

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

### 数物系科学分野に関する学術研究動向及び学術振興 方策 - 素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理、 天文学に関連する分野の動向 -

神田 展行 (大阪市立大学大学院理学研究科・教授)

今年度の大きな動向として、前年度からのコロナウィルス感染症流行による影響を修正して今後の予定を示した大型計画がいくつかあった。本研究員の専門とする重力波観測は国際観測網の稼働予定についての議論が盛んであるし、ヴェラ＝ルービン天文台の予定も天文分野では話題になった。

日本国内では、学術会議においてマスタープラン2023に関する議論が始まった。天文学・宇宙物理学分科会では8月には大型中型計画シンポジウムが開催され、30を超える計画が紹介された。

2021年2月には「素粒子と重力波」研究会を共催した。この研究会は重力波観測と素粒子物理との学術的接点を探る研究会であった。オンラインと現地のハイブリッド開催で200名を超える多くの研究者が参加し、素核・宇宙分野の研究者から高い関心が寄せられた。

### 数物系科学(とくに地球惑星科学)の分野に関する 学術研究動向及び学術振興方策 - 数物系科学にお ける新たな潮流と展開 -

中村 美千彦 (東北大学大学院理学研究科・教授)

トポロジカル物性物理学では、トポロジカル領域周辺の境界状態の制御と応用などにおいて注目度の高い研究がなされ、トランジスターや磁気抵抗などでトポロジカル・デバイスと呼ばれる新しいデバイスも提案されている。またグラフェン、銅酸化物高温超伝導体、量子磁性体など、特異な量子効果が発現する量子物質の理論的・実験的研究が進んでいる。強相関電子系や磁性体を含む量子物質のフロッケ・エンジニアリングとも呼ばれる研究分野が開拓されている。

プラズマ科学関連分野では、高強度レーザーによるプラズマ生成・加熱技術の高度化により多様な形状とイオン種の

生成が可能となり、応用範囲が学際的に広がっている。

地球惑星科学関連分野においては、地球生命史における大量絶滅は注目度の高い研究領域であり、陸上生物のみでなく海洋生物の絶滅の原因となったイベントにも研究が及んでいる。隕石衝突は、化学分析(白金族、オスミウム同位体等)によって直接的な証拠が得やすいため、絶滅が起こった地層境界を特定することが地質学的研究の駆動力の一つとなっている。また日本の地名由来の地質年代「チバニアン」が地質年代の世界標準として発見されたことも注目を集めた。その背景には、地磁気在地層に記録されるメカニズムと時間差の精密理解があり、気候変動と地磁気の関係の解明に発展する可能性もある。

地球惑星科学関連の世界最大の国際学会であるアメリカ地球物理学連合(AGU)秋季大会では、大会に併せたScientific Workshopの開催数がさらに増加傾向にある。話題は、観測・実験・計算技術に関するものを中心として多岐にわたり、とりわけSDGs関係、研究機関が取得したオープンソースデータの活用促進方法・チュートリアルに関するものが増加傾向にある。大規模学会がその大きさを活用して機能を多角化していると同時に、あらゆる角度から、社会の中でのアカデミアの存在感を高めている。

### 大気水圏科学関連分野に関する学術研究動向 - 学際研究・日本の役割を中心として -

大島 慶一郎 (北海道大学低温科学研究所・教授)

大気水圏科学研究の重要な役割の一つに、地球規模の気候変動の理解と予測があげられる。それを国際的に取り纏めているのが、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)であり、2021年8月に8年ぶりに、第1作業部会(自然科学的根拠を担当)の第6次となるIPCC評価報告書が公表された。この報告書からは、大気水圏科学研究の研究動向が読み取ることができ、その要点は以下の通りである。A:人間活動の影響で地球が温暖化していることについては「疑う余地がない」と結論された。今までの評価書の不確かさの表現が初めて外れ、断言されたことになる。B:猛暑や大雨などの

