

日本大学理工学部

一般教育教室彙報

第 106 号

目 次

— 論 文 —

受信料制度に関する法務大臣意見の批判的検討 天野 聖悦 1

結晶成長に関する大学生の誤概念～材料科学実験から明らかになった課題～

..... 岡田 悟志, 大久保 尚紀, 伴 周一 11

— 研究ノート —

最近のムーンシャインの動向について 江成 隆之 17

— 訂正とお詫び — 27

2019年4月

受信料制度に関する法務大臣意見の批判的検討

天野 聖悦

(平成31年1月17日受理)

Critical View against Defending Opinion on NHK Broadcast Receiving Fee System Spoken by Japanese Minister of Justice

By Seietsu AMANO

(Accepted January 17, 2019)

一. はじめに

2017年12月6日、最高裁判所は、受信料という負担付きでしか民放を視聴する自由はないことを示唆するかのような受信料制度合憲判決を下した。この際、判決次第では、社会的に大きな影響がありえたから、法務大臣は、「国の利害に関係のある訴訟についての法務大臣の権限等に関する法律」(4条)に基づいて、裁判所の許可を得て、最高裁に受信料制度を合憲とする意見書を提出している。権力分立を尊重する観点から、法務大臣の意見は、訴訟においては証拠としてではなく参考として扱われるだけで、裁判所を拘束するわけではないが¹⁾、政治部門のひとつである法務大臣が主張する受信料合憲論は、今後、インターネットの世界にまで拡大しようとしている受信料制度²⁾にも大きな影響を与えるものと思われるので、本件判決とは別に、本稿において検討するものである。

なお、意見書は、筆者が情報公開法に基づく情報開示請求によって入手したもので

あり、本稿で意見書を引用する際には、そこに付された頁番号を、本稿本文中に直接に括弧書きで示す。

二. 意見書にみられる「公共放送」観

そもそも公共放送には、あまねく日本全国において放送を受信できるようにし、地震、津波、台風等の天変地異等が発生した場合や、我が国の領土や国民に対する武力や化学兵器等による内外からの攻撃があった場合に、公共放送を受信することができる受信設備を通じて、国民に、時々刻々と変化する状況に関する情報を正確かつ具体的に提供し、国民が自らの生命、身体、財産等を最大限守るために適切な行動をとることができるようにするという重大な社会的使命があり、このような公共放送は諸外国においても創設されているが³⁾、公共放送を国営化すれば国家の過剰な介入の恐れがあり、広告収入で賄えばスポンサー企業の利益を擁護しかねないから⁴⁾、重大な社会的使命を果たす公共放送という重要なイ

ンフラストラクチャーにアクセスできるという利益を享受する者に公共放送の運営資金としての受信料を負担させるという一種の『受益者負担』の方法をとることは、何ら不合理ではない(3-4頁)。

三. 憲法適合性の検討

(1) 基本的人権等の制約原理としての公共の福祉

すべて人は公共の福祉の範囲内で行動することが義務付けられている(憲法13条、民法1条)。この公共の福祉を逸脱した行為が規制の対象となるが、公共の福祉というだけでは、抽象的で漠然としており、それがそのまま立法化されると過度に広範かつ曖昧な概念であるから、その内容を明確にする作業が必要になる。

ここで公共の福祉とは、通説によれば、「各人の基本的人権相互間の衝突の可能性を調整するための原理」⁵⁾であり、憲法に論理必然的に内在するものであって⁶⁾、その調整が、自由国家の理念にもとづく場合は、各人に対して基本的人権を公平に保障するために必要な最小限度においてのみ国家権力による規制が許され、社会国家の理念にもとづく場合は、各種の自由権の経済的裏づけとしての社会権を実質的に保障するために必要な限度において、経済的な基本的人権に対する国家権力による介入ないし干渉が是認されるというものである⁷⁾。

この通説の趣旨をうけて、具体的な違憲審査基準として主張されているのが、アメリカの判例理論に基づいて体系化された「二重の基準」論である。学界で広く支持されているこの説は「人権カタログのな

かで、精神的自由は立憲民主政の政治過程にとって不可欠の権利であるから、それは経済的自由に比べて優越的な地位を占めるとし、したがって、人権を規制する法律の違憲審査にあたって、経済的自由の規制立法に関して適用される『合理性』の基準は、精神的自由の規制立法については妥当せず、より厳格な基準によって審査されなければならない」としながら、「権利や自由の内容・形態、規制の目的・態様等によってさらに判定基準を細かく考えていこうとするもの」である⁸⁾。このとき「精神的自由と経済的自由の保障の程度が段階的にまったく異なる形で区別されるのではなく、両者は保障の程度をほぼ同じくする領域を含み、重なる関係にあること」もあるとする⁹⁾。判例には明確に二重の基準論を採用したものは見られないが、精神的自由に比べて経済的自由のほうが強い規制を受けることは認められている(最大判昭和50年4月30日民集29巻4号572頁)¹⁰⁾。

経済的自由のうち、職業選択の自由については、かつて裁判所は規制目的によって異なる基準を用いる規制目的二分論を採用していたが、単純に、国民の生命や健康などに対する危害を防止するためという消極目的規制の場合は厳格な合理性の基準を、国家がなんらかの政策を実現するためという積極目的規制の場合は、立法府の広い裁量を認める明白性の原則を適用する手法には批判もあり、近時の最高裁も、この二分論に消極的な姿勢を示している(最大判平成14年2月13日民集56巻2号331頁)。財産権の保障については、規制が許されても損失補償がなされる場合があることを考えると、職業選択の自由と同じ基準が妥当

するかは検討を要するが、「規制の目的、必要性、内容、その規制によって制限される財産権の種類、性質及び制限の程度等を比較考量して判断」（最大判平成14年2月13日民集56巻2号331頁）することになる。

(2) 意見書にみられる「公共の福祉」理解

意見書は、「元々、放送は、災害時に国民に正確な情報を即時に提供する手段として期待されていた」（30頁）ことを前提に、放送法が協会に対して「公共の福祉のために、あまねく日本全国において受信できるように」（同法64条）、災害対策基本法が協会を含む基幹放送事業者に「国内基幹放送等を行うに当たり、暴風、豪雨、洪水、地震、大規模な火事その他による災害が発生し、又は発生するおそれがある場合には、その発生を予防し、又はその被害を軽減するために役立つ放送をするようにしなければならない」（同法108条）と命じていることから、「協会の究極の目的である『公共の福祉』の最たるものとして、公共放送がその役割を果たすことを予定している」（30頁）として、協会の活動が公共の福祉の範囲内で行われているとする。

なるほどこのような活動は、公共の福祉に反するものではないことは明らかであるから、国家によって規制されないのは言うまでもない。しかし、公共の福祉のために活動しているからといって、その団体の運営資金を、その団体の提供するサービスにアクセスできるというだけで他者に負担させることは、法の予定するところではない。もしそれが認められるのなら、この項の冒頭で述べたとおり、すべての人は公共の福祉のために活動することが求められて

いるのだから、国家が「良い」と考えたことをしているすべての私人の運営資金を、そのサービスにアクセス可能というだけで負担させることができってしまうことになろう¹¹⁾。例えば、意見書は災害対策基本法をあげているが、同法の定める指定公共機関には「電気、ガス、輸送、通信その他の公益的事業を営む法人で、内閣総理大臣が指定するもの」があり、旧国鉄にあたる鉄道株式会社、NTT、日本郵便株式会社、各高速道路株式会社等も指定されている。しかし、かつて国の機関であった鉄道や郵便、旧国鉄や協会と同様に法律で「公共の福祉の増進」のために活動することが定められているNTTも、そのサービスを利用する可能性があるというだけで、利用しない者からも利用料等を徴収することはなく、利用した者が利用した分に応じて負担する義務が生じるにすぎない。また、自動車の運転者は、一般道路だけでなく、高速道路にアクセス可能であるにも関わらず、高速道路株式会社の運営資金を、高速道路を利用しない自動車所有者から徴収できるような制度にはなっていない。そもそもサービスは、それを不要とする者にまで強制できる性質のものではない。たとえば国家は、健全な民主主義を維持するため、国民に一定の教育水準を求めており、教育というサービスを受けることを強制してはいる（憲法26条2項）。しかしこの場合でも、サービス費用の負担を強制することはできないから、これを無償としているのである（同条）。災害時に国民の生命を守るのは、本来、国家および地方公共団体の役割であるから、地方公共団体や警察・消防は、防災無線等テレビ放送以外の方法で、無償で情報提供

