

ロケット回収船の研究開発と船級規則への対応

角 有司*

1. 目的および背景

JAXAでは、基幹ロケット発展型宇宙輸送システム（以下、再使用ロケットという）の検討を進めている。これは、我が国の宇宙開発ミッションに対応するために、2030年頃の初号機打上げを目指し、大幅な低コスト化の実現に向けて開発するロケットである。本報告では、再使用ロケットを洋上で回収するためのロケット洋上回収船（以下、回収船とする）の検討状況について概説する。なお、再使用ロケットの研究は始まったばかりであり、以下に示す再使用ロケットの仕様や、打上地点等は、検討中の案である。回収船においても要求機能の洗い出しと複数の船舶のトレードオフを行っている段階であり未確定の状況である。なお、本論文はマリンエンジニアリング学会誌への投稿文¹⁾に、5章「回収船のリスク評価に向けた取り組み」を加筆作成したものである。

2. 我が国の再使用ロケットの位置づけ

2.1 我が国の宇宙輸送システムロードマップ

人工衛星を始めとする宇宙開発利用は、気象観測・測位・衛星通信等、国民生活や社会経済・安全保障活動を支える不可欠のインフラとなっている。

宇宙空間への運搬手段である宇宙輸送システムは、宇宙へアクセスするための根幹のインフラとして、自立性を確保することが我が国の宇宙政策の基本となっている。

文部科学省宇宙開発利用部会においても、近年の宇宙輸送市場で激化する競争環境への状況認識・問題意識も踏まえ我が国の宇宙輸送システムの自立性確保、国際的競争力確保および産業発展を目指し、技術革新による抜本的な低コスト化を達成する革新的将来宇宙輸送システムを2040年代前半までに実現することとされ、そのための段階的な計画・道筋（ロードマップ）の策定に当たっての基本的な考えが示された²⁾。これを受けて、革新的将来宇宙輸送システムのロードマップが文部科学省主体で設定されている³⁾⁴⁾。

ロードマップのうち、再使用ロケットに関する内容を要約すると以下となる。

- 国は、安全保障や防災利用、深宇宙探査等の官ミッションに対応するため、2030年頃の初号機打上げを目指して大幅な低コスト化（H3ロケットの1/2程度を目標）の実現に向けた「基幹ロケット発展型（再使用ロケット）」の開発を進める。
- JAXAは民間事業者と対話し必要な要素技術を絞り込み、官民共同研究により要素技術を獲得する。
- 国およびJAXAは、再使用を伴う飛行試験場のスペックや機体の回収方策・整備方法を検討し、民間事業者も試験で活用することを想定する。また、飛行試験場の整備・運用データ等を民間事業者に提供するとともに、制度的課題に関わる部分について、国は、関係機関と連携し、必要な対応の検討を進める。

2.2 JAXAにおける再使用ロケットの全体構成

再使用ロケットの実現に向けてJAXAが検討中の運用プロセスの全体概要を以下A)～D)に示す（図1）。

- A) 国内の打上地点において、再使用ロケットの打上げを実施する。1段ロケットは、2段と切り離された後で、姿勢反転、慣性飛行を経て減速し、回収船に設置されたプラットフォームに着陸する。
- B) 1段ロケットが回収船に着陸すると、回収船に装備された固定装置によりロケットの機体を船体に安定的に固定させる。その後、推薬、酸化剤等をタンクから抜くことで安全化処置を行う。着陸から安全化までの作業は無人で行われる必要があることから、人員は回収船の近くに待機する船舶（サポート船、2.3節に記載）に移動し、遠隔操作によりロケット回収作業を行う。安全が確認された後、人員は回収船に移動し船上での作業を実施する。
- C) 回収船は1段ロケットを搭載したまま、地上の点検整備場の岸壁まで航行する。岸壁に到着した後、クレーンにより1段ロケットを陸揚げする。

