

提言

人類の未来を開くフロンティア人工物工学の
展開のために



令和2年（2020年）8月25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	大和 裕幸	(連携会員)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所特別顧問 東京大学名誉教授 横浜国立大学先端科学高等研究院客員教授
副委員長	鈴木 真二	(連携会員)	東京大学未来ビジョン研究センター特任教授 東京大学名誉教授
幹事	宇都正太郎	(特任連携会員)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所顧問
幹事	伊藤 恵理	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科准教授 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所主幹研究員
	中谷 和弘	(第一部会員)	東京大学大学院法学政治学研究科教授
	向井 千秋	(第二部会員)	東京理科大学副学長
	藤井 孝藏	(第三部会員)	東京理科大学工学部情報工学科教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	河合 宗司	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻准教授
	柘植 綾夫	(連携会員)	公益社団法人日本工学会元会長顧問
	萩原 一郎	(連携会員)	明治大学研究・知財戦略機構特任教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
	松尾亜紀子	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部教授
	松岡 猛	(連携会員)	宇都宮大学地域創生推進機構 宇大アカデミー非常勤講師
	宮崎 恵子	(連携会員)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 国際連携センター副センター長
	観山 正見	(連携会員)	広島大学総合戦略室特任教授
	大山 聖	(特任連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所准教授

本提言の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

伊藤 健	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構次世代航空イノベーションハブ ハブ長
太田垣由夫	ジャパンマリンユナイテッド株式会社顧問
阪口 秀	海洋研究開発機構理事

佐藤 徹 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
藤井 輝夫 東京大学理事・副学長
宮川 淳一 名古屋大学特任准教授

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務 松室 寛治 参事官（審議第二担当）
五十嵐 久留美 参事官（審議第二担当）付参事官補佐
横田 真理江 参事官（審議第二担当）付審議専門職付

要 旨

1 作成の背景

深宇宙や深海底下などは、通常人間が到達できない極限状況下にあり、人類にとって未開のフロンティアの一つである。そこに到達し、活動するための技術、並びに、全地球的及び地球外への輸送システムとしての航空宇宙・船舶海洋技術があり、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・探査を包含している。その科学技術を「フロンティア人工物科学技術」と定義し、日本学術会議、総合工学委員会・機械工学委員会合同のフロンティア人工物分科会として、その学術の確立と推進のために2011年及び2017年に提言を行ってきた。フロンティア人工物科学技術では、無人化技術が重要な共通技術であり、様々な分野の最先端科学技術を総合した巨大複雑システムが開発利用される。その実現のためには、産業基盤や莫大な投資が必要で、国家が先導して行うべきものが多いという特徴を有する。さらに、フロンティア人工物科学技術は、宇宙像や地球像あるいは生命観という新しい科学、エネルギー資源の獲得、防災減災、また国家及び国民の安全や利益の増大にも極めて重要である。また、国連SDGsについても、海洋資源、地球環境保全など様々な分野で大きく貢献できる。過去2回の提言を踏まえ、技術開発の進展、産業の現況、人材育成に関する大学等の在り方を考慮して、新たに提言を行う。

2 現状及び問題点

フロンティア人工物科学技術は上記の特徴に加えて、国際連携も必須で、科学的な発展に加えて国家及び国民の利益や安全の保障など国際政治や経済への配慮も必要になっている。

従って、新しい学術技術の展開と、国家的事業として推進するための論理と社会的な合意が必要である。教育・研究・社会価値創造の三位一体の取り組みが重要である。

国家的政策立案とそのためのプロジェクト評価などの科学的手法の開発、AI (Autonomous Intelligence) などの新技術とフロンティア人工物実現のための産業基盤の強固化、人材育成・アウトリーチと国際連携の在り方について現状の分析と提言を行う。

3 提言の内容

提言として次の3点にまとめた。

(1) 国家的政策立案とそのための科学的手法の開発

関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、環境省、国交省等）は、フロンティア人工物科学技術は人類の科学的知見の構築、資源・エネルギーの獲得、国家及び国民の安全や国際協力に大きく貢献すること、成果までに期間と資金のかかること、様々な分野の技術の融合が必要なことを認識し、政策の立案に当たるべきである。そのためには関係各府省庁は、総合海洋政策本部、宇宙開発推進本部などと連携して、フロンティア人工物について総合的な政策を議論する場を総合科学技術・イノベーション会議に設置する

べきであり、また学界との連携により、科学技術政策決定のためのシステム科学的方法論を早急に確立し、利用するべきである。さらには、フロンティア人工物技術開発関係者とともに、海外の技術開発のスピード感に鑑み、国家及び国民の利益や安全を損なわないように迅速な政策決定と技術開発を行うべきである。

(2) 技術の高度化と産業基盤の強化

関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、国交省、環境省等）や、研究機関、大学、産業界は、運航の自動化知能化のための AI（Autonomous Intelligence）技術をはじめ多岐にわたる新技術を、産官学の連携により確立するべきである。

関係各府省庁は、国立研究開発法人などが主体となって企業・行政などとオープンイノベーションによってシステムの設計・製造・運用が可能となるように組織や法令の改定などを行い、大学や国立研究開発法人の大規模な研究開発施設を維持拡充するとともに、AI 技術、信頼性評価技術などについての実験用航空機や研究船を含む総合的な実証試験設備や環境を整備すべきである。さらには航空技術、海洋開発技術などに代表されるフロンティア人工物実現に必要な産業基盤を強固にするべきである。

(3) 国際連携と人材育成・アウトリーチ

関係各府省庁（文科省、経産省、国交省等）は国際プロジェクトに積極的に取り組むべきである。また航空宇宙や海洋の利用に関する国際的取り決めを先導する国際組織の構築とそのための人材の育成が重要であり、人的国際交流や国際機関での OJT（現任訓練）を積極的に推進すべきである。また、大学は国際的人材輩出のための教養教育を含むフロンティア人工物科学技術教育体系の整備に努めるべきである。

フロンティア人工物科学技術においては、特定の技術分野に通暁するとともに全体を見渡し国際感覚にも優れ、リーダーシップを発揮する技術者と、世界の技術動向を把握し、的確な技術行政の行える技術行政者の育成が必要である。そのために、大学は、国立研究開発法人や企業及び行政とも連携した新しい教育システムを構築すべきである。国立研究開発法人や産業界は学生を受け入れるプロジェクト制度を確立し、博士課程学生を中心に受け入れ学生数を増やし、経済支援もすべきである。

学会などの科学者コミュニティは、社会に対して啓蒙活動を行うべきである。特に初等教育については、良質な教材をインターネットで提供することが必要である。また、学校教育においては実際に航空宇宙や海洋を体験、あるいは実感する教育を行うことが必要であり、国立研究開発法人や産業界はそれをサポートすべきである。

目 次

1	はじめに	1
2	フロンティア人工物に関する学術体系の創出	1
	(1) フロンティア人工物科学技術が直面する課題	1
	(2) フロンティア人工物分野における Autonomous Intelligence 技術	4
	(3) 科学技術と政策をつなげる政策科学技術	5
3	国家のフロンティア科学技術政策の確立	6
	(1) 総合的な政策の議論の場の確保	6
	(2) 政策決定プロセスと国民的合意形成	6
	(3) 研究機関・国立研究開発法人の在り方	7
	① イノベーション駆動力としての国立研究開発法人の活用	7
	② 大学—国立研究開発法人—企業による人材育成のサイクルの確立	7
4	フロンティア科学技術の産業化基盤の構築	9
	(1) 航空・宇宙産業の変革	9
	① 航空機産業の変革	9
	② ベンチャー企業の育成	9
	(2) 船舶・海洋産業の変革	10
	① 海事産業の変革	10
	② 海洋産業の育成・強化	10
	(3) デジタイゼーション時代の国家戦略	11
	(4) 新しい学術と産業分野の確立	11
	① 学界、産業界の連携強化	11
	② 投資と保険技術の展開	12
5	国際連携の促進	12
	(1) 国際間の競争と協調	12
	(2) 国際連携における多様な人材の活用	12
	(3) 国際協議機構の創設とグローバルな人材の活用	13
6	人材育成 —アウトリーチと専門教育—	14
	(1) 新たな専攻分野の創設とカリキュラムの確立	14
	(2) 社会教育とアウトリーチ	14
	① インターネットを多用した初等教育システム	14
	② 空や宇宙や海にふれあう教育	14
	(3) グローバルな人材の育成	15
7	提言	16
	(1) 国家的政策立案とそのための科学的手法の開発	16
	(2) 技術の高度化と産業基盤の強化	17

(3) 国際連携と人材育成・アウトリーチ	17
<参考資料1>審議経過	19
<参考資料2>シンポジウム開催	21
<付録1>マスタープラン2020一覧表(航空宇宙)	28
<付録2>マスタープラン2020一覧表(海)	32

1 はじめに

航空宇宙及び海洋での活動は、高真空、微小重力、高圧、高温、低圧、低温、遠隔、無人などの極限状態で行われ、その開発・利用は人類のフロンティアの開拓である。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に付随する先端的人工物は「フロンティア人工物」、その科学技術は「フロンティア人工物科学技術」である。フロンティア人工物の開発は、大気圏から宇宙、さらに深宇宙の果て、また海洋から海底、海底下まで、人間が存在して活動することができない、まさにフロンティアへの人類の展開である。宇宙像や地球像あるいは生命観という新しい科学、エネルギー資源の獲得、防災減災、また国家及び国民の富や安全の保障においても極めて重要である。また、人類は持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現を求めており、2015年国連サミットにおいてSDGsが採択されたが、海洋資源、地球環境保全など様々な分野でフロンティア人工物が大きく貢献できる。第5期科学技術基本計画においても、「国家戦略上重要なフロンティアの開拓」として「海洋や宇宙の適切な開発、利用及び管理を支える一連の科学技術」の重要性などが述べられている。

しかしながらフロンティア人工物は幅広い最先端技術を駆使した大規模なシステムで、国家による投資も膨大であり、産業化してメリットを得るまでに長期間を必要とし、国際連携も必須で、学術技術の発展に加えて国家安全保障など国際政治や経済への配慮も必要である。国として事業を決定するのも、また実行するのは極めて難しい。

従って、フロンティア人工物を発展させるためには新しい学術技術の展開と、国家的事業として推進するための論理と社会的な合意が必要である。科学技術、国家事業、社会啓蒙・人材育成など、それぞれの側面からの強力な展開が必須である。教育・研究・社会価値創造の三位一体の取り組みが重要である。我が国がこの領域に取り組むために以下のような提言を行う。