をしている。国民の中には、テレビを設置していない者も、設置していても、仕事等で視聴できる状態にない者もあり、また、災害時にテレビを視聴できる保証もないから¹²⁾、災害時の情報提供のすべてを公共放送と民放のみに頼るわけにはいかないのである。このように、災害時にも、公共放送の提供する情報を受領できる確実性はないのだから、その情報にアクセスすることができる可能性をもって、受信料という「一種の負担金」を課すことには合理性がない。

(3) 各条文の検討

意見書は、公共放送の重大な社会的使命を災害時の情報提供に限定しているが、本訴訟では、被告弁護側は、受信料制度によって、災害時の情報だけでなく、一般に公開されている情報を収集することが制限されることを問題にしている。すなわち、民放だけを受信することのできる受信設備が存在しない以上、「民放のみを視聴し、公共放送を必要としない者」が、受信料の負担を合法的に回避しようとする、テレビを設置しないことになり、精神的自由たる「民放から情報を収集する自由(知る自由)」が制限されるという問題である。放送法に違反せずに民放だけを視聴する自由はないとすれば、それは国民の「一般的にアクセス可能な情報源から情報を入手する自由(情報収集の自由、知る自由)」を制限することになる。この自由は、日本国憲法に明文がなくても、様々な条文から当然に引き出すことができるものであり、それは例えば、学術的研究のために情報を収集することは、学問の自由を根拠とし、宗教の教義を知り、入信を検討するという事は信教

の自由を根拠とする基本的な人権として保障されるべきである。

以下、前述の公共の福祉の考え方をもとに、情報提供者たる協会のために、国民の情報受領者の自由を制限することができるのかを検討する。なお、以下①～⑥の見出しは、意見書「第5」のそれと同じくしている。

①契約自由の原則（憲法13条、29条）

意見書は、協会の放送の視聴を希望しない者にとっては、自らの意思に反して受信契約を締結させられることになり、一見すると、「契約自由の原則」に反するとしながら、水道、電気、ガスなどの国民生活に不可欠な公共サービスの供給に関わる契約や消費者保護、労働弱者保護のために契約が制限される例をあげ、協会の放送についても「重大な社会的使命」を理由に、憲法13条、29条に違反しないとする(35-37頁)。

しかし、「重大な社会的使命」を負っているのは、二(2)で述べた通り、協会に限られない。また、意見書は、契約自由の原則のうち、契約締結の自由(契約をしない自由)と契約内容の規制の区別、サービスの提供者と受領者との区別をしていない¹³⁾。意見書が例示した水道、電気、ガスなどの契約においても、そのサービスの提供者は、受領者よりも強い立場にあるから供給の申し込みを正当な理由なく拒絶できないなど契約の自由が制約されているが、サービスの受領者には何ら制約がない。公共放送は、国民の生命に関わる情報を持ちうるのだから、受領者よりも強い立場にあり、公共放送機関が受信機設置者からの受信契約申し込みを拒否することは禁止されるとして

も、公共放送機関がその放送からの情報を受領する意思のない者に、受信契約を強制することはできないはずである。

契約内容については、水道、電気、ガスの他、旅客運送契約などのように、あらかじめ契約内容が決定されており、そのサービスを利用する者との個別の交渉ができない「附合契約」がある。しかし、附合契約であっても、そのサービスを利用しない者には契約をしない自由が保障されている。公共放送の契約にあたっては受信規約が適用され、契約内容には交渉の余地がなく、一見、附合契約のようではあるが、それを必要としない者にも契約を強制するため、契約締結の自由がないから、附合契約でもない。

そもそも、「契約を強制する」ということは、相対立する意思の合致という契約の概念を否定するようなものである。契約とは何かを検討せずに、制約の例をあげても説得力はない。なお、この点については、1953年8月7日の衆議院電気通信委員会で、契約自由の原則に反し、場合によれば憲法にも違反しないかと問われた国務大臣も「私も一般の観念からすれば、まさに御指摘のように、若干の無理があると思います」と答弁しており、1964年の臨時放送関係法制調査会答申書も、『契約』の語を用いることは、実際の法律関係を誤解させるおそれがある」と指摘している。

②財産権（憲法29条）

意見書は、協会の放送の視聴を希望しない者にとっては自らの意思に反して望まないサービスの対価の支払を強制されることになり、その財産権を制約するものである

としながら、契約自由の原則と同様、「重大な社会的使命」を理由に、その制約は合理的であるとしている（37頁）。

ここで、テレビ受信設備を「所有」する行為は、なんら危険を伴うものではないから、銃や刀剣類などとは異なり、それを規制すべき理由はない。つまり、公共の福祉による内在的制約はない。積極目的・政策目的の観点からは、契約自由の原則と同様、受信設備設置者は、いわば弱者になるから、規制を受ける側ではない。

およそ財産権は、自由に財産を取得し、所持し、使用し、処分する権利を意味するが¹⁴⁾、受信契約によって直接に金銭的損失が発生するほか、テレビ放送を受信できる携帯電話やカーナビ、パソコンといった機器の取得さえも困難にしてしまう。テレビ受信機能のない機器を使用すればよいのだが、現実的には、それを探し出すことを含め負担が大きい。また、受信料の免除基準には達しないが経済的に困窮している者が受信機を所持することも困難にする。このような者は、放送法を遵守しようとする、災害時に、生命等を守るための情報を民放等からも取得することが著しく制限される。これは、弱者に配慮する思想をもつ現代立憲主義や社会的法治国原理に反することになる。

③幸福追求権、思想良心の自由、表現の自由（憲法13条、19条、21条1項）

(a) 公共放送を視聴したくない自由

意見書は、公共放送は、究極的には公共放送を視聴したくないと考える受信設備設置者の生命、身体、財産等を守るためのインフラストラクチャーとしても整備されて

おり、このような者の公共放送を視聴したくない自由に優る利益を守ろうとする点に本質的な意義があるとする(38頁)。

公共放送を視聴したくない者が、公共放送によって、どう生命、身体、財産等が守られるかについては説明がない。情報にアクセスしない者が、そのインフラの整備によってどのような利益を受けるのかの具体的説明がなければ説得力を欠く。

また、意見書は「視聴したくない自由」と言うが、「人は、法律の規定をまつまでもなく、日常生活において見たくないものを見ず、聞きたくないものを聞かない自由を本来有して」(最判昭和63年12月20日集民155号377頁)おり、公共放送を視聴しない自由は、任意に受信契約を締結しようとしまいと、いわゆる「とらわれの視聴者」でもない限り、侵害されることはないと考えられる。

(b) 民間放送を視聴する自由

意見書は、受信設備設置者は、受信設備を設置しさえすれば、民間放送を視聴することが自由にでき、放送法は協会の放送を受信することができる受信設備を設置した者に受信料の支払を義務付けるものにすぎず、民間放送の視聴については何ら定めるものではないから、仮に受信設備設置者が受信契約を締結しなかったとしても、民間放送を視聴することが妨げられることはないと言う(39頁)。

この意見書の見解は、一般的な感覚からも意味不明であろう。受信設備を設置することが自由であるというのであれば、その自由権の行使によって何ら法的に不利益をうけないはずである。しかし現在、公共放

送だけを受信できる設備や民放だけを受信できる設備というものが存在せず、1つの受信設備で両方の放送を受信できるのであるから、民放を視聴するために受信設備を設置すると協会の放送が同時に受信できる状態になり、受信契約締結義務が不可避的に発生し、それにより受信料支払い義務も生じてしまう。その意味で、意見書の言うような自由を合法的に行使できる状況にはなっていないというべきである。

「仮に受信設備設置者が受信契約を締結しなかったとしても、民間放送を視聴することが妨げられることはない」というのは、事実としてはそのとおりであるが、法理論としては誤りである。協会の放送を受信できるにもかかわらず契約をしないことは、放送法に違反することになるからである。結果、放送法に違反しないためには、受信機の設置をあきらめるほかない。

基本的人権たる「知る自由」は、その行為が危険を伴わない限り、時・場所・方法等を問わず制約があってはならず、自己所有の受信設備でなくともなんらかの工夫をすれば民放を視聴できるというのでは不十分である。放送による情報の提供は、国家の行為であったとしても権力的行為ではないから、それによって自由を制限することは基本的人権の必要最小限度の規制を超え、無償で公開されている民放から情報を収集する行為は、何ら危険を伴うものでもないから内在的にも制約されず、弱者と強者との関係にあるものでもないから政策目的でも規制されないはずであるが、それにもかかわらず、意見書のように、一定の「経済的な負担付き」でしか認められないというのであれば、基本的人権とは異なる種類

