

博士学位論文

宇宙デブリ除去運用のための
国際枠組みアーキテクチャの構築

**International Framework Architecture
for
Active Debris Removal**

平成 29 年度

慶應義塾大学大学院

システムデザイン・マネジメント研究科

大塚 聡子

目次

はじめに	1
第1章 序論.....	4
第2章 能動的デブリ除去運用の課題	15
2.1 技術.....	17
2.2 法律.....	21
2.3 仕組み	26
第3章 国際枠組み分析	33
3.1 海洋：油濁賠償問題	34
3.2 大気：地球温暖化問題	38
3.3 南極大陸：南極条約	44
3.4 宇宙：INTELSAT	48
3.5 事例からの教訓	50
第4章 能動的デブリ除去運用システム設計	55
4.1 要求分析	56
4.2 機能設計	65
4.3 物理設計	70
4.4 能動的デブリ除去実行シナリオ.....	76
第5章 国際枠組み構築	79
5.1 教訓の取込み	79
5.2 能動的デブリ除去の規則.....	80
5.3 枠組み構築プロセス	82
5.4 総合評価	87
第6章 結論.....	89
謝辞.....	91

目次

文献目次 (1/3 : 含む参照サイト情報)	92
文献目次 (2/3 : 含む参照サイト情報)	93
文献目次 (3/3 : 含む参照サイト情報)	94
関連著作等リスト(1/2)	95
関連著作等リスト(2/2)	96

図表目次

図 1-1	2014 年までの人工衛星の打上げ実績と以降 3 年間の打上げ予測	6
図 1-2	軌道上物体の種類別の数	9
図 1-3	低軌道のデブリ数予測	12
図 2-1	分析のイメージ	16
図 2-2	能動的デブリ除去シナリオの一例	19
図 2-3	ビジネスモデル 1 の Customer Value Chain Analysis	30
図 2-4	ビジネスモデル 2 の Customer Value Chain Analysis	31
図 3-1	現行の国際油濁補償体制	35
図 3-2	地球温暖化組織関係図	40
図 4-1	宇宙デブリに関する活動の関係	63
図 4-2	能動的デブリ除去のシナリオ	64
図 4-3	能動的デブリ除去運用の国際枠組みのサブシステム構成	67
図 4-4	能動的デブリ除去運用のサブシステムの内部インタフェース図	68
図 4-5	能動的デブリ除去運用のサブシステムの外部インタフェース図	69
図 4-6	資金調達ケース 1 : 国際共同供出型	73
図 4-7	資金調達ケース 2 : 除去実行者調達型	74
図 4-8	能動的デブリ除去運用の国際枠組み組織設計	75
図 4-9	能動的デブリ除去実行シナリオ	77
図 5-1	国際枠組み構築の流れ	82
図 5-2	枠組み構築プロセス	86

図表目次

表 1-1	国際標準機構で検討している宇宙環境一覧	8
表 1-2	宇宙デブリによるリスクの管理方法	11
表 2-1	能動的デブリ除去シナリオからの技術課題	20
表 2-2	能動的デブリ除去シナリオへの国際宇宙法の適用	25
表 2-3	能動的デブリ除去の運用のビジネスモデル	27
表 3-1	分析対象ケースの比較	33
表 3-2	IOPCF と ADR 補償基金の対比	37
表 3-3	地球温暖化への取り組みの経緯	39
表 3-4	地球温暖化対策からの教訓の適応	43
表 3-5	南極条約体制からの教訓の適応	47
表 3-6	国際電気通信衛星機構設立までの経緯	48
表 3-7	リファレンスモデル分析	51
表 4-1	IADC デブリ低減ガイドラインでの PMD 要求	57
表 4-2	COPUOS デブリ低減ガイドラインでの PMD 要求	59
表 5-1	各事例での国際枠組み構築の流れの要素の分析	83

はじめに

宇宙開発において、1960年代の東西冷戦下における宇宙先進国による国の威信をかけた開発競争の時代は終わりを告げ、宇宙開発を行っていない国の国民の日常生活も支える社会インフラストラクチャの一端を担う時代へと移り変わっている。2017年現在において、地球を中心とした静止軌道高度以下の宇宙空間に、約1700機の人工衛星が周回し、通信／放送配信／気象情報観測／位置・時刻情報配信など様々な経済活動を行い、市民の社会生活を支えている。(引用[1])

宇宙空間における活動の活性化／多様化に伴って、人工衛星は厳しい宇宙環境に耐えながら確実に目的（ミッション）を達成できることが求められる。宇宙環境には宇宙線、太陽フレアなどの自然環境に加え、宇宙デブリ（以降、またはスペースデブリ）という人工環境もある。宇宙デブリに関するガイドラインや提案、行動規範などを調整している国際機関間デブリ調整会議（Inter-Agency Space Debris Coordination Committee : IADC）のIADC Space Debris Mitigation Guidelinesには、宇宙デブリの定義として、“Space debris are all man made objects including fragments and elements thereof, in Earth orbit or re-entering the atmosphere, that are non functional.”と記されている。つまり宇宙デブリとは、人工衛星を打ち上げた後のロケットの上段や、寿命を終えた人工衛星などであり、「用済み」の人工物体である。(引用[2])

宇宙デブリは、ミッション運用中の人工衛星と衝突し、運用中の人工衛星の機能を喪失させるばかりではなく、衝突した人工衛星自体を宇宙デブリにしてしまう危険性を有する。または、宇宙デブリ同士の衝突により宇宙デブリが更に破損して、加速度的に宇宙デブリが増殖するという事象を引き起こす可能性もある。そこで、宇宙開発関係者は、宇宙環境保全のためにさまざまな宇宙デブリ対策を実行しており、宇宙デブリの発生増加抑制の有効と考えられている手段として能動的宇宙デブリ除去（以降、または能動的デブリ除去）がある。

能動的宇宙デブリ除去とは、宇宙空間にある宇宙デブリを捕獲して、運用中の人工衛星の活動空間から取り除くという方策である。能動的宇宙デブリ除去を継続的に実施することで、宇宙デブリの増加傾向を抑制できるという有効性が確認されているものの、実運用に向けての動きは鈍い。その理由は、能動的宇宙デブリ除去そのものの技術的な難しさに加え、法律、運用の仕組みの側面でも様々な課題が残されているためである。例えば、海洋の海難残骸物に関しては、「海難残骸物の除去に関する国際条約」により、自国の領海の安全確保のために、他国船籍の海難残骸物を迅速に処理することが可能である。(引用[3]) 宇宙デブリは、海洋における海難残骸物と同じと捉えることができるが、その処理には制約がある。宇宙でもロケット／人工衛星には所有者が存在し、その一部の破片、つまり宇宙デブリであっても所有権が存在する。宇宙に関する国際法を制定した頃には、宇宙での様々な状況が明確には想定されていなかったこともあり、宇宙デブリ、能動的宇宙デブリ除去に関して、従来の国際法

は十分に対応しきれていない。現在の宇宙に関する国際法の下では、他国所有の宇宙デブリは、自国の人工衛星との衝突のリスクが高くても、所有者の許可がなくては、海難残骸物のように除去することはできない。所有者の許可を得るための除去実行主体と所有者の調整では、信頼性が肝要となるが、両者の関係が必ずしも友好的であるとは限らない。また、いわゆる「ごみ処理」作業のコストを誰が負担するかという点も課題である。

本研究は、宇宙環境保全という上位目標の達成に有効であると考えられる能動的宇宙デブリ除去の継続的運用を目的に、その目的のための国際枠組みの構築を試みたものである。国際的な枠組みとして構築を試みたのは、従来の宇宙開発の延長線上の法体系や産業構造の下では、「国家」を離れて議論できないためである。国際枠組みには、技術、法律、運用の仕組みの視点で分析して抽出された課題に対処し、能動的宇宙デブリ除去の実行を継続的に推進する新組織が含まれている。

宇宙と同様、人類全体に開かれた空間である、海洋、大気、南極大陸などでも、それぞれの課題があり、解決を試みる国際枠組みが構築されている。それらの国際枠組みの成り立ちの経緯、仕組みには多くの教訓が含まれている。

国際枠組みは、システムを成功裏に実現させることができる、複数の専門分野にまたがるアプローチであるシステムズエンジニアリング手法に基づき設計した。(引用[4]) 能動的宇宙デブリ除去運用の課題を解決し継続運用を行う国際枠組みを設計すると共に、海洋、大気、南極条約などの人類全体に開かれた空間での国際枠組みの仕組みも分析、反映した。横断的な分析により、国際的な課題を解決する枠組みの構築の過程としての共通性を見出し、また構築の過程で、技術の進歩が課題解決の手法に影響を及ぼすことが明らかになり、技術開発の方向性が重要であることを確認した。

以下、本論文の構成を示す。

第1章「序論」では、先ず、最近の動向を踏まえて宇宙開発活動を振り返り、直近の宇宙開発活動／宇宙環境の状況を予測している。そこからは、宇宙環境保全の必要性が読み取れる。特に、宇宙デブリにより誘発される危機と共に、危機回避のための取り組みを述べた。さらに、本研究の主題である能動的宇宙デブリ除去の有効性を明らかにした。

第2章「能動的デブリ除去の課題」では、有効性を示した能動的宇宙デブリ除去の実行に関する様々な課題を、技術、法律、運用の仕組みの三つの視点から分析して、整理した。

第3章「国際枠組み分析」では、宇宙を含め、人類全体に開かれた空間である、海洋、大気(グローバルな気候)、南極大陸で、類似の課題解決を図った組織を分析して、教訓を考察し、能動的宇宙デブリ除去運用の仕組みに取り込むべき要素を洗い出した。

第4章「能動的デブリ除去運用システム設計」では、能動的宇宙デブリ除去運用の仕組みを、システムズエンジニアリング手法に従い、要求分析、機能設計、アーキテクチャ設計の手順で設計した。

第5章「国際枠組み構築」では、設計した能動的宇宙デブリ除去運用の仕組みに他の人類全体に開かれた空間に関する組織からの教訓がどのように組み込まれたかを評価／確認し、能動的宇宙デブリ除去運用の国際枠組みの妥当性、新規性を示した。次に、人類全体に開かれた空間を管理する国際枠組みの構築の流れを分析し、技術の進歩が課題解決に影響を及ぼしていることを明らかにした。

第6章「結論」では、本研究の全体をまとめるとともに国際枠組みが機能する展望を述べた。

第1章 序論

宇宙技術が社会生活を支えている現状を考えると、軌道上の宇宙機に大きな影響を与える宇宙環境問題を看過することはできない。本章では、最近の動向を踏まえて宇宙開発活動を振り返り、直近の宇宙開発活動／宇宙環境の状況を予測した。そこからは、宇宙環境保全の必要性が読み取れる。特に、宇宙デブリにより誘発される危機への対処は喫緊の課題である。宇宙デブリによる危機回避のための取り組みを述べ、さらに、本研究の主題である能動的宇宙デブリ除去の有効性を明らかにした。

20 世紀半ばのロケット打上げ技術の確立に続き、1957 年の人類初の人工衛星、スプートニクの打上げによって、宇宙開発の歴史が始まった。それ以来、人類は競うようにロケット、人工衛星を打上げ、惑星探査、天文などの科学ミッションだけでなく、通信、放送、地球観測、測位などの様々な技術を確認し、人類の社会活動に貢献してきた。宇宙への進出は、人工物だけではない。1961 年のユーリ・ガガーリンの地球一周の軌道飛行の後、37 か国、551 人が宇宙へ行っている。(引用[5]) 国際宇宙ステーションなどでは、長期滞在も可能となっている。2017 年 11 月現在で、人類が宇宙に打ち上げた人工衛星の数は、約 8000 機、内、現在も地球を中心に周回している機数は約 4700 機となる。(引用[6]) 更に、このうち稼働しているのは約 1700 機前後で、残りの 3000 機余りは、役目を終えまたは何らかの事由により機能を停止したまま軌道上に滞留しているものである。(引用[1])

宇宙空間、特に地球を中心とした静止軌道高度以下の空間は、人類の経済活動圏となり、今日、人類の社会生活は宇宙技術抜きには成立しないとも言える。人々は意識せずに、宇宙開発の恩恵を受けている。衛星経由の TV 放送はもとより、天気予報、車のナビゲーションなど、人工衛星の技術に基づく社会インフラストラクチャを、人々は日々利用している。

宇宙開発は、前述のスプートニクの打上げ以来、アメリカ、ロシア(旧：ソビエト連邦共和国)、ヨーロッパ、日本などの限られた国が国家事業として行う活動から、多様なプレーヤが様々な事業形態で参画する活動へと変化してきた。中国、インドだけでなく、アジア諸国、アラブ諸国、南米諸国、アフリカ諸国など、世界で数多くの国が人工衛星の所有国となった。民間企業も自らのビジネス展開のため独自の人工衛星を所有し、大学も、超小型衛星や小型衛星の打ち上げを盛んに行っている。例えば通信衛星経由で携帯電話通信サービスを提供するイリジウムは、軌道高度 780km に 66 機の人工衛星コンステレーションシステムを有している。(引用[46])このように、現在の宇宙開発は、従来の「宇宙先進国(または組織)」が、国家の税金(または国家からの拠出金)を使い、既存の宇宙開発関連企業に宇宙機システムの開発を契約するという構図から、「宇宙途上国」や一般企業が宇宙開発に乗り出すというように様

相を変えつつある。(注 1-1)(注 1-2)

注目すべきなのは、宇宙システム全般の小型化である。宇宙開発に初めて挑戦するプレーヤにとっては、小型の衛星が取り組みやすい。結果、超小型衛星／小型衛星の開発が盛んになり、小型の衛星の宇宙空間への移動手段のニーズの高まりに応じて、各種の小型ロケットが開発され、宇宙空間への人工衛星の投入数は増加傾向にある。

小型の衛星を利用した、ビジネスモデルとして、以下、通信ネットワークシステムと観測システムの例を挙げる。

通信ネットワークシステムの事例は、大規模な衛星コンステレーションシステムを構築して、地球上の情報格差を解消しようという動きである。アメリカの One Web は 150kg 級の衛星を 900 機近く(予備衛星を含む)打ち上げる計画を表明している。(引用[7]) イギリスの SKY AND SPACE GLOBAL も 200 機の超小型衛星による通信システムを構築する。(引用[8]) アメリカの Space X も数千機の衛星を打ち上げて、衛星インターネットを構築する計画を発表したことがある。(引用[9])

次の事例は、可視光センサーや合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar : SAR)などを搭載した衛星コンステレーションシステムによる地球観測網の構築である。アメリカの Planet は 100 機以上の人工衛星による常時地球観測体制を確立している。(引用[10]) 日本のアクセルスペースも 2022 年までに 50 機の地球観測衛星 GRUS を打ち上げ、1 日 1 回、地球上の全陸地の約半分を撮影することが可能になるアクセルグローブ計画を発表している。(引用[11])

こうした宇宙産業界の流れに応じて、打上げられるロケット、人工衛星の機数は増加傾向にある。図 1-1 は、2014 年までの打上げ実績と以降 3 年間の打上げ予測である。2011 年頃から打上げが増加傾向にあることが読み取れる。2017 年 2 月 15 日には、インドの PSLV ロケットは、104 機の人工衛星の打上げに成功した。(引用[12]) Space Works の Elizabeth Buchen は、2014 年までの打上げ実績に基づき、2020 年までに、2000~2750 機の 1-50kg の超小型衛星の打上げ需要が、潜在していると予想している。(引用[13]) これは年平均 400-500 機の人工衛星が打上げられることとなり、打上げ機数の増加に連動して、軌道を周回する人工衛星の数も増大する。

打上げられる人工衛星の数の増加は、前述のようにその技術に依存する社会インフラストラクチャが人工衛星の打上げを要求していることの裏付けでもある。

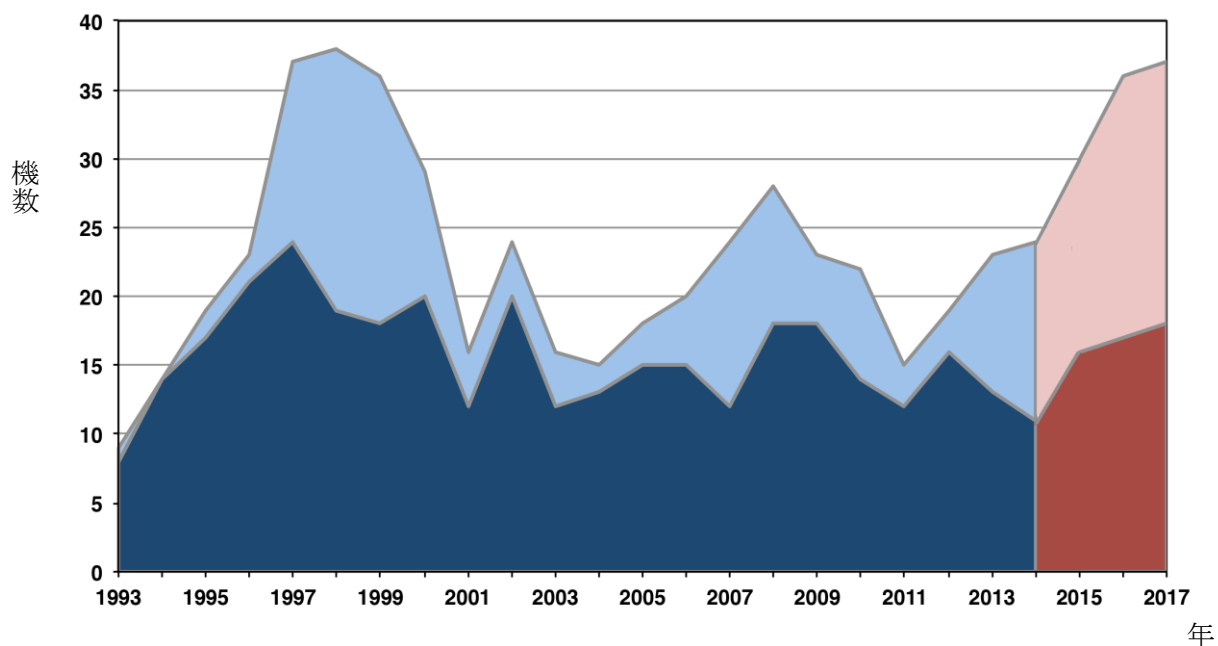


図 1-1 2014 年までの人工衛星の打上げ実績と以降 3 年間の打上げ予測

- 濃い青：静止軌道への打上げ実績
- 濃い赤：静止軌道への打上げ予想
- 薄い青：静止軌道以外の軌道への打上げ実績
- 薄い赤：静止軌道以外の軌道への打上げ予想

引用元[14]

2015 Commercial Space Transportation Forecasts

Federal Aviation Administration April, 2015

https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/Commercial_Space_Transportation_Forecasts_2015.pdf

一方、打上げたロケットの残骸やミッション期間を終えた人工衛星、または故障して軌道制御が不能となった人工衛星は、大気による摩擦により徐々に高度を下げて大気圏に突入し、突入時の断熱圧縮による温度上昇で消滅する。軌道を下げて消滅するまでの期間は、それぞれの軌道高度、機体の大きさなどにもよるが、数年から数十年という時間を要する。その間、これらのロケット残骸、人工衛星は宇宙デブリ(以降、またはデブリ)として、宇宙空間に滞留し続ける。例えば、先に民間企業が所有する人工衛星システム事例として挙げたイリジウムは、2007年に既存のイリジウム通信衛星 66 機をすべて更新する次世代衛星通信ネットワーク計画「Iridium NEXT」を発表した。この更新作業において、既存のイリジウム通信衛星は、軌道高度を下げる運用を行い、大気圏消滅をする処理を行うが、7-10 機は残存燃料が不足しているため、軌道高度が下がるまで現在の軌道高度に残存する。(引用[47])

デブリとは、明確な目的もなく宇宙空間にある人工物として定義される。人工衛星などの打上げに使われたロケット本体や部品、破片、ミッション運用を終了した人工衛星、また宇宙飛行士が船外活動中にリリースしてしまった用具(工具など)が相当する。

デブリにより誘発されるリスクとは、運用中の人工衛星とデブリが衝突することにより、運用中の人工衛星の機能が喪失されるばかりではなく、デブリ同士の衝突で加速度的にデブリが増殖する、または、その人工衛星自体がデブリとなるという事象がある。ケスラーが 1970 年代から警告してきた、所謂”ケスラーシンドローム”である。(引用[15]) 前述の通り、宇宙技術は社会インフラの基盤技術となっており、運用中の人工衛星のデブリ化は社会インフラの喪失につながる。また、まれに大型のデブリは消滅しきれず地表落下する。消滅しなかったデブリが、人口密集地に落下する、飛行機や船舶と衝突するというリスクの可能性は低いながらも存在する。長友も、1970 年代にこうした打上げや人工衛星の数の増加をすでに予想しており、宇宙機同士の衝突の危険性、宇宙航行のコントロール(Space Traffic Control)の必要性を述べていた。(引用[16])

前述の通り、宇宙技術は社会インフラストラクチャを支える技術となっており、運用中の人工衛星のデブリ化は社会インフラストラクチャの喪失につながり、人類の活動に大きな影響を与える。したがって、各人工衛星が確実に目的（ミッション）を達成できるように、人工衛星が曝される宇宙環境を理解し管理することは非常に重要なことであるという問題意識が、宇宙開発関係者の間で醸成されてきた。

こうした動きを受けて、国際標準化機構(International Organization for Standardization:ISO)では、宇宙・航空専門分科会－宇宙システム・運用分科委員会－宇宙環境分科会(ISO/TC20/SC14/WG4)に、人工衛星などが曝される宇宙環境を自然環境と人工環境として定義し、個々の環境モデルを構築して規格化を検討している。本研究では、表 1-1 の#10 宇宙機への相互作用での影響、デブリの衝突に着目している。

表 1-1 国際標準機構で検討している宇宙環境一覧

1.宇宙線
2.太陽活動
3.ジオイド・重力モデル
4.磁気圏
5.電離圏・プラズマ圏
6.放射線帯モデル
7.メテオロイド、スペースデブリ
8.中性ガス、高層大気、大気の発光
9.有人への影響
10.宇宙機への相互作用
11.宇宙環境のシミュレーション試験
12.人工的環境汚染

引用元[17] 宇宙環境リスク事典 五家建夫 丸善(2006)

図 1-2 は NASA の Orbital Debris Program Office が発行している Orbital Quarterly News からの引用であるが、2017 年において宇宙空間にある人工物の全体数(約 18,000 個)の内、約 4,000 個のみが人工衛星であり、80%近くがデブリに相当していることが分かる。これは、地上から観測できるデブリ(低軌道では約 10cm 以上、静止軌道では 1m 以上の大きさ)のみを対象としているため、観測できない小さいデブリを含めると実際の数はいずれも更に増え、数百万、数千万個という見積もりも示されている。同 News には、種別の総質量も示されているが、静止軌道以下の地球の周辺の宇宙空間には約 4500t のデブリが存在しているという見積もられている。

