の変化である。これらは、実物の箱型金物の引張試験で変位を測定した箇所と同じ位置であり、図 3 に併記してある。

4. 解析結果

4. 1. 箱型金物全体の荷重—変形量関係

板厚のすべての組み合わせで得られた荷重と変形量の関係を取りまとめて図 4 に示す。BP の厚さだけを変化させた場合、BP の厚さが増加すると箱型金物の変形抵抗が顕著に増加する。また、BP の厚さを変えた場合に比べ、SP の厚さのみを変えた場合は荷重と変形量の関係にあまり大きな影響を与えないことがわかる。したがって、金物全体に生じる変形量を変える場合は BP の厚さを調節する必要がある。

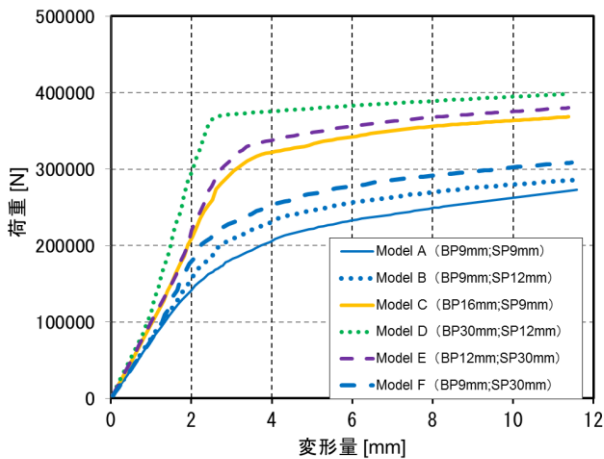


図 4 板厚を変えた場合の荷重—変形量の関係の変化

4. 2. 箱型金物の変形過程

Model B におけるひずみ分布の様子を図 5 および図 6 に示す。図 5 は降伏が起こる前の弾性ひずみの分布である。また、図 6(a)～(d)は荷重の増加にともなう相当塑性ひずみ分布の変化の様子を示している。いずれの図も、左の図が金物の 4 分の 1 部分の外面を右の図が内面を示している。なお各図では、それぞれの強制

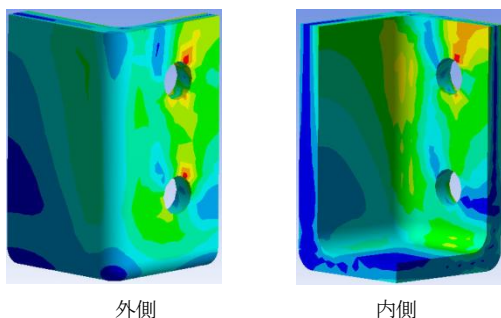
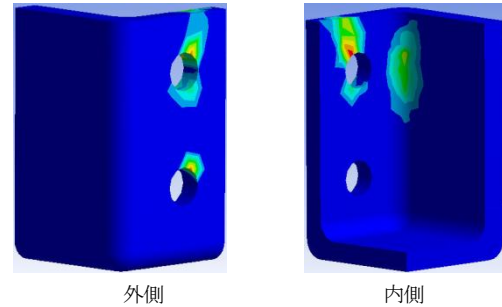


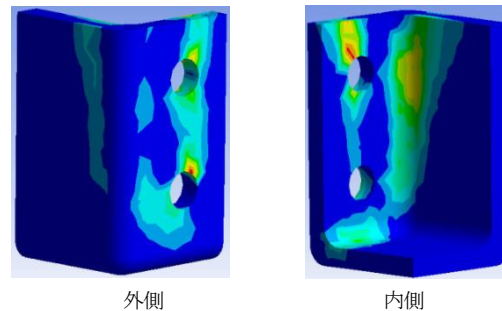
図 5 Model B における弾性ひずみの分布

変位において接合金物に生じているひずみの最大値から最小値の間を等分割して色分けしてある。したがって、各色に対応するひずみの絶対値は図によって異なる。そのため、これらの図ではひずみの絶対値の変化ではなく、ひずみの領域が拡大していく過程を定性的に観察する。

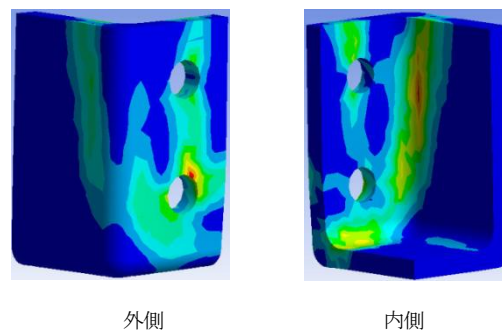
図 5 より弾性ひずみは BP のボルト穴周辺から自由端までの範囲および金物内側 R 部分とその周辺に集中



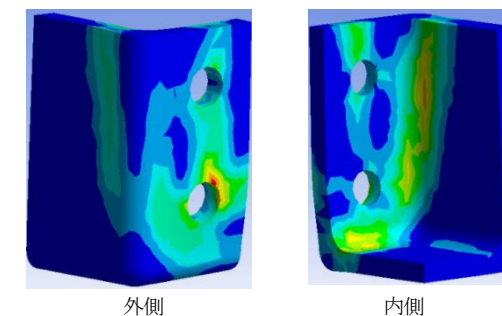
(a) 強制変位 0.95 mm



(b) 強制変位 1.49 mm



(c) 強制変位 3.89 mm



(d) 強制変位 6 mm

図 6 Model B における相当塑性ひずみの進行過程

し、いずれでも自由端に近づくほど大きくなっている。また図6より、相当塑性ひずみはまず大きな弾性ひずみが生じていたボルト穴周辺と金物内側R部分の開口側で生じ、荷重の増加とともにそこからボルト周辺と内側R部分に広がっていく。相当塑性ひずみはこれらの箇所局所的に大きくなり、BPとSP、底板の境界内側近傍に集中する。このことから、箱型金物は開口側が開くように変形するが、全体で生じている変形のほとんどはBPの端のR部分とボルト穴付近の変形に起因するBPの湾曲によるものであると考えられる。

4. 3. 板厚差の影響

SPとBPの板厚の差が比較的小さい組合せであるModel A, Model B, Model Cではひずみ分布および変形過程の傾向に大きな差は見られなかった。これらの板厚の組合せでは図6で示したとおり、塑性変形の領域はBPのR部内側周辺とボルト穴周辺に集中していた。

次に、相対的な厚さの違いの影響を調べるために、BPあるいはSPの板厚を他方に対して厚くした金物の解析結果を図7および図8に示す。図7はModel D (BP: 30mm, SP: 12mm)の様子であり、図8は、Model F (BP: 9mm, SP: 30mm)の様子である。

図7より、BPの板厚が厚い場合、相当塑性ひずみはボルト穴近傍のみに局所的に生じるだけで、R部分を含め各プレートのおよそほとんどの領域で生じない。そのため、BPが大きく湾曲することなく、箱型金物全体でも大きな変形は生じない。図4に示したように、BPが厚くなると荷重-変形量関係は直線から外れる荷重が大きくなり、屈曲後もほとんど直線的になる。このような荷重-変形量関係における屈曲後の急なひずみの増加は、BPの湾曲ではなくLSBの塑性変形による伸びに起因した変位である。

一方、図8より、SPを厚くした箱型金物の場合、BPが大きな湾曲を起こし、全体の大きな変形を生じさせていることがわかる。また、SPは塑性変形をほとんど起こさず、相当塑性ひずみの分布はボルト穴周辺の領域と金物内側R部分のBP側にかかなり限定されている。SPを厚くすることにより、BPのみに変形が集中する結果となった。

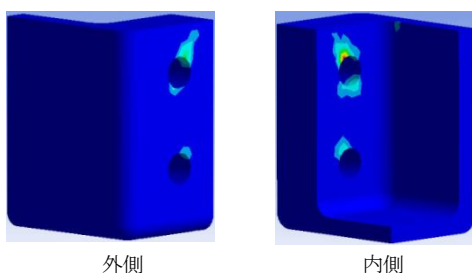


図7 Model Dにおける相当塑性ひずみの分布

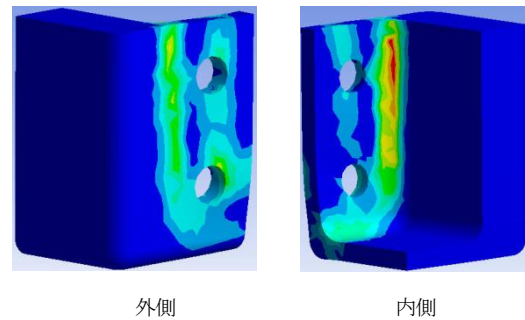


図8 Model Fにおける相当塑性ひずみの分布

4. 4. LSBの引抜けおよび破断との関係

Model Aについて、金物を固定するLSBに生じる相当応力の最大値が外力により変化する様子を図9に示す。最大値は常に固定部分に生じるが、同じ要素で生じるとは限らず、最大値を示す要素が荷重によって変わるため図は滑らかな曲線となっていない。なお、LSBの材料の引張強度は1200MPaであり、図中に黒実線で示した。一方、LSBの引抜け耐力は条件によってかなり変わる⁷⁾。本研究と同様のLSBの本数および配置での引抜け耐力の実測値はLSB1本当たり60~65kNという報告⁸⁾があるので、4本のLSBに均等に荷重が加わるものと仮定し、箱型金物に負荷される荷重が250kN程度でLSBの引抜けが起こるものとして、図中に黒破線で示した。

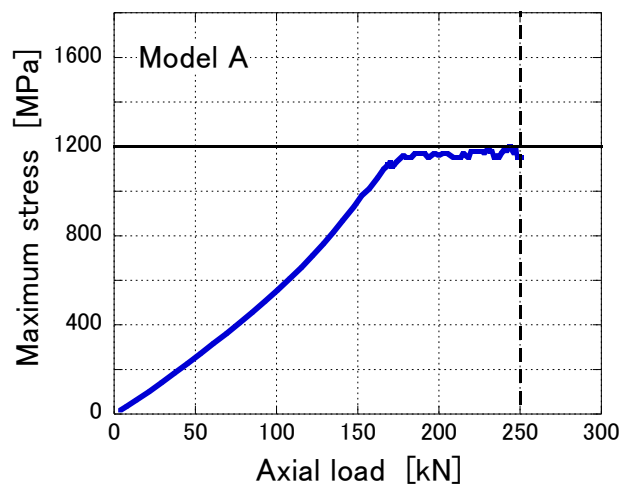


図9 荷重にともなうLSBに生じる相当応力の最大値の変化

この図より、LSB固定部に生じる相当応力はLSBの引抜け耐力より低い引張荷重でかなり大きな値に達することがわかる。これは、図6に示したように、BPが比較的薄い場合はBPが大きく湾曲するために固定部分のボルトは曲げ変形を受け、局所的に大きな相当応力が発生するためと考えられる。このことは、LSBの引抜けより早く、ボルトが破断する可能性があることを示している。実際、実物試験においても3回実施された試験のうち1回はボルトが破断することで試験

が終了している⁶⁾。BPを薄くすることで箱型金物に大きな変形が生じることが期待できるが、一方で固定用ボルトには大きな曲げ変形を与えることとなり、接合部での破壊を早める危険性がある。

5. 箱型金物の板厚選定指針の検討

接続用金物の目的は、LSBの引抜けや破断が生じる前に金物全体で大きな変形を生じさせることである。4節で述べたように、BPとSPとの相対的な板厚差が大きい場合、R部に局所的な変形が生じる。金物全体の大きな変形量がR部に局所的に集中した変形のみ起因するより、できるだけ広く分布した塑性変形に起因する方がR部への負担は少なくなると考えられる。そのためBPとSPの間の板厚差は小さいほうがよいことになる。また、箱型金物はBP、SPおよび底板を溶接でつなぎ合わせるため、金物のR部分の強度はばらつくことが予想される。このことから、R部に局所的に変形が集中することは避けた方が良く考えられる。

一方、BPの板厚が極端に厚い場合は、接合金物は塑性変形をほとんど起こさず、ボルトのみが塑性変形を起こす。これは金物の変形の前にLSBが破壊することになるので、箱型金物を採用する目的に合わない。

これらのことから、BPとSPの板厚はできるだけ同じものとし、BPの厚さはLSBの引抜け耐力程度の荷重で大きく塑性変形できる程度のものとする。LSBの引抜け耐力はLSBの規格(直径やピッチ)だけでなく、これをねじ込む集成材の特性に大きく依存する⁷⁾。例えば、集成材の強度そのものだけでなく、集成材の目の方向にも強く影響される。このため、箱型金物の設計に際しては、まずその構造物におけるLSBの引抜け耐力を正確に評価しておくことも重要となる。

6. まとめ

有限要素法による弾塑性構造解析を使って木質ラーメン構造における箱型金物の変形挙動に影響を及ぼす因子を調べた。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 変形はBPに開けたボルト穴周辺とBP付け根のR部内側に局所的に集中し、箱型金物全体の変形にはR部およびBPの湾曲が最も大きく寄与する。
- (2) BPとSPの厚さの差が小さい場合、BPの湾曲とともにSPでも変形が進行するがBPが厚くなるとBPでもSPでも変形はあまり生じず、箱型金物全体の変形が進む前にボルトが変形する。
- (3) 箱型金物の安全な設計のためには、LSBの引抜

強度程度の荷重でBPが塑性変形する程度の厚さを持たせるとともに、SPとBPの厚さの差を小さくとる必要がある。

実際の構造物が変形するときは、箱型金物には曲げモーメントだけでなく引張荷重あるいは圧縮荷重が同時に加わる。実際の状態に近い柱と梁を組み合わせた構造体の破壊試験も実施されている⁴⁾ので、今後それらとの整合性を調べる予定である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、銘建工業株式会社様より実験データの提供をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小松幸平：日本国特許第2653414号“ラグスクリーボルトを用いた木材の柱－梁接合構造”，(1997)
- 2) 中谷浩之，北守顕久，鄭基浩，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルト柱脚接合部の割裂破壊に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，p. 171-172，(2009. 8)
- 3) 例えば，中谷誠，小松幸平：ラグスクリーボルトの引抜き性能に関する理論式の構築とその検証 その1 繊維平行方向引抜き性能，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，(2003. 9)
- 4) ラグスクリーボルト研究会：ラグスクリーボルト接合設計・施工指針，p. 46-59，(2007. 9)
- 5) 中谷誠，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルトと特殊金物を用いた木質ラーメン構造の柱－梁接合部に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第73巻 第626号，p. 599-606，(2008. 4)
- 6) ラグスクリーボルト研究会：ラグスクリーボルト接合の金物引張試験－MK形式－試験報告書，銘建工業(株)社内報告書，(2009. 4)
- 7) 例えば，中谷誠，小松幸平：ラグスクリーボルトの引抜き性能発現機構(第1報)先孔直径，埋込み深さ，埋込み方向，縁距離が引抜き性能に与える影響，木材学会誌 Vol. 51, No. 2, p. 125-130，(2005)，(第2報)繊維平行方向引抜き理論の構築，木材学会誌 Vol. 51, No. 5, p. 311-317，(2005)，(第3報)繊維直交方向引抜き理論の構築，木材学会誌 Vol. 52, No. 3, p. 160-167，(2006)
- 8) 清水武，川原重明，中谷誠，森拓郎，小松幸平：ラグスクリーボルト(LSB)接合部の引張強度実験 その1－ラグスクリーボルトを多数本配置する場合の強度性能に及ぼす影響－，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，(2007. 8)

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

大田 肇*

The Judgments of UK Courts on “The Right of Life” In Armed Conflict outside its Territory No.2 The Case of Susan 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, the positive obligations under the Right of Life which were argued at UK courts and a conflict between duty of care and combat immunity which were tried at UK courts too.

Key words: The Right to Life, European Convention of Human Rights, Jurisdiction, Combat Immunity

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」¹⁾においては、犠牲となったイラク市民からの訴えを取り上げたが、今回は死傷したイギリス兵からの訴えを取り上げる。

息子 Hewett 二等兵を亡くした Susan Smith 他の訴えは、高等法院（女王座部）²⁾、控訴院³⁾そして最高裁判所⁴⁾において審理された。高等法院の判決は、2011 年 6 月 30 日に、控訴院のそれは 2012 年 10 月 19 日に、そして最高裁判所のそれは 2013 年 6 月 19 日に出された。本稿では、この最高裁判決を中心にその内容を検討していく。

2. 事実経過

この訴えは、イラク従軍中に死亡した 3 人の兵士の遺族と同じく重傷を負った 2 人の兵士からなされた。これらは 2 つの事件に分けることができる。スナッチランドローバー事件とチャレンジャー戦車事件である。スナッチランドローバー事件は、2005 年 7 月 16 日、

Al Amarah 付近で爆発があり、その捜査のため軽装備のスナッチランドローバーで出動したところ、道路に仕掛けられていた簡易爆破装置(“IEDs” improvised explosive devices)が爆破し、スナッチランドローバーが大破し乗っていた Hewett 二等兵が死亡した事件と、2006 年 1 月 28 日、Al Amarah のイラク警察本部から Ab Naji 基地への帰路において、IED が爆破し、スナッチランドローバーを運転していた Ellis 二等兵が死亡した事件を合わせたものである。チャレンジャー戦車事件は、2003 年 3 月 25 日、Basra へ進軍する途中で友軍の戦車から誤って砲撃され、チャレンジャー戦車に乗っていた Allburt 伍長が死亡し、Twiddy 伍長代理と Julien 騎兵が重傷を負ったものである。前者は、占領期間中に発生したものであり、後者は戦争期間中に発生したものである。

3. 法的争点

チャレンジャー戦車事件における兵士たち（その遺族を含む）の請求は、コモンロー上の過失のみに基づいて主張された。その主たる根拠は、国防省が、砲撃された戦車と砲撃した戦車ともに、誤射を防ぐための技術・装置を適切に装備しなかったことと、派兵前及び戦地において兵士に対し十分な認識訓練を実施しなかったことであつた。

スナッチランドローバー事件における遺族たちの請求は、2 つの根拠に基づいていた。1 つは、Hewett 二等兵と Ellis 二等兵両方の遺族から主張

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*一般科目

されたもので、国防省はヨーロッパ人権条約第2条（生命に対する権利）に違反した、つまりスナッチランドローバーでのパトロールを命令された兵士の生命への現実かつ間近に迫った危険からして、当然取るべきであった措置を取らなかったというものであった。もう一つは、Ellis 二等兵の遺族から主張された、コモンロー上の過失であった。

国防省は、コモンロー上の過失に基づく請求に対し、戦闘行動免責（Combat Immunity）の原則に基づいて却下されるべきであると主張し、ヨーロッパ人権条約第2条に基づく請求に対しては、まず Hewett 二等兵と Ellis 二等兵は、その死亡時においてヨーロッパ人権条約第1条のイギリスの管轄権（Jurisdiction）に含まれていなかった、次にその事実から、国防省は人権条約第2条に基づく義務を負っていないと主張した。以下、この事件に関する最高裁判決の多数意見（Hope 卿）を、ヨーロッパ人権条約第1条に関するもの、同第2条に関するもの、そして戦闘行動免責に関するものに分けて、概観・検討していく。

4. 管轄権（人権条約第1条）

ヨーロッパ人権条約第1条は以下のように規定している：

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。⁵⁾

ヨーロッパ人権裁判所の判決では、人権条約第1条は領域に基づく制限を設けていると理解され、その領域外での締約国の行動が人権条約第1条の適用を受けるのは例外的場合（exceptional cases）のみであるとされてきた（*Bankovic v Belgium* 事件大法廷判決）⁶⁾。

よって、スナッチランドローバー事件の請求は、イギリスの管轄権が、兵士がその領域外で活動しているときに人権条約第2条が保障されるよう、拡大されるかという問題を提起することになり（イラクはヨーロッパ人権条約締約国ではない）、そのためには、兵士の国外での活動は例外的事由（exceptional circumstance）に該当すると認められなければならないことになる。

この管轄権に関するイギリス国内裁判所の重要な判決が、*Al-Skeini and others* 事件に関する2007年の貴族院判決⁷⁾である。この事件は、イラク占領期間中にイギリス軍によって殺害された6人のイラク市民の遺族が、ヨーロッパ人権条約第2条違反を根拠にイギリス国防省を訴えたものであり、その前提として、イラクにおけるイギリスの管轄権が審理された。貴族院は、6人のうち、イギリス

軍によって管理されていた収容所で虐待され死亡した Baha Mousa に関しては、イギリス軍が effective control を行使しており、人権条約上の権利及び自由を保障する義務が生じるとしたが、その他の5人は、市街地その他で死亡しており、当時のイラクの治安状況からすれば、そうした市街地にイギリス軍の effective control が及んでいたとは考えられず、人権条約は適用されないと判断を下した。2001年のヨーロッパ人権裁判所の *Bankovic* 事件判決に沿って、管轄権を限定的に解釈したものであった。

しかし、本件の最高裁判所の多数意見⁸⁾は、*Al-Skeini* 貴族院判決を踏襲しようとしめない。その理由は、第1、*Al-Skeini* 事件の原告はイラク市民であり、彼らはイギリスの国家機関でも、その指揮命令に服する者でもなかった。これに対し、イギリス兵はイギリス当局の完全な管理下に置かれ、イギリス法の下にある。第2、*Al-Skeini* 貴族院判決は、領域に基づく管轄権を強調し人権条約上の権利及び自由を分割も調整もできないとしたヨーロッパ人権裁判所の *Bankovic* 事件判決に強く影響されている。第3、領域外での例外を明確に示すのはヨーロッパ人権裁判所の役割であるが、*Bankovic* 事件判決後のヨーロッパ人権裁判所の判決及び決定はそれと同じ主旨で述べられていない（not speak with one voice）。例えば2004年の *Issa* 事件のヨーロッパ人権裁判所判決⁹⁾は、*Bankovic* 事件判決とは異なる判断基準：「締約国がその国外においてその機関を通じてその権限と支配をその地域の人々に及ぼしたとき、彼らは管轄権の範囲に含まれる」を示している。

Al-Skeini 貴族院判決以降、イギリス国内裁判所におけるこの問題に関連した判決として、2008年の *R(Gentle) v Prime Minister* 事件貴族院判決¹⁰⁾と2010年の *R(Smith) v Oxfordshire Assistant Deputy Coroner (Equality and Human Rights Commission intervening)*（“*Catherine Smith*”）事件最高裁判決¹¹⁾がある。

R(Gentle) 事件は、同じチャレンジャー戦車事件において死亡した兵士の母親を含む死亡した兵士2人の母親が訴えを起こしたもので、そこでの主要な争点は、人権条約第2条は、国に軍事紛争にその軍隊を投入する前に信頼できる法的助言を得るため時宜を得た手段をとる実体的義務（substantive duty）を負わしているか否かであった。その判決の中で、イギリス兵はイギリス政府の権限に服しているが、*Al-Skeini* 貴族院判決において解釈されたようにその管轄権には含まれない、及び人権条約第2条は国際法上違法な侵略に参加しないという義務を政府に課すものではないとされた。*Catherine Smith* 事件は、イラクにおいて熱

中症で死亡した Smith 二等兵の母親が訴えたもので、そこでの争点は、彼の検屍が人権条約第2条の手続的要件を満たしていたか否かであったが、判決はイラクのイギリス兵がその基地の外にいるとき、彼（彼女）は人権条約の管轄内なのか否かの問題にも踏み込んだ。最高裁判所の多数意見は、締約国は人権条約を締結するとき、その領域外で活動するその軍隊に人権条約を適用することを想定していたとは思われないこと、国外で活動する兵士のケースは、ヨーロッパ人権裁判所において示された例外のどれにも該当しないこと、国が国内法及び国際法上、国外のその軍隊に有している管轄権が、その軍隊が人権条約第1条の目的のための管轄内にあることを意味するという意見について、ヨーロッパ人権裁判所の判例または原理の中にその根拠を見いだすことはできないことを理由として、管轄外であるとした。

このようにイギリス国内で裁判が展開されていくうちに、2011年7月、*Al-Skeini and others* 事件に関するヨーロッパ人権裁判所判決¹²⁾が出された。この判決では、*Al-Skeini* 貴族院判決においてイギリスの管轄権を否定された5人のイラク人の遺族にも、それが認められた。最高裁判所の多数意見は、このヨーロッパ人権裁判所判決の中から、本件に関連する箇所を抽出する。ひとつは人権条約第1条の管轄権に関する一般的な原理の説明であり、もうひとつは、これらの原理の当該事件の諸事実への適用である。

まず、管轄権の行使は、締約国がその作為又は不作为に責任を負うことになるための必要条件であり、その作為又は不作为が人権条約上の権利及び自由を侵害したという訴えを生じさせた場合には、締約国がその責任を負うことになるとした。そして、管轄権の範囲に関しては、①領域の原則が基本であるが、現在までにヨーロッパ人権裁判所はその判例の中で幾つかの例外的事由を認めてきたが、それらに該当するか否かは、それぞれの事件につき、それ特有の諸事実に照らして判断されなければならないとした。そして、これまでの判例の中に見いだされる例外的事由として、②国家機関の権限と支配、③当該地域の実効的支配、④人権条約の法的空間を挙げた。

② 国家機関の権限と支配について、次のように説明した。これまでヨーロッパ人権裁判所は、締約国の領域外で効果を生じさせたその国の機関の行動に、管轄権が拡大されることを例外として認めてきており、判例を精査してその限定された原理を確認しなければならないとした。そして、3つの限定された原理を提示する。第1は、国際法に則り外国に滞在する外交官及び領事官の活動が、その締約国の管轄権に含まれる

ことである。第2は、その地域の政府の同意、要請あるいは黙認によって、締約国が通常はその政府によって行使されるはずの公的権力のすべてあるいはいくらかを行使するとき、その締約国は領域外の管轄権を行使していると認められることである。第3は、領域外で活動している締約国の機関がそこで武力を行使した場合、それによってその機関の支配下に置かれた個人は、その締約国の管轄権に含まれることである。そして、この場合に重要なのは、当該人物への物理的な力と支配の行使であると補足している。さらに続けて、人権条約の権利及び自由は“分割も調整もできる”とし、*Bankovic* 事件判決とは異なる判断も示している。

③ 当該地域の実効的支配について、次のように説明した。適法あるいは違法の軍事行動によって、締約国がその領域外の地域で実効的支配をおこなったならば、その地域で人権条約上の権利及び自由を保障する義務が、当該締約国に生じる。これは、その地域で実効的支配をおこなったか否かという事実の問題であり、その判断には主として締約国軍隊の存在の大きさが考慮される、と。

④ 人権条約の法的空間については、次のように説明した。人権条約はヨーロッパの公的秩序のための憲法的文書であるとし、ある締約国の領域が他国の軍隊に占領された場合、占領した国は非占領国内の人権条約上の権利及び自由を保障する義務を負うことになる、なぜならば、そうしないと非占領国の人々からそれまで享受していた権利及び自由を奪うことになり、結果として人権条約の法的空間内で保障の“空白”を生むことになるから、とした。

次に、これらの原理の事実への適用である。*Al-Skeini* 事件の死亡は2003年の5月から9月の間に発生し、これらは戦争終結後の連合国暫定政権 (the Coalition Provisional Authority、イギリスもその主要なメンバー) による占領期間中であり、イギリス軍はイラクの暫定統治のため統治権力を行使していた。そうした状況を踏まえ、ヨーロッパ人権裁判所は、イギリスはその兵士を使って、その死亡した個々のイラク人に対し権限と支配を行使していたと認定した。

本件の最高裁判所の多数意見は、このヨーロッパ人権裁判所判決ではどの原理が採用されたかは明示されていないが、②国家機関の権限と支配の原理、さらにその中の第2の限定された原理：「通常はその政府によって行使されるはずの公的権力のすべてあるいはいくらかの行使」を採用して、死亡したイラク人にイギリスの管轄権を認定したと推定する。この期間、イラク政府は存在していなかったので、「当該地域の政府の同意、要請あるいは黙認によって」権力を行使したのではないが、もしイラク政府が存在していたなら「通常はその政府によって行使されるは

ずの公的権力」を、イギリス軍は行使していたからである。

しかし、以上の *Al-Skeini* 事件に関するヨーロッパ人権裁判所判決の判断は、そのまま本件のスナッチランドローバー事件に適用することはできないとする。なぜなら、2003年5月から始まった連合国暫定政権による占領は2004年6月30日のイラク暫定政府の発足の2日前に終了し、Hewett 二等兵と Ellis 二等兵が死亡した2005年及び2006年の時点では、イラクのすべての統治権力はイラク暫定政府に移行し、イギリスは、通常ならその国の政府によって行使されるはずの公的権力をもはや行使していなかったからである。