* 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA） 研究開発部門 第四研究ユニット

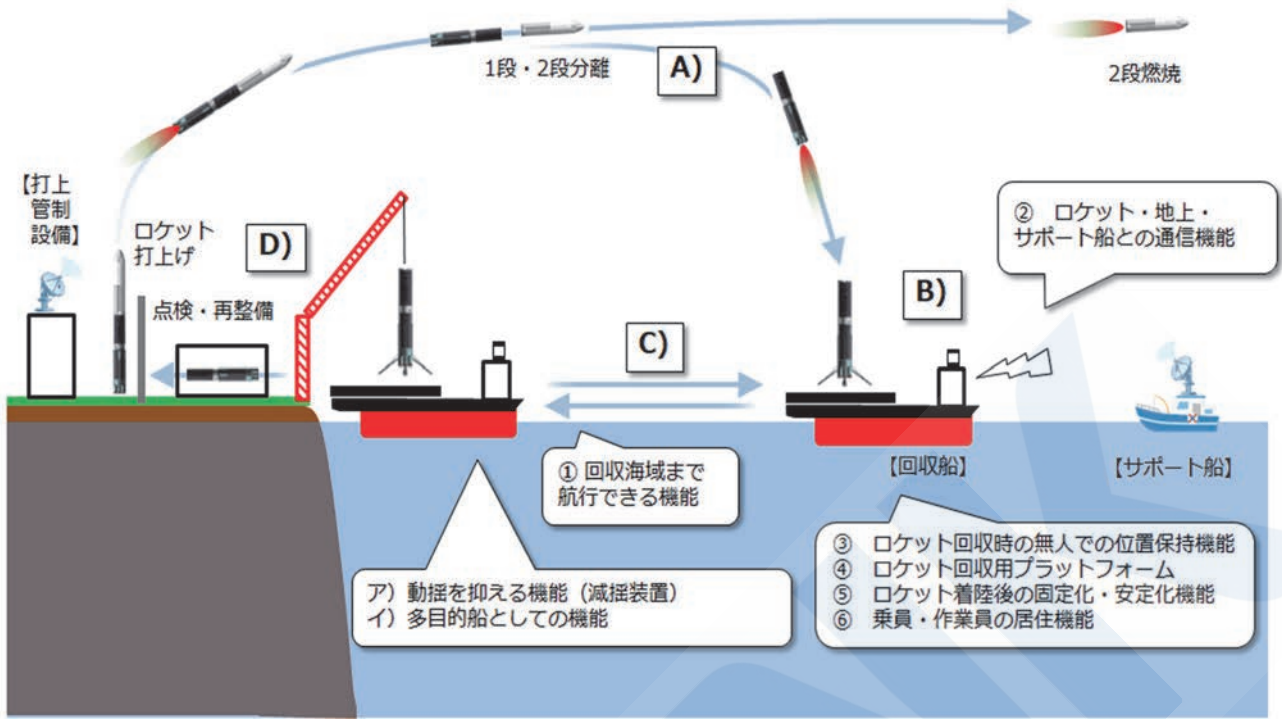


図1 ロケット回収船の洋上回収プロセス(案)

D) 1段ロケットを点検整備場に移動し、再使用するために必要となる整備を行う。整備完了後は1段ロケットを打上地点まで移動させる。その後、上記A)に示す打上げを行う。これ以降はA)~D)を繰り返すことでロケットの再使用を実現する。

2.3 回収海域の候補

現在、再使用ロケットの射点の場所については検討中である。いくつかの候補があるが、ここでは種子島宇宙センターを使用した場合での検討結果を示す。種子島宇宙センターには、現在の基幹ロケット用の機器やインフラが整備されており、それらを流用することで再使用ロケット用の設備の再整備コストの低減が期待できる。また、ロケット回収海域については国内および近隣諸国の安全性を考慮して設定する必要がある。仮に種子島宇宙センターの射点から静止衛星・探査衛星の打上げを想定した場合は、日本の東～南東～南の海域がロケット回収海域として想定される(図2)。周回衛星の打上げを想定した場合は、日本の南西方向の海域が候補となる。

ロケットの回収は、万が一の爆発・火災における人員の安全性を考慮して無人化が求められる。そのため、回収船とサポート船の2船体制による運用とする案が検討されている。役割分担としては、回収船はロケット回収・安全化・運搬を行い、サポート船は、人員の退避、回収船の遠隔操作、ロケットの追跡・制御を行うことが想定される。

3. 回収船の先行事例と日本の課題

3.1 先行事例 (SpaceX社)