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

極端現象の増加にも人間活動の影響が現れている。日本に強く関係する現象としては、強力な台風が到来する確率が大幅に増えることが予想される。C: 世界平均気温は、全ての排出シナリオにおいて、少なくとも今世紀半ばまでは上昇を続け、現状の対策レベルに近い「中間」シナリオでは、今世紀半ばに $2^{\circ}\text{C}$ を超える。D: 気候システム全般にわたる最近の変化の規模と現在の状態(50年で地球平均気温 $1^{\circ}\text{C}$ 近くの上昇、北極海の夏の海氷面積の半減等)は、何世紀も何千年の間、前例のなかったものである。E: 世界平均の海面水位は、現時点で産業革命前から20cm程度上昇しており、今世紀末には0.5~1.0m近くまで上昇すると予測される。もしも南極大陸の氷床が不安定化して崩壊が始まると、1.7m程度上昇も考えられる。

日本においても、IPCCで取り上げられた課題に対応するように、大型プロジェクトが行われつつある。B 極端現象・台風やC 気温予測に関しては、新学術領域研究「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」が、D 温暖化が顕著な北極域の問題に対しては、「北極域研究加速プロジェクト(ArCS II)」が、E 南極氷床融解加速問題に対しては、新学術領域研究「熱-水-物質の巨大リザーバ: 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」が進行中であり、American Geophysical Unionの国際会議などでもそのプレゼンスを発揮している。なお、2021年度ノーベル物理学賞を受賞した真鍋叔郎氏は、IPCCのベースとなっている、二酸化炭素による地球温暖化の定量化や気候モデルの開発を中心的に行った研究者である。

### 応用数学および統計数学関連分野に関する学術研究動向 — 流体现象を始めとする非線形問題における数理解析および数値解析の現状と将来

木村 芳文(名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授)

担当者の専門分野は応用数学および統計数学関連分野(流体力学)であり、流体力学の数学的側面を主な研究対象としている。流体力学は工業問題、航空船舶、宇宙環境問題における様々な問題に関連し、幅広い応用を抱える学問であるが、その数学的な側面については大きく分けて次

の2つの考え方が存在すると考えられる。

(1) 流体、特に粘性流体の運動を記述する非線形偏微分方程式であるNavier-Stokes方程式やそこから派生する方程式、およびそれらを基にしたモデル方程式を基礎方程式として、基礎方程式の解析およびその解の性質を知ることによって現実の問題の理解を行う。

(2) 現象の様々なデータから統計操作によって問題とする物理量の特徴を抽出し、予測を行う。

前者は元来の流体力学の問題意識であり、現在でも数値解析を含めた多くの研究がこの立場で行われているのに対し、後者は近年のAIおよびデータ駆動型研究の発展の下、機械学習・深層学習の範疇として注目されている立場である。これらの2つの立場は相補的であり、例えば(1)で方程式の特異性を研究することは(2)の弱点とも言える突発的大偏差現象の予測に対する情報を提供することになると考えられるし、(2)の方法を用いることによって(1)の立場では計算できないような複雑な状況下の問題について予測が可能になる。

担当者はこれまで(1)の立場で研究を続けてきているが、新しいトレンドとしての(2)の立場に興味を持つとともに(1)と(2)のハイブリッド型の研究の可能性について研究動向を注目している。令和3年度はコロナ禍の影響でオンラインによる調査となったが理化学研究所の数理創造プログラムが主催する、「RIKEN iTHEMSのアウトリーチについての研究会2021」への参加を通して「数理」的分野横断的手法による、宇宙・物質・生命・社会における基本問題解決についての議論およびアメリカ物理学会・流体力学分科会(フェニックス)における発表を通しての渦運動の特異性についての研究調査を実施した。

### 半導体関連、ナノ構造物理関連分野に関する学術研究動向—ナノ物理学がもたらす量子制御と物質の新機能—

小林 研介(東京大学大学院理学系研究科・教授)

現在のナノ物理学関係で特に注目されるトピックに「量子コンピュータ」がある。ここでは量子コンピュータに関

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

する研究動向を概観する。

量子ゲート方式における量子ビットの主たる種類として、超伝導を用いるもの、イオンを用いるもの、半導体を用いるものが、世界的に並列して開発されている。現時点では超伝導を用いる方式が量子ビットの数という意味では最も発展している。2015年にはGoogleが量子コンピュータ開発に参入した。2016年にはIBMがクラウドで量子コンピュータの提供を開始している。2019年にはGoogleが「量子超越」を達成したと報告し、世界的なニュースとなった[Nature 574, 505 (2019)]。IBMは2021年末には100量子ビットを超えたと発表している。一方で、トラップイオンを用いた方式も急進展しており IonQ の取り組みがその代表格である。

