

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	宇宙産業創出に向けた官民連携スキームに関する研究
Title(English)	Research on a public-private partnership scheme for space industry creation
著者(和文)	高田真一, 日高一義
Authors(English)	Shinichi TAKATA, Kazuyoshi HIDAHA
出典(和文)	日本機械学会論文集, Volume 90, Page 24-00173
Citation(English)	Transactions of the JSME (in Japanese), Volume 90, Page 24-00173
発行日 / Pub. date	2024, 7
DOI	https://doi.org/10.1299/transjsme.24-00173
Creative Commons	The information is in the article.

宇宙産業創出に向けた官民連携スキームに関する研究

高田 真一^{*1*2}, 日高 一義^{*1}

Research on a public-private partnership scheme for space industry creation

Shinichi TAKATA^{*1*2} and Kazuyoshi HIDAKA^{*1}^{*1}Institute of Science Tokyo

3-3-6 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan

^{*2}Japan Aerospace Exploration Agency

4-6 Kandasurugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8008, Japan

Received: 27 July 2024; Revised: 15 September 2024; Accepted: 31 October 2024

Abstract

The purpose of this paper is to present a new open innovation type public-private partnership scheme in the space sector, which is suitable for the space industrial complex in Japan, to promote R&D and to realize national projects by public R&D agencies, and to create commercial business by private companies simultaneously. Compared to other sectors, system development and business creation in the space sector remains difficult. Then typical public-private partnership methods from other industries cannot be applied to the space sector, although the U.S. and other countries are promoting public-private partnerships in the space sector. And the more private sector support is provided, the more it will affect the R&D capabilities of public R&D space agencies. Furthermore, Japan has a large gap with the U.S. in terms of technological infrastructure and budget, making it difficult to apply the space public-private partnership methods of the U.S. The scheme proposed in this paper is based on a technology-circulating collaboration model applicable to the Japanese machinery manufacturing industry in general, with modifications to adapt it to the space industrial complex in Japan and to help solve the above issues. Then, a case study analysis is presented to illustrate the suitability of this scheme.

Keywords : Space engineering, Space industry, Public private partnership, Open innovation, Technology circulation model, Problem co-creating type technology circulation model, Chain-linked model, Linear model

1. 緒 言

宇宙産業は裾野の広い関連産業を持つ総合産業で、世界市場の成長率は約 3%であり、2040 年代には、2020 年の 3 倍となる約 1 兆ドルへ成長見込みとされる (Morgan Stanley, 2020)。日本政府は、宇宙産業を日本経済における成長産業とするため、宇宙機器と宇宙ソリューションの市場を合わせて、2020 年に 4.0 兆円の市場規模を、2030 年代の早期に 2 倍の 8.0 兆円に拡大する計画を設定している (内閣府, 2023)。宇宙産業創出には、民間企業等が参入し、民間主導型の宇宙事業を創出していく必要があるが、現時点、本領域の市場に買い手と売り手は多く存在せず、収益性の高い事業が少ない。民需が 80%の商用衛星通信事業を除き、宇宙輸送事業の 75%、衛星事業の 80%、軌道上サービスや宇宙探査分野は官需中心である (Kim, 2023a)。加えて、技術開発が依然困難な領域とされ、宇宙産業創出には技術基盤の更なる強化が必要とされる。

本状況に対し、欧米では、研究開発と国家プロジェクトを担う米国航空宇宙局 (NASA) 等の公的研究開発機関 (官とする) と民間企業 (民とする) との協業による取り組みが進む (Adnan 他, 2019)。しかし、インフラ分野等の他領域と比較し、設計、開発、打上げ・運用、資産維持、市場、残存リスクが厳しい状況にある (Kim, 2023a)。この

No.24-00173 [DOI:10.1299/transjsme.24-00173], J-STAGE Advance Publication date : 8 November, 2024

^{*1} 正員, 東京科学大学 (〒108-0023 東京都港区芝浦 3-3-6)^{*2} (国研) 宇宙航空研究開発機構 (〒101-8008 東京都千代田区神田駿河台 4-6)

E-mail of corresponding author: takata.s.ad@m.titech.ac.jp

ため、宇宙産業創出に向けた官民連携(宇宙 PPP とする)は、他領域の PPP のリスク配分手法、役割分担が適用できず(Xavier and Vidal, 2006), 独特に複雑で独自のフレームワークが必要とされる(Kim, 2023a).

また、米国で多くみられる、官が既存の知見に基づき、民を技術支援する宇宙 PPP の場合、官の関与が増えるほど、官の研究開発機会が相対的に縮小し、新たな知識や専門性の蓄積が困難となり、官の組織能力が低下し得る(Mazzucato 2018). 一般的に、官は自らの研究開発を通じて挑戦的な国家プロジェクトを実現し、将来の多様なミッション検討能力を獲得するからである(Mowery 2012, Foray 2012). また、民への分担・リスクのシフトが進むほど、民は技術的リスクを避け、宇宙事業の技術パフォーマンスが低下する傾向にある(Kim, 2023b).

更に我が国の場合、米国と比べ、民へ提供可能な官の技術基盤が小さく、既存の技術基盤や技術知見だけでは、民への技術支援が十分ではない場合が多い。また、人的リソースが小さく、官は自らの研究開発活動を優先せざるを得ない場合もある。

以上の課題を解決し、我が国の国家政策実現へ貢献するため、本研究では、日本の宇宙産業創出における官民の集合体(宇宙産業複合体とする)の特性を考慮し、官の技術基盤の高度化と国家プロジェクトの実現、そして競争力の高い民の宇宙事業の創出を同時に実現する、新しい宇宙 PPP 手法を提案する。そして、我が国の宇宙輸送分野の4つの連携事業に適用して連携の時間的変化を捉え、連携が機能する条件や課題について論ずる。

2. 産学官連携のイノベーション・モデルと我が国の宇宙産業複合体の特性

2.1 イノベーション・モデル

イノベーション創出の過程を概念化したモデルとして、「リニアモデル」(Kline and Rosenberg, 1986), 「連鎖モデル」(Kline, 1992), 「循環モデル」(高村他, 2016), 「課題共創型技術循環モデル」(加藤他, 2022)が存在する。

「リニアモデル」では、基礎研究、応用研究、開発、生産、マーケティングによる収益化という逐次的プロセスを経て技術イノベーションが成立する(Fig.1). フィードバックのプロセスは明確に含まず、研究と開発のベクトルが異なることに起因する「魔の川」、開発から顧客視点に軸足を移す際に生じる「死の谷」、市場競争において障壁となる「ダーウィンの海」の障壁が存在する(高村他, 2016). 「連鎖モデル」は、潜在的市場をイノベーション・プロセスの端緒とし、研究と事業創出のプロセスを各段階で相互作用させ、新しい商品を市場に提供する(Fig.1). 研究は本プロセスの外側に位置し、新たな知識が必要な時に、研究成果が適宜投入される(高村他, 2016). 日本の製造業を研究対象として考案されたモデルで(高村他, 2016), 従来日本企業のイノベーションの特徴に近い(Kline, 1992). その世代の商品化における課題解決を対象とし、次世代の技術開発への展開は含まない(加藤他, 2022).

