

提 言

人類の持続性確保に貢献する
フロンティア人工物科学技術の推進



2011年（平成23年） 9月30日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

フロンティア人工物分科会

この提言は、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア人工物分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
フロンティア人工物分科会

委員長	久保田 弘敏	(連携会員)	帝京大学大学院理工学研究科長、東京大学名誉教授
副委員長	平 朝彦	(第三部会員)	(独) 海洋研究開発機構理事・地球深部探査センター長
幹事	大和 裕幸	(連携会員)	東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻教授
幹事	松尾 亜紀子	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部機械工学科教授
	柘植 綾夫	(第三部会員)	芝浦工業大学学長
	河野 通方	(連携会員)	(独) 大学評価・学位授与機構教授、東京大学名誉教授
	中須賀 真一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授
	中橋 和博	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻教授
	萩原 一郎	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻教授
	藤井 孝藏	(連携会員)	(独) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 副所長・教授
	松岡 猛	(連携会員)	宇都宮大学工学部機械システム工学科客員教授
	的川 泰宣	(連携会員)	(独) 宇宙航空研究開発機構技術参与・名誉教授、東海大学教授、NPO 子ども・宇宙・未来の会会長

要 旨

1 作成の背景

宇宙および海洋での活動は高真空、微小重力、高圧、高温、低圧、低温、遠隔、無人等の極限状態を開発・利用し人類の未来を切り拓くフロンティアに属し、第3期科学技術基本計画の中で8つの推進分野の一つと位置づけられている。これに社会基盤としての新しい航空、船舶システムを含めた航空宇宙・船舶海洋およびそれらに付随する先端的人工物を「フロンティア人工物」とし、その科学技術を「フロンティア人工物科学技術」と定義する。

この分野は、全地球的および地球外への輸送システムとしての航空宇宙・船舶海洋科学技術、地球のダイナミクスの解明を行う地球海洋観測・探査、地球外フロンティア開拓を担う宇宙開発・探査を包含し、安全・安心で豊かな生活の実現とともに、現在地球が直面しているエネルギー・環境問題の解決、大地震などの防災科学にも深く関わり、人類の持続性確保に深い関連を有している。未知のフロンティアの解明を行う理学とフロンティアに到達するための工学、この二つの分野にわたる知識によって巨大システムを構築する能力を作り出すことが必要である。

本提言は、フロンティア人工物領域の科学技術の現状と問題点を抽出し、その推進の方策を提言するものである。

2 現状および問題点

全地球的輸送システムである航空・船舶の技術の進歩は著しく、輸送機関としての使命を果たしているが、安全性やエネルギー・環境問題に対応する必要がある。航空機技術、航空システム、船舶技術、海上物流システムの新たな展開が要求されている。地球外輸送システムの発達によって、これまで科学研究の対象であった宇宙が既に実利用の場になっている。しかし、いずれにも科学技術知識の伝承や若手育成、産業基盤の発展等の面で課題がある。人工衛星や深海底探査船を用いた海洋地球観測・探査の計画は地球のダイナミクス解明に利用され、これらを統括する国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」が策定されているが、理工学および他分野との連携の面で課題が多く、研究者コミュニティの構築が急務である。

地球外フロンティア開拓の観点からは、「かぐや」や「はやぶさ」等の月・惑星探査の成果によって人類の活動範囲の拡大の可能性が示されている。これらは地球海洋探査技術とともに、人類の持続性確保に貢献しうるものであり、国の重要な施策として推進してゆく必要がある。

3 提言の内容

フロンティア人工物科学技術は全地球的および地球外輸送系の構築を通して、安全・安心な社会・豊かな生活をもたらし、地球のダイナミクスの解明および地球外フロンティア開拓の観点から、新しい自然観および地球観を創成し、人類社会が直面する地球規模のエネルギー・環境課題の解決に貢献する。人類の持続性を確保し得る輸送系の提供とエネルギー・環境課題の解決のために、フロンティア人工物科学技術を早急に推進すべきであるという観点から次の提言を行う。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

- ① 国は、フロンティア人工物領域の成果が人類の持続性確保に貢献するという認識に立って政策を立案するべきである。
- ② 国は、フロンティア人工物領域では企画立案とともにそのプロジェクトの評価手法も確立する必要がある。
- ③ 国は、フロンティア人工物領域の創造的研究を主導し、それによって次世代を担う若者の科学への動機付けを行うべきである。
- ④ 国は、府省庁を越えた立場に立って長期的・俯瞰的な観点から高度なステアリングを行うための組織を作るべきである。
- ⑤ 「宇宙基本法」および「海洋基本法」によって宇宙開発戦略本部や総合海洋政策本部が設置されたが、これらは互いに協力し俯瞰的な施策を行うべきである。

(2) 長期的研究体制と科学者コミュニティの構築

- ① フロンティア人工物領域の科学者は個人や組織の属する領域を超えた有機的な連携をするコミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- ② 国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」においては、全日本的な永続的かつ学際的な研究組織の構築が望ましい。

(3) 技術の高度化と産業基盤の育成

フロンティア人工物領域では、その開発・製造を担当する新しい産業基盤が不可欠であるので、国は、その育成に努めるべきである。

(4) 国際協力への積極的参加

国および科学者コミュニティは、国際的なプロジェクトに積極的に参加するとともに、世界の中心拠点となるように努めるべきである。

(5) 人材育成とアウトリーチの推進

① 人材育成に関して：

システム全体を把握し牽引できる新しい人材の育成が必須である。このことは確立された体系の伝授でなく国家主導のプロジェクト研究のなかで涵養される能力である。そのため、国は研究開発プロジェクトを推進する資金制度を確立し、若手の研究者自身もプロジェクト研究の重要性を認識して、積極的に参加するべきである。また、国は、フロンティア人工物科学技術に基づく教育を重視し、「教育・科学技術・イノベーション」の三位一体的推進を行うべきである。

② アウトリーチの推進に関して：

フロンティア人工物分野のコミュニティは、国民へのアウトリーチ活動を主導し、とくに小中高レベルの生徒への普及啓発活動に努め、また、学会や科学ジャーナリズムは専門家と国民全体との間をつなぐ役割を果たすべきである。

目 次

1 序論：人類の活動における航空宇宙・船舶海洋フロンティア人工物	
－フロンティア人工物科学技術は人類の持続性確保にどう関わるか	1
(1) フロンティア人工物科学技術とは何か	1
(2) 今、なぜフロンティア人工物科学技術を議論するのか	
－提言の意義	1
2 フロンティア人工物科学技術の役割と現状および重要課題	5
(1) 全地球的および地球外への輸送に貢献するフロンティア人工物	5
① 全地球的および地球外への輸送の現状	
ア 航空フロンティア人工物	
イ 船舶・海洋輸送のフロンティア人工物	
ウ 宇宙輸送のフロンティア人工物	
② 全地球および地球外輸送システムとしてのフロンティア人工物の展望	
ア 健全なビジョン構築と国の明確な政策立案の必要性	
イ 輸送システム技術の展望	
(2) 地球ダイナミクス解明とフロンティア人工物	12
① 地球ダイナミクス解明の現状	
ア 新しい地球観測システムの創造	
イ 地球ダイナミクス解明における総合観測の必要性	
ウ 国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の現状と課題	
② 地球ダイナミクス解明における展望	
ア 地球観測における多分野連携の必要性	
イ 地球ダイナミクス解明のための体制構築	
(3) 地球外フロンティア開拓におけるフロンティア人工物	16
① 地球外フロンティア開拓における成果	
ア 宇宙探査の現状	
イ 宇宙探査に関する世界および日本の動向	
② 宇宙探査政策実施上の留意点	
ア 次世代の科学技術への動機付け	
イ 加点法による政策評価の必要性	
(4) 共通の重要課題	19
① 国家的政策立案の必要性	
ア 長期的視点から見た人類の持続性確保のための政策	

イ	長期的・俯瞰的な立場からの政策	
ウ	プロジェクトの評価手法の確立	
②	長期的研究体制と科学者コミュニティ構築の必要性	
ア	フロンティアという観点からの長期的研究体制	
イ	学際的な研究組織の構築	
③	技術の高度化と産業基盤育成の必要性	
ア	高度な技術力の確立と産業基盤の育成	
イ	インセンティブがもたらす産業経済効果の期待	
④	国際協力への積極的な参加の必要性	
⑤	人材育成の必要性	
ア	俯瞰的能力を持った人材の育成	
イ	教育・科学技術・イノベーション政策の三位一体推進	
3	提言	22
(1)	明確な国家的政策立案と施策	22
(2)	長期的研究体制と科学者コミュニティの構築	23
(3)	技術の高度化と産業基盤の育成	23
(4)	国際協力への積極的参加	23
(5)	人材育成とアウトリーチの推進	23
4	おわりに	25
	<参考文献>	25
	<参考資料>	
1	総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア人工物分科会 審議経過	27
2	シンポジウム「未来を開くフロンティア人工物の展開と課題」プロ グラム	29