2 フロンティア人工物に関する学術体系の創出

(1) フロンティア人工物科学技術が直面する課題

航空分野においては、アジアの経済成長などの要因により今後20年間で航空機の輸送量が2倍以上になることが予想されている。航空は産業経済の国際的発展に不可欠で、文化や生活圏の拡大のためにこうした成長が求められる一方で、地球環境の保全のために国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization ; ICAO）や国際航空運送協会（International Air Transport Association ; IATA）は航空機から排出されるCO₂総量を2050年までに2005年度の半分以下に削減することを要求している。これはSDGs（13「気候変動に具体的な対策を」）に関する活動で、機体の更なる環境性能の改善、石油代替燃料の開発、運航の効率化、排出量取引などの経済スキームなど全ての視点からの取り組みが必要である。学術大型研究計画No.118「航空輸送のCO₂削減と持続的成長に寄与するエミッションフリー航空機技術の研究開発」においては、機体システムや推進系の電動化による電動航空機に言及されている。また、地球温暖化・地

球環境変化が急速に進行する中、気候・地球システムの理解は重要であり、航空技術はその重要な役割をも担う。重点大型研究計画 No27「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」では、航空機観測でのみ可能な温室効果気体の濃度やエアロゾル・雲粒の粒径・化学組成などのマイクロ量を、広域かつ高度分布まで含めて測定することで、地球科学のパラダイムシフトを目指すこととなっている。

一方で、航空交通量の増加は、空港の混雑化をもたらし、重大事故の件数増大につながりかねず、さらなる安全性の向上が必要となる。さらに、パイロットや管制官などの人的リソースの不足も重要な課題となり、自動運転のレベル向上や、安全性向上につながる AI (Autonomous Intelligence) による診断技術、貨物機などの無人化、そして運航者を支援する自動化システムの導入が求められる。こうした先端的な無人化技術は、近年大きく普及した小型無人航空機の有人地帯目視外飛行などの更なる活用分野を広げる意味で必要であり、さらには、電動化技術と組み合わせることで、人をも移動させることが可能な電動垂直離着陸機 (eVTOL) の実現が期待される。電動化や自動化、無人化だけでなく、航空機及びその関連機器の新規開発には、安全性、信頼性の実証が不可欠であり、国内での技術開発を促進し、産業化に結び付けるためにはその標準化を海外と連携して推進するとともに¹、飛行実証ができる実験機の整備、及び大規模な航空交通シミュレーターなどの実験環境が必須であり、学術大型研究計画 No. 119「国内で共同利用する実験用航空機の整備」が採択された。

宇宙分野においては、現在の宇宙輸送は基幹ロケットとなる H-IIA/B ロケットやイプシロンロケットに依存しているが、将来の大量高頻度宇宙輸送時代を実現するための手段として再使用宇宙輸送機の開発が期待されている。また、そのためのファーストステップとして、再使用観測ロケットの研究開発が宇宙航空研究開発機構を中心にすすめられている。これに関しては学術大型研究計画として No. 137「宇宙インフラ整備のための低コスト宇宙輸送技術の研究開発」が採択されている。

「はやぶさ」や現在運用中の「はやぶさ2」の成功により、小惑星からのサンプルリターン技術は我が国が世界をリードする技術として注目を集めている。重点大型研究計画 No. 25「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」に示されているように、この技術を生かして太陽系の様々な天体に対して着陸・長期滞在・往復し、多様な試料を分析することで、人類の活動領域を拡大し英知を高める宇宙科学に寄与することが重要である。また、今後も世界をリードしていくためには、月や火星などの重力をもつ天体への突入・降下・着陸技術や、木星トロヤ群小惑星や土星衛星エンセラダスなどの外惑星領域航行・往復技術・地下試料採取・その場分析技術などの技術実証を実施し、技術を磨いていくことが必要であろう。

¹ 航空安全認証制度と技術標準化に関する提言、次世代スカイシステム研究ユニット、東京大学未来ビジョン研究センター、2020.3.6 <https://ifi.u-tokyo.ac.jp/news/5950/>

また、国際ミッションとして 2030 年代には月面の有人探査、2050 年代には火星の有人探査の実施が検討されている。関連して、月・火星や宇宙空間での土木・建築技術や宇宙資源の利用技術、プラネタリプロテクションなどに関する研究が今後重要になってくるであろう。

近年の宇宙ミッションでは高機能化とそれに伴う大型化が進んでいる。高機能化・大型化により新たなフロンティアが開拓されるというメリットがあるものの、予算規模が巨大化し打ち上げ頻度が低下してしまうために新規技術に挑戦しにくいという問題を抱える。学術大型研究計画 No. 120「超小型衛星の統合的研究開発と実ミッション及び各種の宇宙実験を行う高度宇宙プラットフォーム化」に示されているとおり、重量 100kg 以下の超小型衛星を活用して宇宙ミッションの実施頻度を高くし積極的に新規技術に取り組んでいくことが今後ますます重要になってくるであろう。また、超小型衛星を用いた衛星コンステレーションも今後台頭してくることが予想される。

船舶の分野では 2015 年に国連サミットで採択された SDGs（13「気候変動に具体的な対策を」）及び同年の COP21 で採択されたパリ協定を受け、国際海運からの温室効果ガス（Greenhouse Gas ; GHG）削減に向けた動きが加速している。国際海事機関（International Maritime Organization ; IMO）は 2019 年に GHG 削減戦略を策定し、今世紀の早い時期に排出量ゼロを達成するという野心的な目標を掲げた。ゼロエミッション化を目指した技術開発は中長期的に取り組むべき最重要課題の一つであるが、海に関わる工学技術を担う海事産業を取り巻く状況は厳しさを増している。今後も我が国においてフロンティア人工物を支える技術基盤を維持するためには、海事産業の徹底的なデジタル化、情報産業化による経済効率の向上が必要不可欠である。学術大型研究計画 No. 123「スマートマリンシステム実現のための研究開発基盤の構築」においてゼロエミッション化、デジタル化、自動化、人工知能に関する最新技術を織り込んだ「海事産業 3S（スマートシップ、スマートヤード、スマートラボ）」を評価・実現するための研究開発基盤の構築が目指されている。

我が国は、世界第 6 位の広大な EEZ（排他的経済水域）面積を有することは良く知られているが、大水深海域が多く体積では世界第 4 位に相当する。これを国家及び国民の富や利益に資するために、海上・海中・海底に関わる技術開発を総合的に推進する必要がある。現在、海洋資源エネルギー開発の分野では、海底鉱物資源などの開発を目指した研究開発が進められている。内閣府 SIP（Strategic Innovation Program）事業において、海洋研究開発機構を中心に海底鉱物資源を対象とした技術開発が進められているが、今後のフロンティア探査を支える技術として AUV（Autonomous Underwater Vehicle）の高度化、水中充電施設を含むロボットサブシーファクトリー化など挑戦的な課題に取り組み、これらを実用化まで進展させる必要がある。また、学術大型研究計画 No. 124「途上国の SDGs 達成に資する深海エネルギー・鉱物資源の開発のための実海域実証実験の実施および深海水槽の建設」では大規模海洋総合研究施設を構築することにより、

効率的で安全、環境負荷を配慮した海洋開発の学術分野を発展させる世界の中核的な研究拠点の設置が提案されている。これらの技術は第3期海洋基本計画において重点施策の一つとして位置付けられた MDA（海洋状況把握）の観点からも重要であり、関連して学術大型研究計画 No. 122「海洋環境の持続可能で安全な利用に資する情報インフラの構築」が採択されている。

SDGs（7「エネルギーをみんなに そしてクリーンに」）を達成するために、海の分野では海洋再生可能エネルギーの導入を推進する必要がある。このうち洋上風力発電は海域利用に関わる法制が整備されたことを契機として、事業化への動きが加速している。我が国において十分な発電量を確保するためには沖合に設置される浮体式洋上風力発電の普及が必要不可欠であるが、国が系統接続容量の拡大などさらなる環境整備を行うとともに、技術開発拠点として総合研究施設を設立する必要がある。これに関連して学術大型研究計画 No. 121「アジアの拠点となる海洋再生可能エネルギー開発のための総合研究試験施設」が採択されている。

(2) フロンティア人工物分野における Autonomous Intelligence 技術

フロンティア人工物への Autonomous Intelligence² (AI) 技術の実装は2つの意味で重要である。Autonomous Intelligence は、より広範な概念である Artificial Intelligence のうち、制御分野における先端的な機能で、人間の監視や制御に依存することなく行動を可能にするものであると定義できる。一つは、人類が直接に踏み込むことが不可能な深宇宙空間での宇宙船や人工衛星の、また、深海における探査船の操作などへの適用である。人間の遠隔操作にはデータ通信の途絶や遅延により限界があり、知能化された自律的なコンピュータ制御が求められる。二つ目には、人が搭乗し操縦や操作が可能な船舶や航空機、宇宙機の操作やその管制作業である。これらには、人の能力をアシストする計算機システムが既に実装されているが、不測の事態への迅速で適切な対応のために、また人材の不足を補うべく知的な能力を備えたより高度の自律性が求められ、究極には、無人の自律運航は管制処理も望まれる。その場合にも遠隔の機体のモニタリングや、非常時の操作指令の送信などのために無線技術は重要である。AI (Autonomous Intelligence) 技術にはセンサー技術、自律的な予測と判断、その電氣的機械的駆動手段が必要となり、機械学習による判断も実用化を迎えている。こうした AI (Autonomous Intelligence) 制御は、従来の自動制御やプロセス制御と異なり、制御の方式を事前に確定できるわけではないので、その安全性や信頼性の評価方法を開発する必要がある。特に、航空、海洋、宇宙機などは運航が国際的であるだけでなく、研究や開発、さらには製造も国際的な環境でなされるため、評価方法自体も国際的に統一したルールとする必要がある。すでに国際的なコンソーシアムや標準化団体において、アルゴリズム、シミュレータを含む試験方法、評価方法の標準化などの検討が始まって

² Joint Doctrine Note 2/11 The UK Approach to Unmanned Aircraft Systems , 2011, para, 205.