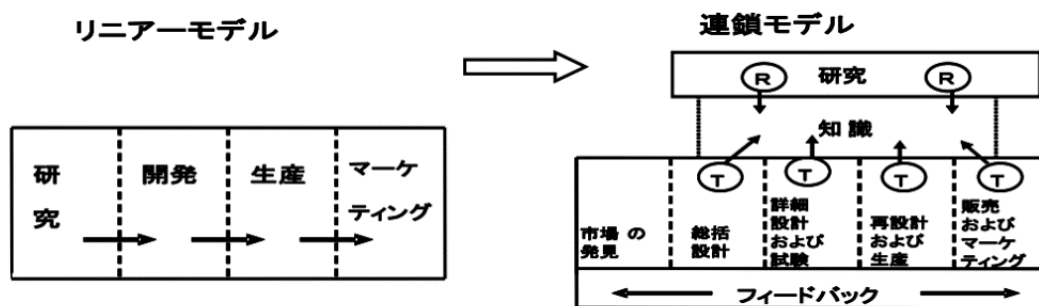


Fig.1 Linear Model(リニアモデル, Kline and Rosenberg, 1986) and Chain-linked model(連鎖モデル, Kline, 1992)

上記に対し、「技術循環モデル」と「課題共創型技術循環モデル」では、技術シーズから開始し、連携を通じて、科学 S(Science)→技術 T(Technology)→工学 E(Engineering)→製造&サービス M&S(Manufacturing & Service)を経て、次世代の技術課題を識別し、再び科学 S(Science)に循環し、連携を持続・発展する(Fig.2). 「技術循環モデル」では、大学等が技術シーズから製品開発に適用する手段を見出し(Region I), 大学等と企業が連携して実用化技術を確認して製品開発し(Region II), 企業が製品の量産及び市場投入を行う(Region III). そして、大学等と企業が連携して商品の経時的機能低下の原理をモデル化し、新しい技術シーズの原理を発見して体系化・理論化し

て新しい科学的知見を得る(Region IV)(高村他, 2016). 「課題共創型技術循環モデル」では, Region IVから Region Iの技術シーズの研究開発, Region IIの実用化開発までを, Region Vとして統合し, 大学等と企業が連携を継続することで, 相互に実利のある成果へつなげるモデルとなる(加藤他, 2022).

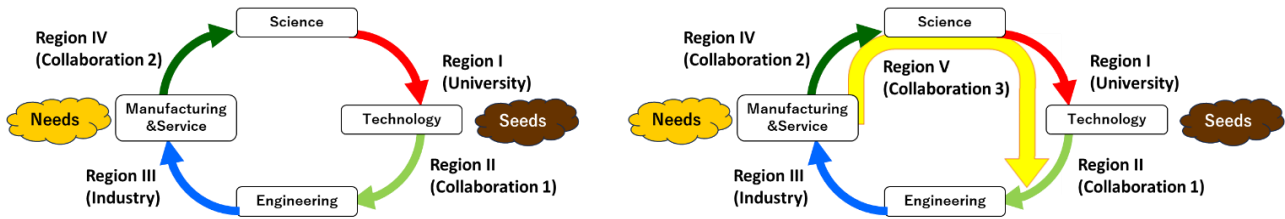


Fig.2 Technology circulation model (Takamura, 2016) and Problem co-creating technology circulation model (Kato, 2022).

2・2 我が国の宇宙産業複合体の特性

米国政府は2000年から20年間で計360億ドルを投資し, 政府が宇宙インフラ開発・構築の全額を負担して資産を取得・保有する従来方式から, 民が官の技術支援を受けながら, 自ら資金負担し, 独自事業の設計・開発・所有・運用を行う方式への移行を進める(Kim, 2023a Karen, 2018). 2006年に開始した商業軌道輸送サービス開発(COTS)プログラム(Hackle, 2014)では, NASAがスペースシャトル等の既存の知見・経験に基づき, 民へ保有知財提供, 技術支援し, 民が従来比で短期・低コストで軌道輸送サービス創出に成功した(Zapata, 2017).

我が国では, 100社超のスタートアップ企業, 100社超の大企業・異業種企業が, 独自の宇宙事業創出に取り組む(SPACETIDE, 2024). 多くの企業が, 官の国家プロジェクトの設計・開発・製造・運用を民が担う従来方式や, 完成したサービス運営を民間移管する方式ではなく, 民が独自の事業アイデアや技術に基づき, 主体的に宇宙事業創出を目指す方式で取り組む. 日本政府は, 2020年以降, 宇宙産業創出に向け, 大型資金提供を伴う複数の支援プログラムを開始しているが, 米国の長年の取り組みと比べ, まだ開始段階にある. また, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)は, NASAと同様に, 基礎研究から開発・利用による国家プロジェクト実現まで担っているが, 民間事業創出に貢献する技術基盤の強化, 民への技術支援への期待が高まる. しかし, 日本の宇宙全体予算規模は米国と比べて小さく, 技術基盤や技術支援を担うリソースが官側に十分にあると言い難い. このため, 独自の宇宙事業創出に取り組む多くの企業に対し, 米国のように, 既存の知見に基づく技術支援に注力する連携手法は困難である.

なお, 宇宙分野のロケット, 衛星等の各領域では, 官の国家プロジェクト実現と, 民の宇宙事業創出における技術課題が共通する場合が多い. また, 一般的に, 官は, 新しい技術を自らの国家プロジェクトに適用する場合, 検証や飛行実証を慎重に進める傾向にあるが, 民は市場の動向を見極めながら事業計画を策定し, 時には挑戦的なスピードで事業開発を進める. これらを踏まえると, 我が国では, 特性の異なる官民が, 共通技術課題を識別し, 双方のリソース, 計画を整合し, 連携して技術課題解決に取り組むことで, 双方が各々単独で取り組む場合と比べ, 官の研究開発と民の事業創出が効率的に促進される可能性が考えられた.

上記を背景に, JAXAは, 2018年度からの7年間の中長期計画において, 「宇宙利用拡大・産業振興」を柱施策の一つとして設定し(JAXA, 2018), 同年5月から, 民間との協業プログラムを開始した(JAXA新事業促進部, 2018). 本連携では, JAXAから連携企業側への資金提供は無い. また, 日本政府が進める民間事業者等と協働で行う事業強化(内閣府2018)に対応している(高田2022, 伊達木2023). 宇宙イノベーションパートナーシップ(J-SPARC)と名付けられた本プログラムでは, 民独自の事業アイデアや事業構想に基づき, 双方に共通する技術課題を見極め, JAXAの技術成果の適用先を, 国家プロジェクトに加え, 外部の民間独自事業にも見出すことで, 双方の課題の同時解決を進める. そして官民双方の知見や資源, 実証機会等を統合し, JAXAが, 民の事業計画に合わせ, 民にとって使用価値の高い技術成果を創出する. 本取組の結果, JAXAの技術成果創出と民の事業創出が加速される成果が生まれ, 更に, 民の事業活動における技術活用結果がJAXAへフィードバックされることで, JAXAの次代の研究開発テーマの発見へつながる事例が生まれてきた. また, JAXAが先行して進めている基礎研究の成果や研究計画と, 民の技術課題を関連付けることで, 本連携が促進されることも分かってきた.