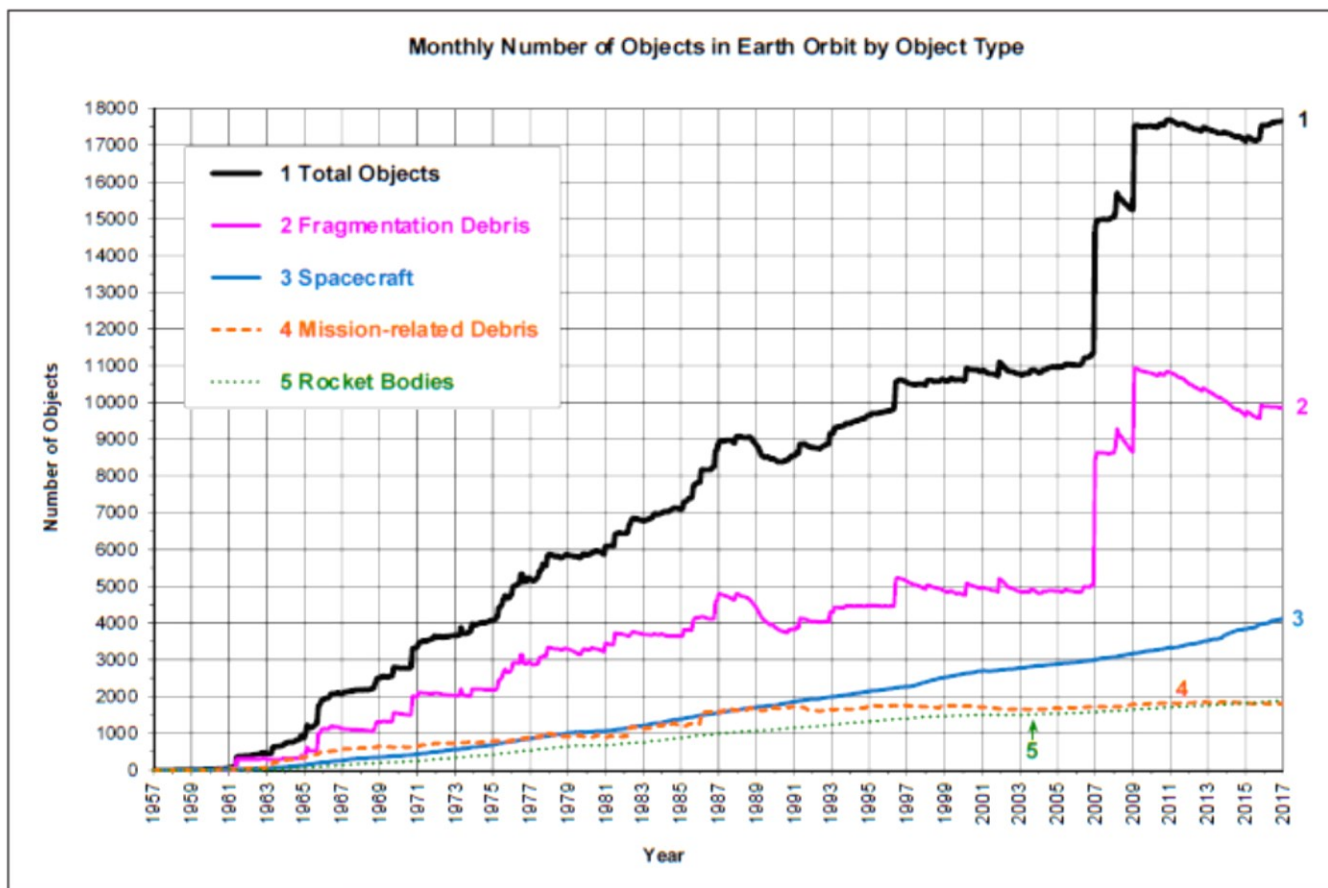


図 1-2 軌道上物体の種類別の数

引用元[18] Orbital Debris Quarterly News Volume 21, Issue 1 February 2017

<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv21i1.pdf>

こうしたデブリが誘発するリスクへの対処方法をプロジェクトマネジメント知識体系(PMBOK)ガイドのリスク管理手法に基づいて評価する。同手法では、リスクへの対応法は、①回避(avoid)、②低減(mitigate)、③転嫁(transfer)、④容認(accept)に分類される。(引用[19])
ここでは、デブリと運用中の人工衛星が衝突する、もしくはデブリが地上に落下して地上での衝突事故を起こすリスクを対象として、対処方法を評価する。

①回避

運用中の人工衛星との衝突が起きないようにするためには、デブリとの衝突の可能性が検知された場合に、運用中の人工衛星の軌道を変更して、衝突を回避する。実際に、宇宙開発関係者は、デブリの軌道を監視することで運用中の人工衛星への接近警告を発して、接近警告を受けた人工衛星の運用者は運用している人工衛星がデブリに衝突しないように人工衛星の軌道を変更している。例えば、アメリカでの国防総省戦略軍統合宇宙運用センター(Joint Space Operations Center:JSpOC)がデブリを 24 時間 365 日監視し、他国政府や商業衛星運用者に対し情報を提供している。(引用[20])

この手法は、回避としては有効ではあるが、観測の限界(観測できるデブリの大きさ、数など)、運用者の負荷、人工衛星の軌道変換による搭載燃料の早期消費、人工衛星の寿命の短命化など課題がある。また、軌道上でのデブリと人工衛星との衝突は避けられても、デブリの落下による地上での衝突事故については回避し難い。軌道上の衝突によるデブリ数の密度上昇や、地上落下事例の増加によって、宇宙活動が困難になる可能性がある。

②低減

デブリの発生や数を抑制して、衝突の発生確率を許容範囲にまで下げる手法となる。実際に、宇宙開発関係者は、ISO や各国／組織の設計基準設けて、打上げられるロケット／人工衛星がデブリとならないように設計する手法を取り入れている。また、運用終了後の処置、廃棄運用(Post Mission Disposal : PMD)によって大気圏に突入する際に、廃棄するロケットや人工衛星の軌道を制御して地表や航空機／船舶などとの衝突を避ける手法も研究されている。しかし、これらの発生抑制、制御された大気圏突入は、ロケットや人工衛星の偶発故障などにより実行できない可能性は残る。また、IADCによると、低軌道の周回衛星に対して PMD を行ったとしてもデブリの数は増加し続けるという解析結果が得られており、PMD だけではデブリの発生を抑制できないという見解を表明している。したがって、現存するデブリを能動的に除去する能動的デブリ除去(Active Debris Removal : ADR)が必要という結論が導かれている。(図 1-3)

能動的デブリ除去とは、デブリを捕獲して何らかの手段で、軌道から離脱(デオービット)させ、大気圏突入させたり墓場軌道へ移動させたりして、運用中の人工衛星の周回軌道から取り除く運用である。

③転嫁

リスク(衝突や地表落下)発生による責任を、外部プレーヤに委託する手法であるが、リスク発生による損害を保険で賠償するのが一般的である。現在は、デブリによる衝突リスクが低く、宇宙保険におけるデブリ衝突に関する保険料率は非常に低い。衝突リスクが高くなり保険による賠償が頻繁に行われるようになると、保険料率は引き上げられるであろう。さらに、宇宙開発での事故の影響は非常に大きく賠償額は高額であるため、保険料は高額となることが予想される。こうした保険料の引き上げは、宇宙開発事業へのコスト面でのインパクトとなり、産業発展の妨げとなり得る。

④容認

衝突や落下による地表での衝突に対する対策を立てず、許容する手法となる。

以上のリスク対策手法を表 1-2 に整理する。現状は、デブリによるリスク発生確率が低いため、宇宙産業界は①回避、③転嫁、④容認の対応でデブリによるリスクに対処できている。しかし、前述のようにロケット／人工衛星の打上げは増加傾向にあり、軌道上での衝突によるデブリ数の密度上昇や、地上落下事例の増加によって、①回避、③転嫁、④容認の対応での許容レベルを越える時は近づいている。デブリによる衝突／デブリの地表落下のリスク発生確率が許容値を越えないよう、②低減の手法の実行、特に能動的デブリ除去の実行に早急に着手すべきである。

表 1-2 宇宙デブリによるリスクの管理方法

PMBOK でのリスク対応法		宇宙開発での対応例
①回避	リスクが起きないように、目的などを変える。	デブリとの衝突を回避するよう運用中の人工衛星の軌道を変更する。
②低減	リスクによる影響／発生確率を許容できるレベルにする。	デブリの発生を抑制する。 デブリの数を減らす。
③転嫁	リスク管理責任を外部プレーヤに委託する。	宇宙損害賠償保険をかける。
④容認	リスクを受け入れる。	デブリによる衝突／デブリの地表落下の発生を許容する。

[筆者作成]

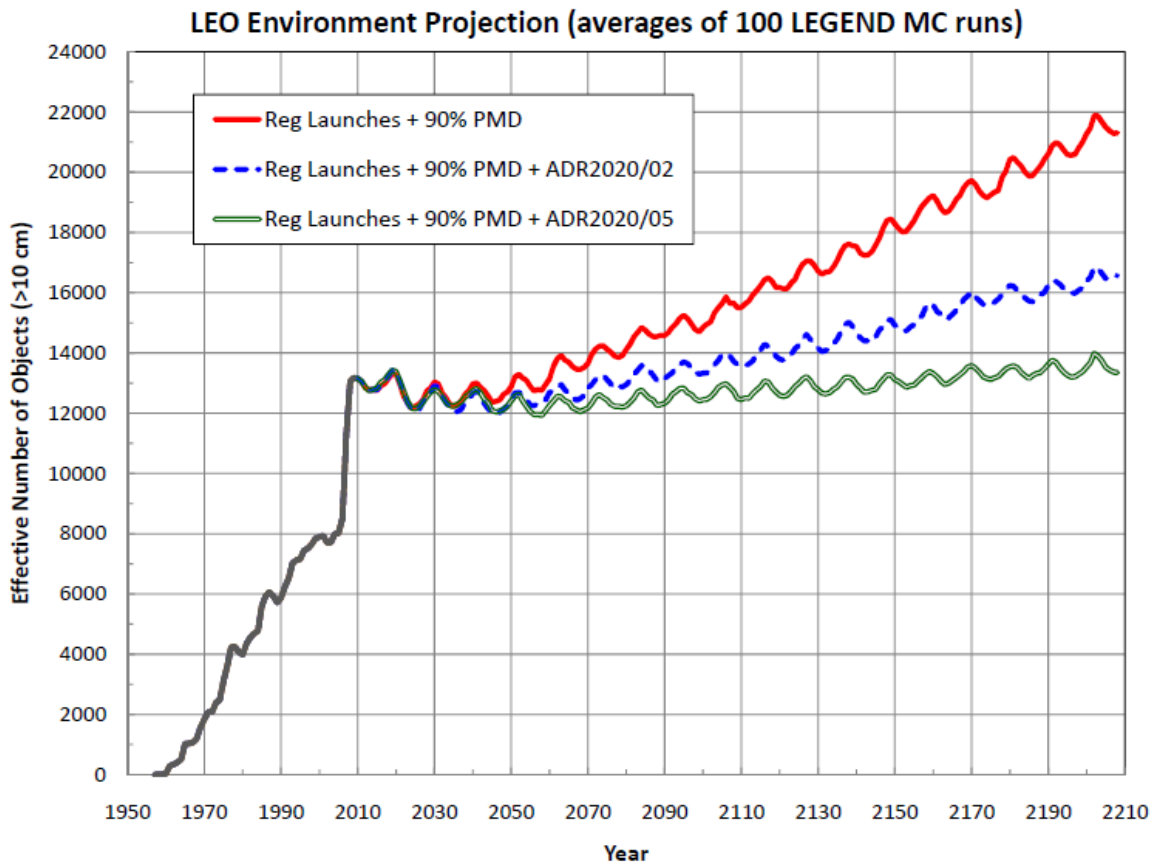


図 1-3 低軌道のデブリ数予測

赤：ミッション後の廃棄運用の達成率 90%のみの条件での低軌道のデブリ数の予測

青：ミッション後の廃棄運用の達成率 90%

および 2020 年から年間 2 回の能動的デブリ除去を実施する条件での
低軌道のデブリ数の予測

緑：ミッション後の廃棄運用の達成率 90%

および 2020 年から年間 5 回の能動的デブリ除去を実施実施する条件での
低軌道のデブリ数の予測

赤線は、デブリの数は単調増加することを示しており、青線は、若干の増加傾向、緑線はデブリの数を 2020 年と同じ程度に抑制できることを示している。つまり、この図から、ISO や設計基準によるデブリ発生抑制処置(ミッション後処置など)のみでは、デブリの増加を抑えることはできず、能動的デブリ除去が必要なことが読み取れる。

引用元[21] Liou, J. C.: An Active Debris Removal Parametric Study
for LEO Environment Remediation
Advances in Space Research, 47(2011), pp. 1865-1876

以上、本章をまとめる。

宇宙開発は、社会インフラストラクチャを支える技術となっている。様々な社会要求に対応するに従い、人工衛星の打上げが増えている。人工衛星の打上げ増加は、宇宙デブリの増加につながる。宇宙デブリは、運用中の人工衛星との衝突や地上への落下によって、大きな被害を引き起こすリスクを有している。

現状は、宇宙デブリによるリスク発生確率は低いため、宇宙産業はリスクを回避、転嫁、容認することで対処している。しかし宇宙デブリの増加に伴い、リスクの発生確率は高くなり、リスクに対して軽減の対処を積極的に行う必要が出てくる。特に、能動的宇宙デブリ除去の早期着手が望まれる。

注記

注 1-1：宇宙先進国／宇宙後進国の明確な定義はないが、本研究内では、

－宇宙先進国：打ち上げ手段および宇宙機システムの開発を主導できる国

－宇宙後進国：打ち上げ手段を有さず、宇宙機システムの開発を主導できないが、宇宙機システムの運用は行う国

と定義する。

注 1-2：人工衛星の種別の定義は色々あるが、本研究では人工衛星の重量をパラメータとして定義する。

－大型衛星：1.5t 以上

－中型衛星：500kg～1.5t

－小型衛星：100kg～500kg

－超小型衛星：100kg 以下

第2章 能動的デブリ除去運用の課題

第1章で有効性を示した能動的デブリ除去であるが、実際の運用に関しては様々な課題がある。能動的デブリ除去の実行方法と、その課題を確認する。能動的デブリ除去の運用を、技術、法律、運用の仕組みの三つの視点から分析して、能動的デブリ除去の運用の課題を整理する。

デブリによるリスク発生の可能性が高くなることが認識されながら、実際に能動的デブリ除去が実行されたことはない。能動的デブリ除去に関わる技術の難しさに加え、法律の対応の遅れ、運用に関する不透明感があるのも一因と考えている。

能動的デブリ除去運用に関する先行研究としては、カナダの McGill 大学が各国の有識者を招いて 2011 年 11 月に開催した The International Interdisciplinary Congress on Space Debris Congress の結果を、Jakhu らが国連宇宙空間平和利用委員会(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space:COPUOS)に報告したレポートがある。(引用[22]) このレポートでも、能動的デブリ除去運用の仕組みが提案されているが、目的は能動的デブリ除去に関わる問題提起である。グローバルな基金の必要性は認めているが、出資者の観点からの評価に欠け、運用組織の構成を明確には定義しきれていない。また齊藤らは、Digital Currency Design for Sustainable Active Debris Removal in Space において、能動的デブリ除去に関するトークンを発行し、宇宙産業全体の負債を宇宙産業全体で返済するという興味深い提案をしているが、能動的デブリ除去への初期投資、除去に失敗した場合の補償など未だ議論すべき点は残されている。(引用[23])

本研究では、システムズエンジニアリング手法に基づき、能動的宇宙デブリ除去運用の仕組みを、要求分析、機能設計、アーキテクチャ設計の手順で設計した。また、宇宙を含め人類全体に開かれた空間である、海洋、大気(グローバルな気候)、南極大陸で、類似の課題解決を図った組織を分析して、教訓をを取り込んだ。本研究で設計した能動的宇宙デブリ除去運用運用の仕組みは、以下の点が新規要素である。

- ・ 能動的宇宙デブリ除去実施の責任を組織が取り、関係国は能動的宇宙デブリ除去の実行のコストのみを負担する
- ・ 既存の国際的な組織を仕組みの中に取りこみ、また新組織が実施に関する調整を引き受けることで、能動的宇宙デブリ除去の実施に関する信頼性／透明性の醸成を試みた
- ・ 既存の宇宙デブリに関する責任問題を問うことなく、活動対象をこれからの能動的宇宙デブリ除去活動に集中させ、従来宇宙先進国が参画し易いようにした

分析のイメージを図 2-1 に示す。

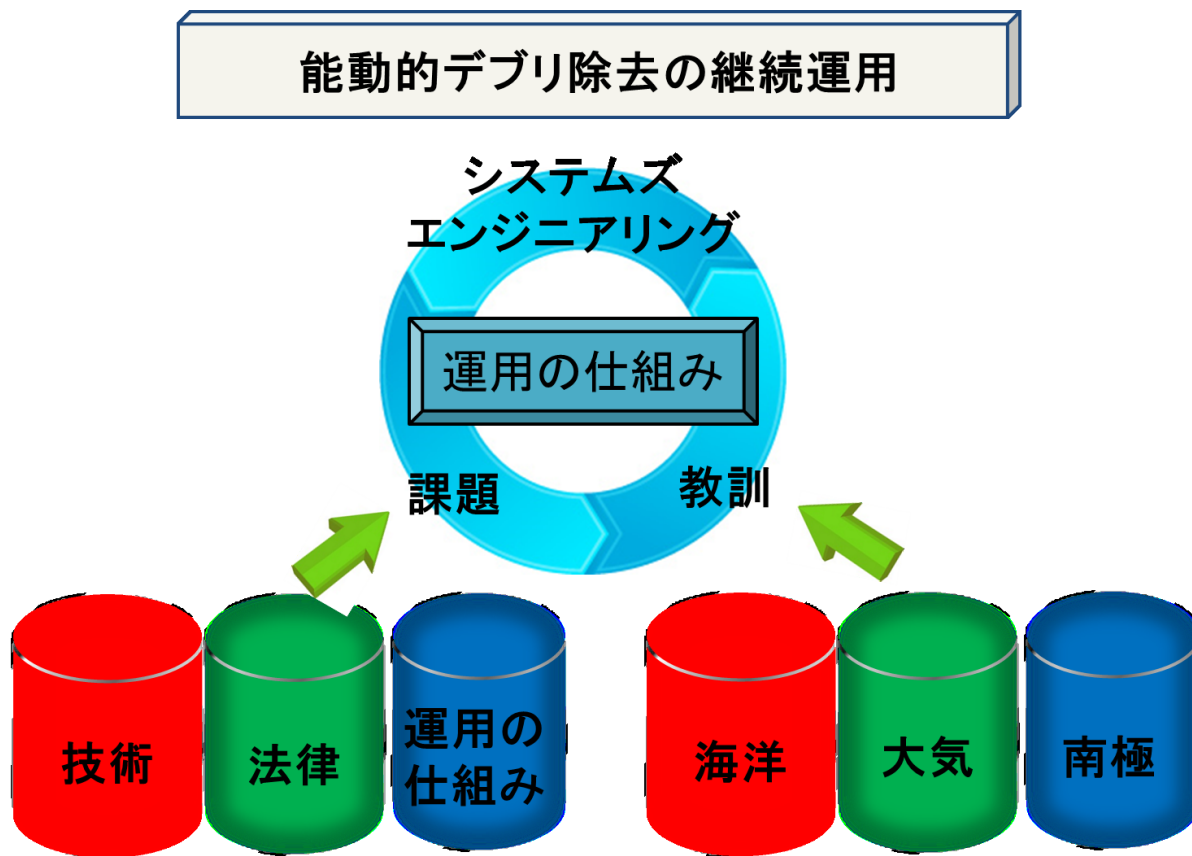


図 2-1 分析のイメージ

[筆者作成]

2.1 技術

第1章で述べたように、現時点での、地球周辺のデブリ除去の有効手段は、デブリを捕獲して何らかの手段で、軌道から離脱(デオービット)させ、大気圏突入させたり墓場軌道へ移動させたりして、運用中の人工衛星の周回軌道から取り除く運用である。本項では、IADCにより有効性が認められた大型デブリ(ロケット上段や人工衛星など)を大気圏突入させる能動的デブリ除去(ADR)をミッションとする衛星(以降、ADR衛星)により除去するシナリオを主な対象として検討する。ロケット上段を対象にADRを実行する運用シナリオの概略を図2-2に示す。なお、このシナリオの各シーンに用いられる個別の技術については、あくまでも一例であり各宇宙機関／研究所などで、様々な方法が検討されている。

このシナリオでの技術課題を表2-1にまとめる。特に以下の運用手順は課題があり、実証を要するものである。

●非協力接近

宇宙空間での人工衛星同士の接近は、国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)へのこうのとりの(H-II Transfer Vehicle : HTV)などの補給機の接近などで実用化されている。これらの相互接近は、「協力接近」と言われ、互いに接近することを前提にして設計された宇宙機システムが、互いに協力的に運用を行っているものである。例えば、接近する人工衛星の目標となるようなターゲットマーカをあらかじめ搭載する設計や、接近してくる人工衛星に向けて誘導信号を発する軌道上での運用などが取り込まれている。しかし、デブリが接近対象の場合、こういった協力体制は期待できず、情報の少ない接近対象(デブリ)の検出、識別から始まり、デブリの運動や形状(破碎などにより設計形状と異なっている可能性がある)認識、接近経路設計などを行う必要がある。非協力接近の実証としては、科学探査衛星はやぶさの小惑星イトカワへの着陸があるが、接近対象の大きさや運動状態に違いがある。はやぶさの技術を応用しつつ、個々の構成技術の研究も含め、非協力接近機能の軌道上実証が必要である。

●デブリ捕獲

図2-2のシナリオでは、デブリを能動的にデオービットさせ大気圏に突入させるためには、何らかの接触、つまり捕獲技術が必要となる。ISSやスペースシャトルでのロボットアームでの浮遊物捕獲は実用化されているが、上記の「非協力接近」の項で挙げた事例と同様に、協力的な捕獲対象を捕獲する技術事例である。ADRの実用化を検討しているシステムでは、対象であるデブリの代替機打上げよりコストを抑える目的もあって、殆どのADR衛星の質量／形状は、デブリのそれに比して小さい。つまり、捕獲した後、デブリとADR衛星との姿勢制御に対するADR衛星の制御能力の影響は小さい。またデ