1 序論：人類の活動における航空宇宙・船舶海洋フロンティア人工物 －フロンティア人工物科学技術は人類の持続性確保にどう関わるか

(1) フロンティア人工物科学技術とは何か

宇宙および海洋での活動は、高真空、微小重力、高圧、高温、低圧、低温、遠隔、無人等の極限状態を開発・利用することで人類の未来を切り拓くフロンティア活動に属する。この分野の科学技術の進歩によって人類社会の著しい経済的発展をもたらす可能性が見込まれるものとして、総合科学技術会議の第3期科学技術基本計画でも8つの推進科学技術分野の一つと位置づけられている。この宇宙および海洋における活動での社会基盤となる新しい航空、船舶システムを含めた航空宇宙・船舶海洋およびそれらに付随する先端的人工物を「フロンティア人工物」とし、そのための科学技術を「フロンティア人工物科学技術」と定義する。また「フロンティア人工物」は、個々の機能が有機的につながり複雑な機能を実現し、惑星や海底の探査など与えられた目標を実現することが必要であり、巨大なシステムとなる。

従来、航空宇宙と船舶海洋の分野の活動は別々に行われていたが、今後は、後に述べる人工衛星による観測を海洋地球観測・探査に利用する「海洋地球観測探査システム」のように有機的に連携・協力できる可能性が大きく、フロンティア人工物領域としての宇宙と海洋の連携活動は第3期科学技術基本計画の総括的・分野別フォローアップにおいても高く評価されている。

(2) 今、なぜフロンティア人工物科学技術を議論するのか ー提言の意義

フロンティアへの好奇心、それに挑む心は人類の本質であり、驚きと感銘なくしては人類の発展もない。空、宇宙、そして海洋は、その美しさと不思議さから長く興味とチャレンジ精神をかき立てる対象であった。船舶は人類の出現以来現在まで、水上の移動手段として人類の活動領域の拡大に使用されていたが、15世紀の「大航海時代」には、人々はヨーロッパから未知の大海に漕ぎ出して新大陸を発見し、人類の活動領域はさらに著しく拡大した。20世紀初頭に発明されたライト兄弟の飛行機は、鳥のように空を飛ぶという人類の夢を実現し、その後の技術の発達によって、高速かつ三次元の移動を可能とした。1961年にはガガーリンが人類初の地球周回飛行を行い、宇宙への活動の端緒を開いた。宇宙への進出は、地球における「大航海時代」と同様、人類のチャレンジ精神の表れであった。

最近では、月周回衛星「かぐや」が月全域について高精度の観測データを取得し、月の起源と進化に関する研究が開始されている。小惑星「イト

カワ」の探査機「はやぶさ」は7年間にわたる航行の末に地球に帰還し、全国民に科学の面白さと大きな感動を与えた。「かぐや」が送ってきた美しい画像や「はやぶさ」による未開拓な宇宙へのチャレンジが国民の関心を呼んだのであろう。また、地球深部探査船「ちきゅう」がもたらす地球の新しい情報は多くの国民に大きな興味を持って迎えられている。

一方、フロンティアへの挑戦は、チャレンジ精神を満たすだけが目的ではない。人類の知的好奇心が、空、宇宙、海洋へと挑むための革新的な移動手段を生みだし、それが我々の日常生活にも還元されて精神的にも物質的にも豊かな生活へと導いている。長距離の高速移動を可能にする航空機の出現は人類の様々な交流を可能とし、地球上の人口が集中している三極（ヨーロッパ、北アメリカ、アジア）を無着陸で結ぶことを可能にしている。メガコンテナ船等を含む近代的な船舶は、大型化、高速化によって交通と物流に技術革新をもたらしている。宇宙空間に打ち上げられた人工衛星は気象予報、通信、放送、測位等の世界に革新をもたらし、日常の人間社会に無くてはならないものとなっている。深海探査船も地球構造を解明するとともに、新たな資源や生命体の発見をもたらしている。つまり航空宇宙・船舶海洋のフロンティア人工物が、科学技術の牽引役を担ってきたともいえよう。人類にとって新たな試練とも言うべき地球環境問題でも、上記の観測結果に基づく正しい地球環境の理解なしには対応策をたてることもできず、航空宇宙・船舶海洋フロンティア人工物が果たすべき役割は大きい。

このようなフロンティア人工物科学技術は、国としての科学技術政策においても重要と考えられている。冒頭に述べた総合科学技術会議の第3期科学技術基本計画では、宇宙・海洋はフロンティア分野として、8つの推進科学技術分野の一つと位置づけられており、航空・船舶は社会基盤分野に取り入れられている¹⁾。これらの科学技術は、未来の社会にイノベーションを起すものとして期待されており、第4期科学技術基本計画でも、宇宙と海洋の両領域が連携して、国民の安全確保、地球環境問題への対応促進および新フロンティア開拓に向けた科学技術基盤の構築に貢献することが目標とされている²⁾。また日本学術会議による総合的な科学・技術政策の確立に関する勧告は、長期的な政策の確立や人材育成を趣旨としているが、本提言でもそのことを必須と考えている³⁾。また、学術の大型研究計画分科会からの提言でも具体的な内容が記され、例として、全地球生命史解読と地下生物圏探査計画の提案等も行われつつある⁴⁾。今後は地球惑星科学や生命科学などの様々なコミュニティが合同してさらに議論し、航空宇宙、船舶海洋の技術を総動員し、フロンティアで何を目指すかを構想し、実行することが必要である。総合科学技術会議と「車の両輪」の関係にある

日本学術会議は、総合科学技術会議と連携をとって、社会・経済・文化面の他分野統合も考慮して、俯瞰的・横断的な立場から、その施策への助言・支援を行うべきであろう⁵⁾。

宇宙探査においては、我が国は、「はやぶさ」の成果を得、高度の惑星探査の分野において世界的にも主導的な立場にたった。太陽系の探査は、地球と他の惑星を比較して考える新しい自然観を生み出した。過去に海洋が存在し、生命が存在したかもしれない火星や、メタンの海や氷で覆われた土星や木星の衛星を知ることにより、地球と人類の未来を考える新しい視点が誕生している。宇宙フロンティアへの人類の活動範囲の拡大こそが、次世代の国家、世界、人類の構築に貢献することを考えると、宇宙探査は、我が国が国際的にも主導すべき領域であるといえる。

地球を観測することの重要性は近年、増々大きくなっている。2007年は、地球と人間の未来にとって重要な年であった。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する政府間パネル) の第4次評価報告書⁶⁾において、地球温暖化が確実に起っていること、そしてその原因は人為起源の温室効果ガスの排出であることを強く指摘したからである。人間生活の向上のためには経済発展は不可欠であるが、そのためのエネルギーを今後どのように確保していくのかという問題が、環境対策に対する問題と並行して存在する。

現在、地球環境変動の予測は長期にわたる経済発展や技術革新などの見通しが立て難いため、今後100年程度の時間スケールで行われている。一方、過去の地球の気候や環境変動は、数100年から1000年スケールで大きな変動を起こしているが、我々の地球に関する知識や理解は、そのようなスケールでの変動を予測できる域にまだ達していない。新しい地球環境変動学の創成が不可欠となっている。さらに、近年の地殻内部生物圏の発見は、我々の地球観を根本から変えつつある。地下数kmの岩石の隙間、割れ目や断層中などに、地表全体の生物圏に匹敵するバイオマスが存在する可能性は、まさに驚愕すべきことである。「ちきゅう」の今後の活躍が期待できる分野であり、また、太陽系の内外における生命探査とも相まって、新しい学問領域(アストロバイオロジー)の開拓が必要である。

21世紀になり、人為作用による地球の変化が前例のない速度で起っている。従来からの対策に加えて、宇宙・地球・海洋のフロンティアへの新たな挑戦を通じて、より幅広く、より長期的な視点から我々の存在を見なおす時期が到来している。すなわち、今後100年、1000年スケールでの人類持続性の確保は、新しい地球観の上に構築されるべきである。

以上のように、地球温暖化などわが国および地球における諸問題の理解と解決に、フロンティア人工物領域の科学技術の推進は不可欠である。今

後も社会から強く要請される地球上および地球外への先進的な輸送手段の提供、未知なるものの探求という面で、人類の活動領域の拡大に貢献する責務がある。

この分野の長期的な発展のためには人材育成が極めて重要な課題であり、様々な分野を俯瞰して技術を総合する能力を持った人材の育成が必須である。これらは大学大学院等に理工連携などによる新しい教育システムを作るとともに、座学ばかりでなく実際にプロジェクトに参加する中で教育を行うことが必要である。また次世代を担う小・中・高校生に対してフロンティア科学技術のおもしろさや責務の重要性を伝えていかななくてはならない。

フロンティア人工物領域の科学技術は、宇宙・地球・海洋の観測・探査を通して、新しい自然観の構築に貢献する。さらに理学と工学の融合により、直面しているエネルギー・環境問題の危機を解決する義務も有している。その第一歩は今、踏み出さねばならない。

本提言は、フロンティア人工物領域の科学技術が、以上のような命題にどう応えられるか、およびどう応えるべきかについて、その具体策の考察、分析、提案を行った。本提言では、第2章でフロンティア人工物科学技術の役割と現状を他分野の状況と比較しながら述べ、さらに重要課題と展望を俯瞰的・横断的な立場から述べた。これらの重要課題を解決するには様々な努力が必要であることに鑑み、第3章においていくつかの提言を行った。