いる³。そして、そうした国際的な議論に積極的に参画することが必要であり、そこで活躍できる人材の養成も重要であり、AI (Autonomous Intelligence) システム実証のための総合的な実証試験設備や環境を構築することも必要である。

(3) 科学技術と政策をつなげる政策科学技術

フロンティア人工物に関するプロジェクトは、科学的知見や資源獲得など様々な目的があり、様々な分野の先進技術をまとめ上げる巨大システム構築作業であり、長期間にわたる研究的資金と事業的投資が必要で、成果が確実に得られるかもわからない。企業が投資するということにはなじまないものも多い。そのために国家的な予算の注入が必要である。提案される多数のプロジェクトから国家としてどれを選ぶか、またそのプロジェクトを最適に実行するにはどのような研究開発体制やプロセスを選択すべきかなどを科学的に検討する手法の開発と利用とが強く望まれる。すなわち大規模プロジェクトを個別に評価し、プロジェクト間での比較を行い決定する手法と、国際的プロジェクトの実行体制と実施方法を最適に設計し、そして実行をモニターする技術が必要である。これらには国家の安全保障というような漠然とした評価も必要である。従って、必ずしも計量的正確さを求めるものではなくて、人間の判断のための課題の整理、明確化が最初の課題である。現在ではシステム科学的方法論として、プロジェクトの構成要素とそのステークホルダーの関係を明確にして、シミュレーションを通してその効果などを調べる方法が考案されつつある⁴。

さらにこれをベースに国民的な議論にまで進める手順が必要である。国民にわかりやすく説明し、国民の合意を得る仕組みを開発する必要がある。このようないわば「政策科学技術」の開発が必要である。

また、プロジェクトの設計とプロジェクト進捗管理についてもコンピュータ上でのシミュレーションにより最適設計を行うシステムなども使われるようになっているが、現状では決定的な考え方やソフトウェアの実績はない。フロンティア人工物の健全な発展にはフロンティア人工物そのものに加えて、これらのシステム科学的方法論の研究開発を進める必要がある。

³中村裕子、鈴木真二、「空の産業革命」「空の移動革命」のキーワード“自動化”“自律化”の認証の壁と実現に向けた世界の取り組み、日本航空宇宙学会誌 68(1), pp. 8-14, 2020

⁴「システム・アーキテクチャ: 複雑システムの構想から実現まで」E.クロウリー, B.キャメロン, D.セルヴァ(著), 稗方和夫(訳) 丸善出版, 2020

3 国家のフロンティア科学技術政策の確立

(1) 総合的な政策の議論の場の確保

我が国には地球環境保全の総合的な取り組みを行う責務がある。それにはフロンティア人工物は多くの貢献ができる。総合的な政策のためには府省庁を超えた議論をすべきである。すでにいくつかの機関があるが、これらをさらに有機的に働くようにする必要がある。

宇宙開発戦略本部、総合海洋政策本部においては府省庁間の連携をさらに強化し、またこの二つの本部間でも連携して政策立案を行うべきである。

限られた財政基盤のもとで、我が国が持続可能で多様性と包摂性のある社会を目指す科学技術・イノベーション創造立国であり続けるために、宇宙、航空、海洋などの各フロンティア人工物の研究開発目標及び個別の投資のアウトカムだけでなく、それらの社会的かつ経済的な将来便益の最大化と、国家及び国民の安全の保障に貢献する視点に立った国家戦略が欠かせない。特に、2020年以降の我が国は、人口減少、高齢化社会、デジタル変革、地政学的な大変動という激動期を迎えることになる。フロンティア人工物分野においての省エネルギー、環境負荷低減技術、再生可能エネルギー利用技術の開発は、エネルギー問題の解決及び環境保全への大きな貢献となる。これらフロンティア人工物の貢献を国家戦略に組み入れるために、総合科学技術・イノベーション会議にフロンティア人工物に関する議論の場を常置するべきである。これにより、内閣総理大臣のリーダーシップのもとで関連府省庁と学术界・産業界がそれぞれの業界や分野、府省庁間の垣根を越えて協働する場を創造しなくてはならない。

宇宙開発の基盤となる航空技術については、産業政策だけではなく、航空機技術及び航空管制技術などの新しい科学技術に対する政策を総合的に立案する場を設ける必要がある。

(2) 政策決定プロセスと国民的合意形成

例えば海洋開発については、経産省はエネルギーや資源の獲得、文科省は科学的知見の充実、環境省は環境保全、国交省は国際輸送技術を管轄しており、それぞれ基本計画などを策定し、国民にも公開し、その上で予算を獲得して実施している。各府省庁の論理としては正しいことが行われている。しかし、国連 SDGs への貢献、国家及び国民の利益と安全の増進に限られた予算を配分するには、より総合的な観点からの取捨選択・統合による政策決定が必要である。そのために総合海洋政策本部が設置され、総合的な政策立案をしているところであるが、すでに国民的合意を得た計画に則って進められている各府省庁の政策を、新たに統合して実施することは論理的にも矛盾がある。各府省庁の基本計画立案の時点から各府省庁を統合した計画の立案がなされなくてはならない。このことは目的も技術内容も異なるものを比較するという、かなり難しい作業である。

このように、統合戦略的な政策決定をするためにも、体系的に整理されたシステム科学的方法論による戦略的な政策決定プロセスの実践が必要である。

続いて、長期的な視点に立った我が国の国家像や世界が目指すべき理想像を描き、それを支える科学技術戦略を立て、長期的に遂行できる環境をつくるためには産業界や府省庁が連携し、具体的なビジョンとして国民に示した上で、フロンティア人工物の研究開発が国家及び国民の富に資することを国民にわかりやすく説明して支持してもらう必要がある。科学技術における国民への啓蒙活動及び政策討論のわかりやすさや透明性確保が重要である。そのためにもシステム科学的方法論によるわかりやすい説明が不可欠である。

(3) 研究機関・国立研究開発法人の在り方

① イノベーション駆動力としての国立研究開発法人の活用

長らく国立研究開発法人（以下、「国研」という。）は国の技術政策のサポートや、企業が行うにはなじまない研究を行うことを使命としてきた。しかしながら、2016年の第5期科学技術基本計画から国研にも大学と同様にイノベーションを駆動することが要請された。さらに知財の現物出資や政府出資金による外部企業を使つてのこれまでにない研究を行うことも可能になりつつある。フロンティア人工物は企業でリスクを負うことができないものも多く、国研が直接先端的な開発研究、産業界に直接移転できる研究を行うべきである。さらに国研の政府出資金制度などを用いて企業に具体的なシステムの構築などの実開発研究を行ってもらふことも重要である。またフロンティア人工物の開発は、分野横断的でありオープンイノベーションが本質的で国研のような場が適切である。

研究施設や人的資源が国研以外には存在せず、システムを実現する製造手段とノウハウは企業にしかない。総合的な開発力を持つ国研がベンチャーを含む企業からの人的支援を得てフロンティア人工物の開発や設計を行い、製造は企業が行うこととなる。その際、ベンチャーの育成も併せて行うことができる。フロンティア人工物の実現はこのようなやり方が基本的であるが、そのための国研の組織改革・機能拡充やマインドセットの更新などが必要である。

② 大学—国立研究開発法人—企業による人材育成のサイクルの確立

フロンティア人工物は、様々な分野の高度な知識が必要であり、それらを応用して新しいフロンティア人工物を作り上げる人材が必要である。基礎学術の習得、基礎的研究は大学で、また実際の応用研究は国研などで、そして実機設計製造は企業などで行う産学官連携した教育プログラムを通して、研究開発力やグローバルな視点を持った人材を育成するべきである。そのためには博士課程の学生を国研や企業のプロジェクトに参加させ、給与を支給するなど経済的支援も必要である。海外も含めたこれらの機関を自由に渡り歩くことで人材が育つことが重要で、そのための連携教育システムや奨学金制度、給与体系などを充実する必要がある。また、目まぐるしく進歩する

技術にキャッチアップするには、企業に所属する技術者のリカレント教育も重要で、大学での学位プログラムとの連携を行う必要がある。大学－国研－企業が連携してしっかりした人材育成システムを作ることが必要である。

4 フロンティア科学技術の産業化基盤の構築

(1) 航空・宇宙産業の変革

① 航空機産業の変革

航空機産業は世界的に高い成長率を有する工業製品では数少ない成長市場であるが、その厳しい参入障壁ゆえに特定少数の寡占市場である。我が国の航空機産業はこれまで主にボーイングの構造下請事業で発展してきたが、世界市場では小規模に留まっている。また一部では完成機事業に挑戦しているが苦戦中である。しかし、成長を牽引するアジアでの地政学的位置や、我が国が得意とする高付加価値の擦り合わせ工業製品である点から、次世代基幹産業としての期待は大きい。航空機産業を取り巻く近年の状況として、発展途上国の爆発的な航空需要の増大、地球環境意識の一層の高まりに対応した CO₂規制強化など、市場要求が大きく変化している。一方で、センサー技術、Big Data、IoT (Internet of Things)、AI (Autonomous Intelligence) などの先進技術は航空機に様々な変革をもたらしており、電動化、自律化、コモディティ化、モノからサービスへなど、成長が阻まれてきた我が国の航空機産業に大きな発展のチャンスが訪れている。加えて、ドローンや空飛ぶクルマなど、従来の航空機産業に含まれていない新しい航空交通手段が急速に発展を遂げ社会に大きな変革をもたらしつつある。この絶好の機会を遅滞なく生かすためには、政府が航空機産業を次世代の基幹産業として明確に位置付け、産業育成に国家的な取り組みを進めるべきである。まず、経産省、文科省、国交省、防衛省など関係省庁を横断して、戦略的かつ統合的な政策を推進する航空中枢機構（仮称）を設置すべきである。さらに、この航空中枢機構を中心に、従来の大企業のみならず中小企業、ベンチャー企業やその協業を含めて、航空機産業のスピード感ある変革を牽引する先進的な取り組みやプロジェクトを積極的に支援するべきである。さらには、航空機産業振興の根幹を支える即戦力となる実践的な人材育成に注力すべきで、学問・研究を超えた航空の実学教育に産官学が一致して協力すべきである。先行する航空大国や飛躍を目指す航空途上国の動きを考えれば、一刻も早い着手と加速化が必須である。

② ベンチャー企業の育成

宇宙分野においては、米国 SpaceX 社に代表される宇宙ベンチャー企業が世界中で勃興している。日本国内においても、宇宙輸送機の開発や小型衛星の開発などを目的とした宇宙ベンチャー企業が多数立ち上がっている。これまでの宇宙ミッションは「官」の独壇場であったが、今後は大型高機能の「官」の宇宙ミッションと小型高頻度の「民」の宇宙ミッションの強い連携がなければ、我が国の宇宙開発は世界に後れを取ってしまうことになる。今後も我が国が宇宙分野においてリーダーシップをとっていくためには「官」の宇宙ミッションを推し進めることはもちろん、「民」の宇宙ミッションの主体となる企業、とくに財政的に脆弱なベンチャー企業の支援や、ベンチャー企業と大企業との連携を促進する仕組みが必要である。これにより、若くて優秀な人材を集め、産業構造の変革や新しい産業の創成にもつながるであろう。