の自由であるか、あるいは、公共放送のための負担をしている者だけが、それに付随して取得する「民放を視聴できる自由」ということになる。後者の場合、民放は誰にでも一般に公開されている情報源ではないということにもなる。

④平等原則（憲法 14 条）

意見書は、被告弁護側の違憲論を「協会との間で受信設備設置者に契約締結義務を課すことにより、協会にのみ受信料徴収の利益を与えている点で、民間放送事業者に比べ協会を優遇し、両者を区別して取り扱っていることが不合理な差別に当たる」と主張しているものと誤解し、「そもそも受信設備設置者には、自己の権利利益と無関係に民間放送事業者と協会の区別が平等原則に反することを主張する適格がない」とする（39-40 頁）。

しかし、被告弁護側は、協会のみにも適用される点で一般性を欠く放送法によって協会のみが「あまねく日本全国において受信できるように」する等の負担を課され（放送法 15 条）、受信料制度によって、協会と関わり合いたくない国民にも負担が転嫁されていることの不合理性を主張したものであって、協会と民放の違いを不平等として主張したものではない。

ところで、意見書にあるように、主張の適格性という点に注目するのなら、放送法 64 条に基づいて、契約をしない受信設備設置者に対して、その契約締結を要求できるのは、法の執行者たる政府（総務大臣）であって、協会が受信契約未締結者に要求できる地位にはないはずである。政府がその執行を協会に委任しているとしても、こ

の規定を執行できるのは、協会に対して、受信設備の所有者が任意にその設置を告げながら、契約に応じないという特殊な場合に限られる。政府にも協会にも、強制的に各戸に立ち入って受信設備の設置の有無を調査する権限はないから、契約未締結者が、受信設備を所有していない、あるいは設置していないと言うのであれば、契約を求めることができないのである。このように、受信契約未締結者の対応次第で、受信契約締結のための訴訟を提起できるかどうかが変わってしまうのでは、法の平等な執行ができないことになる。

⑤国会の権能等（憲法 41 条、73 条 6 号）

意見書は、放送法 64 条を、受信設備設置者の不特定多数に適用され得る一般的・抽象的な法規範であり、協会が徴収する受信料について規定することは国会の「立法」の権能に属するというべきであり、規約及び規約を内容とする受信契約が「立法」に当たらないことは明らかであるから、協会が立法に加わったものということとはできないと理解している（40 頁）。

しかし意見書は、立法を一般的抽象的法規範の定立という意味で使いながら¹⁵⁾、協会にのみ適用される放送法の規定を疑問としていない。憲法は、平等原則の観点から、そのような「特定の個人、団体、地域のみにかかわる法律（個別的法律）」¹⁶⁾を容認していないと解される¹⁷⁾。放送法は多くの義務を協会に課しているが、協会がそれを不服としなければ、法理論上の問題はあっても、他の国民の関知するところではない。ただ、それにかかる協会の負担を受信料として、協会と無関係でありたい国

民にも転嫁するところに問題がある。意見書は、放送法の規制対象について、協会と受信設備の設置者とを区別せず、「受信設備設置者の不特定多数」という立法の定義に抵触しない方だけを取り上げて、合憲性を説いているにすぎない。なお、協会のほかにも個別の法律で設立された法人（特殊法人）はあるが、いずれも、政府の事業を行うもので、人々の自由や権利の規制と無関係であるから認められる。報道の自由など民放と同様の私権を有し、元々社団法人であったものを法律で強制的に特殊法人に改組された協会は¹⁸⁾、特殊法人の中でも特殊な存在なのである。

また、「協会の放送を受信することのできる受信設備を設置した者」という規定の仕方は、基本権を制限する規定としては過度に曖昧で広範であり、法律の文言の明確性の法理に反する。おそらく放送法の立法者は、携帯型のテレビ受信機だけでなく、テレビ放送の受信を主たる目的としないワンセグ機能の付いた携帯やカーナビが開発されることを想定していない。2018年3月26日に東京高裁が、地方裁判所で判断の分かれていたワンセグ携帯の「携帯」が放送法の規定する「設置」の概念に該当すると判決するまでは、協会の制定する受信規約1条で「受信機」や、それを「設置」することの定義がなされているにすぎなかったのである。これは、協会の策定した受信規約に、いまだ契約関係にもない国民が拘束されていたのであって、協会と関係を持ちたくない者も、官報によって受信規約の内容を確認して行動しなければ、不意に受信契約を求められる場合もあったことを意味する。つまり、協会が策定したもの

にすぎない受信規約が法律同然に機能していたことになり、これは、国会が、憲法上の根拠なしに、国家機関でない協会に立法を委任し、協会が立法に加わったことになるのである。ゆえに、総務大臣の認可を伴うとしても、受信規約をもって国民を拘束することはできない。

さらに、受信規約の変更は、官報への掲載で済まされている。契約内容を構成する受信規約の内容が一方的に変更され、官報を目にしていなくとも、変更された契約内容が適用されるとすれば、やはり受信規約は実質的に法律として機能していることになる。また、受信規約の改定に不服がある場合、受信機を廃止して契約関係から離脱する自由はあるが、それにより、民放が視聴できなくなるほか、携帯電話やカーナビも使用できなくなるなど、視聴者が著しい負担をこうむることになるのは著しく不合理である。

精神的自由権の規制は、必要最小限度においてのみ許容され、過度に広範で曖昧であってはならず、経済的自由権についても、政策的に不必要で不合理な規制は禁じられている。にもかかわらず意見書は、受信規約が『立法』にあたらぬことは明らか」と簡単に処理してしまっている。

⑥租税法律主義（憲法 84 条）

意見書のとおり、受信料を租税と見ることはできないが、「租税に等しい」という見解は、しばしば国会での審議においても見られた表現であるから¹⁹⁾、被告弁護側も確認のために「租税に等しい」と主張したものである。なお、在日米軍は、受信料は租税に該当し、したがって免除されるとい

う理由で、支払いを拒否している²⁰⁾。一般的な感覚では、サービスの対価、つまり給付と反対給付の関係にない特殊な負担金としての受信料は、租税に等しいと考えるであろう。

四. おわりに

意見書は、「重大な社会的使命」は公共の福祉の範囲内にあるから、他者の自由や権利を制限することもやむを得ないとしているようであるが、それは、自由や権利の制約原理である公共の福祉の理解を誤ったものである。これが許されるならば、公共放送のインターネットによる常時同時配信の開始によって、公共放送も民放も視聴せずインターネットのみから情報を収集していた者まで、後から参入してきた協会のために負担を課されることになり、この受信料という経済的負担を回避するには、こんにちでは不可欠な情報収集手段としてのインターネットの使用を放棄せざるを得なくなる。これは「知る自由」の完全な否定に等しい。

筆者は、決して公共放送を不要だと言うわけではない。学校教育で用いられる番組などスポンサーを必要とする民放では難しいものもあるからである。しかし、受信料制度は、本稿で見たように違憲である。基本的には視聴したい者が契約するという方式が望ましいということと、「重大な社会的使命」を果たすのは、本来、国家の役割であることを考えると、政府からの補助金で賄うという制度が、憲法問題も回避でき、かつ、多くの国民が納得できるのではないだろうか。

注

1. 共有林の分割を制限する森林法の規定の合憲性が争われた訴訟（最大判昭和 62 年 4 月 22 日民集 41 卷 3 号 408 頁）では、法務大臣が合憲との意見を述べたのに対し（『日本経済新聞』2017 年 4 月 12 日付（デジタル版））、最高裁は違憲と判断した。
2. 平成 29 年 2 月 27 日付 NHK 受信料制度等検討委員会答申「常時同時配信の負担のあり方について」
3. 意見書は、民主主義を採用する諸外国の放送制度としてアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、韓国をあげているが、わが国と憲法体制が同じわけではないから、受信料制度を認める根拠とはならない。
4. 意見書が列挙した諸外国の公共放送には、租税や広告収入によって賄われているものもある。
5. 宮澤俊儀『日本国憲法』（日本評論社、1955 年）201 頁
6. 宮澤・前掲書 202-203 頁
7. 宮澤・前掲書 203 頁
8. 芦部信喜『憲法 第 6 版』（岩波書店、2015 年）103-104 頁
9. 芦部・前掲書 194 頁
10. この判例を、二重の基準論の考え方を取り入れたものと解することもできるが、日本国憲法は経済的自由権については、個別に公共の福祉による制約があることを明示し、基本的人権と区別して規定しているから、わが国では殊更に二重の基準論を用いなくても、それぞれ異なる審査基準を用いることは否定されないと思われる。
11. 国家は、成年後見制度、青少年からの有害図書との隔離、バイク走行時のヘルメットの着用、自動車乗車時のシートベルトの着用など、判断能力の乏しいものや危険を伴う行為をする者に対