以上より、宇宙 PPP に関する先行研究課題に対応した連携スキームを提案する上で、我が国の宇宙産業複合体の特性、J-SPARC の取り組み結果より、次の点が重要と考えられる。

- ・官民共通の技術課題を識別し、官が先行して進めている基礎的な研究開発活動との整合をとる。
- ・官は、国家プロジェクトと、民独自事業の両方で有用となることを目指し、研究開発を進める。
- ・民は、官の獲得する技術成果を活用し、独自の市場分析に基づき、自らの資金で、事業開発を進める。
- ・官は、官の獲得する技術成果を活用し、国家プロジェクト開発を推進する。
- ・官民が技術成果を活用した結果は、官にフィードバックされて次代の研究開発テーマの発見につなげる。

3. 我が国の宇宙産業複合体の特性を踏まえた連携モデル

3・1 我が国の宇宙産業複合体に適した官民連携イノベーション・モデル

日本の宇宙産業複合体において、官民連携状況の把握には、官の研究開発をコアプロセスに位置付け、技術が官民の間を循環する時間的推移をとらえることが重要であり、リニアモデル、連鎖モデルは適切ではない。このため、日本の機械産業分野において活用され、研究開発をコアプロセスに位置付け、産官学で技術を循環させ、新たな技術と産業を生み出す「循環モデル」(高村他, 2016)及び「課題共創型技術循環モデル」(加藤他, 2022)をベースとする。更に、2.2 項で示した、我が国の宇宙 PPP において考慮すべき点を捉えるため、本モデルを日本の宇宙産業複合体の特性を踏まえて修正し、事業共創型技術循環モデル(Fig.3)として提案する。

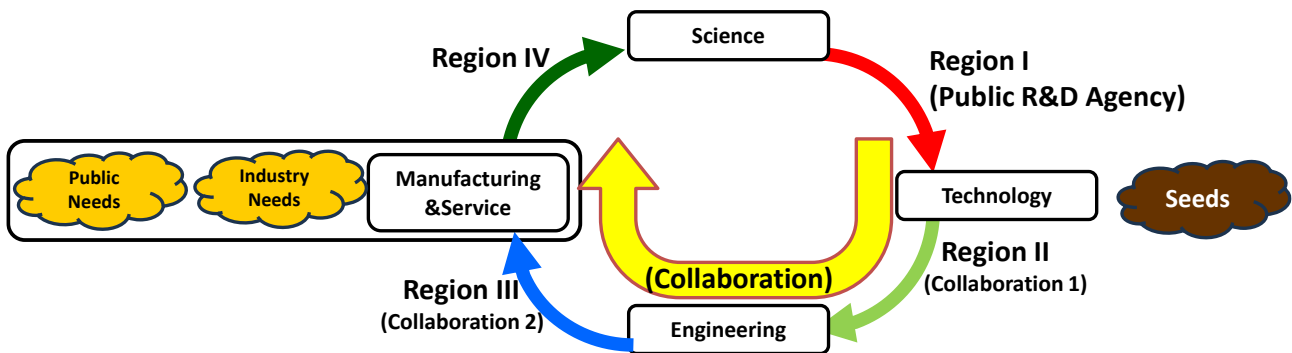


Fig.3 Business co-creation type technology circulation model

「事業共創型」では、各宇宙事業領域において官の国家プロジェクトと民独自の事業の両方の創出に向けて、共通する技術課題を設定し、官の保有する技術シーズの識別を出発点とする。そして、官の研究開発計画と、民間事業創出に向けた技術課題への対応を整合し、官主体で技術を高めながら、民独自の事業創出まで連携する。また、「技術循環」とは、高村(2016)、加藤(2022)らの定義にある、技術が、科学(S)⇒技術(T)⇒工学(E)⇒製造&サービス(M&S)⇒科学(S)へ循環する流れと同じとする。宇宙産業でも、事業領域が拡大し、民は、法人向けの製造に加え、法人と消費者双方向けのサービス提供までスコープに入れるケースが多いため、高村(2016)らと同じく、産業の最終段階を製造とサービスの両方と定義する。ただし、主たる連携のフェーズ、官の技術成果を官民双方が活用し、各々のプロジェクト、事業の実現を目指す点が異なる。

Region I では、官が、科学領域で得た官の技術シーズに対し、官の国家プロジェクトの実現、官が保有すべき技術基盤の整備を目指し、基礎的な研究開発を進める。本基礎的な技術基盤の存在が、官民の間を循環していく技術の出発点となる。Region II では、独自の民間事業創出への強い意志があり、技術課題を保有し、官との連携活動にコミットする民との対話が始まる。民の事業構想と技術課題が官に共有され、官の基礎的な技術成果、官側の技術課題に基づき、官民共通の技術課題が識別される。官は、民の事業創出活動と連携し、当該技術の成熟度を高め、民にとって使用価値の高い新しい共通技術基盤として整備する。また、民は、官の研究開発活動と連携しながら、暗黙知的な観点も含む官の知見やノウハウ、試験・解析に関する運用手法等を習得し、自らの事業開発へ活用する。Region III では、官の技術成果が、民独自の事業開発と、官の国家宇宙プロジェクト開発の両方に適用されて試行される。そして、各々の試行結果に基づき、官は、更に技術開発を進め、技術成果の使用

価値を高めていく。官の技術成果が、民の事業に活用され、民の飛行機会で実証される場合もある。Region IVでは、民の事業実証・市場投入結果と官の国家プロジェクトでの活用結果の両方が、各々官にフィードバックされ、官は、次世代に向けた新たな研究開発課題を識別し、新しい科学的知見の獲得へとつなげる。

以上より、高村(2016)らが提唱した、既存技術を出発点とし、製造&サービス M&S から科学 S に戻る流れを、我が国の宇宙産業複合体の特性にあわせて修正し、技術が世代を超えて、循環する流れを実現することが可能となる。また、官民の特性の違いを活かした連携を構築することで、官民が連携するほど、官の研究開発と、民の事業創出が促進される仕組みとなり、NASA 等の宇宙 PPP モデルで指摘されている課題への対応策となり得る。

しかし全てのケースで本連携が機能すると限らず、連携状況を正確にとらえ、連携促進要因を把握する必要がある。このため、日本の宇宙輸送分野の事例分析を通して、実践的な示唆を整理する。

4. 事例分析

我が国の宇宙産業複合体の特性を踏まえた宇宙 PPP のマネジメント手法として、事業共創型技術循環モデルが有効か、事例分析に基づき立証する。本研究では、JAXA の J-SPARC プログラムにおける約 50 件の宇宙 PPP 事業の中から、宇宙輸送分野の連携事業に着目し、インターステラテクノロジズ株式会社(以下、IST 社)、スペースワン株式会社(以下、S1 社)、PD エアロスペース株式会社(以下、PDAS 社)、川崎重工業株式会社(以下、KHI 社)との計 4 件の連携事例を分析対象として取り上げる(Table 1)。IST 社、S1 社は、小型ロケットの研究開発・製造・打上げ運用により、世界で増加する小型衛星打上げ事業の創出を目指す企業である。PDAS 社は、完全再使用型サブオービタル宇宙機による輸送事業等の創出を目指す企業である。KHI 社は宇宙分野で実績豊富な民間事業者であり、小型衛星分離機構による独自の宇宙事業を進めている。

Table 1 Correspondence of each Co-Creation region in the business co-creation type technology circulation model

-	IST	S1	PDAS	KHI
共通技術課題	小型ロケット向けのエンジン技術	ロケットの飛行解析技術	高揚力サブオービタル宇宙機技術	非火工品分離技術
3 時→6 時 (Region II) での活動	主要コンポーネントの低コスト・軽量・高性能化研究	飛行解析技術の高性能化	空力・構造設計、エンジン搭載性に関する技術開発	非火工品分離デバイス信頼性設計・試験技術開発
6 時→9 時 (Region III) での活動	エンジン研究開発 (今後飛行実証予定)	高性能飛行解析環境構築、事業活用	実証試験機的设计・開発、飛行実証	小型衛星分離機構の製品開発、事業活用

4・1 IST 社との軽量低コストロケットエンジン研究

IST 社は、液化天然ガス(LNG)を燃料とする 2 段式の液体ロケット ZERO の開発を進め、北海道の射場から、小型衛星の希望する軌道、日程で柔軟な打上げサービス提供を目指す。ロケットの設計から量産製造・打上げ運用まで自社で一貫通貫に行い、打上げまでの期間を大幅短縮、サービスの抜本的低価格化を目指す(IST, 2023)。

I) 0 時→3 時(Region I)