(2) 船舶・海洋産業の変革

① 海事産業の変革

我が国にとって極めて重要な海上物流を担う海事産業においてもフロンティアは存在する。これからの課題は「GHG 削減」と「デジタルライゼーション」への対応である。GHG 対策については、減速運航や省エネに加え水素などの脱炭素推進機関への転換が必要となり、経済と環境の調和を是とする社会的合意を形成しつつ、国を挙げて技術開発を行う必要がある。一方、デジタルライゼーションは海事産業に変革をもたらす。船載機器の自動化、船陸衛星通信の大容量化などにより船の IoT 化を進め、AI (Autonomous Intelligence) による自律運航船を開発するとともに、船の設計建造から就航船の運航状況や貨物の動きに至るまであらゆる情報をデジタルデータに置き換えて活用せねばならない。すなわち、従来縦系列であった荷主、船社、造船、船用メーカーは相互にデータやアプリケーションを使うネットワーク上の関係に変わり、さらに IT ベンダーも加わり、これまでにないメンバーと手法で海事産業全体の効率向上を図り、新しい海上輸送サービスを生み出す産業へ変革を遂げねばならない。

これらは企業にとって経験の少ない研究開発分野であり、産官学の連携が極めて重要で、特に国研が中心となってデジタルデータを共用するプラットフォームを設け、ICT (Information and Communication Technology) 分野などのこれまでにないプレイヤーを巻き込んで、国を挙げて「GHG 削減」と「デジタルライゼーション」の技術開発・実装を促進する仕組みを作る必要がある。そして、そのことが SDGs に対応して我が国の海事産業が世界をリードしていくことに繋がる。

② 海洋産業の育成・強化

海洋は、地球環境保全と密接なつながりがある重要なフロンティアである。我が国には、自然エネルギー、水産物、鉱物などが広く賦存する EEZ (Exclusive Economic Zone) があるが、特にメタンハイドレート、レアアース泥など賦存量も十分に経済価値も極めて大きいエネルギー・鉱物資源、洋上風力発電などのエネルギー資源を海上・海中・海底に関するフロンティア人工物の基盤技術を用いて、実効的な価値に変えなくてはならない。EEZ 開発は、地球環境保全、エネルギー・資源の自給などの社会便益を生み、我が国に豊かさをもたらす投資であり、国家プロジェクトとして取り組むのが妥当である。また、海洋には多くのステークホルダーが関係するため、個別の利害を乗り越えた国家的視点から開発を進める国家戦略が欠かせない。すなわち、関係各府省庁 (内閣府等) は「EEZ を国家及び国民の富に変える」ための国家戦略を打ち立て、その下に各機関が有する、MDA (Maritime Domain Awareness)、海底資源や水産資源の開発、水素生成、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) などのプロジェクトの優先順位を定め、投資効率の向上を図らねばならない。具体的には、海洋政策取り纏め機関としての総合海洋政策本部の機能を強化し、エネルギーや資源開発に関する国の基本計画の立案・実施に関与せしめ、府省庁や大学、国研、産業界が抱えているプ

プロジェクトの取捨選択・統合の任を担わせ、自らも予算を確保して、産官学共同で効率よく海洋開発を進める体制を構築すべきである。

ちなみに、今般クリーンかつ国産のエネルギーとして洋上風力発電の事業性が高まっているが、これを機に関係各府省庁（経産省、環境省、国交省等）は、風況の良い沖合の浮体式風力発電ファームを建設するなど、我が国のエネルギー構造の転換に取り組み、それを起点に EEZ を総合的に開発するプロジェクトを興し、海洋の産業化を促進すべきである。

なお、EEZ 開発においても、国として「デジタルイゼーション」の技術開発・実装に注力すべきであり、加えて、大規模な海洋人工物の設計・建設に必要な実海域を模擬する大型実験設備を整備する必要がある。また、総合開発プロジェクトの円滑な運営・評価にはシステム科学的方法論が有効である。

(3) デジタルイゼーション時代の国家戦略

センサー技術、Big Data、IoT、AI (Autonomous Intelligence) などに代表されるデジタルイゼーションは、航空宇宙や船舶海洋などのフロンティア人工物を扱う産業に大きなインパクトを与える。すなわち、複雑で大きな人工物の開発、設計、建造、運用、廃棄に至るまであらゆる情報をデジタルデータ化することで、ものづくりの効率が高まるだけでなく、産業構造の変革や新しいサービスの創出など産業の形態まで変わることが予想される。また、デジタルデータを分析することで、SDGs に謳われている地球環境保全や包摂性ある社会などへの産業の寄与度が数値化され、客観的に評価されるようになると考えられるなど、デジタルイゼーションが社会に及ぼす影響は大きく広範囲にわたる。

今こそ関係各府省庁（内閣府、総務省、経産省、文科省、環境省、国交省等）は、デジタルイゼーションが社会や産業にもたらすインパクトを把握し、産業変革を促す政策を講じ、地球環境や包摂性ある社会などの将来便益を国民が享受できるよう、国としての産業戦略を打ち立てるべきである。

(4) 新しい学術と産業分野の確立

① 学界、産業界の連携強化

フロンティア人工物科学技術は、理学的には宇宙や生命の起源の探究、地球ダイナミクスの解明、工学技術的には環境問題の解決、資源やエネルギーの獲得、地球モニタリングによる防災減災、宇宙空間利用などを目的としている。これらは輸送系技術、観測用センサー技術などで構成され、それぞれ先端的で新しい学術を作り出すものである。一方、AI (Autonomous Intelligence) などの新しい知能ロボティックス、センサーや高速通信、巨大データベースの整備や利活用、データやモニター画像からの知識抽出、俯瞰型技術開発プロジェクトの構築手法など新しい学術分野の展開も必要である。いずれの技術も基礎研究から十分に実用に耐えうる信頼性を持つまでの徹底した開発が必要であるとともに、サイバーセキュリティを含めた新しい信頼性確保技術

が重要となる。また、これらの分野は全て新規ビジネスとして成立し得るものであり、学界によるイノベーションと産業界による実現化、商用化技術開発の連携強化が特に重要となる。

② 投資と保険技術の展開

フロンティア人工物には産業化される開発技術が多数あるが、そのためには開発のリスクを考慮した上で必要な投資がなされなくてはならない。政府にしろ民間にしろ合理的な投資を行うための技術が必要である。また実運用においては事故などの際の損害保険の計算も重要である。資金が円滑に循環することも極めて重要で、資金計画を明確に策定できるようなリスク分析や組織設計などを体系化した投資のための新たな技術が必要である。これらの投資・保険技術も、先に述べたシステム設計技術などとともに、システム科学的方法論がベースとなり、新しい学術の創成を要する分野である。

5 国際連携の促進

(1) 国際間の競争と協調

宇宙においては国際宇宙ステーションのような、国際協調により大きな成果をあげたプロジェクトがある一方で、米国は宇宙軍を創設するなど軍事利用や宇宙での覇権競争にもなりかねない側面があり、競争と協調のバランスをとる必要がある。すなわち、フロンティア人工物にかかわる科学技術の研究開発において、国際間の健全な競争の維持と協調の促進が必要不可欠である。競争領域においては、海底ガス田、メタンハイドレートや洋上風力発電などの海洋分野、旅客機開発や宇宙開発などの航空宇宙分野においても中国等近隣諸国の進展は著しく、これら昨今の国際的な技術開発競争のスピードに鑑み、国家及び国民の富や安全の保障を損なうことがないように、国や技術開発関係者は、迅速な政策決定と俊敏な技術開発を行わなくてはならない。また、協調領域において国としては国際プロジェクトを先導したり、外国のプロジェクトに参加することは極めて重要であり積極的に取り組むべきである。一方でフロンティア人工物そのものばかりでなく航空宇宙や海洋の利用に関する国際的取り決めについても、それを先導する国際的組織の構築と人材の育成が重要である。このためにも、人的国際交流を積極的に推進すべきである。

(2) 国際連携における多様な人材の活用

フロンティア人工物分野が対象とする航空、宇宙、海洋は、国家レベルではなく、国境を越えて、人類全体で取り組むべき課題を多く含んでいる。国際宇宙ステーションや国際深海科学掘削計画（IODP）でも、参加国から多様な人材が集まり、それぞれの力を発揮し、人類の知を結集してプロジェクトを成功に導いている。このように、フロンティア人工物に関する科学技術を促進するためには、国籍、ジェンダー、専門分野などの多様な人材で構成されるチームと、その中で共通のビジョンを描きながら活躍できる人

材、そしてチームを率いる人材の活用が必要不可欠である。しかしながら、我が国における人材の多様性とその活用は、世界の先進国から大きく遅れをとっているのが現状である。先進的な科学技術を有する外国人材の受け入れを促進する社会的かつ経済的な支援制度の充実等、国家による強いリーダーシップを発揮しなければならない。そして、国籍やジェンダー等の多様性を確保し、また多様な専門分野から、多彩な人材を活用できる環境を、産学官の現場に早急に実現しなければならない。

(3) 国際協議機構の創設とグローバルな人材の活用

これまで述べてきたとおり、フロンティア人工物科学技術は我が国の政策とも密接に関係するとともに、その発展には国際的な連携が不可欠である。協調領域における国際連携の促進の主要な場として、国際的な機関がある。ICAO、IMO といった国際機関では、我が国が、科学的な根拠に基づき、航空機や船舶の安全確保、環境保全のための国際的な基準及び条約の審議に貢献している状況の中、これらの国際機関における人材の活用、活躍を促進する取り組みが求められる。

これからのフロンティア人工物のグローバルな展開においては、技術開発と制度・規則設計の二つの側面がある。宇宙や海洋が人類にとって有害な利用をされないようにするための国際的な合意が必要である。我が国にはそのような国際的取り決めに積極的に寄与していく義務がある。そのためには、力強い国際的協議機構の創設と、そこでの議論を主導し、信頼され、結論をまとめ上げる人材が我が国から参加することが重要である。その人材は、教養教育を基礎に、豊かな国際感覚と政治経済や科学技術の現状に対する理解力を身に付けた上で、国際的な連携及び合意形成の場に投入されることが必要である。また、国際機関の職員など組織内部への人材供給も重要である。