- して、パターンリスティックな介入をすることがあるが、受信料制度はそれらとも性質が異なる。
12. 水島宏明上智大学教授によれば、2018年9月6日の北海道地震では大規模な停電のためテレビによる情報収集はできなかったそうである（『Yahoo! ニュース』2018年9月20日付）。
 13. 塩野宏『放送法制の課題』（有斐閣、1989年）263頁も、サービスの提供者と受領者とを区別していない。
 14. 自動車の運転にあたっては、自動車損害賠償保障法5条によって、自動車損害賠償責任保険契約の締結が義務付けられているが、これは、特定の保険会社の運営資金としてではなく、自動車という危険な道具を使用するのであるから、それによって発生しうる損害への賠償を明確にするためであり、警察目的としての公共の福祉の観点から正当化される。
 15. 芦部・前掲書270頁
 16. 佐藤幸治『憲法第3版』（青林書院、1995年）145-146頁。ただし、佐藤幸治『日本国憲法論』（成文堂、2011年）433-434頁は、『憲法第3版』に比べて個別的法律を容認するような表現に変わっている。
 17. 2009年、日本航空に公的資金を投入する際に、企業年金の引き下げを法律によって強制的に行う案があった。このときメディアは財産権の侵害の可能性を報じたが、法律の一般性を欠くことも問題であった。
 18. 国家機関ではない特定の団体を、法律で別の組織に変更することは日本国憲法のもとではゆるされないはずであるから、これは占領下での超憲法的措置とみるほかない。
 19. 1954年3月23日第19回衆議院電気通信委員会議録16号原茂、1956年3月27日第24回参議院通信委員会議録12号津島壽一、1959年2月6日第31回参議院通信委員会議録4号山田節男
 20. 2014年5月27日第186回衆議院総務委員会議録24号新藤義孝国務大臣答弁

結晶成長に関する大学生の誤概念 ～材料科学実験から明らかになった課題～

岡田 悟志, 大久保 尚紀, 伴 周一

(平成31年1月17日受理)

Misconceptions of University Students about Crystal Growth ～ The Problems Revealed by Material Science Laboratory ～

By Satoshi OKADA, Naoki OHKUBO, Shuichi BAN

(Accepted January 17, 2019)

1. はじめに

理工系学部の初年次教育における物理学実験は、純粋に物理現象を学ぶことだけが目的ではなく、物理現象を観察・測定をする手法と、その測定結果に真摯に向き合う姿勢を身につけ、その上に実験器具の扱い方、データ処理の手法、レポートの書き方、コンピューターを使用した計測・解析といった理工系の学生に必要な技術を身につけることも目的として設置されている。そのため、実験テーマとしては高校までに学んだ力学や熱力学、電磁気学の物理現象を扱うことが多い。そして、高校では物理学を履修してこなかった学生たちや、履修していても実験を通して学んだ経験がない学生たちに、高校で学ぶ物理現象を実際に体験させることは有意義である^{*1}。実際、本

学部設置の「基礎物理学実験・建築物理学実験」、短期大学部（船橋校舎）設置の「物理実験Ⅰ・Ⅱ」でも同様の目的・手法で行われている。しかし、物理学は力学や熱力学、電磁気学だけではなく、物性や材料科学を含む学問であり、様々な現象・機能が物質を通して発現していることを認識するように仕向けることは大切である。

このような物質を扱う分野は、高等学校までの理科では化学の領域に含まれている。高校までの化学では気体や液体を用いた化学反応を多く学び、固体同士の反応を扱うことは少ない。大学進学後においても化学実験では均質な水溶液中での反応や有機合成などの合成過程について学ぶことが中心となり、不均一な固相での合成やその生成物の物理的性質（電気抵抗や誘電率等）の評価はこれまで学習範囲の外に置かれていた。

そこで我々は、学生たちが材料の合成から測定までを学ぶ場として、教養科目であ

^{*1}日本の高校物理において、実験を通して学んだ経験がない学生が多く存在しているという実態は、山崎らによってアンケート調査を通して明らかにされている^{1), 2)}。

る「教養ゼミナール」において「機能性電子材料入門」として酸化物高温超伝導体を合成・測定する授業を平成 27 年度から 29 年度にかけて行ってきた。またこれは、多くの学生が受講する初年次教育の物理学実験に、材料科学的実験を導入するための実験的授業にもなっている。この中では、「固相反応法による合成」・「コンピューターを利用した結晶同定」・「ゼロ抵抗の確認による超伝導現象の観察」を学ぶことを重点に置いた授業を行ってきた。この授業終了後に行った固相反応法による結晶成長についての概念調査の結果から、大学生は正しい粒子概念が構築されなかったことが判明した。そこで本稿では、学生の回答結果を詳細に分析し、個々の学生がなぜ誤った概念に至ったのか、実施した授業内容及び高校までの学習内容を踏まえ検討を行う。

2. 概念調査対象者

概念調査は、平成 29 年度実施の「教養ゼミナール～高温超伝導体を作ろう：機能性電子材料入門」の受講生を対象に行った。受講した学生は、都市計画系（1 年）9 名、建築系（2 年）1 名、機械系（3 年）2 名の計 12 名であった。実験では、3 人 1 組で班を作って共同で行った。このうち、初年次の実験科目である「基礎物理学実験」を受講したことのある学生は機械系（3 年）2 名のみ、「基礎化学実験」を受講したことのある学生は 0 名であった。このため、受講者は化学実験の知識・技能は高校での教育のままとみなせ、本調査では上級生も同じように扱うことにする。

3. 結晶成長について授業で実施した内容

最初の講義で固相反応法について、「原料の粒子同士の接触点から化学反応が始まり、原料の間に生成物ができるため、生成物の中を原料が拡散し、原料同士が出会うことで反応が継続する」ことを説明した。このことは、高校の化学で学ぶ「化学反応は溶液中の原料同士の衝突によって起こる」に対応しているため理解しやすいと考える。また、学生たちは試料合成の実験において、1 次熱処理の後に圧粉ダイスによる成形を行ってから 2 次熱処理を行った。圧粉ダイスから取り出すときにわずかな振動で成形した試料が崩れることを体験した。また、2 次熱処理の後に電気抵抗測定のために成形する際に、非常に硬くなりなかなか切断できず、紙やすりで削るにもかなり時間を要したことも体験した。つまり、熱処理によって焼成が進み試料の硬さが変化したことを体験している。

これらの授業を受けた後、最終授業日の最後に概念調査を行った。12 人全員から回答の提出を受けた。

4. 概念調査結果の分析

概念調査の設問と学生の回答を表 1 に示す。学生の回答を「粒の大きさ」、「粒の数」、「整列状態」で整理して表 2 に示す。

一般的な固相反応法では、原料粉体同士の接触点で同時多発的に起こる化学反応（狭義の固相反応）に続いて、生成物の粒子が大きくなることで互いに癒着が進み、接触点が面になり複数の粒子が一体化したり、粒子の間に存在した気孔が外部に押し

出される形で消滅したりする。これによって、生成物の緻密化が起こり試料は硬くなる。このような現象は焼結（成形をして行う場合は特に焼成という）と呼ばれる³⁾。

多くの学生が硬くなった原因をすき間がなくなったと考えていることがわかる（表1の回答番号（以下同じ）No.2～6）。すき間がなくなった原因としては、粒が小さくなり、すき間に入りやすくなったためと考えているようである。そして、大きな粒が小さく分裂したので粒の数が増えたと考えている（No.2～5）。実際には他の粒と一体化をしながら粒が大きくなることで、粒の数は少なくなるので、明らかに誤っている。

次に多い回答では、整列に伴って結合が強くなったと考えている（No.3, 10～12）。これは、生成物の粒を原子（イオン）と間違えていると考えられる（No.10～12）。生成物の粒は成長・変形に伴って移動することは起こり得るが、粒の整列によって硬くなるわけではない。また、すき間なく詰め込まれるため整列しているように見える回答もあった（No.2, 4～6）。