したがって、Hewett 二等兵と Ellis 二等兵が、その死亡時においてイギリスの管轄権に含まれていたのか否かの問いに対し、ダイレクトな答えを *Al-Skeini* 事件ヨーロッパ人権裁判所判決から得ることはできない。しかし、その判決の中の「現在までに(to date)」という表現は、例外的事由のリストがまだ完了していないことを意味し、今後新たな例外的事由が追加される可能性があり、国が国外の軍隊に対し国内法及び国際法上管轄権を有するということがその兵士たちは人権条約第1条の管轄内にあることを意味するのか否かの審理を、ヨーロッパ人権裁判所に求めた訴訟がこれまででなかったことに、それほど悩む必要はないとする。

次に、最高裁判所の多数意見は、*Catherine Smith* 事件最高裁判決が採用した、国外の軍隊は人権条約第1条の管轄権の範囲に含まれないとする見解をもはや支持できないとし、その結論を導く要点を *Al-Skeini* 事件に関するヨーロッパ人権裁判所判決から抽出しようとする。

第1の要点は、ヨーロッパ人権裁判所が例外事由として「国家機関の権限と支配の原理」を採用したことである。第2要点は、ヨーロッパ人権裁判所が、既述の *Bankovic* 事件判決と *Issa* 事件判決との不一致を、「国家機関の権限と支配の原理」の説明において *Issa* 事件判決をその判例の1つとして引用し、*Issa* 事件判決をこの争点に関するヨーロッパ人権裁判所判例の主流の中に据えることによって、解決したことである。第3の要点は、繰り返しになるが、ヨーロッパ人権裁判所が、*Bankovic* 事件判決の人権条約の権利及び自由は“分割も調整もできない”という考えを否定したことである。

続いて、最高裁判所の多数意見は「国家機関の権限と支配の原理」の変遷を、ヨーロッパ人権裁判所及び同人権委員会の判決・決定から示そうとする。この原理が最初に登場したのは、1975年の *Cyprus v Turkey* 事件ヨーロッパ人権委員会決定¹³⁾であり、その後いくつかの委員会決定、裁判所判決に見い

だすことができる。ヨーロッパ人権裁判所における *Al-Skeini* 事件の審理では、原告は上記の委員会決定を引用しているが、人権裁判所にはそれを批判する機会があったがそうしなかった。*Catherine Smith* 事件の最高裁判所においても、Phillips 卿他によって上記の委員会決定は参照された。したがって、現時点において、この原理は、最上層部から末端の兵士までその指揮命令系統を通じて、国の権限と支配が貫徹するという軍隊の仕組みを考えれば、自明のものであるとする。

さらに、最高裁判所の多数意見は、ヨーロッパ評議会の閣僚委員会(the Committee of Ministers)あるいは議員会議(the Parliamentary Assembly)がその文書の中で、軍隊での人権保障が実現するよう勧告していることも、拘束力のない勧告であるが、その根拠として挙げている。

以上から、Hewett 二等兵と Ellis 二等兵に人権条約第1条の管轄権を認めた。

5. 生命に対する権利(人権条約第2条)

ヨーロッパ人権条約第2条1項は以下のように規定している：

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。¹⁴⁾

本件の最高裁判所の多数意見は、1項の権利の2つの側面を指摘する。ひとつは実体的なものであり、もうひとつは手続的なものである。そして、本件に係るのは、前者だとする。そしてこの実体的権利には、国に対し正当な理由なく生命を奪ってはならないと要求することの他に、生命を守るための法制度、予防措置、その執行手続の確立を要求することも含意されているとする。

まず、最高裁判所の多数意見は、予備的考察をおこなう。武力交戦における戦闘行為に関わるいくつかの問題が司法判断に適さないことは確かだが、軍隊の作戦行動から生じる死亡・負傷のすべてが、人権条約第2条の対象外であるとする考えには賛成できないとする。そして、ヨーロッパ人権裁判所は、積極的義務を評価する際には競合する個人の利益と社会全体の利益との間で公正な均衡をとらなければならないことを繰り返し強調し、また広範な評価の余地が存在することも認めてきたとして、我々は、本件のスナッチランドローバー事件の審理において、2005年・2006年のイラクでイギリス軍が直面した状況の中で、その両極端

(the two extremes) の間のどこに境界線を引くかの決定を迫られているとする。

人権条約第2条1項の保護は、兵士を組織化された軍隊の一部として国外での実戦行動に派兵することによって、兵士が実行を命じられることそれ自体に殺される危険が内在しているとしても適切に装備され自分を守ることができるのであれば、侵害されたりはしない。つまり、人権条約第2条の適用はない。

しかし、他方で、国家とその軍隊との関係に人権条約を適用することを不可能にあるいは不適切にするものは、国外での作戦行動における装備、計画又は訓練などの十分さに関しては、存在しない。例えば、兵士の死因の調査から、その命を守るに必要な装備が支給されていなかった、拙い計画あるいは危険の不十分な予測の下で派兵したなどの組織的あるいは作戦上の怠慢が判明する事例が多く存在している。

人権条約第2条の実体的義務の軍事活動への適用が、不可能にあるいは不適切と考えられる程度は、そのコンテキストによって変化する。練習場で展開される作戦行動と敵と対面した戦場でのそれとの間には、根本的な違いがある。後者の場合、裁判所は、そこでなされた作戦行動上の現場の命令を問題にすることには、慎重でなければならない。また、調達に関する問題がある。軍隊への、あるいは軍隊内での資源の割り当ての問題は、現代の軍装備の多くが最先端技術の成果であり、非常に高価なものとなっていることから、政治的な解決が適している。さらに、実戦における人間の行動にも、大なる注意をもって、法は関わらなければならない。実戦中の軍隊の作戦行動を厳格な審査にかけることは、国の防衛能力を低下させる危険をおかすことになるからだとする。

次に、最高裁判所の多数意見は、この問題に関するヨーロッパ人権裁判所の判例を検討する。人権裁判所は、人権条約第2条は国に対し生命を守るための法体系をもつことを要求しており、その主たる義務は、刑事法犯罪の確定と刑事司法機関の執行による生命に対する権利の保障であるが、国にはさらに、積極的義務として予防的措置をとる義務が暗黙のうちに課されていると解している。この後者の義務はさらに、生命に対する権利への脅威に対して実効的な抑止措置をとるための立法的かつ行政的な体制をつくるという組織的な義務と、生命に対して現実かつ間近に迫った危機が生じた場合に、予防的措置を講じる義務とに分かれるとする。最高裁判所の多数意見は、前者の組織的義務は、本件での軍隊が作戦行動に派遣される前の段階での訓練と装備調達の問題に関わる可能性がある、そして後者の義務は本件にずばりあてはまると考える。

そして、ヨーロッパ人権裁判所は、本件のような軍事作戦に参加した軍隊に対し、人権条約第2条がどの程度保障されるのか、を審理する機会をまだもってこ

なかったが、何らかの指針を示すものは存在しているとして、ヨーロッパ人権裁判所の判例の検討を続ける。まず、裁判所は軍隊独特の性格に留意しなければならないことを確認する。そして、人権条約第2条によって市民に与えられる保護と同じものを兵士に期待することは、軍隊の性格と相容れないことは明らかであるとする。適切な訓練と装備の用意によって死亡・負傷の危険から身を守るということが、なぜ兵士には、警察官、消防士その他の危険業務従事者と同じようには実施されないのか、という問いに答えることは難しいが、兵士がリクルートと訓練から、実戦での作戦行動へ移動すれば、話は変わってくる。また、実戦に際しては、作戦行動の立案とその実施に責任を負う現場の指揮官に広範な評価権限を与えなければならないということが、国益から求められるとする。次に、2010年11月9日に下された、パラシュート降下訓練中に空軍兵士が死亡するという *Stoyanovi* 事件に関するヨーロッパ人権裁判所判決¹⁵に注目し、人権裁判所が予防的措置をとる義務を取り上げ、この義務は当局に対し不可能なあるいは不釣り合いな負担をかけないように解釈されなければならないと述べ、この積極的義務の適用はそれぞれのコンテキストに応じて異なるとしつつ、国が危険な活動を担い、実施しあるいはそれらを認めるときはいつでも、国はその危険性を合理的な水準にまで減らすよう、規則の制定と行き届いた管理によって努めなければならないと述べ、これにも関わらず損害が生じたとき、それが不十分な規制と管理に起因するなら、それは国の積極的義務違反に行き着くとの判断を示したことを紹介し、しかしこの人権裁判所の判断は訓練実施中に生じた事故、つまり国がその状況を管理できる場合のもので、実戦における予測困難な場面にこの判断枠組み、つまり規制と管理の枠組みを適用することはできないとの考えを示した。

こうして、最高裁判所の多数意見は、ヨーロッパ人権裁判所の判例の検討から、以下の指針を導き出せるとする。まず、戦闘状態での軍事作戦の計画及びその実行に関しては、裁判所は国に積極的義務を課してはならない。しかし、人権条約第2条の保護を当人が期待することに合理性がある場合には、積極的義務は果たされなければならない。その訴えが人権条約第2条の保護を超えたものかを判断することは、その訓練、調達、軍事作戦についての決定が、上層部の命令であり政治判断と政策問題に関わっているならば簡単である。また、危険を回避する責任を負う者が敵との交戦状態にあった場合も、同様に簡単である(超えている)。しかし、当局あるいは交戦状態にある者に与えられなければならない広範な評価の余地が、人権条約第2条の意味を無にすることなく理解されるように、請求を中景(middle ground)に持ち込むことができる余地があるのか否かの判断は、はるかに困難である。これは

それぞれの事件の事実に照らしてのみ、なしうると。

最後に、最高裁判所の多数意見は、こうした指針に照らして、本件の Hewett 二等兵に関する請求を検討する。スナッチランドローバー事件が生じた環境は、人権条約第2条の積極的義務が暗黙のうちに課せられたこれまでの事件のそれとは同じではなく、また Hewett 二等兵に関する請求内容明示訴答書の中の主張と Ellis 二等兵に関するそれも、同一ではないとする。それは、Hewett 二等兵が死亡した爆破は、Ellis 二等兵のその6ヶ月以上前に生じており、Ellis 二等兵に関する請求は、経験の観点からの、不十分な装備の供給と重装備の車両によるパトロールに限定しなかった失敗とに集中しているからである。しかし、Hewett 二等兵に関する請求も、少し雑でより広範囲であるが、彼より7週間前に同じ状況で死亡した Brackenbury 伍長代理の事件から、適切な車両と装備の供給における失敗とパトロールに責任を有する者が下した作戦決定に対する批判も含んでいるとする。しかし、多数意見は、これらの提出された請求内容明示訴答書 (particular) は手短な概略でしかないという事実を意識すべきだとし、またそれらの請求は2008年1月と2009年2月に出訴されており、Stoyanovi 事件ヨーロッパ人権裁判所判決が下される前であることも意識すべきだとする。なぜなら、ヨーロッパ人権裁判所は現在では、本件のような請求にあてはめられるべきより明確なアプローチを提供しているからである。それに照らせば、本件で遺族が主張している失敗のいくつかは、積極的義務の中の組織的な義務に関わるように思われ、その他の失敗は、生命に対して現実かつ間近に迫った危機が生じた場合の予防的措置を講じる義務に関わるように思われる。例えば、現場でなされた車両と装備の供給に関する調達決定と同じく兵士の出動に関する決定は、後者の予防的措置を講じる義務の範囲に含まれるとする。そして、本件での請求が人権条約第2条に含意されている積極的義務の構造に、如何に正確に適合するか否かは、これらの事件に関しより多くの事実を知らなければ決定できないとの結論を導き出す。

6. 戦闘行動免責

チャレンジャー戦車事件の請求は、Pinkstone 伍長ら味方の戦車への誤射に直接関与した兵士たちの作為又は不作為には、コモンロー上の過失責任はないとの前提ですめられた。請求の焦点は、関係した2両の戦車に誤射を防ぐための技術・装置を適切に装備しなかったという失敗と、派兵前及び戦地において兵士に対し十分な認識訓練を実施しなかったという失敗に向けられた。

これに対し、国防省は戦闘行動免責 (combat immunity) を訴え、それには、死亡・負傷を生じさせた作戦行動中の作為又は不作為のすべてが含まれるよう、広い適用範囲が与えられなければならないと主張した。この戦闘行動免責の原理が適用されれば、裁判所の裁判権から完全に過失責任の争点を消すことができるのである。

最高裁判所の多数意見は、まず、この原理に関する先例を検討する。この原理が最初に登場したのは、1940年の *Shaw Savill & Albion Co Ltd* 事件に関するオーストラリア高等法院判決¹⁶⁾だとする。この事件は、イギリス海軍の艦船と民間の船舶が衝突した事件に関するもので、民間船舶の船主はその衝突は海軍の過失によって生じたと主張し、損害賠償を請求した。これに対し海軍は、敵に対する実戦活動中においては、帝国軍隊は民間人の損失・損害を回避しなければならないとの注意義務を負わないと反論した。Dixon 裁判官は、敵との実戦中に、軍艦の操縦将校が、その海域に現れた民間船舶への危害を避けなければならないとのコモンロー上の義務を負っていると考えことは難しいとした。彼は、さらに、この原理は敵の存在あるいは敵との遭遇が確実視されている場合だけでなく、敵に対するすべての作戦行動に適用されなければならないと主張した。こうした考えは、1982年の *Grove* 事件に関するオーストラリア高等法院判決¹⁷⁾の Gibbs 裁判官、1996年の *Mulcahy* 事件に関する控訴院判決¹⁸⁾の Neill 裁判官に受け継がれ、2003年の *Multiple Claimants* 事件に関する高等法院判決¹⁹⁾の Owen 裁判官も、敵に対するすべての作戦行動に広げることを支持し、そこでは兵士は攻撃あるいは攻撃の恐れにさらされており、さらに軍隊が攻撃を受けるか敵の抵抗に遭うかの中での作戦行動の計画及び準備も含まれるとした。が、Owen 裁判官は、この「作戦行動の計画及び準備」については、そこで損害が生じた作戦行動の計画及び準備を指しており、これから見込まれている未確定の作戦行動のための一般的な計画及び準備は含まれないとした。

しかし、最高裁判所の多数意見は、Owen 裁判官の、戦闘行動免責をそこで損害が生じた作戦行動の計画及び準備にまで及ぼすという考えは、緩すぎて、これまでこの原理が適用されてきた状況を超えて適用されることになるとし、2004年の *Bici* 事件に関する高等法院判決²⁰⁾における Elias 裁判官の、戦闘行動免責の範囲は限定的に解釈されるべきであるとの考えこそが、先例によって肯定されるとする。

そして、チャレンジャー戦車事件の、技術・装置の適切な装備を怠ったという失敗と派兵前及び戦

地において兵士への十分な認識訓練を怠ったという失敗に関わる請求は、敵対行動が開始される前にこうした措置が取られるべきであったということにまとめることができるとし、本件での問題は、戦闘行動免責の原理が、実戦段階の失敗からそれ以前の時点での失敗にまで及ぼすことができるか否かであるとする。最高裁判所の多数意見は、本件における敵対行動が開始される前の失敗にまで、この原理を適用することは、これまでの適用範囲を超えることになり、認められないとする。例えば、*Shaw Savill & Albion Co Ltd* 事件において、オーストラリア高等法院は、事故当時、海軍の艦船は敵との交戦状態にはなかったとして戦闘行動免責を認めず、*Mulcahy* 事件においては、控訴院はその適用を認めたが、それは当該事故が敵との交戦の前ではなく、まさにその最中に生じたからであると説明する。

さらに、免責の範囲を拡大するには、その正当化が必要であり、それは必要性によって示されなければならないとする。*Shaw Savill & Albion Co Ltd* 事件のオーストラリア高等法院判決の中で、Starke 裁判官が、戦争時に行われたすべての作戦行動が戦争に関わる作戦行動ではないと述べていること、また Dixon 裁判官も敵との交戦活動と戦闘行動の中のその他の活動との間には区別が存在することを認め、後者の例として母港に帰港している海軍の艦船を挙げて説明しているとし、この例の場合、艦船の将校に注意義務を課してはならないとする根拠は、明らかに存在しなかったとする。最高裁判所の多数意見は、以上の視点から、チャレンジャー戦車事件においても、いつ、技術・装置の適切な装備と兵士への十分な認識訓練に関する失敗が生じたのか、が問題となるとする。そして、派兵前であろうと戦地であろうと兵士が訓練されているとき、あるいは戦車その他の戦闘車両の装備に関する決定がなされているとき、考慮し、計画しそして判断を下す時間があるはずであり、これらの活動は、敵対交戦中の危険から十分に離れたものであるから、チャレンジャー戦車事件の請求には戦闘行動免責は適用されないと結論を下す。

Ellis 二等兵の遺族から請求に関しては、最高裁判所の多数意見は、そこで主張されているいくつかの失敗は、現場において交戦中に指揮官によってなされた決定によるものであり、戦闘行動免責に含まれるという主張が成り立つ可能性があるとする。しかし、どちらにせよ、人権条約第2条に基づく請求と同様、この判断に必要な情報が現段階では不足しているとする。

7. ま と め

スナッチランドローバー事件とチャレンジャー戦車事件に関する最高裁判所の多数意見は、ヨーロッパ人権条約に基づく請求に関しては、第1条の管轄権については認めたが、第2条の生命に対する権利の侵害については、より多くの事実が必要であるとし、コモンローに基づく請求に関しても同様の理由から、その結論を留保するものとなった。この事件は、より詳細な事実に基づく審理が高等法院で開始される見込みである²¹⁾。

イラク戦争・占領期間中のイギリス軍が関与した事件に、ヨーロッパ人権条約が適用されるのか否かの問題は、*Al-Skeini and others* 事件に関する2004年12月14日の高等法院（女王座部）判決においてその適用範囲を限定的に解釈されて以降、議論されてきたが（その多くは判決に批判的なものであったが）、本件の最高裁判所の多数意見によって適用範囲の拡大が示された。イギリス国外のイギリス軍兵士への人権条約の適用は、今後も踏襲されると思われる。それに対し、人権条約第2条の生命に対する権利の具体化、戦闘行動免責適用範囲の明確化に関しては、活発な議論の展開が予想され、それらの細かな検討は次の課題としたい。

ここでは、この判決に対する国防省その他の反応と、裁判官7人の意見が4対3に割れた本件の最高裁判所判決の少数意見を短く紹介して、まとめに代えたい。

Philip Hammond 国防大臣は、「私は、結局のところ我々の軍隊がその作戦行動を実行することをさらに困難にし、広範な軍隊の決定を不確かな訴訟へと開放する可能性のある、この判決の広範な含みに大いに注目している。・・・我々は、次のことを今後の裁判において主張し続けるだろう、作戦行動中の軍隊が、我が国の安全を守るために作戦上必須なものよりもヨーロッパ人権条約を優先させなければならないということは正しいはずがない、と。」と述べた²²⁾。イギリス陸軍のトップ（chief of general staff）である Sir Peter Wall 大將は、2013年6月27日に RUSI（Royal United Services Institute for Defence and Security Studies）において講演し、その中で「先週の戦闘行動免責に関する最高裁判所判決の影響を見定めるには、もうしばらくかかります。私はみなさんに、その決定は戦闘の真っ直中で下される決定には影響を及ぼさないことを確約できます」と述べた²³⁾。2013年6月25日の貴族院でも取り上げられ、フォークランド戦争に従軍した元海軍将校の West 卿が「持っている装備でその戦争を戦うのが軍人の義務である。この義務に反対するために人権法を使うことができるとは、全く馬鹿げている」と主張した他、他の議員からも今後の作戦活動への懸念が示

された²⁴⁾。議会・庶民院の国防委員会は、2013年7月3日に“派兵されたイギリス軍兵士の保護と義務に関し、その合法性と正当性を保障するための新しい調査”を始めると発表した²⁵⁾。2013年7月31日のイギリスの新聞は、2003年6月にイラクで反発したイラク人群众に殺害されたイギリス憲兵隊員の遺族が、この事件における国防省の対応に過失があったとして訴訟を起こす、前月の最高裁判所判決を受けての動きであると報じた²⁶⁾。

最高裁判所判決の3人の裁判官の少数意見の中で、最も詳細な Mance 卿の意見を取り上げる。まず、Mance 卿は管轄権については多数意見に同意する。しかし、コモンローによる判断を、ヨーロッパ人権条約第2条によるそれよりも優先させるべきだと主張する。そして、それぞれの請求の中味を吟味し、例えばチャレンジャー戦車事件においては、現場において戦車の砲撃を指揮した下士官の責任を無視することはできないとする。コモンロー上の兵士に対する国の責任については、1947年国王訴訟手続法 (Crown Proceedings Act) から、国王は不法行為に関して他の使用者と同じ責任を負うことになるが、戦時の実戦に関しては軍の行動は司法審査の外にあるとする判決の存在を指摘する。そして交戦状態での作為又は不作為に適用されるコモンロー上の戦闘行動免責に関しては、本件の2つの請求は、交戦状態から離れた状態での出来事として戦闘行動免責には該当しないように主張されており、したがって注意義務 (duty of care) の有無が問題となるとし、公的政策 (public policy) における注意義務に関する判例を検討していく。そして、多数意見では装備の調達・訓練の実施等と実戦における現場での命令等の間の関連性が、軽視されていることなどを指摘し、より良い装備・訓練は政策決定と関係しそれらはより広範な問題へとつながる可能性があり、しばしば政治的論争となるとする。さらに、死亡した兵士の遺族が国をその装備の不備を理由に訴えることができるとするならば、兵士たちも実戦中に、その装備は不十分なもので、したがってそれを使って戦闘行動に入れと命令することはコモンロー上の注意義務違反あるいは人権条約第2条違反だと主張するかもしれない、もし国内法によってそれを強制すれば兵士たちはヨーロッパ人権裁判所に訴えるかもしれない、とも述べる。したがって、コモンロー上の不法行為に基づくチャレンジャー戦車事件の請求は、交戦状態におけるものであり国に注意義務はないとして、却けられるべきである、Ellis 二等兵の遺族から請求も同様であるとした。次に、人権条約第2条に基づくスナッチランドローバー事件の請求に関しては、本件のような事件に

ついて、ヨーロッパ人権裁判所は判決を下しておらず、そうした中ではコモンローに照らして判断を下しておくのが国内裁判所としては妥当な対応であるとし、その請求も、却けられるべきであるとの結論に達している。

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) *Smith & Others vs The Ministry of Defence* [2011] EWHC 1676 (QB) .
- 3) *Smith & Others vs The Ministry of Defence* [2012] EWCA Civ 1365 .
- 4) *Smith & Others vs The Ministry of Defence* [2013] UKSC 41.
- 5) 松井芳郎編『ベーシック条約集 2009』, 東信堂, 2009年, p238.
- 6) *Bankovic v Belgium* (2001) [GC] Application no. 52207/99.
- 7) *Al-Skeini and others v Secretary of State for Defence* [2007] UKHL 26. 水島朋則「国際社会のグローバル化変動と国際法—領域外での国の活動に関する人権条約上の義務について」『法律時報増刊 改憲・改革と法』民主主義科学者協会法律部会編, 日本評論社, 2008年, p18 参照. この事件の高等法院判決については、1) の拙稿を参照.
- 8) 2005年憲法改革法の施行により 2009年10月1日からイギリスの最終審裁判所は、それまでの貴族院 (及び枢密院司法委員会) から最高裁判所 (Supreme Court of the United Kingdom) となった.
- 9) *Issa and others v Turkey* Application no. 31821/96.
- 10) *R(Gentle) v Prime Minister* [2008] UKHL 20.
- 11) *R(Smith) v Oxfordshire Assistant Deputy Coroner (Equality and Human Rights Commission intervening)* [2010] UKSC 29.
- 12) *Al-Skeini and others v The United Kingdom* [GC] Application no. 55721/07.
- 13) *Cyprus v Turkey* (1975) 2DR 125.
- 14) 松井芳郎編『ベーシック条約集 2009』, 東信堂, 2009年, p238.
- 15) *Stoyanovi v Bulgaria* Application no. 42980/04.
- 16) *Shaw Savill & Albion Co Ltd v The Commonwealth* (1940) 66 CLR.
- 17) *Grove v The Commonwealth* [1982] HCA 21.
- 18) *Mulcahy v Ministry of Defence* [1996] EWCA Civ 1323.
- 19) *Multiple Claimants v The Ministry of Defence* [2003] EWHC 1134 (QB).
- 20) *Bici v Ministry of Defence* [2004] EWHC 786 (QB).
- 21) “Soldiers’ families can sue Ministry of Defence, supreme court rules”, The Guardian, 19 June 2013 (電子版) .

- 22) “Landmark ruling for military families paves way for damages claims”, The Telegraph, 19 June 2013 (電子版) .
- 23) “Keynote Speech 2013: General Sir Peter Wall”, Land Warfare Conference 2013, 27-28 June 2013, RUSI (Royal United Services Institute for Defence and Security Studies.
- 24) Hansard – House of Lords debates , 25 June 2013, Column 656-658.
- 25) “New Inquiry: UK Armed Forces personnel and the legal framework for future operations”, 3 July 2013, Defence Committee.
- 26) “Red Cap’ s family sues Mod for negligence over his death in Iraq”, The Guardian, 31 July 2013 (電子版) .