デブリは軌道上で姿勢制御を行われずそのまま長期間滞留しており、その運動状態は地上では把握できていない。つまり、デブリと ADR 衛星との姿勢制御系への影響力の小さい ADR 衛星が、運動状態が未知のデブリを捕獲することになり、したがって、デブリの運動を精度よく推定する技術、およびデブリの運動エネルギーを吸収できる捕獲システムの開発が課題となる。捕獲に関わる手順については、捕獲システムの機構の試作品開発を含め、地上での解析が行われており、軌道上実証が計画されている。

一方、戒崎らは、軌道上でレーザーをデブリに照射し、生ずるプラズマの反力を使って、デブリの速度を落とし高度を下げ、地球大気圏に突入させて除去する方法を提案している。(引用[24]) この方式では、ADR 衛星とデブリとは非接触であり、捕獲の課題はないが、以下の課題が挙げられている

◆宇宙用高強度レーザー

戒崎らの試算では、デブリ除去のためには平均パワーが 500kW の宇宙用高強度レーザーが必要となる。従来のレーザー技術では、この高強度レーザーは精密な調整を要し、機器の打上げ時の振動への耐性設計が必要であった。ロケットの振動に耐えられません。しかし、最新技術で、精密な再調整を必要としない高強度かつ高頻度のレーザーを発信の可能性が示されており、課題解決の方向が見出されている。

◆高速追尾のレーザー

デブリへ反力を与えるため、ある程度の時間のレーザー照射が必要であり、そのために高速移動するデブリの高精度の運動推定、高速レーザー追尾が求められる。戒崎らによると、光学系の精度はハッブル宇宙望遠鏡などですでに達成されており、高速追尾に耐える望遠鏡の開発は、現在最新の光学設計技術で実現可能としている。

前述の通り、これらの方法以外にも色々な除去方法が提案／検討されており、何らかの課題を抱えているが、地上実証や解析結果が行われている。今後、軌道上実証を経て実用へ進むと考えられる。

能動的デブリ除去の実行に関する技術面での課題に共通する要因として、デブリが非協力であること、デブリの情報が少ない（または、ない）ことがある。既に軌道上でデブリになっている宇宙システムは協力対象となることは不可能であるが、情報（例えば、物体視認のための外観／形状に関する情報）提供があれば、能動的デブリ除去のシナリオ実行の角度を高めることができる。技術要素の実証に加えて、デブリに関する情報授受、情報管理などが、能動的デブリ除去ミッションの成否に影響すると言える。

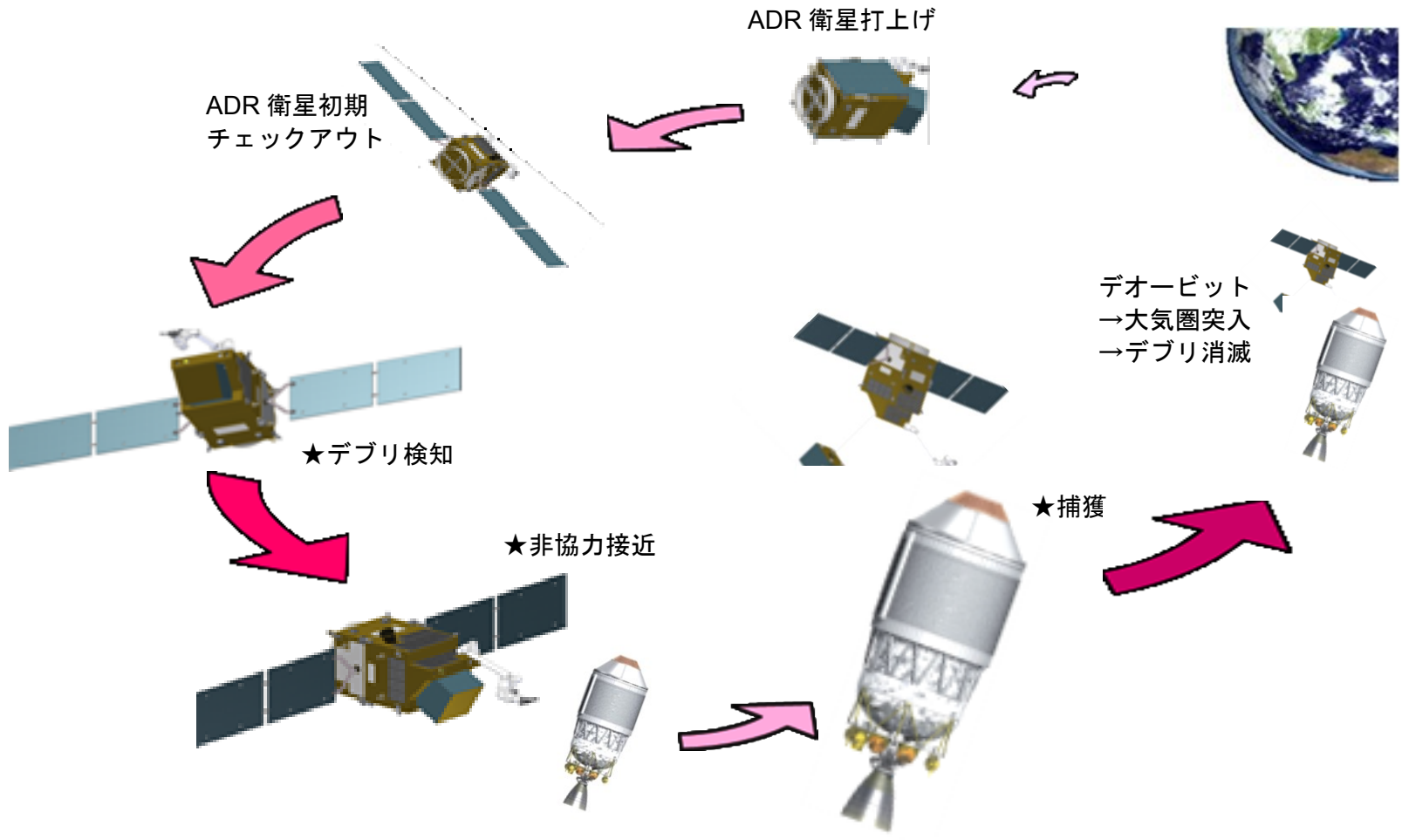


図 2-2 能動的デブリ除去シナリオの一例

: ★は主要技術課題

[筆者作成]

表 2-1 能動的デブリ除去シナリオからの技術課題

シナリオ	シナリオ詳細	技術課題	課題の検討状況
ADR衛星打上げ	ADR衛星を打上げる		
ADR衛星初期チェックアウト	ADR衛星の初期チェックアウトを行う		
非協力接近	デブリをADR衛星に搭載したセンサにより検出する デブリとの相対距離および接近軌道を算出する デブリへの接近軌道に障害物がないことを確認する デブリへADR衛星を相対接近させる	<ul style="list-style-type: none"> ・遠方(相対距離:100km~1km程度)からのデブリの点光源認識技術 ・近傍(相対距離:1km~数10m程度)からのデブリの物体視認識技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・きく7号やはやぶさによるイトカワの検出機能などを応用して、技術開発中
デブリ捕獲	デブリの近傍(相対距離:数10m程度)でADR衛星を相対停止させる デブリの運動状態を検出する デブリを捕獲する部位の状態を検出する デブリを捕獲する位置へ相対移動する デブリをADR衛星により捕獲する	<ul style="list-style-type: none"> ・デブリの運動推定技術 ・デブリの運動エネルギーを吸収する捕獲技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・きく7号やはやぶさによるイトカワの検出機能などを応用して、技術開発中 ・捕獲機構での試作品での技術実証中 ・シミュレータを使った運動推定技術の実証中
デオービット(軌道変換)	デブリの軌道高度を変更して、大気圏に突入させたり墓場軌道へ移動させる		

[筆者作成]

2.2 法律

能動的デブリ除去の運用を法律面から考察する。

能動的デブリ除去は、宇宙空間での活動であり、除去対象のデブリが自国所有のものとは限らないため、国際宇宙法に従い運用されると想定される。

国際宇宙法は、COPUOS が起草した宇宙関係 5 条約、宇宙活動国間の憲章／条約／規則や、法的拘束力は持たないが実質的な行動規範として機能するソフトローなどから構成される。

(引用[25])

宇宙関係 5 条約とは、以下の 5 つとなる。(引用[26])

- ・ 宇宙条約
月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約
- ・ 宇宙救助返還協定
宇宙飛行士の救助及び送還並びに宇宙空間に打ち上げられた物体の返還に関する協定
- ・ 宇宙損害責任条約
宇宙物体により引き起こされる損害についての国際的責任に関する条約
- ・ 宇宙物体登録条約
宇宙空間に打ち上げられた物体の登録に関する条約
- ・ 月協定
月その他の天体における国の活動を律する協定

これらの国際宇宙法を、図 2-2 で示した能動的デブリ除去運用シナリオに適応して、遵守すべき手続きや課題を挙げる。以下、除去実行主体とは、能動的デブリ除去を計画、実行する組織(国の宇宙機関や企業等)と定義する。

●能動的デブリ除去衛星の登録

根拠：宇宙物体登録条約

除去実行主体もしくは能動的デブリ除去衛星の打上げ国は、宇宙物体登録条約に基づき、国連事務総長に能動的デブリ除去衛星の情報を提供し登録する手続きが必要である。この手続きは「国」が行うこととなっており、除去実行主体が単一の「国」でない場合に備えて、除去実行主体は打上げ国と、登録簿の内容及び保管の条件を決めておく、もしくは除去実行主体が「国」と同等の立場を取り得る、国際法人格を取り、「国」として手続きを進められる体制を整えておく必要がある。

●能動的デブリ除去衛星による第三者賠償責任

根拠：宇宙条約 第七条／宇宙損害責任条約

能動的デブリ除去衛星が引き起こした損害については、「打上げ国」が賠償責任を負う。地表、または飛行中の航空機に対して与えた損害については、無過失責任を負う。それ以外の場所においての損害は、状況に応じて責任を負う。

除去実行主体が「国」でない場合にも備えて、「国」と同等の立場を取り得る、国際法人格を取り、「打上げ国」としての責任を負えるような体制を整えておくべきである。ヨーロッパ宇宙連合(European Space Agency : ESA)などは国際法人格を有している。ただし、国際法人格を取得するためには、除去実行主体に属する国が宇宙条約を締結している必要がある。

一方、国際宇宙法が定めるのは、国家間の責任であり、個人が求める損害賠償を制約するものではない。つまり、被害者個人は、能動的デブリ除去に関係した衛星製造機関（企業）、打ち上げ機関（企業）などの責任を追及することも可能である。その場合、能動的デブリ除去によるリスク(過大な責任)が負担となり、各機関（企業）が能動的デブリ除去に参入する障害となり得る。そこで、除去実行主と能動的デブリ除去に関わる機関（企業）間との取り決めにより、実質的には除去実行主体が責任を取る(つまり、損害賠償を行う)ように、各機関（企業）から除去実行主体に対する求償権を設定する。しかし、訴追された主体が、除去実行主体以外の国の管轄下にある場合は、その訴追主体は、その国の法律に拘束されるので、除去実行主体が責任を負うという解決案が単純に進められないことも考え得る。

したがって、除去実行主体が実体的に第三者賠償責任を負えるように、能動的デブリ除去実行に関わる関係者間で求償について取り決めておくと同時に、能動的デブリ除去に関わる関係者は除去実行主体と同じ国の管轄下にある組織に限定するのも解決策である。

●デブリ所有権／管轄権

根拠：宇宙条約 第八条

宇宙条約では、登録国が宇宙物体の管轄権を、個人や団体が所有権を有する。

除去実行前の手続きとして、除去実行主体が、デブリの管轄権を有する国、所有権を有する個人や団体と調整を行い、当該デブリを除去することについて、了解を得る必要がある。また、各国が、機能を失った宇宙物体、つまりデブリと認められる物体の所有権の取り扱いに関する国内法を整備し、個人や団体の所有権の消滅／国への委譲などの手続きが取れるようにできれば、能動的デブリ除去の促進にもつながる。

検討を要するケースとして、軌道上での所有権委譲などにより、所有者が登録国の管轄下でない場合がある。所有者が除去実行主体と交渉し難い国の管轄下にある場合は、能動的デブリ除去衛星による第三者賠償責任の問題もあり、当該デブリの除去の交渉は難しいと考えられる。

●デオービット

根拠：アメリカ合衆国法典第 51 編 第 50902 条(13)／(14)

同上 第 50904 条

いくつかの国では、国内法で再突入(リエントリ)に関しての認可を定めている。

能動的デブリ除去を実行してデブリを軌道離脱(デオービット)された結果、デブリが地上まで消滅せず、これら「リエントリ」の許可を要する国へ落下する可能性はある。

ここで、根拠としたアメリカ合衆国法典を例として議論する。(引用[26])

第 50902 条 定義

(13)「再突入する」および「再突入」とは、地球の軌道又は宇宙空間から地球へ、再突入機及びそのパイロード、乗員、または要る場合は宇宙飛行参加者を、確固たる意図をもち帰還させる又は帰還させようとするをいう。

(14)「再突入業務」とは、次に挙げるものをいう。

(A)再突入のための再突入機のパイロード、乗員(乗員訓練を含む)、または要る場合は宇宙飛行参加者の再突入の準備に関連する活動。

(B)再突入の実行。

第 50904 条 打上げ、運営及び再突入に関する規制

まず、能動的デブリ除去でのデオービットが、第 50902 条で定義する再突入に相当するののかという点が議論の対象である。現在、デブリが徐々に軌道高度を落として自然落下するのは、再突入とは考えられていない。

一方、一部の能動的デブリ除去のミッション実現方法は、大気圏への突入であり、意図をもった(計画的な)再突入と捉えることもできる。再突入としてとして解釈されるならば、除去実行主体は、アメリカ合衆国へ許可申請を行うか、コントロールドリエントリを行い、許可を要しない地域へ落下させるという対策が必要である。したがって、図 2-2 のシナリオでは含まれていないコントロールドリエントリを可能とする方向での技術検討が必要となる。

能動的デブリ除去が実行されると、アメリカ合衆国法典での再突入の定義の適用／非適用が議論されることになるが、除去実行主体は、コントロールドリエントリの技術導入も視野に入れておく必要がある。

●デオービットにおける第三者損害賠償

根拠：宇宙条約 第七条／宇宙損害責任条約

能動的デブリ除去衛星による第三者損害賠償と同じ宇宙法に基づくが、能動的デブリ除去がミッションの場合、デオービットする宇宙物体にデブリが含まれる。能動的デブリ除去衛星は、ISO や IADC のデブリ低減ガイドラインに基づいて製造されるという前提で、地表落下による損害発生は設計で対策されていると考えられる。したがって、地表落下で損害を与えるのは、デブリである可能性が高く、デブリの「打上げ国」の責任が問われることもある。能動的デブリ除去促進のためにも、能動的デブリ除去衛星による第三者損害賠償と同様に、除去実行主体内での取り決めにより、実質的には除去実行主体が責任を取る(つまり、損害賠償を行う)ことを事前にデブリの管轄権を有する国、所有権を有する個人や団体と協議しておく必要がある。

●デブリの返還

根拠：宇宙条約 第七条／救助返還協定第五条

宇宙物体が自国領域で発見された場合、打上げ国と国連に通報、打上げ国の要請に従って返還し、返還にかかる費用は、打上げ国が負担するというのが、国際宇宙法での規定である。

能動的デブリ除去推進の障害要素の一つとして、デブリの登録国は、デオービットの結果、消滅しきれず地表に落下した除去されたデブリが他国に渡り、自国の宇宙開発技術情報漏えいすることを懸念して、除去を認めないということが考えられる。

デブリが大気圏で消滅しないで地表落下した場合、除去実行主体が返還費用を負担し、デブリの管轄権／所有権を放棄していても、元のデブリ登録国へ地表落下したデブリを返還するという方針を立てておくことが、能動的デブリ除去推進の一因となり得るだろう。

表 2-2 に能動的デブリ除去運用における各宇宙国際法の適用をまとめる。国際宇宙法に照らし合わせて、能動的デブリ除去の運用時の法律面での遵守すべき手続きや課題を整理した。能動的デブリ除去の運用にあたり、関係者／国はこれらの手続きを遵守すると共に、第三者賠償などに関する事前調整を行い、合意しておく必要がある。特に、賠償は手続きだけでは済まず、実費が必要となることから、能動的デブリ除去の運用の仕組みの中で、負担責任まで踏み込んだ調整が必要である。

表 2-2 能動的デブリ除去シナリオへの国際宇宙法の適用

宇宙関連法規等		ADR衛星		デブリ
		打上国	ADR実行主体/国	デブリ所有者/国
宇宙関係 5条約	宇宙条約	第三者賠償責任(七条)	第三者賠償責任(七条) 所有権・管轄権(八条)	第三者賠償責任(七条) 所有権・管轄権(八条)
	宇宙救助返還協定			デブリの返還受領
	宇宙損害責任条約	第三者賠償責任	第三者賠償責任	第三者賠償責任
	宇宙物体登録条約	ADR衛星の登録手続き 登録簿の内容及び保管条件の決定	ADR衛星の登録手続き 登録簿の内容及び保管条件の決定	登録手続き(国連へ情報提供) 登録簿の内容及び保管条件の決定
その他	米合衆国法典 第50902条 (13)／(14) 第50904条		落下の許可 デブリの返還	

[筆者作成]

2.3 仕組み

次に、能動的デブリ除去を運用する仕組みを考察する。前述の通り、能動的デブリ除去は継続して実行されないと、デブリの数削減には結びつかない。(参照：図 1-3) したがって能動的デブリ除去は、技術課題の軌道上実証に続き、継続的に運用する仕組みが必要である。以下、能動的デブリ除去の運用をビジネスとして捉え、その継続性を検討する。

能動的デブリ除去の運用をビジネスとして捉え、まず、どのように能動的デブリ除去を行うかの「仕組み」=ビジネスモデルを設計した。ビジネスモデルでは、「誰に、何を、どのように提供し、どのように収支バランスを保つか」が明確になっている必要がある。

ビジネスとしては、誰(=ステークホルダー)にとって価値のあるものを提供する必要があるため、何=提供する価値と、誰=ステークホルダーとは、関連性が強い。価値の提供先=ステークホルダーが決まれば、そのステークホルダーを含めて収支バランスを取ることになる。

能動的デブリ除去が提供する価値を次の2つで考え、その提供する価値は、誰が要求するかを考えた。

- 価値1：デブリを特定せず除去することによる

人類全体に開かれた空間である宇宙環境保全

ステークホルダーは、「人類」と考える。

宇宙環境を保全するという広義な価値ではあるが、具体的には除去した各デブリの所有国にとって、その国由来のデブリが除去されたことに価値を認め、対価を払ってもらおう。各国由来の軌道上宇宙デブリの数に比例して、各国から対価を調達する。

- 価値2：特定のデブリを除去することによる特定の人工衛星の衝突リスク低減

ステークホルダーは、特定の人工衛星の打上げまたは運用機関(企業)と考える。

特定の人工衛星の衝突リスクが低減されるため、直接、恩恵を受ける打上げ機関(企業)から対価を調達する。

前述の価値 1、2 に対応する能動的デブリ除去の運用のビジネスモデルを表 2-3 にまとめる。

表 2-3 能動的デブリ除去の運用のビジネスモデル

	ビジネスモデル#1	ビジネスモデル#2
提供価値	宇宙環境全般の保全	特定の人工衛星の衝突リスク低減
除去対象	デブリ全般	特定の人工衛星との 衝突リスクの高い特定のデブリ
ステークホルダー	人類	宇宙開発機関 (各国宇宙機関や 宇宙利用民間業者)
提供手段	能動的デブリ除去の 実行主体が運営	能動的デブリ除去の 実行主体が運営
収支バランス	各国由来のデブリの数に比例して 各国に課金	デブリ除去をすることで 衝突リスクが低減された 報酬として徴収

[筆者作成]

能動的デブリ除去の運用のビジネスモデルを、顧客価値連鎖分析(Customer Value Chain Analysis : CVCA)ツールにより分析する。(引用[27])

CVCA ツールはビジネスモデルのコンセプトによってステークホルダーにどのような価値をもたらし、その価値がどう連鎖していくのかを可視化することができる。価値連鎖の可視化により、ビジネスモデルの妥当性を判断したり、ビジネスモデルの訴求点を見いだしたりすることが可能となる。また「ステークホルダー」のインタフェース概念を、所謂「対価を支払う人」からプロジェクト関係者にまで広げることができ、関係者の要求をより広く確実にとらえるのに有効な手法である。

上記の 2 つの価値に対応して設計した 2 つのビジネスモデルを分析した。2 つのビジネスモデルの CVCA 分析結果を図 2-3 および図 2-4 に示す。結果、それぞれのビジネスモデルの課題が識別された。

<能動的デブリ除去運用ビジネスモデル1の課題>

●宇宙利用民間企業がフリーライダーとなっている

宇宙利用民間企業は宇宙を利用する際に、宇宙環境が保全されるという価値を享受しているが、デブリ除去事業運用機関に対して対価を支払う流れがない。

対策として、宇宙利用民間企業からも課金する仕組み、例えば、税金の中にを取り込むなどの仕組みの構築が必要である。

●人類／国民に価値が理解されるか

人類／国民は、宇宙利用の価値を宇宙利用民間企業や各国政府(宇宙機関)から提供されることに対し、利用料や税金という手段を通じて対価を支払う立場となっているが、宇宙環境が保全されるという価値を直接は享受しなていない。したがって、宇宙環境保全の価値を理解しがたいと考えられる。一般国民にも、宇宙環境の現状を理解してもらい、宇宙環境保全への意識向上を図る活動をする必要がある。

<能動的デブリ除去運用ビジネスモデル2の問題点>

●除去対象とするデブリの優先度をどのように決めるのか

デブリ除去事業運用機関は、各国政府(宇宙機関)や宇宙利用民間企業に対して、それぞれが所有する人工衛星とデブリとが衝突するリスクを低減するという価値を提供する。それぞれが所有する人工衛星の用途が異なるため、除去対象となるデブリも異なり、除去するデブリの選定プロセスを確立する必要がある。

●デブリ所有者がフリーライダーとなる

軌道上にデブリを放置していた所有者が何ら対価を払うことなく、軌道上からデブリが除去されることとなり、完全なフリーライダーとなっている。除去に係る報酬を、デブリ所有者から徴収するという手段を取るべきであるが、その場合、所有者が報酬支払いを避けるため、除去作業に応じない可能性が高い。その一つの要因として、デブリを放置していて、運用中の人工衛星と衝突しても責任を問われていないという実態がある。宇宙環境保全の意識が向上すると、放置していることの責任を問う流れが生まれると考えられる。放置責任が追及される動きが出れば、デブリ所有者も除去に係る報酬を分担すると考えられる。