「やわらかくなった」という回答もあるが、固相から液相への状態変化と間違えていると考えられる（No.7～9）。しかし、熱処理後というのは加熱した後、さらに冷却した状態なので学生自身の経験と明らかに異なっている。いずれにせよ、明らかに誤った概念が形成されてしまっていることが見て取れる。

平成20年度の学習指導要領で小中高校の理科の重点的学習項目として「粒子」が導入されて系統的に繰り返し学習することで、「すべての物質が原子・分子・イ

表1 熱処理後の試料の変化についての設問と回答

[設問] プレス機で成型した後の2回目の熱処理の前と後では試料の硬さが変化しました。熱処理前は粉末状の試料の粒が左の図のようになっていたので崩れやすかったのですが、熱処理後この粒はどのように変わったと考えられますか、図を描いてください。



[回答]

No.	図	図の説明（自由記述）
1		熱で温められて合成した
2		更に熱処理をしたことで粒がもっと細かくなった
3		崩れにくくなったので、きそく的に、粒がならんだと思った。
4		熱処理をすることで含まれていた水分や空気が抜けた。
5		密度が高くなり非常に硬くなった
6		水分や空気が抜けた
7		熱を加えたことによりやわらかくなった
8		すき間ができた
9		熱を加えたことによりやわらかくなる
10		バラバラだったのが整列しました。安定して等間隔に
11		均等に並んでいる
12		バラバラの原子が格子結晶を形成する

表2 熱処理による試料の変化の認識

粒の大きさ	大きくなる	2
	小さくなる	5
	変わらない	5
粒の数	増える	5
	減る	6
	変わらない	1
整列	する	8
	しない	3

オンからなる」ことを学ぶ。特に中学1年には、図1のように粒子モデルを使いながら、固体・液体・気体の状態変化や液体に固体を溶かす溶解を学ぶ⁴⁾。このモデルでは、「すべての物質は粒子からできている」、「粒子の間にすき間がある」、「粒子は消滅しない」、「粒子の質量は変わらない」、「粒子の大きさは変わらない」、「粒子は熱運動している」、「粒子はたがいに引きあう性質がある」という初歩的な粒子概念⁵⁾をもとに現象の理解へと導く助けとなっている(図1)。

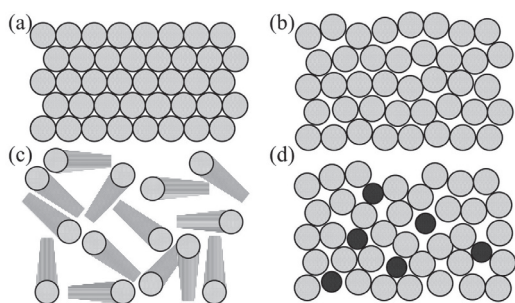


図1 粒子モデルの説明 (a)固体, (b)液体, (c)気体, (d)溶液のモデル図. 中学校理科の教科書⁴⁾を参考に作成

しかし、ここでいう「粒子」が「原子」・「分子」・「イオン」となっていることで、固体にみられる「粒(結晶粒)」という「結晶構造(高校では体心立方格子・面心立方格子等を学ぶ)」と「バルク体(多結晶体, 物質の塊)」の間にある構造体の理解に妨げられているのではないかと危惧される。実際に今回の調査結果では、固体における「粒(結晶粒)」の成長に大きな誤解が生じている。つまり、粒子モデルでは「固体は粒子が整列した状態」として学ぶ。そのため、「粒(結晶粒)」が整列していくように

回答したと考えられる。しかし、実際には、「粒(結晶粒)」は大きくなってすき間を埋めていくだけで、整列することはない。「原子」・「分子」・「イオン」が整列することで「粒(結晶粒)」は大きくなるのだが、ここが十分理解できていない。また、目に見える「粒(結晶粒)」と目に見えない「原子」・「分子」・「イオン」の大きさの違いともいえる。「固体」だから「整列」という過去に学んだことに無理に合わせようとしているように思われる。「加熱」したら「液体」になって「やわらかい」という回答も同じような振舞いと言えるだろう。

また、粒子が小さくなった、粒子が多くなったことによってすき間がなくなるという回答(No.2~6)において、彼らが考えている粒子が「粒(結晶粒)」でなく、「原子」・「分子」・「イオン」を考えると、「粒子の大きさは変わらない」という初歩的な粒子概念を理解できていないことになる。この点については、より踏み込んだ調査が必要と考える。

5. 結論

本研究では、高校までに学ばない固体同士の化学反応における結晶の成長について誤った概念が形成されてしまっていることが明らかになった。これは小中高校の学習により形成されたと考えられ、これを是正するためにも、固相反応の概念説明や熱処理の前後で電子顕微鏡による「粒(結晶粒)」のサイズ計測などの観察実験を初年次教育の実験科目に取り入れることによって、「原子」・「分子」・「イオン」よりも大きな「粒(結晶粒)」がさらに大きくなっ

ていくことを実際に観察することが必要であると考える。

参考文献

- 1) 山崎敏昭他：「高校物理実験の実態－2006年大学
新入生からの分析－」物理教育, 55, (2007), 33.
- 2) 山崎敏昭他：「高校物理実験の実態 II－2009年大
学新入生調査の分析－」物理教育, 59, (2011), 101.
- 3) 例えば, 水田進, 河本邦仁：『材料テクノロジー 13
セラミック材料』, 東京大学出版会, (1986), 181.
- 4) 有馬朗人他：『理科の世界 1年』, 大日本図書,
(2012), 66.
- 5) 菊地洋一他：「小学校における系統的物質学習の
実践的研究－粒子概念を「状態変化」で導入し「溶
解」で活用する授業－」, 理科教育学研究, 54,
(2014), 335.

最近のムーンシャインの動向について

江 成 隆 之

(平成31年1月17日受理)

Some recent topics of the moonshine

by Takayuki ENARI

(Accepted January 17, 2019)

1 はじめに

よく知られているように、物理学はその近代的起源から現在に至るまで数学を用いて現象を記述する形式をとっている。このため数学と物理学の関係は密接であり、相互に影響を及ぼしながら発展してきた事実は必然的であるように思われる。今日、数学と物理学の深化に伴い分業化が進んでいると言われているが、それでもなお数学と物理学双方が関わる重要な研究は数多く存在する。本稿で述べるムーンシャインはそのような研究の1つである。

ムーンシャインとは、有限群とモジュラー形式あるいはモック・モジュラー形式という、一見すると何の関連もない2つの数学的対象を結び付ける奇妙な関係を指す。ムーンシャインにはいくつかのバリエーションが知られており、モンストラス・ムーンシャインとよばれているものが最初に発見され、また最も理解が進んでいる。驚くべきことに、その過程において物理学の理論である共形場理論が必要となることが示されている。これはある性質をもった共形場理論や（共形場理論の応用をその一部分としてもつ）弦理論を調べることで、新しいムーンシャインを発見する、あるいは様々なムーンシャインの背後に潜む構造を理解し得ることを示唆しており、数学者のみならず物理学者も関わる分野となっている理由である。

本稿では、様々なムーンシャインの基礎とも言えるモンストラス・ムーンシャインから始めて、近年物理学者によって発見されたマシュー・ムーンシャイン、およびマシュー・

ムーンシャインを包含し、現在活発に研究が行われているウンブラル・ムーンシャインへの導入を述べる。

2 モンストラス・ムーンシャイン

モンストラス・ムーンシャイン (monstrous moonshine) とは、モンスター群とモジュラー形式を 2 次元共形場理論を介して結びつける関係を指す。そこでまず、モンスター群とモジュラー形式について簡単に説明しておく。

モンスター群. 有限単純群、すなわち正規部分群をもたない有限群の分類定理は現代数学における重要な研究成果のひとつである [1]。これによれば、全ての有限単純群は素数位数の巡回群・次数が 5 以上の交代群・Lie 型・散在型のいずれかと同型である。Fischer-Griess のモンスター群 \mathbb{M} は、26 個ある散在型 (sporadic) のうち最大の位数

$$|\mathbb{M}| = 2^{46} \cdot 3^{20} \cdot 5^9 \cdot 7^6 \cdot 11^2 \cdot 13^3 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 41 \cdot 47 \cdot 59 \cdot 71$$

をもつ。モンスターという名はこの非常に大きな位数に由来する。 \mathbb{M} はその部分群あるいは部分群の商として散在型に分類される 20 個の群を含んでおり、特に Mathieu 群とよばれるものは第 3 節で述べるマシュー・ムーンシャインと関係する。