再使用ロケットおよび回収船の事例として、SpaceX社の取り組みがある⁶⁾。SpaceX社ではマーリンエンジンを9基搭載したFalcon9ロケットを使用した洋上回収ミッションを実施している(図3)。2024年4月時点の結果ではシリーズとして271回打ち上げられ、ここまでそのうち267回のミッションが成功(成功率98.5%)している。洋上回収は、ドローン船(ASDS, Autonomous Spaceport Drone Ship)というバージ船を改造した自動航行が可能な船舶を使用して行われており、これまで4隻のドローン船を建造し使用している(図4)。一般にバージ船の乾舷の高さでは遠洋に出ることが困難であり、船舶の自動運転についても国際ルールが定まっていないことから、米国政府により特別に許可を受けた範囲で運用されていると考えられる。ロケット回収時は無人化が行われ、回収時の制御は、近くに停泊するサポート船⁷⁾(図5)によって行われている。回収海域は、ミッションによって異なり、フロリダ沖の約300~1,200kmの位置で行われている。

3.2 日本の回収船で考慮すべき事項

米国(SpaceX社)と日本の置かれた状況を比較し、特に配慮すべき事項について以下に示す。

① SpaceX社がロケット回収を行うフロリダ沖は比較的穏やかであるため、バージ船のような船舶でも回収が出来たと考えられる。一方で、日本近



図2 ロケット回収海域 (案) (背景図⁵⁾)



図3 SpaceX社のファルコン9ロケット⁶⁾



図4 SpaceX社の回収船 (ASDS)⁷⁾



図5 SpaceX社のサポート船 (Go-Quest号)⁸⁾

海は季節によっては波・風が厳しいため、洋上での耐航性の高い船舶が必要になると考えられる。海のうねりに対して揺れが少ない大型船舶を採用するか、減揺装置を搭載した一般船舶を利用するといった対策が必要になる。

- ② SpaceX社では、Starlink衛星⁹⁾の打上げ等を継続的に実施しており、安定的かつ長期的に打上げの機会がある。従って回収船は回収だけを目的とした専用船が成立できる。一方で、JAXAのロケット打上げ機会は、当面は年に数基に留まることが予想されるため、打上げが無い期間における船舶の維持管理について配慮することが必要である。

4. 回収船の開発構想

4.1 回収船に求められる要求機能

上記2.2節で述べた再使用ロケットの全体構想を実現するために、回収船に求められる要求機能を以下の通り整理した(図1)。

(1) 基本的な機能要求

- ① 回収海域まで航行できる機能
- ② ロケット・地上・サポート船との通信機能
- ③ ロケット回収時の無人での位置保持機能
- ④ ロケット回収用プラットフォーム
- ⑤ ロケット着陸後の固定化・安全化機能
- ⑥ 乗員・作業員の居住機能

(2) 日本の事情を考慮した機能要求

- (ア) 動揺を抑える機能 (減揺装置)
- (イ) 多目的船としての機能 (浚渫機能¹⁰⁾ ¹¹⁾, 油回収機能¹⁰⁾ ¹¹⁾, 病院船機能等が考えられる。)

4.2 回収船の構想例

現在、JAXAでは要求機能を実現できる船舶のトレードオフを実施中である。ここでは一つの例として、浚渫兼油回収船¹⁰⁾ ¹¹⁾をベースに、ロケットの洋上回収だけでなく、病院コンテナの運搬等の機能を持たせた多目的船の構想例を図6に示す。

本船はJAXAにおける再使用ロケットの計画とは別に筆者が独自に検討したものである。今後、さらに検討を進める場合は、造船メーカ等の協力のもと、船舶規則上の成立性や構造強度上の成立性等についての検討が必要である。

以下に本船の特徴を4.1節の要求機能①～⑥、(ア)、(イ)との対応で記載する。

- (1) 回収海域までスムーズに航行するために一般の船型を採用する (機能①)。推進器は全旋回型とし、推進器とバウスラスタを利用することでロケット回収時の位置保持を行う (機能③)。
- (2) ロケット回収時は、回収用のデッキ(11.5(m) x