能動的デブリ除去の運用によってもたらされる価値に対応して設計した2つのビジネスモデルの分析により、能動的デブリ除去事業を運用する上での課題が浮かび上がってきた。能動的デブリ除去の結果は宇宙空間の環境保全でとどまるため、地上の宇宙利用者の実感を伴わない。結果、価値を理解されにくく、資金調達が難しい。この課題に対しては、以下の対策が有効であろう。

●問題意識向上

宇宙環境保全という、日常生活では理解し難い価値を、宇宙開発関係者も含め人類に理解を促す啓蒙運動を進める大気汚染問題や地球温暖化問題ですら、被害を体感できる地域の人々と、そうでない地域の人々の間では、問題への取り組み姿勢に大きな違いがある。デブリによりもたらされるリスクへの理解を深め、問題意識改革を諮る。

●除去するデブリの選定

ステークホルダーがデブリ除去の対価として除去に係る原資を供するためには、ステークホルダーにデブリ除去の価値を十分に理解してもらう必要がある。この場合、ステークホルダーとは宇宙技術を利用している一般国民ではなく、宇宙技術を利用して何らかのサービスを提供している事業主や宇宙開発を進める国と考えてよく、利用する宇宙技術を特定することができる。(特定の軌道の宇宙機を利用している。) したがって、どの宇宙デブリを除去すれば、ステークホルダーにとって魅力的な活動と映るかを検討して除去対象のデブリを選定する。

●デブリ除去事業の付加価値

デブリ対策として、デブリ発生抑制も検討されており、これらの対策が順調に実行されれば、軌道上のデブリの数は減少し、不慮の事故で発生したデブリのみが対象となると予想される。したがって、デブリ除去事業を長期的に遂行するためには、デブリ除去以外の付加価値が必要である。例えば、故障衛星への修理／燃料補給などの軌道上サービスが考えられる。

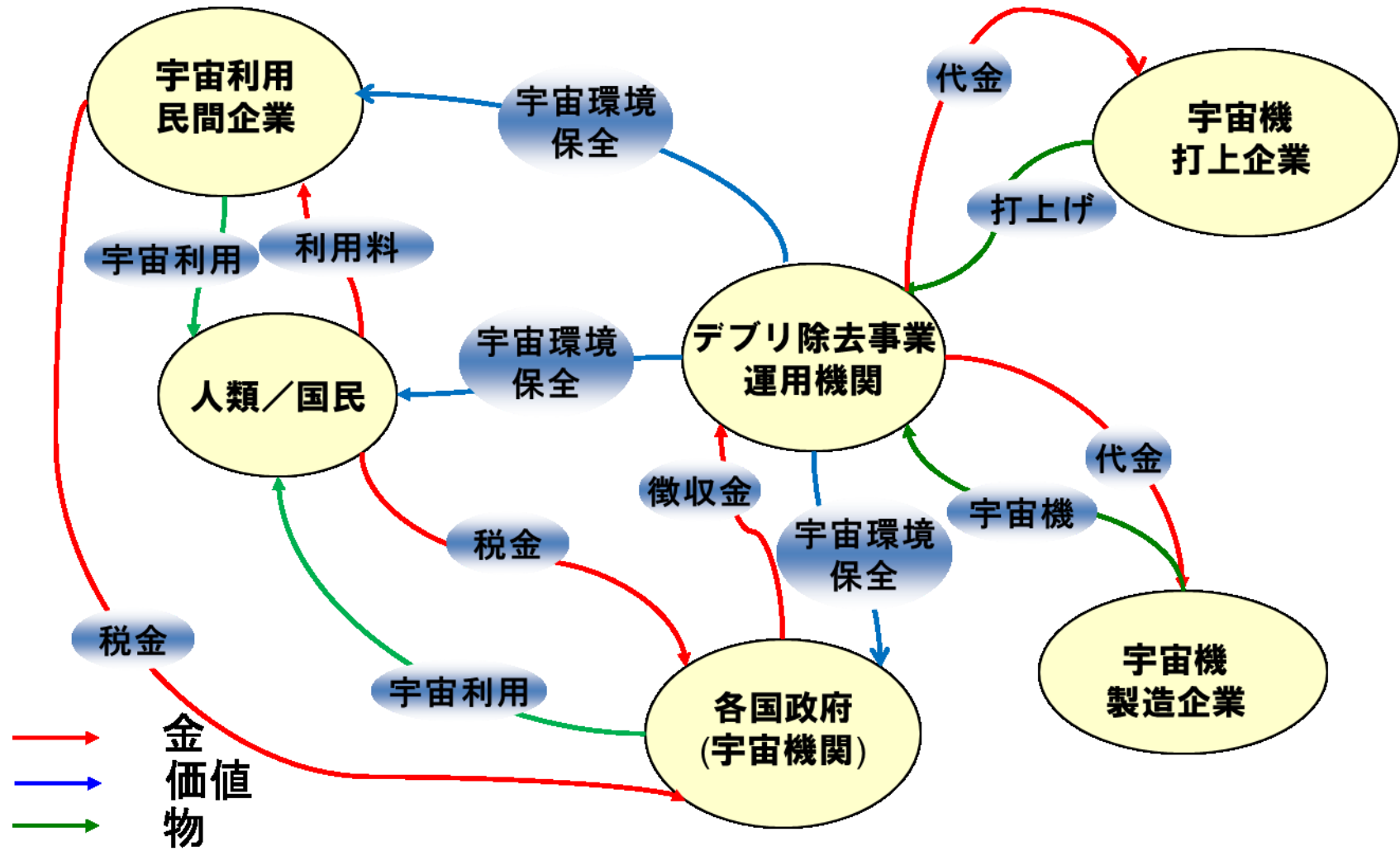


図 2-3 ビジネスモデル1の Customer Value Chain Analysis

[筆者作成]

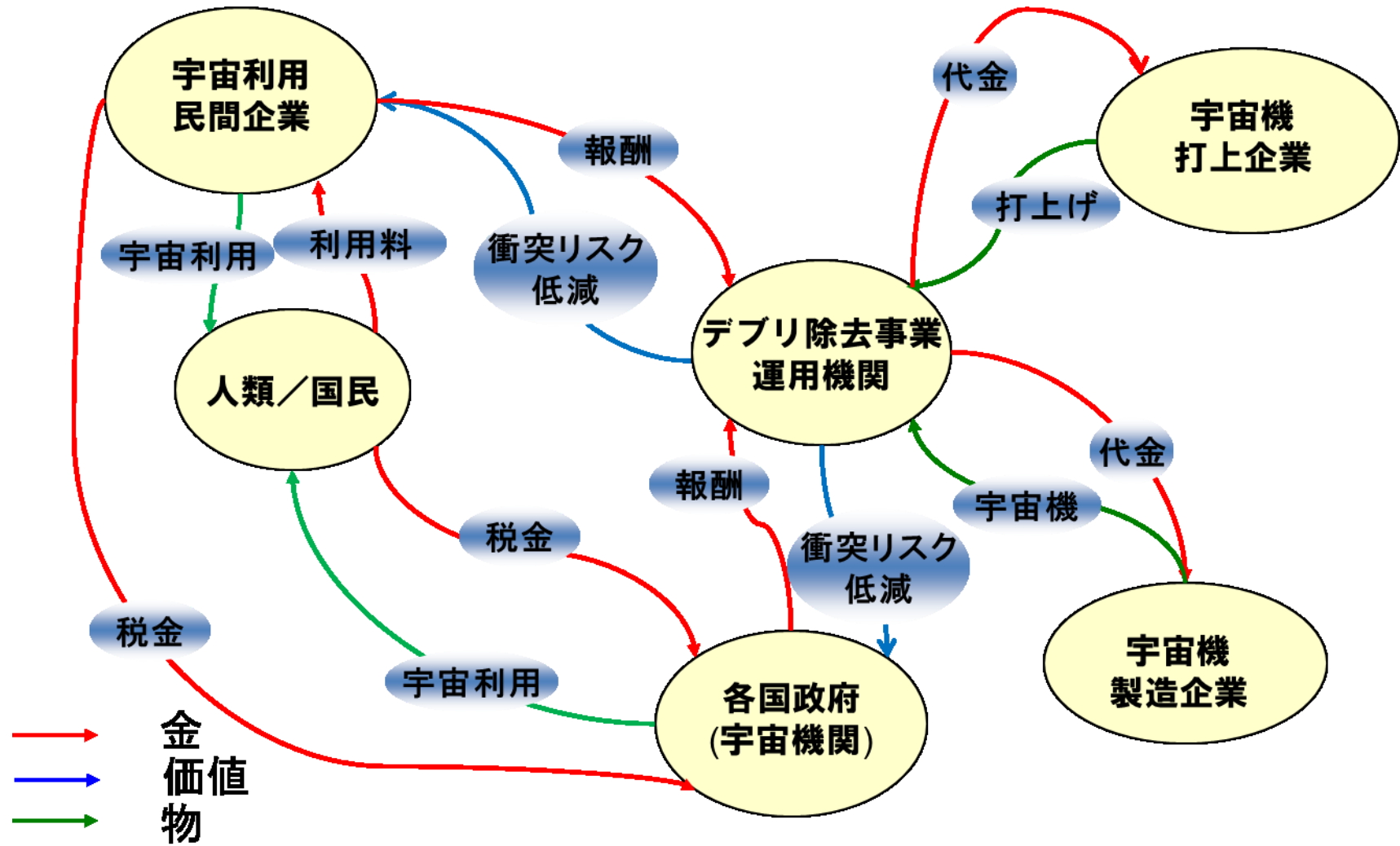


図 2-4 ビジネスモデル 2 の Customer Value Chain Analysis

[筆者作成]

以上、本章をまとめる。

能動的デブリ除去の運用を、技術、法律、運用の仕組みの三つの視点から分析した。技術は、様々な能動的デブリ除去の方式が検討され、それぞれ課題が識別されている。今後、軌道上実証を経て実用へ進むと考えられるが、デブリの情報授受／管理はデブリ除去ミッションの成否に影響する。

法律では、運用に当たって必要な手続きや、運用に関わる関係者間で合意しておく事項が識別された。特に能動的デブリ除去での第三者賠償責任は、賠償金の分担も含めた調整が必要である。

運用の仕組みは、能動的デブリ除去のビジネスモデルを構築して、CVCA を使って分析した。宇宙環境保全という地上では理解が難しい価値提供に対しての資金調達が課題であることが明確となった。

三つの視点からの分析により、デブリ情報授受／管理、第三者賠償責任、資金調達の課題が識別された。

第3章 国際枠組み分析

第2章で能動的デブリ除去の運用の課題を整理したが、本章では宇宙分野を含めた類似の課題解決を図った組織を分析して、能動的デブリ除去の運用の仕組みに取り込む要素を洗い出す。

分析対象は、次の4つである。

海洋：タンカー座礁などによる油濁での賠償問題

大気：グローバルな気候の変動、温暖化問題

南極大陸：南極条約による統治問題

宇宙：INTELSAT 設立の経緯

能動的デブリ除去の運用の仕組みを設計する前に、課題を解決して運用の組織を構築した事例を分析する。

分析対象としては、次の4ケースとした。分析対象ケースは、宇宙と同じように人類全体に開かれた空間、つまり多くの人々が利用する、もしくは関わる領域として、海洋、大気、南極を選び、そこでのリスク事象として影響が大きいものとして選択した。また同じ宇宙領域では、国際機関として立ちあがったINTELSATを取り扱った。表3-1にリスクの観点で4ケースの比較を示す。各ケース、宇宙でのデブリ問題と類似性を持っていることが示されている。

表 3-1 分析対象ケースの比較

リスク	海洋	大気	南極	宇宙
内容	タンカー座礁などによる沿岸の油濁汚染問題	グローバルな温暖化気象問題	統治問題	デブリ問題
影響の空間的広がり	△(限定地域)	○	△(限定地域)	○
被害額の大きさ	○	○	△	○
社会生活への関わり	△(限定地域)	△(限定地域)	×	○
責任者の明確さ	○	△	○	△
解決への国の関与	×	○	○	○
解決への民間の関与	○	△	×	△

[筆者作成]

3.1 海洋：油濁賠償問題

海洋汚染とは、人間が海洋生物や人間に有害なものを、海へ投棄したり下水などから海へ流したりすることである。汚染の要因として、ゴミや産業廃棄物の投棄、座礁したタンカーからの石油の流出といった一時的なもの、工場や家庭からの排水、河川や大気から農薬などの化学物質が流れこむといった慢性的なもの多岐に亘るが、ここでは座礁したタンカーから原油が流出して、沿岸海域が汚染される事象を取り扱う。

1967年のリベリア船籍のトリーキャニオン号がドーバー海峡で座礁し、大量の原油がイギリスやフランスの沿岸に漂着し、大きな損害を引き起こした事故をきっかけに、海運業界に国際的な保険組合を結成して、油濁損害を補償しようという提案がされた。(引用[28])

政府間海事協議機関(Intergovernmental Maritime Consultative Organization : IMCO)により、1969年に「油による汚染損害についての民事責任に関する国際条約」が成立したが、これは船主に責任を問うものであった。(引用[29]) (注 3-1) 実際の汚染損害では、船主の補償責任限度額を上回ることが予想され、さらなる検討の結果、1971年に「油による汚染損害の補償のための国際基金の設立に関する国際条約」が成立し、荷主(石油受取人)による基金で損害を補償する制度が作られ、1978年に発効された。つまり、リスク発生(トリーキャニオン号の事故)からリスクへの対応制度の設立まで、10年近くの年月を要したことになる。

この長期に亘る国際調整の傍ら、国際石油資本(石油メジャー)は、石油消費増加に伴う石油の海上輸送の増加、タンカーの大型化により、油濁事故による損害の増大化に危機感を持っていた。そこで、石油メジャー主導の元、海運業界と石油業界とで、国際条約発効までの対処として、民間自主協定による油濁補償制度を発足させた。

その後も、過去の被害額を上回る大規模な油濁事故が発生し、それに対応して、補償制度も何度も見直しがかげられた。現在は、1992年の民事責任条約(The Civil Liability Convention : 92CLC)を基盤とし、船主や荷主の追加基金で補償するという仕組みになっている。図 3-1 に、現行の国際油濁補償体制(International Oil Pollution Compensation Funds : IOPCF)を示す。

図 3-1 で示されているように、IOPCF は 3 層構造になっている。第 1 層は、92CLC に基づく船主による基金、P&I 保険、第 2 層は 92 年基金条約に基づく、荷主(石油受取人)による基金、第 3 層は追加基金議定書に基づく、荷主(石油受取人)による基金(一部、船主による任意負担)である。(注 3-2)

また、IOPCF はタンカーからの石油流出時などには、裁判で加害者の判定が出ることを待たずに被害者を救済するという合理的な処理制度を有している。これは、一回の油濁事故を要因として、全世界的に石油の配給が滞ることを避けるために、石油メジャーが海運業界と石油業界との利害を調整した結果である。

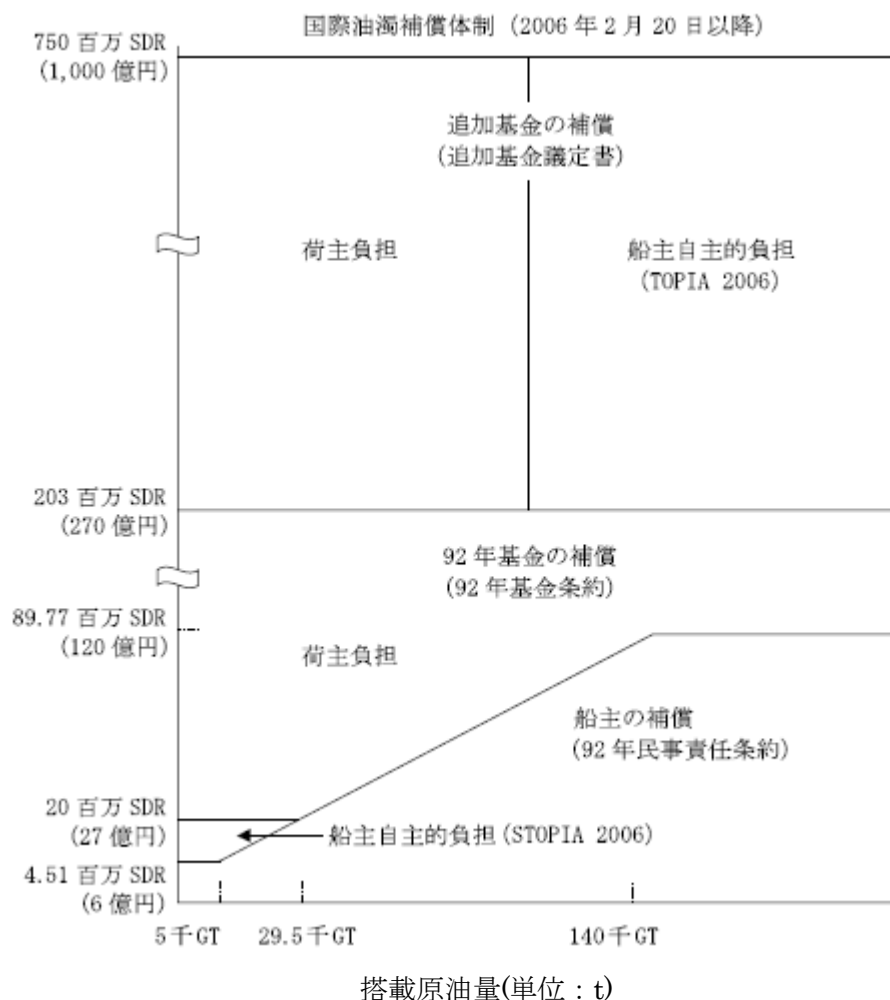


図 3-1 現行の国際油濁補償体制

SDR : Special Drawing Right

STOPIA : Small Tanker Oil Pollution Indemnification Agreement

TOPIA : Tanker Oil Pollution Indemnification Agreement

引用[29] 佐久間敬一 国際油濁補償制度について

http://www.umitonagisa.or.jp/pdf/88-3_kokusaiyudaku.pdf (石油海事協会)

IOPCF の特徴を、デブリによるリスクに当てはめてみる。

IOPCF が油濁除去と油濁による損害補償の費用に使われるように、能動的デブリ除去の実行に関わる関係者による「ADR 補償基金」を設立し、能動的デブリ除去の運用時のリスク、ADR 衛星とデブリとの衝突、またはデブリの地上落下による地表での衝突事故発生時の第三者賠償に使用するという体制を想定する。

能動的デブリ除去の運用自体の費用として充当しない理由は、次の二点による。

まず、IOPCF は、タンカーの事故から石油漏れが発生して海洋油濁が発生してからの作業にかかる費用を補填する一方で、デブリは ADR 補償基金の設立前から軌道上に存在しているため、能動的デブリ除去に係る費用に充当するのは適切ではない。

次に、デブリも、デブリになる前には目的（ミッション）が設定されており、そのミッション運用失敗のリスク対応は、何らかの制度(打上げ保険や軌道上不具合発生に対する保険など)で処置済みであると考えられる。したがって、デブリ化したことに対する対処作業＝能動的デブリ除去に対して、費用を充当するのは適切ではない。

ADR 衛星は能動的デブリ除去をミッションとし、ADR 補償基金は、能動的デブリ除去を遂行できなかったことによるリスクを補償する。基金出資者は、IOPCF に石油荷受人が加わったように、衛星やロケットの製造関係者だけでなく、衛星運用者、宇宙技術利用者も含めるようにする。基金への出資率は、各事業主の収益(国の宇宙機関の場合は、宇宙開発予算)に比して分担するものとする。

IOPCF に倣い「ADR 補償基金」を設立した場合、宇宙技術利用者への基金出資の動機付け(インセンティブ)の検討は必要であろう。油濁リスクに関しては、石油メジャーは、リスク処置後には、速やかに通常業務に戻りたいと考えており、IOPCF を設立して、リスクに備えることは、動機づけとなっている。

能動的デブリ除去に関しては、人工衛星の運用機関(または企業)にとっては、運用中の人工衛星のデブリとの衝突リスクの低下、それによりサービス提供の継続性確保が、ADR 補償基金への加盟の動機づけとなる。そのため、運用中の人工衛星がデブリと衝突して機能不全となった場合に打上げる代替の人工衛星に係るコスト(製造コスト及び打上げコストなど)に比して、ADR 補償基金への出資金が低いことが必要であろう。

表 3-2 に IOPCF と比較した ADR 補償基金の構成要素案を示す。

表 3-2 IOPCF と ADR 補償基金の対比

	リスク	用途	基金出資者	出資率
IOPCF	油濁	油濁除去にかかる費用 油濁による損害補償	船主と荷主 (石油受取人)	石油輸送量
ADR補償基金	ADR衛星とデブリとの衝突 デブリ除去に伴う 地表での衝突事故など	能動的デブリ除去ミッション 失敗による 第三者損害賠償	人工衛星所有者と 運用者	各事業主の収益 (国の場合は 宇宙開発予算)

[筆者作成]

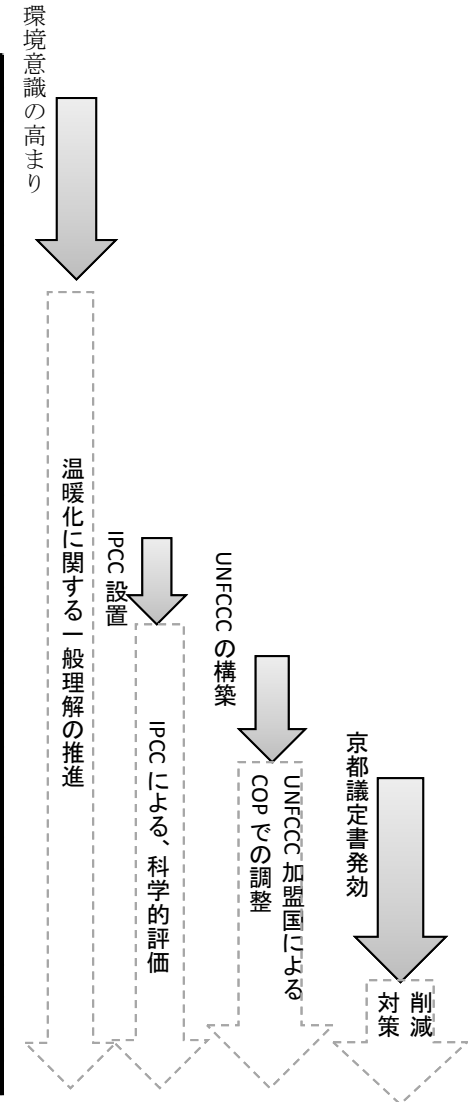
3.2 大気：地球温暖化問題

人類の産業活動により排出された人為的な温室効果ガスによって引き起こされた地球温暖化現象は、気温や水温を変化させ、海面上昇、降水／降雪量の変化を引き起こすと考えられている。降水量の変化により洪水や旱魃が誘発され、酷暑や台風／ハリケーンの規模を増大化させるなどの激しい異常気象を起こす危険性がある。さらに、生態系への影響も出て、絶滅を引き起こす可能性もある。地球全体の気候や生態系に大きく影響するリスクが警告されている。