6 人材育成 ―アウトリーチと専門教育―

(1) 新たな専攻分野の創設とカリキュラムの確立

大規模複雑化するフロンティア人工物の研究開発、製造、運用を担う人材を養成するためには、大規模システムの解析、設計の科学的な体系、経済効果の予測、またシステムを社会実装する際の制度的検討、そして、それらの推進を計画する政策立案が求められる。これらを総合的に扱う新たな学術体系そのものが求められ、その構築には産業界と、学界及び研究機関、政府関係者の連携が大学には必要である。大学での教育プログラムでは、学部レベルでは幅広い教養教育の基盤の上に、各分野での基礎教育を社会との連携のもとで行える Project Based Learning⁵とともに実施し、大学院課程、特に博士課程では、AI (Autonomous Intelligence) 技術や制度、設計解析から運用にわたる大規模なデータ管理などの社会実装を、国際的な連携のもとで実施するという新たな課題に取り組み、国や企業のプロジェクトへの参加も積極的に推進すべきである。こうした教育カリキュラムの体系化を産学官の連携により推進し、教育、訓練を実施するためには、大学の新たな役割が求められる。それは学術の体系化と深化以外に、学生のみならず社会人も研究教育に参加でき、研究教育の担い手も、産学官のフレキシブルな交流が求められる。しかも、それらを国際的に実施すべきで、大学がその核となる必要がある。その際には、学生の経済的サポートも含む欧米型のインターンシップの定着も推進すべきである。フロンティア人工物の実際の研究開発事業は大規模で長期に渡るが、その機会は頻繁にあるわけではないので、それをモデル化したプロジェクト型の研究教育を産学官の連携により企業や研究機関の施設やリソースを活用して社会人のリカレント教育も含めて大学で実施することは、国として研究開発能力を維持していく上でも重要である。

(2) 社会教育とアウトリーチ

① インターネットを多用した初等教育システム

フロンティア人工物科学技術については、例えば海洋については学習指導要領に記載され、初等中等教育の場に導入されている。しかし、わくわく感のあるような教材や学問の体系の一端を明確に見せるような教材が準備されているわけではなく、またそれを教育する教職者に十分な指導の仕方が伝授されているわけでもない。今後は学会などの科学者コミュニティはそれぞれの知見をもとに様々な教材を供給すること、特に今後学校に導入される電子端末での教育に適したインターネット教材などを供給すべきである。

② 空や宇宙や海にふれあう教育

小学校などでは臨海学校などがなくなっているが、博物館や水族館ばかりでなく実際に空港や海、航空機工場や造船所に行くこと、臨海学校を復活させることなどで

⁵ 問題解決型学習。講義形式の座学ではなく、自ら問題を発見し解決する能力を養うことを目的とした教育法。

空や海に直接ふれあい、また、科学館を利用して宇宙体験を行うなど、環境や様々な科学の一端を見せるような教育を行うことが必要であり、企業や研究機関の体験訪問も取り入れるべきである。

(3) グローバルな人材の育成

ICAO 及び IMO では、主要な委員会での日本人議長の実績や日本代表団としての審議への貢献などがある。我が国が、国際的なプレゼンスを発揮し続けるためには、このような権威のある国際機関において、専門知識を有しながら国際交渉の方法とノウハウを熟知する人材が必要であるため、長期に渡って計画的に人材を育成しなければならない。このような国際社会で信頼される人材には、専門性のみならず、幅広い知識と体験に基づき、異なる考え方やアプローチを理解できる教養と問題解決に取り組む情熱が求められる。こうした人材や、5. (3)で述べている新しい国際的協議機構へ投入する人材を我が国で育成するために、フロンティア人工物プロジェクトへの参加や、ICAO 及び IMO などの国際機関での研修制度などの活用及び充実と、実践型リベラルアーツ教育の促進を提言する。

7 提言

これまでの考察・分析から下記のようにまとめることができる。

- 1) フロンティア人工物科学技術は、地球的宇宙的移動体などを含む大規模システムの構築を通して、地球・宇宙・生命観の創成、海洋や航空宇宙における国家及び国民の利益の確保、持続可能な環境創出、安全安心な社会の構築、エネルギー・資源の確保に大きく寄与している。
- 2) フロンティア人工物はさらに大規模複雑になっており、AI (Autonomous Intelligence) などの知能化システム、信頼性確保技術、政策科学などの分野で新たな展開が求められている。
- 3) フロンティア人工物の研究開発は長期間で膨大な資金がかかり、国が十分な計画・資源の投入を行うべきである。
- 4) フロンティア人工物に関わる国際的人材の育成が急務で、大学・国研・産業界・行政機関による新しい教育システムが望まれる。また、その基盤となる若い世代へのアウトリーチが重要である。
- 5) 教育・研究・社会価値創出の三位一体の活動が必要である。
- 6) 各国の科学技術の展開速度は極めて速く、フロンティア人工物の迅速な研究開発が重要である。

これらのことから、下記の3項目を提案する。

(1) 国家的政策立案とそのための科学的手法の開発

- ① 関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、環境省、国交省等）は、フロンティア人工物科学技術は人類の科学的知見の構築、資源・エネルギーの獲得、国家の安全保障や国際協力に貢献するところ大であること、技術成果の獲得までに長期間と莫大な資金のかかること、さらに様々な分野の技術の融合で達成されることを認識し、政策の立案に当たるべきである。
- ② 関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、環境省、国交省等）は限られた財源の中で、フロンティア科学技術の個別プロジェクトの目的を明確にし、さらに最適な方法で実施されるよう宇宙開発推進本部、総合海洋政策本部などと連携して総合的に議論を行い、国民の納得できる政策決定をするべきである。そのためにはフロンティア人工物の総合的な政策を議論できるように総合科学技術・イノベーション会議にフロンティア人工物に関する審議の場を設置することが必要である。
- ③ フロンティア科学技術政策の決定に当たっては科学的な検討方法を用いることが必要である。関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、環境省、国交省等）や学界は科学技術政策決定のための科学的方法論を早急に確立し、利用すべきである。
- ④ 昨今の国際的な技術開発競争のスピードに鑑み、国家及び国民の利益や安全を損なうことのないように関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、環境省、国交省等）やフロンティア人工物技術開発関係者は、迅速な政策決定と俊敏な技術開発を行わなくてはならない。

(2) 技術の高度化と産業基盤の強化

- ① 関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、国交省等）や、研究機関、大学、産業界は、運航の自動化知能化のための AI（Autonomous Intelligence）技術、安全性確保のためのソフトウェアを含めた信頼性評価技術、巨大システムの設計製造運航廃棄のための ICT/LMS（Lifecycle Management System）技術、情報セキュリティ技術、通信技術、推進系技術、経済効果の推定や制度検討、科学技術政策などは必要不可欠な新しい学術分野であり、産官学の連携によりこれら基礎技術を確立するべきである。
- ② 関係各府省庁（内閣府、文科省、経産省、国交省等）は、フロンティア人工物の創成が国家的事業であることに鑑み、国研などが主体となって企業・行政などとコンソーシアムを作り、オープンイノベーションによってシステムの設計・製造・運用が可能となるように組織や法令の改定などを行うべきである。
- ③ フロンティア人工物科学技術開発においては様々な大規模試験施設が必要で、関係各府省庁（文科省、経産省、国交省等）は大学や国研の研究開発施設を維持拡充するべきである。さらに AI（Autonomous Intelligence）技術、信頼性評価技術などについての実験用航空機や研究船等を含む総合的な実証試験設備や環境を整備するべきである。
- ④ 関係各府省庁（経産省、国交省、環境省等）は、航空技術、海洋開発技術などに代表されるフロンティア人工物実現のために必要な産業基盤を強固にするべきである。

(3) 国際連携と人材育成・アウトリーチ

- ① フロンティア人工物は、目的も活動領域も国際的であり、国家間の競争と協調の双方の側面をもつ。国としては国際プロジェクトを先導したり、参加したりすることは重要で積極的に取り組むべきである。一方で航空宇宙や海洋の利用に関する様々な国際的取り決めについても先導する国際協議組織の構築と人材の育成が重要である。行政機関は、国際協議組織の構築とそのための人材育成として既存国際機関での OJT の実施に努め、大学は国際的人材輩出のための教養教育を含むフロンティア人工物科学技術教育体系の整備に努めるべきである。
- ② フロンティア人工物科学技術は、幅広い技術体系に拠る大規模システムであるが、特定の技術分野に通暁するとともに関連する社会科学分野の知識や理解力を身に付け、全体も見渡し国際感覚にも優れたリーダーシップを発揮する人材の育成が急務である。また世界の技術動向を把握し、的確な技術行政の行える人材の育成も必要である。
- ③ 大学でのフロンティア人工物科学技術教育体系の見直しが必要である。学部レベルでは幅広い教養教育をベースに参加型の基礎教育を行い、大学院課程、特に博士課程では、国や企業でのプロジェクトへの参加を重視した教育プログラム、実務者に対するリカレント教育、政策立案者に対する政策科学、など国研や企業及び行政とも連携した新しい教育システムを構築すべきである。産業界は人材、資金、機会を提供することで能動的に教育研究に貢献するべきである。国研や企業はプロジェクトに学生

を受け入れる制度を確立し、博士課程学生中心に受け入れ学生の数を増やし、給与などの経済的支援も行うべきである。

④ 学会などの科学者コミュニティは、フロンティア人工物システムの意義やその技術と開発方法などについてわかりやすい展示会やインターネットサイトなど各種メディアで啓蒙活動を行うべきである。特に初等教育については、良質な教材をインターネットで提供することが必要である。

⑤ 学校教育においては、実際に航空宇宙や海洋を体験、あるいは実感する教育を各地の科学館や博物館、空港や港湾設備、企業や研究機関の研究開発現場に触れることなどにより行うことが必要である。また早い時期から Project Based Learning を取り入れるべきである。それに対して科学者コミュニティは必要なサポートをするべきである。

<参考資料1>審議経過

平成30年

7月30日 フロンティア人工物分科会（第1回）
分科会の趣旨説明
委員による自己紹介
委員長の選出及び幹部の決定
フロンティア人工物企画小委員会の設置提案
特任連携会員の推薦
3年間の活動方針と計画
シンポジウムの開催案
次回について

10月15日 フロンティア人工物分科会（第2回）
開会
分科会の体制・進め方について
① 特任連携会員
② 企画小委員会
③ 総合工学委員会企画分科会報告
論点の抽出と今後の進め方について
シンポジウムの内容検討
大型研究（マスタープラン）の検討
① 検討スケジュール案
② マトリクス案
次回について
その他

平成31年

2月19日 フロンティア人工物分科会（第3回）
マスタープランの審議など
3月27日～7月4日 フロンティア人工物分科会（第4回）（メール審議）
公開シンポジウム「宇宙・空・海ー フロンティア人工物科学シンポジウム」の承認について