真に有用な「誤り耐性量子コンピュータ」の実現には少なくとも100万量子ビットが必要とも言われており現時点では程遠い。一方で、100量子ビット程度以上でも十分に役に立つという期待から行われているのが「NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Technology)」と呼ばれる「小・中規模でノイズを含む量子コンピュータ」である。現在はこの部分がハードとソフトの両面で量子コンピューティング研究の主戦場であると言える。

日本においても文部科学省が継続的に戦略目標を策定している。直近の2つを上げると、令和元年には「量子コンピューティング基盤の創出」、令和4年には「量子情報と量子物性の融合による革新的量子制御技術の創成」が立てられた。これに呼応して様々な量子テクノロジー関連のプロジェクトが動いている。現在、一見すると量子コンピュータの研究が完全に応用工学的な段階に入っているようにも見えるが、その一方で、複数の量子ビット型が並列して開発されている現状を考えると引き続き基礎研究が必要な段階である。

量子コンピュータだけでなく量子計測や量子通信のような種々の量子制御技術が研究されている。これらの量子テクノロジーは人類が新たに手にした将来性のある科学・技術の萌芽である。数十年という長期的な視野に立ち大切に育てていく必要がある。

### 核融合学、プラズマ科学関連分野に関する学術研究動向 -核融合燃焼実験に向かい取り巻く展開-

山田 弘司(東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授)

本調査研究は核融合学およびプラズマ科学関連分野において国際熱核融合実験炉(ITER)計画における核融合燃焼実験に向かい、これを取り巻く学術研究の動向について海外を中心に我が国の状況も合わせて調査することを目的とした。ITER計画は一つの実験プロジェクトの範囲を越えて、関連する研究の極めて指向性の高い集約統合を求める時代背景を生み出しつつある。一方、この分野の「学術研究」の全体を包摂するものではない。このため、ITER計画への研究開発の加速と、多様な学術研究の拡がりの合一に注視する。ITER計画では参加各極が製作した大型機器が建設現地(サン・ポール・レ・デュランス、仏)へ搬入され、ITER本体の現地組み立てが本格的に進められている。2025年の実験開始を目指した建設工程は全体の80%に至っている。今年度は調査研究の対象として、歴史的な成果が、欧州が共同して進めているJET計画によってなされた。JETは現在稼働中の世界最大のトカマクであり、核融合の実燃料である重水素とトリチウム(三重水素)を用いることができる唯一の装置である。2021年の実験において、10MW以上の核融合出力を5秒間保持することに成功した。生成された核融合エネルギーは59MJに達している。核融合炉で想定される金属壁条件かつ定常に保持できたことは、ITERでの運転を見込むために極めて重要な研究成果である。また、ITER計画を支援するとともに、原型炉設計を見据えた高性能プラズマの実証のためのJT-60SA計画(日欧の共同事業)は統合調整運転において、残念ながら超伝導コイルの短絡事象があったため実験開始は2022年中が見込まれている。核融合燃焼実験を見込んだ中心課題は、コアプラズマの予測の精緻化が、プラズマが固体材料に直接接触するダイバータを含めたより複雑な周辺プラズマ研究の高度化にも活かされつつある。

# 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

## 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理に関連する実験分野に関する学術研究動向—将来素粒子実験計画の国際的新展開—

川越 清以 (九州大学大学院理学研究院・教授)

1960年代に提唱された素粒子の標準理論は、これまでの実験結果のほとんどを精度良く説明できている。しかし、標準理論は宇宙のダークマター・ダークエネルギー、物質・反物質の非対称性、ヒッグス場に関する階層性の問題など、根源的問題を全く説明できない。標準理論の綻びを探し、それを超える新しい原理を求めることが素粒子物理の最重要課題である。