本提言を作成するに際し、分科会における議論（参考資料1）を基にするとともに、2010年8月26日に日本学術会議講堂で開催されたシンポジウム「未来を開くフロンティア人工物の展開と課題」（主催：本分科会および地球惑星科学委員会地球惑星科学企画分科会）における討論⁷⁾を参考にした。そのプログラムを参考資料2に掲載した。また、同シンポジウムの内容は、日本学術会議の「学術の動向」3月号の特集1として公表されている⁸⁾。

本提言を作成するために協力いただいた各方面に感謝する次第である。

2 フロンティア人工物科学技術の役割と現状および重要課題

序論では、フロンティア人工物領域の科学技術は、今後も社会から強く要請される地球上および地球外への先進的な輸送手段の提供、未知なるものの探求という面で人類の活動領域の拡大に貢献する責務があることを述べた。また、宇宙・地球・海洋の観測・探査を通して、新しい自然観の構築に貢献し、さらに理学と工学の融合により、直面しているエネルギー・環境問題の危機を解決する義務も有していることを指摘した。またフロンティア人工物領域の科学技術では、流体力学、熱機関、構造材料、通信や制御技術、設計システムなど広範な学術や技術の基礎の上に、宇宙や深海などの極限世界の探査などに対応するシステムを構築してきたことにも留意するべきである。

そこで、本章では、その根拠となるフロンティア人工物領域の科学技術の役割および現状を

- (1) 全地球的および地球外への輸送
- (2) 地球ダイナミクスの解明
- (3) 地球外フロンティア開拓

の3つの観点から概観し、その課題を述べることとする。

(1) 全地球的および地球外への輸送に貢献するフロンティア人工物

① 全地球的および地球外への輸送の現状

ア 航空フロンティア人工物

航空技術は1903年のライト兄弟の初飛行以来、三次元的な革新的移動・輸送手段を提供して、安全・安心で豊かな生活のための社会基盤となるフロンティア人工物であるとともに、人類の知的好奇心に応える感動を与えている。航空技術は輸送手段として日常の生活に溶け込み、成熟技術の感があるが、その技術革新の勢いは未だに衰えていない。地球環境保全のための最先端科学技術の推進という重要な役割も担っている。

(ア)「航空ルネッサンス」への期待

序論で述べたように、長距離航空機は、地球上の人口が集中している三極を無着陸で結ぶことを可能にし、国際的な文化交流にも寄与してきた。近年、環境適合性や安全性の向上要求の高まりから、CO₂排出や騒音を飛躍的に減らす次世代航空機の研究活動が活発化している。小型航空機においても安全性改善や低価格化が進み、米国では地域間交通や私的交通としての使用が拡大しつつある。航空機技術のこれら新たな展開は、たとえば有限要素法、動的計画法などをはじめとした計算科学を駆使した設計技術や先進材料開発、ロボット技術などの基盤学問の発展というシーズによるものであり、環境問題への対応の必要性とも相まって今まさに「航空ルネッ

サンス」が始まろうとしている。一方で、多様な航空交通の増大は航空機の安全性の向上なくしては成り立たない。高度に大型化・高速化した機械システムやその運航でのヒューマンファクターのあり方についての根本的な見直し、航空事故ゼロへの道を開く必要がある。テロに対する配慮も必要である。

世界の航空旅客需要は、日本航空機開発協会の予測によると、20年後には現在の約2.7倍に増大する⁹⁾。航空交通のこの大きな成長率に対し、米国および欧州は共に航空機産業の成長戦略とも言うべきビジョンを21世紀になって発表している¹⁰⁾。航空交通の健全な発展には安全性の向上とともにCO₂排気・空港騒音の大幅削減等、環境面からの航空機技術の一層の改善・革新が必要であることを強調し、先端技術を担う高付加価値産業のさらなる発展を目指している。これを背景に米国では2006年に航空技術開発についての大統領令が発令されて具体的な施策が行われている。様々な航空機が飛び交う近未来の航空管制のためのNEXTGen (Next Generation Air Transportation System)の開発強化もその一環である。欧州でも、“CLEAN SKY” Joint Technology Initiativeという取り組みを2008年から始めた。航空機開発における産官学の全欧州的な連携により7年以内にCO₂排出量を40%、NO_xを40%、騒音レベルの20デシベル減少を目指す野心的なものである。

(イ) 国産航空機開発の現状

我が国では、年間の国内航空旅客数が1億人近くに達し、東京－札幌の路線は旅客輸送数が世界最大であるなど、航空交通の需要は大きい。しかしながら、航空機産業は我が国GDP比で0.2%程度であり、それ故に航空科学技術の研究も欧米に比べると心もとない。我が国の独自開発による民間航空機は、ターボプロップ機YS-11以来、長い空白期間があったが、三菱重工業が主体となつてのジェット旅客機MRJの事業が2008年より開始された。防衛省でも対戦哨戒機PXや輸送機CXの開発が行われ、前者は2007年に、後者は2010年に初飛行を成功させている。国内の航空機メーカーはボーイング社等の下請けとして製造技術の向上に努めてきており、ボーイング787型機では主翼を含む35%の製造分担を行うまでになっているが、このことも独自開発につながったとも言えよう。

(ウ) 航空機産業育成と先端科学技術の発展および人材育成

過去、航空機開発はそれに必要な計算科学をはじめとする様々な学問分野を牽引してきた。今日、航空技術は社会基盤の一つとなっているものの、未だに最先端技術が常に求められる分野であり波及効果大きい。欧米が航空産業の育成を重要視しているのも、それに関連した先端技術の取得、学術の高度化を意識してのことであろう。しかしながら、我が国は航空機

産業を今後どのように育成するかのビジョンは欧米ほどには明確ではない。我が国は様々な基盤技術が他国に例を見ないくらい充実しているため、総合的な産業である航空機産業には適している。世界の航空交通需要を満たす安全・安心で高効率な航空機産業を構築することは、世界に対する貢献という意味でも、また国家の安全の基礎の確立という意味でも重要である。過去に繊維や造船等の産業が日本を豊かにし、現在は自動車産業が基幹産業として日本の製造業を支えているが、より知識集約産業である航空機産業を次の基幹産業の一つに育てるべきである。旅客機を含む航空機産業の健全な発展を目指して、欧米航空機メーカーとの関係強化、独自開発、さらにはアジア諸国との連携など、様々な可能性を議論し航空機産業の更なる育成を図る必要がある。我が国の航空技術の基盤を高めることが、そのシーズとなる様々な学問分野を発展させ、且つ構想、設計、運用等のシステムの全体を「俯瞰的」視点で見ることのできる人材を育て、フロンティア人工物のイノベーションの前提条件にもなる。

イ 船舶・海洋輸送のフロンティア人工物

地球の表面積の70%を占める海洋は、人類にとっては食料、資源、エネルギー供給源であり、また国際物流の場でもある。地球の理解や利用のために、また人類の科学の発展のために新しい地球像をもとめて、研究は海中から海底へと進んで行かなくてはならない。宇宙探査技術による地球外惑星での観測に基づくアストロバイオロジー研究などとともに、直接海洋を対象とする探査や開発技術の発展が必須である。

(ア) 海中フロンティア探査

海中の生物や海底面の探査には有人無人の各種潜水艇が利用される。有人探査システムとしての「しんかい 6500」は最大 6500 m の潜航能力を持ち、現在は世界最深である。超高水圧の環境であり、十分な強度を持つ材料で、極めて高い精度で真球を製造する基盤的な産業技術が必要である。無人探査機「かいこう 7000」は、母船からケーブルでランチャーとビークルが結合されており、ビークルは 7000 m まで潜航して、各種センサーで記録をとるほかマニピュレータで試料の採取などが行える。ランチャーは 11000 m まで達することができ、音波によって地形のプロファイリングを行うことができる。無人であるので危険のともなう作業も可能である。

ROV (Remotely Operated Vehicle) と AUV (Autonomous Underwater Vehicle) は海中ロボット技術と呼ばれ、前者は母船からケーブルでつながった遠隔操作のロボットで、後者は母船から離れるとあとは自律的にミッションを遂行する。明神礁での熱水鉱床の発見や、深海の蟹の生態観察など多くの成果を上げている¹¹⁾。

海洋研究開発機構では、位相共役波を用いた水中音響システムの研究も

行い、自立型無人探査機「うらしま」で 300 km の長距離音響通信にも成功している。いずれも完成度は高いシステムであるが、海底プロファイリングや海底熱水鉱床の探査など開発目標を明確にして、数千台のロボットを同時に投入して迅速に観測を行うことなどが是非必要である。これらの開発を行う深海水槽などの研究施設整備も必要である。

(イ) 海洋エネルギー

海洋エネルギーには、メタンハイドレートのような採取してくるものと、風力、波力、潮力などの再生可能なものがある。

メタンハイドレートはシャーベット化したメタンで、冷却した状態での取り扱いが必要になる。日本近海には相当量があると言われ、得られるエネルギー量に対して排出二酸化炭素量が少ないために将来のエネルギー源として期待される。しかし、基礎的な物性も不明で、実際の賦存量や採取可能性、開発と生産に関するコストや採取後の環境影響などをまず明確にしなくてはならない。

風力発電については陸上での実績があるが、洋上風力発電は、電力の消費場所から離れ、海水環境でもありコスト高である。潮力発電については、発電システム自体は難しくないが良好な稼働状態の確保できる場所がそれほど多くない。実際に運用して、最適配置やコストの削減などに取り組まなくてはならない。