50(m))を船尾部の両舷に搭載し、ロケット回収に必要となる50(m)x50(m)の領域を確保する(機能④)。回収用デッキは通常は地上に保管することで、通常航行時の支障にならないように配慮する。着地後の固定化・安全化のための装置を回収デッキ周辺に配置する(機能⑤)

- (3) 居住区を船首部、ロケット回収用デッキを船尾部に配置する(機能⑥)。居住区は船首部に配置することで、ロケット運搬時の前方の視野を確保する。居住区の左舷には車両が出入りするためのタラップを装備するとともに、居住区下部は自動車用の通路および駐車場とする。これにより、ロケットの整備作業中に頻繁に発生するロケット・衛星の機器の搬入や、作業者のアクセス性を向上させる。居住区上部の暴露部にはロケット・サポート船との通信アンテナ等を搭載する(機能②)。
- (4) 居住区の上層部には減揺装置を搭載するとともに、居住区側面には傾斜をつけ横風の影響を少なくする。回収デッキ下部の船体に空間を設けて2層構造とすることで、回収デッキに当たった横風が空間を通り抜けることで船舶の横揺れを低減する(機能ア)。
- (5) 多目的利用のための浚渫機能を装備した(機能イ)。浚渫槽底部にはホップドアを配置し、ドラグアームはサイドドラグアーム型を採用し

両舷に配置する。浚渫槽は船体中央部に配置することで、浚渫土をホップドアから廃棄した際の船舶のトリム状態への影響を少なくする。また、浚渫槽をロケット回収地点と居住区の間に配置して距離を確保することで、万が一のロケット火災発生時における居住区の損傷を減らす考えである。火災発生時は、浚渫ポンプを利用して消火に活用する。ロケット回収時には浚渫槽に海水を積載することで船舶の動揺特性を調節する。

- (6) 船上には大型の門型クレーンを搭載する。このクレーンは、ロケット回収用のデッキの搭載、回収したロケットの岸壁への搬入、病院船用コンテナの移動¹²⁾ ¹³⁾等、多目的に利用できる(機能イ)。

5. 回収船のリスク評価に向けた取り組み

5.1 取り組みの方針

国産リージョナルジェットの開発中止と、自動車会社による小型ジェット機の成功を分析した文献¹⁴⁾によると、一つの視点として型式認証への対応の違いが指摘されている。小型ジェット機が成功した理由として、当初から型式認証を行う米国に拠点を構え、米国航空業界との技術交流を深めた点にあるとの指摘である。