LNG は供給安定性が高く、温室効果ガス排出が比較的少なく、密度が比較的高く燃料タンクの小型化が可能で、次世代のロケット推進薬として期待されている(IST, 2020)。しかし、日本では、LNG を用いたロケットエンジンの開発実績が少なく開発リスクとなり得る。JAXA は、実績のある水素を燃料としたロケット推進系に加え、将来の活用を視野に、2003 年から LNG を燃料としたロケット推進系の研究開発を本格開始し、基盤技術の獲得、燃費性能向上に関する研究等を進めてきた。そして、LNG を燃料とするロケットエンジンの主要部品である燃焼室の噴射方法の改良試作を段階的に進め、2019 年には燃費性能の向上を実証した(南里 2022)。

II) 3 時→6 時(Region II, 連携領域 1)

ロケットエンジンは、極低温推進薬の取り扱い、推進薬の噴射、燃焼、伝熱・冷却、極低温トライポロジー、軽量材料、低コスト製造が関係する複雑なシステムである。IST 社の主要技術課題の一つが、小型、低コスト、取扱性の良いロケットエンジン開発であった(Yamashiro, 2023)。JAXA と IST 社は、小型ロケットエンジンの主要コンポーネントである噴射器、燃焼室等の開発を、共通する技術課題として識別した。そして、JAXA が技術開発を進め、IST 社と JAXA の双方が本技術成果を活用する連携を考案し、取組を開始した(Yamashiro, 2023, IST and JAXA, 2022)。IST 社の事業で求めるエンジン技術、コスト目標が共有され、JAXA は IST 社のイノベティブなアイデア、スピード感のある手法を取り入れて技術開発を進めた。IST 社は本技術成果を想定し、また適宜共有されながら、ロケット事業開発を推進した(IST and JAXA 2022)。2019年5月には IST 社のエンジニアが JAXA ロケットエンジン開発拠点へ、また、2020年4月には JAXA エンジニアが IST 社へ出向し、開発現場での連携も強化された(岩本, 2020)。

連携当初、IST 社は、LNG ではなく、IST 社で実績のある常温炭化水素系を燃料とするロケットエンジン開発を進めていた。しかし、2020年1月、IST 社が設計した噴射器を用いた LNG エンジンの燃焼試験結果を踏まえ、2020年3月、常温炭化水素系から LNG への燃料変更を決定した(IST 2020, IST and JAXA 2022)。本変更によって、IST 社と JAXA の技術課題の共通範囲が大幅に拡大し、各々単独でエンジン主要コンポーネントの研究開発を行う場合と比較し、効率的に広範囲のデータを取得し、実用的な技術獲得へつなげた (IST and JAXA 2022)。

III)6時→9時(Region III, 連携領域2)

Region II での連携成果に基づき、IST 社と JAXA は、小型ロケットエンジンのシステム技術を、共通する新たな技術課題として識別した。JAXA は、IST 社と対話を通して、ロケットエンジンの性能やコストの目標仕様を設定し、LNG を燃料とする4トン級ロケットエンジンの研究開発を進めた(IST and JAXA 2022) (Fig. 4)。



Fig.4 LNG-fueled small rocket engine under research and development by JAXA in collaboration with IST

エンジンの噴射器開発では、JAXA が基礎研究を進めてきたピントル衝突型と呼ばれるタイプが採用された。従来比で大幅に部品点数が少なく、構造がシンプルで、製造コスト削減への期待が高く、また、エンジンの推力要求に応じてカスタマイズ開発が比較的容易とされ、アジャイル開発方式に適しており、将来の多様な活用が期待される(Vasques and Haidn 2017, Nardi 2015)。JAXA は、IST 社からフィードバックを得ながら、約6MPaの燃焼圧で燃焼試験(Fig. 5)を実施し、実用レベルで求められる燃焼効率を達成した。JAXA は、並行してエンジン燃焼試験設備の機能高度化を進め(JAXA 2020)、より高頻度・低コストで燃焼試験実現を可能とした(Yamashiro 2023, JAXA 2022)。また、燃焼器開発では、同じく JAXA が基礎研究を進めてきた、熱間等方圧加圧法(HIP 法)による製造手法の開発を進めた。接合条件の設定が困難であったが、試作を繰り返し、漏れのない再生冷却型燃焼器の製作に成功した。今後の複数燃焼室の同時接合、将来量産時の大幅コスト低下が期待される技術成果である(Yamashiro 2023)。JAXA は、更なる低コスト化研究(JAXA 2022)、リファレンスとなるエンジン開発を進めており、JAXA の将来事業や IST 社を含む様々な民間企業での活用を進めていく予定である(IST and JAXA 2022)。



Fig. 5 Status of testing rocket engines under research and development by JAXA in co-creation activities with IST.

4・2 S1 社との飛行解析技術の高度化

S1 社は、固体推進薬を用いた 3 段式の KAIROS ロケットの開発を進め、和歌山県の射場から、柔軟で汎用性の高い打上げサービスを、高い信頼性と低コストでの提供を目指している。2018 年 7 月に発足し、日本が長年蓄積してきた固体ロケット技術を継承して事業創出を進めている (S1, 2024)。

I) 0 時→3 時 (Region I)

本研究で対象とする飛行解析技術とは、ロケットの飛行経路計算及びモンテカルロシミュレーション等による、ロケットの上昇、落下予測解析を実施する技術である。これまで JAXA 主導で研究開発・整備・運用を進めてきた。そして、JAXA の基幹ロケットにおける傷害予測数解析等に使用してきた (内閣府 2019)。

II) 3 時→6 時 (Region II, 連携領域 1)

JAXA と S1 社は、海外の民間宇宙輸送サービスと比較し、衛星事業者等の顧客ニーズに応じた衛星打ち上げ成立性の早期判断を行うため、多様な飛行解析を短期で行うために必要となる飛行解析技術の高度化を、共通する技術課題として識別した。本技術を用いた統合解析ツールは宇宙活動法ガイドラインでも紹介されており (内閣府 2019)、本取組が、民間ロケット事業の競争力強化に加え、JAXA の将来事業にとっても有用であると判断した。そして、JAXA が本ツールの高度化開発を進め、双方が本技術成果を活用する連携を考案し、取組を開始した。連携において、JAXA がツールを高度化し、S1 社が自らのリソースを用いて利用者視点で試行し、試行結果が JAXA へフィードバックされる活動が進められた。そして、都度新たな機能や仕様の検討が行われ、JAXA は新たな研究開発課題として設定して取り組み、より使用価値が高まるよう、解析ツールの高度化が進められた。

III) 6 時→9 時 (Region III, 連携領域 2)

JAXA は、S1 社からのフィードバックを踏まえた結果、S1 社を含む様々なユーザーが、本ツールの一部の機能を自ら改修してカスタマイズできるプログラム構成を組み込み、民間が利用する上で柔軟性、競争力強化を実現した。この結果、S1 社と JAXA は、各々単独で研究開発を行う場合と比較し、開発費及び開発期間を削減し、本解析技術の高性能化・解析期間の大幅短縮を実現した。

IV) 9 時→0 時 (Region IV)

本解析ツールは、2024 年 3 月の KAIROS ロケットの初号機打ち上げに向けた取り組みにおいて活用された。将来の S1 社事業や JAXA 基幹ロケット事業にも活用される計画である。JAXA は、これらの成果に基づき、更なる本解析ツールの高度化に向けた課題を識別し、取り組みを進めている。

4・3 PDAS 社との事例

PDAS 社は、サブオービタル宇宙機の開発を進めており、将来のサブオービタル宇宙機/極超音速旅客機による事業実現を目指している。

I) 0 時→3 時 (Region I)