温室効果ガスが地球の気候を変化させる可能性については、19世紀後半に既に指摘されていた。しかし、当時は環境問題への意識が低く、こういった科学的な分析結果が広く世間に知られることはなかった。20世紀に入り、公害による健康被害などが起き、環境問題への関心が高まる一方で、科学分析手法も向上して、地球の気候に関する理解は進んできた。1988年に、世界気象機関(World Meteorological Organization : WMO)と国連環境計画(United Nations Environment Programme : UNEP)の共同で、気候変化の科学的な分析と判断基準の提案を目的とした、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC)が設立された。1992年には、気候変動枠組条約(United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC)が採択され、温暖化問題への取り組みの仕組みが整った。UNFCCCは、気候変動枠組条約締約国会議(Conference of the Parties : COP)を開催したりして、国際的に地球温暖化問題を協議している。地球温暖化への取り組みの経緯を表 3-3 に、組織関係を図 3-2 に示す。

表 3-3 地球温暖化への取り組みの経緯

年代	出来事
1970	1972 ストックホルムで国際連合人間環境会議開催(地球規模で行われた初めての環境問題の会合) ・国際連合環境計画(United Nations Environment Programme : UNEP)が設立
	1979 ジュネーブで第1回世界気候会議開催 ・世界気候計画(World Climate Programme : WCP)が採択
1980	1985 フィラハで「気候変動に関する科学的知見整理のための国際会議」開催 ・科学者による地球温暖化に関する初の国際会議 ・21世紀前半に地球の平均気温の上昇が人類未曾有の規模で起こりうるとの声明を発表
	1988 トロントでカナダ政府の呼びかけにより、変化する地球大気に関する国際会議開催 CO2排出量を2005年までに1988年比20%削減する事を提案 気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)発足
1990	IPCC第1次評価報告書公表
	1990 ジュネーブで第2回世界気候会議開催 気候変動に関する枠組条約交渉会議が設立
	1992 リオ・デ・ジャネイロで環境と開発に関する国際連合会議(地球サミット)開催 ・気候変動枠組条約(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)採択
1997	京都で第3回気候変動枠組条約締約国会議(Conference of the Parties 3 : COP3)開催 ・京都議定書議決 ・京都メカニズムの導入
	2001 マケラシュでCOP7開催 ・京都議定書の運用細則を定めたマラケシュ合意が採択 ・議定書批准が促進
2000	2005 京都議定書の発効



宇宙デブリ除去運用のための
国際枠組みアーキテクチャの構築

3. 国際枠組み分析

[引用[30]記述に基づき筆者作成] 引用[30] 松橋隆治 京都議定書と地球の再生 日本放送出版協会

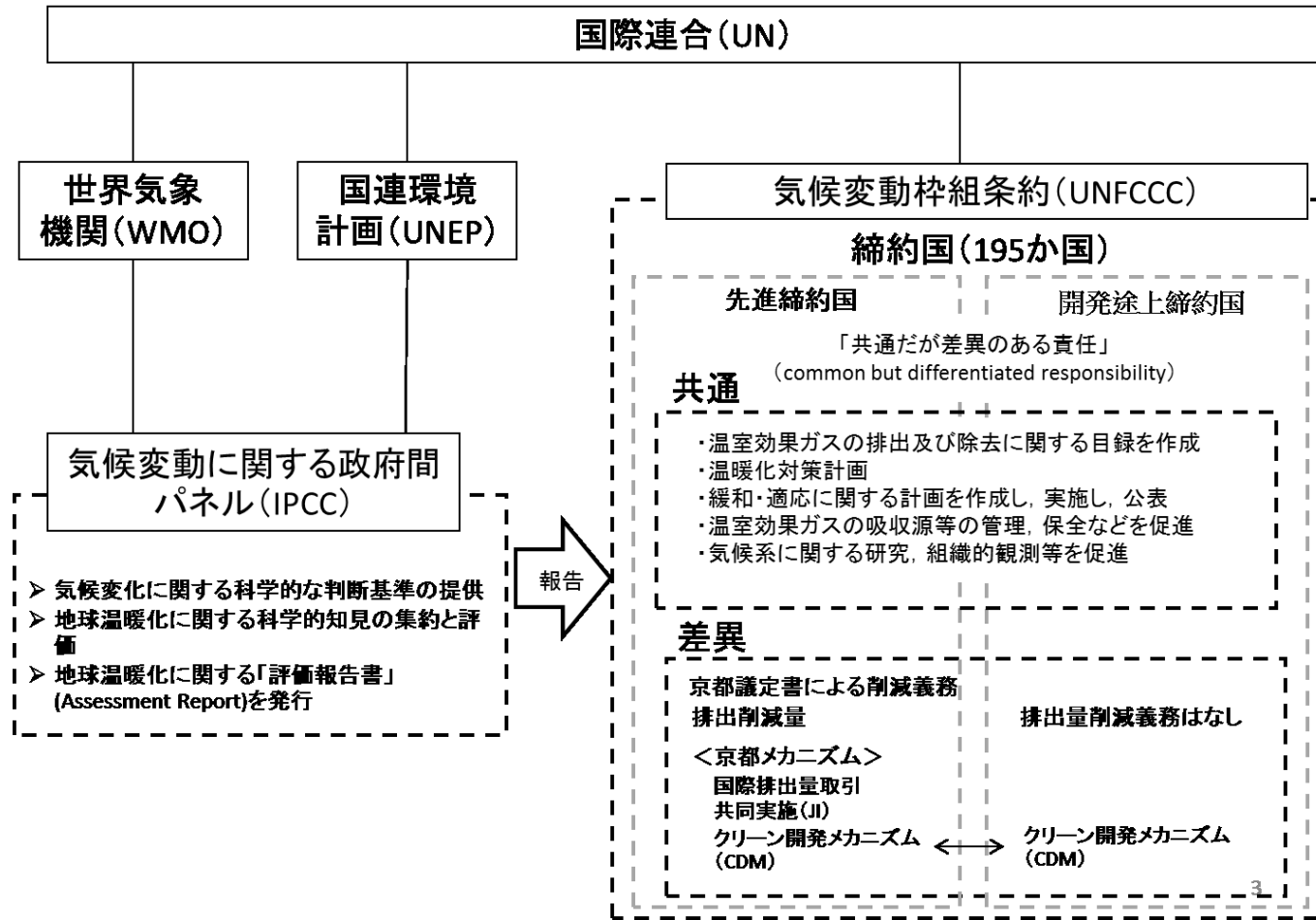


図 3-2 地球温暖化組織関係図

[引用[31]および引用[32]に基づき筆者作成]

引用[31] IPCC ホームページ <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>

引用[32] UNFCCC ホームページ <http://unfccc.int/2860.php>

京都議定書とは、1997年に、京都で開かれたCOP3で採択された、気候変動枠組条約に関する議定書である。以下、京都議定書の特徴である京都メカニズムを示す。(引用[33])

京都メカニズムとは、国内での絶対的な温室効果ガスの排出量削減活動以外に、国外での排出量削減活動／削減量の国家間取引／植林活動などを取込み、温室効果ガス削減活動をより活発にしようとした仕組みである。クリーン開発メカニズム／排出量取引／共同実施／吸収源活動などの具体的な施策で構成されている。

クリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism : CDM)とは、先進国が開発途上国に温室効果ガス排出削減の技術提供や資金援助の支援を行うことで、その開発途上国が温室効果ガス排出量を削減、または吸収量を増加させることができた場合、削減できた排出量の一定量を先進国の温室効果ガス排出量の削減分として充当することができる制度である。先進国にとっては国内での排出量削減活動への投資が、国外での排出量削減活動につながり、開発途上国は、先進国からの技術提供や資金援助が加速されるという効果が期待されていた。

排出量取引(Emissions Trading : ET)は、下記 4 種類の温室効果ガス量を取引する制度である。

- ・ 国に割当てられた排出枠(Assigned Amount Unit : AAU)
- ・ 吸収源活動による吸収量 Removal Unit : RMU) -
- ・ 共同実施で発行されるクレジット(Emission Reduction Unit : ERU)
- ・ CDM で発行されるクレジット(Certified Emission Reduction : CER) -

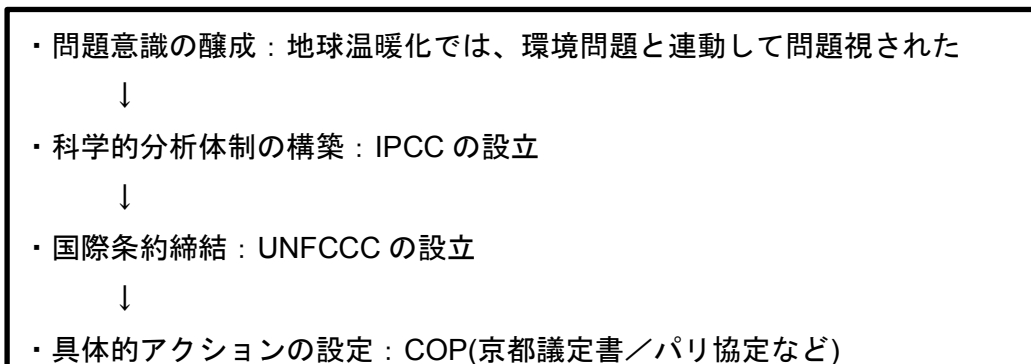
温室効果ガス排出量の削減技術を確立した国は、排出量が売れることを期待して、更なる排出活動を行い、排出枠を越えてしまった国は、こういった国から越えた分を買い取るという循環が期待されていた。

共同実施(Joint Implementation : JI)とは、出資国が温室効果ガス削減事業を実施しようとする国に出資して、そこで達成した削減量、ERU を取引する制度である。

吸収源活動とは、植物は温室効果ガスを吸収するという考えで、植林活動を温室効果ガス排出量削減に換算し算入するものである。逆に、森林が都市化／農地化などで失われた分は排出量増加として、同様に換算算入される。

地球温暖化問題への取り組みおよび京都議定書のメカニズム設計の経緯から、以下が読み取れる。

地球温暖化問題に関わる組織の設立の流れは、以下のものであった。問題意識の醸成により、国際枠組みが立ち上がり、そこで具体的な施策を制定した。国際問題では、枠組みなくして、問題は議論されない。枠組みが構築されると、そこで議論が生まれ、具体的な施策を制定する場となる。したがって、枠組み構築が重要である。



次に、国の(経済/政情)状況が重要要素となり得る点である。京都議定書の採択当時は、開発途上国と見なされていた中国／インドは、温室効果ガス削減が課せられなかった。国家を先進国と開発途上国と識別して義務に差別化を加味していることは、国家間で平等に締結される国際条約としては珍しいと、米本が指摘している。(引用[34]) 先進国は、温暖化効果ガスの排出積算量に基づいて、国の削減量が定められた。一方、発展途上国と見なされた中国／インドに関しては、削減義務が課せられず、その後の経済成長により、大量に温室効果ガスを排出し、先進国から非難を浴びた。中国／インドが開発途上国と見なされていたため、京都議定書の採択を容易にしたとも考えられるが、温室効果ガス削減活動には効果がなかったことになる。パリ協定においても、アメリカの政権交代に伴いアメリカは離脱宣言が出した。参加国の経済／政情などに柔軟に対応できる仕組みが必要である。

京都メカニズムのETは、削除義務のない国にとっては、単純な収益事業となってしまう。地球温暖化を引き起こした国への動機づけとなるように、削除義務のある国間での取引と限定することで、単なる収益事業にはならない構造とした。

また、科学的評価組織と実施組織とが独立性を保っている点が有効に働いている。これも米本が指摘しているが、IPCCによる自然科学の専門概念が、COPでの具体的施策の基礎概念となっている点は珍しい。IPCCの位置づけは国際的な専門家をつくる、地球温暖化についての科学的な研究の収集、整理のための学術的機関であり、COP事務局からは独立している。COP体制へのさまざまな批判があるにも関わらず、IPCCの評価自体には、批判が少ない。IPCCが独立して研究を推進していること、特にCOPと独立していることが要因と考える。

地球温暖化問題を取り扱う機関の設立の過程、機関間の関係性を、能動的デブリ除去を運用する仕組み、および仕組みの中の機関に当てはめる。

国際的な問題意識の醸成を進めることは、仕組みの構築の一助となる。仕組みが構築されると、そこは国際問題の議論の場となり、議論の中から具体的な施策が生まれる。したがって、まずは能動的デブリ除去の運用の仕組み構築を諮るべく、国際的な問題意識高める活動を推進する。

国家主導で宇宙開発が行われること、宇宙技術が国家の安全保障に深くかかわっていることも考慮すると、能動的デブリ除去の運用を扱う機関が国際機関となるべきことは当然として、機関の中で、主権国家間の立場に差異を付けることは好ましくないとも考えられる。また、能動的デブリ除去の継続した運用を目指すならば、国家の経済状況／政情を理由に離脱されないような仕組みである必要がある。一方で、デブリの由来などから宇宙環境問題への責務量を考慮し、公平性を生み出す姿勢も必要と考える。

能動的デブリ除去の具体的な施策の根拠として、デブリ問題を科学的に分析する中立組織からの提言が望まれる。デブリの状況を科学的に評価する研究機関を、能動的デブリ除去を運用する機関とは独立した組織として構築し、その分析結果の信頼性を確保する。

表 3-4 に地球温暖化対策からの教訓のデブリ問題への適応をまとめる。

表 3-4 地球温暖化対策からの教訓の適応

	国際問題意識	国家の責任	課題の科学分析
地球温暖化	環境問題と連動して地球温暖化が問題視され、各機関の設立の流れとなった	先進国と発展途上国との責任の差異をつけたことにより、国単位で進める対策の非難、条約からの脱退表明などを誘発した	COPと独立したIPCCが分析しCOPへの提言を行う
デブリ	国際問題としての議論の醸成を諮る	主権国家は平等に扱う	デブリを含む宇宙環境を科学的に分析する専門組織を構成する 専門組織は、能動的デブリ除去を運用する組織とは独立性を保つ

[筆者作成]

3.3 南極大陸：南極条約

1959年に採択された南極条約(Antarctic Treaty : AT)とその関連条約、議定書と勧告とで構成される法的枠組みは、南極条約体制(Antarctic Treaty System : ATS)と呼ばれ、南極に関わる様々な国際問題を管理している。

20世紀以前は、厳しい気象条件のため南極大陸は未踏の地であった。しかし、技術の発達と共に永住の可能性が出てきた。実際、1957年から始まった第3回国際地球観測年(International Geophysical Year : IGY)以降、参加国は長期滞在をして観測作業を実施するようになった。同時に、南極大陸の領土権を主張する国が出てきた。こういった状況の中で、南極大陸に関する何らかの取り決めをするべきという流れが出てきた。(引用[35])

IGYに参加し、かつ南極大陸での活動に先行していたイギリス、フランス、アルゼンチンなどは領土権を主張し、日本、ベルギーなどは領土権を否定した。長い議論と微妙な交渉の結果、南極大陸を科学調査のための保護区として維持し、自由な科学調査活動を保証し、一切の軍事活動を禁じるという内容で調整された。

第二次世界大戦の経験から、紛争のない平和な場所として南極を維持し、純粋に科学観測活動を行おうという機運に加えて、IGYが南極条約締結を加速させたとも言える。一方で、純粋に科学観測活動を行うための条約ではなく、領土権については「凍結」(領土権に関する紛争を「凍結」とする解釈も有力である)して科学観測活動を優先させた内容である。以下、南極条約第4条から引用するが、そこからは領土権について、南極条約締結国だけでなくそれ以外の国も、留保していることが読み取れる。

<南極条約第4条>(引用[36])

- 1.この条約のいかなる規定も、次のことを意味するものと解してはならない。
 - (a)いずれかの締約国が、かつて主張したことがある南極地域における領土主権又は領土についての請求権を放棄すること。
 - (b)いずれかの締約国が、南極地域におけるその活動若しくはその国民の活動の結果又はその他の理由により有する南極地域における領土についての請求権の基礎の全部又は一部を放棄すること。
 - (c)他の国の南極地域における領土主権、領土についての請求権又はその請求権の基礎を承認し、又は否認することについてのいずれかの締約国の地位を害すること。
- 2.この条約の有効期間中に行なわれた行為又は活動は、南極地域における領土についての請求権を主張し、支持し、若しくは否認するための基礎をなし、又は南極地域における主権を設定するものではない。南極地域における領土についての新たな請求権又は既存の請求権の拡大は、この条約の有効期間中は、主張してはならない。

12 カ国が締結した南極条約の下で、観測活動などが行われてきたが、1980 年代に入ると、ATS は排他的フォーラムである(a “closed-door” system)と批判を受けるようになってきた。(引用[37]) 当時は、南極条約締結の 14 国が協議国として協議国会議(Antarctic Treaty Consultative Meeting : ATCM)に出席し、討議内容を外部に知らせない状態で南極地域に適用される条約を交渉していた。協議国になるためには、南極条約第 9 条 2 項により「科学的基地の設置又は科学的探検隊の派遣のような南極地域における実質的な科学研究活動の実施により南極地域に対する自国の関心を示す」必要があった。(引用[36]) このような体制に対して、アンティグア・バーブーダなどは “the Treaty cannot be regarded as fair, it cannot be regarded as universal in character, nor can it be regarded as compatible with its declared objective of promoting “the interest of mankind” or “the progress of all mankind””と非難し、国連の加盟国全てが南極大陸に関する条約の調整に加わるべきであると主張した。(引用[38])

柴田は、こういった ATS 外部からの批判を受けて 1980 年以降に行われた ATS の制度改革を分析して、ATS は国際社会全体の利益になる法規範を形成する「正当性」を持つべきであり、その要素は、法形成会議体への参加(participation)と国際社会に対する説明責任(accountability)である、という結論に ATCM が到達したことに注目している。(引用[39])

ATS は、その法形成会議体、つまり ATCM への参加(participation)をオープンにするために、以下の 3 つの制度改革を行った。

- ・ ATCM への非協議国のオブザーバー参加

非協議国は、協議国会議本会議だけでなく、作業グループや準備会合、特別協議国会議などにも出席できるばかりでなく、議長の招待により発言もできる。ただし、意思決定には参加できない。

- ・ ATCM への関連国際団体のオブザーバー参加

南極問題に知識と関心を有する交際団体として、南極研究科学委員会(Scientific Committee on Antarctic Research : SCAR)と南極海洋生物資源保存委員会(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources: CCAMLR)をオブザーバーと指定し、ATCM への出席、作業文書の提出、会議での発言などを認めている。またその他の国際団体に関しても、全ての協議国の合意があった場合に、協議国会議開催国政府が招待状を發布してその団体の代表は専門家として、オブザーバー参加ができる。

・ 協議国資格取得基準の緩和

前述のように協議国になるためには、基地の設置完了や探検隊の派遣が必要であったが、これは高額な費用は勿論のこと、高い技術力がなくては達成できないため、一部の国に限られていた。批判を受けて、南極条約第9条2項が実際に改訂されたわけではないが、1980年代以降のインド、ブラジル、中国、ウルグアイの協議国資格取の審議に当たっては、基準の緩和が断行されたことが読み取れる。例えば、ブラジルは基地の建築計画と探検隊の南極地域への派遣のみで認められた。ウルグアイは、夏季稼働観測拠点の設置活動のみで認められた。

ATS は、会議文書公開、情報提供、さらに事務局を常設することで、国際社会に対する説明責任(accountability)果たそうとした。

事務局(Secretariat of the Antarctic Treaty)は、以下の機能を有する。

- ・ ATCM など関連会議の準備、開催、フォローアップ支援業務
- ・ 協議国間の情報交換、情報提供の支援、調整業務
- ・ ATS 関連の情報、資料、文書の収集、整理、維持、提供業務
- ・ ATS 関連の機関およびその他の関連団体との調整、連絡業務

会議文書公開、情報提供など説明責任が直接に寄与するのは自明のことであるが、事務局の常設が、ATSにとって重要な決断であったことについて、説明を補足する。

ATS が事務局を有していなかった背景には、南極条約の当初の締結国の一部からの強い抵抗がある。前述のように南極条約は領土権を留保している。事務局設置は、南極地域に超国家的行政機構を設立し行政を行うという印象を与え、ひいては、統治＝領土権の発生という誤解に結びつくという主張があり、事務局設置は言及すらタブーであった。(引用[40]) しかし、ATS 体制への批判を受け、ATCM の透明性を示すためにも事務局設置の必須との考えが協議国の間で共有され、設置に至った。

南極条約は、領土権を凍結して、科学観測活動実行を優先させた内容で締結された。以降、南極に関わる関係者が増えるに従い、国際社会の中で、南極条約の「正当性」を確立するために、法形成会議体への関係者の参加 (participation) と国際社会に対する説明責任 (accountability) という要素を取り込み、体制の変革を続けて、現在に至っている。

南極条約の事例は、能動的デブリ除去の運用を優先させるためには、過去のデブリに関わる責任問題などを凍結した条約も有効である可能性を示している。

能動的デブリ除去の運用の正当性を国際社会で確立するためには、能動的デブリ除去の運用を決定する会議体への関係者の参加 (participation) と国際社会に対する説明責任 (accountability) を持つ必要がある。能動的デブリ除去を運用する組織は、ATS にならい、能動的デブリ除去を運用する組織の意思決定機関への関係者の参加を容易なものとし、能動的デブリ除去の運用に関わる活動報告を公にするという機能を有するべきであろう。

表 3-5 に南極条約体制からの能動的デブリ除去運用の仕組みへの教訓をまとめる。

表 3-5 南極条約体制からの教訓の適応

	参加	説明責任
南極条約	ATCMへの参加条件を緩めた	会議文書公開、情報提供、事務局の常設
能動的デブリ除去運用	能動的デブリ除去を決定する会議体には加盟国が全て参加できることとする	能動的デブリ除去に関連する活動の報告文書の公開、事務局の設置

[筆者作成]

3.4 宇宙：INTELSAT

INTELSAT は 1964 年に発足した国際機関「国際電気通信衛星機構」が前身であり、設立当初は国際通信を非営利目的で運営していた。出資母体の経営統合や、民間衛星通信により安価な通信料実現により、1999 年に民営化が決まった。