数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト I

有本 茂^{1*} 福田信幸^{2*} 廣木一^{3*} 村上達也^{4*}

成木勇夫^{5*} 斎藤恭司^{6*} 竹内 茂^{7*} 横谷正明^{8*}

Mathematics and Chemistry

Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project I

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI

The present series of articles (Parts I, II, and III) records 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 a challenging cross-disciplinary problem which is directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. This problem is 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, Elliptic functions, 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。本論文は、この学際シンポジウムで発表された学術的内容を総括記録すると共に、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)」をその定式化の中にもつ1つの学際的基本問題を提起するものである。（この問題提起の部分のみは、英語で表記した。）

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関係する成果を記念する集会であった。本シンポジウムの数学の部では数学と諸科学の交流の歴史を顧み、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、補足した本論文は **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。

4月5日の第1部は、数学と隣接科学分野の概観、数学と化学のとの間に横たわる広大な未開拓領域に関する概説、福井謙一博士の回顧より始まり、京都大学物質・細胞統合システム拠点 (iCeMS) の村上によるカーボンナノチューブの癌治療への可能性をさぐる話（講演は録音再生を用いた）、今年10月、津山講演予定の白川英樹博士（2000年ノーベル化学賞）の

原稿受付 平成25年8月30日

1*, 2*, 8* 津山高専 一般科目 3* 津山高専 一般科目

4* 京都大学 物質・細胞統合システム拠点 (iCeMS)

5* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

6* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

7* 岐阜大学 教育学部・数学科

直弟子、廣木による、ポリアセチレン合成の発見論的逸話等が披露された。

また、この日、本シンポジウム特別ゲストにより、数学とその隣接科学の歴史的概観と数学と化学の境界における新しい動向についての話が披露された。4月6日の第1部はドイツの国際学術雑誌で紹介された中に向かって無限に繰り返しを持つ神秘的な「津山城関数」と呼ばれるフラクタル3次元図形にかかわる話、朝日新聞社賞受賞の津山高専4年生橘智子さんによる「複素ピタゴラス数の構造について」の話、津山高専数学科、横谷、福田による、一般、数学アマチュア向け初等的「フェルマーの無限降下法」の話を経て、斎藤、成木による「楕円関数と2重周期性」の講演が行われた。

2. 福井謙一博士の思い出

平成25年、4月5日、6日「数学と化学の学際シンポジウム」冒頭において、福井プロジェクト・ディレクター有本と長崎総合科学大学、新技術創成研究所所長（京都大学名誉教授）山邊時雄教授により福井謙一先生を回想する講演がおこなわれた。（後者の講演は録音再生を用いた。）また、有本による福井謙一先生回想の講演は補充された形で、化学同人出版、学術雑誌「化学」に2013年11月、発表された。（第III部後記参照）

3. UFDの数学 I

成木勇夫

零因子を持たない可換環は整域（integral domain）と呼ばれる。整域の理論の中で、良い性質を持つ類として知られているものの一つとして、一意分解整域（unique-factorization-domain, 略してUFD）と呼ばれるものがある。この小論では、その本質が明らかになるような形でUFDを定義し、UFD理論における最も基本的な定理：「UFD上の一変数多項式環は再びUFDである」の証明について概説して見よう：

まず R は可換環とする。 R の二つの元 u, v に対して、 v は u の因子（factor）であるとは、 $u = v \cdot w$ となる $w \in R - \{0\}$ が存在するときに言う。 R の零元 0 はそれ自身の自明な因子であるが、 0 の、 0 ではない因子は零因子と（特別に）呼ばれる。従って、 R がもし、（上の意味で）整域であるとするならば、 R の 0 でない元の積は決して 0 とはならない。そして、これがまた R が整域であるための条件である。

以後、 R は整域であると仮定する。また因子に関する議論は $R^* = R - \{0\}$ 上に限って行うことにしよう。

因子はまた、約元（divisor）とも呼ばれるが、その理由は v が u の因子であることを v は u を約す、或は割る（divide）などと言い表すからである。この u と v の関係は記号

$$v \mid u$$

で表し、二項関係 $\mid$ を整除関係と呼ぶ。（整除＝割り切ること。）また、このとき、

$$u = vw$$

となる $w \in R^*$ は（一意的に決るので）記号

$$\frac{u}{v} \quad \text{或いは} \quad u/v$$

などで表し、 u の v による商（the quotient of u by v ）と呼ぶ。

整除関係に対しては、明らかに次の推移律が成り立つ：

$$(T) \quad w \mid v, v \mid u \Rightarrow w \mid u$$

しかし、整除関係は一般には順序関係ではない。このことは以下の議論から理解される。

同値関係 $\sim$ を次のように定義する：

$$\stackrel{\text{def}}{u \sim v} \Leftrightarrow u \mid v, v \mid u$$

さて、これによって $u \sim v$ と仮定すると

$$\frac{v}{u}, \frac{u}{v}$$

は互に逆元、とくにどちらも1の約元である。一般に1の約元は可逆元（invertible element）と呼ばれ、可逆元の全体は R^* での積に関して群をなす。この群を記号

$$I(R)$$

または単に I で表すことにしよう。

群 I は乗法群として $R^* = R - \{0\}$ に作用し I による軌道空間 R^*/I は同値類空間 $R^*/\sim$ と一致する。整除関係 $\mid$ は自然に $R^*/\sim$ での整除関係 $\mid$ を誘導し、それは $R^*/\sim$ での順序関係となる。

このような少し人工的な同値関係 $\sim$ の定義や $R^*/\sim$ 上での順序関係となる整除関係などについて、もう少し合理的で自然な説明を与えるには、 R における単項イデアルの概念を用いた言い換えを導入するのが早道である。

$R^* = R - \{0\}$ の元 v に対して、 v で生成される R の単項イデアルを (v) で表す：

$$(v) := \{av \mid a \in R\}$$

明らかに

$$(i) \quad u \sim v \Leftrightarrow (u) = (v)$$

$$(ii) \quad v \mid u \Leftrightarrow (u) \subseteq (v)$$

が成り立つ。

実際、 (v) は v を約元とする元の全体であるから

$$v \mid u \Leftrightarrow u \in (v) \Leftrightarrow (u) \subseteq (v)$$

と(ii)が証明される。また、 $u \sim v$ は $u \mid v$ かつ $v \mid u$ と定義されたので(ii)から(i)が従う。

(i) によって、一つの単項イデアルの生成元の全体は、同値関係 $\sim$ による一つの同値類をなし、逆もまた成り立つことが分る。

(ii) を考慮して、同値類の大小関係を

$$[v] \leq [u] \Leftrightarrow (u) \subseteq (v)$$

と定義する。 $[u], [v]$ はそれぞれ u, v の属する同値類である。この定義によれば

$$I = [1]$$

は最小類である。対応するイデアルは最大イデアル R である。

類 α が $I = [1]$ と異なり、また $\beta \leq \alpha$ となる類 β が I と自身 α 以外にないとき、 α は既約類と呼ばれる。

既約類に対応する単項イデアルは、 R を除いた全単項イデアルの集合の中で、包含関係に関して極大なものであることになる。

ここで、小さな反省をして見る。確かに $R^* = R - \{0\}$ には二乗の乗法 (積) があって、それは可換で、結合律を満たしている。しかし、 I 以外の元には逆元がないので一般には R^* は群ではない。しかし、それは単なる可換半群であるばかりではなく、単位元 1 を持ち、乗法は簡約律

$$uw = vw \Rightarrow u = v \quad (u, v, w \in R^*)$$

を満たしている。従って R^* は、(半群の一般理論によって) R^* で生成される可換群の中に (算法もこめて) 埋め込まれる。このような可換群は同型を除いて一意に決まり R^* の商群 (the group of quotients) と呼ぶ。この商群を K^* で表す。 K^* は R^* で生成されるので、 K^* の任意の元は

$$uv^{-1} = \frac{u}{v} \quad (u, v \in R^*)$$

の形に書き表される。もちろん、表現は一意的ではなく

$$\frac{u}{v} = \frac{u'}{v'} \Leftrightarrow uv' = u'v$$

と約束される。

ここで K^* の二つの元の和を

$$\frac{u}{v} + \frac{s}{t} = \frac{ut + vs}{vt}$$

と定義すれば、 $ut + vs \neq 0$ ならば、この和は二乗の表現には依らず K^* の元として確定する。また $ut + vs = 0$ の場合は二乗の和は R の元 0 であるとする。この場合

$$\frac{s}{t} = \frac{-u}{v} = (-1) \cdot \left(\frac{u}{v} \right)$$

となるので、積と和の間に分配律が成り立つとすれば、この定義はまったく合理的である。

実際、

$$K := K^* \cup \{0\}$$

と定義すれば、 K は $R = R^* \cup \{0\}$ を含む体となる。 K は R の商体 (the quotient field) と呼ばれる。それは整域 R を含む最小の体であると考えることが出来る。

同値類空間 $R^* / I = R^* / \sim$ の各元は R における非零単項イデアルと 1 対 1 に対応していることは上に見た通りである。すなわち $u, v \in R^*$ に対して

$$u \sim v \Leftrightarrow (u) = (v) \Leftrightarrow u / v \in I$$

が成り立つからである。

では剰余類空間 K^* / I の各元に対して、類似の対象を考えることが出来るであろうか?

まず任意の $u \in K^*$ に対しても

$$(u) := \{au \mid a \in R\}$$

と置くことが出来、これは分配律により、明らかに加法部分群 ($\subseteq R$) であり、また R の任意の元の乗法によって自身の中に写される。従って、 R の部分集合であると言う条件を除けば、イデアルであるための (残りの) 条件をすべて満たしている。このことから (u) は u によって生成される単項分数イデアルと呼ばれる。

この考察により K^* / I の各元は、一つの単項分数イデアルの生成元集合と同一視される。そして K^* / I も R^* / I と同様に順序付けられる:

$$[u] \leq [v] \Leftrightarrow (u) \subseteq (v) \Leftrightarrow u / v \in R^*$$

但し、 $[u], [v]$ などはそれぞれ u, v の属する同値類 (= 剰余類 I_u, I_v) を表すものとする。

さて、これまでは K^* / I は乗法群であると考えて来たが、これからは、可換群なので、それを加法群と見做しても、十分注意すれば、論理的には何の問題も起こらない筈である。(環 R 、体 K には乗法の他に加法もあるが、それは K^* / I の算法には何の影響も与えていないからである。) すなわち K^* / I の単位元 I は 0 と書かれ、 K^* / I での算法 $+$ は

$$[u] + [v] := [uv]$$

と定義される。

上で導入された順序 $\leq$ に関して、 0 より大きい K^* / I の元は正元と呼ばれ、 0 より小さい元は負元と呼ばれる。出発点の半群 R^* / I は非負元の全体であり、従って

$$P := R^* / I - \{0\}$$

は正元の全体である。上で既約類の概念を導入したが、それは順序 $\leq$ に関する、 P の中の極小元と新たに特徴付けられる。 P における極小元全体の集合を記号

$$\Lambda$$

で表すことにしよう。

これだけの準備の上で、ようやく R が UFD であることを定義することができる。

(第 II 部に続く。)

4. 楕円積分

斎藤恭司

楕円積分の研究は加法定理の発見(オイラー1751)以来長い歴史があるが(文献 14) 参照)、本節では天下りのモジュライパラメータに関わる幾つかの結果を原始形式の積分の立場から要約してみる(文献 9)-12) 参照)。

§1 まず次の三種の方程式で定まる楕円曲線の族を三つ考えよう。

$$A_2: F_{A_2}(x, y, g) := y^2 - (4x^3 - g_2x - g_3). \quad (0.1)$$

$$B_2: F_{B_2}(x, y, g) := y^2 - (x^4 + g_2x^2 + g_4 + g_2^2/8). \quad (0.2)$$

$$G_2: F_{G_2}(x, y, g) := x(x^2 - y^2) + g_2(3x^2 + y^2) + g_6 - 2g_2^3. \quad (0.3)$$

これ等は歴史的には各々Weierstrass、JacobiそしてHesseの標準型として良く知られている(正確にはそれ等を原始形式の立場から座標変換を施している)。それを改めてrank 2のルート系の名を用いて A_2 -型、 B_2 -型そして G_2 -型と名付ける。その理由を以下に述べよう。

まず、式中の g は下付き数字で示したウェイトを持つ複素二変数パラメータ空間 $\mathbb{C}^2$ (それ等を型に応じて S_{A_2} , S_{B_2} 又は S_{G_2} と名付ける) の点を動くものとする。天下りであるが、判別式を

$$\begin{aligned} \Delta_{A_2} &:= -g_3^2 + g_2^3, & \Delta_{B_2} &:= -g_4^2 + g_2^4/64, \\ \Delta_{G_2} &:= -g_6^2 + 4g_2^6 \end{aligned} \quad (0.4)$$

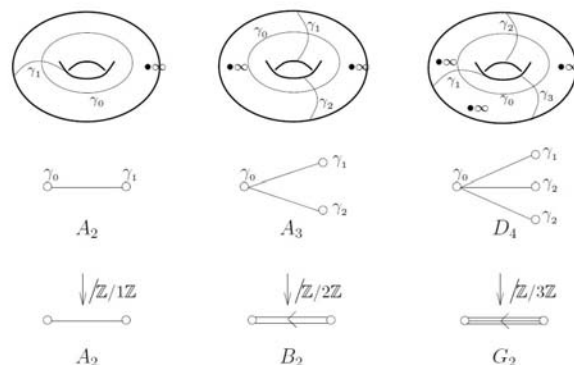
と置きその零面を D_{A_2} , D_{B_2} 及び D_{G_2} と記しディスクリミナントと呼ぶ。すると、補集合の各点 $g \in S_{A_2} \setminus D_{A_2}$, $S_{B_2} \setminus D_{B_2}$ 又は $S_{G_2} \setminus D_{G_2}$ に対し、方程式 (0.1), (0.2), (0.3) の零面が複素 xy 平面に定めるアフィン曲線 E_g は各々穴が一個、二個又は三個あいた楕円曲線となる。複素楕円曲線は位相空間としては2次元トーラスなので、下図の第一段のように表示しておく。更に複素 xy 平面の自己同型写像 σ を

$$\sigma_{A_2}(x, y) := (x, y),$$

$$\sigma_{B_2}(x, y) := (-x, y), \quad \sigma_{G_2}(x, y) := \left(-\frac{x+y}{2}, \frac{3x-y}{2} \right)$$

と置くと、各々、対応する楕円曲線の定義方程式を不変にする位数1、2及び3の巡回群 $\langle \sigma \rangle$ を生成し、楕円曲線の穴に推移的作用する事が分かる。

ここで楕円曲線の1次元ホモロジー群 $H_1(E_g, \mathbb{Z})$ を考えると、夫々の型に応じて、次の図の一段目の様に γ_i ($0 \leq i \leq 2, 3, 4$) という基底が取れ、各々階数が2、3又は4の自由加群である。次の図の二段目はそれ等の基底の交叉状況のダイアグラム表示を与えたものであるが、



夫々 A_2 -型、 A_3 -型そして D_4 -型のディンキン図式に成る事が見て取れる。この事により、 $H_1(E_g, \mathbb{Z})$ は対応するルート系のルート束に同一視される。ここで自己同型写像 σ は基底の集合であるディンキン図式の自己同型も引き起こしている。その自己同型により、ディンキン図式を折り畳んだ結果の図が上図最下段に与えられている。直ぐ見て取れる様に、夫々 A_2 -型、 B_2 -型そして G_2 -型のディンキン図式に成る事が見て取れる。この折り畳まれたダイアグラムの二個の頂点が、不変部分群 $H_1(E_g, \mathbb{Z})^\sigma$ の基底を記述している。これが、夫々の楕円曲線族に上記の名前を与えた理由である。以降三つの型を統一的に扱うために、 $A_2 = I_2(3)$, $B_2 = I_2(4)$ および $G_2 = I_2(6)$ と置く。¹

以上が意味ある方程式を見つけるという §1 に対応する。次に §2 及び §3 を考えよう。

§2 a) 天下りであるが、被積分微分形式として前 §1 の三つの楕円曲線族の各型 $I_2(p)$ ($p=3, 4$ 又は 6) 各々に対し次のシンボルを考える。

$$\zeta_{I_2(p)} := \text{Res} \left[\frac{dx dy}{F_{I_2(p)}(x, y, g)} \right] \quad (0.5)$$

その意味は次の通りである。各点 g を固定すると右辺の括弧の中身は xy 平面上の有理式係数の2-微分形式で丁度楕円曲線 E_g に一位の極を持つ。それに対しResidue (剰余) と呼ばれる E_g 上の1-微分形式が定まる。

それは xy 座標を用いる事により $\frac{dx}{\partial F_{I_2(p)} / \partial y}$ と表示される(ただし、 x, y は $F_{I_2(p)}(x, y, g) = 0$ なる関係を満たしている)。即ち $\zeta_{I_2(p)}$ は g でパラメトライズされた1-微分形式の族である。少し計算すると、この $\zeta_{I_2(p)}$ は穴も含めた全楕円曲線の上で正則(極を持たない、即ち第一種)となる事もすぐ分かる。この $\zeta_{I_2(p)}$ が原始形式の古典的な例となる(文献 9), 14) 参照)。

b) 次に原始形式 $\zeta_{I_2(p)}$ を積分するサイクルのなす加

群として各点 $\underline{g}$ 毎に、 $H_1(E_{\underline{g}}, \mathbb{Z})$ の中の巡回群不変な階数 2 の部分加群を考える。すでに脚注 1 で述べたように、それは束 $L_{I_2(p)}$ と同型であるが、同型写像（即ち基底 e_1, e_2 に対応する $H_1(E_{\underline{g}}, \mathbb{Z})$ の元の取り方）は点 $\underline{g}$ のみでは決まらない（実際は点 $\underline{g}$ とディスクリミナントの二つの分岐とを結ぶ道に依存して決まる）。即ち或起点 $\underline{g}_0$ で同型を一つを固定してやると、あとはそこから点 $\underline{g}$ までの $S_{I_2(p), \mathbb{C}} \setminus D_{I_2(p), \mathbb{C}}$ 内の道 g に沿っての平行移動により決まることが分かる。又、その決まり方は道 g のホモトピー類にのみよる。この記述の帰結として次の二つの写像が構成された。

モノドロミー表現：

$$\begin{aligned} \rho : \pi_1(S_{I_2(p), \mathbb{C}} \setminus D_{I_2(p), \mathbb{C}}, \underline{g}_0) &\rightarrow \text{Aut}(L_{I_2(p)}), \\ g &\mapsto \{\gamma \in L_X \mapsto g\gamma := \text{道 } g \text{ に沿った } \gamma \text{ の平行移動}\}. \end{aligned}$$

周期写像：

$$\begin{aligned} (S_{I_2(p), \mathbb{C}} \setminus D_{I_2(p), \mathbb{C}}, \underline{g}_0)^\sim &\rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(L_{I_2(p)}, \mathbb{C}), \\ \tilde{g} &\mapsto \{\gamma \in L_{I_2(p)} \mapsto \int_{\tilde{g}\gamma} \zeta_{I_2(p)} \in \mathbb{C}\}. \end{aligned}$$

先に行く前に基本群 $\pi_1(S_{I_2(p), \mathbb{C}} \setminus D_{I_2(p), \mathbb{C}}, \underline{g}_0)$ を決定しておく。Zariski van Kampen の古典的方法を (0.4) のディスクリミナントの定義方程式に適用することにより、基本群は以下の生成系と関係式で決まる。

$$G_{I_2(p)} := \langle a, b \mid ab \cdots = ba \cdots \rangle$$

（ここで、定義関係式の両辺は各々文字 a 及び b が交代的に現れる長さ p の語である。現在の言葉ではこの群は $I_2(p)$ -型の Artin 群である（文献 3), 12) 参照）。²

§3 以上の §1 及び §2 をふまえて、周期写像を考察する（このセクションの詳細については文献 12) §6 を参照）。

定理 a) モノドロミー表現は次の完全列で与えられる：

$$1 \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow G_{I_2(p)} \xrightarrow{p} \Gamma_1([p/2]) \rightarrow 1 \quad (0.6)$$

但し $\mathbb{Z}$ は元 $(ab)^{k(p)} = (ba)^{k(p)}$ ($k(3) = 12$, $k(4) = 8$, $k(6) = 6$) で生成される無限巡回群であり、 $\Gamma_1([p/2])$

は対応 $a \mapsto \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $b \mapsto \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -[p/2] & 1 \end{bmatrix}$ により束

$(L_{I_2(p)}, -J_{I_2(p)} + J_{I_2(p)})$ の自己同型群の主合同部分群に埋め込まれる。

定理 b) 周期写像は次の $\Gamma_1([p/2])$ -同変な双正則同相写像を引き起こす。

$$(S_{I_2(p), \mathbb{C}} \setminus D_{I_2(p), \mathbb{C}}, \underline{g}_0)^\sim / \mathbb{Z} \simeq \tilde{\mathcal{H}}_{I_2(p)}.$$

但し周期写像の像領域は次のように与えられる。

$$\tilde{\mathcal{H}}_{I_2(p)} := \{\varphi \in \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(L_{I_2(p)}, \mathbb{C}) \mid \text{Im}(\varphi(e_1) / \varphi(e_2)) > 0\}.$$

定理 c) デデキントのエータ関数 $\eta(\tau)$ を用いて $\tilde{\mathcal{H}}_{I_2(p)}$ 上の関数を

$$\begin{aligned} \lambda_{I_2(p)} &:= \eta(\tau) \eta([p/2]\tau) \varphi(e_2) \\ &\quad (\text{但し } \tau := \varphi(e_1) / \varphi(e_2)) \end{aligned} \quad (0.7)$$

と定義する。すると $\lambda_{I_2(p)}$ は主合同部分群 $\Gamma_1([p/2])$ 上のキャラクター

$$\vartheta_{I_2(p)} : \Gamma_1([p/2]) \rightarrow \mathbb{C}^\times, \quad a, b \mapsto \exp\left(\pi\sqrt{-1} / k(p)\right)$$

をもつウエイト 1 のカスプ形式であり、かつ判別式の次の巾根を与える：

$$\Delta_{I_2(p)} = \lambda_{I_2(p)}^{2k(p)} \quad (0.8)$$

3

ここで $k(3) = 6$, $k(4) = 4$ 及び $k(6) = 3$ である。

注. 楕円積分がそれ以前の弧長積分と比較して注意を引いたのは Fagnano によるレムニスケート曲線の弧長の倍化点の代数性の発見 (1718) そしてそれを一般化した Euler による加法公式の発見 (1751) による。即ち、指数関数（三角関数）を超えた加法性を持つ関数の発見に繋がったからである。これがその後の Abel-Jacobi の理論へと、そして更には、現代の Hodge 構造の理論へと発展していく様はまさに壮観である。他方、同じ楕円積分が、加法性とは別の視点である同次元性や原始性の立場からも、あらたな古典としてよみがえり新しい数学を導いている様に見える。偶然と言うには深い驚きであり、魅力的に思える。

¹ 同一視の意味を説明しよう。曲線 $E_{\underline{g}}$ のパラメータ $\underline{g}$ をディスクリミナントに近付けるとその経路に応じて $H_1(E_{\underline{g}, \mathbb{C}}, \mathbb{Z})$ の元が潰れ、その（生成）元は消滅サイクルと呼ばれる。今ディスクリミナント $D_{I_2(p)}$ の原点における重複度二なので、その二つの分岐に対応し取れる消滅サイクルを e_1, e_2 とすると、 $H_1(E_{\underline{g}, \mathbb{C}}, \mathbb{Z})$ の $\sigma_{I_2(p)}$ -不変な部分加群の基底を与える。更に e_1, e_2 間の Seifert 形式 (link 数) は（一方の分岐の重複度が $[p/2]$ である事から計算でき）

$$J_{I_2(p)} = \begin{bmatrix} 1 & -[p/2] \\ 0 & [p/2] \end{bmatrix} \text{ となる。すると、加群 } L_{I_2(p)} := \mathbb{Z}e_1 + \mathbb{Z}e_2 \text{ は}$$

ホモロジー群としての交叉形式は反対称形式 $-{}^t J_{I_2(p)} + J_{I_2(p)}$ を持つが、他方、対称内積 ${}^t J_{I_2(p)} + J_{I_2(p)}$ に関し e_1, e_2 を単純ルート基底とする $I_2(p)$ 型のルート束と見なせる。

² 群の生成系である a, b を与える道と消滅サイクル e_1, e_2 を与える為を選んだ道とは互いに“連動”しているのであるがここでは説明は省略する⁵⁾。

³ この様に、判別式の高位の巾根がキャラクター付カスプ形式で与えられる事の単純な幾何的説明は今のところない。その本格的理解には鏡像対称性が必要となると思われる。

一般に、任意の有限ルート系 X に対して、周期領域 $\tilde{\mathcal{H}}_X$, シンプレ

クテック・ディスクリート群 $\Gamma(X)$ 、位数 $k(X) \in \mathbb{Z}_{>0}$ 、キャラクター $\vartheta_X : \Gamma_X \rightarrow \mathbb{Z} / (2k(X)\mathbb{Z}) \subset \mathbb{C}$ 等が定義される (文献 2) 参照)。この時、判別式 Δ_X の $2k(X)$ 位の巾根を与えるキャラクター ϑ_X 付の Γ_X 付のカスプ形式 λ_X が存在するであろうと予想されているが¹³⁾、今のところ検証されているのは楕円積分に帰着できる上記の A_2 , B_2 , G_2 及び B_3 型のみである。

参考文献

- 1) Borchers, Richard: Automorphic forms on $O_{s+2,2}(\mathbb{R})$ and infinite products. *Inventiones Math.* **120** (1995) 161-213.
- 2) Bourbaki, N.: *Éléments de mathématique*, Fasc. XXXIV, Groupes et algèbres de Lie, Chs. 4-6. Hermann, Paris 1968.
- 3) Brieskom, Egbert: Singular elements of semi-simple algebraic groups. *Proc. Internat. Congress Math. (Nice 1970)*, vol. 2, 1971, pp. 279-284.
- 4) Brieskom, Egbert: Die Monodromie der isolierten Singularitäten von Hyperflächen. *Manuscripta Math.* **2** 1970 103-161.
- 5) Frenkel, Igor B.: Representations of Kac-Moody Algebras and Dual Resonance Models. *Lect. Appl. Math.* **21** (1985) 325-353.
- 6) Gonzalez-Springberg and J.-L. Verdier: Construction géométrique de la correspondance de McKay. *Ann. Sci. École Norm. Sup.* **16** (4) (1983) 409-449.
- 7) McKay, John: Affine diagrams and character tables. Santa Cruz, 1979.
- 8) Mumford, David: *Tata Lectures on Theta II (Jacobian theta functions and Differential equations)*. Birkhäuser, 1984.
- 9) Saito, Kyoji: Period Mapping Associated to a Primitive form. *Publ. RIMS, Kyoto Univ.* **19** (1983) 1231-1264.
- 10) Saito, Kyoji: Around the Theory of the Generalized Weight System: Relations with Singularity Theory, the Generalized Weyl Group and Its Invariant Theory, Etc. *Amer. Math. Soc. Transl. (2)* **183** (1998) 101-143.
- 11) Saito, Kyoji: Primitive Automorphic Forms, *Mathematics unlimited: 2001 and beyond*/ Bjorn Enquist, Wilfried Schmid, editors (Springer Verlag).
- 12) Saito, Kyoji: Uniformization of the orbifold of a finite reflection group. *Frobenius manifolds*, 265-320, *Aspects Math.*, E36, Vieweg Wiesbaden, 2004. (20F55 32S30 32S40).
- 13) Saito, Kyoji: Jugendtraum of a mathematician. *Asia Pac. Math. Newsl.* **1** (2011), no. 3, 1-6. 11R04.
- 14) Siegel, Carl Ludwig: *Topics in Complex Function Theory*, Vols. I, II and III. Wiley, 1969.

数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト II

有本 茂^{1*} 福田信幸^{2*} 廣木一^{3*} 村上達也^{4*}

成木勇夫^{5*} 斎藤恭司^{6*} 竹内 茂^{7*} 横谷正明^{8*}

Mathematics and Chemistry

Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project II

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI

This is the second part of the series of articles that records 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 a challenging cross-disciplinary problem which is directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. This problem is 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, Elliptic functions, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

1. 緒 言

福井予想の証明には理論化学、数理論化学において比較的親近性を持つ関数解析やオペレータ代数の数学言語と同時に一般の化学者に馴染みの少ない環論、UFDの理論、特異点解消に関連する数学言語が基本的意義をもつ。

読者は本報読後の文献 1)-5)を参考にされたい。

2. UFDの数学 II

成木勇夫

定義 I: R が UFD (一意分解環) であるとは K^*/I が埋込写像

$$\Lambda \hookrightarrow K^*/I$$

によって、 Λ を基底とする自由加群 $\mathbb{Z}[\Lambda]$ と自然に同型となるときに言う。

この定義の意味をよく理解するために、任意の空でない集合 M に対して、 M を基底とする自由加群 $\mathbb{Z}(M)$ を具体的に構成して見よう。

まず次のことを注意しよう。 M から整数全体のなす加群 $\mathbb{Z}$ の中への写像の全体の集合 $\text{Map}(M, \mathbb{Z})$ は次のように定義される二つの和によって、明らかに加群 (=アーベル群= $\mathbb{Z}$ -加群) となる:

$$(\phi + \psi)(\mu) = \phi(\mu) + \psi(\mu) \quad (\mu \in M)$$

$$(\phi, \psi \in \text{Map}(M, \mathbb{Z}))$$

任意の $\phi \in \text{Map}(M, \mathbb{Z})$ に対して、その台 (=support) を

$$\text{supp}(\phi) := \{\mu \in M \mid \phi(\mu) \neq 0\}$$

と置いて定義するならば、その台が空集合となる元は零元であり、 $-\phi$ は $(-\phi)(\mu) = -\phi(\mu)$ によって決まる。

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

1*, 2*, 8* 津山高専 一般科目 3* 津山高専 一般科目

4* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

5* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

6* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

7* 岐阜大学 教育学部・数学科

さて、目的の $Z(M)$ は $\text{Map}(M, Z)$ の部分群として次のように定義される：

$$Z(M) := \{\phi \in \text{Map}(M, Z) \mid \text{supp}(\phi) : \text{finite set}\}$$

これが部分加群であることは

$$\text{supp}(\phi) = \text{supp}(-\phi)$$

$$\text{supp}(\phi + \psi) \subseteq \text{supp}(\phi) \cup \text{supp}(\psi)$$

などから理解される。

この $Z(M)$ が M を底とする自由加群と呼ばれるのは、 M を $Z(M)$ の中に埋め込む標準写像

$$\iota : M \rightarrow Z(M)$$

が次のように定義されるからである。すなわち、与えられた $\mu_0 \in M$ に対して

$$\iota(\mu_0)(\mu) = \begin{cases} 1 & (\mu = \mu_0) \\ 0 & (\mu \neq \mu_0) \end{cases}$$

と定義する。

写像 ι は単射であり、 M と像 $\iota(M)$ を ι によって同一視すれば M は $Z(M)$ の部分集合となり、 $Z(M)$ は M の有限個の元の形式的 Z -係数 1 次結合の全体として表現される。実際、 $\phi \in Z(M)$ に対して、自明な等式

$$\phi = \sum_{\mu \in \text{supp}(\phi)} \phi(\mu) \iota(\mu)$$

が成り立つからである。

この説明から、次の $Z(M)$ の普遍的性質が証明される：

定理 I： 集合 M から任意のアーベル群 (= 加群) A の中への任意の写像 f に対して、加群準同型

$$\tilde{f} : Z(M) \rightarrow A$$

が一意的に存在して

$$f = \tilde{f} \circ \iota$$

が成り立つ。

実際

$$\tilde{f}(\phi) = \sum_{\mu \in \text{supp}(\phi)} \phi(\mu) f(\mu)$$

と必然的に定義され、また、この定義は定理の要請に対して十分である。

M を基底とする自由加群 $Z(M)$ はこの普遍的性質によって (同型を除いて) 特徴付けられることも簡単に理解される。この性質を持つ二つの加群があれば、それらのどちらにも M は自然に埋め込まれているので、一方から他方への加群準同型が二つ得られるが、それらの合成も (合成の向きを変えることによって) 二つ得られるが、どちらも恒等写像である。定理の f が M 上で恒等写像であるならば、 $\tilde{f}$ も一意性によって恒等写像でなければならないからである。このような自由加群 $Z(M)$ は函手論的なものである。