欧州原子核研究機構(CERN)の陽子陽子衝突型加速器 LHC では、さまざまな新粒子の直接探索を精力的に行なっているが、未発見である。その一方、2021年4月に米国フェルミ国立加速器研究所で行われているミュオン異常磁気能率( $g-2$ )測定実験の結果が発表された。荷電レプトンの磁気能率の大きさを表す  $g$  値は量子補正によって2からずれる。その実験値が理論値から優位にずれていれば、標準理論を超える新粒子の間接的証拠になる。今回のものは従来実験と同じ手法でより高い精度の測定を目指すもので、その結果、実験と理論のずれは  $4.2\sigma$  まで拡大した。東海村 J-PARC では米国の実験と異なる手法でミュオン  $g-2$  を測定する実験を準備中である(2027年開始予定)。標準理論からのずれを示唆する実験結果として、B中間子崩壊におけるレプトンフレーバ普遍性の破れなど、「Bアノマリー」の研究も注目される。B中間子の研究についてはLHCでの実験だけでなく、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子陽電子コライダーSuperKEKBでの Belle II 実験が進行中で、新しい実験結果が待たれる。

新粒子・新現象の間接的な発見を目指す様々な実験実験が、遂行中あるいは準備中である。ただし、間接的証拠だけでは、標準理論の向こうに何があるのか、その正体を特定することは難しい。そのためには、エネルギーフロンティアの電子陽電子コライダーが必要であり、その第一歩として、「ヒッグスファクトリー」を実現することが素粒子物理コミュニティの国際的コンセンサスとなっている。その

最有力候補が国際リニアコライダー(ILC)であり、早期実現を目指して国際的な枠組みで取り組まれている。

## 代数学分野に関する学術研究動向—整数論および代数学関連分野の最近の発展と展開—

栗原 将人 (慶應義塾大学理工学部・教授)

新型コロナウイルス感染症により、オンラインでの研究集会、セミナーが常態化した。オンラインセミナーは参加しやすいという利点はあるものの、自分の研究分野と少し異なる分野のセミナーへの参加は減る傾向があるように見られる。また、あいまいなアイデアに始まる非公式な議論がしにくいというデメリットがある。

Dasgupta と Kakde は、長らく未解決であった、CM体のイデアル類群が Stickelberger 元で消えるという Brumer-Stark 予想の証明に成功した。もっと正確に、Stickelberger 元がイデアル類群の双対の Fitting イデアルに入るという Strong Brumer-Stark 予想、さらにはイデアル類群の双対の Fitting イデアルの完全決定(Kurihara 予想)も証明した。また、Stickelberger 元に対する Gross 予想も証明し、上記の Brumer-Stark 予想と合わせて、有名な Hilbert の 12 問題(類体の構成問題)を、基礎体が総実代数体の場合に解決した(ただし多変数複素関数の値を使って類体を書くのではなく、ある種の  $p$  進積分を使って類体を書いている)。以上の結果は整数論のブレークスルーとなり、多くの研究者が彼らの結果や方法を使うことにより、新しい結果、たとえば同変岩澤主予想、同変玉河数予想などを証明する状況になっている。H. Johnston, A. Nickel, 片岡武典、熱田真大などがこの方面で優れた研究を行っている。

他の重要な成果についても述べると、関真一郎、甲斐亘、見村万佐人、宗政昭弘、吉野聖人は Green と Tao による「任意の長さの素数等差数列が存在する」という有名な定理を、完全に一般の代数体の整数環とその既約元に拡張した。坂内健一、大下達也、戸次鵬人、山田一紀、山本修司、萩原啓は、ゼータ関数の値に関する新谷理論を新谷生成類というコホモロジーの元で表すと、取り方によらない自然なも

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

のできることを発見し、理論を発展させている。青木美穂、小山信也はリーマン予想の精密化を用いて等差数列の中の素数の個数についての Chevishev の偏りに新しい解釈を与えた。D. Burns, 佐野昂迪、坂本龍太郎は高階の Euler 系、Kolyvagin 系、Stark 系という元の系列で Selmer 群を上から押さえる新理論を構成している。また、坂本は階数 0 の Kolyvagin 系の理論を構成し、楕円曲線の Selmer 群の構造を計算可能な量で表す予想の証明にも成功した。