注目すべきなのは、現在の INTELSAT の前身である国際電気通信衛星機構の発展の経緯である。国際電気通信衛星機構の設立の流れを、表 3-6 にまとめる。(引用[41])

表 3-6 国際電気通信衛星機構設立までの経緯

1962	アメリカ/NASAが通信放送衛星テルスターを打上げ、パリ～アメリカに向けてのテレビ放送の実験を成功させる。
1963	アメリカで通信衛星会社COMSAT(Communications Satellite Corporation)が設立される。 通信衛星法(Communications Satellite Act of 1962)に基づいて設立された民間会社である。 ボードメンバーも、当時のケネディ大統領が任命している。 設立目的は、国際通信衛星システムの実現であった。
1964	アメリカ、日本など11か国と140ヶ国以上の通信事業者が出資して国際機関「国際電気通信衛星機構」(INTELSAT)が発足した。COMSATは61%の出資をしていた。
1971	「国際電気通信衛星機構(インテルサット)に関する協定」が採択される
1973	INTELSAT発足

[筆者作成]

1964 年から INTELSAT が 1973 年に発足するまでを暫定制度での運用と呼び、1973 年からは恒久制度での運用と呼ばれている。

1964 年、アメリカ主導で世界的な通信衛星システム設立への協力を各国に呼びかけ、16 か国によって世界的な通信衛星事業について話し合いが開始された。交渉において、特に米国／欧州諸国間に、組織の構成／運営の問題について意見が分かれたが、宇宙技術を早期に取り入れて、世界電気通信網の改善に役立てることが先決であるという判断の下、とりあえず国際協力体制を発足させ、暫定制度として衛星通信システムの運用が始まった。経験を得た上で恒久的制度への移行を検討することとした。

暫定制度の下で、1968 年に 3 機目の衛星の打ち上げを実施し、目標のグローバル衛星システムを完成させた。これに対応する各国地球局の整備、充実も目覚ましく、1973 年には 48 か国に 78 基のアンテナが設置され、インテルサット衛星を利用して通信を行っている。

暫定制度から恒久制度に移行する期間中に、議論となった点として、アメリカの優位性、先進国と開発途上国との技術面での対立、国際レベルによる規制と事業の効率的運営との両立などがある。これらは、1971年の協定採択まで議論されたが、暫定制度発足時の11か国だけでなく77か国が議論に参加したことは、多くの国が通信衛星システムの重要性を認識していたことを示している。

つまりINTELSATは、先進国と開発途上国を含め全ての国民が、同等の条件で衛星通信の利用が可能になることを優先させて、暫定制度の下で発足した組織であると言える。暫定制度で運用の経験を積みながら、具体的な方策を構築していった。

こうした動きは、地球温暖化問題、南極条約でも見出されている。地球温暖化問題では、UNFCCCという国際枠組みを構築してから具体的方策を議論している。南極条約はIGYでの科学観測活動を優先させるため領土権については「凍結」させた形でATSが発足した。INTELSATも先進国と開発途上国との対立など議題をかかえながらも、世界的な電気通信網の立ち上げを優先させた暫定制度の下で発足している。

INTELSATを含め、国際的な枠組みの発足の経緯からは、段階的に構築するプロセスの有効性が見出される。

3.5 事例からの教訓

海洋、大気、南極大陸、宇宙に関する事例を分析して、能動的デブリ除去の運用の仕組みへの取り込みを検討すべき教訓を得た。表 3-7 に、各事例の分析結果を総括する。

教訓を取り込んだ能動的デブリ除去の運用の仕組みの概念を、以下にまとめる。

国家主導で宇宙開発が行われており、また宇宙技術が国家の安全保障に深くかかわっていることから、能動的デブリ除去の運用は、国際機関によって行われると考える。

まず、世界規模で宇宙環境保全の問題意識の共有を図り、国際枠組み構築の必要性の機運を生み出す。

構築される国際枠組みが持つべき特性は、以下のようまとめられる。

- ・ 能動的デブリ除去の運用の正当性を国際社会が認めていること

そのためには、国際枠組みの中では、能動的デブリ除去の運用を決定する会議体に、関係者は制約なく参加することができ、また会議内容、能動的デブリ除去運用の結果を、枠組みは国際社会に対して説明する必要がある。

- ・ 国際枠組みの中で、加盟国家は互いに同等の責任を有すること
- ・ 科学的な知見に基づく能動的デブリ除去の具体的な施策提言を受けること

国際枠組みから独立した組織が、宇宙環境を科学的に評価し、能動的デブリ除去の具体的な施策への提言を作成する。

能動的デブリ除去の実行を推進する仕組みとして、国際枠組み関係者から広く基金を募り、「ADR 補償基金」を設立する。この基金は、能動的デブリ除去ミッションに関わる第三者賠償を拠出するもので、技術的な課題の残る能動的デブリ除去ミッションへの挑戦を促進する目的がある。

また国際枠組みは、段階を経て構築されるものであり、具体的な施策の実施や国際枠組み内での議論を反映して改革することも容認する。

表 3-7 リファレンスモデル分析 (1/2)

枠組み	油濁補償	地球温暖化	南極条約	INTELSAT
構築経緯	【事故発生→国際取組】 油濁事故の発生を受け、国連が動いた。タンカーの大型化に伴い、被害影響が拡大したことも一因である。	【研究→国際取組】 環境悪化問題を科学者が報告書にまとめて、国連が条約締結に動いた。	【技術／研究→条約締結】 科学観測の実行を優先させて関係国が条約締結に動いた。	【技術→ビジネス】 通信技術確立により世界電気通信網の改善の目的で国際組織を立ち上げた。
レベル	国際レベル (百数10ヶ国)	国際レベル (195カ国以上)	限定された 国際レベル (60ヶ国程度)	国際レベル (百数10カ国)
関連法	油濁補償基金条約	気候変動枠組条約(COP)	南極条約	政府間協定 暫定協定 →恒久協定

[引用[42]記述に基づき筆者作成] [42] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

表 3-7 リファレンスモデル分析 (2/2)

枠組み	油濁補償	地球温暖化	南極条約	INTELSAT
活動主体	各国(実質的には船主・荷主)	各国	協議国	国際共同事業体から政府間国際組織へ
コスト	各国(実質的には船主・荷主)の拠出金	各国独自出資尚、2国間の資金分担調整可	各国負担(国庫)	関係国の分担金、及び、INTELSAT所有財産の使用料
現況	運用フェーズ	開発途上 1994年の条約制定から19回の締約国会議を実施。	レベル変更に伴い内部構成変革中	設立より約30年後に民営化に移行し、運用中

[引用[42]記述に基づき筆者作成] [42] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

以上、本章をまとめる。

海洋、大気、南極大陸、宇宙に関する事例を分析して、能動的デブリ除去の運用の仕組みが取り込むべき教訓を得た。

能動的デブリ除去の運用の仕組みは、国際機関となるが、その構築の過程は、宇宙環境保全の問題意識の共有から国際枠組みをスタートさせ、段階を経て構築を進める。

国際枠組みの特性は、次のものがある。

- ・ 能動的デブリ除去の運用の正当性を国際社会が認めていること
- ・ 国際枠組みの中で、参加国家は同等の責任を有すること
- ・ 科学的な知見に基づく能動的デブリ除去の具体的な施策提言を受け入れること

「ADR 補償基金」を設立し、技術的な課題の残る能動的デブリ除去ミッションへの挑戦を促進する。

注記

注 3-1 : IMCO は、1982 年に改称し、現在は国際海事機関(International Maritime Organization、IMO)となっている。

注 3-2 : P&I とは Protection & Indemnity (保護&補償)の略称であり、P&I 保険は船舶の所有、賃借又は運航に伴って生ずる船主責任を対象とする。

19 世紀中頃にイギリスの海上保険はイギリス議会の特許を得た保険会社 2 社とロイズ保険者の独占状態であり、船主は不利な条件と高い保険料を課されていたため、船主は自衛上、営利を目的としない相互船体保険組合を設立した。これを母体として、P&I 保険が作られた。

第4章 能動的デブリ除去運用システム設計

能動的デブリ除去の運用の仕組みを、システムズエンジニアリング手法に基づき以下の手順で設計し、能動的デブリ除去運用システムを構築する。

要求分析：能動的デブリ除去に関する要求を分析して、能動的デブリ除去の運用の仕組みへの要求仕様を定義し、また仕組みの範囲を明確にする。

機能設計：仕組みへの要求機能を分析して、より詳細化する。

物理設計：詳細化された機能を、仕組みの構成要素に配分する。

宇宙環境保全への有効性が示された能動的デブリ除去を持続的に運用する仕組みをシステムズエンジニアリング手法に基づき設計する。能動的デブリ除去の運用の仕組みへの要求をデブリの状況から分析し、仕組みへの機能要求を整理する。続いて、その機能を仕組みの構成要素に当てはめながら、能動的デブリ除去運用のアーキテクチャを設計する。

一般的に、システムズエンジニアリング手法は、大規模システムの開発プロジェクトを効率的かつ円滑に進めるために用いられるもので、プロジェクトの最上位の目標から、要求を設定し、その要求を細分化／整理して、システムの構成要素(サブシステム)に要求配分／機能展開を行うというプロセスを段階的に行い、開発を効率的に進めるものである。細分化されたサブシステムを順次くみ上げることで、目標とする大規模システムが完成する。

また要求配分／機能展開の段階において、個々の構成要素への要求展開のみならず、各構成要素間インタフェース(内部インタフェース)や外部要素とのインタフェース(外部インタフェース)を調整しながら設計を進めないと、システム構築に失敗する。

本章は、能動的デブリ除去の運用の枠組みという組織をシステムとして捉え、組織構築にシステムズエンジニアリング手法を取り入れようとするものである。

4.1 要求分析では、最上位目標である宇宙環境保全への有効性が示された PMD と能動的デブリ除去への要求を 2 章で能動的デブリ除去の運用に関して抽出された課題の対処も含めて整理し、設計対象となるシステム＝能動的デブリ除去の運用の枠組みの範囲を明確化する。

4.2 機能設計は、能動的デブリ除去の運用の枠組みが有すべき機能を、サブシステムに配分する。4.3 物理設計では、国際枠組みとしての組織を設計する。

4.1 要求分析

1章でデブリによるリスクの発生の可能性が高くなってきており、宇宙環境保全が必要であること、有効な対処方法として、廃棄運用(PMD)や能動的デブリ除去があることを示した。

図 1-3 の赤線は 2011 年時点での打ち上げ予測と、90%の達成率で PMD が行われるという前提での低軌道でのデブリの数予測である。青点線／緑線は赤線の条件に加えて、能動的デブリ除去を年間 2 回／5 回で実施した場合のデブリの数予測である。したがって、PMD の達成率 90%および 5 回／年の能動的デブリ除去実施が実現するならば、低軌道のデブリの数はほぼ 2011 年の状態を維持可能という予測が得られている。ただし、1章で示したその他の宇宙環境の状況に基づけば、打上げ予測およびデブリの数は 2011 年時点より多くなっていると予測される。したがって、PMD の達成率 90%および 5 回／年の能動的デブリ除去実施は、デブリの数増加抑制に対する、ほぼ絶対条件であると言える。

以上より、デブリの数増加抑制に対する要求は、次のようになる。

- ① PMD を 90%以上の軌道上物体が満足すること。
- ② 能動的デブリ除去を年間 5 回以上で実施すること。
- ③ ①②を持続的に実施すること。

- ① PMD を 90%以上の軌道上物体が満足すること。

運用終了後の衛星／ロケット等に対して、IADC の制定したデブリ低減ガイドラインや、国宇宙空間平和利用委員会(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space : COPUOS)のスペースデブリ低減ガイドラインには PMD を行う要求が記述されている。宇宙先進国は、この要求を取り込んでいる。表 4-1 に IADC の、表 4-2 に COPUOS のデブリ低減ガイドラインの運用終了後の廃棄要求を示す。(引用[43])(引用[44])

実際の遵守状況であるが、2002-2004 年の静止軌道では 40%、2000-2014 年の世界のロケット及び人工衛星で 63%という調査結果が出されている。また、推進系を有しない人工衛星では PMD の実施は難しい。(引用[17]) (引用[45])

したがって、PMD90%以上の要求は実現困難である。

表 4-1 IADC デブリ低減ガイドラインでの PMD 要求 (1/2)

5.3 運用終了後の廃棄

5.3.1 地球同期軌道域

ミッションを終了した宇宙機は、静止軌道上の宇宙システムと干渉を起こさないように十分遠くに移動させること。全ての軌道摂動効果を考慮して定めたりオービット完了時点での近地点高度の最小上昇高度の推奨値は、

$$235 \text{ km} + (1000 \cdot \text{CR} \cdot \text{A/m})$$

ここで、

CR: 太陽輻射圧係数 (典型的には 1 ~ 2 の間である。),

A/m: 乾燥質量に対する有効面積 [m²/kg]

235 km: GEO 保護域 (200 km) と月・太陽と重力による摂動効果による最大高度変化量 (35 km) の和

である。

静止衛星の推進システムは、衛星から分離しないように設計すること。分離せざるを得ない理由が有るならば、推進システムは、地球同期軌道保護域の外側で、かつそれと接触しない軌道に放置するように設計すること。推進システムは、分離されるか否かを問わず、無害化できるように設計すること。

運用者は、打上げロケット軌道周回機体と地球同期軌道域との永久的あるいは周期的接触を避けること。

引用[22] IADC Space Debris Mitigation Guidelines

http://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Deb- ris-Guidelines-Revision1.pdf

表 4-1 IADC デブリ低減ガイドラインでの PMD 要求 (2/2)

5.3.2 低軌道域を通過する物体

可能であれば、LEO を通過する軌道あるいは LEO と干渉する恐れのある軌道で運用を終了した宇宙システムは、デオービット（直接再突入が望ましい）させるか、軌道寿命が短い軌道に移動させること。回収は、もうひとつの廃棄手段である。了承し得るノミナルな太陽活動を前提として大気抵抗が軌道寿命を制限する（と予測される）軌道にミッション終了後のシステムを放置すること。運用終了後の軌道寿命の制限値が衝突率やデブリ数の成長に与える影響が IADC で研究されてきた。この IADC の研究や幾つかの既存の国家的ガイドラインでは、25 年が合理的で妥当な寿命制限であると見なしてきた。もし、宇宙システムを大気圏再突入で処分する場合は、地球表面に到達するデブリについては、地上の人間及び財産に大きなリスクを与えないようにすること。これは、残存デブリを制限するか、海洋などの非居住区に制限することで達成できる。更に、搭載物に起因する放射性物質、毒性物質、その他の環境汚染物質によって引き起こされる地上の環境被害を防止するかまたは許容範囲内であると認められまで最小化すること。

宇宙システムの落下区域をコントロールする場合は、当該システムの運用者は、関連する航空路や航海路の責任機関に対し、再突入時刻、落下経路、関係する地上区域について通知すること。

5.3.3 その他の軌道

その他の軌道域でミッションを終了する宇宙システムは、もし高度に利用が進んでいる軌道域と干渉するならば LEO 軌道寿命制限と同等の軌道寿命に短縮するか、移動させること。

引用[22] IADC Space Debris Mitigation Guidelines

http://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debri-Guidelines-Revision1.pdf

表 4-2 COPUOS デブリ低減ガイドラインでの PMD 要求

ガイドライン 6 : 宇宙機やロケット軌道投入段がミッション終了後に低軌道 (LEO) 域に長期的に留まることの制限

LEO 領域を通過する軌道で運用を終了した宇宙機やロケット軌道投入段は管理された方法 (controlled fashion) で軌道から除去すること。それが不可能ならば、LEO 領域への長期的滞在(long-term presence)を避ける軌道に廃棄すること。

LEO から物体を除去する解決案を決断する際には、残存して地表に到達するデブリが、ハザードな物質による環境汚染を含む、人間や財産に不当なリスクを課さないことを保証するために十分な(due)な配慮が払われなければならない。

引用[23] Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space

<http://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS-GuidelinesE.pdf>

② 能動的デブリ除去を年間5回以上で実施すること。

能動的デブリ除去の実証を各国が進めているが、能動的デブリ除去実用時の目標回数情報は、共有されていない。また、国家主導で宇宙開発が行われていること、宇宙技術が国家の安全保障に深くかかわっていることから、能動的デブリ除去実行主体は国際機関であるべきであり、その国際機関の元で、能動的デブリ除去実行の回数分担を各国で調整して実施することが必要である。

③ ①②を持続的に実施すること。

各国独自で実施している場合は、各国の経済状況等によって、能動的デブリ除去運用が実施されない事態が起こりえる。②同様、デブリ低減活動を各国が協調して行えるように国際機関の下で活動できる枠組みが必要である。

以上より、能動的デブリ除去の運用への要求は、PMDの実施率が現実では90%を満足していないことを考慮して、「能動的デブリ除去を最大限(5回以上)継続的に行う」と要約できる。

2章では、能動的デブリ除去の運用において、いくつかの課題があることが識別された。これらの課題の対処方策を能動的デブリ除去の運用の国際枠組みへの要求とする。

●デブリの情報授受／管理

軌道上でのデブリの運動状態は、実際の観測によるが、能動的デブリ除去を成功させるためには、デブリの情報、形状、材質、機器配置などの情報が必須である。一般的に、宇宙技術が国家の安全保障に深くかかわっていることから、宇宙システムの情報は、機密秘密扱いであり、特に国をまたいでの情報授受は困難である。デブリの所有者と能動的デブリ除去の実行主体とが、同じ国家に属していても、別組織であれば、同様に情報授受は難しい。

また情報を開示する側も、情報管理および能動的デブリ除去終了後の情報処理にも保証を求めるであろう。

そこで、能動的デブリ除去の運用の国際枠組みの中では、国家から独立し、かつ国際社会から認められている実行主体が、能動的デブリ除去ミッションの遂行のために必要最小限のデブリの情報を、デブリ所有者から受け取り、能動的デブリ除去の実行する機関に、引き渡し、ミッション終了後、情報の回収を行うという機能を有することが求められる。

●第三者賠償責任

能動的デブリ除去ミッションに起因する第三者賠償責任が免除されることは、能動的デブリ除去の運用の国際枠組みへの参入しやすさにつながる。能動的デブリ除去の運用の枠組みの中では、能動的デブリ除去の実行主体が第三者賠償責任を取ることが要求される。

●資金調達

能動的デブリ除去の運用の国際枠組みは、能動的デブリ除去を実行することで提供する宇宙環境保全という価値に対しての対価を調達する必要がある。

デブリに関する活動の関係を、図 4-1 に示す。デブリに対しては、能動的デブリ除去以外にも、デブリの状況観測、デブリの発生低減活動、デブリ低減のためのガイドラインや法の制定などの活動が行われている。図 4-1 の中で、能動的デブリ除去運用のための国際枠組みは、デブリ除去という活動を、他の関係者を含めず実行できることが示されており、設計の対象は、図 4-1 の赤枠の範囲とする。

デブリ除去は、以下の流れで実行される。

除去対象のデブリを選定する
デブリ形状／軌道情報などを調査する
デブリの所有権を確認し、所有者と所有権譲渡の調整をする
除去を実行する
除去実行者を選定する
除去実行者には、能動的デブリ除去の費用が支払われる
除去実行者は能動的デブリ除去衛星(ADR 衛星)を調達する
除去実行者は ADR 衛星の打上げを調達する
除去実行者は、能動的デブリ除去を実行する。

この流れと並行して、能動的デブリ除去運用の活動は、宇宙条約や IADC や COPUOS のデブリ低減ガイドラインに即した活動であるかの監視が必要である。そのために、能動的デブリ除去の運用の国際枠組みの中で、「除去ルール」を制定し、適用する。