さて、 R は UFD であると仮定して、 R の商体 K の乗法群 K^* の構造を明らかにするために定理 I を応用し

て見よう。

まず UFD であるとの仮定から同型

$$(i) \quad K^* / I \cong Z(\Lambda)$$

が成り立っている。 Λ は K^* / I の既約類の集合であった。

Λ の任意の元 λ は K^* / I における剰余類であるので類 λ の中から λ を代表する (K^* の) 元を一つ選び、それを $\hat{\lambda}$ で表す。 $R^* \subseteq K^*$ なので $\lambda \mapsto \hat{\lambda}$ を Λ から加群 K^* の中への写像と考え

$$f(\lambda) := \hat{\lambda}$$

と写像 $f : \Lambda \rightarrow K^*$ を定義する。

ここで $M = \Lambda$, $A = K^*$ と置いて、定理 I を適用すれば、加群準同型

$$(ii) \quad \tilde{f} : Z(\Lambda) \rightarrow K^*$$

が得られる。これを更に同型 (i) と合成すれば、準同型

$$(iii) \quad \sigma : K^* / I \rightarrow K^*$$

が定義される。更にこれを標準的全射

$$\pi : K^* \rightarrow K^* / I$$

と合成すれば $\pi \circ \sigma$ は f の取り方から Λ ($\subseteq K^* / I$)

をそれ自身に恒等的に写している。再び定理 I を同型

(i) を通して適用すれば

$$(iv) \quad \pi \circ \sigma = id_{(K^* / I)}$$

が得られる。

等式 (iv) によって、特に σ は単射であることが解り、また任意の $v \in K^*$ に対して、 v と $\sigma \circ \pi(v) = \sigma(\pi(v))$ の商は π の核 I に属することも解る。 $(K^*$ は、まだ乗法可換群と考えている。) すなわち v は I の元と $\text{Im}(\sigma)$ の元として一意に書かれる。すなわち乗法可換群 K^* は I と $\text{Im}(\sigma)$ の直積である。明らかに $\text{Im}(\sigma)$ は加法可換群 $K^* / I \cong Z(\Lambda)$ と同型だから、結局 K^* は直積

$$I \times Z(\Lambda)$$

と同型であることが証明されたのである。

具体的には $(u, \phi) \in I \times Z(\Lambda)$ に対応する K^* の元は

$$u \cdot \prod_{\lambda \in \text{supp}(\phi)} \hat{\lambda}^{\phi(\lambda)}$$

と一意的に表される。

既約類 $\lambda \in \Lambda$ は $\hat{\lambda} \in K^*$ によって代表されているので $\lambda = [\hat{\lambda}] = I\hat{\lambda}$ であるが、 λ に対応する単項イデアルは

$$(\hat{\lambda}) = \{a\hat{\lambda} \mid a \in R\}$$

と取り敢えず代表元を用いて表現する他なかったのであるが、もちろんこの単項イデアルは代表系 $\hat{\lambda}$ の取り方に依存しないので、もっと合理的に、この単項イデアルを記号

$$(\lambda)$$

で表現することにしよう。

この約束のもとで次の定理が成り立つ：

定理 II： R は UFD であり、 Λ は R^* / I における全既約類の集合であるとする。このとき、すべての $\lambda \in \Lambda$ に対して、単項イデアル (λ) は素イデアルである。

証明) R^* の元 v, v' に対して

$$vv' \in (\lambda)$$

であると仮定する。すなわち

$$(vv') \subseteq (\lambda)$$

すなわち

$$(1) \quad \lambda \leq \pi(v) + \pi(v')$$

であると仮定する。 $R^* \ni v, v'$ なので

$$0 \leq \pi(v), \pi(v')$$

すなわち

$$\phi = \pi(v), \phi' = \pi(v')$$

と置けば、もちろん λ に対しても

$$\phi(\lambda), \phi'(\lambda) \geq 0$$

である。(1) より

$$\phi(\lambda) + \phi'(\lambda) \geq 1$$

となるので

$$\phi(\lambda) \geq 1, \text{ 或いは } \phi'(\lambda) \geq 1$$

でなければならない。すなわち

$$v \in (\lambda), \text{ 或いは } v' \in (\lambda)$$

が成り立つ。これで (λ) が素イデアルであることが証明された。

ここで、次のような反省をして見る。 R が UFD であることは、同型

$$\mathbb{Z}(\Lambda) \cong K^* / I$$

の存在であった。 Λ は K^* / I の部分集合なので写像 $\mathbb{Z}(\Lambda) \rightarrow K^* / I$ は埋込 $\Lambda \hookrightarrow K^* / I$ から一意的に決まるが、これが同型であることが、 R が UFD であることの決定的な意味である。すなわち逆同型

$$K^* / I \rightarrow \mathbb{Z}(\Lambda)$$

が存在することが重要なのである。

実際、まず標準写像 $K^* \rightarrow K^* / I$ と合成することによって、写像

$$K^* \rightarrow \mathbb{Z}(\Lambda)$$

が得られ、また各 $\lambda \in \Lambda$ に対して射影写像

$$\mathbb{Z}(\Lambda) \rightarrow \mathbb{Z} \cdot \iota(\lambda) \approx \mathbb{Z}$$

を更に連結して、加群準同型

$$v_\lambda : K^* \rightarrow \mathbb{Z}$$

が得られる。これは商体 K に対して、付値 (valuation) と呼ばれるものを本質的に与えているのである。このことについて、少し説明をして見よう。

一般に体 K と全順序加群 G が与えられているとき、 K から $G \cup \{\infty\}$ への写像 v が付値であるとは次の諸条件が満たされているときに言う：

$$(1) \quad v(a) = \infty \Leftrightarrow a = 0$$

$$(2) \quad \text{制限写像 } v|_{K^*} : K^* \rightarrow G \text{ は加群準同型である}$$

$$(3) \quad v(a+b) \geq \min\{v(a), v(b)\}$$

ここで ∞ は $G \cup \{\infty\}$ の最大元となる形式的元である。

R が UFD であるとき、さらに

$$v_\lambda(0) = \infty$$

で定義を補えば、

$$v_\lambda \quad (\lambda \in \Lambda)$$

はすべて付値であることが簡単に解る。今の場合 $G = \mathbb{Z}$ であって、実数の間の自然な大小関係によって、全順序加群と見做される。このような付値は一般に離散付値 (discrete valuation) と呼ばれる。この場合、さらに

$$v_\lambda(K^*) = \mathbb{Z}$$

となるので、正規離散付値 (normalized ~) と呼ばれる。

結局、 $a \in K^* = K - \{0\}$ の類 $[a] = Ia$ に同型

$$K^* / I \cong \mathbb{Z}(\Lambda)$$

を通して対応する $\mathbb{Z}(\Lambda)$ の元 ϕ を ($\mathbb{Z}(\Lambda)$ を含む) $\text{Map}(M, \mathbb{Z})$ の元と考えるとき

$$\phi(\lambda) = v_\lambda(a) \quad (\lambda \in \Lambda)$$

が成り立っており、またこの等式によって対応が確認される。

整域 R とその可逆元全体のなす群 I も、この正規離散付値族 $\{v_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ によって、それぞれ

$$\alpha) \quad R = \{a \in K \mid v_\lambda(a) \geq 0 \quad (\forall \lambda \in \Lambda)\}$$

$$\beta) \quad I = \{a \in K \mid v_\lambda(a) = 0 \quad (\forall \lambda \in \Lambda)\}$$

と特徴付けられる。(0 $\in R$, 0 $\notin I$ に注意。)

今や UFD の定義を次のように変更することが可能となる：

定義 A： 整域 R が UFD であるとは R の商体 K が、上の $\alpha), \beta)$ の他に、以下の条件を満たす正規離散付値族 $\{v_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ を持つときに言う：

$\gamma)$ 任意の $a \in K^* = K - \{0\}$ に対して $v_\lambda(a) \neq 0$ となる $\lambda \in \Lambda$ は有限個しかない。

$\delta)$ 写像

$$K^* \ni a \mapsto \sum_{\lambda \in \Lambda} v_\lambda(a) \iota(\lambda) \in \mathbb{Z}(\Lambda)$$

は加群同型

$$K^* / I \approx \mathbb{Z}(\Lambda)$$

を引き起こす。

整域 R がこの定義の意味で UFD であるとき加群

$$K^* / I \cong \mathbb{Z}(\Lambda)$$

は単なるアーベル群であるのみではなく、順序加群であることをもう一度思い起そう：

条件 (α) を見れば分るように、 $R^* = R - \{0\}$ は $K^* = K - \{0\}$ の非負元の全体であり、 K^* / I における順序関係は (R^* に基く) 整除関係に由来するものであった。(α) は全順序群 $\mathbb{Z}$ から導かれる自由加群 $\mathbb{Z}(\Lambda)$ における順序関係と一致することを述べているのである。

もちろん、 $\mathbb{Z}(\Lambda)$ における順序は一般には全順序ではない。しかし有難いことに、空でない有限部分集合に対する上限、下限の存在は既に ($\mathbb{Z}(\Lambda)$ を含んでいる) $\text{Map}(\Lambda, \mathbb{Z})$ において保証されているからである。

実際、有限部分集合

$$F = \{\phi_1, \dots, \phi_m\} \subseteq \text{Map}(\Lambda, \mathbb{Z})$$

に対して

$$(\sup F)(\lambda) = \max\{\phi_1(\lambda), \dots, \phi_m(\lambda)\}$$

$$(\inf F)(\lambda) = \min\{\phi_1(\lambda), \dots, \phi_m(\lambda)\}$$

$$\lambda \in \Lambda$$

とすれば F の上限、下限が決定されている。また $F \subseteq \mathbb{Z}(\Lambda)$ の場合は $\sup F, \inf F \in \mathbb{Z}(\Lambda)$ であることも明らかである。

これら上限、下限の存在の意義は、 K^* / I から K^* に、また K^* から R^* に戻って考えれば、非常に直観的なものとなる：

与えられた有限集合

$$\{a_1, \dots, a_m\} \subseteq R^*$$

に対して $\phi_j = [a_j] = I a_j$ ($1 \leq j \leq m$) と置き $F = \{\phi_1, \dots, \phi_m\}$ とすれば $\sup F, \inf F$ は R^* / I の元として定まる。このとき剰余類 $\sup F$ に属する元は (上限の定義により) $a_1, \dots, a_m$ の共通の倍元 (公倍元, common multiple) であり、またすべての公倍元を整除するもの、すなわち最小公倍元である。そのようなものは一般に一個ではなく、 R^* / I における一つの剰余類として定まるのである。

反対に下限 $\inf F$ は $a_1, \dots, a_m$ の共通の約元 (公約元, common divisor) であり、すべての公約元の倍元となっているもの、すなわち最大公約元の剰余類を意味している。

さて、いよいよ R は UFD であると仮定し、 R 上の一変数多項式環

$$S := R[X] \quad (X: \text{不定元})$$

が UFD であることの証明に、この最大公約元類の概念

を応用して見よう：
まず

$$S^* := S - \{0\}$$

と置き、 S^* の元

$$f = f(X)$$

を任意に一つ取って考えよう。すなわち多項式 f の 0 でない係数の集合を F とし、 $\inf F$ すなわちそれらの係数の最大公約元類を考えよう。

$$c \in \inf F$$

とすれば

$$p := c^{-1}f$$

はまだ S^* の元であり、与えられた f は

$$f = cp$$

と表される。では、ここで $p = p(X)$ はどのような多項式かと問うと、その 0 でない係数の公約元はすべて可逆元 (すなわち $\in I$) であるような多項式である。この性質を持つ多項式は一般に原始的 (primitive) と呼ばれるが、この概念の最も便利な定義は次のようなものである。

定理 II によって $\lambda \in \Lambda$ に対応する単項イデアル (λ) は素イデアルであるので、剰余環

$$R_\lambda := R / (\lambda)$$

は整域であり、標準全射

$$\pi_\lambda : R \rightarrow R_\lambda$$

は整域の準同型

$$\hat{\pi}_\lambda : R[X] \rightarrow R_\lambda[X]$$

を引き起す。

定義 B: S^* の元 p が原始的であるとは、すべての $\lambda \in \Lambda$ に対して

$$\hat{\pi}_\lambda(p) \neq 0$$

となることを意味する。

この定義によって有名なガウスの補題が簡単に証明される。

定理 III: S^* に属する原始多項式の全体 P は積に関して閉じている。すなわち P は S^* の部分半群である。

実際 $p, p' \in P$ とすれば、任意の $\lambda \in \Lambda$ に対して

$$\hat{\pi}_\lambda(p) \neq 0, \quad \hat{\pi}_\lambda(p') \neq 0$$

$R_\lambda[X]$ は整域であるので

$$\hat{\pi}_\lambda(pp') = \hat{\pi}_\lambda(p)\hat{\pi}_\lambda(p') \neq 0 \quad (\lambda \in \Lambda)$$

従って $pp' \in P$ 。

上で行った議論により、次の定理も証明されている：

定理 IV : 上記の記法の下で

$$S^* = R^*P$$

が成り立つ。

上の議論では、 $f \in S^*$ に対する分解表現

$$f = cp \quad (c \in R^*, p \in P)$$

の多様性もまったく明らかになっている。すなわち

$$cp = c'p' \quad (c, c' \in R^*; p, p' \in P)$$

であるならば

$$c' = uc, \quad p = up'$$

となる $u \in I$ が存在する。従って群 I の軌道空間に移行することによって、半群 S^*/I の直積表示

$$S^*/I = (R^*/I) \times (P/I)$$

が、定理の等式 $S^* = R^*P$ の補足として得られる。

さて、ここで反省して見ると、 S^*/I を含む

$$K^*/I \cong \mathbb{Z}(\Lambda)$$

が既に順序加群であり、有限部分集合に対する下限の存在定理が成り立っているので、 R 係数の多項式ばかりではなく、(0 ではない) K 係数多項式 $f = f(X)$ に対しても分解表現

$$f = cp \quad (c \in K^*, p \in P)$$

が得られる。

この事実に定理 IV と類似の表現を与えるために

$$T := K[X], \quad T^* := T - \{0\}$$

と置く。

定理 V : 上の記号のもとで

$$T^* = K^*P$$

が成り立つ。これより同型

$$T^*/K^* \cong P/I$$

および直積表示

$$T^*/I = (K^*/I) \cdot (P/I)$$

などが得られる。

さて、我々の目的は (R が UFD であるとの仮定の下で) $S = R[X]$ が UFD であることの証明であった。その目的を果すため、まず T が体 K 上の一変数多項式環として UFD であることに注意しよう。 T はユークリッドの互除法により PID (単項イデアル環) であることが解り、簡単な議論により任意の PID は UFD であることが示されるからである。

さて、ここで S と T の商体が一致してしまうことに

注意しよう。包含関係

$$R \subseteq S \subseteq T$$

によって S の商体は R の商体 K を含み、それはまた $T = KS$ を含んでしまうからである。この S と T の共通の商体を記号 L で表そう。 L は 体 K 上の一変数有理関数体 と呼ばれるものである。

まず P/I は T^*/K^* との同型を通じて L^*/K^* の部分半群となるが、 T は PID なので L^*/K^* は P/I の正の全極小元の集合 Λ' を底とする自由加群と同型になる：

$$L^*/K^* \cong \mathbb{Z}(\Lambda')$$

次に加群の完全列

$$0 \rightarrow K^*/I \rightarrow L^*/I \rightarrow L^*/K^* \rightarrow 0$$

を考える。これは、今までに得られた同型によって

$$0 \rightarrow \mathbb{Z}(\Lambda) \rightarrow L^*/I \rightarrow \mathbb{Z}(\Lambda') \rightarrow 0$$

と書き直される。しかし、 $\mathbb{Z}(\Lambda')$ は自由加群なので同型

$$L^*/I \cong \mathbb{Z}(\Lambda \cup \Lambda') = \mathbb{Z}(\Lambda) \oplus \mathbb{Z}(\Lambda')$$

が得られる。右辺は $\Lambda \cup \Lambda'$ を底とする自由加群である。また、 $\Lambda \cup \Lambda'$ は半群 S^*/I の中の正の全極小元集合と解釈することができる。

これで S が UFD であることが証明された。実際 L は S の商体であり、 S の全可逆元の群は R のそれと一致する。多項式環 $S = R[X]$ の可逆元の次数は 0 でなければならないからである。この証明の仮定は R が UFD であることのみであったので、次の定理が得られる：

主定理 : UFD 上の一変数多項式環は UFD である。

これでこの小論の目的は完全に果たされた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) S. Arimoto, Proof of the Fukui conjecture via resolution of singularities and related methods. III, J. Math. Chem. 47 (2010) 856.
- 4) 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.
- 5) 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.

数学と化学の学際共同研究と福井プロジェクト III

有本 茂^{1*} 福田信幸^{2*} 廣木一^{3*} 村上達也^{4*}

成木勇夫^{5*} 斎藤恭司^{6*} 竹内 茂^{7*} 横谷正明^{8*}

Mathematics and Chemistry

Interdisciplinary Joint Research and the Fukui Project III

Shigeru ARIMOTO, Nobuyuki FUKUDA, Kazuaki HIROKI, Tatsuya MURAKAMI
Isao NARUKI, Kyoji SAITO, Shigeru TAKEUCHI, and Masaaki YOKOTANI

This is the third part of the series of articles that records 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 a challenging cross-disciplinary problem which is directly related to the Fukui conjecture and to recent carbon nanotube research. This problem is 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, Elliptic functions, Unique factorization domain (UFD), Carbon nanotube, Polyacetylene

1. 数学と化学

竹内 茂

はじめに：本稿では福井博士の業績を記念して、博士が化学の研究に果たす数学の役割を重視して来られたことに敬意を表し、また今後更に化学と数学の関係が緊密になることを願って、これまでの両者の関係に焦点を当てて歴史的なことを述べたい。本論に入る前に、数学界・数学教育学界として博士に感謝しなければならないことがある。それは、1980年代、今から30年以上前の学習指導要領改定時の博士のリーダーシップである。ゆとり教育の重要性・必要性が叫ばれ、理数科教育の軽視がおき、高校数学の中で古典的

なユークリッド幾何の軽視が強まっていたときに、博士のおかげで幾何教育が復興したことの意義を、当時数学の教科専門委員として、その任に当たっていた小平邦彦博士が述懐していたことはよく知られている。尚小論の性格上、出典、文献等は（古典的なことが多いので）全て省略する。

先ず歴史的なことを述べると、近世（17～18世紀）まで、数学と物理学が渾然一体となって、進歩発展してきたことは、多くの人の認めることであろう。その典型的例は、ニュートン、ガウスの2巨人が数学・物理双方に多大の業績を残し、数学、物理の両分野で双方とも数学者、或いは物理学者と考えていることに見られる。しかし、その関係は近代（19世紀）になって、数学が固有の概念・用語・論理によって、独自の発展を遂げるようになると、様相が一変する。その契機となったのは、カントールらによる集合論の導入と、ヒルベルトらによる数学における証明・論理の厳密化、数学基礎論の発展であろうか。その前段階として、18～19世紀にかけて、微積分学における極限操作の厳密化が近代的な解析学の誕生を齎したという事実が

原稿受付 平成25年8月30日

1*, 2*, 8* 津山高専 一般科目 3* 津山高専 一般科目

4* 京都大学 物質-細胞統合システム拠点 (iCeMS)

5* 立命館大学 理工学部・数学物理学系・数理科学科

6* 東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

7* 岐阜大学 教育学部・数学科

あり、その過程で実数論の厳密化が要請されたことがあろう。以下に近・現代になって独自の道を歩みはじめるまでの、数学の歴史を概観してみよう。蛇足ではあるが、数学の歴史において、カントール以前に集合の考えが無かった訳ではないし、実際オイラーなどは現今ベン図で知られる集合の視覚的表示を行っており、論理構成や証明の過程で、(現代風に言えば素朴に)集合の考えを多用していたと思われる。後年カントールが集合論の創始者として登場する理由は、(非)可算濃度の定式化など本格的に集合を数学の研究に用い、ツェルメロー・フレンケルの公理系の確立も相俟って、従来考えられなかった範囲にまで数学の研究対象・方法が広がったことによるのであろう。

数学が歴史に現れるのは、古代のギリシャが最初であろう。エジプトにおいてもプトレマイオス朝時代に既に天体観測や地上での測量術が発達し、幾何 (Geometry) の語源が測地術であるということは、よく知られている。ここではその後のユークリッドやピタゴラス、ディオファントス、プラトンらのギリシャ数学・哲学の系譜に属する幾何や数論の発展を見ると当時は、自然学 (現代から見れば物理学・天文学・化学) と数学とは渾然一体となっていたように見受けられる。数学の語源 (mathesis) 自体も日本語とは違って数とは無関係に、単に学問・研究 (厳密・精緻な思考) の対象を表しているようである。主観性を排除し客観性、正確性を備えた確実な知識という意味での科学 (science) とほぼ同義であったと思われる。古代から中世へ向かう間に、キリスト教の神学が優位となり、数学・科学にとっては暗黒の時代になるわけだが、ルネサンスと宗教改革によって、人間中心の思想が復権するとともに、再び科学・数学の復興が起こって来る。しかし、ギリシアの数学の遺産は皮肉なことに、ヨーロッパではなくアラブ人・アラブ語圏に引き継がれ、更にまたその後はユダヤ人たちによってヘブライ語訳を経て再び、ヨーロッパ諸語に翻訳されて、欧米に戻って来るという歴史を辿っている。その頃ギリシアはオスマン帝国の支配下にあり、かつてのギリシア文明の中心地ではなくなっているので、実際にはローマ帝国の後継国家であるイタリア、フランス、ドイツ、オーストリア、イギリス等で、それらの遺産が省みられることになる。自由七科 (三学四芸) という言葉で代表される近世の中等・高等教育の教養教育は、その淵源をギリシア (プラトンのアカデメイア)・ローマまで遡ることが出来るが、四芸に相当する算術・幾何学・天文学・音楽は、少なくとも当時は全て数学に「関係した」教科 (discipline) であった。音楽以外は現代でも違和感無しに受け入れられる考えであろうが、音楽もピタゴラスの純正律で知られるように、当時から近世になってバッハの平均律曲集が盛んになるまでは、音階理論が極めて数論的に構成されていたため、数学の一分科と

見なされても当然と考えられていたのであろう。因みに数学でしばしば用いられる (non-)trivial という言葉は、辞書的な意味は「くだらない」とか「瑣末な」とかであるが、語源的には上記「三学四芸」の三学 (trivium) を表す名詞から派生した形容詞である (別の説もあるが)。

最後に、今までの議論を締めくくり、数学と化学の今後の関係について述べてみたい。化学が扱う物質 (元素・化合物) の性質、新素材の発見・生成法など工学・医学・薬学への応用において、今両者の協働が関心・注目を浴びている。従来、(純粋) 数学者は応用に余り熱心ではなかった。勿論、ガウスやニュートンの例を引くまでもなく、物理の問題を理論的に定式化する上で、数学自身に新しい概念・方法が必要であった頃は、既に存在する数学を何かに応用するという態度で、問題に取り組んだわけではないだろう。物体の運動を記述する上で、必然的に力の作用方向、大きさ・強度等、また運動の速度等は自然に数学的な考えを要求し、また数学はそれに応えるだけの普遍性・潜在力を持っていたことになる。ただ、当時は集合論も整備されておらず、分子・原子など物質の構造や存在形式・性質を記述する数学的手段・方法は略皆無であった。また理論を裏付けるだけの実験や観測方法も存在しなかった。だが今はそうではない。カントールが創始した頃の集合論は、無限集合が本質的な格闘相手であった。今は有限集合である分子・原子および無限集合である分子の同族列を相手にして、それらの構造や性質が何によって本質的に決定されるかを、バナッハ代数などの数学的構造をもちいて、総合的に記述する可能性が生まれてきているのである。ナノ化学の進展の中に、その例を見出すことが出来る。

2. 半導体性および金属性単層カーボンナノチューブの光応答性とその癌治療への応用可能性

村上達也

単層カーボンナノチューブ (SWNT) の生物医学応用は、細胞生物学研究、診断、治療において大きな可能性を有する^{1), 2)}。SWNT は近赤外光 (650–900 nm) を効率良く吸収できる。この領域の光は、生体成分、すなわちヘモグロビン (<650 nm)、水 (>900 nm) による吸収が少ないため、生体にとって比較的安全とされている³⁾。SWNT のこの近赤外領域の吸収は、孤立分散した SWNT の M_{11} と S_{22} van Hove transition に由来する。SWNT をベースとする癌治療法開発では、近赤外光照射による SWNT からの熱産生、すなわち光線温熱効果 (photothermal effect, PTE) に注目が集まっている^{4)–6)}。

SWNT は金属性と半導体性成分の混合物である。従ってその modified Jablonski diagram によると、SWNT

は PTE だけでなく光線力学効果(photodynamic effect, PDE)も示すはずである⁷⁾。半導体性 SWNT の Fermi レベルでの状態密度はゼロであるため、半導体性 SWNT の励起エネルギーは O_2 へ移動し、結果、活性酸素種が生成しうることが予想される。しかしながら、我々の知る限りにおいて、それぞれの SWNT の光応答性を分離して評価した例はない。一方、近年、ゲルクロマトグラフィー⁸⁾や小分子⁹⁾を利用することで、金属性と半導体性 SWNT を高収率で分離する手法が確立された。ここでは近赤外光照射下でのこれら 2 種類の SWNT の光応答性を詳細に検討し、さらにその癌細胞に対する影響を評価することを試みた。

HiPco SWNT を sodium dodecyl sulfate (SDS) 存在下、ソニケーションして H_2O 中に分散させた後、超遠心操作により SWNT 分散液を得た。この分散液をアガロースゲルカラムに流し、金属性成分濃縮 SWNT (m-SWNT) を素通り画分、半導体性成分濃縮 SWNT (s-SWNT) を吸着画分として得た。分離濃縮は UV-vis-NIR 吸収スペクトル測定により容易に確認でき、さらにラマンスペクトル測定により m-SWNT、s-SWNT は、それぞれ 55%、86% の純度であることが示唆された。熱重量分析の結果、いずれの SWNT 分散液にも金属不純物はほとんど含まれていないこともわかった。

まず m-SWNT と s-SWNT の PTE を調べるため、808 nm レーザー照射下、水分散液の温度を測定した。SWNT の濃度は、808 nm での吸光度換算で統一した ($Abs_{808} = 0.2$)。これにより両 SWNT により吸収されるエネルギーは等しくなる。10 分照射後、m-SWNT 分散液の温度は、s-SWNT のそれよりも高くなることがわかった。SWNT 濃度を上げると、温度上昇度 ($\Delta T (^{\circ}C) = \text{照射後の温度} - \text{最初の温度}$) は徐々に増大し、 $Abs_{808} = 0.6$ 以上で頭打ちとなった。一方で ΔT はレーザーパワー強度に比例して増大した。これらの結果から、m-SWNT は s-SWNT に比べて高い PTE を示すことが示唆された。さらに 808 nm 以外に、532 nm、670 nm、715 nm のレーザーも用いたところ、m-SWNT と s-SWNT の ΔT の差は、532 nm レーザー照射で最も大きくなった。UV-vis-NIR スペクトルから判断すると、532 nm では s-SWNT に比べて m-SWNT の方が効率良く光を吸収できるため、m-SWNT の PTE が強調されたと考えられる。

次に 808 nm レーザー照射下、PDE を注意深く検討した。 O_2 存在下、PDE により 2 種類の活性酸素種、スーパーオキシドアニオン($O_2^{\cdot-}$)と一重項酸素(1O_2)、が生成する。 $O_2^{\cdot-}$ と 1O_2 は、それぞれ励起された光増感剤から O_2 への電子移動(type I mechanism)とエネルギー移動(type II mechanism)により生成する。ここではそれぞれの活性酸素種と特異的に反応する蛍光試薬を用いて、PDE を評価した。808 nm レーザーを各分散液に 10 分間照射すると、s-SWNT でのみ両活性酸素種が検出さ

れた。すなわち s-SWNT は m-SWNT に比べて高い PDE を示すことが示唆された。また O_2 フローにより s-SWNT 分散液中の酸素濃度を高めてからレーザー照射すると、 1O_2 産生のみ増強された。このことは s-SWNT が従来の PDE の光化学に従うことを示唆する¹⁰⁾。