JAXA は、将来の極超音速旅客機の実用化を目指し、世界に先駆け、マッハ4 飛行環境でのエアブリージングエンジン運転実験、推進性能の取得、国内の大学と連携して極超音速飛行実験に向けた実験機の空力設計(風洞試験、数値シミュレーション)、耐熱構造設計、飛行軌道解析、各種要素技術研究を進めてきた。そして、高揚力機体設計技術、高信頼エンジン設計技術、航空機並みの信頼性評価技術に関する基礎的な技術基盤を蓄積してきた。

II)3 時→6 時(Region II, 連携領域 1)

PDAS 社の事業実現に向けた主要技術課題の一つが、高揚力機体技術であった。JAXA と PDAS 社は対話を進め、JAXA が PDAS 社のニーズにも対応する形で本技術基盤を強化し、PDAS 社が本成果を活用して宇宙機へ適用することで、PDAS 社の開発リスクを低減するとともに、JAXA の本分野の研究開発を加速する連携を考案した。本連携着手にあたっては、市場の可能性、事業創出を目指す PDAS 社という民間企業の存在、本連携機会が JAXA の研究開発機会となる点が重視された。高迎角飛行に対応した空力設計、マッハ5 級の遮熱構造設計、高信頼エンジン搭載性能評価等が重要な技術課題であり、JAXA は、本速度域で使用できる機体形状の創出、解析と実験による空力性能の設計検証を行い、極超音速機の飛行実験に適用できる空力データベースを構築した。また、JAXA は、マッハ5 飛行時の空力加熱や荷重条件に耐える機体構造の設計・試作、エンジン作動を含む風洞実験を行い、極超音速機の設計解析手法を構築した。本風洞実験を行う上では、模型支持方法の影響評価(深澤他 2021)、本有翼を適用した高速航空機の低速域における空力特性評価(香山 2019)等を行い、高揚力機体技術の研究開発を進めた。

PDAS 社は、本連携を通して、サブオービタル宇宙機全般に関する知見、開発仕様や評価項目の整理方法や優先順位の考え方等への知見を高めた。また、地上・飛行実証に関し、風洞試験模型製造に関するノウハウ、試験立案、事前検討の要点の明確化、機体輸送や運用における知見の獲得、リスクマネジメントの基礎を把握した。

III)6 時→9 時(Region III, 連携領域 2)

PDAS 社は、JAXA 技術成果を活用し、サブオービタル宇宙機の新規設計開発を進めた。本事業に必要な法制度調整、実験場調整等については PDAS 社独自で進めた。そして、2023 年にサブスケールモデルとして中型サイズ(全長 5m)の無人飛行実験機を製作、飛行実験に至った。事前にシミュレータを作成し、JAXA で実施した風洞試験や CFD 解析に加え、地上滑走試験の実データを反映させた。結果、非常に良好な離陸・安定飛行を実現した。本実験は、飛行中に、機体と地上操縦機器との通信状態に問題が生じ、事前に取り決めた飛行試験領域を逸脱する可能性が発生したため、自動安全機能によって飛行中断となったが、JAXA 技術成果を適用した宇宙機システムの飛行実証は、JAXA 単独活動だけではなし得なかった取り組みとなった。

IV)9 時→0 時(Region IV)

上記成果は将来の有翼サブオービタル宇宙機において重要な技術となり、また、PDAS 社の一連の対応事項は、今後の開発者に広く活用されるよう、宇宙往還型飛行試験における実施手順として整理された。JAXA は、本成果に基づき更なる技術課題を設定して研究開発を進めており、PDAS 社も事業開発を継続している。

4・4 KHI 社との事例

川崎重工業株式会社(KHI 社)は、従来から日本の基幹ロケット等に向けて、多数の主要機器の開発・製造の実績を保有している。本連携では、KHI 社は、宇宙空間において、小型衛星をロケットから分離して軌道投入する最終段階において、分離時の衝撃をより一層和らげ、外乱を低減させ、また衛星に対する優しい搭載条件となるよう、衛星をロケットから分離する衛星分離部(Payload Attach Fitting, PAF)の新たな開発を実施した。

I)0 時→3 時(Region I)

JAXA は、自らの基幹ロケットの衛星フェアリングの分離や、ロケット第1段/第2段間の分離の機構に、従来から火工品を用いてきた。衛星フェアリングとは、ロケットが地上から高度 100km 強までの大気中を飛行する際の風圧、風圧によって発生する力、空気との摩擦熱から衛星を守るためのカバーであり、ロケットが大気圏外まで上昇すると機体から分離される。火工品による分離方式は、分離の瞬間性・同時性、運用実績、高い作動信頼性等の利点を有する一方、マイクロ秒オーダーで締付力(歪エネルギー)が解放されるため作動時の衝撃が大きく、

また火工品に対する手続き等の運用コストが比較的大きい(松永 et al. 2023). このため, 我が国の製品は世界市場において競争力があると言い難く, また, 海外既製品の輸入時は, 高いコスト, 法的制約(I-Tar, 火薬取締法)の課題があった(JAXA 2020). 加えて, JAXA は, 将来宇宙輸送システムの研究開発に向けて, ロケット機体の再使用化を検討しており, 分離機構周辺への高い衝撃負荷は, ロケットの再使用を実現する上で主要な技術課題の一つとして位置付けており, 結合・分離機構の非火工品化が必要であった(松永 et al. 2023). 分離機構は, 構造体から伝わる厳しい荷重, フライト時に発生する振動や熱等環境条件に耐え, 火工品と同様の信頼性が必要となり, 低コスト化も重要であるため, 非火工品化による分離のコンセプト/技術の成熟化が必要となり, JAXA は基礎研究を継続してきた.

II)3時→6時(Region II, 連携領域1)

JAXA と KHI 社は, 低衝撃, 低コストで, 火工品が不要な PAF 開発を, 共通する技術課題として識別した. そして, JAXA が本分野で有する知識・経験, 非火工品デバイスの信頼性設計技術に基づき, 非火工品を用いた分離技術を高め, KHI 社が本技術成果を取り込み, 更に, 汎用性の高い材料やシンプルな構造・機構を用いることでコスト低減につながる PAF 開発を目指す連携を考案し, 取組を開始した.

JAXA は, 大型構造物の結合に使用するマルマンクランプバンドと呼ばれる連結機構の材料を, 従来のチタン材料から汎用的なアルミ材適用へ変更し, クリーブ変形が生じないように, 断面形状と張力を設定し, 実現性と低コスト化の目途付けを行った. また, 分離ボルトを拘束するサポートが解放される仕組みによって, 張力開放時間を確保し(2 ミリ秒程度), 加えて, 分離時に外乱を生じないリンク機構設計とすることで, 1000Gsrs 以下の低衝撃化の目途付けを行った. さらに, 火工品に代わる作動素子として, ワイヤを電気溶断し, 冗長性も有する汎用性材料の素子を採用し, 火工品と同等の信頼性確保の目途付けを行った(JAXA, 2021).

III)6時→9時(Region III, 連携領域2)

KHI 社は, 上記成果を活用して, 250kg までの小型衛星向け PAF の製品開発を進めた. 並行して, JAXA と KHI 社は, 将来の顧客候補となるロケットや小型衛星の事業者に対し, 実機 PAF を用いた地上デモンストレーションを繰り返し, 熱切断素子を含む分離パーツの射場等での取扱い性, 質量, 価格等に関する要望を識別した. そして, 識別した技術課題を, JAXA の研究開発及び KHI 社の製品開発の計画や要求に反映した. この結果, 火薬類取締法の制約がなく, 海外製より価格を 50%以上低減し, また, 世界標準のインターフェイスと互換性のあるピッチ径 8 インチと 15 インチの 2 種類及び日本で広く使われている代表径 239mm の, 計 3 種類のメカニカルインターフェイスを保有する, 非火工品低衝撃型の小型 PAF 開発に成功した(JAXA, 2021). 本製品の仕様は, 競合する海外他社製品の仕様を凌駕し(Horie, 2022), 急速に拡大しつつある小型ロケット/衛星事業者の導入を容易にし, 国内外市場での大きなシェア獲得が見込まれる. また, 2024 年 2 月に打ち上げられた H3 ロケット 2 号機に本 PAF が搭載され, 宇宙空間での衛星分離に成功した. 今後, S1 社の民間ロケット等, 他のロケットにも搭載される予定である.