以上の活動を、図 4-2 に能動的デブリ除去のシナリオとして示す。

課題の対処方策、およびシナリオから、能動的デブリ除去の運用の枠組みの範囲および機能要求は以下の通りにまとめられる。

●範囲

能動的デブリ除去の実行に関わる活動

●機能要求

デブリ形状／軌道情報などを調査する

デブリの所有権を確認し、所有者と所有権譲渡の調整をする

除去対象のデブリを選定する

除去対象のデブリの情報を管理する

能動的デブリ除去を実行する

除去ルールを制定する

除去活動に除去ルールを適用する

能動的デブリ除去の実行主体が第三者賠償責任を取る

能動的デブリ除去の実行の費用を調達する

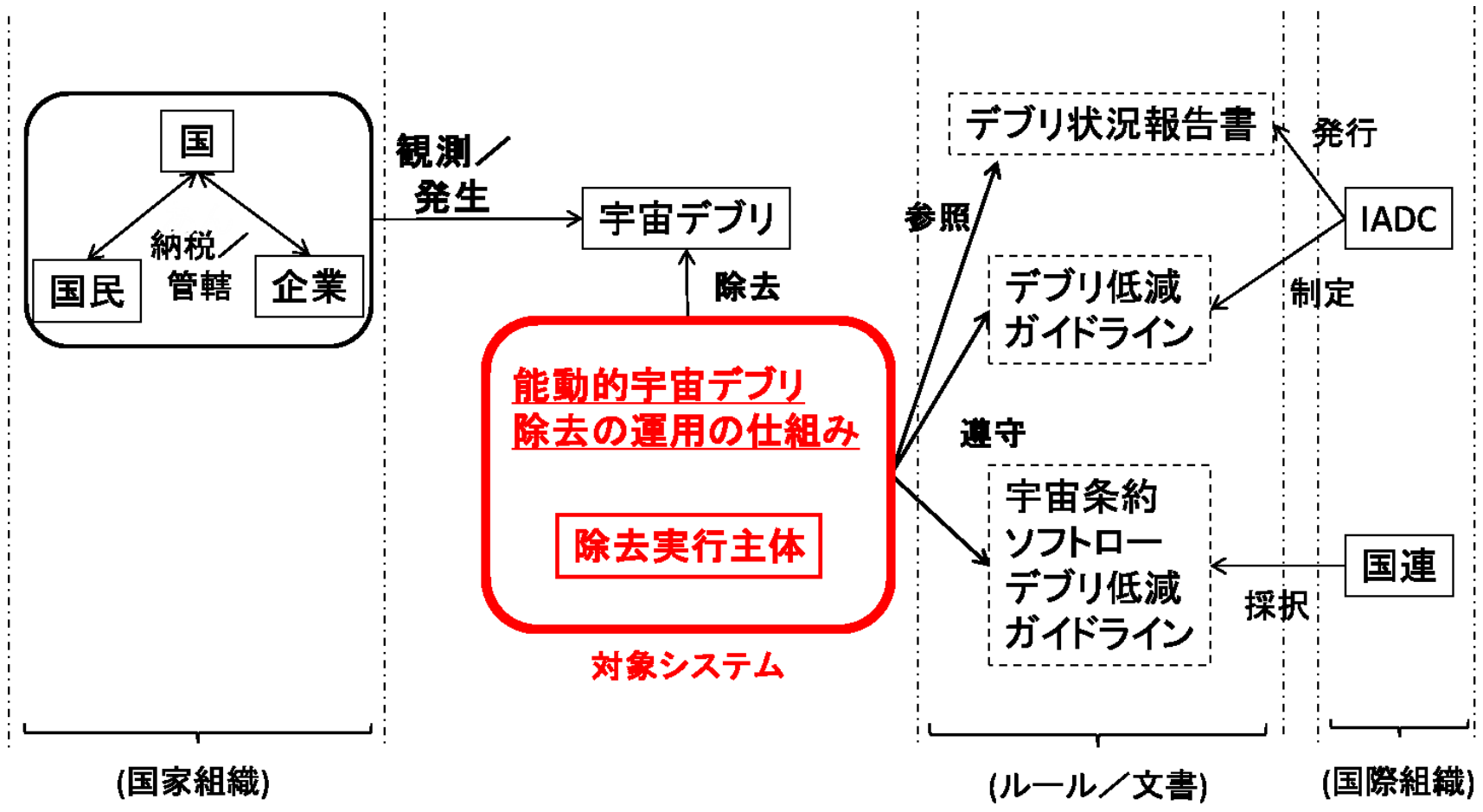


図 4-1 宇宙デブリに関する活動の関係

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

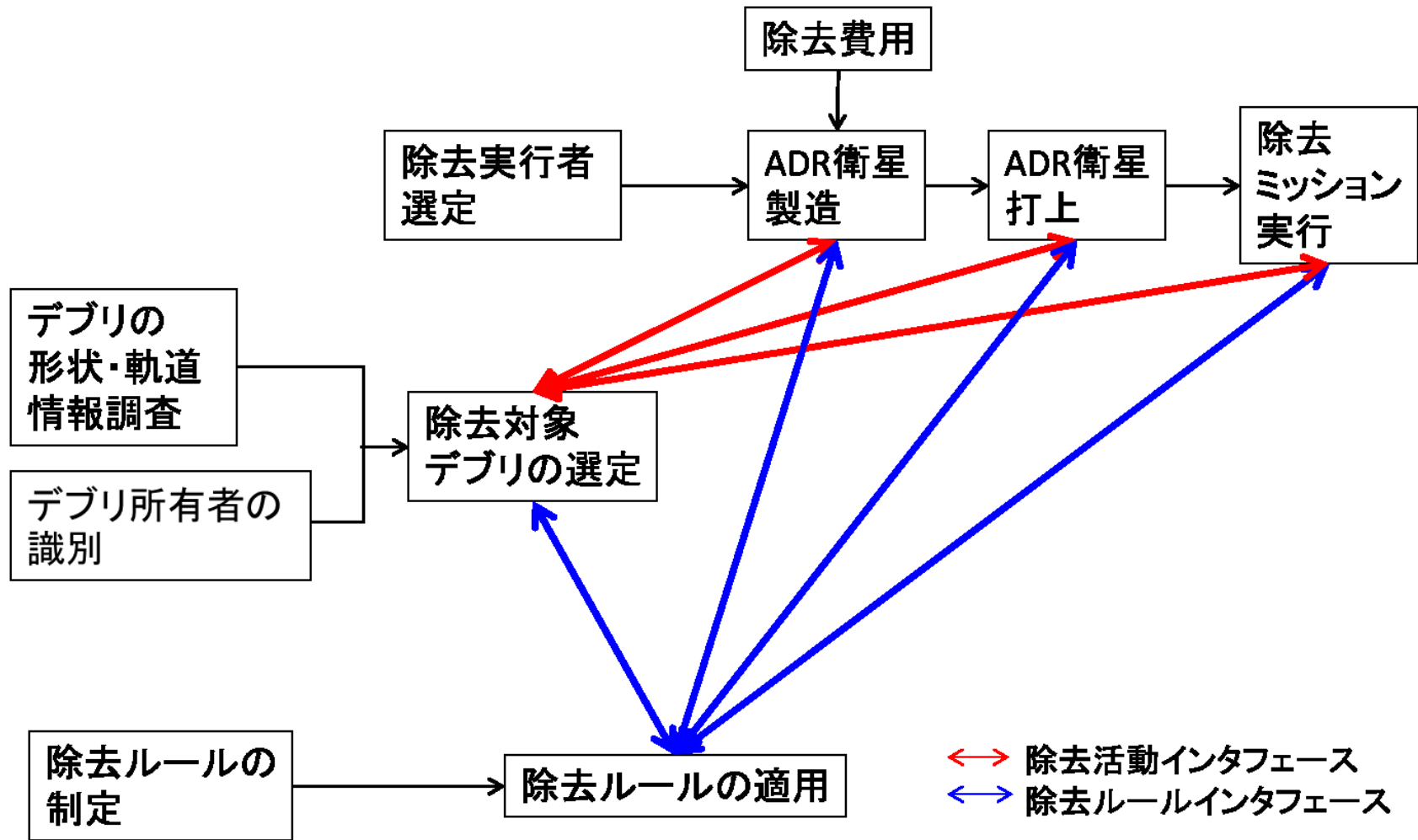


図 4-2 能動的デブリ除去のシナリオ

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

4.2 機能設計

4.1 要求分析で能動的デブリ除去運用のための国際枠組みへの要求が識別されたが、以下の考えに基づき、4つのサブシステムを設計し、各機能を配分した。なお、サブシステムの検討においては、権力分立の典型例である、立法、行政、司法の三権分立を参考にしている。

- 個々の機能間インタフェースが最少になるように構成要素を決定する。
- 要素に権力が集中することを防ぐ為に、各構成要素は独立とする。

まず、デブリの除去の流れ（除去対象の選定から除去まで）を分析する。「除去対象の形状／軌道調査」、「除去デブリ所有者の識別」という2つの機能を介して「除去対象の決定」が行われる。これらの3つの機能は、いわば能動的デブリ除去の実行において重要な機能である。また、デブリの情報を取り扱うことから、「除去対象のデブリの情報を管理する」機能も関連が深い。そこで、これら4つをひとつのサブシステムとしてまとめる。(デブリ除去決定サブシステム)

除去活動インタフェースについてみると、「除去対象デブリの決定」は、「ADR 衛星製造」、「ADR 衛星打上」、「除去ミッション実行」の3つの機能とインタフェースを有する。ADR 衛星に関する3機能は、その内容から、同一の組織が実施することが、従来の宇宙開発での手法でもあり、効率的でもある。また他の機能とのインタフェースも一本化できるので、これら3つの機能はひとつのサブシステムとする。(デブリ除去実行サブシステム)

除去ルールインタフェースについてみると、「除去ルールの適用」は、「ADR 衛星製造」、「ADR 衛星打上」、「除去ミッション実行」の3つの機能と「除去対象デブリの選定」機能とインタフェースを有する。「除去ルールの適用」機能も、その内容から、「除去ルールの制定」と合わせてひとつのサブシステムとする。(デブリ除去法的サブシステム)

残る「除去実行者選定」、「除去費用」、「能動的デブリ除去の実行主体が第三者賠償責任を取る」機能については、以下のように考える。

除去実行者が選定されると、除去の指示と同時に、費用を渡す、デブリの情報を提供する必要がある。能動的デブリ除去の公正な実行を期するためには、「除去実行者選定」機能および「除去費用」機能は、除去実行者が関連するデブリ除去実行サブシステムとは別のサブシステムに配分すべきである。特に、費用に関しては、公正な資金運用を期するためにも、全てのサブシステムから独立したサブシステムとした方がよい。(デブリ除去費用サブシステム)。

第三者賠償責任は、2章での分析から、能動的デブリ除去の実行主体が取ることがよいと判断されたため、除去実行主体が関わるデブリ除去実行サブシステムに配分する。

以上の検討結果を、図4-3に能動的デブリ除去運用の国際枠組みのサブシステム構成として、図4-4に能動的デブリ除去運用の国際枠組みのサブシステム間の内部インターフェースとして図示する。

能動的デブリ除去運用の国際枠組みのサブシステムの構築結果に基づいて、外部インターフェースを検討する。図4-1に示したように、外部インターフェース先として、国(国民、企業を含む)、デブリ、IADC、国連がある。

国や企業は、宇宙開発の活動の結果、デブリの所有者となる可能性があり、したがって、2.3 仕組みで分析したように、能動的デブリ除去実行で提供される宇宙環境保全という価値に対する対価を払うステークホルダーとなり得る。また、デブリ所有者として、能動的デブリ除去運用の国際枠組みと、デブリの情報提供、所有権譲渡の調整を行う。

IADCが発行するデブリ状況報告書は、除去対象の選定における根拠文書となる。能動的デブリ除去運用の国際枠組みが制定する除去ルールは、IADCおよび国連が制定したデブリ低減ガイドラインに準拠するものとなる。

国際宇宙法が定めているのは国家の責任であるため、能動的デブリ除去運用の枠組みが、第三者賠償責任を負えるようにするためには、国際社会に国際法人格として認めてもらう必要がある。そのため、国連に保証をしてもらい、また能動的デブリ除去運用の枠組みの活動報告を国連に対して行う。国連の中でも、国連事務総長が、宇宙物体登録簿の管理者であり、能動的デブリ除去を管轄するに相応しい立場であると考えられる。

以上の検討結果を、図4-5に能動的デブリ除去運用の国際枠組みの外部インターフェースとして図示する

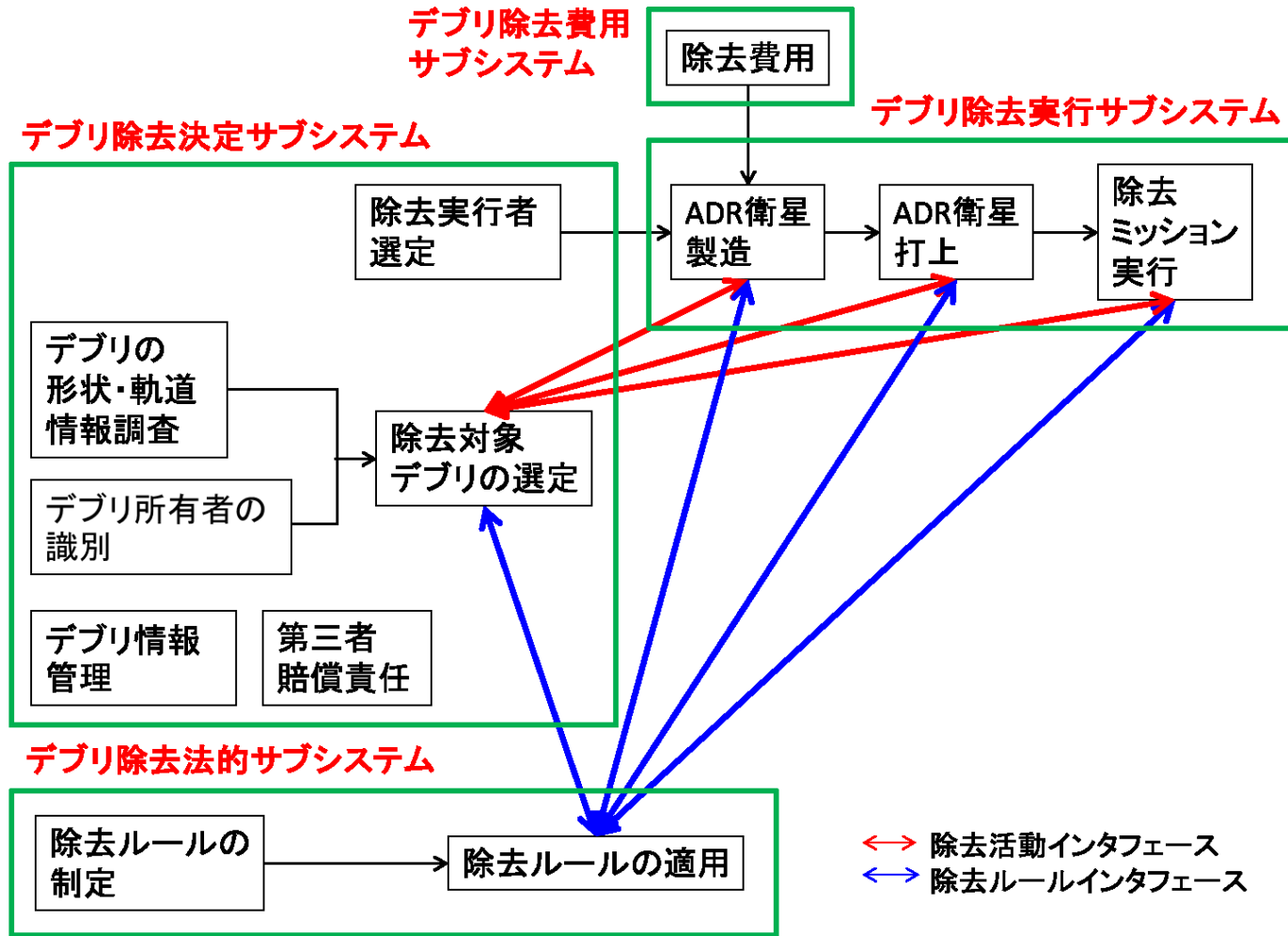


図 4-3 能動的デブリ除去運用の国際枠組みのサブシステム構成

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

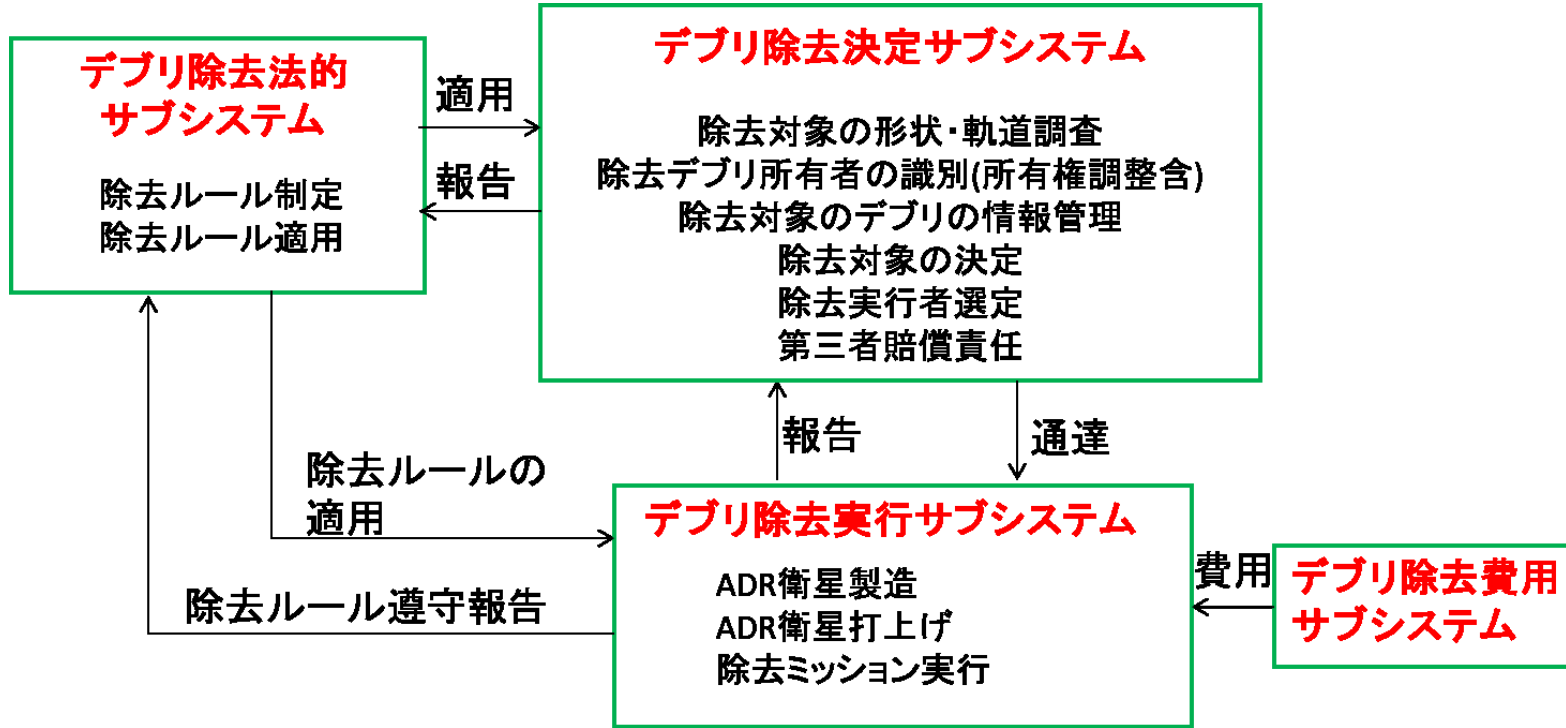


図 4-4 能動的デブリ除去運用のサブシステムの内部インタフェース図

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

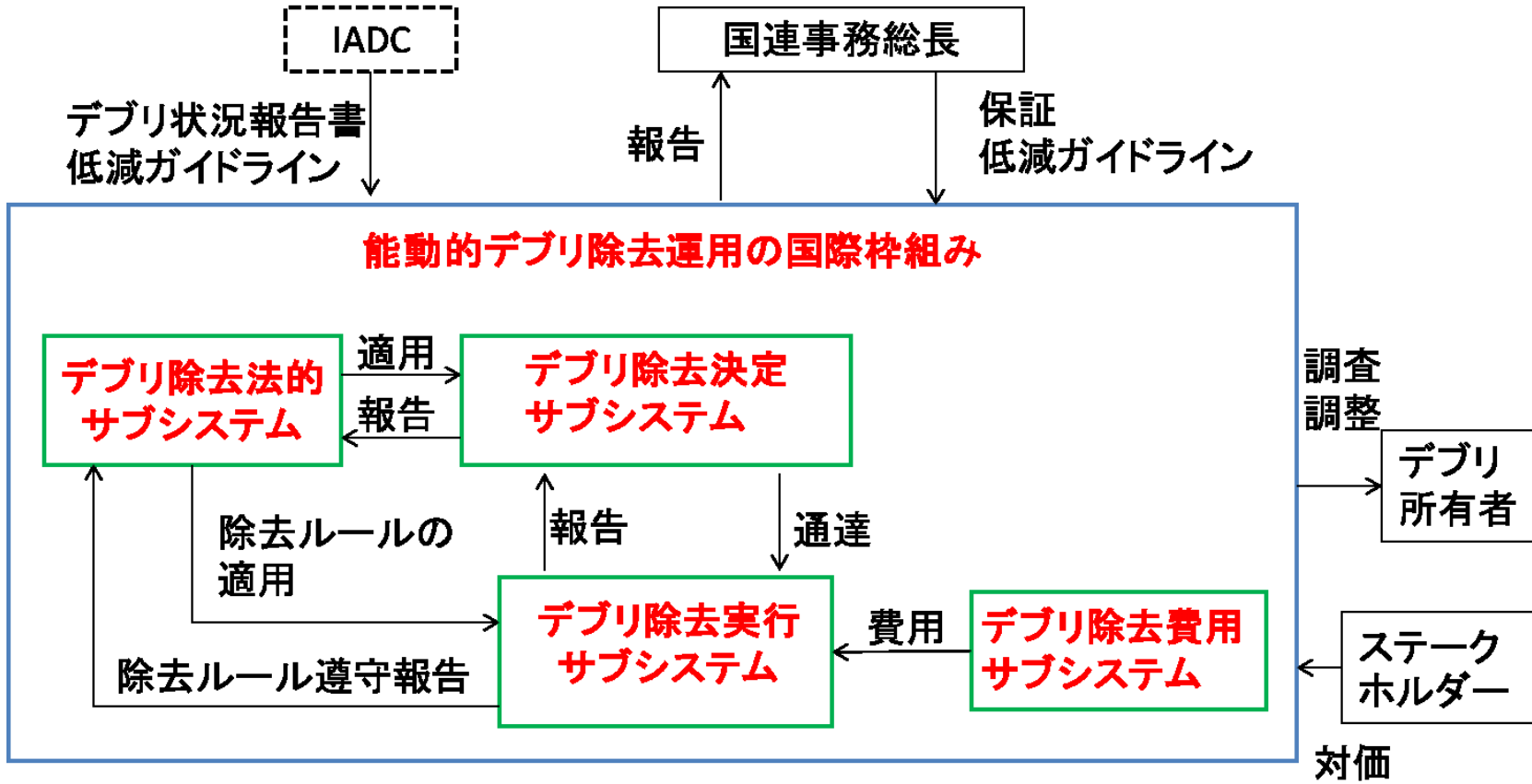


図 4-5 能動的デブリ除去運用のサブシステムの外部インターフェース図

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

4.3 物理設計

機能配分の結果に基づき、能動的デブリ除去運用の国際枠組みを組織として設計する。

能動的デブリ除去運用の国際枠組みを構成する4つのサブシステムの内、デブリ除去決定サブシステムとデブリ除去法的サブシステムは、共に国連との関連が強い。

能動的デブリ除去運用の国際枠組みは、国際法人格としての保証を国連から得て、デブリ除去決定サブシステムが第三者賠償責任など国際宇宙法で定められている「国」としての責務を果たす。また、デブリの情報を取り扱うため、宇宙物体登録登録簿を管理する国連事務総長とも情報を共有する。

デブリ除去法的サブシステムは、国際宇宙法やデブリ低減ガイドラインに準拠した「除去ルール」を定めて、能動的デブリ除去運用の国際枠組み内に適用する。

したがって、デブリ除去決定サブシステムとデブリ除去法的サブシステムを、1つの組織として統合し、国連の下に置く。国連には多くの宇宙開発関係国も参加しており、調整の場としても適している。この統合した組織を、「ADR 連合」と呼ぶ。

ADR 連合には、デブリ除去決定サブシステムとデブリ除去法的サブシステムに対応する、ADR 実施機関と ADR 法制定機関とを設ける。サブシステム設計方針である、「各構成要素は独立とする」に従い、この両機関は、ADR 連合の中では、互いに独立して活動する。

国連の両機関のメンバーは、国連事務総長が任命する。ADR 連合は、その活動内容を国連事務総長に報告する。

デブリ除去は、ADR 実施機関が選定した除去実行者によって実行される。実行にかかる費用は、デブリ除去費用サブシステムが調達する。以下、費用の調達方式を設計する
まず、能動的デブリ除去の費用調達を民間業界から行うケースを2つ評価する。