ところで今回用いた m-SWNT には“不純物”として 45% の半導体性成分が含まれている。この半導体性成分が PDE に寄与しない理由について知見を得るため、原子間力顕微鏡を用いて両 SWNT の構造を比較した。ナノチューブ長はいずれも主に 200–600 nm に分布しており、明確な差はなかった。ナノチューブ高さ、すなわちバンドル形成の程度では明確な差があり、s-SWNT がほぼすべて孤立分散した状態であるのに対して、m-SWNT では高さ 3 nm 程度のバンドル化したナノチューブが主成分であった。このことから、m-SWNT に含まれる半導体性成分はバンドル化することで不活化している可能性が考えられる。また同時に、周囲に多数存在する金属性成分へのエネルギー移動により不活化している可能性も考えられる。

SWNT の PDE の細胞への影響は検討された例はない。s-SWNT を細胞実験に供するには、生体適合性の分散剤で s-SWNT を分散安定化する必要がある。我々の研究室では、生体ナノ材料である高比重リポ蛋白質(High-density lipoprotein, HDL)を作製し、生物医学応用することも行っている^{11)–12)}。HDL はディスク状リン脂質二重膜と脂質結合タンパク質(apoA-I)からなり、疎水性物質を取り込むことができる¹³⁾。この性質を利用し、s-SWNT に HDL を吸着させ、その後透析により界面活性剤を除去することを試みた。この結果得られた s-SWNT は生理的条件下でも凝集せず、HDL が分散剤として機能することが明らかとなった。さらに癌細胞に作用させても、細胞生存率は変化せず、界面活性剤が効率良く除去されていることも示唆された。

HDL 安定化 s-SWNT を癌細胞に作用させた後、808 nm レーザーを照射すると、細胞生存率は 55% にまで低下した。さらに $O_2^{\cdot-}$ 失活剤あるいは 1O_2 失活剤存在下でレーザー照射すると、後者の場合のみ、この細胞生存率は上昇した。すなわち s-SWNT の PDE は癌細胞を死滅させるのに十分強力であり、その活性本体は 1O_2 であることが示唆された。

以上まとめると、金属性および半導体性 SWNT の PTE と PDE を近赤外領域、より詳しくは S_{22} van Hove band gap transition 領域の波長(808 nm)のレーザー照射下初めて評価し、金属性 SWNT が PTE に優れること、半導体性 SWNT が PDE に優れることを示唆する結果を得た。孤立分散した半導体性成分を濃縮したことが、近赤外光照射下の明確な PDE 検出を可能にしたと考えられる。半導体性 SWNT の PDE は、SWNT の生物医学応用に新たな知見を与えるものと考えられる。

3. ポリアセチレンとセレンディピティ

廣木一亮

世界的な大発見・大発明の原動力は何だろうか？その一つがセレンディピティである。科学研究におけるセレンディピティ (serendipity) 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。

セレンディピティによってもたらされた、化学分野での大発見・大発明は数多いが、なかでも「導電性高分子の発明」が良い例なので紹介したい。

もともとアセチレンの重合機構の研究をしていた白川英樹博士 (当時、東京工業大学・助手) は、ある日、奇妙な出来事に遭遇する。研究生がポリアセチレンを合成したいと言ってきたので、通常のやり方を指示したところ、研究生は「失敗した」と言ってきた。そこで様子を見に行ったら白川博士が目にしたものは反応フラスコ内の黒い膜。当時、ポリアセチレンは粉末しかできないとされていたので、当初の目的からすればこれは「失敗」であった。

ところが白川博士がその「失敗作＝黒い膜」を分析してみたところ、なんと、それは誰も合成に成功することがなかったポリアセチレン薄膜だったのである。合成実験を繰り返すうち、そのポリアセチレン薄膜は金属光沢を持ち始める。そこで白川博士は「ひょっとしたら電気が流れるのでは？」と、ひらめいた。が、絶縁体ではないにせよ、できの悪い半導体程度にしか電気は流れなかった。

しかし、ある出会いがポリアセチレンに導電性高分子としての道を切り開く。それはペンシルバニア大学からやってきた無機化学者・マクダイアミド博士である。たまたま窒素と硫黄の化合物なのに金色をしているポリチアジルを研究していた彼は、東京工業大学に立ち寄った際、有機化合物なのに銀色に輝くポリアセチレン、そしてその研究者・白川博士に出会ったのである。2人は意気投合し、ペンシルバニア大学でともに研究することになった。そこで更なる出会いが待っていた、固体物理学者：ヒーガー博士である。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導電性を発現した。世界初の導電性高分子「ポリアセチレン」の誕生である。

2000年、白川博士・ヒーガー博士・マクダイアミド博士は揃って、ノーベル化学賞を受賞する。しかし、その裏側でセレンディピティのひらめきの瞬間や、思いがけない邂逅、専門が異なる3人の科学者の共同研

究があったことを知る人は少ない。更に導電機構の解明や、ポリピロール・ポリチオフェンなどの合成・物性評価にも白川博士 (高分子化学) と山邊時雄博士 (量子化学) や吉野勝美博士 (電子工学) らの分野を超えた交流や共同研究があったことを忘れてはならない。これからは導電性高分子は様々な分野の科学者・技術者が出会い、手を携えて研究開発がなされ、人々の生活を便利で快適なものにしていくことだろう。

4. 福井プロジェクトの新局面 New Frontier Project

有本 茂

福井予想の根底には、福井謙一博士 (写真1)¹⁴⁾ のフロンティア理論第一報の共著者である新宮春男博士 (写真2) の炭化水素の構造と零点エネルギーの加成的関係を実験データに基づき経験的に示した一連の研究がある。シンポジウムでは次節の命題Iと直結するこの経験データが紹介され、この方面における化学経験と理論の新しい融合に関連する概説が行われた。

実数列 E_N が漸近線をもつとは、実数 α と β とが存在して $N \rightarrow \infty$ の時

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

が成立する事である。ここで $o(1)$ はランダウの記号を表す。 N は分子のサイズを表す自然数である。広範な物性実験データに対する物性構造相関プロットは高速漸近性と呼ばれる非常に速く直線に漸近する高度な規則性を持つことが知られている。福井予想の証明は自然界でこのような高度な規則性が観測できる理由のある種の対称性、周期性、反復性考察によって行うものである。その際、次節で定式化される命題Iの中で用いられる特殊な環 (一意分解整域 UFD) の数学的考察が重要な役割をはたす。

さらに福井予想はフロンティア電子理論における軌道相の考察手法と連携され、反応論における形の観点を物性論に拡張するガイドラインとなり、また、最近のカーボン・ナノチューブの電気伝導性研究とも総合連携され、数学と化学の新境界分野の開拓の旗印となっている。また、上記の物性構造相関プロットの高速漸近性に関する研究は、リピート空間論 (Repeat Space Theory) と呼ばれる総合的理論を通じ、一連の分子物性の研究と統合され、New Frontier Project と呼ばれる福井プロジェクトの新しい局面展開につながっている。特にリピート空間論の特異点解消と環論とに関連する数学的手法は、(第2節、半導体性および金属性単層カーボンナノチューブの光応答性とその癌治療への応用可能性の初めの部分で言及された van Hove transition と) van Hove singularities の問題と関連している。この方面



写真 1 福井謙一博士 (1918-1998)

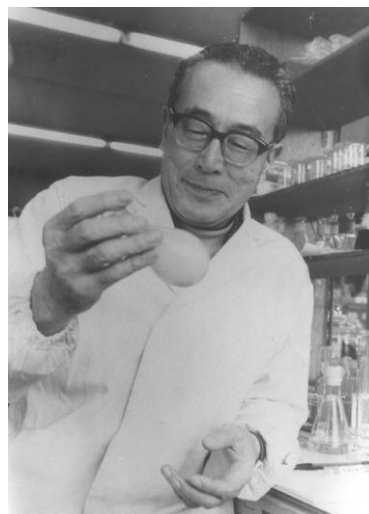


写真 2 新宮春男博士 (1913-1988)

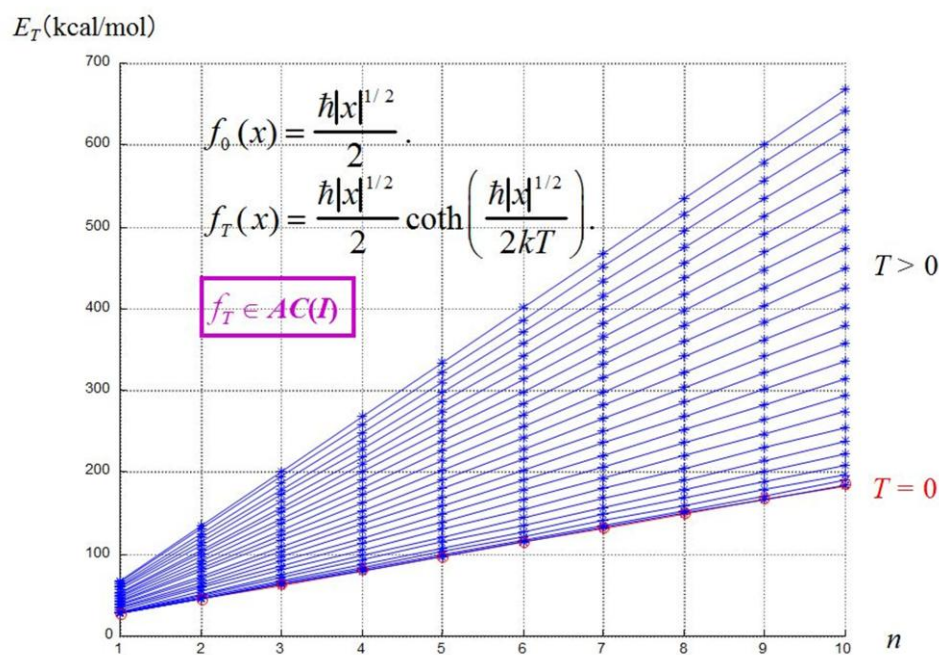


図1 直鎖パラフィン炭化水素 C_nH_{2n+2} の
内部エネルギー E_T ($T \rightarrow 0$ K) E_0 : 零点振動エネルギー

の研究は数学と化学との間で薬学と医学とも連絡する新しい学際研究に直結している。

5. A Challenging Cross-disciplinary Problem Related to the Fukui Conjecture and to the Chemistry of Carbon Nanotubes

Shigeru Arimoto, Masaaki Yokotani, and Nobuyuki Fukuda

In this section, let $\mathbf{Z}^+$ and $\mathbf{R}$ 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^{(15)–(17)}. The reader is referred to refs. 18)–20) and references therein for the science and technology of carbon nanotubes.

Definitions I.

Let $a, b \in \mathbf{R}$ with $a < b$ and let $I = [a, b]$.

A real-valued function on a subset $S \subset \mathbf{R}$ 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 ring (UFD) of all real analytic functions defined on I .

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

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

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

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

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

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

Now we are ready to state our

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

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

$$p = \lambda^q + c_1\lambda^{q-1} + \dots + c_q. \quad (2)$$

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

$$\text{Ev}_\theta(p) = \lambda^q + c_1(\theta)\lambda^{q-1} + \dots + c_q(\theta) \quad (3)$$

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

$$f(\theta) = \text{Ev}_\theta(p), \quad (4)$$

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 ϕ be a real-analytic function defined on $\mathbf{R}$. Let

$$E_N = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^q \phi(r_j(f(\frac{k}{N}))). \quad (5)$$

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

$$E_N = \alpha(\phi)N + \beta(\phi) + o(1) \quad (6)$$

as $N \rightarrow \infty$.

Note I. The following proposition, which is easily established via Taylor’s theorem, is fundamental in investigating Proposition I.

Proposition II. 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 $N \in \mathbf{Z}^+$, let

$$E_N = \sum_{k=1}^N g\left(\frac{k}{N}\right). \quad (7)$$

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

$$E_N = \alpha N + \beta + o(1) \quad (8)$$

as $N \rightarrow \infty$.

The above Proposition II, which is easy to prove and has a link to the Fukui conjecture and to the chemistry of carbon nanotubes, has been used for educational purposes in Tsuyama National College of Technology. The details of the method that enables one to link the education of students to the frontier of science shall be published elsewhere. We would like to express sincere thanks to a member of the Fukui Project, Prof. Peter Zizler, (Mount Royal University, Canada) who provided the idea of using the above Proposition II for educational and cross-disciplinary purposes.

6. 後 記

有本 茂

今年、平成25年は福井謙一先生の生誕95周年に当たる。平成25年末に、数学と化学の学際シンポジウム2013・津山における有本の福井謙一先生回顧講演の内容を補充した「福井予想と New Frontier Project」と題する記事²¹⁾が化学同人の学術雑誌「化学」に掲載された。この場をお借りして、「化学と私」¹⁴⁾より本論文への福井謙一先生の写真転写を許可され、上記の記

事執筆の機会を提供された化学同人、編集長、平 祐幸氏に感謝の意を表したい。

上述の「化学」中の記事においては、福井予想の起点の一つになった図 1 の実験データの解説がなされる。図 1 に見られるプロットにおいて視覚的に捉えることのできる(高速漸近)直線関係は 5 節、命題 I の(6)式の漸近線 $\alpha(\varphi)N + \beta(\varphi)$ と密接な関係をもっている。詳しくは、上述の記事「福井予想と New Frontier Project」を参照されたい。

最後に、「数学と化学の学際シンポジウム 2013・津山」の企画・準備にあたって、福井プロジェクト、津山市役所、津山市教育委員会、Try アングル岡山連携機関、津山高専内外の幾多の方々にお世話になった事、津山高専校長裁量の御援助をいただいた事をここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) L. Lacerda, A. Bianco, M. Prato & K. Kostarelos, *Adv. Drug Deliv. Rev.* 58, 1460 (2006).
- 2) Z. Liu, S. M. Tabakman, Z. Chen & H. Dai, *Nat. Protocols* 4, 1372 (2009).
- 3) R. Weissleder, *Nat. Biotechnol.* 19, 316 (2001).
- 4) A. Burke, X. Ding, R. Singh, R. A. Kraft, N. Levi-Polyachenko, M. N. Rylander, C. Szot, C. Buchanan, J. Whitney, J. Fisher, H. C. Hatcher, J. D'Agostino, R., Kock, N. D., P. M. Ajayan, D. L. Carroll, S. Akman, F. M. Torti & S. V. Torti, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 106, 12897 (2009).
- 5) P. Chakravarty, R. Marches, N. S. Zimmerman, A. D.-E. Swafford, P. Bajaj, I. H. Musselman, P. Pantano, R. K. Draper & E. S. Vitetta, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 105, 8697 (2008).
- 6) N. W. S. Kam, M. O'Connell, J. A. Wisdom & H. Dai, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 102, 11600 (2005).
- 7) J. Miller, *J. Chem. Ed.* 76, 592 (1999).
- 8) T. Tanaka, Y. Urabe, D. Nishide & H. Kataura, *Appl. Phys. Express* 2, 125002 (2009).
- 9) R. Voggu, K. V. Rao, S. J. George & C. N. R. Rao, *J. Am. Chem. Soc.* 132, 5560 (2010).
- 10) I. J. Macdonald & T. J. Dougherty, *J. Porphyrins Phthalocyanines* 5, 105 (2001).
- 11) T. Murakami, K. Tsuchida, M. Hashida & H. Imahori, *Mol. Biosyst.* 6, 789 (2010).
- 12) T. Murakami, W. Wijagkanalan, M. Hashida & K. Tsuchida, *Nanomed. (Lond)* 5, 867 (2010).
- 13) M.-H. Ham, J. H. Cho, A. A. Boghossian, E. S. Jeng, R. A. Graff, D. A. Heller, A. C. Chang, A. Mattis, T. H. Bayburt, Y. V. Grinkova, A. S. Zeiger, K. J. Van Vliet, E. K. Hobbie, S. G. Sligar, C. A. Wraight & M. S. Strano, *Nat. Chem.* 2, 929 (2010).
- 14) 山邊時雄編, ノーベル賞科学者福井謙一 化学と私, 化学同人 (1982).
- 15) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. I, *J. Math. Chem.* 41 (2007) 231.
- 16) S. Arimoto, Repeat space theory applied to carbon nanotubes and related molecular networks. II, *J. Math. Chem.* 43 (2008) 658.
- 17) 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.
- 18) S. Iijima, *Nature* 354 (1991) 56.
- 19) T. Yamabe, *Synthetic Metals* 70 (1995) 1511.
- 20) K. Tanaka, T. Yamabe and K. Fukui, *The Science and Technology of Carbon Nanotubes* (Elsevier, 1999).
- 21) 有本 茂, 福井予想と New Frontier Project, 化学 Vol. 68 No. 11 (2013) 24.

学校部活動への参加義務化がもたらす効果と課題に関する一考察

山本 浩二* 神野 賢治**

A Study on the Effects and the Challenges that Mandatory Participation in School Extracurricular Activities will Bring

Koji YAMAMOTO and Kenji KAMINO

The purpose of this study was to consider the effect and the challenges that mandatory participation in school extracurricular activities will bring. In addition, second purpose was to examine extracurricular activities and grade differences. Consequently, the effectiveness of extracurricular activities and the relation between sociality and extracurricular activities were confirmed. In addition, the participants in extracurricular activities are higher sociality than the non-participants. And therefore, efforts of this school can be expected to increase the social nature of student.

Key Words: Sociality, Effectiveness of Extracurricular Activities, Mandatory Participation

1. 緒 言

これまで、青少年期における日本のスポーツ活動の基盤は学校運動部活動（以下、運動部活動）にあった。しかしながら今日、少子化や顧問教員の高齢化、それらに伴う運動部の統廃合、子どもたちや教員の部活動に対する価値観の多様化など、これまで青少年のライフスタイル形成に大きな役割を果たしてきた運動部活動は、存立の危機にまで直面している。

このような状況において、「スポーツ基本計画」は、学校と地域が連携して、子どもの学校内外のスポーツ環境を充実することを目標に掲げている¹⁾。また、今後の具体的施策展開として、運動部活動を総合型地域スポーツクラブ等の地域のスポーツ活動と連携して実施することを求めていることからわかるように、学校内における運動部活動の運営が困難となった今日、地域社会との連携、もしくは地域社会への委嘱が重要視されるようになった。いずれにせよ、青少年期のスポーツ活動の環境（場）の再考を迫られており、喫緊の課題であるといえよう。

本学教員においては、2010 年度後期より「学校部活動（以下、部活動）指導の全員化」を図ること

学生とのコミュニケーションの向上、学生への教育機会の拡大、さらには学校の活性化を目指した取り組みである。さらに、2012 年度より本学に入学してきた学生に対しても、「部活動参加の義務化」を推奨し、学校内における部活動に教員そして学生ともに参加することを方向づけた。この方針は近年のわが国のスポーツ政策動向と 2 つの点で相反する動きであるとも捉えることができよう。

すなわち、一つ目に、部活動は自主的・自発的に行なわれることを目的とされている²⁾にもかかわらず、部活動参加を「義務化」したこと。二つ目に、「スポーツ基本計画」においても、学校と地域の連携を推奨しているにもかかわらず、学生がスポーツ活動および文化活動を実施できる環境、そしてその運営までも「学校」主体で活動していくことを目指していること。これらの取り組みは、近年の部活動の在り方や運営の改善に対する方策とは対照的である。

これまで青少年期の子どもたちのスポーツ・文化活動の中心を担ってきた部活動を、従来どおり学校内に留めるのか、地域へと委嘱してしまうのか、それとも、学校と地域が手と手を取り合い、協力して支えていくのか。この点に関しては、多くの議論とともにケーススタディ（事例研究）の積み重ねが必要であろう。すなわち、部活動の存在基盤を学校内に位置付けた本学の取り組みは、一事例研究として、今後の部活動の在り方を示唆する手がかりとなる。

そこで、本研究では、本学学生（1～3 年生）を対象とした質問紙調査を元に、今日の高等学校期の学生が

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*一般科目

**金沢星稜大学 人間科学部

獲得している「社会性」に関して、各種活動参加状況（「運動部」「学外クラブ」「文化部」「所属なし」）間で比較・検討作業を施す。さらに、部活動参加義務化となった2012年度入学者（現1年生）は、どのような特性を持つことになるのか。他学年との比較、あるいは2年前の本学学生に対する調査結果との比較により、高等学校期に部活動に参加することの今日的意義や効果の把握理解を目指したい。以上の作業を踏まえ、今後の部活動の方向性について言及してみたい。

2. 部活動に関する先行研究の検討

部活動が子どもにもたらす教育的効果と影響力を検討した先行研究は多く見られ、玉江ら（1998）は、「学校部活動との適切な接点を有する者ほど精神健康状態は良好である」⁶⁾との学校保健学領域の研究知見、また、山本ら（2007）は、高校生の社会性獲得状況に関する研究において、運動部活動への参加が高等学校期における社会性獲得に好影響をもたらしていることを確認している⁷⁾。さらに、中西ら（2007）は、「運動・スポーツ活動は、子どもの社会力の形成に有意な影響を及ぼすことが明確にされるとともに、学校における体育・スポーツの重要性と存在価値が示唆された。」¹⁰⁾と述べている。以上の研究知見に鑑みただけでも、高等学校期の運動部活動への参加は生徒の精神状態の安定さらには将来的に良好な社会性を獲得していく能力の開発・開拓に大きな影響力を有していると推察できる。

部活動に多大な有効性があるにもかかわらず、地域との連携、地域への移行が迫られるようになった要因に関しては、先述したような、社会情勢の変化によるものが大きい。運動部活動が抱える「困難」について、松尾（2008）は、以下、3点を指摘している。すなわち、まず第1には、急激に進む少子化による学校運動部員数の減少、少子化による教員数の削減とそれに伴う教員の高齢化の進行などの人口統計学的な困難である。第2に、専門的指導者の確保の難しさと教員の異動に伴う運動部の継続の問題といった、指導者の供給システム上の困難。そして、第3には、学習指導要領の改訂に伴う特別活動としてのクラブの廃止の問題や部活動の競技会の開催根拠となっていた文部事務次官通知の廃止による対外運動競技の教育上の位置づけの曖昧化などにみられる、法的・規程的正統性からみた困難である¹¹⁾と論じており、部活動の拠点を地域へ移行する方策が浮上せざるを得ない理由を窺うことができる。

では、学校内で部活動を実施することが困難となった今日、活動拠点を「地域社会」へ移行できるのか。そこにもまた、あらたな「困難」があると思われる。三本松（2008）は「自主的な活動（運動部活動）を通

して、自主性・主体性を養うとともに個性を伸長し、社会性を涵養して、心身の調和的な発達を図ることがその理念として伝統的に謳われており、その理念は今日でも変わっていない。」¹²⁾と述べており、さらに「当該年齢の子どもたちを持つ親の9割が学校運動部の必要性を感じている。」¹³⁾と指摘している。また、清水（2011）は、「運動部活動は、自主的・自発的活動の形態を保つことで教科では十分に育むことのできない部分を育てたのであり、これらの活動が学校外に移行した場合には、学校の果たしてきた生活による教育機能の低下を招くことが危惧される。」¹⁴⁾と論じている。

すなわち、先行研究の検討作業から言えることは、長年にわたり青少年のスポーツ・文化活動の基盤となってきた部活動の実施・運営が困難となった今日、地域との連携、地域への移行に活力を見出そうとするも、良好な連携、移行を成し遂げることができていないということが現状であるといえよう。

3. 研究目的

本研究において言及する事柄は、以下3点に集約できる。

- 1) 本学学生の「社会性獲得状況」について把握理解し、部活動参加形態や性別、学年間により比較・検討する。
- 2) 1)の結果を受けて、高等学校期に部活動に参加することの教育的意義や効果について考察する。
- 3) 学生のスポーツおよび文化活動の拠点を「学校内」に置く、本学の取り組みに対する考察と今後の学校部活動の方向性を言及する。

4. 研究方法

4. 1. 分析枠組み

本研究で用いる「社会性」に関する先行研究は心理学、社会学の分野で多く見られ、子どもから大人にわたり幅広く用いられており、概して「今ある社会に適応していく能力」を第一義として用いられている¹⁵⁾¹⁶⁾。

また、学校社会に特化した場合、「学校教育で想定される社会性とは、集団活動の場で自分の役割や責任を果たす、互いの特性を認め合う、他者と協力して諸問題を話し合う、その解決に向けて思考・判断する等の能力や態度である」¹⁷⁾と位置づけられている。

高校生の部活動をはじめとした諸集団活動からもたらされる影響内容の検討が意図される本研究においては、社会性を「適応能力」だけに狭義化するよりも、「社会（環境）に適応し、自己を発揮していく能力」と捉えるべきでなかろうか。そこで、本研究における

「社会性」の位置づけとしては、「個人を取り巻く社会（環境）において、自己を発揮し、実現していくための能力」と考える。

4. 2. 調査方法

本調査においては、本学1～3年生までの学生491名を対象に質問紙調査を実施した。調査実施者から各クラスに対して協力を要請し、体育授業の時間帯に配布・回収を行なっている。

回収されたデータ数は全対象数である491部であったが、分析対象者は、欠損回答が皆無の462部（有効回答率94.1%）となった。調査時期は2012年9月である。

また、本学における学校部活動所属者（1～3年生）は、現在、運動部には約52.4%（462人中242人）が所属しており、全国の高等学校運動部活動所属者（約37.4%）^{18）}と比べても高い所属率であると言える。文化部においても約28.4%（131人）が所属しており、全体として約80.8%（373人）が学校部活動に所属している。また、学外クラブ所属者は約2.6%（12名）であり、多くの学生がスポーツ・文化活動の拠点を学校内に置いていることが把握できる。

4. 3. 調査項目

本研究の主となる「社会性」を測定する尺度として、山本ほか（2012）により開発された「高校生版社会性測定尺度」^{19）}を用いる（表1）。

表1 高校生版社会性測定尺度

項 目	因子負荷量
意思表示 ($\alpha = .80$)	
1 人前で大きな声で、はっきりとした口調で話することができる	.71
23 何事も自ら積極的に行うほうである	.71
48 性別や年代に関係なく、一緒に話をするすることができる	.67
56 自分には、まわりを励ましたり、元気づけたりする明るさがある	.67
Fit index: GFI=.997 AGFI=.985 CFI=1.00 RMSEA=.000	
目標遂行 ($\alpha = .74$)	
11 自分の立てた目標を目指して行動することができる	.65
41 物事を実行する目的を明確にしている	.65
24 自分の目標が、何を、いつまでに、どれだけ達成するのかわかっている	.60
35 自分のやりたいこと(職業)を意識して、進路設計している	.56
Fit index: GFI=.997 AGFI=.987 CFI=1.00 RMSEA=.000	
対人関係 ($\alpha = .72$)	
12 仲間と意見交換し、協力することができる	.65
4 他人が困っているときは、助けてあげたいと思う	.62
16 他人の良いところは自分にも取り入れたいと思う	.58
33 助言してくれる人たちを持っている	.55
Fit index: GFI=.997 AGFI=.985 CFI=1.00 RMSEA=.000	
創意工夫 ($\alpha = .73$)	
27 他人の批判を受け入れ、自分の改善に取り入れる	.68
39 多少気の合わない相手でも、協力して物事を行える	.60
52 別の方法はないかとあらゆる可能性を探ろうとする	.59
20 なるべく間違えではなく、創意工夫したい	.59
Fit index: GFI=.996 AGFI=.980 CFI=1.00 RMSEA=.000	

本尺度は4因子計16項目から構成されており、モデルの適合度指標となる、GFIとAGFIにおいては、すべての因子で十分に高い値が得られている。また、値が1に近いほど良いモデルとされるCFIにおいては、すべての因子で1.00を示していることや、値が0に近いほど良いモデルとされるRMSEAにおいても、すべての因子で.000を示していることから、非常に高い適合度であると考えられる。

さらに、学校行事に対する参加意欲について訊ねる5項目を設定し、それぞれ「4 大変感じている」～「1 まったく感じていない」の4件法により回答を求めた。その他、「基本的属性に関すること」、「クラブ活動に関すること」、「過去の体験に関すること」、「自分自身に関する意識について」、「学校諸活動に対する参加意欲」についても訊ねている。

4. 4. 分析方法

4因子16項目で構成された社会性測定得点との関連性を把握するため、一要因の分散分析を行なった。「社会性獲得」との関連性を検討する項目としては、「部活動（クラブ活動）参加状況」、「性別」、「学年」の3項目とする。ただし、「学年」による比較・検討作業においては、全員部活動参加義務化となった、現1年生（2012年度入学生）と、本学の2年前（2010年度入学）の1年生と比較・検討する^{4）}。

5. 結果と考察

5. 1. 各種活動への参加状況と社会性得点との関連性

各種活動参加状況と社会性得点の比較・検討を行なった（図1）。各種活動の所属者数は462名（運動部242名、学外クラブ12名、文化部131名、所属なし77名）である。