(ウ) 海上交通

2050年の海上輸送量を IPCC などのシナリオに基づいて計算してみると、輸送量全体は 2010 年の 2 倍強になる。2010 年には海上輸送量の半分は原油であるが、これは 2020 年頃から漸減し 2050 年にも 2010 年と同程度の量である。一方コンテナ船による製品の輸送は急増し、2050 年には総量の半分になる。コンテナ船の量は現在の 4 倍になる^{1 2)}。コンテナ船は速度が速く、二酸化炭素の排出量は大きい。従来の内燃機関では二酸化炭素の発生を抑えることは不可能で、燃料電池へ転換し、燃料も重油からメタノール、LNG、水素への転換を考えつつある。さらに空気を船底に吹き出し、摩擦抵抗の低減をはかるシステムの実用化がなされている。航路計画の合理化などで効率的な運行を行うことも重要課題である。

(エ) 海洋フロンティア技術の将来

海洋フロンティア技術は、科学的な地球探査にしてもまた工学的な探査にしても AUV による熱水鉱床探査システムやメタンハイドレート掘削技術など、喫緊だが今後開発するべき課題が多い。大変に長い期間と巨額の投資が必要で、逆に得られる便益は不確定である。しかし、海底ボーリングによる生命や地震の解明に関する理学系分野や、潮流や海象計測など航空宇宙工学分野と共同して行う成果による新しい地球観の確立とそこから

派生する人類にとって有用な工学的な知見は、環境やエネルギーなどの問題の根本的な解決には必須である。これらは国民の利益や安全に直接関係しており、国民生活に与える影響も大きい。これらを俯瞰的に見る目を養いつつ、当面は最近注目されつつある熱水鉱床の開発や、IODP (International Ocean Drilling Program) の展開を支える技術などを中心に深海水槽の準備や探査船開発のための産業技術の維持、これらプロジェクトの大学での教育への展開につなげて行くべきである。

ウ 宇宙輸送のフロンティア人工物

序論で述べたように、宇宙は地理的、技術的な側面で、まさにフロンティアである。宇宙輸送は、高真空、微小重力、高温、低圧、低温、遠隔等の極限状態を克服しながら、地球上と宇宙空間の間の三次元的な移動を可能としてきた。大学等のアカデミアの貢献が多岐であり、材料技術の進歩による大型化軽量化やエンジン出力の増大、センサー技術の進歩による高度な制御システムの実現など枚挙にいとまがない。これらのアカデミア発の基礎技術が理学的な観測ニーズに対応する複雑なシステムを支えてきた。19世紀から20世紀の初頭にかけてジュール・ベルヌ、チオルコフスキー、ヘルマン・オーベルト等のパイオニアが夢見た宇宙旅行も可能となってきた。

(ア) ロケットと人工衛星

現在の代表的な宇宙輸送システムであるロケットは、1903年にチオルコフスキーがその推進理論を発表して以来、アメリカ、旧ソ連を中心に高性能化、大型化が図られ、宇宙空間への人工衛星打上げの役割を果たしてきた。静止軌道に打ち上げられた気象観測衛星通信衛星や放送衛星、中・低軌道の通信・測位衛星、地球観測衛星等は、それぞれのミッションを果たすことで社会に大きく貢献している。今や、人間社会は人工衛星の恩恵無しには成り立たないと言っても過言ではない。

日本では、1955年に東京大学生産技術研究所の糸川英夫博士がペンシルロケットの研究開発を開始して以来、文部科学省の宇宙科学研究所 (ISAS) における科学衛星を打ち上げるカップパ、ラムダ、ミュー等の固体ロケット、宇宙開発事業団 (NASDA) における実用衛星を打ち上げる N-I、N-II、H-I、H-II 等の液体ロケットを開発してきた。ISAS および NASDA は、NAL (科学技術庁航空宇宙技術研究所) とともに 2003 年に統合されて宇宙航空研究開発機構 (JAXA) となり、現時点では JAXA は宇宙開発・利用の中核機関となっている。JAXA が開発し、三菱重工業株式会社に運用が移管された H-IIA ロケットは日本の基幹ロケットの役割を果たしている。その能力増強型である H-IIB ロケットは静止遷移軌道へ 8 トンのペイロード打ち上げを可能に

し、2009年9月には宇宙ステーション補給機 HTV (H-II Launching Transfer Vehicle: 「こうのとり」) 1号機を打ち上げた。HTV 2号機は2011年1月に打ち上げられ、高い技術レベルを示した。科学衛星打ち上げに用いられた小型固体ロケット M-V ロケットは開発を終了したが、その後継機である「イプシロン」により、ロケット輸送のファミリー化も計画されている。

ロケットは、コストと信頼性に対して国際的な競争の時代に突入しており、如何に確実に安く打ち上げるかが課題となっている。2010年時点で H-IIA ロケットと H-IIB ロケットの打ち上げ成功実績は20機中19機となり、成功率95%という世界トップレベルの信頼性を達成するに至った。ただ、技術に対する高い評価に比べて、世界の衛星ニーズにマッチし得なくなってきたため、H-IIA ロケットの国際マーケットにおける認知度は低いという欠点は否めない⁸⁾。

(イ) 将来型宇宙輸送システム

世界の宇宙輸送システムを見たとき、宇宙が既に商業的な競争の場になっていることは確かであるが、一方では外交戦略の情報獲得手段としての重要性も増加している。これらの現実を見据え、長期ビジョンを検討していく必要がある。実利用の立場からの開発が、ひいては惑星探査にもつながり我が国の宇宙科学を促進することとなる。

一方、現用の宇宙輸送システムが持つ経済性の悪さや信頼性の低さ等の課題を克服するために、低コスト性、高安全性・高信頼性、環境適合性を有する再使用型宇宙輸送システムの実現に向けての努力も続けなければならない。部分再使用型の宇宙システムであるスペースシャトルは2011年で退役するので、日本の HTV による国際宇宙ステーションへの物資輸送に対する期待は大きい。HTV に回収機能を付加する HTV-R は、今後有人宇宙輸送機となり得る可能性もある。

(ウ) 宇宙輸送の将来

宇宙空間の利用のための輸送システムは、観測や様々な利用技術との組み合わせによって地球科学構築の基盤となっている。このような宇宙輸送システムを活用しての惑星科学は、地球の持続性を顧みるための必須の手法といえる。これに対して、我が国の高度な通信や探査ロボティクスなどの基盤技術、大規模システムのインテグレーション技術、様々な加工生産技術などを活用させることは、国際的な貢献であるとともに我が国の科学技術の振興のためにも重要なことである。

同時に、有人宇宙活動に伴う有人宇宙輸送の道筋を確立する必要があるだろう。

② 全地球および地球外輸送システムとしてのフロンティア人工物の展望

ア 健全なビジョン構築と国としての明確な政策立案の必要性

フロンティア人工物の分野の活動には、全地球的交通システムのCO₂削減や安全・安心のような具体的課題と、地球外輸送や惑星探査のような未知領域の課題、さらにたとえば海底ボーリングによる地殻探査とアストロバイオロジーとを組み合わせる生命や地球科学を発展させる船舶海洋と航空宇宙にまたがる課題がある。これら多岐にわたる課題を整理して可能性・実現性、社会へのインパクトや産業への貢献度を考慮した上でその発展を促す健全なビジョンが必要である。そのためには、現時点で各府省庁に分散している航空宇宙・船舶海洋の活動を一元的に統括する組織が必要となる^{13), 14)}。現在、宇宙基本法（2008年5月28日、法律第43号）、海洋基本法（2007年4月27日、法律第33号）の双方が成立した段階でそれぞれの分野内での政策検討がなされているが、その双方にまたがる検討も必要な段階に入っているといえる。

イ 輸送システム技術の展望

(ア) 輸送システムと安全・安心技術

輸送システムの安全性向上には、事故調査・分析体制の充実、ヒューマンファクター、テロ防止技術等も含めた多様な研究活動が必要となる。複雑な輸送システムの安全な運航・管制には情報技術の活用も不可欠である。既に航空管制分野では、米国を中心に研究開発が進められており、近い将来には世界スタンダードが構築されよう。我が国も安全・安心なグローバル輸送システムに貢献すべく早急にIMOやICAOなどに貢献するための体制の充実、安全確保システムやその評価手法の研究活動の活性化が必要である。

(イ) 環境への寄与

交通システムのCO₂排出量は全体の20%程度であるが、今後はこの削減努力が必要である。航空宇宙、船舶海洋においても厳しい技術開発と運行手法の改革が必要になる。しかし、これらはたとえば高効率エンジンの開発というような単発的な課題で解決しうるものでなく、運行ルートの効率化なども含めた全地球交通システムの効率最適化によって達成出来るものである。また、個別の産業に任せられる課題ではなく、低炭素化への個別研究課題や環境保護国際条約化に対して国家としての支援が必要である。

(ウ) ロボティクス技術との融合

惑星や深海のような未開拓領域の探査機は基本的に無人であり、ロボティクス技術が不可欠である。輸送システムとロボティクス技術の融合は科学探査だけでなく、航空機の自動操縦や、環境モニタリング・災害調査用の無人飛行機の自律飛行技術等においても不可欠である。航空宇宙・船舶