IV)9時→0時(Region IV)

JAXA は, 上記取組からのフィードバックを踏まえ, 民間の新たな市場ニーズを把握し, 荷重レベルや方式の異なる機構品への適用を見据え, 非火工品技術の新たな研究開発テーマを設定し, 活動を進めている. その一つとして, 市場性が高まり続ける数 kg~数 10kg 程度の超小型衛星向けの分離機構の実現に向け, 熱切断素子を含む分離パーツの更なる小型化, 低駆動電流で安定作動するための引き込み力の低下, 低コスト化等に向けて, 新たな技術テーマを設定し, 取り組みを開始している.

5. 考察

5・1 新しい連携モデルの検証

事業共創型技術循環モデルを用いた事例分析結果から, Region I の官の基礎的な技術基盤を, Region2 で官民共通の課題と位置付け, 民の事業創出活動と連携しながら官主体で研究開発を進め, Region3 で官民双方が民間

独自事業や官の国家プロジェクトにおいて、技術成果を実用化に結び付けて実証・事業化につなげ、また先行する一部の事例では、Region4で次代の技術課題設定へつなげている状況を把握した。本章では、各Regionへの移行における技術循環に関し、時間的推移に着目して、一般化し、連携に影響を与える要因について論ずる。

・Region I から Region II への移行(官民によるコンセプト検討への移行)

従来から官が進めてきた基礎的な研究開発のテーマや技術課題と、民間独自の宇宙事業創出に向けた技術課題を並べ、共通する技術課題を見出すことが最初のキーとなる。また、官の研究開発と民の事業開発の実現性や、連携による相互利益を試算し、目標やスケジュールを整合し、双方が連携活動に強くコミットする必要がある。国庫を原資とし、国家プロジェクトを中核的に実施するプロジェクト指向型の公的研究開発機関にとって、共通課題を設定する上で、特定の民間企業に利するだけでなく、自身の国家プロジェクトに加え、将来の多様な民間事業に活用可能な公的技術成果の創出が求められる。本制約を考慮し、魔の川に相当する研究と開発のベクトルの不一致による障壁(出川, 2004)を克服し、民の事業化に適した技術要求と、官の研究開発テーマ・計画とを整合し、成果創出を進めていくことが必要である。また、連携初期段階では、官民の相互理解が必ずしも十分ではなく、民の事業環境の変化も想定する必要がある。このため、対話を通じて積極的に相互の理解を深め、時には連携計画を修正しながら対応していく必要がある。本分析対象事例では、JAXA 研究開発者と民間事業開発者との対話促進、連携プロセス・場・ツール等の設定、課題や目標の整合を担う事業プロデューサーの役割を、JAXA 側に設置することで、双方の連携内容を修正しながら、連携がマネジメントされ、推進される状況を確認した。

・Region II から Region III への移行(事業実証への移行)

官と民は、官の研究開発と国家プロジェクトの創出、民の事業創出という官民各々の場における独立した活動と、官から民への技術の共有及び民から官への技術試行結果のフィードバックを繰り返すことで、キーとなる技術が高度化され、官民双方が技術成果を活用できる状態にしていくことが重要となる。本連携では、民が創意工夫による試行を繰り返して官の技術成果の新たな使用価値を見出し、また、官が民の使用価値を高めることを意識して技術成果の更なる創出に注力する、双方の独立した活動領域の存在が重要であった。また、民の事業化計画や事業化スピードに基づき、官が研究開発を加速し、また、民の事業機会を活用して官の技術の実証や社会実装化を推進することも、目指すべき成功モデルとなる。

・Region III から Region IV への移行(次代の技術テーマの発見・対応)

S1 社との統合解析ツール、KHI 社との PAF の 2 つの事例では、官の新たな技術成果が民の事業に活用・実証され、飛行結果の確認やフィードバックが進められた。PDAS との連携でも、JAXA 単独活動だけではなし得なかったスピードで、JAXA 技術成果が民間の宇宙機システムに活用され、飛行実証する機会が得られ、官の将来の有翼サブオービタル宇宙機における重要な技術獲得となった。官の技術が、官の国家プロジェクトの機会だけでなく、民の事業機会を活用して早期に実践投入されること、また、官は、民の市場活動から新たな技術テーマに気付きを得て更に技術を高度化していく循環が生まれることが、本連携の目指す成功モデルとなる。

6. 結言

本論文では、宇宙産業創出に向けて、宇宙PPPに対して先行研究で指摘されている課題に着目した。そして、我が国の宇宙産業複合体の特性や制約、官民双方の特性の違いを踏まえ、双方の課題解決につながる連携及びプロセスを構築することで、公的研究開発機関(官)主体の研究開発及び国家プロジェクトの推進、民間企業(民)主体の事業創出を同時に実現する新たな官民連携方法への変更が可能であることを示した。そして、これを事業共創型技術循環モデルとして提示し、宇宙輸送分野の4件の連携事例を分析した。特に以下の点が重要となる。

- 1) 連携初期に、官の既存技術基盤や課題と、民の事業化に向けた技術課題とのテーマや計画を整合する。
- 2) 民の事業化計画に応じた官の研究開発加速、官の技術成果を用いた民の早期事業創出となる連携を構築する。
- 3) 連携の進捗に応じて、課題や目標の整合、修正をしながら、連携をマネジメントし、推進する。

- 4) 官は民の使用価値を高める技術成果を創出し、民は官の技術成果の新たな利用価値を見出す。
- 5) 官の技術成果が、官の国家プロジェクトだけでなく、民の事業機会を活用し、早期に実践投入される。官は、民の事業化活動からも新たな技術テーマに気付きを得て、更なる技術の高度化につなげる循環を生み出す。

以上の結果から、我が国の宇宙産業創出に向けて、公的研究開発機関の研究開発と国家プロジェクトの促進、民間主体の事業創出を同時に実現する、新たな連携方法の可能性を示した。上記知見は、公的研究開発機関と民間企業とのオープンイノベーション型連携の実現に貢献し、日本の宇宙産業政策の一助となり得ると考えられる。