令和元年

11月29日 フロンティア人工物分科会（第5回）
前回議事要旨確認
本日の公開シンポジウムについて
今期の提言について
その他

令和2年

2月13日 フロンティア人工物分科会（第6回）、フロンティア人工物企画小委員会（第1回）合同会議

前回議事要旨確認

小委員会の委員長選出

提言案の審議

提言案の承認

その他

6月25日 日本学術会議幹事会（第293回）

提言「人類の未来を開くフロンティア人工物工学の展開のために」について承認

＜参考資料 2＞シンポジウム開催

日本学術会議 フロンティア人工物分科会
公開シンポジウム妙録

日時：2019年11月29日（金）13:00-17:00

場所：日本学術会議講堂

分科会趣旨説明（大和裕幸 分科会長）

人類の持続的発展・知的探究のために宇宙・空・海はその対象となる有益なフロンティアであり、利用技術と科学的解明のためのシステムのことをフロンティア人工物と定義している。これをどのように創り出すかを議論するのがフロンティア人工物分科会である。フロンティア人工物は、国際的かつ学際的な複雑系であり、その社会技術としての開発の在り方、社会実装のためのアプローチ、人材育成についても議論する必要がある。

分科会の活動として、マスタープランの審議を行い、評価・支援に貢献した。今期中に、マスタープラン審議及びシンポジウム内容を反映した提言をまとめる予定である。提言内容は、科学技術基本計画、宇宙基本計画、海洋基本計画に反映し、国が掲げる骨太の方針として政策への貢献を目指す。

挨拶 - 我が国科学技術の今後とフロンティア人工物 - （上山隆大 先生）

2019年2月頃より、総合科学技術・イノベーション会議では、第6期の科学技術基本計画の議論を進めている。モノからコトへ、コトからヒトへ、というコンセプトで、新しいタイプの人材を創ることを掲げている。これまでの基本計画を抜本的に見直す予定でいる。

まずは、1995年に施行された科学技術計画基本法の改訂案を来年の通常国会に提出し、現行の大きな抜けを補いたい。第一に、現行の基本法は、科学技術の振興を謳っているが、イノベーションの観点からの言及がなされていない。例えば、当時イノベーションを謳ったアメリカとは視点が異なっていた。第二に、文理融合を謳いながらも人文・社会科学の接点が弱かった。第三に、大学、研究開発法人の現場の責任・精神や、民間が担う役割について明確に書かれていない。これらの点を改正した基本法を、2020年5月頃に成立し、これに基づいて第6期の科学技術基本計画の文書をまとめる予定である。

第6期科学技術政策が対象とする2021年からの日本は、人口減少・高齢化社会・デジタル変革・地政学的な大変動という激動期を迎えることになり、これを支える科学技術政策が求められる。2030年、2040年の時点で、日本は大国であるが、超大国ではないことが予想される。全ての国土が海に囲まれ開かれている海洋国家である日本は、他の国々との接点の中でしか生きていくことができない。アジア環太平洋地域は、今後数十年は富の創出の中心となることが予想されるため、日本が大きな窓口になれるよう、科学技術と日本の国家像を描きたい。

宇宙・空・海に関連する人工物に関する審議は、科学技術政策の審議と共通している。今後ともフロンティア人工物分科会の審議・提案を生かして、議論しながら科学技術政策をまとめたい。

セッション1：無人化・知能化する社会技術としてのAI (Autonomous Intelligence)

1. 機械学習 AI を信用する？AI 応用と品質のお話 (大岩寛 先生)

航空機・鉄道に代表される輸送システムや、電気・水道などのインフラの制御、消費者機械など、ソフトウェアに人命を預けている現状で、AI の社会実装が話題となっており、その品質保証が問われている。そもそも機械学習は、品質管理に不利にも関わらず、現実世界が複雑になって人間が分析しきれない・プログラムを書くのが難しいものをコンピュータに任せたいという欲求によって、AI に期待が集まっている所感である。

このように、人間が対応しきれない問題分析などに対して、データを集めれば何か解を出してくれるかもしれないという新しいパラダイムが生まれている。便益としては、開発コストの削減や、実社会の絶え間ない変化への追従（人間が手を加えなくても学習して変化する）、人間が想像できないロジックをデータから見つける可能性などが挙げられ、限られた分野（囲碁や将棋の世界など）では人を上回るかもしれない。

機械学習への要望としては、とにかく早く動いて欲しいという開発効率の高さが対象となるものや、テスラの自動運転のような安全性・リスク回避に関わるもの、株価予測のように的中率を高くしたいものなど、品質保証に求められる要求としても様々である。ビジネスの立場からは、機械学習の品質に対して、顧客に安心して利用してもらわないといけない。品質が保証できないということは、粗悪な AI との区別ができず、AI ビジネスの競争が成立しなくなるのを危惧している。これを解決するために、品質保証が必要である。

従来のソフトウェア開発は、リスクを洗い出し、対策を設定し、個別に実装し、検査して確認するというように、構造的に品質向上に取り組むことができた。設計通りにプログラムをかけたかどうか、従来のソフトウェアを信用する在り方であり、方法論としても説明可能だったが、機械学習 AI はデータを活用する統計的な手法をとっており、学習しても正しく判断できるとは限らない。また、その構造を人間が理解できない。さらに、ある機能を修正すると、他の機能に未知の影響が出るかもしれず、構造的な説明方法では、品質を保証できない。そこで、機械学習 AI に対する、新しい品質の作り込みが必要になる。それには、短期的アプローチと長期的アプローチがあると考えている。

短期的アプローチとしては、どのように利用すれば品質が悪化するのか、逆に品質が向上するのか、ロジカルに説明するガイドラインを更新するなど、安心できる取り扱い方に対する基準を作り、社会的な合意が得られるように体系化することである。機械学習 AI に求められる主要な用途は、リスク回避（自動運転など）、性能（株価予測など）、公平性（データ分析における偏ったバイアスの除去）である。これらに対して、劣悪な品質の機械学習 AI が社会に出ないように、評価の物差しと基準を作る必要がある。

長期的アプローチとしては、人間が機械学習 AI を理解することである。誤作動の原因を追跡できる、判断の根拠を説明できる、判断を事前に説明できるなど、説明できる AI を保証する必要がある。現状では、機械学習 AI の品質が悪化した場合、データが不足しているのか、学習のさせ方が悪いかなどは、開発者が勘で判断しているが、判断できる技術として確立する必要がある。さらに、人間に対する評価に近づくが、免許証の付与や試験といった制度を充実する必要がある。人間と違って、コンピュータには大量のテストをさせることができるため、試験の仕方も検討しないとイケない。

2. 人工知能と深層学習 (丸山宏 先生)

人工知能とは、知性を探究する学術分野が正しい定義だと考えている。ただし、分野によってアプローチが異なり、脳科学・神経科学の分野では脳の活動を観測することによって、心理学の分野は人間の行動を観察することによって、経済学は人間を合理的なエージェントと考えることで、ロボティクスは微分方程式を使うことによって、計算機科学はコンピュータで知性を模倣することによって、知性を探究している。

ひとことに人工知能 (AI) と呼んでも、人工知能という分野から派生した技術、あるいはその技術を応用したシステムのことを、人工知能や AI と呼ぶことがあり、混乱をおこしている。それは、機械による自動化であったり、データ分析であったり、まだ見ぬ技術 (SF) であったりする。問題は、それらの異なる対象を区別せずに AI と認識することで、様々な悲劇が起きている点にある。

例えば、IBM Watson は文献検索システムとしては素晴らしいが、医者に置き換わるものではない。しかし、それを理解しない営業と顧客の手に渡ることで、全く期待に添わない結果となった例がある。

コンピューターサイエンス 60 年の間に、例えば再帰呼び出しが最大の関心時であったり、記号処理や探索アルゴリズムの実現が第一次 AI ブームだったりした歴史があるが、それらの技術は、現在では当たり前のように計算機科学分野で利用されている。第二次 AI ブームで注目された知識表現のような概念も、オブジェクト指向言語に取り入れられている。このように、現在取り沙汰されている統計的機械学習も、数年もすれば、当然のようにソルバーとして利用されているだろう。

深層学習は、非常に簡単に言えば、関数である。ただし、演繹的ではなく、帰納的な方法で、システムを模倣するように関数をつくり込む。つまり、システムを動かすアルゴリズムやモデルが分からなくても、データがあればそれを例示することができる。

深層学習は、過去のデータに基づいて未来を予測するため、変化が激しい世界には適応できない。例え過去と未来が同じ法則で動いていたとしても、訓練データセットにない稀な事象に対しては、ほとんど上手く動かない。非常事態に対応するシステムは、深層学習では作成できない。さらに、訓練データセットのランダムサンプリングを利用するので、100%の確約をもつシステムは原理的に保証できない。ただし、訓練データセットをうまく集めることができれば、これまでにないソルバーとして利用できる可能性がある。

例えば、土木工学に知識体系ができていて、社会から信用を得ているように、機械学習についても、工学的法則が必要である。土木工学ハンドブックには、構造計算の理論があり、安全性係数を定めて社会と対話することで、社会と契約をしている。このように、機械学習にも必要なデータ品質の指標を定める必要があると考えている。

セッション2：科学技術政策に求められる方法論

1. システムとしてのフロンティア人工物のアプローチ（稗方和夫 先生）

システムとは、様々な要素から構成され、その機能が個別の総和以上になるものである。複雑な社会技術システムをどのように構築すればよいか、今すでにあるインフラに新しい技術をどのように取り入れたらよいか、設計プロセスについてシステムズアプローチ⁶の取り組みを説明する。

システムズアプローチでは、あるシステムを対象に、取り巻く利害関係を分析し、その利害関係の中から要求を分析する。その後、システムの要件、コンセプト、アーキテクチャといった技術的な分析をして、取り得る選択肢と方策を検討する。

システムを複雑にするのは、要素間の相互接続や要素分割である。制度や人工的な制約を直すべきで、システムを複雑にして対応するべきではないと考えている。システムシンキングは、疑問や状況や問題をシステムとして明示的に考えることである。システムを設計するために、知識の記述をベースとしたシステム構築の方法論と、分野の異なる専門家がチームワークで問題を共有するアプローチが必要である。

まず、システム設計における利害関係について、SVN (Service Value Network) というダイアグラムを記述し、チームで共有して全体の理解を進める。次に、要求分析を行い、機能要求と非機能要求を明らかにし記述する。MTI では、OPM と呼ばれる言語を技術言語として採用し、明示的に記述している。その後、要求を満たすためのシステム要件を明らかにし、方策を提案する。

東大はMIT と共同で、社会人学生を対象に、システムズアプローチの教育プログラムを実施している。日本企業の凝り固まった考え方から視野を広げる意味でも、MIT での研修はよい経験となっている。

2. 科学技術政策に求められる方法論（竹森裕樹 先生）

金融投資家がどのような視点で科学技術に投資を考えるかといった観点からの日本固有の問題への解決策として、組織の仕組みを変える、人材を流動化する、労働力減少を補うためのデジタル変革が求められている。組織が変わることへの抵抗もあるが、変わらないことが一番のリスクである。国からの自立も必要である。