### 天文学分野に関する国際協力予算の動向

土居 守 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

基礎科学の代表である天文学分野においては、望遠鏡が大型化し、あるいは大気の影響を避けた宇宙からの観測が重要となってきている。一方、研究対象により最適な望遠鏡は様々な特長を有しており、一国ですべての研究対象をカバーして望遠鏡群を用意するのはほぼ不可能になってきている。ただし、一つの望遠鏡によって可能な研究対象は多種多用にあり、日本が主体となるもの、あるいは主要パートナーであるものについては概算要求を行う可能性もあるが、数も多く、すべてをそのような形で進めるのは現実的に困難な状況にある。一方、研究対象ごとに多数の科学研究費で研究予算を確保していく形は、国際的な覚書をまとめて締結して参加していくことが困難で、また個々の科研費の研究期間も短い。

これらの状況をうけて、本調査では、国内の具体的な状況について調査と分析を行うとともに、海外の科学研究費の状況も調査し、適切なしくみの在り方を検討した。なお、調査開始の時点では国際先導研究は存在していなかったが、調査期間の終わりの 2022 年 3 月中旬に公募が出された。国際先導研究は本調査に大きな影響がある費目であるが、初めての費目で、特に審査基準などについて十分な検討材料はないが、基本的条件などをもとに検討を行った。

国内の状況については、特別推進研究、学術変革領域研究さらには公募がぎりぎり始まった国際先導研究に応募あるいは応募を検討している研究者にオンラインでのうちあわせなどを行って調査をおこなった。中国については、

日本語が堪能な中国からの留学生に計算機を用意し、インターネットを通じて資料作成をしてもらい分析を行った。ドイツ、英国、フランスについては日本学術振興会の研究連絡センターの資料も参考にしながら、在住研究者への調査も行い、また European Research Council (ERC) についてはホームページの情報を使っていくつか追加の分析をおこなった。(米国は大規模かつ複数の組織が関係していて日本との比較は簡単ではないとわかったので今回は対象としなかった。)

その結果、海外の大型科研費では、ERC Synergy Grants (10M ユーロ・6 年上限) が予算上限も最大かつ間上限も最長であった。日本の科研費の場合、国際先導研究は予算上限が 5 億円と少し規模が小さいが、研究期間上限が 10 年と画期的である。予算上限については、学術変革領域が最大 15 億円と大きい、研究期間上限が 5 年である。天文学分野における国際協力予算のニーズに対応するためには、国際先導研究の継続と予算上限の拡大、あるいは学術変革領域の研究期間上限の延長のいずれかが望ましいと考えられる。

### 磁性、超伝導および強相関係関連分野に関する学術研究動向—磁性と他分野の境界領域における新たな潮流と展開—

村上 修一 (東京工業大学理学院・教授)

トポロジカル相の物理は、当初はトポロジカル絶縁体などの電子系から始まったが、この 10 年ほど、電子系以外の系へ目覚ましく広がってきた。そもそも、トポロジカル相の物理、特に波数空間でのトポロジカル相については、元を正せば空間的に周期性のある媒質中の波の問題であるので、電子系に限らずフォノン、フォトン、マグノンなど、さまざまな波動現象や準粒子の物理に広く適用できる。フォトニクスにおいては、フォトニック結晶と呼ばれる、人工的に媒質に周期性を導入した系が 1990 年代より研究されている。この系はトポロジカル相と相性がよく、例えば MIT による量子ホール系のフォトニック結晶での実現などは代表例の一つである。フォトニック結晶といっても、

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

電波の領域ではその長さスケールが cm にもなるため周期構造を作ることが容易であり、いろいろなトポロジカル相を実現する試みがすでに発表されている。またこうした系は電気回路とのアナロジーもあり、電気回路系でのトポロジカル相の理論・実験も軌を一にして発展してきた。フォトニクス系（電磁波の系）の特徴は、波長によって実験方法や見られる現象が全く違うことであり、これがトポロジカルフォトニクスに多様性と新規性をもたらしている。また、トポロジカルレーザーなど、トポロジカル相に特有なトポロジカルエッジ状態をレーザー発振に応用するなど、電子系にはない発展もめざましい。