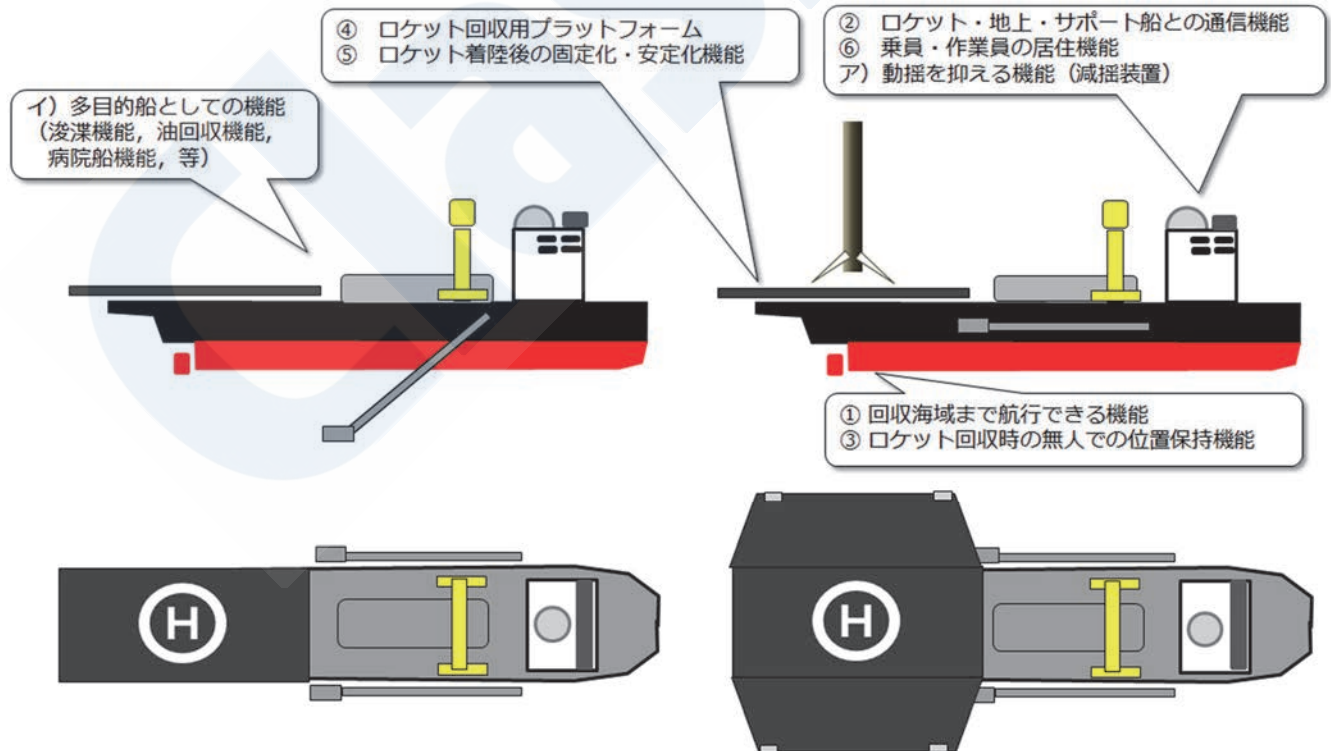


図6 洋上回収船の構想図
(左図：浚渫時、右図：ロケット回収時)

日本の研究開発機関（JAMSTEC等）が建造する船舶はNKの認証を受けていることから、JAXAとして初めて建造するロケット回収船はNKの認証を受ける計画としている。NKの認証を確実に取得するために、JAXAは開発当初からNKとの技術交流を深め、研究開発とリスク評価を同時並行で行う方針とした。

5.2 船級規則の調査

(1) 目的

調査の対象は4.2節で述べた浚渫兼ロケット回収船とし、浚渫船や病院船など機能を追加する場合の適用規則の整理と、その規則の認証に向けた課題と対策を整理した。また、ロケット側のルール調査を

同時並行で実施し、適用すべき規則の全体像を整理した。

(2) 検討結果

今回の対象としたルールの全体像を表1に示す。船級規則としては、船舶の設計・建造計画に従って対応することで適用できることを確認したが、今後、船種が変更になった場合は適用させる規則の確認から行う必要がある。また、ロケットの仕様や運用が確定した後に確認すべき項目として、いくつかの課題が確認された。その概要を以下に示す。

- ① ロケットの洋上回収を無人で行う場合は、船舶を定点保持するだけで良いのか完全無人運転が必要となるかについて判断が必要となる。船舶

表1 検討対象とした船級規則および関連規則

NK 技術規則 検査要領	1	A編 総則	24	船舶保安システム規則/実施要領
	2	B編 船級検査	25	海上労働システム規則/実施要領
	3	C編 船体構造及び船体機装	26	船用品等検査試験規則
	4	U編 非損傷時復元性	27	事業所承認規則
	5	V編 満載喫水線	28	海洋汚染防止のための構造及び設備規則/検査要領
	6	W編 船橋視界	29	安全設備規則/検査要領
	7	D編 機関	30	無線設備規則/検査要領
	8	GF編 低引火点燃料船	31	居住衛生設備規則/検査要領
	9	H編 電気設備	32	船体防汚システム規則/検査要領
	10	K編 材料	33	バラスト水管理設備規則/検査要領
	11	L編 機装品	34	冷蔵設備規則/検査要領
	12	M編 溶接	35	揚貨設備規則/検査要領
	13	N編 液化ガスばら積船	36	潜水装置規則/検査要領
	14	S編 危険化学品ばら積船	37	船橋設備規則/検査要領
	15	I編 極海航行船、極地氷海船及び耐氷船	38	機関予防保安設備規則/検査要領
	16	O編 作業船	39	総合火災制御設備規則
	17	P編 海洋構造物等	40	船体監視システム規則
	18	R編 防火構造、脱出設備及び消火設備	41	高速船規則/検査要領
	19	登録規則/細則	42	旅客船規則/検査要領
	20	船級登録及び設備登録に関する業務提供の条件	43	強化プラスチック船規則/検査要領
	21	国際条約による証書に関する規則	44	船舶用原動機放出量確認等規則/実施要領
	22	船舶安全管理システム規則/実施要領	45	船用材料・機器等の承認及び認定要領
	23	国際航海に従事しない船舶又は総トン数500トン未満の船舶の安全管理システム規則/実施要領		