フィンランドの事例（ビジネスフィンランド）として、NOKIA が破綻した後に人材が流動化し、大企業とベンチャー企業の生態系が生まれた。結果としてファンディングが多様

⁶ 本文中では「システム科学的方法論」とした。

化し、NOKIA も再生し、フィンランドのベンチャー企業も活性化している。外国の資金も入れながら、ビジネスを活性化している。

ヴァルチラというフィンランドの船のエンジンをつくっている会社に投資しているが、船の設計や自動化にも乗り出しており、船のエコシステムといった観点から世界を変えていこうとしている。

これらの経験から、今後の日本の科学技術政策に4つの提案がある。1つ目は、業種・企業の垣根を破壊し、各々の既存技術を組み合わせる必要がある。企業・業界単位では、イノベーションは起きにくい。2つ目は、官が必要に応じて、時には全体をコーディネートするようにリーダーシップを発揮しながら、官と民のディスラプションを起こすことである。3つ目は、人材を固定化せず、自由に出入り可能な風土をつくることで、人材を最適な環境に配置することである。4つ目は、企業の大小に囚われず、よいものをまず取り入れることである。このためにも、民の垣根を壊しながら、国がコーディネートするのが理想的だと考えている。

セッション3：これからの科学技術を担う人材育成について

司会：鈴木真二 先生

1. 大坪新一郎 先生

現在では、重工系の力が弱くなっていること、伝統的な造船技術だけでなく新たな領域（IT など）が必要になっていることなどから鑑みて、新しい人材が必要になっている。IMO などの国際交渉において、担当テーマを熟知し、国際交渉の方法・ノウハウを習熟している国際人材が求められるため、そういった人材を計画的に育成しなければならない。今までは組織力で人材育成をしていたが、いつ崩れるかわからない。外の人材と産業をつなぐ役割を、研究機関が担って欲しい。

2. 袴田 武史 先生

Moon Valley 2040 など、人間が宇宙に生活できる未来・何万人かの規模の人間が宇宙で活動する未来をつくるためには、宇宙産業だけでなく、経済基盤をつくる必要がある。宇宙への安定的な輸送サービスを構築するために、設計の初期段階から経済的合理性を入れていかないといけない。宇宙機の開発は、技術的側面に偏っているが、経営と資本が必要である。

3. 海野光行 先生

次世代に海を引き継ぐために、日本財団オーシャンイノベーションコンソーシアムでは、世界の海底地形データを収集するプロジェクトを実施している。このようなプロジェクトを遂行するためには、人材の多様性とビジョンの共有が求められる。オールジャパンには限界があり、日本人がコーディネートする日本チームが必要である。異分野が絡むプラットフォームも求められる。

4. 中須賀真一 先生

科学技術を担う人材には、自分で問題解決するマインドセットと情熱が必要である。大学では自力で問題解決する経験を繰り返し、自分で分からなければ、わかる人を探して能力が求められる。なんとでも解決しようとする姿勢、強いモチベーションを与える題材の提供が必要である。

日本には、問題解決することが最優先課題ではなく、問題を解くプロセスを大事にしている風潮があり、また政府・社会がイノベーションを阻害している。例えば、規制の壁があるが、規制自体が時代遅れであるにもかかわらず、これまでのやり方を変えることに強い抵抗がある。失敗することを社会が許容しない。大学が論文数の一軸評価であるなど、多様性が足りない。

実践型のリベラルアーツについて、どう考えているか？

日本の文化や歴史を理解し、伝えられる人材が必要だという議論がある。国際交渉をするときに大事なのが、人間として信頼できるか、パッションがあるか、という点が必要になる。そのためには、広い教養があること、自分の専門分野があることが、信頼感を得る鍵である。(大坪)

ダイバーシティの重要性を述べられたが、会場に多様性がないのはなぜか？

いろんな観点のダイバーシティがある。性別、国籍だけでなく、思想や専門性のバックグラウンドにダイバーシティが必要である。他分野が融合するところに解があるが、それを怖がる人が多いのも現状である。実際にアクションが起きないのは、恐れがあり、心理的なハードルがあるのかもしれない。(袴田)

問題解決をしようという意識がないことが、多分野に進出する努力をせず、ダイバーシティが進まない原因だと考えている。異分野交流を促進する取り組みが必要で、マインドセットも必要である。(中須賀)

SDGs への認識と取り組みについて

国際海運の持続可能性に対しての取り組みとして、省エネ・CO₂削減・ゼロエミッション・制度的なイノベーションが必要である (大坪)

宇宙業界の取り組みは、基本的には、SDGs のどの分野にも貢献がある。例えば、宇宙の活動で新たな資源が活用される。このためには、宇宙インフラを維持する必要がある。(袴田)

日本財団では、職員の半分が女性である。障害者支援・子供の貧困対策はもとより、気候変動の取り組みなど、SDGs の課題に対しては、千年単位のスパンで考え取り組んでいかなければならない。(海野)

まず、SDGs の課題を知ることが大事である。宇宙分野では、衛星でできることが多い。例えば、ルワンダで衛星を使った干ばつ予測など、重要で危機的な課題に対応できる。(中須賀)

<付録1>マスタープラン 2020 一覧表 (航空宇宙)

重点大型研究計画

分野	計画 No.	学術領域番号	施設/研究の別	ヒアリング対象	マスタープラン 2017の重点大型研究計画	計画タイトル	計画の概要	学術的な意義	社会的価値	年次計画	所要経費 (億円)	実施機関と実施体制
総合工学	25	27-8	研究		○ (継続)	宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム (Space Technology Demonstration Program for Space Exploration Missions)	今後の宇宙探査に必須の重力天体突入・降下・着陸&長期表面滞在技術、外惑星領域 航行・往復&地下試料採取・その場分析技術を複数ミッションで実証し、科学成果も追求することで日本が太陽系探査を先導可能とする。	サンプルリターンの広域化・高度化により、ロボット工学の幅広い発展が促される。将来人が滞在するための基礎情報が得られる。太陽系の形成と進化に関する理解を高め、生命起源物質の進化過程を明らかにできる。	科学啓蒙・科学教育、人類の活動領域の拡大、スペースガード、資源利用、裾野の広い産業の牽引 (ロボット、防災・減災、グリーンイノベーション、複合材、遠隔医療、新電子デバイス等)、STEM 分野での人材育成	H30-R6 : 月面 R1-R9 : 火星 R2-R21 : 木星トロヤ群小惑星 R13-R38:土星衛星エンケラドス	総額:1520 月面長期探査ミッション:380、火星探査ミッション:360、木星トロヤ群小惑星探査ミッション:300、土星衛星エンケラドス探査ミッション:480	宇宙航空研究開発機構が中心となり、探査機開発・打上・運用を行う。海洋研究開発機構の知見も加えて、惑星検査・初期分析施設等の基盤整備を行う。多数の大学・研究所の研究者も加わる。
	27	32-1	研究			航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進 (Promotion of Scientific Research on Climate and Earth System Sciences Using Aircrafts)	わが国初となる共同利用に基づく地球観測専用の航空機を導入し、アジア・北極を中心とした観測により、大気、海洋、植生、雪氷、防災・減災などの地球科学分野を横断した、気候・地球システム科学研究を推進する。	地球環境変化予測の鍵となる 大気中のエアロゾル化学組成などのミクロ量は、航空機でのみ観測可能である。ミクロ量・素過程の解明に基づく気候・地球システムの理解という、地球科学のパラダイムシフトを実現する。	急激な環境変化が進むアジアや北極の環境把握と変動メカニズムの解明は、高い観測技術をもつ日本の責務である。環境変化の予測精度向上や、災害時に機動的に状況を把握する技術の開発により防災・減災にも貢献する。	R2-R3 : 観測準備と共同利用体制構築 R4-R9:諸分野の観測研究 R10-R11:統合的な気候・地球システム観測研究	総額 155 観測機のリース・改造・運用 130、無人機による地球観測のための技術開発・運用 10、観測機器の整備 10、人件費 (特任教授・助教各 1名、事務員 4名) や諸経費 5	全国共同利用拠点である名古屋大学宇宙地球環境研究所の飛行体観測推進センターが中核機関。JAXA 航空技術部門が地球観測の飛行技術開発のために参画。気象研などオールジャパン体制で推進。

学術大型研究計画（区分Ⅱ）

分野	計画 No.	学術領域番号	施設/研究の別	ヒアリング対象	マスタープラン 2017の重点大型研究計画	計画タイトル	計画の概要	学術的な意義	社会的価値	年次計画	所要経費 (億円)	実施機関と 実施体制
総合工学	12	27-8	研究	○		再使用観測ロケット計画 (Reusable Sounding Rocket Program)	従来の観測ロケットは打上後に使い捨てるが、再使用観測ロケットは打ち上げ後、発射点に帰還する特徴を有している。再使用観測ロケットを開発することで、革新的な実験機会を研究者に提供することが可能となる。	再使用観測ロケットを運用することにより従来の観測ロケットとは質的に異なる実験環境が提供されることになり、従来では得られない数多くの科学的研究成果が見込めることになる。	再使用観測ロケットの実用化・実利用により、将来の宇宙輸送システム実現すなわち、一般国民が宇宙に対しより身近になることを体現することができ、将来の宇宙輸送システム開発に対する国民の理解が一層深まる。	H28-R2：実験機飛行実証期間 R3-R7：機体システム開発期間 R8-：定常運用期間	総額 100 (1)機体システム開発・製造・試験費：40 (2)地上試験設備、射場設備整備費：25 (3)再使用観測ロケットエンジン開発・製造・試験費：35	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が中心となって実施する。