まず、すべての社会性項目において最も高い値を示したのは、「運動部」であった。すべての社会性項目で、「所属なし」との間に有意差も確認できた。この結果から、高等学校期に運動部活動に参加することの効果の一端を確認できる。この結果に関しては、高校生を対象とした山本ら（2007、2008）の先行研究の結果と符合する^{8）20）}。特に「対人関係因子」においては、「運動部」とその他の各種活動間に有意差も見られ、さらに「文化部」と「所属なし」との間にも有意差が確認できることから、部活動で見られる「学年の壁を越えた縦断的な交流」が、得点の高まりを見せたのではなからうか。

いずれにせよ、各種活動間で社会性得点に差異が見られた、その要因を検証していく作業は不可欠であろう。すなわち、「なぜすべての項目において、運動部と所属なしとの間に有意差が確認できたのか」、「なぜ同

じスポーツ活動を伴う運動部と学外スポーツとの間に、差が生じるのか」といったことに対して、質的アプローチにより解明していくことが必要であろう。

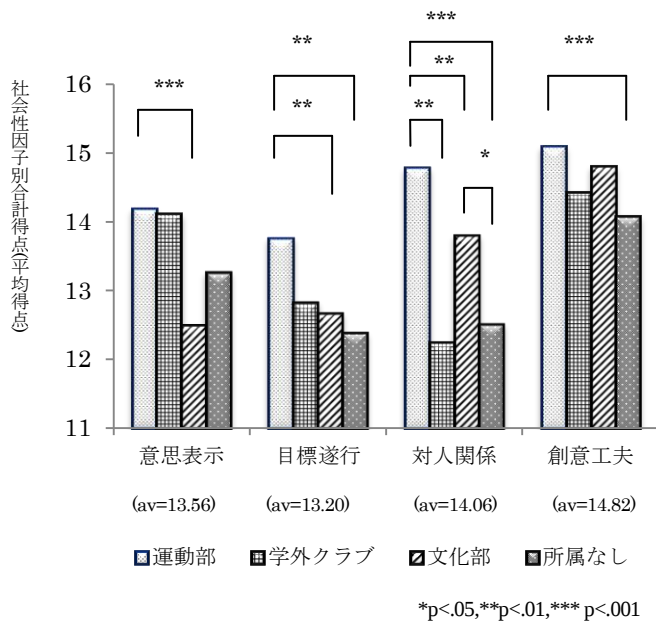


図1 部活動参加状況と社会性得点

5. 2. 性別と社会性得点との関連性

性別と社会性得点との比較・検討を行なった(図2)。男女比に関しては、男性412名、女性50名である。すべての項目で、女子学生が高い社会性得点を示す結果となった。これは、先行研究の結果とも付随することから、高等学校期における社会性獲得は、男性より女性の方が高い社会性を獲得しているといえよう。この結果においては、中学校期、あるいは大学期にも焦点化し、縦断的な調査研究が必要であろう。

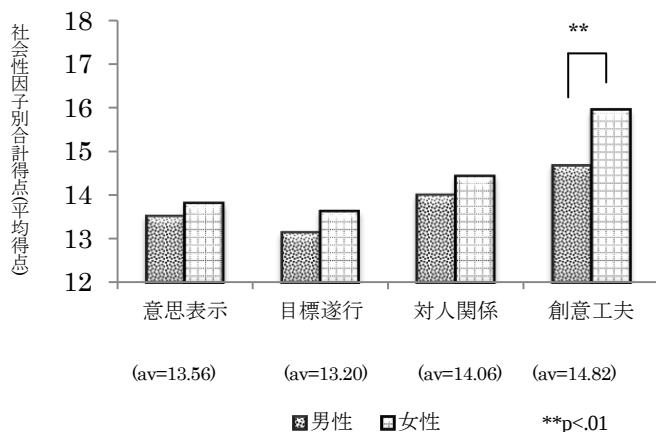


図2 性別と社会性得点

5. 3. 学年と社会性得点との関連性

学年と社会性得点との比較・検討を行なった(図3)。学年比に関しては、1年生184名、2年生129名、3年生

生149名である。

注目すべき点は、「対人関係因子」である。1年生が最も高く、2・3年生との間に有意差が確認できる。この結果に関しては、部活動全員参加を促した、本学の取り組みが、1年生の社会性得点を高める要因となったのか、それとも、もともと社会性得点(特に対人関係能力)の高い学生が入学してきたのかについては、今回の結果だけでは明言できない。しかしながら、先行研究の結果に鑑みると、「高校生における社会性得点は、すべての項目で3年生が高い」という結果が得られていること⁹⁾、また、2年前の本学調査結果においても、1年生と2・3年生の社会性得点に有意差が確認できていないこと⁵⁾からわかるように、現1年生の対人関係因子得点の高まりは、先行知見と一致しないことから、何らかの特別な動き(本研究に限れば、部活動参加義務化)によるものと推察できる。今後、縦断的な調査により、明らかにしていきたい。

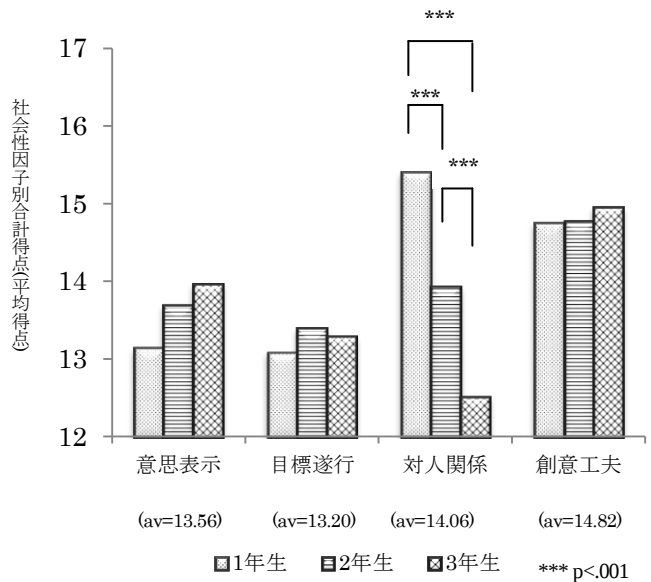


図3 学年と社会性得点

5. 4. 本学の部活動運営形態の変化に伴う社会性得点の差異の検討

先述したように、本学においては、2012年度入学者より「部活動参加義務化」を実施し、いずれかの部活に所属するように促している。しかしながら、その動向に対する効果検証はまだなされていない。

そこで、2年前に本学で実施したアンケート調査結果との比較により、部活動参加義務化がもたらす影響力を見ていくこととする。まだ始まったばかりではあるが、2年前のデータとの比較により考察していきたい。比較対象は、2010年度入学者(1年生)163名である。また、2年前の調査時期は2009年7月であり、本調査とほぼ同時期である。調査

項目に関しては、今回の調査項目である 16 項目に合わせ、4 因子 16 項目で比較・検討を行った（図 4）。

この結果からわかることは、「対人関係」において、現 1 年生の方が高い得点を示し、2 年前の 1 年生との間に有意差も確認できた。しかしながら、その他の 3 項目においては、社会性得点にほとんど差が見られなかった。

ここからは推察の域に留まるが、入学して間もない時期に、部活動に参加することは、先輩、同級生、顧問教員などの多数人物との関わる機会を得ることができ、部活動参加を義務化したことで、より多くの 1 年生が他者との関わる機会を得ることができたのではなかろうか。その結果、現 1 年生の対人関係得点が、他学年、さらに 2 年前の 1 年生よりも有意に高いという、これまでの先行知見とは異なる結果に繋がったのではなかろうか。

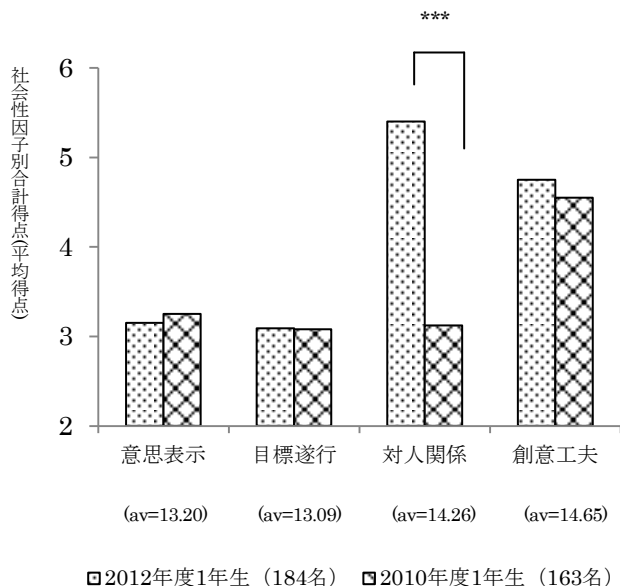


図 4 過去の調査結果との社会性得点比較

6. ま と め

本研究では、部活動参加義務化に向けた本学の取り組みが、学生にどのような影響を及ぼすのか、その効果検証と、そこから見えてくる課題について考察していくことを目的とした。まずは、高等学校期の部活動への関わりと社会性獲得の関連性について実証的に検討するために、本学生を対象に質問紙調査を実施した。本研究において得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 社会性項目の得点はすべての項目で「運動部」が最も高い値を示し、「所属なし」との間に有意差も確認できた。また、「対人関係」に関し

ては、「運動部」、「文化部」が高く、「所属なし」との間に有意差が確認できた。

- 2) 学年別に見ていくと、4 項目中 3 項目においてあまり差は見られなかったものの、「対人関係」においては、1 年生が最も高く 2・3 年生との間に有意差も確認できた。
- 3) 部活動参加義務化を導入した現 1 年生と 2 年前の 1 年生とを比較した結果、「対人関係」において、現 1 年生の方が有意に高い値を示した。

以上 3 点より、今後の研究継続にあたり課題として挙げられることは、本結果において一部確認されることとなった「運動部がすべての項目において社会性得点が高く、非所属の学生との間に有意差が確認された」ことをより詳細に検討していくことである。このことに関しては、先行研究においても一致した結果が得られている。今後は、「なぜ運動部所属者は高い社会性得点を獲得しているのか」、その要因を検証していくことが必要不可欠であろう。

また、学年間の比較・検討においては、ほとんどの項目で差は見られないものの、「対人関係」においては、1 年生が最も高い値を示した。この結果は、過去の調査結果と比較しても、現 1 年生は特別に高い値であると言えよう。先行研究においても、1 年生が有意に高い値を示した結果は見当たらないため、今後、現 1 年生を追跡調査し、要因の解明を行なう必要がある。

その際、一つの仮説として考えられることが、現 1 年生から取り組んだ「部活動参加義務化」である。すなわち、入学して間もないこの時期に、人との関わり（特に他学年との関わり）の要素が多く含まれる部活動に参加することで、「対人関係」能力に関して特別な高まりを見せたのではなかろうか。「対人関係」以外の 3 項目に関しては、2 年前の調査結果との比較においても、ほとんど差異は見受けられないため、もともと現 1 年生が入学前から高い社会性を獲得していたとは考え難い。「対人関係」に焦点化した場合、「文化部」と「所属なし」との間にも有意差が確認できることから、高等学校期に部活動に参加することの効果の一つとして、対人関係能力を向上させることにつながると言うことができよう。

今後の課題としては、「部活動参加義務化」の縦断的な効果検証である。すなわち、部活動の活動基軸を「学校内」におくことで、言わば、わが国のスポーツ政策動向と相反する方針で動き出した本学の取り組みを縦断的に追跡する必要がある。その研究結果こそ、今後の部活動の在り方、方向性を導く一事例研究となりうるのではなかろうか。

まだ始まったばかりとはいえ、社会性得点比較（特に対人関係）により部活動の効果の一端を把握できたといえよう。

しかしながら、本学の「部活動参加義務化」の取り組みに対する、当該学生（現1年生）に関しては、検討の余地を残した。すなわち、当該学生（現1年生）が、この「部活動参加義務化」の方針をどのように感じ、部活動へ参加し、その後、継続しているのか。この点に関する検討作業なされていない。

アンケート調査の中で、部活動入部以前の本学部活動に対する参加意識を訊ねている。その結果、「入学前から本学でどの部活動に入部するか決めていた」77名（42.7%）、「入学してから何かしらの部活に入部しようと思っていた」68名（37.8%）、「入部するかしないかもわからなかった」24名（13.3%）、「いずれにも入部しないつもりだった」11名（6.2%）という結果であった。

論述すべき点は、「いずれにも入部しないつもりだった」11名（6.2%）の学生である。彼らは、入学前は部活動に入部する気はなかったにもかかわらず、入部せざるを得なくなったと捉えることができよう。彼らがどのような気持ちで部活動を選択したのか、また、その後の活動はどのような状況なのか。彼らに対しインタビュー調査を実施し、彼らの本質に迫っていくことこそ、本学の「部活動参加義務化」の真の「効果」があるといえよう。

部活動参加義務化がもたらす効果検証は、「社会性（特に対人関係）向上」といった、「数値上の効果」検証と、部活動に参加することが自身にとって良いものだ（良かった）と実感できる、学生自身に焦点化した、「内的な効果」検証との両面の検証作業が不可欠であろう。

最後に、本研究において、分析を進めていく上で認識することとなった制約事項をあげておく。

制約事項として挙げられるのが、各種活動参加比である。「学外クラブ所属者」が12名と極端に少ないため、「部活動」と「学外クラブ」との比較・検討作業が困難となった。今後、部活動の有効性を論じる際、「学外クラブ」との比較・検討作業は必須である。したがって、今後は「学外クラブ」数の増大、さらに、本学同様に「部活動参加義務化」を課している高等学校あるいは高等専門学校との比較・検討作業も必要であろう。

参考文献

- 1) 文部科学省「スポーツ基本計画」2012
- 2) 文部科学省「(13)部活動の意義と留意点等」高等学校学習指導要領解説総則編 pp. 78-79, 2009
- 3) 山本浩二ら他「高等学校期における学校部活動への関わりと社会性獲得との関連性に関する実証的研究」津山工業高等専門学校紀要 第52号 pp. 95-100, 2010
- 4) 3)と同書
- 5) 3)と同書
- 6) 玉江和義ら他「福岡県内某公立高等学校1年生における精神健康と疲労に関する探索的研究—中学校からの運動部活動歴との関連性の検討—」健康科学 20 pp. 93-98, 1998
- 7) 山本浩二ら他「高校生における社会性獲得に関する実証的研究—運動部活動参加状況による比較・検討を中心に—」別府溝部学園高等学校紀要 第19号 pp. 50-62, 2007
- 8) 7)と同書
- 9) 7)と同書
- 10) 中西純司ら他「子どもの運動・スポーツ活動と『社会力』との関連性に関する実証的検討」福岡教育大学紀要 第56号 p. 144, 2007
- 11) 松尾哲矢「わが国における青少年のスポーツ競技者養成《場》の構造変動—民間スポーツクラブの成立と学校運動部との関係に着目して—」大谷善博監修、三本松正敏・西村秀樹編「変わりゆく日本のスポーツ」世界思想社 pp. 204-227, 2008
- 12) 三本松正敏「序章 日本スポーツの変革」大谷善博監修、三本松正敏・西村秀樹編「変わりゆく日本のスポーツ」世界思想社 pp. 1-41, 2008
- 13) 12)と同書
- 14) 清水将「高等学校における運動部活動の教育課程上の位置づけに関する検討」東亜大学紀要 第14号 pp. 17-32, 2011
- 15) 石田勢津子ら他「児童の心理学」第9章 有斐閣 1995
- 16) 小島秀夫「児童心理学への招待—学童期の発達と生活—」サイエンス社 1991
- 17) 国立教育政策研究所「『社会性の基礎』を育む『交流活動』・『体験活動』—「人とのかかわる喜び」をもつ児童生徒に—」国立教育政策研究所生徒指導センター p. 8, 2004
- 18) 文部科学省「平成16年文部科学白書」第一部 第一章 第4節 図表 1-1-11, 2004
- 19) 山本浩二ら他「高校生における社会性測定尺度の開発と部活動および学年間による差異の検討」岡山体育学研究 第20巻 pp. 11-16, 2013
- 20) 山本浩二他「高校生における社会性獲得に関する縦断的研究—年次推移に伴う比較・検討を中心に—」別府溝部学園高等学校紀要 第20号 pp. 41-51, 2008

研 究 調 査 報 告

柔軟で高効率な熱電素子水分解システムの開発

田辺 茂* 清水 日彬** 谷口 雄亮***

Flexible and High Efficient Thermoelectric Water Electrolysis System Using Hot Spring Water

Shigeru TANABE, Yoshiaki SHIMIZU, and Yusuke TANIGUCHI

The purpose of this study is to develop flexible and high-efficient thermoelectric water electrolysis system using hot spring water and water of a stream nearby. The system was field tested in 2010 for the first time and several improvements were adopted to the system and field tests were conducted in 2011 and 2012. The consecutive improvements made it possible to produce twice as much hydrogen as before. In addition, we established the method which determines the best connection method of thermoelectric cells under various water temperature combinations.

Key words: Hot Spring, Stream Water, Thermoelectric Generation, Water Electrolysis, Hydrogen Generation

1. 緒 言

熱電素子水分解システム¹⁾は、筆者らが命名したものであるが、地域を科学技術で活性化させる試みの一つであり、また 2011 年に発生した東日本大地震の被害からの復興の一助になることを想定した研究である。

熱電素子を使用した発電²⁾は、利用されずに廃棄されている熱エネルギーを有効利用できる点で、持続可能社会のエネルギーを考える上での有力な技術の一つと考えられる。さらに従来技術では利用しにくい 100℃以下の熱でも、温度差に応じた発電量が得られることも本発電方式の魅力である。

熱電素子による温泉を利用した発電は、これまでに国内では数か所で行われており、例えば鳥取県東郷湖めぐみの湯³⁾や群馬県草津温泉における温泉発電⁴⁾がある。こうしたシステムでは、発電した電力をそのまま利用するか、あるいは蓄電池に一度蓄えたのちに利用することが行われている。

一方、例えば 2010 年 6 月に閣議決定された資源エネルギー庁による「エネルギーの基本計画」⁵⁾においては、低炭素化のための水素エネルギー社会の実現への期待が述べられている。水素は多様な方法で生成することが可能であることから、エネルギー安全保障の観点からも優れたエネルギー

社会を支える水素生成装置の一つになると期待できる。

ここでは、過去 3 年間実施してきた湯原温泉における現地試験結果を検証し、今後の課題を検討する。

2. 熱電素子水分解システムの構成

図 1 に熱電素子水分解システムの簡易化した構成図を示す。高温側には温泉の湯を利用することとした。温泉の場所によっては 80℃程度の湯を利用できる可能性がある。熱電素子に有効に温度差を与えるためには、高温側の面の反対側を冷却することが有効である。温泉地の多くの場所で近く

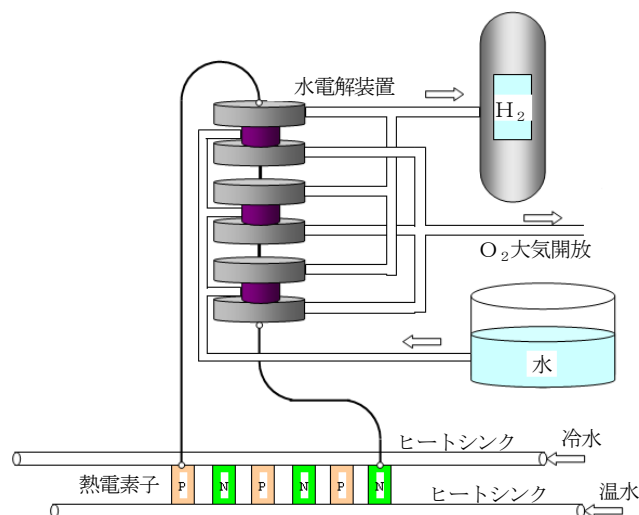


図 1 熱電素子水分解システム構成

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*電気電子工学科

**電子情報システム工学専攻 平成 24 年度修了生

***電気電子工学科 平成 24 年度卒業生

に河川が流れていることから、この河川の水を低温側の冷却水として利用することとした。

この温水と冷水をヒートシンクに通水することにより、ヒートシンクに挟み込んだ熱電素子に温度差を与える。市販されている主に電子冷却に使用されている熱電素子（ペルチェ素子と称される）は、図2に示すように平板状であり、その上下面から熱流を通過させる。ヒートシンクは熱電素子に合わせて平板とし、2枚のヒートシンクで熱電素子をはさみ、片方ヒートシンクには温水を、他方には冷水を流すことにより、熱電素子に温度差を与えることができる。

熱電素子の大きさは製造時の制約から1枚の大きさは40mm□程度であり、1枚で得られる電力はわずかである。この電力を多数集めて利用に供するが、その時の熱電素子の接続方法は、負荷に応じて最適なものにする。高電圧が必要であれば直列接続とし、大電流が必要であれば並列接続とする。本研究では、温度変化に応じて常に最適な熱電素子の直・並列接続となるような自動制御をめざしている。

熱電素子の電気出力は、固体高分子形水電解装置に接続する。別途用意した電機分解用の純水を水電解装置に供給し、それを電気分解して水素を生成する。生成した水素は水上置換法により容器に貯蔵している。酸素は大気開放する。実用段階では水素は圧縮してタンクに貯蔵することを検討する必要がある。

3. 技術課題と性能向上策

3年間の研究で明らかになった本システムの技術課題とその対策について以下に述べる。ここでは、真庭市湯原温泉で3回実施した現地実証試験を便宜上、1回目（2010年12月）、2回目（2011年12月）、3回目（2012年12月）と呼ぶ。

3. 1. 熱電素子の圧接

ヒートシンク2枚で熱電素子を挟み圧接することで、熱電素子への給熱と放熱を行っている。従ってヒートシンクと熱電素子の圧接状態が発電特



図2 熱電素子の外観

性に大きく影響することが考えられる。なおヒートシンクの大きさは350mm×190mmで、16枚の熱電素子を取り付けることができる。

熱電素子が許容する荷重は1枚あたり662Nなので、ヒートシンクあたり16枚の熱電素子を取り付けるとすれば、11kNと大きな荷重に耐えられることになる。しかし実際に実装するときには不均等な加圧による熱電素子の破損が発生するための限界があった。

1回目と2回目の現地実験では、ヒートシンクの上に重り（1回目：10kg、2回目：20kg）を乗せることで加圧した。3回目の現地試験では加圧の安定性を増すために図3に示すように8本のボルトで加圧する方式とした。締め付けトルクは150N・mである。この改善により、水素生成量は約20%増加した。

圧接についてのもう一つの技術課題がヒートシンクと熱電素子の接触状態である。以下の3点を検討した。まずヒートシンクの平面度公差は、大形パワー半導体素子を圧接する場合と同一の条件（0.05mm）とした。また表面粗さは、Ra記号で6.3とした。一方、熱電素子の厚みの公差は仕様では±0.1mmであり、この厚みのばらつきをカバーするため、2回目の現地試験以降、1mm厚の熱伝導度の大きなシリコンシートをヒートシンクと熱電素子の間に挟んだ。（2回目：信越化学工業製TC-CAT-20、3回目：同社製TC-(100)TXE）

3. 2. 熱電素子の最適接続

熱電素子の出力電流Iと出力電圧Vの特性（I-V特性）の実測値の例として、図2に外観を示した今回の研究に使用している、（有）日本テクモ製TEC1-12706について図4に示した。高温側温度42℃、与えた温度差は35Kである。この結果から電力を計算して同じく図4に示すが、熱電素子の最大電力は、出力電圧を開放電圧の半分で運転したときに得られることがわかる。

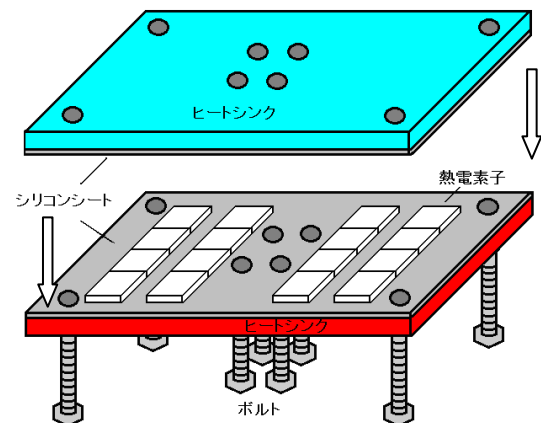


図3 熱電素子の取り付け方法

一方、負荷となる水電解装置の I-V 特性は図 5 のようになる。装置はアスデン(株)製 XL-MODEL、電極が 40mm 口の固体高分子形である。図から、電圧 1.5V から電気分解が始まりその後は電流が直線的に増加していることから、電気分解中は電気分解セルの等価抵抗は、ほぼ一定とみなすことができる。

熱電素子と水電解装置の I-V 特性の交点がシステム動作点となるが、図 4 と図 5 より、実証試験を実施する湯原温泉で得られる温度差 35K では、熱電素子 1 枚で水の電気分解はできないことがわかる。開放電圧の半分で電力最大になることを考慮すると、熱電素子 4 枚を直列接続すればよいと考えられる。システム全体では 64 枚の熱電素子を使用するので、これらの素子を 4 直列-16 並列すれば、最大の水素製造量となることが推察できる。2, 3 回目の実証試験ではこの接続方式とした。なお 1 回目の実証試験では温度差を 30K と想定したため出力電圧の予測が低く、直列接続数を 8 とした。この並列接続数の差は 50% 程度の水素生成速度の差として現れた。

熱電素子の最適接続方法の決定手順を一般化すると以下ようになる。

①熱電素子 1 枚で、各種温度差における I-V 特性を測定し、得られた I-V 特性を数式化する。

$$I = -aV + b$$

ここで、a：短絡電流/開放電圧、b：短絡電流

②熱電素子を n_s 個直列接続し、 n_p 個並列接続したときの熱電素子全体の I-V 特性は次式で表せる。

$$I = -a(n_p/n_s)V + n_p b$$

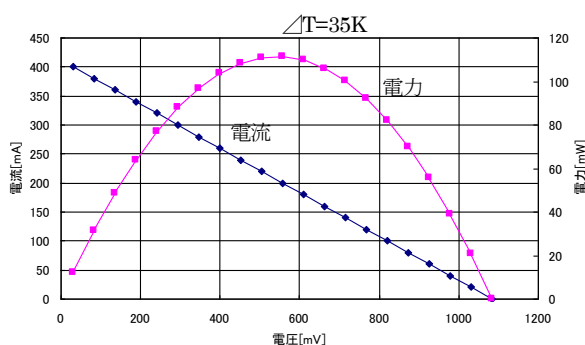


図 4 熱電素子の I-V 特性例

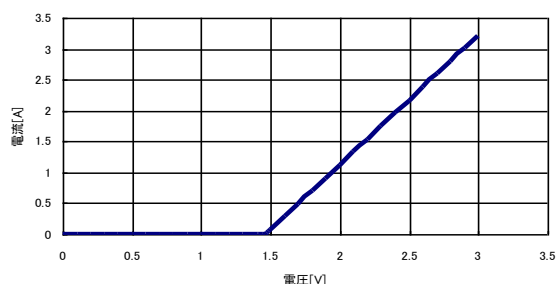


図 5 水電解装置の I-V 特性

③水分解装置の I-V 特性を測定し、得られた I-V 特性を数式化する。

$$I = cV + d$$

ただし、 $V < V_{th}$ で $I=0$, c : I-V カーブ傾き、 $d/c = -V_{th}$

④所定の温度条件と熱電素子の接続条件で、熱電素子と水電解装置の特性の交点をもとめ、その時の電流を計算する。

⑤電流が最大になる熱電素子の接続条件を求める。

3. 3. 冷却水流量の影響

ヒートシンクに流す冷却水の流量を増加すれば熱電素子の低温側の温度上昇を抑制できるので、発電電力の増加が期待できる。実験室における温度差 35K の条件で 1L/min から 4L/min まで流量を変化させて最大電力を比較したところ、約 4 倍の増加を確認した。この結果を受けて、3 回目の現地実証試験では可能な限りの冷水側流量の増加を図った。

4. 温泉地での実証試験

3 章で述べたように、これまで 3 回の実証試験を湯原温泉にて実施してきた。システムの設置場所の選定にあたって、湯と河川水の両方がポンプなしでヒートシンクに流せる場所を探した結果、田羽根川が旭川に合流する地点が絶好であることを見出した。この地点には 4m 上に足湯があり、湯はそこから高低差を利用して 4L/min 程度の十分な流量を確保できた。一方、水は田羽根川からホースで容易にヒートシンクに引き入れ可能と考えたが、実際には高低差のない川なので十分な流量を確保するのに苦労した。3 回目の試験では特に水の流量増大を意識して取り組み、取水部の形状を大きくすることや川自体の流量が多い場所を最大限利用するなどの工夫により、結果として前年度より 13% の増加となった。

3 年間の結果をまとめて表 1 に示す。どの年も温度差で 35K 程度が得られた。3 章で説明した出力増大策の適用により、3 年目には 1 年目の 2 倍の水素生成速度を得ることができた。