国際条約	1	MARPOL	国内法	1	船舶安全法
	2	FSS code		2	危険物船舶運送及び貯蔵規則
	3	LSA code		3	海洋汚染防止法
	4	COLREG		4	特殊基準及び暫定基準
	5	SPS code(特殊目的船コード)	その他 (現状規則はないが追加で検討が必要)	1	病院船にかかる追加要件
	6	IP code(洋上作業員運送の安全に関する国際コード)		2	無人運航船にかかる追加要件
	7	MODU code(移動式海底掘削船の国際建造規程)		3	回収船に関わる安全要件 (火災消火、耐熱デッキへの要件等)
	8	IMSBC code(国際海上固体ばら積み貨物規則)			
	9	IMDG code(国際海上危険物規程)		ロケット 安全要求	1
	10	Polar code(極海船コード)	2		JERG-1-007 射場・飛行運用安全技術基準 (*1)
	11	IBC code(危険化学薬品のばら積み運送のための船舶の構造及び設備に関する規則)	3		JERG-1-006 ロケットシステム開発安全技術基準 (*1)
	12	IGC code	4		NPR8715.3 NASA Procedural Requirements NASA General Program Requirements Chapter 2, System Safety
	13	IGF code	5		MIL-STD-882 Department of Defense Standard Practice for System Safety
				(*1) https://sma.jaxa.jp/techdoc.html 参照	

としての自動運航技術についてはまだ実験段階であり、完全な無人運航船については法規制の整備も含めて対応中の段階である。将来的な無人運航船に対する法規制を適用ないし部分的に適用をする必要があると考えられるものの、現時点では明確なものが存在していないため、国土交通省と調整して、本船の仕様が法規制に対して逸脱したものとならないよう綿密なやり取りを実施していく必要がある。

- ② 回収船にJAXA・メーカー職員が乗船するための事前訓練が必要であることが分かった。JAMSTECが所有する船舶の例を参考にして、JAXAとしての訓練マニュアルを整備する必要がある。
- ③ 病院船について、船上で医療活動をする場合は客船と同等の仕様となり船舶の建造コストが大幅に増加する可能性がある。一方で病院コンテナを運搬して地上に設置し医療活動は地上で行う方法等が議論され、今後、病院船としての利用頻度を考慮して検討を継続する必要がある。
- ④ 今後は、ロケット総合システム（ロケット+船）として検討していく必要がある。その際は、JAXAが開発中の再使用ロケット（RV-X¹⁵⁾、等）におけるロケット転倒等のハザードを参考に検討を進めることが推奨された。今後ロケットの仕様を明確にする作業と同時並行で、JAXA射場安全部門等との協議によりロケット側のルールを再整理する必要がある。
- ⑤ ロケット着陸時の環境（衝撃・熱・可燃性ガス）と船舶側の圧力容器との関係を整理しておく必要がある。また、ロケット側に搭載される危険物（ロケット燃料、液体酸素、ヒドラジン、等）に関しては、その取扱い方法含め詳細な検討が必要である。

6. 今後の課題

6.1 回収船の成立性検討

3.2節で述べた通り、本船は構想段階であるため、造船技術者の協力による成立性検討が必要である。例えば、ロケット回収時に船の揺れを小さくするための船型の検討や、ロケット回収用のデッキの強度設計・耐熱設計等、多くの検討が必要である。一方でロケット回収のための技術検討も必要である。ロケットを安全に固定する機能、安全化機能、無人運転の機能等の多くの検討が必要である。

また、本船のライフサイクルコスト面での評価が必要である。ロケット回収に使用しない時期の用途

として、浚渫、ロケットの運搬、病院船等を提案したが、これは可能性があるものを列挙しただけの状況である。多目的船とすることにより船舶の構造とその運用が複雑となるデメリットがあるため、実際の運用コストや、運用する企業の希望を考慮し、機能を絞った船舶とした方が良い可能性がある。