モジュラー形式. 上半平面 $\mathbb{H} = \{\tau \in \mathbb{C} \mid \text{Im } \tau > 0\}$ に対して $SL(2, \mathbb{R})$ は 1 次分数変換として作用する。特に $SL(2, \mathbb{R})$ の離散部分群である $SL(2, \mathbb{Z})$ をモジュラー群という。種々のモジュラー形式は、 \mathbb{H} 上の正則関数 $f : \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}$ でモジュラー不変量となるもの、すなわち

$$f(\tau) = f\left(\frac{a\tau + b}{c\tau + d}\right), \quad \forall \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in SL(2, \mathbb{Z}) \quad (1)$$

を満たす f に対し、次のような一般化を組み合わせることで定義される。

1. 解析性：尖点 (cusp) $\{i\infty\} \cup \mathbb{Q}$ における振舞いが指数関数となる。
2. 重みなど：モジュラー変換 (1) にスケール因子が現れる。例えば重み k をもつならば

$$f(\tau) = (c\tau + d)^{-k} f\left(\frac{a\tau + b}{c\tau + d}\right).$$

3. 群： $SL(2, \mathbb{Z})$ を他の $SL(2, \mathbb{R})$ の部分群に置き換える。
4. ベクトル化： $f : \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}$ を $f : \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}^n$ に置き換える。

楕円モジュラー関数

$$J(\tau) = \left[1 + 240 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 q^n}{1 - q^n} \right]^3 / q \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^n)^{24} - 744 \quad (q := e^{2\pi i \tau}) \quad (2)$$

はモジュラー不変量であり, $\tau \rightarrow i\infty$ のとき $J(\tau) = q^{-1} + O(q)$ のように振舞う¹. ムーンシャインと関連する重要な性質は, $J(\tau)$ が $SL(2, \mathbb{Z})$ 不変な \mathbb{H} 上の正則関数の成す体の生成子となっていることである. このことを, $J(\tau)$ は $SL(2, \mathbb{Z})$ の主モジュラー (principal modulus, Hauptmodul) であるという.

モンストラス・ムーンシャインの発見は, McKay による観察が契機となった. すなわち, 楕円モジュラー関数 $J(\tau)$ の Fourier 展開

$$J(\tau) = \sum_{m=-1}^{\infty} c_m q^m = q^{-1} + 196884q + 21493760q^2 + 864299970q^3 + \dots \quad (3)$$

の展開係数 196884 が, モンスター群 \mathbb{M} の既約表現の次元を用いて $196884 = 1 + 196883$ のように分解される, という事実である. これを基に, Thompson は無限次元の次数付き加群

$$V = \bigoplus_{m=-1}^{\infty} V_m \quad (4)$$

の存在を仮定したうえで, 各 $g \in \mathbb{M}$ に対し

$$T_g(\tau) := \sum_{m=-1}^{\infty} \text{Tr}_{V_m}(g) q^m \quad (5)$$

を調べることを提案した [2]. (5) は McKay-Thompson 級数とよばれ, 次の性質をもっている: (i) $g = e$ (単位元) のとき $J(\tau)$ に帰着する. (ii) \mathbb{M} 上の類関数になっている. すなわち, 任意の $g, h \in \mathbb{M}$ に対し $T_g = T_{hgh^{-1}}$ を満たす.

最終的に Conway と Norton は次の予想に到達した [3].

各 $g \in \mathbb{M}$ に対し $SL(2, \mathbb{R})$ の離散部分群 Γ_g が存在して, McKay-Thompson 級数 $T_g(\tau)$ は Γ_g の主モジュラーとなる.

これがモンストラス・ムーンシャインの正確な表現である. よりくだけた言い方をすれ

¹ $q = e^{2\pi i \tau}$ は以後断りなく用いる.

ば、それぞれの $T_g(\tau)$ は $J(\tau)$ と類似の性質をもつということである。この予想を証明するためにはまず V を具体的に構成しなければならないが、2次元共形場理論を用いればよいことが示されている²： \mathbb{R}^{24} に Leech 格子（実 24次元の正定値な自己双対偶格子で、ルートをもたない） Λ を導入して 24次元トーラス \mathbb{R}^{24}/Λ を作る。このトーラスの座標を X^i ($i = 1, \dots, 24$) とし、自由なカイラルボソン場 $X^i(z)$, $z \in \mathbb{C}$ を力学変数とする共形場理論のトーラス分配関数 Z を計算すると

$$Z(\tau) = J(\tau) + 24$$

を得る。定数項を消去するには \mathbb{R}^{24}/Λ の \mathbb{Z}_2 オービフォルド化、すなわち $X^i \sim -X^i$ の同一視を行えばよい。実は、このように構成された共形場理論に対してモンスター群 \mathbb{M} は対称性として作用する。言い換えれば、理論の状態空間 V について $\text{Aut}(V) = \mathbb{M}$ が満たされている。従ってこの V がモンスター加群であり、以後 $V^{\mathbb{M}}$ と書く。

以上より、McKay-Thompson 級数 (5) は $g \in \mathbb{M}$ でツイストした分配関数

$$T_g(\tau) = \text{Tr}_{V^{\mathbb{M}}} g q^{L_0 - c/24} \quad (6)$$

となることが分かる。従ってモンスター・ムーンシャインを証明するには、各 $g \in \mathbb{M}$ について (6) が ($SL(2, \mathbb{R})$ の離散部分群である) Γ_g の主モジュラーとなっていることを示せばよい。実際、その証明は Borcherds によって与えられた [5]。

モンスター・ムーンシャインから得られる重要な教訓は、各 $T_g(\tau)$ がもつ主モジュラー性である。このような共通した性質はマシューおよびウンブラル・ムーンシャインにおいても鍵となる。

3 マシュー・ムーンシャイン

散在型有限単純群には 5 個の Mathieu 群 $M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{23}, M_{24}$ が含まれており、 M_{24} が最大である。マシュー・ムーンシャイン (Mathieu moonshine) は M_{24} とモック・モジュラー形式を結びつける関係であり、K3 曲面³をターゲット空間とする $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論⁴の楕円種数が介在している [6], [7]。本節ではまずモック・モジュラー形式につ

² 数学では頂点作用素代数 (vertex operator algebra, VOA) とよばれている。VOA とモンスター加群の構成は [4] で解説されている。

³ K3 曲面とは 2次元 Calabi-Yau 多様体のひとつで、弦理論の双対性や数学的応用と深く関連している。また、一般に Calabi-Yau 多様体は複雑で扱いが難しいが、K3 曲面はそれが比較的容易である。

⁴ 超対称性が存在する共形場理論を超共形場理論とよぶ。超対称性とはボソンとフェルミオンを入れ換える連続変換 (超対称変換) に対する不変性を指しており、その保存電荷をスーパーチャージとよぶ。 $\mathcal{N} = 2$ とは、スーパーチャージが 2 種類存在することを意味している。

いて説明した後、マシュー・ムーンシャインについて述べる。

モック・モジュラー形式⁵ h を全ての尖点における振舞いが指数関数であるような \mathbb{H} 上の正則関数, Γ を $SL(2, \mathbb{R})$ の離散部分群とする. h が重み $w \in \mathbb{Z}/2$ をもつ Γ に対するモック・モジュラー形式 (mock modular form) であるとは, 次のことを指す.

重み $2-w$ のモジュラー形式 g が存在して, $\hat{h} := h + g^*$ が重み w の Γ に対する正則なモジュラー形式として振る舞う.

ここに g を h の影 (shadow), \hat{h} を h の完備化とよぶ. また g^* は次のようにして定義される: g の Fourier 展開を $g(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} c_g(n)q^n$ のように書くとき,

$$g^*(\tau) := \frac{c_g(0)(-\mathrm{Im}(\tau))^{1-w}}{w-1} + \sum_{n=0}^{\infty} (-4\pi n)^{w-1} \overline{c_g(n)} q^{-n} \int_{4\pi n \mathrm{Im}(\tau)}^{\infty} e^{-t} t^w dt.$$

Witten 指数とは分配関数の拡張で, 超対称性が存在する系において超対称真空を数え上げる. $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論では, スーパーチャージを入れ替える対称性 (R-対称性) に起因する $U(1)$ カレントが存在するために, 楕円種数 (elliptic genus)[12] とよばれる Witten 指数の拡張を定義することができる. 楕円種数は超対称性を部分的に保つ励起状態である BPS 状態の縮重度を与え, また幾何学的にはターゲット空間の位相不変量と関係している.