またフォノン系・振動子系・音波の系などのさまざまな振動波動系でも、多様なトポロジカル相実現の試みがある。最も簡便に実現できるものとしては音波の系があり、人工的に周期性を導入した系は sonic crystal と呼ばれる。これは 3D プリンタなどで空隙が周期的になるような特殊な構造物を作って、一方から音波を入れて別の箇所を音波を測定するといった測定がなされている。また力学的な振動子を組み合わせた周期系の実験もいくつか発表されている。

変わった例としては、赤道付近に流れる海流がトポロジカルなものであるという研究結果がある。地球の自転に起因する対称性の破れがトポロジカルな制限を与え、地球上の海流がトポロジカルに非自明になると提案され、この理論と地球上の海流の周波数スペクトルがよく一致することが示されている。このように、いままでトポロジーと関係がないと思われていた現象にも、見方を変えることで新しい側面が見えてきたり、新しい現象を見出せたりという新境地につながるものが興味深く、新しい着想に基づく分野のさらなる広がりが期待できる。

### 半導体、光物性および原子物理関連分野に関する学術研究動向-放射光を用いた強相関電子系に関する研究の動向調査-

木村 昭夫（広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授）

強相関電子系の研究は、物性物理学でも中心課題の一つで

あるが、電子間に働く強い相互作用がその理論的取り扱いを難しくしており、物性発現機構の理解が進んでいない。このような強相関電子系では、電荷・軌道・スピン・格子の自由度が絡み合っており、互いに相互作用をしていると考えられており、それぞれの自由度にピンポイントで焦点を合わせて情報を導き出すことが、それらの物性発現機構解明につながると考えられている。共鳴非弾性散乱 (RIXS) は角度分解光電子分光 (ARPES) に比べバルク感度が高く、最近の革新的な実験装置の高度化により、高い精度での実験が可能になり、強相関電子系における電荷・軌道・スピン・格子の自由度の理解が深まっていった。特に、Fe 系超伝導体をはじめとする多軌道相関物質については理論的取り扱いも難しく、RIXS の実験結果の解釈が困難である中、実験の高度化に伴って精度の良い実験結果が得られ、理論計算手法の高度化も必要になってきた。そこで、RIXS を用いた最新の実験研究とそれに伴う計算手法の開発状況について研究動向を調査した。

欧米の放射光施設には RIXS の実験ステーションが新たに建設され、さまざまな強相関電子系における dd 励起、電荷移動、フォノンやスピン励起などの検出が次々と報告された。特に鉄系超伝導体や Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> など、銅酸化物系とは異なる非従来型超伝導をはじめとした多軌道相関物質には、スピン、電荷、軌道の秩序化、巨大・超巨大磁気抵抗、金属-絶縁体転移など、多くの興味深い現象が現れる。これらの多軌道相関物質は、ハバード相互作用によって特徴づけられる電荷相関だけでなく、フント結合によって決定される軌道相関を受ける。これらは、ARPES でも調べられているが、RIXS は、バルク、元素、軌道の感度などいくつかの利点を持っているため多軌道相関物質への適用は大変有効である。そこで、グリーン関数のキュムラント展開と、時間依存密度汎関数法を用いて第一原理的に最近では RIXS のスペクトル関数を求める理論構築がなされ鉄系超伝導体に適用された。

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

### 幾何学関連分野(複素幾何学・微分幾何学)に関する学術研究動向 —幾何学全般, およびその周辺領域における新たな潮流とその発展—

中川 泰宏(熊本大学大学院先端科学研究部・教授)

2021年度は、「日本数学会2021年度年会(2021年3月15~18日・慶応義塾大学)」, および「日本数学会2021年度秋季総合分科会(2021年9月14~17日・千葉大学)」が新型コロナウイルスの影響により相次いでオンライン開催となり, 今年度の学術研究動向調査もどうなることかと心配されたのだが, 2年目ということもあり, 比較的スムーズに各種のセミナー発表や研究集会がZoom等を用いてネット開催されていた。昨年度も感じたことであるが, ネット開催での研究発表には, 良い点もあれば, 悪い点もあるように思われる。良い点としては, 例えば東京で開催されている研究集会での講演を聞いた直後に九州で開催されているセミナーでの講演を聞くといったようなことが問題なく可能になったことであろう。悪い点としては, 気楽に質問することがやりにくいという点があげられるように思う。対面で実施されていれば, 講演の終了後などにちょっとした質問を気軽にできていたように思う。また秋以降は対面とオンラインを併用するハイブリッド型の研究集会の数も増えてきた。実際, 「第27回複素幾何シンポジウム(金沢)2021」は大阪大学での対面講演(およびそのオンライン配信)とオンライン講演とのハイブリッド型で実施された。私自身はオンラインで参加したのだが, 情報収集などという面から考えると, やはり対面での参加のほうが良かったのではないかと感じた。