海洋の全ての輸送システムにおいて、ロボティクス技術との融合を促進すべきで、とくに海底探査システム、惑星探査システムなどに注力すべきである。

(2) 地球ダイナミクス解明とフロンティア人工物

① 地球ダイナミクス解明の現状

ア 新しい地球観測システムの創造

新しい地球の概念は観測によって進歩する。海底下のドリリングによって複雑に沈み込むプレートの様子や地底構造の連続性等が観測でき、地震のメカニズム解明、有用資源の埋蔵量推定なども期待できる。IODPでは、温暖化や氷河期の発生などの地球環境変動、地震発生のメカニズム、地殻内生命圏の発見などを目的として、2003年から日米欧、中国の協力で深海掘削を行っている。我が国の「ちきゅう」は掘削器関係が技術のコアであり、船上から数千メートルに及ぶ掘削用パイプを正確に保持する新しいライザー技術によって効率的な掘削が行えるが、中核的技術は外国技術の導入であるので、今後これらの技術を確立する必要がある。これまでの海洋掘削は石油や天然ガスの採取が中心であったが、IODPでは科学的研究を地道に行うことで、これまでになかった熱水鉱床の開発や海底での有用金属等の分布やその科学的意味も発見することが期待できる。

一方、このような海洋掘削や海洋の保全のための技術研究設備も必要になる。つまりドリリングが周囲の環境にどのような影響を及ぼすかなどの具体的な検討を行うために、深海を模擬した水槽なども必要である。

このように、地球観測システムの創造のための研究環境を整え、海洋にアクセスし、必要な観測を行い、データや資源を採取するシステムを構築して社会に貢献するための海洋工学の発展を目指す必要がある。

イ 地球ダイナミクス解明における総合観測の必要性

序論で述べたように、数100年から1000年のスケールという長期間にわたって人類の存続を考えるときの大きな問題に、地球環境問題、食料問題、エネルギー問題がある。それらの課題を解決するためには、まず地球全体に対しての科学的な知識を深め、地殻の内部から表層、海洋をはじめとする地球の様々な構成要素およびその相互作用についてのマイクロなダイナミクスと地球規模のマクロなダイナミクスを解明する必要がある。地球ダイナミクスの深い理解なくしては、地球温暖化や巨大台風などの気候変動、エルニーニョ現象や海水面変動などの海洋変動、地震現象や地盤災害、土壌保全、生態系の多様性保全、資源エネルギー問題などに対して本質的な

解を見つけることはできず、対症療法的な対応策に終始するのみで、手遅れなしいし取り返しのつかない結果になる恐れさえある。

これらのダイナミクスを総合的に解明していこうとする研究は既に始まっている。例えば「地球システム科学」や人文社会科学の分野を融合した「地球学」という名のもとで、学際的な研究者コミュニティの形成が始まっていることは望ましい動きである。しかし、そのダイナミクス解明の基礎になる観測データに関しては、海洋研究船、海底探査機や人工衛星により、様々な視点からの観測は行われてはいるものの、何を観測すればダイナミクスの解明につながるのかについての深い検討に基づく観測計画の立案や、異なる分野の観測を組み合わせるより本質的な情報を抽出しようという試みはまだ不十分であり、技術的に実現可能なセンサーを搭載し、「現段階で可能な観測」から始めている感を拭えない。

地球を構成する要素の多様さ、その複雑な相互作用の本質的重要性を勘案した、地殻、海洋、大気等の研究分野の枠を超えた学際的な計画立案が必要である。構想や準備段階での総合的な検討を行う機能を宇宙基本法、海洋基本法で設置されている諸機関を中心に十分に行うことが必要である。同様に、観測システムにおいても、地中、地上、海中、海上、宇宙、海底からの観測を単独で行うだけでなく、複合した観測によって初めて見えてくる現象もあることに留意すべきであろう。またこれらは、巨大地震や巨大津波などの自然災害発生メカニズムの本質的な解明や予知予防に役立つことが期待できる。

ウ 国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の現状と課題

人工衛星を用いた地球観測は、気象観測、測位や地形などの分野でこれまで大きな貢献を果たしてきたことはいまでもない。人工衛星による三次元的で広域・迅速な全地球的観測は、植生の変化や砂漠化、川の流水域の変化、極域の氷の減少など、陸上・海上における長期的な環境の変化の把握だけでなく、海洋観測と連携することによって、海面の温度分布の観測によるエルニーニョなどの海洋現象の把握、台風、山火事、森林火災、地震などの災害監視、海洋における油流出や森林伐採などの人的な災害の状況把握、地下資源探査、さらには、温室効果ガス量、オゾンホール、エアロゾルなどの大気の観測に至るまで、長期的でグローバルな視点を活かした様々な知見をもたらしている。

地球環境観測に係る観測プラットフォームの開発を統括するプログラムとして、総合科学技術会議のもとで、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」が策定された^{1)、15)}。これは、従来別々の活動であった人工衛星

による宇宙利用と地球海洋観測を有機的に連携させる意義を持ち、「宇宙から深海底まで、わが国の総合的安全保障に不可欠な観測・探査活動（地球観測、災害監視、資源探査）の基盤となるシステムを確立する」というミッションを定義し、文部科学省の下、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、東京大学が開発主体となって、衛星観測監視システム、次世代海洋探査システム、およびデータ統合・解析システム（DIAS）を構築することを目指している。その中で、海洋分野では総合国際深海掘削計画（IODP）を支える世界最高の深海底ライザー掘削技術を持った地球深部探査船「ちきゅう」、海中の無人巡航探査機、大深度高機能無人探査機など、宇宙分野では上記の衛星技術の開発が完了ないし計画中で、それらによる観測データにユーザが容易にアクセスでき画期的な処理・解析・表示機能を利用できるインフラストラクチャの構築が始まっている。また、国際的な取り組みである「全地球観測システム（GEOSS）」の枠組みの下で、人工衛星を使った国際的な観測分業やデータ共有化の仕組みも構築されつつある。国家基幹技術としての「海洋地球観測探査システム」は、我が国が総合的な地球観測に踏み出した重要なステップではあるが、いくつかの問題も抱えている。それは、関係者の努力にも関わらず、この計画がまだ広く研究者や技術者コミュニティを巻き込んだプログラムにはなっていないからである。この観点から、この計画は個別の研究に必要なデータの明確化とその供給体制を整備して、多くの分野の研究者や技術者が連携して成果をあげる新たな取り組みとする必要がある。

② 地球ダイナミクス解明における展望

ア 地球観測における多分野連携

人工衛星を利用した観測システムの構築には、様々な基盤技術・革新的技術の開発と多額の予算が必要である。したがって、限られた予算の中で効果的な観測システムを構築すること、さらには、取りきれなかったデータについては国際的な協力関係の構築により、お互いに補完していくような枠組みが求められる。例えば、宇宙科学の分野では、JAXAを頂点とする宇宙科学コミュニティの中でまず、国際的な宇宙科学のロードマップと日本の果たすべき役割に関するコンセンサスの下、広範な研究者による深い議論により観測すべき対象が検討される。さらに衛星やセンサー開発を行うJAXAの工学者・技術者との連携による技術的なフェージビリティの検討を経て、衛星搭載センサーが決定される。その結果、搭載されたセンサーはコストパフォーマンスが極めて高く、確実に宇宙科学コミュニティのニーズに応えられるものとなり、世界的にも高い評価を得る成果をあげている。宇宙科学の分野に見られるこのような成果は、データを利用する研究

者層が厚く、その総意の下で次の観測計画が立案される枠組みが熟成されているために可能となる。

この例から明らかのように、地球ダイナミクスの解明に向けた総合的な観測が実施されるためには、(a) どのような観測が何の解明につながるか、コストパフォーマンス等についての事前の深い検討、(b) 理学者サイドと観測システムの技術面を検討できる工学者サイドの間の深い連携、宇宙と海洋の連携 (c) 観測データをダイナミクスの解明につなげていく学際的で質・量ともに豊富な研究者コミュニティ、(d) 非常に長期にわたってそのような連携の場が維持されること、が必要である。(c) の存在は (a) の前提でもあるが、(a) を実現するには、さらにはそのような検討ができる「場」と、検討した結果が実際の観測システムに結実していく宇宙開発と海洋政策を担当する国の機関が連携して予算化まで行う「仕組み」が必要である。

イ 地球ダイナミクス解明のための体制構築

国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」は、総合的地球観測への第一歩として意義は大きいですが、その組織に全日本的な研究者コミュニティが強く結びついている状況にはなく、また、組織運営が政府のプロジェクト的な予算措置に依存することから、長期にわたって研究組織が維持される保証はない。そこで、地球ダイナミクスの解明に関連する研究者の継続的かつ学際的なコミュニティを関連学会間の連携を基に構築し、然るべき財政基盤を確保しつつ、行政サイドの組織との連携をとることが必要である。そのコミュニティの役割は、1) 地球ダイナミクス解明に向けての研究を学際的に実施し、2) その研究を基に次に実現すべき観測システムやセンサーがどうあるべきかの深い検討を行い、3) 行政組織と連携して海洋探査機や衛星等の観測システムの開発・運用等を指導し、4) 得られた観測データを責任を持って活用し、5) 国民への普及啓発活動を実施し、また、この分野に進むべき人材開発でも中心的役割を果たす、等である。関連する学問領域は、理学分野としては大気、海洋、地球物理、地質、惑星科学、宇宙科学などが、工学分野としては船舶・海洋工学、宇宙工学、機械工学、ロボット工学、画像処理学、情報工学などがある。各分野の研究者コミュニティを統括する学会組織が各分野に既に存在するので、地球ダイナミクスの解明という共通の目標に向かって、学会間の連携を図ることが効率的であろう。また、研究推進組織（例えば研究開発法人）と基盤研究と人材育成を担当する大学等の連携をさらに密接にする必要がある。これはアメリカ航空宇宙局（NASA）とアメリカの幾つかの大学との連携にその例を認めることができる。宇宙航空研究開発機構（JAXA）のような研究開発法人の行うプロジェクトに大学の理学系工学系専門家と学生が参加することは今後