本システムの出力を生成される水素エネルギー(低位発熱量:LHV 基準)と考え、入力として温泉の湯の温度低下から計算できる熱エネルギーを考えると、本システムの効率 η を以下のように定義できる。

$$\eta = \frac{\text{単位時間あたりに生成した水素の LHV}}{\text{湯の温度低下と流量から求めた熱量}} \times 100 \quad (1)$$

(1)式において単位時間を 1 分とし、水素生成速

表1 3年間の現地実証試験結果のまとめ

	2010年12月	2011年12月	2012年12月
熱電素子接続	8直列-8並列	4直列-16並列	4直列-16並列
ヒートシンク圧接	重り 10kg	重り 20kg	ボルト締め (*2)
熱電素子接触面	処理なし	シリコンシート	シリコンシート
水温 高温/低温(*1)	42.7℃/7.1℃	41.5℃/5.8℃	42.3℃/5.8℃
温度差 (*1)	35.6K	35.7K	36.5K
湯/水 流量 (*1)	4.0/1.7 L/min	4.5/1.6 L/min	3.7/1.8 L/min
水素生成速度 (*1)	0.75 NL/h	1.31NL/h	1.51NL/h
電圧/電流/電力 (*1)	1.73V/1.9A/3.29W	1.81V/3.06A/5.54W	1.97V/3.09A/6.08W

(*1): 代表値, (*2): M10×8, 締め付けトルク 150N・m

度 Q_h [Ncc/min], 水素の LHV[10.8J/cc]⁶⁾ とおけば次式が得られる。

$$\eta = \frac{Q_h \times 10.8}{(\theta_1 - \theta_2) \cdot Q_w \cdot 4.186} \times 100 \quad (2)$$

ここで Q_w : 湯の流量[cc/min], θ_1, θ_2 : ヒートシンクの入口, 出口の湯温

(2)式において, 3 回目の実証試験結果である $Q_h=25.2$ Ncc/min, $Q_w=3700$ cc/min, $\theta_1=42.3^\circ\text{C}$, $\theta_2=41.1^\circ\text{C}$ を代入すると η は 1.5% となる。

一方, 電気出力は 3 回目の実証試験で 6.1W が得られた。これは 1m^2 当りに換算すると 60W に相当する。水路のゴミの除去などのために設備利用率が 80% と考えると, 平均発電電力は 48W となる。この値を効率 20%, 設備利用率 12% の太陽光発電 ($1000\text{W} \times 0.2 \times 0.12 = 24\text{W}$) と比較すると, 2 倍となる。熱電素子が 24 時間安定して発電可能であることがこの差を生んでいる。

5. ま と め

電子冷却に用いられている安価な熱電素子により構築した熱電素子水分解システムを, 岡山県真庭市湯原温泉で 2010 年から 2012 年にかけて 3 回の実証試験を行ってきた。使用した熱電素子は面積が 16cm^2 のもの 64 枚で, これらを適切に直・並

列接続して, 温泉の湯と河川の水を通水した 2 枚のヒートシンクに挟みこんだ。この温度差で発電した熱電素子の発電電力を水分解装置に供給した。得られた温度差は 36K であったが, 2012 年の実証試験では 1 時間当たり 1.5L の水素を生成することができた。これは 2010 年の結果の 2 倍である。得られたエネルギーは湯からシステムが得た熱エネルギーの 1.5% であった。一方, 本システムで発電した電力を単位面積当たりで換算すると, 太陽光発電の 2 倍の平均電力が得られたことがわかった。

なお本研究の一部は, 科学技術振興機構平成 22 年度研究成果最適展開支援事業の支援を受けておこなわれた。

参 考 文 献

- 1) 田辺茂, 吉鷹朋昭: 熱電素子水分解システムの基礎検討, 電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 215, 2010
- 2) 坂田亮: 熱電発電—基礎と応用, 裳華堂, 2005, 2-21,
- 3) 温泉発電, 石田工業株式会社パンフレット, (2004)
- 4) 新藤尊彦, 中谷祐二郎, 大石高志: 未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム, 東芝レビュー, 63, 2(2008)7-10
- 5) 資源エネルギー庁ホームページ
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004657/energy.html>, 2013-7-18 確認
- 6) 田辺 茂: 燃料電池の基礎マスター, 電気書院, (2009) 130

津山高専における迷惑メール独自対策の長期検証

岡田 正* 米澤将人**

Long-term Evaluation of TNCT Independently Blocking of Spam E-mail

Tadashi OKADA* and Masato YONEZAWA**

We reported a unique blocking system of spam e-mail using Postfix mail server program six years ago. In this report, a subsequent improvement and an effect of the blocking are reported on a long-term view. We introduce additional refusal rules not only in delivery servers connected to the Internet but in the intramural last receiving server in order to improve a blocking efficiency. Although very slight superfluous restriction has occurred, the mail delivery system by which spam e-mail hardly enters within our campus is realizable without optional software and/or hardware.

Key Words: Blocking Spam E-mail, Postfix, Long-term Evaluation of Blocking Efficiency

1. はじめに

電子メール・ウェブサイト等の安全で安定な運用は、あらゆる組織の情報交換と情報発信に必須なものとなっている。津山高専では、オープンソースソフトウェア(OSS: Open Source Software¹⁾)を活用し、安全なネットワークサーバを安価に自前で構築し、15年以上にわたって安定に運用している²⁾。構築・運用にあたっては、単に業務を遂行するためだけでなく、ここで得られた技術情報や運用ノウハウを、学生教育・地域協力にも波及させ、多面的な教育・研究活動へと発展させてきた³⁾。

ネットワークサーバの運用では、セキュリティを重視した上で、複数人での管理を考え原則として標準的で分かりやすい設定を心がけている。この方針の唯一の大きな例外は、先に報告した電子メールサーバの設定である⁴⁾。迷惑メールを学内に入れないことを目的に、津山高専独自の拒否方針をもうけ、固有の設定情報を使った運用を10年近く続けて効果を上げている。

本報告では、前回の報告以降に行った追加設定やログ情報を紹介し、迷惑メール独自対策の効果を長期的に検証する。2章では、津山高専独自の迷惑メ

ール対策を、前回報告した以降の追加設定を含めて述べる。3章ではログ情報に基づき迷惑メールの長期にわたる受信状況を紹介し、4章では独自対策効果の検証と課題について考察する。

2. 津山高専の迷惑メール独自対策

津山高専の電子メールサーバに実装している迷惑メール拒否方法は、SMTP(Simple Mail Transfer Protocol, RFC5321⁵⁾)手順に基づいて、可能な限り初期の段階で拒否することで効率を上げるものである。前報で報告したとおり⁴⁾、

- (a) 特定のIPアドレスまたはFQDN(Fully Qualified Domain Name)の制限
- (b) FQDNを持たないクライアントの制限
- (c) 特定のメールアドレス/ドメイン名の制限
- (d) 存在しないドメイン名の制限
- (e) 存在しないユーザ向けのメール制限

について、OSSのメール配送プログラムPostfix⁶⁾の機能を使って記述している。このとき許可/拒否リストを、津山高専に届いた迷惑メールの情報を使って作成することも特徴である。

当初登録に使う情報は、システム管理者である本報告筆頭著者(岡田)に届いた電子メールから抜き出していた。その後、拒否設定の精度が向上するにつれて、個人に届く迷惑メールが少なくなったので、対外接続メールサーバのログを利用して、登録に使う情報を増加させた。すなわち、卒業した学生利用者や退職教職員宛に届き"User unknown & host name

原稿受付 平成25年8月30日

*情報工学科

**専攻科電子・情報システム工学専攻

not found"となる電子メールを探し、client と from から迷惑メールと判断されるもの（DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)で割り振られたアドレス、ドメイン情報に矛盾があるクライアントなど）を拒否リストに登録している。

しかし、IP アドレスの追加だけでは、巧妙に送りつけられる賞金・アダルト・違法物品等の電子メールを防ぐことに限界があった。そこで、プライバシー保護の方針にやや反する面があることを承知で、2008年5月12日から学内の電子メールサーバにおいて Postfix の header_checks⁷⁾を有効にして、電子メールの一部内部情報を制限設定に利用することにした。

設定の特徴として、迷惑メールに含まれるヘッダの特定パターンに一致した電子メールを、拒否して捨てるのではなく、独自コマンドを埋め込むことで管理領域にファイルとして保存できるようにした。これにより、迷惑メールだけを自動で選別・保存し、万一間違いがあっても手動で送信先に配信可能とな

っている。

保存された電子メール(ファイル)を随時点検し、本当に迷惑メールであるかどうかを確認するとともに、送りつけた IP Address を対外接続電子メールサーバに登録することで、極力前の段階で拒否できるようにする。

これでも一部の迷惑メール(特に、日本語で書かれたもの)は拒否設定をすり抜けていた。そこで、2012年6月4日からは内部電子メールサーバで Postfix の body_checks⁶⁾も有効にした。ここでの設定は、悪質で影響の大きいもののみに限定し、少数の短いパターンとすることで、処理負荷を押さえている。

3. 迷惑メールの長期受信状況

迷惑メールの受信状況の推移を、月単位(図1)と日単位(図2)で示す。

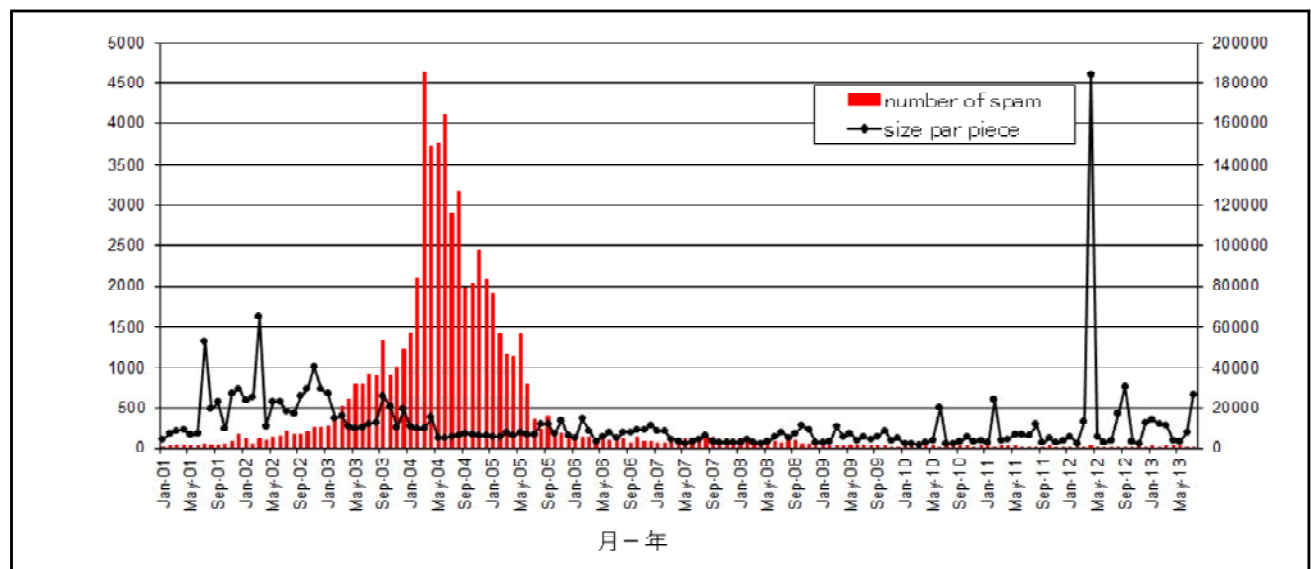


図1 迷惑メール受信状況の推移(月単位)

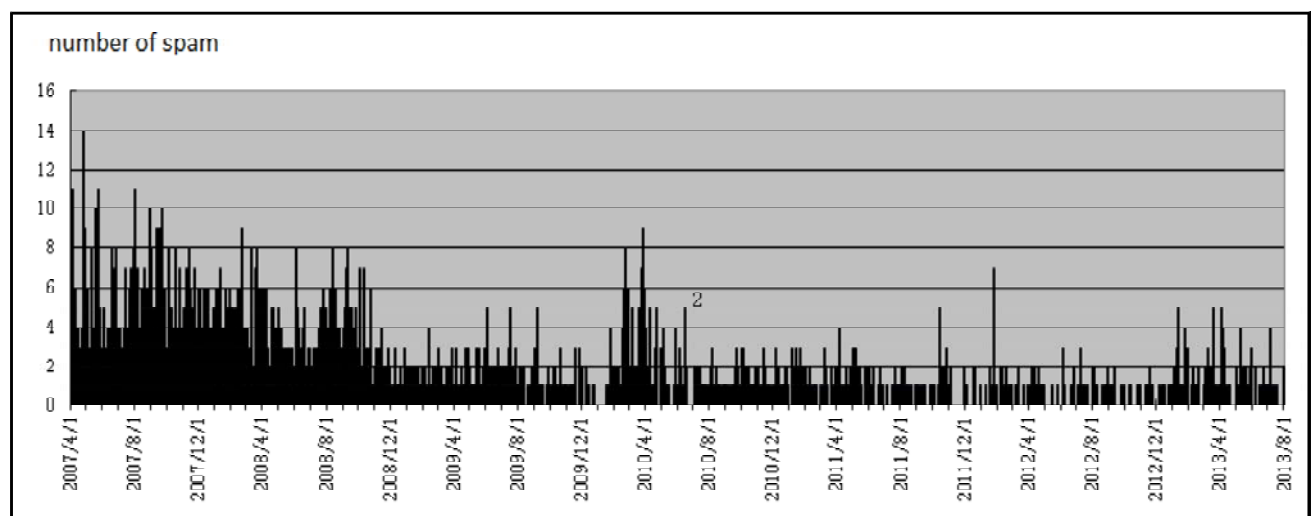


図2 迷惑メールの受信状況の推移(日単位)

図1は、システム管理者の一人である筆頭著者(岡田)に届いた迷惑メールの件数とその1件あたりの平均バイト数を、前報で報告した受信状況を含めて2001年1月から2013年7月までの12年7ヶ月分を示したものである。前報報告時点で月100通前後だった迷惑メールが、header_checks導入以降は数十通に下がり、現在は10通前後となっている。平均バイト数については、件数が減ったので、添付ファイル付きメールを受け取った月は大きな影響を受けているのがわかる。

図1では長期間のデータをまとめて示しているため、大量に届いていた時期と重なっていてわかりにくい。そこで、一日ごとの受信状況を2007年4月1日から2013年8月1日まで示したのが図2である。過去2年で見ると、2012年1月25日に7件受け取ったのが最大で、一週間届かない週もある。ただ、拒否リストを追加しているにもかかわらず、その後漸減しているわけではない。5件程度受け取る日もあり、新たなパターンで迷惑メールを送りつける状況が続いているのが見て取れる。

次にheader/body_checksの効果について述べる(ログの詳細は省略)。管理領域に保存したファイルは、通常月あたり数十通である。しかし、状況によって大きく変動するのが、この制限の特徴である。例えば、特定利用者が標的になって、同じような電子メールが大量に届き一定期間増加することがある。あるいは、新たな教職員を新規利用者として登録し、その方が前任組織から電子メールを転送されることがあり、組織によっては迷惑メールが大量に含まれていて多くのファイルが溜まることがある。いずれにしても、header/body_checksにより、巧妙な迷惑メールを拒否するのに効果のあることを確認できた。

4. 独自対策効果の検証と課題

3章で示したように、最も大量に迷惑メールを受け取るであろうシステム管理者に、現在では、数日に1通、月に10通前後届く環境を実現できている。月平均4000通程度の電子メールを受け取っているなかで、まったく気にならないレベルである。システム管理者以外の利用者で、迷惑メール拒否の效果を感じられるのは、他組織との異動を経験された場合であろう。本校に赴任された方または他機関に転出された方から、本校で迷惑メールを読むことがほとんどない(なかった)との感想を複数聞いており、本校の対策が有効に機能しているからだと考えている。

次に、本校のメールサーバ全体としての受信状況を、前報と同様に制限条件ごとに比較検討する。ア

クセス解析を行ったのは、前報とほぼ同じ時期の2013年6月15日から6月22日の一週間である。内部に転送した割合は16%と変わらなかったものの、制限条件の割合は大きく変わった。

まず、2章の条件(b)が29%から55%へと大きく増加した。これは、FQDNを持たないクライアントからのアクセスで、IPベースのインターネット管理に起因する継続した問題である。インターネットの普及に伴い、適切に管理されていないパソコン等の存在が増えている結果と考えられる。後で述べる過剰制限を生じる原因の一つともなっており、引き続き注視していく必要がある。

一方、IPアドレスを拒否する2章の条件(a)は、20%から8%へ減少した。正規に登録されているIPアドレスについては、OP25B(Outbound Port 25 Blocking)⁸⁾の導入など適切な管理が進むという良い面の反映であろう。また、途中で接続を切るクライアントは33%から18%へと、こちらも減少している。これは、迷惑メールを送りつける手法が洗練されてきて、時間のかかる接続をいやがるという悪い面が読み取れる。

次に、内部メールサーバでheader/body_checksを導入した効果を検討する。保存された電子メールを見ると、新たなソフトウェアやハードウェアを追加することなく、最小限のメール情報を使うだけで、巧妙な迷惑メールを排除できている。この方法で、最も気がかりなのは、処理によるサーバ負荷の増加である。日常的にメールサーバの負荷状況を監視していると、実行待ちジョブの平均数が一時的に3近くになることがある。このときプロセスを確認すると、外部から送られてきた電子メールを大量に処理している。しかし、処理自体は単純なテキスト検索で、現行サーバのCPU・メモリ等の資源で十分に対応できる。とはいえ、個別電子メールの内部情報を使うので、body_checksだけでも廃止できる状況にしたいと考えている。

最後に、過剰制限について検討する。2012年4月から2013年3月の一年間(平成24年度)に、13件の過剰制限が発覚した。発覚した場合は、原因を調査し設定を修正するとともに、同様の過剰制限が起きていないかどうかmaillogをさかのぼって確認している。少なくとも上記の期間において、発覚した以外の過剰制限は見つかっておらず、精度良く対処できていると考えている。

年間100万通に達する受信メールに対しごくわずかな件数であるとはいえ、電子メールの重要性から過剰制限は完全になくすのが理想である。過剰制限の原因は、逆引きできないクライアントから、またはCIDR(Classless Inter-Domain Routing)指定した連続アドレスに含まれるクライアントからのアクセス

である。前者は外部の問題で、先に述べたようにこの拒否設定は外せないで、正当な FQDN を持つメールサーバを使って欲しいというしかない。後者は内部の問題で、CIDR による効率性を追求しながら、登録時に範囲をていねいに確認し過剰にならないよう心がけている。

過剰制限かどうか、何が原因かの解析は、maillog の検索で簡単に行える。さらに設定変更は、単一のテキスト形式設定ファイルを編集するだけである。過剰制限がわかれば、IP アドレスとして許可設定を行い、FQDN の有無にかかわらず、または CIDR 指定範囲に入るかどうかにかかわらず、受け取れるようにしてある。なお、ログ情報から、過剰制限を自動的に検出できないか検討しているものの、一般化できる有効な条件を見いだすに至っておらず、まだ適切な方法を実装できていない。

5. あとがき

本報告では、津山高専が 10 年近く運用している独自の迷惑メール対策について、前回報告した以降の状況を中心に設定と推移を述べた。特別なソフトウェアやハードウェアを必要とせず、制限の設定や保守が容易で、メールサーバの負担を軽くし、利用者の追加設定を必要としない制限方法をめざして、Postfix の機能だけを使って実装している。さらに、津山高専に届いた迷惑メールの情報を使い、徐々に制限を強めることで、迷惑メールがほとんど届かない環境を実現できた。

しかし、過剰制限をなくしたり、設定リストを保守するには、引き続きログ情報を監視したり、インターネットに関する情報収集が欠かせない。とりわ

け、送信ドメイン認証⁸⁾を始めとした新しい技術が一般化すれば、速やかに対応しなければならない。さらに、IPv6 が普及すると現在の IPv4 ベールの設定が使えなくなる。このとき、どのような技術で迷惑メールを届かないようにするのか、電子メールにまつわる課題を継続して検討していく必要がある。

謝 辞

常日頃からネットワークサーバの運用・管理を始としたシステム管理業務に協力していただいている総合情報センター、特にシステム管理者の皆さまに感謝いたします。また、一部の教職員には過剰制限でご迷惑をおかけしており、この場を借りてお詫びいたします。

参 考 文 献

- 1) The Open Source Initiative : <http://opensource.org/>.
- 2) 岡田正：安全で教育的な情報通信基盤の構築，論文集「高専教育」第 24 号，pp.259-264 (2001)。
- 3) 平田克己，岡田正：学内情報ネットワークの独自運用と波及効果，平成 20 年度高専教育講演論文集，pp.245-246 (2008)。
- 4) 平田克己，岡田正：津山高専における迷惑メールの独自対策とその効果，津山工業高等専門学校紀要 第 49 号，pp.61-66 (2007)。
- 5) <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5321.txt>.
- 6) The Postfix Home Page : <http://www.postfix.org/>.
- 7) Postfix manual - header_checks(5) : http://www.postfix.org/header_checks.5.html.
- 8) 迷惑メール相談センター | JADAC : <http://www.dekyo.or.jp/soudan/>.

大規模イベントにおける準リアルタイム渋滞情報提供システムの構築と運用

寺元 貴幸* 福谷 遼祐**

Construction and Operation of Near-real-time Congestion Information Providing System in Large-scale Events

Takayuki TERAMOTO* and Ryosuke FUKUTANI**

In recent years, it is very major method that use internet for collecting information. Especially, social network service (SNS) is growing rapidly. For example, there are Twitter, Facebook, LINE, mixi, and so on. However, SNS is very difficult to understand for Information illiterate. In this challenge, in order to provide real-time information of "B-1 Grand prix in Tsuyama", our system was built. This system provides near-real-time information. Information is based on information that was sent by staff. Moreover, user interface is simple web-page and it is easy to use. In order to get latest information, the web browser is only required. In the day of event, our system acted role without incident. It seems without problem that operating our system, but exists some issues about construction. In this report, our system, operation, and consideration were recorded.

Key words: Web, Real-time, Provide-Information, Smart-phone

1. 概 要

近年, Web は情報提供の手段として定着してきており, そのなかでも Twitter や Facebook, LINE などに代表される SNS の普及によるユーザ同士の情報伝達も一般的になってきた. しかし, これらのサービスを活用するためには, 事前にサービスの利用登録を行うことが基本的に必要となり, 正確でしかも常に情報が更新されるタイプの情報提供は期待することができない. さらに, 短期間のイベントでは, 常設の駐車場のよう渋滞情報を自動計測するようなシステムを導入することは困難である. そこで今回, 大規模なイベントにおいても, ほぼリアルタイムに駐車場の渋滞情報や店舗の混み具合を知る事ができ, しかもレンタルサーバとスマートフォンを用意するだけで, 非常に安価に運用できるシステムを開発したので報告する.

今回本システムを 2013 年 5 月 25・26 日に実施された「近畿・中国・四国 B-1 グランプリ in 津山」にお

いて運用することを試みた. B-1 グランプリにおいては, 以前から Web ページによる情報の提供自体は行われていたが, スタッフ同士がメールを用いて情報交換を行い, これに従ってスタティックな Web ページを逐次書き換えて表示する情報の更新を行っていた. しかし, この方法では手間がかかり, リアルタイム性も非常に低くなりがちであった. そこで今回本システムを適用することにより「スタッフが現在の情報を送信すると Web ページを最新の情報に更新」というサイクルを自動化するためのシステムによりリアルタイム性の高い情報提供を行うことができたのでその様子を報告したい.

2. システム構成

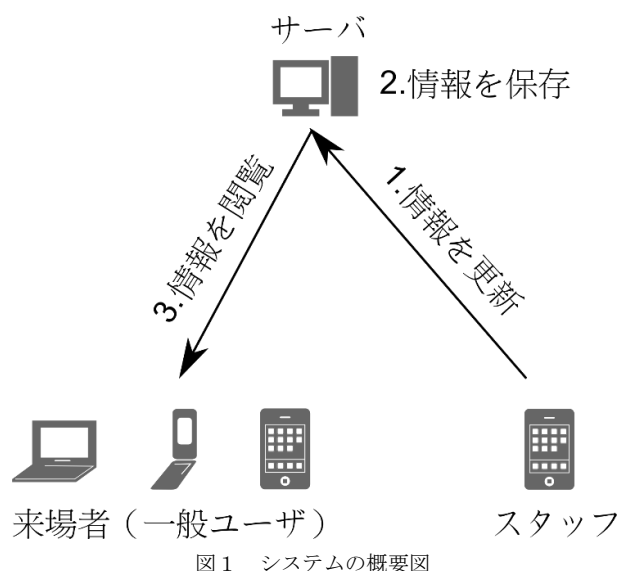
2. 1. システム全体と運用方法

本システムでは, Web サーバが情報を直接受け取り, 即時に Web ページを書き換えるためにスクリプト (PHP) を用いた動的な Web ページによる情報の提供を行う. 以下の図 1 に概要図を示す.