そんな中, 担当者の専門分野である幾何学においては, 多くの若手研究者が活躍していたように感じた。中でも, 塚本真輝氏(九州大学)は「力学系における平均次元の研究」が評価され, 2021年度日本数学会春季省を受賞した。「平均次元」は無次元の力学系を解析するためにグロモフにより導入された概念であり, 塚本氏はグロモフの研究を発展させる幾何解析的な成果を上げている。また近年は, 力学系の埋め込み問題や, データの圧縮などの情報理論と

関連する研究も進めている。

幾何学という分野では勿論若手のみが活躍しているわけではない。Martin Guest氏(早稲田大学)が2021年度日本数学会秋季賞を受賞した。受賞業績は「 $tt^*$ 方程式および量子コホモロジーに関する一連の研究」というものであり, 幾何学, トポロジー, 可積分系, 非線形偏微分方程式, 数理論理学といった多数の分野に跨る非常に興味深い研究である。

また複素幾何学, 特に私の研究テーマに近い分野においてのここ数年での目立った動きは, 若手の優秀な代数幾何学者が多数参入してきていることである。

### 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理理論分野に関する学術研究動向 —重力、弦理論、量子情報、凝縮系物理を巻き込むブラックホールの新しい潮流と展開—

初田 真知子(順天堂大学保健医療学部・教授)

近年, ブラックホールの天体観測に加え重力波及びマルチメッセンジャーによる観測が進み, 多様な質量のブラックホール形成, 連星ブラックホール形成, 原子ブラックホール起源などの解明に向けた研究が進んでいる。これらは一般相対論の検証及び新しい重力理論の探査のエビデンスとなる。さらにブラックホールの蒸発過程やワームホールについてなど量子重力理論への足掛かりとなる新しい潮流について報告する。

近年のブラックホールに関する観測は目覚ましいものがある。2015年に世界で初めて連星ブラックホールが重力波で観測されて以降, これまで考えられていたブラックホールの質量よりも重い巨大ブラックホールなど, 様々な質量のブラックホールが存在することがわかってきた。恒星の運動による通常のドップラー効果である赤方偏移とは異なる, 巨大ブラックホール候補天体の重力による重力ドップラー効果が2018年に検出された。2019年には巨大ブラックホールの影が, 世界中のミリ波・サブミリ波望遠鏡が連携して高解像度の観測を実現する国際プロジェクト「イベント・ホライズン・テレスコープ(Event Horizon Telescope; EHT)」で撮像された。さらに磁場の効果など

## 令和3年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

電磁気学及びブラックホールのダイナミックスの解明などが展開されている。これらの観測により多様な質量のブラックホール形成、連星ブラックホール形成、原子ブラックホール起源などの解明の研究が進んでいる。これらは一般相対論の検証及び新しい重力理論の探査のエビデンスとなる。

新しい重力理論としての弦理論は量子重力理論の候補である。近年、弦理論によるブラックホールの研究が盛んに行われている。一般相対論の解としてアインシュタイン・ローゼン橋とも呼ばれる、2つのブラックホールの外部を結んでいるワームホールと呼ばれる構造がある。ワームホールと量子情報のエンタングルメント（量子もつれ）との関連、ブラックホールの情報と量子理論におけるユニタリティとの無矛盾性の問題、ブラックホールの蒸発過程の問題などが注目されている。エンタングルメントと幾何学との関係の一般化などが、量子重力の謎の解明に向けて展開されている。量子物質のダイナミクスや冷却原子実験などの凝縮系物理への応用が、ゲージ・重力対応（ホログラフィック原理）を用いて展開されている。