なお、今後に向けて、以下の研究課題を提起する。

- 1) 宇宙輸送事業以外に分野を広げた、連携事業の分析・本モデルへのフィードバック
- 2) 連携活動の成否に影響を与える組み合わせ条件の整理

7. 謝辞

官民連携事例紹介では、各案件の J-SPARC プロデューサーに協力いただいたことに謝意を表す。各事例の技術的詳細については参考文献を参照いただきたい。

文 献

- Adnan, Merhaba. Ainardi, Matteo. and Aebi, Tobias., THE SPACE AGENCY OF THE FUTURE (2019), Arthur D. Little, available from <<https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/space-agency-future>>, (参照日 2024 年 7 月 20 日).
- Cabinet Office, 宇宙ベンチャー育成のための新たな支援パッケージ (2018), available from <<https://www8.cao.go.jp/space/policy/pdf/package.pdf>>, (参照日 2023 年 5 月 21 日).
- Cabinet Office, 傷害予測数計算条件及び方法 (ロケット) (2019), available from <https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline1-1.pdf>, (参照日 2023 年 11 月 11 日).
- Cabinet Office, 宇宙基本計画 (令和 5 年 6 月改定) (2023), available from <https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf>, (参照日 2024 年 9 月 7 日).
- 伊達木香子, イノベーション創出に向けた JAXA 「J-SPARC」の取り組み, 日本機械学会誌 Vol.126 特集 宇宙産業の成長と展望 (2023).
- 出川通, 技術経営の考え方 - MOT と開発ベンチャーの現場から. 光文社新書 (2004).
- Foray, D., Mowery, D.C. and Nelson, R.R., Public R&D and social challenges: What lessons from mission R&D programs?, Research Policy, Vol.41, No.10 (2012), pp. 1697-1702, DOI: 10.1016/j.respol.2012.07.011.
- 深澤瑞輝, 廣谷智成, 田口秀之, 刺刀一匡, 手塚亜聖, エンジン付きダブルデルタ翼機形状の低速風洞試験における模型支持方法の影響評価, 第 59 回飛行機シンポジウム (2021).
- Hackle, R., NASA COTS Final Report, NASA/SP-2014-617 (2014), <http://www.nasa.gov/content/nasa-releases-cots-final-report>, (参照日 2023 年 5 月 21 日).
- Horie, youichi, Zama, S. and Kobayashi, M., Development of Simple PAF: Satellite Emission System and Its Performance Evaluation. Presented at the 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan (2023).
- IST, インターステラテクノロジズ 次世代燃料として注目の LNG を軌道投入用ロケット「ZERO」の推進剤に選定 (2020), available from <https://www.istellartech.com/7hbym/wp-content/uploads/2020/03/200305_zero_methane_release_revErelease.pdf>, (参照日 2023 年 11 月 10 日).
- IST, 小型衛星専用の宇宙輸送サービス (2023), available from <<https://www.istellartech.com/launch/zero>>, (参照日 2023 年 11 月 10 日).
- IST and JAXA, プレスリリース (2022), available from <https://www.jaxa.jp/press/2022/03/20220302-1_j.html>, (参照日 2023 年 11 月 10 日).
- 岩本裕之, JAXA と民間企業の共創活動について, 宇宙航空研究開発機構特別資料第 17 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-20-007 (2020), pp.25-33.
- JAXA, JAXA 中長期計画 (2018), available from <https://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan04_a.pdf>, (参照日 2023 年 5 月 21 日).
- JAXA, JAXA における宇宙輸送に関わる取組 (2020) (P.47-51), available from

- <https://www.mext.go.jp/kaigisiryoo/content/20201105-mxt_uchukai01-000012291_8.pdf>, (参照日 2023年5月21日).
- JAXA, JAXA 2020年度業務実績等報告書 (2021), available from <https://www.jaxa.jp/about/finance/pdf/finance_report2020.pdf>, (参照日 2023年5月21日).
- JAXA, JAXA 2021年度業務実績等報告書 (2022), available from <<https://www.jaxa.jp/about/finance/pdf/2021dokuhouhyoukakekka.pdf>>, (参照日 2023年5月21日).
- JAXA 新事業促進部, JAXA 宇宙イノベーションパートナーシップ(J-SPARC) (2018), available from <<https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/outline/>>, (参照日 2023年5月21日).
- KAREN L. JONES, PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS: STIMULATING INNOVATION IN THE SPACE SECTOR. THE AEROSPACE CORPORATION (2018).
- 加藤弘一, 伏信一慶, 武田行生, 課題共創型技術循環モデルによる産学連携スキームの提案, 日本機械学会論文集 Vol.88, No.909 (2022), p. 21-00339, DOI: 10.1299/transjsme.21-00339.
- 香山雄紀, 廣谷智成, 田口秀之, 手塚亜聖, ダブルデルタ翼を適用した高速航空機の低速域における空力特性の数値的評価, 第57回飛行機シンポジウム (2019).
- Kim, M.J., Toward Coherence: A Space Sector Public-Private Partnership Typology. Space Policy, Vol.64 (2023a), pp.101549, DOI: 10.1016/j.spacepol.2023.101549.
- Kim, M.J., Coherence to Choices: Informing Decisions on Public-Private Partnerships in the Space Sector. Pardee Rand Graduate School (2023b), available from <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/RGSDA2700/RGSDA2739-1/RAND_RGSDA2739-1.pdf>, (参照日 2024年7月20日).
- Kline, S. J., イノベーション・スタイル—日米の社会技術システム変革の相違—, アグネ承風社 (1992) (in Japanese).
- Kline, S. J. and Rosenberg, N., An overview of innovation, In the positive sum strategy, National Academy Press (1986), pp. 275-304
- 松永光生, 伊海田皓史, 寺島啓太, 松村吉起, 迎田健一, 再使用可能なフェアリング・段間分離機構用結合/分離機構の研究構想, 第67回宇宙科学技術連合講演会 (2023).
- Mazzucato, M. and Robinson, D.K.R., Co-creating and directing Innovation Ecosystems? NASA's changing approach to public-private partnerships in low-earth orbit, Technological Forecasting and Social Change, Vol.136 (2018), pp.166–177, DOI: 10.1016/j.techfore.2017.03.034.
- Morgan Stanley., Space: Investing in the Final Frontier (2020), available from <<https://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space>>, (参照日 2023年5月21日) >.
- Mowery, D.C., Defense-related R&D as a model for “Grand Challenges” technology policies. Research Policy, Vol.41, No.10 (2012), pp.1703–1715, DOI: 10.1016/j.respol.2012.03.027.
- 南里秀明, LNG 推進系 燃費高める (2022), available from <<https://www.aero.jaxa.jp/spsite/rensai/column/40.html>>, (参照日 2023年11月11日).
- Nardi, R., Perez, V. and Pimenta, A., Experiments with Pintle Injector Design and Development, in: 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, FL (2015), DOI: 10.2514/6.2015-3810.
- SPACETIDE, 2024. SPACETIDE COMPASS Vol.10.
- S1, SPACE ONE CO., LTD (2024). available from <<https://www.space-one.co.jp/>>, (参照日 2024年10月3日).
- 高村藤寿, 太田順子, 尾崎光則, 西澤泉, 大学に見える化技術を活用した産学連携の技術循環モデルとその実践. 日本機械学会論文集, Vol.82, No.842 (2016), pp.16-00070, DOI: 10.1299/transjsme.16-00070.
- 高田真一, フロントステージとバックステージの連携～宇宙産業創出に向けた共創活動～, サービスロジー Web マガジン (2022), available from <<https://magazine.serviceology.org/2022/07/05/1318/>>, (参照日 2023年5月21日).
- VASQUES, B., HAIDN, O., Effect of Pintle Injector Element Geometry on Combustion in a Liquid Oxygen/Liquid Methane Rocket Engine, 14 pages (2017), DOI: 10.13009/EUCASS2017-88.
- Xavier, Bertran. Vidal, A., The Implementation of a Public-Private Partnership for Galileo: Comparison of Galileo and Skynet 5 with Other Projects. Online Journal of Space Communication, (2006), available from <<https://ohioopen.library.ohio.edu/spacejournal/vol5/iss9/7/>>, (参照日 2024年7月20日).
- Yamashiro, R., Development of Small Rocket Engine for Rocket Ventures, 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan (2023).

Zapata, E., An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS-CRS Program and Implications for Future NASA Missions, AIAA Space 2017 Conference. No. KSC-E-DAA-TN44427 (2017).