$\mathcal{N} = 2$ 超共形代数は

$$\begin{aligned} [L_m, L_n] &= (m-n)L_{m+n} + \frac{c}{12}m(m^2-1)\delta_{m+n,0}, \\ [J_m, J_n] &= \frac{c}{3}m\delta_{m+n,0}, \\ [L_m, J_n] &= -nJ_{m+n}, \\ [L_m, G_r^\pm] &= \left(\frac{m}{2} - r\right)G_{r+n}^\pm \\ [J_n, G_r^\pm] &= \pm G_{r+n}^\pm, \\ \{G_r^+, G_s^-\} &= 2L_{r+s} + (r-s)J_{r+s} + \frac{c}{3}\left(r^2 - \frac{1}{4}\right)\delta_{r+s,0} \end{aligned} \tag{7}$$

⁵ モック・モジュラー形式は Ramanujan によって 1920 年に発見されたが, その進展は近年になってからである [8]. また, 物理学にモック・モジュラー形式が現れる例として [9], [10], [11] などが知られている.

で与えられる. ここに L_m は Virasoro 演算子, G_r^\pm は 2 種類のスーパーカレント, J_m は R-対称性による $U(1)$ カレントである. このとき楕円種数を

$$Z(\tau; z) = \text{Tr}_{\mathcal{H}_R} \left[(-1)^{J_0 + \bar{J}_0} y^{J_0} q^{L_0 - c/24} \bar{q}^{\bar{L}_0 - c/24} \right], \quad y := e^{2\pi iz} \quad (8)$$

で定義する.

K3 曲面をターゲット空間とする $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論の楕円種数は

$$Z_{K3}(\tau; z) = 8 \left[\left(\frac{\theta_2(\tau; z)}{\theta_2(\tau; 0)} \right)^2 + \left(\frac{\theta_3(\tau; z)}{\theta_3(\tau; 0)} \right)^2 + \left(\frac{\theta_4(\tau; z)}{\theta_4(\tau; 0)} \right)^2 \right]$$

のように計算され, モジュラー不変性を示す⁶. ここに $\theta_i(\tau; z)$ ($i = 1, \dots, 4$) と $\eta(\tau)$ はそれぞれ Jacobi のテータ関数, Dedekind のエータ関数である. さらに $Z_{K3}(\tau; z)$ は

$$Z_{K3}(\tau; z) = \frac{[\theta_1(\tau; z)]^2}{[\eta(\tau)]^3} (24\mu(\tau; z) + H(\tau)) \quad (9)$$

のように分解される. (9) の各項はモジュラー変換に対して余分な項が現れ, モジュラー不変性を示さない, すなわちアノマリーをもっている. ところがこれらは相殺して $Z_{K3}(\tau; z)$ が本来もっているモジュラー不変性は保たれている. 実は, $H(\tau)$ は重み $1/2$ のモック・モジュラー形式であり, $\mu(\tau; z)$ (Appell-Lerch 和という) はその影になっている. そして $H(\tau)$ の Fourier 展開

$$H(\tau) = 2q^{-1/8}(-1 + 45q + 231q^2 + 770q^3 + \dots) \quad (10)$$

において, 括弧内の定数項を除くいくつかの展開係数と, 最大の Mathieu 群 M_{24} の既約表現の次元 $45, 231, 770, \dots$ が一致している. 以上がマッシュュー・ムーンシャインの発見の経緯である.

この事実とモンスター・ムーンシャインの類推から直ちに, 無限次元の次数付き加群である M_{24} -加群

$$K = \bigoplus_{n=0}^{\infty} K_{n-1/8}, \quad (11)$$

および各 $g \in M_{24}$ に対する McKay-Thompson 級数

$$H_g(\tau) := \sum_{n=0}^{\infty} \text{Tr}_{K_n}(g) q^{n-1/8} \quad (12)$$

の存在が考えられる. 実際, (12) を与える K の存在が証明されている [14]. しかしながらモンスター加群 V^\natural に対応する, 具体的な構成法はまだ知られていない.

⁶ $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論の楕円種数は [13] において詳細に議論されている.

4 ウンブラル・ムーンシャインへの導入

ウンブラル・ムーンシャイン (umbral moonshine) は, マシュー・ムーンシャインを包含するより広いクラスのムーンシャインである [15], [16]. その背景は広範にわたるため, 本稿では導入に留める.

第2節の最後で述べたようにムーンシャインにおいて重要な鍵となるのは, 有限群の各元に対応する (モック) モジュラー形式がある共通した性質をもつことである. モンストラス・ムーンシャインの場合, それは主モジュラー性であった. マシュー・ムーンシャインの場合はどうか. $H_g(\tau)$ を与える M_{24} -加群 K は確かに存在するから, この場合も主モジュラー性であるように思われる. しかしモック・モジュラー形式にそのような性質はない.

実は, $H_g(\tau)$ は Rademacher 総和性 (Rademacher summability) とよばれる性質をもつことが確かめられている [17]: $H_g(\tau)$ をある級数 $R_{\Gamma_g}(\tau)$ で表したときに, 級数のラベル Γ_g は群をなし, その作用は $H_g(\tau)$ を不変に保つ, というものである. この性質をベクトル値モック・モジュラー形式に要求すると, マシュー・ムーンシャインを包含するムーンシャイン, すなわちウンブラル・ムーンシャインが得られる.

一方, 全く異なる考え方に基づいてウンブラル・ムーンシャインを得ることもできる. まず Niemeier 格子 N^X (実 24 次元の正定値な自己双対偶格子で, 23 個のルートをもつ) を用意する. ここに X はルートのラベルである. これを基にウンブラル群 $G^X := \text{Aut}(N^X)/\text{Weyl}(X)$ を定義する. また一方で, X でラベルされるベクトル値モック・モジュラー形式 H^X を (適当な条件の下で) 構成することができる. このとき G^X と H^X の関係はウンブラル・ムーンシャインに他ならない. なお, ルートの数と同じくウンブラル・ムーンシャインの例は 23 個存在する.

ウンブラル・ムーンシャインはマシュー・ムーンシャインと同様, 加群の存在は証明されているものの [18], 現段階では数学的に満足な定義は与えられていない. また, マシュー・ムーンシャインを包含していることから物理学的・幾何学的には K3 曲面が関係すると考えられるが, 様々な議論があり十分理解されたとはまだ言えない状況である.

5 まとめと展望

本稿では大きく分けて 2 つのムーンシャインについて述べた. どちらにも共通するのは, 有限群の各元に対応する (モック) モジュラー形式がある共通した性質をもつという

ことである。これは新たなムーンシャインを探す際にも重要であると考えられる。加えてウンブラル・ムーンシャインにおけるルート系のように、その起源を異にするものが存在している可能性もある（実際このルート系は K3 曲面の du Val 型特異点の分類と対応しており、ウンブラル・ムーンシャインの幾何学的理解へのヒントになっている）。

2次元共形場理論はその強力な解析性から数学的定義を与えることが可能であり、ムーンシャインという予想外の場面で威力を発揮することは非常に興味深い。一方、弦理論は物理学として未完成であるだけでなく、数学的定義を与えることもまだ難しい。しかしながら弦理論には大きな対称性や豊富な双対性が含まれており、数学に“インスピレーション”を与えることは少なくない。Calabi-Yau 多様体のミラー対称性はその顕著な例である。従ってムーンシャインへの応用を試みることもまた有用であると考えられ、それは既に始まっている。

ムーンシャインの最初の発見から 40 年ほど経ったが、完全に理解された例はまだ無く、その一方で新たな例も見つかっており、今後も数学と物理学双方の発展に寄与すると期待される。

最後に、紙面の都合上本稿で述べることのできなかつた事項や文献のより詳細な一覧は [19], [20] にまとめられていることを付しておく。

参考文献

- [1] M. Aschbacher, “The status of the classification of the finite simple groups,” Notices Amer. Math. Soc. **51** (2004), no. 7, 736–740.
- [2] J. G. Thompson, “Finite groups and modular functions”, Bull. London Math. Soc. **11** no. 3, (1979) 347–351.
- [3] J. H. Conway and S. P. Norton, “Monstrous Moonshine,” Bull. London Math. Soc. **11** (1979) no.3, 308.
- [4] I. Frenkel, J. Lepowsky and A. Meurman, “Vertex Operator Algebras And The Monster,” vol. 134 of ‘Pure and Applied Mathematics’ **134**, Academic Press Inc., Boston, MA, 1988.
- [5] R. Borcherds, “Monstrous moonshine and monstrous Lie superalgebras,” Invent. Math. **109**, No.2 (1992), 405–444.
- [6] T. Eguchi, H. Ooguri and Y. Tachikawa, “Notes on the K3 Surface and the Mathieu group M_{24} ,” Exper. Math. **20** (2011) 91 [arXiv:1004.0956 [hep-th]].
- [7] 江口徹, 菅原祐二, 共形場理論. 岩波書店, 2015.