学術大型研究計画（区分Ⅰ）

分野	計画 No.	学術領域番号	施設/研究の別	ヒアリング対象	マスタープラン 2017 の重点大型研究計画	計画タイトル	計画の概要	学術的な意義	社会的価値	年次計画	所要経費（億円）	実施機関と実施体制
総合科学	118	27-8	研究			航空輸送のCO2削減と持続的成長に寄与するエミッションフリー航空機技術の研究開発 (Research and development of emission-free aircraft technology that contributes to CO2 reduction and sustainable growth of air transportation)	エンジン電動化技術を核としたエミッションフリー航空機を提案し、航空輸送のCO2削減と持続的な成長を両立する解を提示する。電動化という技術革新に取り組み、新しい航空科学技術分野を創出することを目指す。	本研究活動は革新技術に挑むものであり、化学材料・素材の探求レベルから高度に統合化されたシステムレベルまで、従来の航空工学の枠組みを超え、航空分野における新しい学術体系を構築するものである。	将来の航空輸送の経済的発展を阻害しかねないCO2排出量削減の問題に対して抜本的な解決手段を与えるだけでなく、エアラインにとっては莫大な燃料コスト削減の効果があり、経済的にも大きな価値を提供する。	R1-R5:ブレークスルー技術の獲得 R6-R8:電動ハイブリッドシステム飛行実証 R9-R12:高リスク技術サブシステム化	総額:73 ブレークスルー技術の獲得:25、電動ハイブリッドシステム飛行実証:24、高リスク技術サブシステム化:24	JAXA 及び航空機電動化コンソーシアム参画メンバーを研究体制の中心とし研究を実施する。
	119	27-8	施設			国内で共同利用する実験用航空機の整備 (Research Platform using Experimental Aircraft)	実験用航空機の保有体制、運用管理体制、飛行試験体制を産官学の研究コンソーシアムで検討し、飛行試験が実施可能な研究プラットフォームをSpaceJet M90の開発スケジュールと調和する形で整備する。	音響空力技術、空気抵抗削減技術・エンジン燃費向上技術、安全性向上に寄与する自律飛行制御技術・飛行データの処理による整備技術・次世代運行管理技術などの広範な技術開発に貢献できる。	実験用航空機の整備により、新しい航空技術の飛行実証が可能となり、航空機装備産業、航空機産業の発展が見込まれる。また、飛行実証に必要な耐空性証明技術伝承も可能となり、次期国産機開発の基盤整備となりうる。	H31-R4: ニーズ調査、ハンガー設置 R3-R4: 認証規則制定委員会設置 R4-R6: 機体整備 R6-: 運用	総経費:270 設備費:200 (機体+ハンガー+実験設備) 人件費(5年):20 維持費(5年):50	一般社団法人 航空イノベーション推進協議会傘下のAC研究会

	120	27-8	研究	○	超小型衛星の統合的研究開発と実ミッションおよび各種の宇宙実験を行う高度宇宙プラットフォーム化 (Integrated Research and Development of Micro/nano/picosatellites and Their Utilizations as High Level Platforms for Practical Space Missions and Various Inorbit Experiments)	超低コスト化・短期開発の超小型衛星を統合的に研究開発する技術拠点を形成、衛星通信・地球観測・宇宙科学 探査・微小重力環境利用分野等の実ミッション・宇宙実験が定常的に実現される状況を作り出す。	予算の限界で従来実現できなかった各分野の優れたミッションが多数実現されることで宇宙利用の多様化と高度化を達成し、多数機による革新的観測手法が生まれ、中大型衛星への転用は宇宙技術全体の高度化につながる。	頻繁な地球のモニターが安全安心や農林水産業、地球温暖化の監視などに貢献し、宇宙科学探査は宇宙や地球に関する知識を拡大、大容量光通信技術は今後の大きな宇宙インフラ構築のキー技術となり産業界や社会に貢献。	R1：計画期間（ロードマップ作成） R2以降：研究・開発（要素技術・衛星開発） R3以降：打ち上げ、運用 フィードバック	総額：5年で35.7 拠点形成経費（人件費中心、10名）：4.5 先端技術開発経費（年1）：5 プロジェクト実施費（50kg 級 5.3 と 3kg 級 1）：26.2	東京大学が中心となり、ほどよしプロジェクトで連携した大学・企業、PROCYON 等での連携先・JAXA および光通信の東大・NICT 共同研究を核として、利用コミュニティを巻き込む。
融合領域	137	32-1	研究		宇宙インフラ整備のための低コスト宇宙輸送技術の研究開発 (Research and Development of Revolutionary Low Cost Space Transportations for Space Infrastructure Constructions)	将来の国民の生活水準の維持のための宇宙インフラの建設や維持のために、経済的な宇宙輸送システムとしてハイブリッド宇宙エレベータと新宇宙輸送システムの、工学・社会科学両面からの研究開発を提案する。	宇宙輸送システムの新規技術を獲得することができる。関連する制御、構造、材料、空気力学、燃焼等の分野での波及成果が期待できる。社会科学の点では輸送システムの事業性や在り方を評価する機会が得られる。	衛星の軌道投入等のインフラ整備により将来にわたる国民の生活水準の維持が可能となる。産業界に対し無重力環境を提供できる。高速輸送は物流に変革をもたらす。日本の工業全体に新たな需要を生む。	R2-R7：要素技術確立と実証準備。社会科学 的評価。 R7-R12：技術実証と評価。 R12-：宇宙インフラ整備。	総額 700 設備投資 135（通信管制、風洞、射場等）、研究開発 220（エレベータ、輸送機の要素技術）、実証試験 295（飛行試験費、試験機体製作）、運営費 50（事務費、人件費等）	JAXA が全体取纏め。宇宙エレベータを静岡大と日大が担当。輸送機は理科大、早稲田、東大等が実施。設備射場整備を室工大、HASTIC が担当。社会科学 的検討を北大、立命館大が担当。

<付録2>マスタープラン2020一覽表(海)

分野	計画No.	学術領域番号	施設/研究の別	ヒアリング対象	マスタープラン2017の重点大型研究計画	計画タイトル	計画の概要	学術的な意義	社会的価値	年次計画	所要経費(億円)	実施機関と実施体制
総合工学	121	27-9	施設	○		アジアの拠点となる海洋再生可能エネルギー開発のための総合研究試験施設(Integrated Research and Testing Center for Development of Offshore Renewable Energy Served as a Hub in Asia)	海洋再生可能エネルギーの総合的な研究試験施設を実現し、基礎・応用研究、機器の性能試験、実証試験の実施により知見を蓄積、海洋再生可能エネルギー利用を促進する。アジアのハブとしての機能、全国的取組が特徴。	基礎研究開発から実証までの一貫した総合的な取り組みを通じて、知見の蓄積を行うとともに教育に反映する。アジアの研究・開発ハブ、水産業との協調、国際基準策定のリード、アセアン各国支援の機能を実現する。	海洋国家のポテンシャルを活かして、再生可能エネルギー利用による地球環境問題解決、持続可能社会の実現、エネルギー自給率向上に貢献する。また、わが国の重要課題である海洋分野人材育成の機能を強化する。	初年度:運営組織立ち上げ 2-3年度:施設・設備建設、評価機器設置 4年度:運用開始 5年度:国内外との本格連携開始	総額 216 本部機能5、実海域再現施設50、実証サイト70、研究開発施設63、気象研究施設5、人材育成施設20、社会受容研究施設2、国際展開拠点1	大学(東大、阪大、九大、横国大、佐賀大、長崎大、日大、長総大)、OEAJ、国立研究開発法人(海技研、港空研、産総研、NEDO)、日本海事協会、地方自治体および関連組織、海外関連組織
	122	27-9	研究			海洋環境の持続可能で安全な利用に資する情報インフラの構築 (Information infrastructure for sustainable and safe utilization of the ocean environment)	海洋の安全かつ有効な利用に資する情報インフラの構築を目指す。そのために、海洋空間利用計画に必要な情報を一元的に管理するための、観測センター、データセンターを設立し、社会実装する。	海洋の知見、海洋環境情報、社会的な情報を、海洋を利用する立場から集約・加工し、配信する。地球規模の問題に対する一つの解決策としてだけでなく、新たな海洋学的な発見や新たな機器の開発へとつながる。	社会実装により、ユーザーへの情報伝達と利用について検証する。フィールドでのデータ利用の推進により、ニーズからデータの集約を試みる。海域利用者の協力により、船舶などを観測に生かし、稠密観測を実現する。	R2-R4:稠密観測網、海洋通信インフラ準備 R5-R6:地域特化社会実験の実施	地域センターの設立およびスケラブルな通信インフラの整備:観測センター20、データセンター10、社会実験センター5、海洋通信インフラ20	東京大学及び船舶・海洋関連大学コンソーシアム、海上・港湾・航空技術研究所等国土交通省関係、海洋研究開発機構等文部科学省関係、農林水産関係の研究所と現業機関との省庁横断的な共同体制
	123	27-9	研究			スマートマリンシステム実現のための研究開発基盤の構築 (Construction of R&D infrastructure for realizing Smart Marine System)	脱炭素化、デジタル化、自動化、人工知能(AI)に関する新技術を織り込んだ「海事産業3S(スマートシップ、スマートヤード、スマートラボ)」を評価・実現するための研究開発基盤を5カ年	GHG排出ゼロ技術、自動運行・運転技術、遠隔監視技術、デジタルツイン技術は、海事分野のみならず、多くの産業分野における製造業に関わる工学系学術分野への波及効果・寄与は大きく、学術的意義は大きい。	我が国貿易の99.7%を占める海上輸送におけるGHG排出量を早期にゼロとすることは我々人類に課せられた使命であり、深刻化する労働力不足の解消は社会問題として懸念されている少子高齢化の克服	R2-R4:不足技術開発 R5:ラボ建設・運用、小型プロトタイプ実験 R5-R6:実証船建造・実験、大型プロトタイプ実験	総額:142 スマートシップ実験船開発・建造:60 スマートラボ施設建造:55 スマートシップヤードのプロトタイプ製作・実証実験:27	海上技術安全研究所(本研究の全体取り纏め)、東京大学、長崎総合科学大学、大阪大学、日本船舶海洋工学会、日本マリンエンジニアリング学会、日本航海学会

124	27-9	研究				途上国の SDGs 達成に資する深海エネルギー・鉱物資源の開発のための実海域実証実験の実施および深海水槽の建設 (Real-Sea Demonstration for Development of Deep-Sea Energy and Mineral Resources and Construction of Deep-Water Experiment Basin for Achieving SDGs in Developing Countries)	で構築する。 深海には、熱水鉱床、メタンハイドレート、レアアース、海洋深層水などが存在し、その開発技術の開発は国益となるだけでなく、その技術を以てアジアやアフリカなど広く途上国の経済発展に寄与する。	深海底から表層までの潮流や風波の環境状態を模擬できる大規模海洋総合研究施設を構築することにより、効率的で安全、環境負荷を配慮した海洋開発の学術分野を進展させる世界の中核的な研究拠点となる。	に裨益する。 未開拓の深海の資源、空間、機能の活用の道筋をつけることにより、我が国の EEZ に賦存が期待されている豊富な資源・エネルギーの開発を、途上国に先駆けて実施し、途上国への技術移転、人材育成に貢献する。	R2 : 概念設計 R3 : システム構築、水槽実験 R4 : プラント製作 R5 : 試運転、環境アセス R6 : 実海域続運転	総額 708 概念設計 26、システム構築・水槽実験 27、試運転・環境アセス 243、実海域続運転 412	主として九州大学総合理工学研究院にて、燃焼実験と震災避難・海護システムのシミュレーションを担当し、主として東京海洋大学にて、自動運航 Hybrid 船シミュレーションを担当する。

(出典) 日本学術会議第 24 期学術の大型 研究計画に関するマスタープラン (マスタープラン 2020)