是非必要である。

(3) 地球外フロンティア開拓におけるフロンティア人工物

① 地球外フロンティア開拓における成果

ア 宇宙探査の現状

宇宙探査は従来から人類の夢であった。惑星探査に関しては 20 世紀半ば頃から世界的に種々の計画が開始され、1962 年に NASA の「マリナー2号」が金星近傍通過時の観測を行って以来、アメリカ、旧ソ連、ヨーロッパ、日本によって、数多くの惑星間航行ミッションが実施されてきた。中でも 12 年間にわたって木星、土星、天王星、海王星を観測した「ボイジャー計画」はその代表である。

我が国は、1970 年の日本初の人工衛星「おおすみ」以来、培ってきた宇宙技術を背景にして、「さきがけ」、「すいせい」によるハレー彗星探査 (1986 年)、「ひてん」による月の引力を利用した航行ミッション (1990 年)、「のぞみ」(2003 年)による惑星間航行を経てきた。国の第 3 期総合科学技術基本計画でも、太陽系を構成する月、金星、水星等の高精度探査・観測を行い、月の起源や惑星の大気、気象、磁場、磁気圏等に関する新しい知見を得て新しい原理や現象の発見・解明を通して多様な知の創造を導くことを目標としてきた¹⁾。

2007 年に打ち上げられた月周回観測衛星「かぐや」は月全域について高精度な観測データを取得し、月軌道への投入等の技術実証なども達成した。「かぐや」が送ってきた地球の鮮明な画像は、今に至っても記憶に新しい。「かぐや」のデータを用いて、月の起源と進化に迫る研究も実施されている。小惑星探査機「はやぶさ」は小惑星「イトカワ」のサンプルリターン(地質回収)を行い、7 年間 6 億 km の旅を終えて 2010 年 6 月、地球に帰還した。「はやぶさ」の成功は国民に多大の感激を与え、地球外フロンティア探査の分野で他国の追従を許さない成果をあげた。「はやぶさ」は超遠距離での自律航法、長時間にわたるイオン推進、超軌道からの帰還等の最先端技術の実証を行う非常にチャレンジングな計画を立て、種々のトラブルを乗り越えてそれを達成したものであり、回収された「イトカワ」のサンプルは人類の起源を解明する糸口となる可能性もある。

2006 年 9 月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」は太陽大気中の磁場分布や電流分布、速度分布等の精密な観測を行い、アメリカの科学雑誌「サイエンス」の表紙を飾るほどの成果をあげた。2010 年 5 月に打ち上げられた金星探査機「あかつき」は現時点では金星軌道への投入には成功していないが、その可能性は十分に高い。太陽光の圧力を推力とする「イカロス」は現在も航行実証を続けている。生命のもとになる炭素の多い小惑

星「1999JU3」を探索する「はやぶさ2」は2014年に打ち上げる予定であるし、ヨーロッパとの共同で水星を探索する「MMO」も2014年にアリアン5ロケットで打ち上げの予定である。

イ 宇宙探査に関する世界および日本の動向

現在、宇宙関係機関の協働体制として国際探査戦略グループ（ISECG）が設けられ、同グループは地球外フロンティア開拓の意義として1) 科学、2) 滞在を可能とする技術開発、3) 経済発展、4) 国際パートナーシップ、5) 創発と教育、の5項目を挙げている。このように、地球外フロンティア開拓は次世代の国家、世界ないし人類の興隆確保をめざす活動であり、国民や人類が資源を出しあって計画、推進すべき政策に属する。すなわち、国民の矜持を高め、次世代の国造りを行う政策の一環であり、ひいては人類の持続性確保の活動であると解釈できる。

宇宙開発委員会は次のような日本の長期計画と政策を定めている。1) 宇宙探査については、人類にとって未知の領域である月、惑星、小惑星等の太陽系の天体の探査に関し基盤的な技術開発を着実に進め、数年程度をサイクルとして果敢かつ戦略的に挑戦する。2) 太陽系探査科学については、宇宙科学と宇宙探査活動の連携によって、太陽系諸天体の構造と起源、惑星環境とその進化、宇宙に共通な物理プロセス等を探り、太陽系惑星における生命発生、存続の可能性及びその条件を解明する。3) 始原天体の探査については、月・惑星の内部及び表層の調査を行い、太陽系の初期状態を実証的に探ることを長期的な目標とし、「はやぶさ」や「はやぶさ2」により取得した小惑星物質を分析し、太陽系の初期状態を推定し、また「かぐや」後継機の惑星表面着陸技術を確立し、月の起源・進化過程を解明する。

以上のことから、地球外フロンティア開拓が人類の持続性確保に貢献できる点は次のように整理できる。

- (a) 他惑星の内部構造や大気・プラズマ圏を理解することによって、地球環境のダイナミクスを理解し、かつ未分化天体からの希少金属、触媒材料などの利用によるエネルギー・環境維持技術を開発する。
- (b) 地球外生命の探査、生命維持技術の増進および宇宙探査動力源の開発を行うことによって、人類の活動領域を拡大し、安全で豊かな生活の達成に資する。

② 宇宙探査政策実施上の留意点

ア 次世代の科学技術への動機付け

我が国は現在、少子化問題とそれに伴う労働力の低下、税収の低下や年金などの社会的課題に直面している。人口の減少と税収の低下は、ひいて

は科学技術政策への投資の減退にもつながり、国力の衰勢の危機であると言わなくてはならない。次世代の国家を構築し、人類の持続性を確保するためには、宇宙探査ミッションをはじめとする知的活動の前線を拡大する創造的研究を国として実施し、直接・間接的に次世代への科学技術への動機付けとする必要がある。

宇宙開発・利用は、直ちに成果を創出するものではないので、生活に直結する技術開発成果に乏しいという評価を受けがちである。しかし、「はやぶさ」の成功が国民に多大の感激を与えたように、国民の宇宙科学への好奇心を大いに満たす可能性があり、また、学生が理工系のなかで宇宙分野への志向はかなり強く、一般的な理工系進学や就職へのインセンティブにもなっていると思われる。次世代若者の科学技術への動機づけとしても有効であろう。

イ 多面的達成度評価（政策評価）の必要性

我が国では税金の支出効果を減点法で評価する傾向が強い。現行では宇宙開発は、利益性は低いが、国家、国民の将来への投資として実施されるべき故に国が実施しているという性格を有している。成果を創出するためのリスクが他の事業に比べて非常に高いこともこの一因ではあるが、政策評価の減点法的な視点は見直されなくてはならない。技術政策目標を明確にしたうえで、その達成度を中心に評価すべきである。このことについては、日本学術会議 研究評価の在り方検討委員会でも検討がなされている¹⁶⁾。同委員会報告では「例えば、米国の NSF における基礎研究評価は、(1) intellectual merit (知的価値)、および(2) broader impact (より幅広いインパクト) の2つの基準により、実施されている。評価基準の、intellectual merit には、プロジェクトが、①関連する研究分野や異なる研究分野に進んだ知識や理解を与えることができるか、また、②どの程度、創造的、独創的、変革的な概念を切り開き、提案できるか等が要求されている。Broader impact においては、プロジェクトが、①教授、訓練、学習を促進すると同時に、発見や理解を増進させるか、②施設・設備、器具、ネットワーク、協調などの研究や教育の構造基盤をどの程度向上させられるか、③科学的・技術的理解を幅広く普及できるか、④何が社会にとって利益になるか等が基準である。」

このように達成目標は多面的に評価することが望まれ、今後検討が必要である。

(4) 共通の重要課題

以上、3つの観点における現状と課題の分析から、共通の課題として次

のことが重要である。

① 国家的政策立案の必要性

ア 長期的視点から見た人類の持続性確保のための政策

フロンティア人工物領域の成果は、全地球的および地球外への望ましい輸送手段の提供および地球ダイナミクスとの関連に基づく長期的視点からエネルギー・環境問題の解決手段を提供し、国民の安全・安心および豊かな生活を保障して人類の持続性確保に貢献する。地球外フロンティア開拓も含め、それらを推進することは国民の矜持と次世代へのインセンティブを高め、次世代の国造りへの投資とするため必須であるという認識に立って政策を立案することが必要である。

イ 長期的・俯瞰的な立場からの政策

大規模かつ失敗する可能性もあり、時間のかかるフロンティア人工物領域研究に対して、どの研究・プロジェクトが国にとって有益かの判断が重要である。そのため、府省庁の枠を越えた長期的・俯瞰的な観点から高度なステアリングを行う組織が必要である。