-
- [8] S. Zwegers, “Mock Theta Functions”, Ph.D. thesis, Utrecht University, 2002 [arXiv:0807.4834 [math.NT]].
- [9] J. Troost, “The non-compact elliptic genus: mock or modular,” *JHEP* **1006** (2010) 104 [arXiv:1004.3649 [hep-th]].
- [10] A. Dabholkar, S. Murthy and D. Zagier, “Quantum Black Holes, Wall Crossing, and Mock Modular Forms,” arXiv:1208.4074 [hep-th].
- [11] S. Alexandrov, J. Manschot and B. Pioline, “D3-instantons, Mock Theta Series and Twistors,” *JHEP* **1304** (2013) 002 [arXiv:1207.1109 [hep-th]].
- [12] E. Witten, “Elliptic Genera and Quantum Field Theory,” *Commun. Math. Phys.* **109** (1987) 525.
- [13] T. Kawai, Y. Yamada and S. K. Yang, “Elliptic genera and $N=2$ superconformal field theory,” *Nucl. Phys. B* **414**, 191 (1994) [hep-th/9306096].
- [14] T. Gannon, “Much ado about Mathieu,” *Adv. Math.* **301** (2016) 322 [arXiv:1211.5531 [math.RT]].
- [15] M. C. N. Cheng, J. F. R. Duncan and J. A. Harvey, “Umbral Moonshine,” *Commun. Num. Theor. Phys.* **08** (2014) 101 [arXiv:1204.2779 [math.RT]].
- [16] M. C. N. Cheng, J. F. R. Duncan and J. A. Harvey, “Umbral Moonshine and the Niemeier Lattices,” *Res. Math. Sci.* **1** (2014) 3 [arXiv:1307.5793 [math.RT]].
- [17] M. C. N. Cheng and J. F. R. Duncan, “On Rademacher Sums, the Largest Mathieu Group, and the Holographic Modularity of Moonshine,” *Commun. Num. Theor. Phys.* **6** (2012) 697 [arXiv:1110.3859 [math.RT]].
- [18] J. F. R. Duncan, M. J. Griffin and K. Ono, “Proof of the Umbral Moonshine Conjecture,” *Res. Math. Sci.* **2** (2015) 26 [arXiv:1503.01472 [math.RT]].
- [19] J. F. R. Duncan, M. J. Griffin and K. Ono, “Moonshine,” *Res. Math. Sci.* **2** (2015) 11 [arXiv:1411.6571 [math.RT]].
- [20] V. Anagiannis and M. C. N. Cheng, “TASI Lectures on Moonshine,” *PoS TASI 2017* (2018) 010 [arXiv:1807.00723 [hep-th]].

本誌第 105 号に掲載いたしました「研究動向一覧表」に誤りがありました。本号にて下記の通り訂正させて頂くとともに深くお詫び致します。

記

彙報第 105 号 p.23 26 行目

誤

A. 論文・研究ノート

- | | | | |
|------|---------------------------------|--|---------|
| 郭 海燕 | 明治外交官・稲垣満次郎の国家戦略思想—植民地論と西伯利亚鉄道論 | 『北方シルクロードと東北亜民族学術検討会論文集』中国对外関係史学会
Vol.31, pp.119-132 | [17. 9] |
| 郭 海燕 | 巨文島事件与英国東北亜政策 | 『“中外条約与近代中国” 国際学術検討会論文集』中国社会科学院近代史研究所・湖南師範大学
pp.118-135 | [17.10] |
| 郭 海燕 | 巨文島事件与英国東北亜政策 | 『安徽史学』安徽社会科学院,
ISSN1005-605X
Vol.2018-1, pp.97-108 | [18. 1] |

正

A. 論文・研究ノート

- | | | | |
|------|---------------------|---|---------|
| 郭 海燕 | 「巨文島事件与英国东北亚政策」(单著) | 『安徽史学』
安徽社会科学院, ISSN1005-605X
Vol.2018-1, pp.97-108 | [18. 1] |
|------|---------------------|---|---------|

C. その他

- | | | | |
|------|---------------------------------------|--|---------|
| 郭 海燕 | 「明治外交官・稲垣満次郎の国家戦略思想—植民地論和西伯利亚鉄道論」(单著) | 『北方丝绸之路与东北亜民族学術検討会論文集』
中国对外关系史学会
Vol.31, pp.119-132 | [17. 9] |
| 郭 海燕 | 「巨文島事件与英国东北亚政策」(单著) | 『“中外条約与近代中国” 学术研讨会论文集』
中国社会科学院近代史研究所・湖南师范大学
pp.118-135 | [17.10] |

編集規定

1. 本誌は、日本大学理工学部一般教育教室の機関誌であり、その目的を本学部と短期大学部（船橋校舎）に所属する教員の学術研究発表とする。
2. 本誌の発行は、年度内2回とする。
3. 本誌には、論文、研究ノート、依頼論文および研究動向の各欄を設ける。
4. 論文・研究ノートは査読制とする。
5. 掲載は編集委員会の決定による。
6. 彙報に掲載された論文・研究ノートは、本教室のウェブサイト上において公開する。

投稿規定

1. 投稿者は、原則として本学部と短期大学部（船橋校舎）に所属する教員とする。ただし、編集委員会が特別に許可した者は投稿を認めることができる。
2. 投稿する論文等はいずれも他に未発表のものに限る。ただし、口頭発表およびその配布資料はこの限りではない。
3. 投稿は1人1編とする。
4. 掲載決定後の加筆、訂正は原則として認めない。
5. 投稿者は、編集委員会に ①投稿原稿（英文の題目・氏名を付けたもの）、②審査用原稿コピー2部、③邦文要旨（600字以内）、④投稿者連絡票 を提出する。
注. 原則として電子ファイルで提出すること。
6. 原稿は下記の執筆要項に従うこと。

執筆要領

1. 原稿は、A4用紙を用い、原則として横書きとする。
2. 本文・図・表・注・引用文献を含めて、下記のレイアウトで10ページ以内とする。
3. 和文 一段組 1ページ 1行40字×36行、1文字10.5ポイントとする。
二段組 1行19字×36行×2段、1文字10.5ポイントとする。
4. 欧文 本文が 横15センチ×縦20センチ、1行16ポイント、1文字10.5ポイントとする。
5. 図・表は、論文原稿末尾に貼り付け、本文中に挿入箇所を指定する。
6. 注および引用文献の表示は下記の通りとする。
 - (1) 引用文献は通し番号をつけ本文の後にまとめて記載する。
本文中の参照個所に文献の番号を記載する。
 - (2) 各文献は、「著者名・編著者名」「引用論文図書名」「出版社・発行地」「発行年」「ページ」を記載する。
 - (3) 欧文の場合、著者名は立体、書名は斜体にすること。
7. 表題等の文字の大きさは例文を参照すること。

編集委員（五十音順）

委員長	三島 隆 (Takashi MISHIMA)	
委員・幹事	中原明生 (Akio NAKAHARA)	
委員	北村勝朗 (Katsuro KITAMURA)	三五弘之 (Hiroyuki SANGO)
	周 一川 (Yichuan ZHOU)	鈴木 孝 (Takashi SUZUKI)
	勢力尚雅 (Nobumasa SEIRIKI)	山崎 晋 (Susumu YAMAZAKI)
事務局	杉友隆之 (Takayuki SUGITOMO)	

一般教育教室彙報 第106号

発行日 平成31年4月30日
 発行者 日本大学理工学部 一般教育教室
 三 島 隆
 印刷者 日本フィニッシュ株式会社
 高 橋 嘉 久

BULLETIN
OF
DEPARTMENT OF GENERAL EDUCATION
COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
NIHON UNIVERSITY
No. 106

CONTENTS

Articles

- Critical View against Defending Opinion on NHK Broadcast Receiving Fee
System Spoken by Japanese Minister of Justice
.....Seietsu AMANO 1
- Misconceptions of University Students about Crystal Growth
~The Problems Revealed by Material Science Laboratory~
.....Satoshi OKADA, Naoki OHKUBO, Shuichi BAN 11

Monograph

- Some recent topics of the moonshine Takayuki ENARI 17

- Corrections** 27