6.2 宇宙と船舶の課題解決の場としての利用

ロケット回収船の実現に向けては、宇宙技術と船舶海洋技術の両者の協力が必須である。また、宇宙技術が持つアピール力と、船舶技術が持つ高い技術力を組み合わせて発展させることで、それぞれの業界が抱える課題解決の場として利用できる可能性がある。

文献¹⁶⁾によると、船舶業界の課題として、官公庁船の整備、カーボンニュートラルに向けたガス燃料船の開発・普及等が挙げられている。また、自動運転技術の実証¹⁷⁾、ICT浚渫¹⁸⁾等の取り組みも進められている。ロケット回収船をそういった船舶技術の実証の場として利用することで、さらに多くの国民へのアピールの場となり、船舶業界への理解が広がることが期待できる。

一方で宇宙業界の方は、近年のベンチャー企業を巻き込んだ競争の激化により、さらなる性能向上・信頼性向上と低コスト化が求められている。既に米国のSpaceX社は再使用ロケットを実用化し実績を挙げていることから、JAXAは従来の延長上の取り組みを行うだけでは不十分であり、そのままでは、さらに諸外国との差が広がる懸念がある。そこで、ロケット回収船を様々な用途で使用して新しいビジネス機会を創出し、トータルとしての収益性を上げることが必要である。

日本には、造船業、船用機器産業、海運業等、高い技術力を持つ多くの産業が存在している。そういった日本としての優位性や文化的背景を生かし、様々な業界との議論を通じて、新しいアイデアを創出していきたい。

謝辞

ここに報告された船級規則の調査は、日本海事協会とJAXAとの共同研究「ロケット洋上回収船の多目的利用に向けた船級規則の調査」の研究成果である。関係各位の貢献に感謝を表します。

参考文献

- 1) 角有司, 再使用ロケットの洋上回収船, マリンエンジニアリング学会誌 第59巻第1号,

2024.1

- 2) 文部科学省 宇宙開発利用部会 将来宇宙輸送システム調査検討省委員会 会議資料, 2020
- 3) 文部科学省研究開発局 宇宙開発利用課, 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会取りまとめ, 2022
- 4) 文部科学省研究開発局 宇宙開発利用課, 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会中間取りまとめ, 2021
- 5) 国土地理院: 日本の東西南北端点の経度緯度, <https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/center.htm> (Accessed 2024/4/1)
- 6) <https://www.spacex.com/> (Accessed 2024/4/1)
- 7) <https://spacexfleet.com/go-quest/> (Accessed 2024/4/1)
- 8) https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon_9 (Accessed 2024/4/1)
- 9) <https://www.starlink.com/> (Accessed 2024/4/1)
- 10) ドラグサクシオン浚渫船: <http://www.s-jwa.or.jp/workvessels/set01.html>, 作業船協会 (Accessed 2024/4/1)
- 11) 加藤英夫, ドラグサクシオン浚渫兼油回収船による浚渫及び油回収技術の紹介, マリンエンジニアリング学会誌 第53巻 第6号, 2018.11
- 12) 内閣府; 病院船の活用に関する検討会, <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/ship/index.html> (Accessed 2024/4/1)
- 13) 内閣府 (防災担当), 災害時多目的船 (病院船) に関する調査・検討報告書, 2013.3
- 14) 杉本貴司, 藤本秀文, 湯前宗太郎, ものづくり興亡記, 日経BP 日本経済新聞出版 (2024/3/5)
- 15) 基幹ロケットの再使用化による打ち上げコストの低減, 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/rvx/rvx.html> (Accessed 2024/4/1)
- 16) 国土交通省; 造船業の国際競争力強化 https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk5_000014.html (Accessed 2024/4/1)
- 17) 日本財団: 無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」, <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/about/history/60years/1-topics-1-2> (Accessed 2024/4/1)
- 18) 大山 剛司, ICT活用工事 (河川浚渫工) の施工について: 関東地方整備局 荒川下流河川事務所 小名木川出張所, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000746669.pdf (Accessed 2024/4/1)