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*情報工学科

**電子・情報システム工学専攻科



また、実際の運用の手順は以下のとおりである。
 (1) スタッフが、スタッフ専用ページにスマートフォンなどを用いてアクセスし、任意の情報を最新のものに更新する。実際のスマートフォンでの操作画面を以下の図2に示す。

図2 情報更新画面

(2) Web サーバは、情報を最新のものに更新し、以前の状況をバックアップする。

(3) 一般の利用者は、来場者用のアドレスにアクセスし、最新の情報を取得する。実際の画面以下の図3に示す。

図3 情報閲覧画面

今回、開発を行ったシステムは基本的に「情報の更新と取得を行うライブラリ」、「スタッフが情報を更新するためのページ」、「一般の来場者が情報を閲覧するためのページ」に分けることができる。また、ライブラリを含むシステム群は今回の B-1 グランプリに限らず、ほかの大規模イベントにも対応できるように、提供すべき情報の数が増加した場合でも容易に拡張が可能となっている。以下の表1に今回のイベントで提供した情報を示す。

表1 提供した情報

種類	個数
駐車場の混雑状況	3
シャトルバスの待ち時間	2
チケット売り場の待ち時間	4
出展団体の待ち時間	22

以上のように、合計 31 箇所の情報についてリアルタイム性の高い情報の公開サービスを提供した。

2. 2. 情報の更新と取得を行うライブラリ

Web サーバ上の情報を更新したり、最新の情報を取得したりするために各 Web ページ上で使用される共通の関数群がまとめられた PHP ファイルである。Web サーバは、各種の情報を保持しておく必要があり、TXT ファイルで現在の情報を保存することとした。このファイルには、フォームで情報を更新する際の一意の ID と最新の情報、更新時刻などが含まれている。情報公開用サイト内で使用する、逐次更新されるべ

き情報は全てこのファイル内で一括管理されている。また、性能向上のため APC (Alternative PHP Cache) と呼ばれる PHP を高速化するモジュールを有効化した。これに含まれる、`apc_store` という関数によって TXT ファイルの内容を、セッションをまたいでメモリ上に保持することが可能となった。このため、一般ユーザからのアクセス時には TXT ファイルを読み出す必要がなくなり、TXT ファイルの読み書きは情報の更新時のみでよかった。

2. 3. スタッフが情報を更新するページ

スタッフが最新の情報を任意のタイミングで Web ページに反映させるために、情報を Web サーバに送信するためのページである。一般のユーザが利用すべきページではないため、HTTP リクエストの GET パラメータを用いて簡易的なパスワードを設けている。このため、仮にスタッフ専用の URL を推測できたとしても、GET パラメータにセットすべき値が漏洩しない限り、スタッフ専用のページにアクセスすることはできない。また、GET パラメータの値を正しく設定したとしても、セッションごとにパスワードによる認証が必要である。このパスワードは、実際の運用時はスタッフの手間を軽減する目的で無効化されていた。

また、今回のシステムでは、上記のようにスタッフの手間を軽減することを主な目的のひとつとしてある。このため大勢存在するスタッフは自身の担当すべき情報以外の情報も任意に更新することが出来る。これはセキュリティ上好ましくなく、本来ならスタッフは個別に ID とパスワードを用いて認証を行うべきであるが、今回のケースでは実装の手間と利用の手間がどちらも増加することになるため、特に個別の認証は実装されなかった。

2. 4. 一般の来場者が情報を閲覧するページ

一般の来場者が使用する情報公開用ページである。先に述べたライブラリにより、ページ上の情報はアクセス時に最新のものが適用される。単純に PHP の `echo` コマンドを使用しているため、ユーザから見るとスタティックなページと変わりはない。

2. 5. その他

(1) エラーページのカスタマイズ

Apache 標準のエラーページではなく、利用者がわかりやすいデザインのページが表示されるように変更した。

(2) PC, スマートフォン, フィーチャーフォンそれぞれに最適化されたページの表示

PHP のユーザーエージェント判別機能により、それぞれに適したページが表示されるようになっている。

3. 実際の運用

本システムを運用するため、専用レンタルサーバを Web サーバとして稼働させた。ここで、一般的なレンタルサーバでは APC が使用できなくなり、性能が低下することに注意すべきである。以下の表 2 に APC が有効化された場合と無効された場合での性能を示す。この時の性能とは、PHP によって動的に生成されるページを大量にリクエスト(合計 10000 リクエスト, 同時接続数 20)を行った場合の秒間アクセス数とする。この検証には Web サーバなどの負荷テストツールの一つである `ab` を用い、さくらインターネットの VPS1G プランでの性能を比較した。

表 2 性能の比較

	秒間アクセス数 (エラー含む)	秒間アクセス数 (エラー除く)
APC なし	47 毎秒	6 毎秒
APC あり	54 毎秒	54 毎秒

以上のように、APC によって大幅な高速化を行うことができたことがわかる。また、負荷テストに使用したネットワーク帯域の使用率がほぼ 100%に達していたため、実使用環境ではさらに性能が伸びる可能性がある。以上のテストは VPS を用いたため、使用できる帯域が不安定であるが、実際に運用に使用した専用サーバ上では、仮に 100Mbps の転送速度を前提にした場合、約 2800 毎秒ものリクエストを処理できる性能が発揮できる見込みとなった。また、実際に使用したサーバの仕様を以下の表 3 に示す。

表 3 使用したサーバ

サービス名	さくらインターネット さくらのマネージドサーバ Xeon プラン
使用料金	月額¥14800 初期費用¥30000
root 権限	なし
マシンスペック	CPU:Xeon, RAM:8GB, HDD:600GB
ネットワーク	100Mbps 共用

イベント当日の運用については、特に大きな混乱もなく行われた。以下の図 2 にイベント時のサイトへのアクセス数の推移を示す。今回のイベントでは、日中において秒間 1~2 程度のアクセスしかなかったため、サーバに対しての負荷はほとんどかかっていなかった(アイドル時と同程度)。このため、使用したサーバの性能は十分であったと思われる。

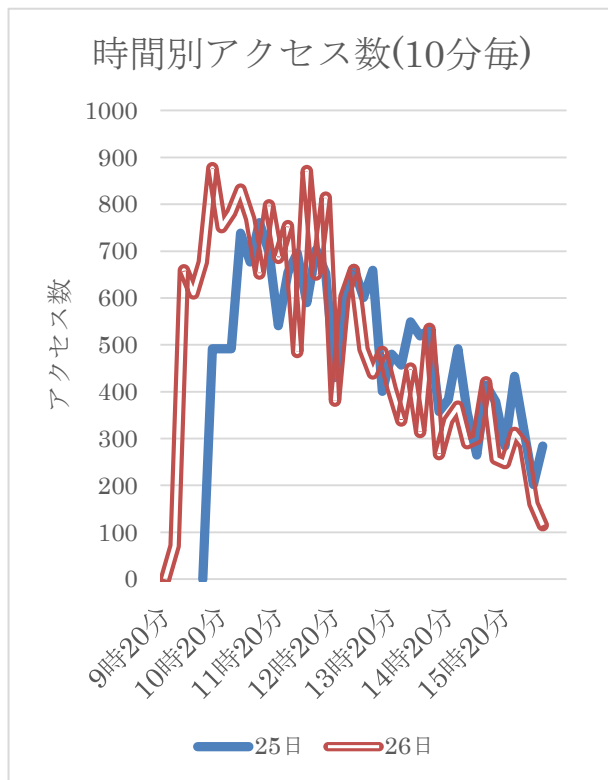


図2 時間別アクセス数

6. ま と め

今回の例では、もともと人が行っていた作業を Web サーバ上で自動化することが主な目的であった。PHP によるサーバサイドの処理によって自動化は実現できたものの、以下のような課題も明らかとなった。

まず、セキュリティ上の脆弱性に対しての問題があげられる。情報を更新するスタッフに対して認証を行わないため、だれが何を更新したのかわからない。パスワードの入力などの煩雑さも、Web ブラウザによるパスワードの保存機能などを用いることで低減できると考えられる。

次に APC 実行可能環境に依存しなければならない問題がある。今回のシステムでは、大量のアクセスに備えて APC を導入したが、果たして十分に効果があったかどうか疑問である。それよりも APC を有効化できる環境が限られる不便さのほうが問題となりかねない。アクセス数の増加に対しては、それ以前

にネットワーク帯域の確保、サイトの効率的な設計などのほうが重視されるべきであった。しかしながら、特に大規模なイベントなどに対応するためにはやはり APC などの PHP アクセラレータが必要になってくる場合がある。この場合は、自分でサーバを構築するか、または一般的なレンタルサーバではなく VPS や今回利用したような専用サーバ(ネットワーク帯域が保障されていればなお望ましい)を使用して運用を行うべきである。もちろん、APC なしでも問題なさそうであれば無理に高価な環境を整える必要はないと思われる。

最後に、更新情報の管理の方法についての問題がある。今回のシステムでは、サイト上で一意の ID を持つ情報を単一の TXT ファイルに保存する手法をとった。しかしこれでは情報そのものの管理が煩雑になるため、各情報は階層構造によって管理されるほうが効率的であると考えられる。

今回のシステムにおいて、最も重要であるのは、情報の更新と取得が可能な PHP のライブラリを作成したことである。しかしこれは汎用性が低いわけではないが上記のような問題を抱えており、今すぐにほかのイベントなどで使用できるものではない。よって今後、汎用性を重視してシステムの設計・実装を変更していくべきである。

参 考 文 献

- 1) B-1 グランプリ公式サイト, <http://b-1tsuyama.com>
- 2) 清野克行：作りながら基礎から学ぶ PHP による Web アプリケーション入門, (2011)
- 3) 掌田津耶乃：HTML5 Web アプリケーションプログラミング入門, (2012)
- 4) 園田誠：HTML と CSS で基礎から学ぶ JavaScript, (2011)
- 5) PHP マニュアル, <http://php.net/manual>
- 6) さくらインターネット, <http://www.sakura.ad.jp>
- 7) Web クリエイターネット, <http://www.webcreator-net.com>
- 8) PHP リファレンス, <http://www.php-ref.com>
- 9) sakura vps manual, <http://www.さくらvps.com>
- 10) PHP の拡張モジュール APC をインストール
<http://d.hatena.ne.jp/replication/20110327/130121832>

ジェミニ2システムと ASCOM プラットフォーム

佐々井 祐二*

Gemini 2 System and ASCOM Platform

Yuji SASAI

In March 2012, we constructed an astronomical observatory on the rooftop of our school building. This observatory is equipped with an equatorial mount and a 35cm diameter ACF (Advanced Coma-Free) telescope. The Gemini 2 system of this equatorial mount can be controlled by the Web browser of a PC on a network. ASCOM (AStronomy Common Object Model) is an open integrated platform that provides a standard interface for astronomy equipment including mounts, focusers, and imaging devices in a Microsoft Windows environment. We investigated the control of our astronomical observatory using the ASCOM platform.

Key Words : Astronomical Observatory, Gemini 2 System, ASCOM

1. 緒 言

津山工業高等専門学校応用物理研究室では 2009 年 3 月に、口径 35cm シュミットカセグレン式望遠鏡と口径 4cm H α 太陽望遠鏡を装備するスライドルーフ天文台（東天体観測室）を構築した。また、2012 年 3 月に、口径 35cm ACF 鏡筒を大型赤道儀に同架させた西天体観測室（図 1）を本校の校舎屋上に構築し¹⁾、本校 3 年の自発的学習科目チャレンジゼミナールあるいは 5 年卒業研究の学生と共に、天体の測光・分光観測など様々な天文教育研究活動を行っている。世界天文年 2009 から小中学生対象の公開講座「天体観測会—君も未来のガリレオだ！—」^{2), 3)}を年 4, 5 回行っており、好評である。さらに、近年は津山市公民館から依頼された「天体観測教室」も実施している。

西天体観測室赤道儀の制御系であるジェミニ 2 システムについて、ハンドコントローラを利用する方法は、天体観測会などでその機動性を発揮する。もちろん、ジェミニ 2 は通常の制御系が使用する Windows PC 上のプラネタリウムソフトに対応しているが、ハンドコントローラよりも詳細な制御を Web ブラウザから行うこともできる。また、最近パルスカウントによって制御できる天文機器ドライバの統合パッケージとして、Windows 用にオープンソースの ASCOM プラットフォームがあり、その活用の広がりが期待されている。しか

し、ASCOM について、そのホームページに英文の説明があるだけで、余りまとまった文献がない。そこで、具体的な説明を試みる。

本稿では、西天体観測室の赤道儀の制御系であるジェミニ 2 システムについて、制御 PC からの Web アクセスによる利用方法、オープンソースの ASCOM プラットフォームについて調査したので、報告する。

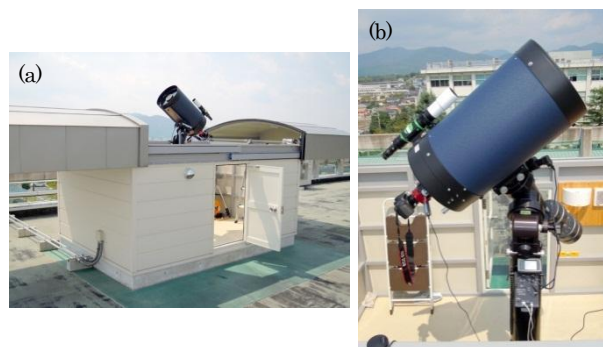


図 1 西天体観測室 ((a) 外観 (b) 口径 35cm 鏡筒と赤道儀, メインコントロールパネル, ハンドコントローラ

2. ジェミニ 2 システム

鏡筒は米国 Meade 社の口径 35cm ACF の LX200ACF-35, 赤道儀は米国 Losmandy 社の HGM TITAN である。TITAN 赤道儀はピリオディックエラー ± 5 秒角以内、最大搭載重量約 45kg（撮影用鏡筒搭載時）の性能を有している。

赤道儀コントローラとしては、同社のジェミニ 2 (Gemini 2) システム^{4)~6)}（図 2）を使用する。ジ

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*専門学科共通科目 sasai@tsuyama-ct.ac.jp

ジェミニ 2 は初めてタッチパネルを採用した赤道儀コントローラであり、操作性に優れる。また、ジェミニ 2 は旧モデルのジェミニ Level 4 の CPU を強力にし、メモリを増やし、タッチパネル等よりユーザインタフェースを向上させたモデルである。



図 2 ジェミニ 2 システム (a) メインコントロールパネル
(b) ハンドコントローラのタッチパネル

ジェミニ 2 の主な仕様⁴⁾は以下の通りである。

- ・内蔵データベースは 41,000 天体 (Messier=110 個, NGC=7840 個, IC=5386 個, Sh2=313 個, Bright Stars=79 個, SAO=17635 個) である
- ・導入精度は全天で 3 分角未満, 領域限定で 1 分角以内である
- ・LX-200 互換プロトコル
- ・ASCOM プラットフォーム対応

また、大きな特徴^{4)~6)}として、次のモデリングと極軸修正機能がある。

(1) モデル

モデルはデータベース座標と望遠鏡が指向する天球座標との正確なシンクロナイズを実現するためのパラメータである。複数の基準星を導入することによりモデルを構築する。Meade LX200 だと 2 スターアライメントであるが、ジェミニ 2 ではドイツ式赤道儀のコーンエラーを考慮し、子午線を挟んだ東半球と西半球で別々にモデルを構築する。基準星 1 個までで赤経・赤緯軸の座標エラーの補正, 5 個までで極軸エラーの補正, 9 個までで赤経赤緯両軸の非垂直パラメータを加えて補正, 10 個以上で鏡筒やカウンターウェイトのたわみまで補正する。モデル情報は保存・読み出しが可能のため、自動導入とフリーストップが両立する。

(2) 極軸修正機能 PAC (Polar Axis Correct)

Titan 赤道儀の場合、極軸に付かない極軸望遠鏡の使用は前提としていない。極軸修正機能 PAC では、天の北極から離れた天の赤道に近く子午線付近の基準星を使う。正確なモデリング後、PAC を

実行すると、ジェミニ 2 は正確な極軸を前提とした“対象のあるべき位置”に鏡筒を移動させる。赤道儀の極軸調整 (方位・仰角) 機構で基準星を視野中央に入れ直すと、合致精度 2 分以内に極軸が修正可能である。ただし実際は、西天体観測室の赤道儀について、基準星がずれていく方向を考慮し、手動で極軸を追い込んだ。



図 3 ジェミニ 2 Web ページ画面

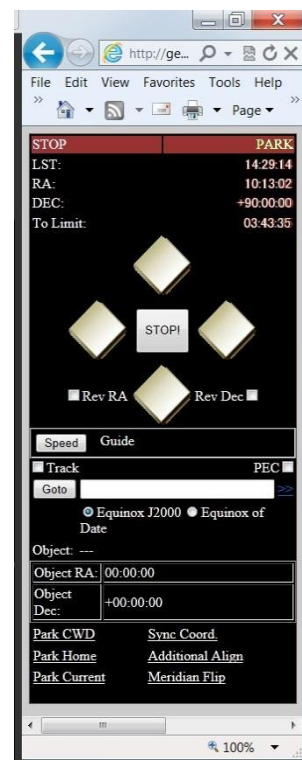


図 4 メニュー「ハンドコントローラ」画面

1 年程度使用して、不具合だと感じる点について、精度不足により、内臓時計が 1 日当たり 5 秒程度進むので、しばらく使わないと天体が赤緯方向に移動していることが挙げられる。GPS を利用する必要がある。また、表示が稀にドイツ語に文字化けすることがある。これはファームウェアバージョンアップで改善すると期待している。

3. ブラウザによる操作

ジェミニ2システムには、Ethernetポートがあり、設定したIPアドレスに対し、ネットワーク上のPCブラウザからアクセスすると図3のようなWebページが表示される。ジェミニ2の全てのメニューにブラウザ上からコントロールできる。

内蔵リチウム電池が放電してしまうと、ジェミニ2は電源ケーブルが接続された状態であっても、設定情報が消え、不安定な動作をする。この内蔵リチウム電池の状況についても、Web上から確認でき、ハンドコントローラより充実したメニューを活用できる。

また、「Observation」－「Hand Control」を選択すると、図4のようにハンドコントローラと同様のウィンドウが表示される。

4. ASCOM

4.1 ASCOMとは

ASCOM (AStronomy Common Object Model) ⁷⁾とは、ベンダーに依存しないプラグアンドプレイ制御を指向する天文ソフト開発者や天文機器製造業者のグループが主導している標準規格である。また、ASCOMはWindowsコンピュータに接続する多くの天文デバイスでサポートされている多対多および言語非依存のアーキテクチャである。

ASCOMに準拠する事で、機器の違いによる実装上の問題をある程度解消することができる。そのために、WindowsにASCOM Ver.6をインストールし、内蔵デバイスドライバの不足があれば、さらにデバイスドライバをインストールする。

ASCOMと伝統的な天文機器制御アーキテクチャの違いについて図5に示す。

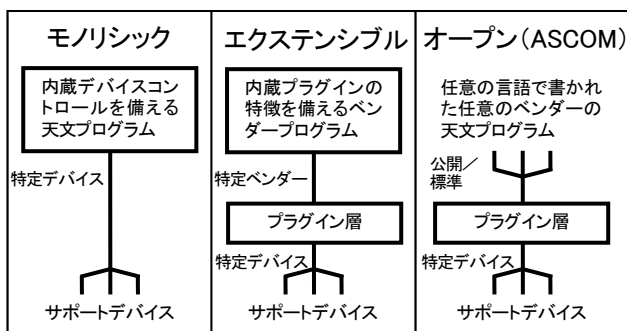


図5 天文機器制御アーキテクチャ

次に、各制御アーキテクチャの特徴を列挙する。

モノリシック

- ・各々のプログラムはデバイスコントロールのためにそれ自身のコードを持っていなければならない

ない。

- ・ベンダーはデバイスコントロールコード全てを書かなければならない。
- ・新デバイスはプログラムの新リリースを要求する。
- ・デバイスコントロールにおけるバグはプログラムの新リリースを要求する。

エクステンシブル

- ・ベンダープログラムの幾つかはデバイスコントロールコードを共有できる。
- ・誰でもデバイスコントロールのプラグインを書くことができる。
- ・新デバイスは新プラグインのみ要求する。
- ・デバイスコントロールにおけるバグは新プラグインのみ要求する。

オープン(ASCOM)

- ・ベンダー独立：どのプログラムもドライバを使用することができる。
- ・誰でもドライバを書いたり、サポートすることができる。
- ・新デバイスはドライバのみ要求する。
- ・デバイスコントロールにおけるバグは新ドライバのみ要求する。

4.2 ASCOMインストール

西天体観測室のWindows 7の制御PCにASCOMをセットアップしたので、ここで、その紹介をする。今後の更新でファイル名等は変更されるが、現時点での状況で説明する。

(1) ASCOM プラットフォームインストール

ASCOM 標準規格のホームページより、最新版「ASCOMPlatform6SP2.exe」をダウンロードの上、インストールする。

(2) 赤道儀コントローラーインストール

ASCOM 標準規格、あるいは Gemini 2 Mount Controller のホームページから圧縮ファイル「GeminiTelescopeInstaller_1.0.51.0.zip」をダウンロードし、解凍の上、インストールする。

(3) フォーカサードライバインストール

西天体観測室では、MoonLite Telescope Accessories の MoonLite CS Focuser を導入している。カセグレン式鏡筒では、粗動ピントノブを回転させ、鏡筒の底にある反射レンズセルを前後に動かすことによりピント調整する。ミラーロックノブにより、レンズセルを固定し、鏡筒リアーにフォーカサーを組み込み、光路長を変化させ、フォーカ

スの微調整を行う。リモコンボックスのボタンを押すことの他に、PC上でリモート制御させることもできるので、そのドライバをインストールする。

nFOCUS のホームページ⁸⁾よりインストーラー「GCUSB_nFOCUS_Setupv5v6a.exe」をダウンロードし、実行する。次に同じページにある INF ファイルの圧縮ファイル「inf_gc_usb_nfocust1.zip」をダウンロードの上、解凍する。次に、フォルダ内の 2 つのファイルを

C:\Program Files (x86)\Common Files\ASCOM
¥Focuser

にコピーする。ただし、CS Focuser の USB ケーブルを制御 PC に挿すだけでは、ドライバが認識されておらず、デバイスマネージャの「ドライバの更新」から上記フォルダを指定し、ドライバをインストールする。その後、CS Focuser は COM ポートに接続されているように認識される。

(4) カメラドライバインストール

ASCOM 用のドライバを提供するメーカー等もあるが、デジタル一眼レフカメラ (DSLR) と冷却 CCD カメラの最大メーカーは特に ASCOM 用のドライバは提供していない。そのため、カメラコントロール用のソフトウェアは商用のことが多い。天文用の一眼レフカメラの場合、キャノンが業界標準となっており、カメラ通信ソフト「Canon EOS Utility」をインストールすれば、ASCOS 上の撮影ソフトを利用できる。もっとも、性能も高いので「EOS Utility」をそのまま利用すればよいのかも知れない。また、DSLR 用のフリー撮影ソフトはかつて存在したが、Android 用が目につく程度である。今後、提供するユーザが現れる可能性もある。

他に、ドームコントローラ、フィルターホイール、視野回転装置等については、天文専用であるので、ASCOS に対応している装置が多い。必要であればインストールする。

4. 3 ASCOM 利用例

デスクトップ上の「ASCOS Diagnostics」アイコンをダブルクリックして、各種デバイスの設定をしても構わない。ここでは、数種のデバイスを立ち上げ、月面を撮影する手順を紹介する。

(1) 赤道儀 (ジェミニ 2)

赤道儀のジェミニ 2 システムの電源を投入後、デスクトップ上の「Gemini Telescope」アイコンをダブルクリックして表示される「Gemini」ウィンドウ (図 6) 下部の「Connect」ボタンをクリックし、ジェミニ 2 との通信を開始する。

「Setup」ボタンをクリックし、プルダウンメニュー



図 6 ジェミニ 2 ASCOM ドライバ画面

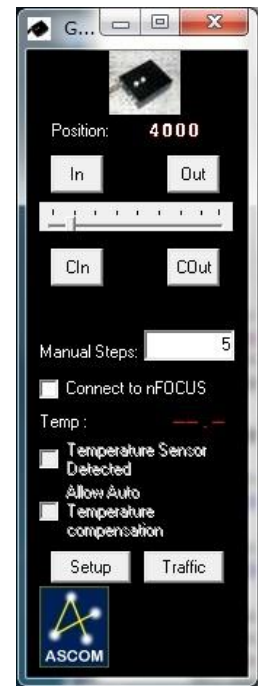


図 7 nFORCUS ASCOM ドライバ画面

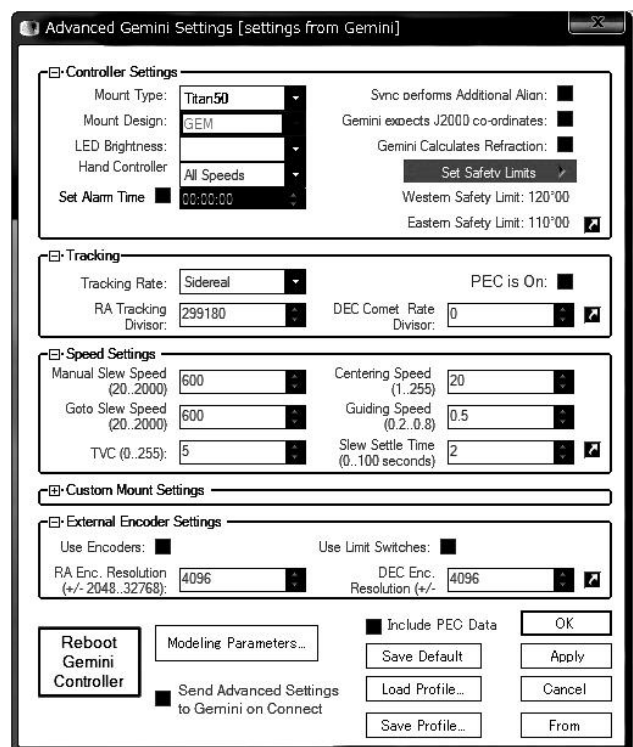


図 8 Advanced Gemini Setting

ユーの中から「Advanced Gemini Settings ...」を選択すると、図 8 のように、現在のジェミニ 2 システムの設定が読み出されているのが分かる。

「Func」ボタンをクリックし、「Object and Coordinates ...」を選択すると「Object RA and DEC Coordinates」が表示され、右の「Catalogs ...」ボタンをクリックすると図 9 が表示される。

「Bright Star List」から「Vega a Lyr」を選択し、

右にある「Go To」ボタンをクリックすると、こと座ベガに向けて鏡筒が移動する。

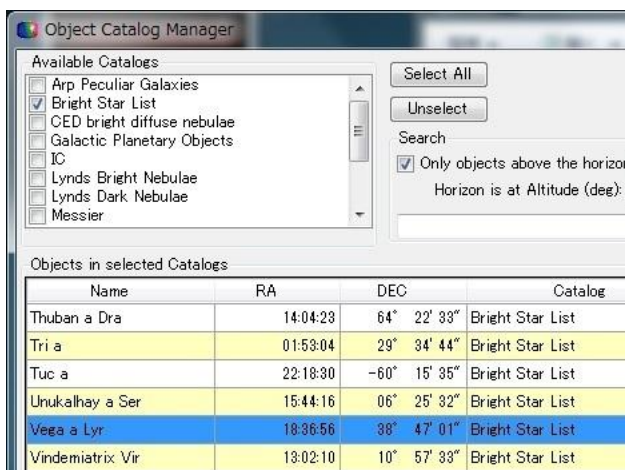


図 9 Object Catalog Manager 画面の一部

(2) フォーカサー(nFOCUS)

デスクトップ上の「GCUSB_nFOCUS」アイコンをダブルクリックすると、「GCUSB_nFOCUS」ウィンドウが表示される(図7)。ここで「Connect to nFOCUS」にチェックを入れると通信が始まる。ライブビュー画面で確認しながら、「In」あるいは「Out」ボタンにより、フォーカスを調整する。

(3) カメラ(Canon 60D)

デスクトップ上の「EOS Utility」アイコンをダブルクリックして、「EOS Utility」を起動させ、図10(a)のコントロール画面が表示される。ここで「ライブビュー」を選択するとフォーカス合わせが簡単である。「EOS Utility」でISO、シャッタースピード等を調整して、撮影ボタンをクリックすると図10(b)のように撮影画像の月のプレビュー画面が表示される。

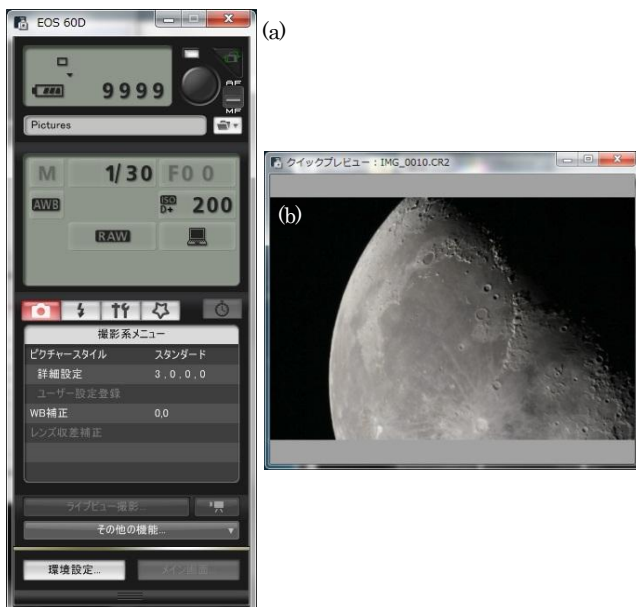


図 10 EOS Utility 画面 ((a) コントローラ, (b) クイックビュー)

代表的な冷却 CCD カメラである SBIG 社の製品では、制御ソフトウェアの CCDOPS が利用できる。

また、ASCOM 対応の画像解析・天文台操作統合ソフト MaxIM DL や AstroArt などを利用すると、一眼レフカメラも冷却 CCD カメラも、ベンダー依存性と機種依存性を排除した、同一の操作手順が実現できる。

5. 結 言

本稿では、本校の西天体観測室に設置している赤道儀コントローラ ジェミニ2について、ブラウザによる操作などの調査を報告した。また、望遠鏡の架台、フォーカサー及び撮像機器のコントロールを行うためのオープンな標準仕様で、さまざまな天文観測機器のドライバが提供されている ASCOM について調査した。ASCOM は Windows 上のパッケージであり、今後、関連するメーカー、ベンダー、ユーザが対応を加速させることが予想される。天体観測室の安全に十分配慮する必要があるが、ASCOM と Windows のリモートデスクトップの組み合わせにより、研究室から天体観測室の統合的リモート制御も実現可能となる。

同様のプラットフォームとして、Linux もカバーするものとして、INDI (an abbreviation of Instrument Neutral Distributed Interface) があり、XML に対応している。今後、ASCOM と INDI との比較も行いたい。

なお、本取組と調査は科学研究費補助金(23501047)と2012年度本校教育研究活動支援経費・経営戦略経費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) 佐々井祐二：新天体観測室の構築とすばる望遠鏡の利用法，津山工業高等専門学校紀要，第54号（2013）71-76.
- 2) 佐々井祐二：津山高専「天体観測会－君も未来のガリレオだ！－」の紹介，第24回天文教育研究会集録(2010)166-169.
- 3) 佐々井祐二，最上勲：公開講座「天体観測会－君も未来のガリレオだ！－」－教員と学生が取り組む小中学生向け天文啓蒙活動について－，論文集「高専教育」，第34号(2011)601-606.
- 4) (株)ジズコ URL：<http://www.zizco.jp/>.
- 5) (株)ジズコ：ジェミニ2基本操作マニュアル(2012)1-20.
- 6) ジェミニ2 URL：<http://www.gemini-2.com/>.
- 7) ASCOM URL：<http://ascom-standards.org/>.
- 8) nFOCUS URL：http://www.astrogene1000.com/products/gcusb_nfocus/gcusb_nfocus.htm.

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)

植 月 唯 夫	大 田 肇
大 平 栄 二	小 西 大二郎
佐々井 祐 二	山 本 吉 範

津 山 工 業 高 等 専 門 学 校 紀 要

第 55 号

平成26年 2 月28日 発 行

発行者／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