「宇宙基本法」、「海洋基本法」によって宇宙開発戦略本部や総合海洋政策本部が設置されたが、それは「人類の持続性確保」の観点から互いに協力し、さらに効率的な政策をたてることが望ましい。

ウ プロジェクトの評価手法の確立

フロンティア人工物科学技術では巨額の費用と時間をかけ、さまざまな分野の科学技術を総合してシステムが開発される。企画立案とともにそのプロジェクトの評価手法も確立して、物的人的資源の有効な活用を行う必要がある。

② 長期的研究体制と科学者コミュニティ構築の必要性

ア フロンティアという観点からの長期的研究体制

フロンティア人工物科学技術の推進には、もちろん科学者自身の努力が必要である。フロンティア人工物領域の関係者がコミュニティを形成し、情報の交換と活動方針を議論し、長期的な研究体制を構築すべきである。

イ 学際的な研究組織の構築

宇宙・海洋の科学技術の融合である国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の実施においては、そのリーダー会議と日本学術会議が連携して研究活動をより活性化し、総合科学技術会議をはじめとする行政サイドとの連携をとるとともに、全日本的な永続的かつ学際的な研究組織の構築に向けた検討を実施するのが望ましい。

③ 技術の高度化と産業基盤育成の必要性

ア 高度な技術力の確立と産業基盤の育成

高度な技術を必要とする航空宇宙・船舶海洋フロンティア人工物には、その開発・製造を担当する産業基盤が不可欠である。その基盤となる航空宇宙、船舶海洋分野の個別産業は十分に発展しているが、さらにフロンティア人工物産業への展開が必要である。これには単にマーケットメカニズムによるだけでは発展は見込めない。惑星や深海探査は国家基幹的事業であることから、これら産業基盤の健全な育成発展を国の施策としていく必要がある。また産業基盤の育成発展は、革新的な産業を生み出す可能性もある。その各分野からの優秀な若手も集まることで、その育成を通じて高度な知識の開発と伝承も可能となる。

イ インセンティブがもたらす産業経済効果の期待

地球ダイナミクスの解明および地球外フロンティア開拓においても産業経済とは無縁ではない。それらは新たなフロンティア人工物の興隆のためのインセンティブであり、広く科学技術を牽引して産業経済を発展させる政策の鍵を握ると考えられる。

④ 国際協力への積極的な参加の必要性

フロンティア人工物科学技術は国の政策とも密接に関係し、国際的な協調と競争の側面を有する。そのために国際的なプロジェクトに積極的に参加するとともに、世界の中心拠点となるための研究開発力とグローバル人材が必要である。

⑤ 人材育成の必要性

ア 俯瞰的能力を持った人材の育成

航空宇宙・船舶海洋フロンティア人工物は多様で高度な知識の集積による産物であるため、その開発にはシステム全体を把握し牽引できるシグマ型人材（本分科会メンバーでもある柘植綾夫芝浦工業大学長の提唱する総合的・俯瞰的能力を有する人材）¹⁷⁾の育成が不可欠である。研究機関や大学で内容も規模も多様なプロジェクトを行うことで、そこに携わる若手が総合的な視野を持つように育成できよう。同時に、経験者から若手への知識の伝承も必須である。

イ 教育・科学技術・イノベーション政策の三位一体推進

上記人材育成には、初等教育から高等教育までを通して、フロンティア人工物を題材としたサイエンスの素養と技術を涵養することが有効である。第4期科学技術基本計画では科学技術政策と社会イノベー

ション政策を一体的に推進することとしているが、「教育」を入れた三位一体的推進を行い、教育への投資が必要である。

ヨーロッパの宇宙プロジェクトでは、その費用の1%は必ず教育・アウトリーチ（普及）に使うことになっていることにも鑑み、国は大型の国家プロジェクトに「教育費」の費目を設けて投資するのが望ましい。海洋の探求や開発には、海外では米国のシーグラント制度¹⁸⁾のような海洋開発専用の国家資金が充てられることが多い。我が国でもこのような人材育成・教育制度確立を図ることが望ましい。

ウ 国民の理解と支援

フロンティア人工物領域の課題は国家的様相を持つため、課題解決のためには国民の理解と支援も必要である。国、研究機関、科学者コミュニティは、国民の宇宙科学等への好奇心を大いに満たすように、現状や研究成果の国民への開示や理解の醸成のためのアウトリーチ活動を主導し、基盤的な人材育成に力を入れることも必要である。特に、小・中・高等学校レベルの生徒へのフロンティア人工物科学技術の狙いやその実現方法を具体的に伝授する普及啓発活動を通して関連分野の興味を引き出し、次世代の研究者育成に努めるべきであろう。また、専門家と一般の人との間をつなぐための学会活動や科学ジャーナリズムの役割も重要である。

3 提 言

以上の考察・分析に基づくと次のことが結論できる。

- ・フロンティア人工物科学技術は全世界的および地球外輸送系の構築を通して、海洋や宇宙における国益の確保、安全・安心な社会・豊かな生活をもたらしている。
- ・フロンティア人工物科学技術は、地球のダイナミクスの解明および地球外フロンティア開拓の観点から、新しい自然観および地球感を創成し、人類社会が直面する地球規模のエネルギー・環境課題の解決に貢献する。
しかし、下記のような課題がある。
- ・現状では輸送系についてはスペースシャトルの事故や海底油田の漏出事故などにみるように安全面、利便性、環境への波及効果の面で問題点が残されており、将来にわたり持続的な輸送系を提供できるまでに成熟しているとはいえない。
- ・技術そのものばかりでなく技術研究の体制や評価方法などになお課題が多い

このように、フロンティア人工物科学技術は、人間社会に寄与する輸送手段を提供すること、および地球内外のフロンティアに到達し新しい地球観の創成によって人類の持続性確保に貢献しているが、エネルギー・環境課題は、すぐに解決しないと取り返しのつかないことになることは、IPCCをはじめ様々な検討の結果明らかになりつつある。そのため、フロンティア人工物科学技術の推進を早急に行うべきであり、次の5項目の提言を行う。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

- ① 国は、フロンティア人工物領域の成果が長期的視点からエネルギー・環境問題の解決手段を提供し、国民の安全・安心および豊かな生活を保障して人類の持続性確保に貢献するという認識に立って政策を立案すべきである。
- ② 国は、フロンティア人工物領域が他の短期競争的先端研究とは異なり、長期的視野からリスクの高い課題に対して巨額の費用と時間をかけ、さまざまな分野の技術を総合して大きな成果を期待するものであり、そのためには企画立案とともにそのプロジェクトの評価手法も確立する必要がある。
- ③ 国は、フロンティア人工物領域の研究開発が、資金など国家の関与無くしては不可能であること、またその成果は知的活動の前線をこれまでになく拡大するものであるという認識に立ち、創造的研究を実施し、それ

によって次世代を担う若者の科学への動機付けを行うべきである。

- ④ 大規模かつ失敗の可能性があつて時間の要するフロンティア人工物領域研究に対しては、国は府省庁を越えた立場に立って長期的・俯瞰的な観点から高度なステアリングを行うための組織を作るべきである。
- ⑤ 「宇宙基本法」および「海洋基本法」によって作られる新しい組織は、「人類の持続性確保」という観点から互いに協力し、さらに効率的な科学技術政策が実現できるような俯瞰的な施策を行うべきである。

(2) 長期的研究体制と科学者コミュニティの構築

- ① フロンティア人工物領域の関係者は、科学者コミュニティを形成し、情報の交換と活動方針を議論し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- ② 国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の実施においては、国は全日本的な永続的かつ学際的な研究組織の構築に向けた検討を実施するのが望ましい。

(3) 技術の高度化と産業基盤の育成

高度な技術を必要とするフロンティア人工物分野では、その開発・製造を担当する産業基盤が不可欠であることを認識して、国は、技術の高度化に努め、新しい産業基盤育成に努めるべきである。

(4) 国際協力への積極的参加

フロンティア人工物科学技術は国の政策とも密接に関係し、国際的な協調と競争の側面があるので、国および科学者コミュニティは国際的なプロジェクトに積極的に参加するとともに、世界の中心拠点となるための研究開発力の向上に努めるべきである。

(5) 人材育成とアウトリーチの推進

① 人材育成に関して：

ア フロンティア人工物科学技術は多様で高度な知識の集積によって成り立っており、他分野の科学・技術の推進にも寄与するものである。国や大学など教育機関は産業界と連携して、理学工学のさまざまな分野にわたる知識を持ち、システム全体を把握し牽引できる人材（いわゆるシグマ型人材）の育成を行うべきである。その中で、(3)および(4)に必要な高度な研究開発力、技術力およびグローバルな視点を持った人材を育成すべきである。

イ 上記観点から、国は人材育成のための特別な資金制度を確立するべきであり、各研究機関は専任研究者やポスドクの増員、およびプロ

プロジェクト研究を通じての世界レベルの若手研究者・リーダーの育成を行うべきである。若手の研究者自身も、プロジェクト研究の重要性を認識して、積極的に参加するべきである。

ウ 国は人材育成を一番の国家的政策と位置付け、フロンティア科学技術に立脚した教育を重視することにより、「教育・科学技術・イノベーション」の三位一体的推進を行うべきである。

