

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。

ま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る。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氣は流れなかった。

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をある種の対称性、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)

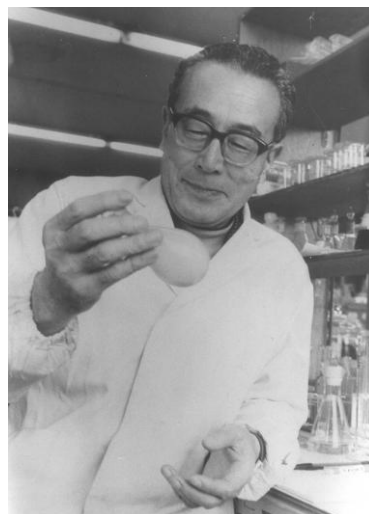


写真 2 新宮春男博士 (1913-1988)

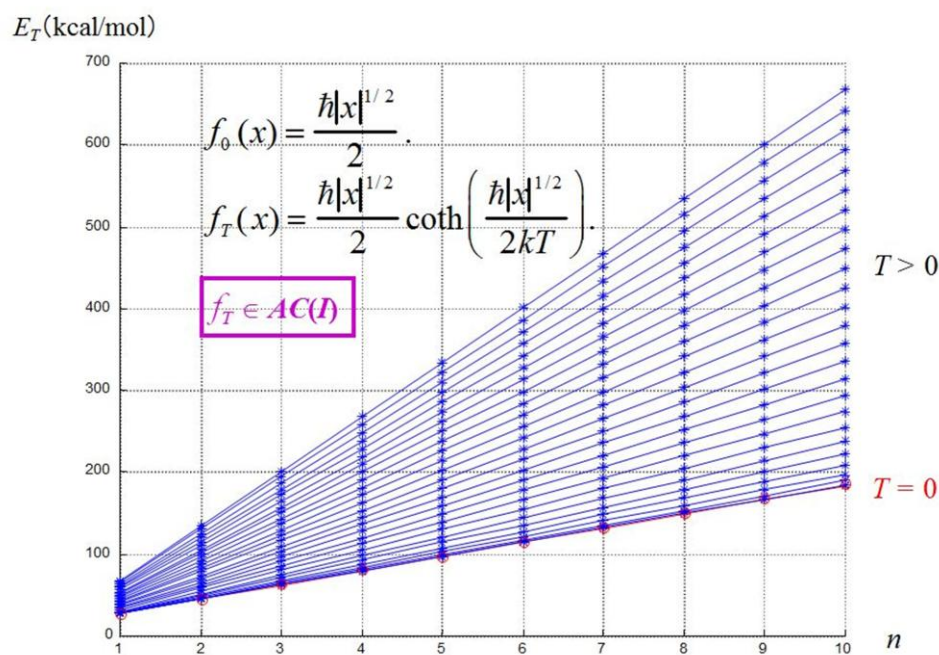


図1 直鎖パラフィン炭化水素 C_nH_{2n+2} の
内部エネルギー E_T ($T \rightarrow 0$ °K) E_0 : 零点振動エネルギー

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.