References

- Adnan, M. Ainardi, M. And Aebi, T., THE SPACE AGENCY OF THE FUTURE (2019), Arthur D. Little, available from <<https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/space-agency-future>>, (accessed on 20 July, 2024).
- Cabinet Office, A new support package for fostering space ventures (2018), available from <<https://www8.cao.go.jp/space/policy/pdf/package.pdf>>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- Cabinet Office, Calculation conditions and methods for predicting injury (rocket) (2019), available from <https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline1-1.pdf>, (accessed on 11 November, 2023) (in Japanese).
- Cabinet Office, Basic Plan on Space Policy (June 2023), available from <https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf>, (accessed on 7 September, 2024) (in Japanese).
- Dateki, Kyoko., JAXA's "J-SPARC" initiative for innovation creation. Journal of the JSME. Vol. 126: Growth and Prospects for the Space Industry (2023) (in Japanese).
- Degawa, T., The Concept of Management of Technology - From the Perspectives of MOT and Development Ventures. Kobunsha Shinsho (2004) (in Japanese).
- Foray, D., Mowery, D.C. and Nelson, R.R., Public R&D and social challenges: What lessons from mission R&D programs?, Research Policy, Vol.41, No.10 (2012), pp. 1697-1702, DOI: 10.1016/j.respol.2012.07.011.
- Fukazawa, M., Hirotsu, T., Taguchi, H., Kamisori, K. and Tezuka, A., Evaluation of effect on model support method in a low-speed wind tunnel test of double delta wing aircraft with engines, Proceedings of the 59th Aircraft Symposium (2021) (in Japanese).
- Hackle, R., NASA COTS Final Report. NASA/SP-2014-617 (2014), <http://www.nasa.gov/content/nasa-releases-cots-final-report>, (accessed on 21 May, 2023).
- Horie, Y., Zama, S. and Kobayashi, M., Development of Simple PAF: Satellite Emission System and Its Performance Evaluation. Presented at the 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan (2023).
- IST, "Interstellar Technologies selects LNG, a fuel that is attracting attention as a next-generation fuel, as the propellant for its ZERO orbital launch vehicle" (2020), available from <https://www.istellartech.com/7hbym/wp-content/uploads/2020/03/200305_zero_methane_release_revErelease.pdf>, (accessed on 10 November, 2023) (in Japanese).
- IST, Space transportation service dedicated to small satellites (2023), available from <<https://www.istellartech.com/launch/zero>>, (accessed on 10 November, 2023) (in Japanese).
- IST and JAXA, Press Release (2022), available from <https://www.jaxa.jp/press/2022/03/20220302-1_j.html>, (accessed on 10 November, 2023) (in Japanese).
- Iwamoto, H., Collaborative activities between JAXA and private companies, Special Documents of JAXA, Proceedings of the 17th Space Environment Symposium, JAXA-SP-20-007 (2020), pp.25-33 (in Japanese).
- JAXA, JAXA, Mid-to-Long-Term Plan (2018), available from <https://www.jaxa.jp/about/plan/pdf/plan04_a.pdf>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- JAXA, JAXA's efforts on space transportation (2020) P.47-51, available from <https://www.mext.go.jp/kaigisiryoo/content/20201105-mxt_uchukai01-000012291_8.pdf>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- JAXA, JAXA FY2020 Annual Report (2021), available from <https://www.jaxa.jp/about/finance/pdf/finance_report2020.pdf>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- JAXA, JAXA FY2021 Annual Report (2022), available from <<https://www.jaxa.jp/about/finance/pdf/2021dokuhouyoukakekka.pdf>>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- JAXA Business Development and Industrial Relations Department, JAXA Space Innovation through Partnership and Co-creation Program (J-SPARC) (2018), available from <<https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/outline/>>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- KAREN, J., PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS: STIMULATING INNOVATION IN THE SPACE SECTOR. THE

AEROSPACE CORPORATION (2018).

- Kato, K., Fushinobu, K. and Takeda, Y., Proposal of a new industry-university collaboration scheme based on a problem co-creating type technology circulation model, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.88, No.909 (2022), p. 21-00339, DOI: 10.1299/transjsme.21-00339.
- Kayama, Y., Hirotani, T., Taguchi, H. and Tezuka, A., Numerical evaluation of aerodynamic characteristics in the low speed range of high speed aircrafts applying a double delta wing, Proceedings of the 57th Aircraft Symposium (2019) (in Japanese).
- Kim, M.J., Toward Coherence: A Space Sector Public-Private Partnership Typology, Space Policy, Vol.64 (2023a), pp.101549, DOI: 10.1016/j.spacepol.2023.101549.
- Kim, M.J., Coherence to Choices: Informing Decisions on Public-Private Partnerships in the Space Sector. Pardee Rand Graduate School (2023b), available from <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/RGSDA2700/RGSDA2739-1/RAND_RGSDA2739-1.pdf>, (accessed on 20 July, 2024).
- Kline, S. J., Innovation styles in Japan and the United States, Agune Shofu-sha (1992) (in Japanese).
- Kline, S. J. and Rosenberg, N., An overview of innovation, In the positive sum strategy, National Academy Press (1986), pp. 275-304
- Matsunaga, M., Ikaida, H., Terashima, K., Matsumura, Y. and Koda, K., Research concept of reusable joint and separation system for payload fairing and core-stage, The 67th Space Sciences and Technology Conference (2023) (in Japanese).
- Mazzucato, M. and Robinson, D.K.R., Co-creating and directing Innovation Ecosystems? NASA's changing approach to public-private partnerships in low-earth orbit. Technological Forecasting and Social Change, Vol.136 (2018), pp.166–177, DOI: 10.1016/j.techfore.2017.03.034.
- Morgan Stanley, Space: Investing in the Final Frontier, Morgan Stanley (2020), available from <<https://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space>>, (accessed on 21 May, 2023).
- Mowery, D.C., Defense-related R&D as a model for “Grand Challenges” technology policies. Research Policy, Vol.41, No.10 (2012), pp.1703–1715, DOI: 10.1016/j.respol.2012.03.027.
- Nanri, H., LNG propulsion system: Increasing fuel efficiency (2022), available from <<https://www.aero.jaxa.jp/spsite/rensai/column/40.html>>, (accessed on 11 November, 2023) (in Japanese).
- Nardi, R., Perez, V. and Pimenta, A., Experiments with Pintle Injector Design and Development, 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, FL (2015), DOI: 10.2514/6.2015-3810.
- SPACETIDE, SPACETIDE COMPASS Vol.10 (2024) (in Japanese).
- S1, SPACE ONE CO., LTD (2024), available from <<https://www.space-one.co.jp/>>, (accessed on 3 October, 2024) (in Japanese).
- Takamura, F., Ohta, Y., Ozaki, M. and Nishizawa, I., Technology circulation model of industry-university collaboration utilizing visualization technology of university and its practice, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.842 (2016), pp.16-00070, DOI: 10.1299/transjsme.16-00070.
- Takata, S., Collaboration between Front Stage and Back Stage - Co-creation activities for the creation of a space industry -. Society for Serviceology, Special topics (2022), available from <<https://magazine.serviceology.org/2022/07/05/1318/>>, (accessed on 21 May, 2023) (in Japanese).
- VASQUES, B., HADIN, O., Effect of Pintle Injector Element Geometry on Combustion in a Liquid Oxygen/Liquid Methane Rocket Engine, 14 pages (2017), DOI: 10.13009/EUCASS2017-88.
- Xavier, Bertran. Vidal, A., The Implementation of a Public-Private Partnership for Galileo: Comparison of Galileo and Skynet 5 with Other Projects. Online Journal of Space Communication (2006), available from <<https://ohioopen.library.ohio.edu/spacejournal/vol5/iss9/7/>>, (accessed on 20 July, 2024).
- Yamashiro, R., Development of Small Rocket Engine for Rocket Ventures. 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku, Azerbaijan (2023).
- Zapata, E., An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS-CRS Program and Implications for Future NASA Missions, AIAA Space 2017 Conference No. KSC-E-DAA-TN44427 (2017).