② アウトリーチの推進に関して：

ア フロンティア人工物のコミュニティはフロンティア人工物領域の状況や研究成果の国民への周知徹底を通して国民の関心を高めるアウトリーチ活動を主導するべきである。

イ 上記観点から、国および研究者コミュニティは宇宙や海洋科学等への関心の高い国民に対して、また、小中高レベルの生徒へのフロンティア人工物科学技術の狙いや方法についての普及啓発活動や関連分野のアウトリーチに努め、次世代の研究者育成に注力するべきである。また、学会や科学ジャーナリズムは専門家と一般の人との間をつなぐ役割を果たすべきである。

4 おわりに

航空宇宙・船舶海洋からなるフロンティア人工物分野の科学技術は、空、宇宙、海洋への革新的な移動手段を生み出し、人類の活動領域を拡大することにより安全・安心で豊かな生活をもたらす可能性を有し、また、地球ダイナミクスの解明および地球外フロンティアの開拓の観点から、現在地球が直面しているエネルギー・環境問題の解決に貢献する。この際のキーワードは「人類の持続性確保」である。

本分科会では、フロンティア人工物科学技術が人類の持続性確保にどう貢献し得るかについて、3つのワーキンググループを組織して、

- (1) 全地球的および地球外での輸送システムとしての観点
- (2) 地球のダイナミクス解明の観点
- (3) 地球外フロンティア開拓の観点

から現状および問題点を議論し、フロンティア人工物科学技術を早急に推進しなければならないとの結論に達し、そのための方策を提言した。

提言は、①国としての明確な政策立案と施策の必要性、②長期的研究体制と科学者コミュニティの構築、③技術の高度化と産業基盤の育成、④国際協力の推進、および⑤人材育成とアウトリーチの推進の5項目から成る。政策当局および科学者コミュニティがこの提言を実行する努力を続けることにより、標題に掲げた「人類の持続性確保に貢献するフロンティア人工物科学技術の推進」が実現できることを確信する。

なお、フロンティア人工物は社会や経済、文化に及ぼす影響も大きく、社会系、人文系のメンバーを含めての検討も必要である。この点についての議論は今回の提言では行わなかったが、将来への課題と考えている。

<参考文献>

- 1) 総合科学技術会議：第3期科学技術基本計画分野別推進戦略－科学技術による世界、社会、国民への貢献、2006年3月。
- 2) 総合科学技術会議：第4期科学技術基本計画に向けて、諮問第11号「科学技術に関する基本政策について」に対する答申、2010年12月。
- 3) 日本学術会議 幹事会：勧告「総合的な科学・技術政策の確立による科学・技術研究の持続的振興に向けて」、2010年8月
- 4) 日本学術会議学術 大型研究計画検討分科会：提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－」、2010年3月
- 5) 久保田弘敏：フロンティアプロジェクトに見る日本の総合戦略、経済 Trend、pp. 20-22, 2008年1月。

- 6) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する府
間パネル) の第4次評価報告書、2007年.
- 7) 日本学術会議 第21期総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア
人工物分科会、地球惑星科学委員会地球惑星科学企画分科会主催シンポジ
ウム「未来を開くフロンティア人工物の展開と課題」テキスト、2010年8月
26日.
- 8) 日本学術会議 総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア人工物
分科会、地球惑星科学委員会地球惑星科学企画分科会：特集1 未来を開く
フロンティア人工物の展開と課題、学術の動向、第16巻、第3号、pp. 9-57、
2011年3月.
- 9) http://www.jadc.or.jp/3_forecast.pdf
- 10) [http://ec.europa.eu/research/growth/aeronautics2020/pdf/
aeronautics2020_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/growth/aeronautics2020/pdf/aeronautics2020_en.pdf)
- 11) 玉木賢策他、海底熱水鉱床の生成機構と探査手法に関する研究、2007年度
科学研究費報告書、<https://kaken.nii.ac.jp/ja/p/17360431>
- 12) 海洋政策振興財団、平成19年度 世界における海事産業の変革ビジョン
に関する調査研究報告書、2008年3月
- 13) 日本学術会議 第19期航空宇宙工学研究連絡委員会、人工物設計・生産
研究委員会宇宙利用専門委員会：我が国の航空宇宙科学技術推進に向けて
の提言、2005年7月.
- 14) 日本学術会議 第17期船舶海洋工学研究連絡委員会、人工物設計・生産
研究委員会海事工学専門委員会：海事工学の役割と将来についての提言、
2000年4月.
- 15) 平 朝彦：海洋科学技術の展望—海洋の知の先導、経済 Trend, pp. 38-39,
2008年1月.
- 16) 日本学術会議 研究評価の在り方検討委員会：対外報告 我が
国における研究評価の現状とその在り方について、2008年2月26日.
- 17) 日本学術会議 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会：
提言 巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて、2008年6月26
日.
- 18) <http://www.seagrant.noaa.gov/>

<参考資料 1>

総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア人工物分科会審議経過

2009 年

- 4 月 17 日 フロンティア人工物分科会 (第 1 回)
自己紹介
役員選出
20 期の活動報告
21 期の活動計画の検討
その他
- 7 月 3 日 フロンティア人工物分科会 (第 2 回)
前回議事録の確認
総合科学技術会議フロンティア分野の中間フォローアップ
について
「日本の展望」について (大和委員)
その他
- 12 月 29 日 フロンティア人工物分科会 (第 3 回)
前回議事録の確認
10 月の総合工学委員会での報告
日本学術会議 日本の展望委員会作成資料について
ミレニアムシンポジウム企画案について
宇宙利用シンポジウムについて
その他

2010 年

- 2 月 3 日 フロンティア人工物幹事会 (第 1 回)
シンポジウムに関する打合せ
- 6 月 19 日 フロンティア人工物幹事会 (第 2 回)
シンポジウムに関する打合せ
- 7 月 20 日 フロンティア人工物幹事会 (第 3 回)
シンポジウムに関する打合せ
- 8 月 10 日 フロンティア人工物幹事会 (第 4 回)

シンポジウムに関する打合せ

- 8月26日 フロンティア人工物分科会（第4回）
シンポジウムの作業確認
分科会出席者の自己紹介
前回議事録の確認
活動報告について
「学術の動向」への記事掲載に関して
パネルディスカッションのテーマについて
その他
- 8月26日 シンポジウム「未来を開くフロンティア人工物の展開と課題」
の開催
- 2011年
- 2月24日 フロンティア人工物幹事会（第5回）
分科会において作成中の提言に関する確認作業
- 7月28日 日本学術会議幹事会（第130回）
フロンティア人工物分科会提言「人類の持続性確保に貢献
するフロンティア人工物科学技術の推進」について承認

<参考資料 2>

シンポジウム「未来を開くフロンティア人工物の展開と課題」プログラム

1. 主 催：総合工学委員会・機械工学委員会合同フロンティア人工物分科会
地球惑星科学委員会・地球惑星科学企画分科会
2. 後 援：日本航空宇宙学会、日本船舶海洋工学会、東京大学大学院海運造船新技術戦略寄付講座、宇宙航空研究開発機構(JAXA)、海洋研究開発機構(JAMSTEC)
3. 日 時：2010年(平成22年)8月26日(木)13:00-18:00
4. 場 所：日本学術会議講堂
5. プログラム：

13:00-13:10 開会挨拶 久保田弘敏(連携会員、
帝京大学)

<趣旨説明とこれまでの経過、現状の紹介>

第一部 序論 人類の発展とフロンティア人工物

13:10-14:30 新しい地球像の探求 平 朝彦(会員、
JAMSTEC)
宇宙探査の将来 的川泰宣(連携会員、
JAXA)

<深海底下の地球内部から宇宙空間に広がるフロンティアを探索することにより、地球・生命の新しい理解、そして人類の未来構築に貢献できることを提案する>

第二部 フロンティア人工物科学技術の役割と現状および重要課題

14:30-14:50 航空宇宙フロンティア技術の展望 中橋和博(連携会員、
東北大学)

<宇宙技術とその成果のレビューと今後の技術課題、政策的な要望も含む>

14:50-15:10 船舶海洋フロンティア技術の展望 大和裕幸(連携会員、
東京大学)

<海洋技術とその成果のレビューと今後の技術課題、政策的な要望も含む>

15:10-15:20 休憩

第三部 課題と提言

15:20-15:50 フロンティア人工物の課題 藤井孝藏(連携会員
JAXA)
湯原哲夫(東大特任教授)

＜国家の技術政策の手法、プロジェクトの建て方、プロジェクトの評価、リベラルアーツ型教育の取り入れ、博士課程学生の育成、人材育成など今後解決すべき問題を明確にする＞

15:50-16:20 フロントアを開く産業技術の展開 渥美正博（三菱重工業（株））

浦 環（東京大学）

＜航空宇宙産業、船舶海洋産業、通信産業などの基盤技術の展開と今後の方向について考える＞

16:20-16:30 休憩

第四部 パネルディスカッション

16:30-17:45 パネルディスカッション

司会：

中須賀真一（連携会員、
東京大学）

＜これまでの報告に関する討論をおこない、今後何をしていくかのとりまとめ文書を作る＞

メンバー：渥美正博、戸塚正一郎（富士重工業（株））、浦 環、
柘植綾夫（会員、芝浦工業大学）＋ 講演者全員

17:45-18:00 閉会挨拶

松尾亜紀子（連携会員、
慶應義塾大学）