●デブリリスク保険を源泉として能動的デブリ除去の費用を調達するケース

日本の車両に掛けなくてはならない強制保険のように、打上げや人工衛星の運用が計画されると、打上げ機関(企業)や運用者が、ロケットや人工衛星に掛けなくてはならないデブリリスクに対する強制保険を設計し、その保険の掛け金を能動的デブリ除去の実行費用の原資とする。

IOCPF での分析の通り、保険はリスクが発生してからの適用となるため、現存するデブリの除去用途には用いることができない。現存するデブリの除去用途に保険を用いることができるように、保険制度の見直しが必要である。

また、これは、現状ではデブリによるリスクの発生確率が低いため、現在の宇宙保険の中でのデブリに対する保険料率は非常に低い。保険制度の見直しがされたとしても、能動的デブリ除去の実行費用を調達するためには、この保険料率が上がることになる。料率の上昇は、宇宙開発活動のコスト増となり、宇宙開発発展の妨げとなる。

●宇宙開発関係機関(国または企業)から直接、能動的デブリ除去の費用を調達するケース

打上げ時や、人工衛星がデブリになった時ごとに課金して、資金を集め、それを能動的デブリ除去の実行費用の原資とする。

この方法は、宇宙開発全般でコスト増を招き、宇宙開発活動の妨げになる。また、これから宇宙開発に進出しようとする機関や企業にとっては、自らが発生源ではないデブリの除去の費用を負担することになり、資金調達に協力しないことが予想される。

除去実行者にとっても、能動的デブリ除去に係る費用を低減する努力を払う動機付けに欠ける費用調達方式であり、資金が調達できても、その分配の調整は難しいものとなると考えられる。

以上より、民間業界からの能動的デブリ除去の費用調達は困難であると判断した。そこで、国が能動的デブリ除去の費用を支出し、国が民間ベースでの能動的デブリ除去の技術開発競争を促進する仕組みを設計する。この場合、直接の除去実行者は「国」となるが、国は能動的デブリ除去作業を、機関や民間企業に委託してもよいものとする。

国が除去実行者になることにより、能動的デブリ除去技術が軍事技術に極めて近いことにまつわる技術の国外流出や公開の歯止め等に関して、ADR 連合は関与せずに能動的デブリ除去を推進することができる。また、各国にとっては、国内産業を育成して、能動低デブリ除去技術を習得しようとする動機付けにもなる。

国から能動的デブリ除去をの費用を調達する次の2つのケースを評価する。

●ADR 連合が各国から資金を収集し除去実行国へ必要費用を供与するケース
(国際共同供出型)

ADR 連合が、加盟各国は拠出金を収集して、それを除去実行国に能動的デブリ除去に係る費用として配分する。

加盟国から資金提供を強制的に求め、それが必ずしも、自国に配分されるわけではないので、宇宙予算を切迫する可能性があり、宇宙作業を減速させる方向に働く。宇宙産業は基本的には国策産業であることから、そのリソースの一部を国外の国際組織が消費することは、国内での反発を招く可能性が高い。また、提供資金額の設定は、各国の軌道上デブリ所有数や経済状況等の様々な要素を勘案して調整する必要がある、難航する恐れがある。図 4-6 にこのケースの費用調達の流れを示す。

●除去実行国が自国の宇宙開発予算から能動的デブリ除去の費用を供出するケース
(除去実行者調達型)

能動的デブリ除去の費用の工面方法は各国に委ねられるため、自由度が大きい。例えば、自国の宇宙機関で実行する、民間委託してコスト低減を目指す、等の選択肢を持つことが可能であり、また、除去実行国にとっては能動的デブリ除去に係る費用を削減する努力を払う動機付けを含む費用調達方式である。

ADR 連合加盟国の内、除去実行国とならない国も、ADR 連合が負う第三者賠償責任の費用を拠出することで、能動的デブリ除去のリスクを負担する。

ADR 連合は除去費用に関する調整を行う必要が無くなり、中立的な立場を確保できる。

図 4-7 にこのケースの費用調達の流れを示す。

以上の評価結果から、デブリ除去費用サブシステムは、除去実行国が自国の宇宙開発予算から能動的デブリ除去の費用を供出する方式(除去実行者調達型)を取り込む。

能動的デブリ除去運用の国枠組み組織設計を、図 4-5 に示す。

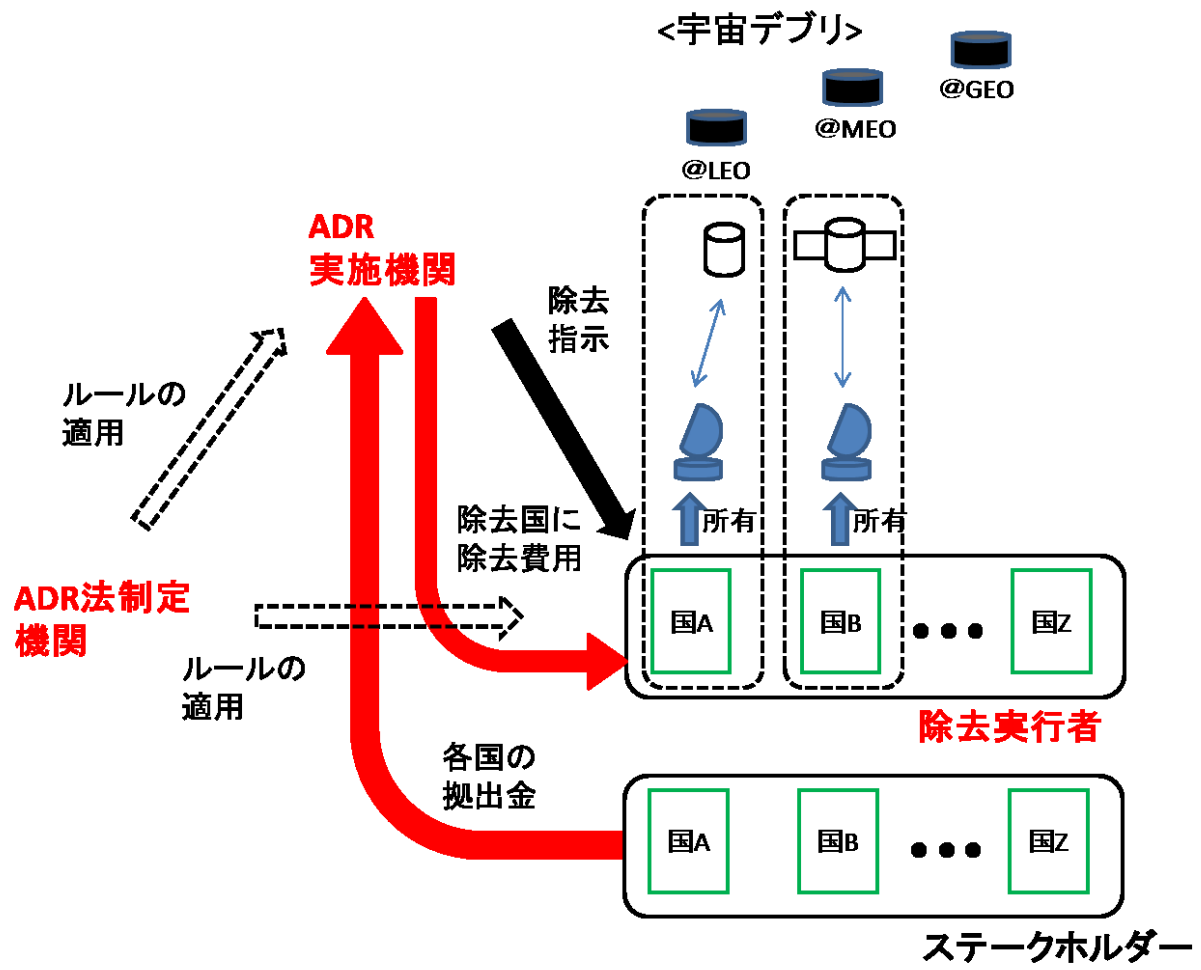


図 4-6 資金調達ケース 1：国際共同供出型

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

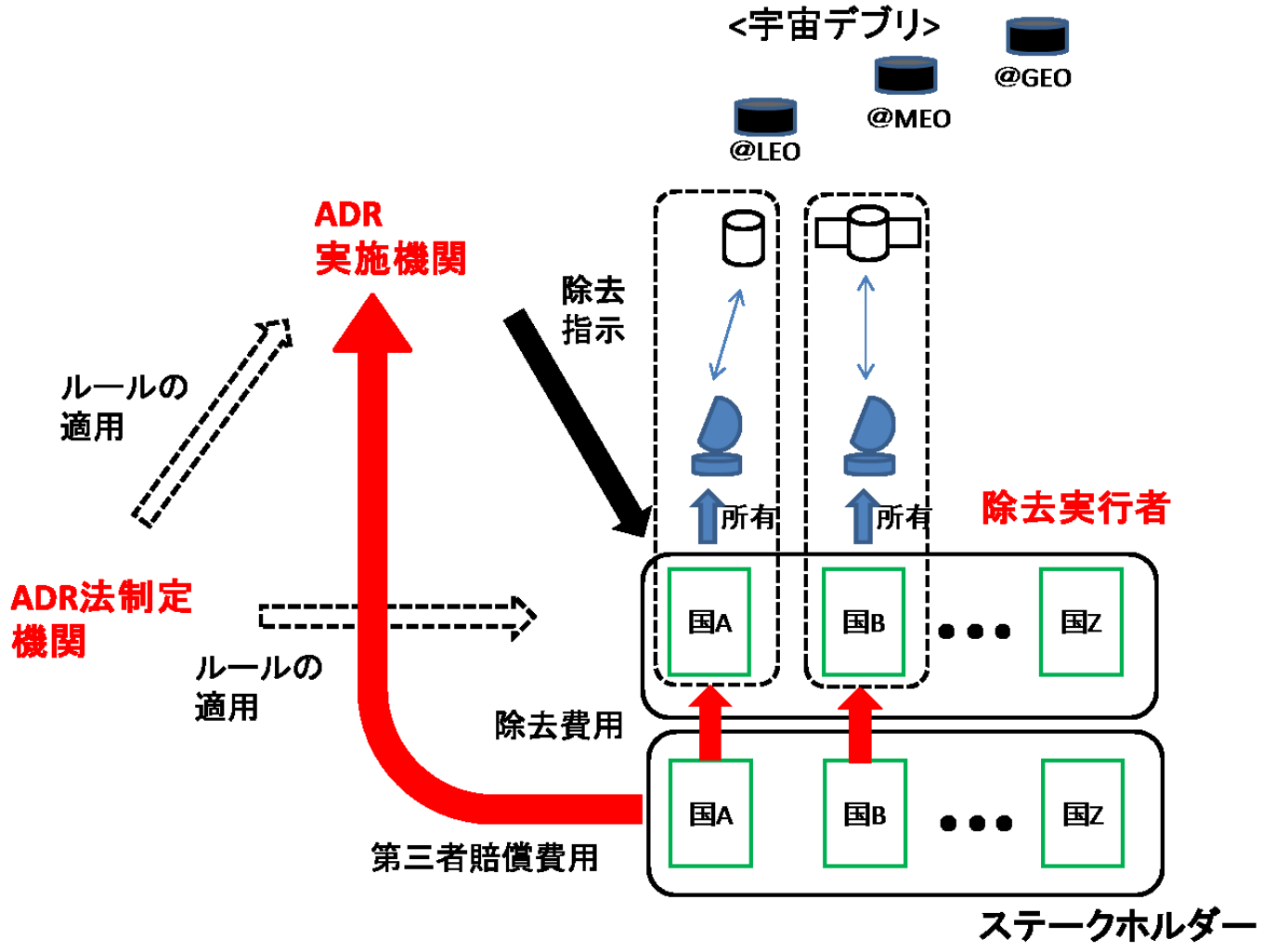


図 7-1 廃止明確化 / 公法・私法大別明確化

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

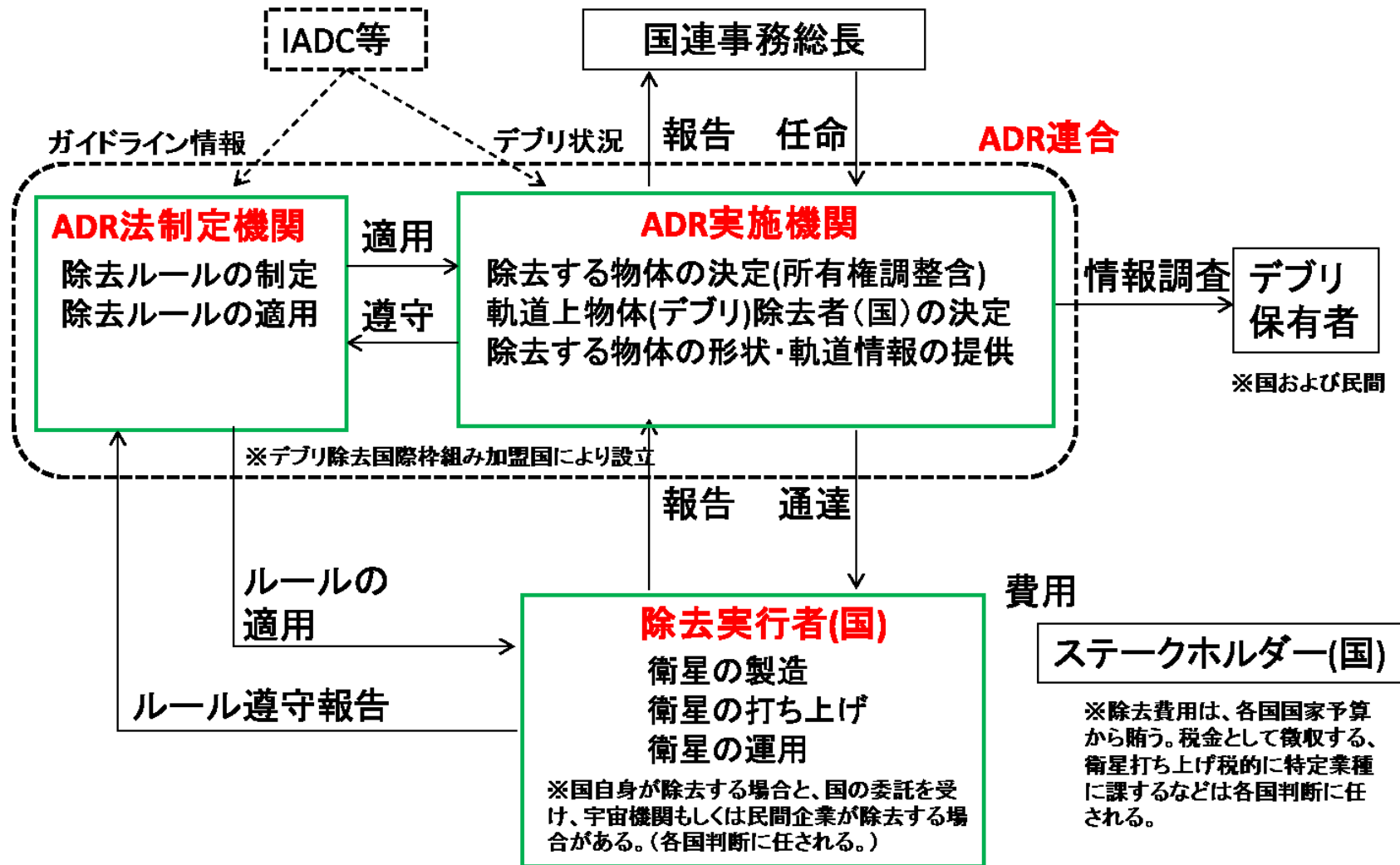


図 4-8 能動的デブリ除去運用の国際枠組み組織設計

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

4.4 能動的デブリ除去実行シナリオ

設計した能動的デブリ除去運用の国際枠組みの中で、除去対象デブリがどのように選定され、除去が実行されるかをシナリオとして明確にする。

IADC は、軌道上のデブリの観測結果に基づき、除去効果が大きいデブリをリストアップしている。ADR 連合の ADR 実施機関は、そのデブリ低減効果リストを入手して、除去対象リストを作成する。当該リスト作成にあたっては、ADR 連合加盟国所有のものに限り、リスト掲載にあたっては所有国との同意調整を済ませたものとする。

除去対象のデブリの所有権に関しては、了解を得られたものはこの時点で ADR 連合に無料譲渡し、了解を得られていないものは保留とする。そして、本リストを ADR 連合加盟国全体に公開して、除去対象デブリ選定を行う。

所有権を譲渡されたデブリについては、除去に必要なデブリの技術情報も除去対象リストに含めて開示される。

除去対象リストを受け取った ADR 連合加盟国は、除去対象リストから自国が除去を実施する対象を選択して、ADR 連合に申請する。

ADR 連合では、ADR 連合加盟国へのデブリ除去分担、割当てを、年一回の会議で調整する。この分担、割当ては、除去作業量／費用に直結する為、調整が最も難航すると予測されるが、ADR 連合加盟国が互いに同等の責任を有するように配分する。

能動的デブリ除去技術を実証しようとしている国の、既存の軌道上デブリ所有率や年間の人工衛星製造数の割合は、9 割近くになる。また、国の機関および企業が運用する人工衛星の数は、その国の宇宙利用の度合いの指標となり得る。割当て配分は、これらの数値を総合的に取り扱い、能動的デブリ除去技術の実証状況も考慮して調整する。

既存のデブリの所有率のみに基づく割当て配分は、宇宙大国の不公平感を招く可能性が高く、3.5 項で挙げた「国際枠組みの中で、加盟国家は互いに同等の責任を有すること」という教訓が生かされない。

除去対象デブリの選定と除去実施国を決めて、ADR 連合の承認の下、除去実行者は除去作業を行う。除去作業の結果は、除去実行者から ADR 連合に報告される。

ADR 法制定機関は、上記の一連の作業が、除去ルールを遵守して適正に行われているかを監視する。

上記の流れをを図 4-9 に図示する。

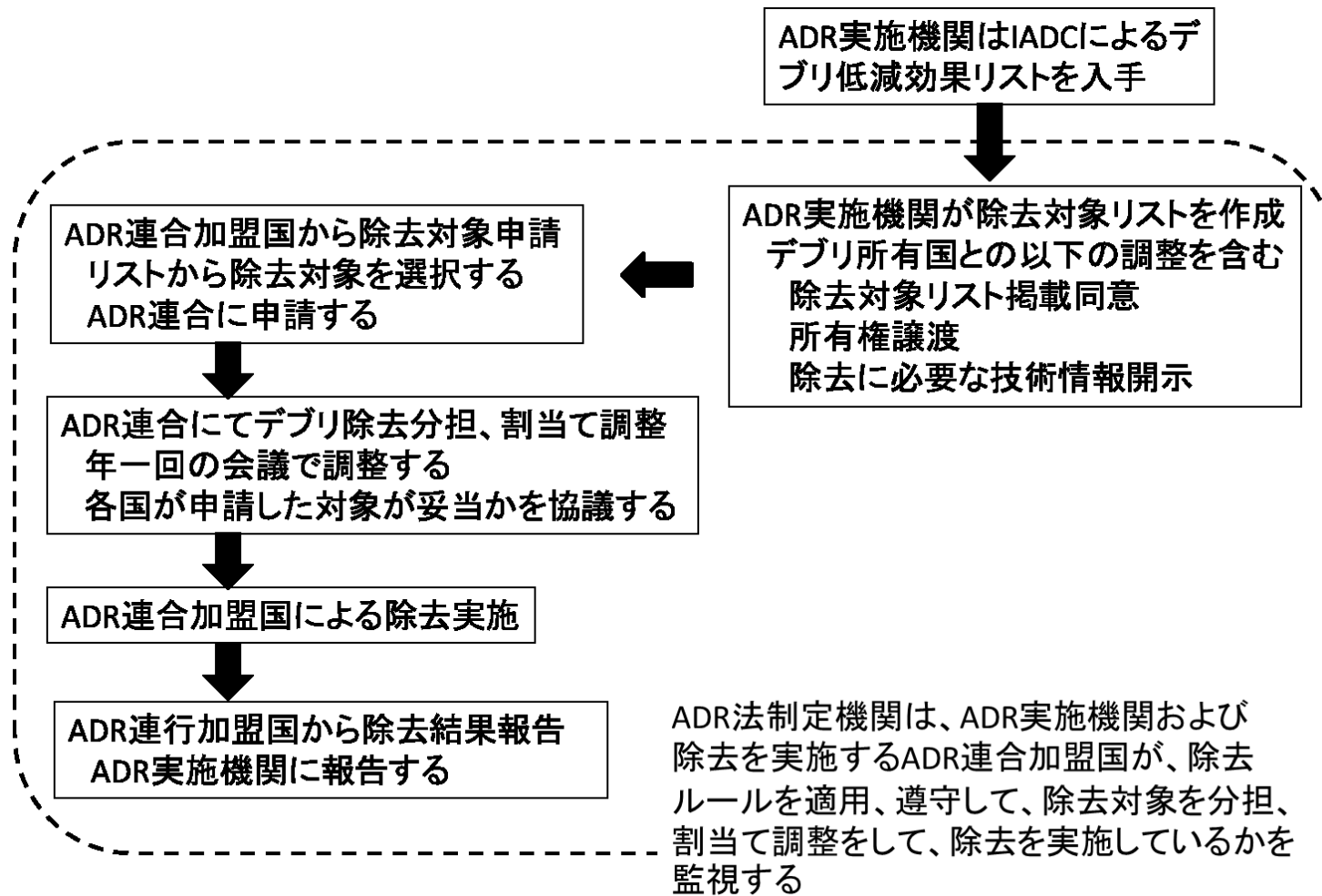


図 4-9 能動的デブリ除去実行シナリオ

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書

以上、本章をまとめる。

能動的デブリ除去運用の国際枠組みをシステムズエンジニアリング手法に基づき設計した。

能動的デブリ除去の運用に関して抽出された課題の対処も含めて、要求を整理し、設計対象となるシステム＝能動的デブリ除去の運用の枠組みの範囲を明確にした。続いて、能動的デブリ除去の運用の枠組みのサブシステム構成を設計し、機能を配分した。最後に、能動的デブリ除去の費用調達方式の比較も含めて、能動的デブリ除去の運用の国際枠組みの組織を設計した。能動的デブリ除去の費用は、除去実行者である国の宇宙開発予算からの拠出とすることで、国際枠組み内での除去費用に関する調整を行う必要がなくなり、能動的デブリ除去を実施する組織、ADR 連合は中立的な立場を確保できる。

第5章 国際枠組み構築

第4章で設計した能動的デブリ除去運用の国際枠組みの特性を、海洋油濁、地球温暖化、南極条約、INTELSAT の事例分析で得られた教訓の取込み状況を含めてまとめ、設計の妥当性を示す。

5.1 教訓の取込み

3章では、他事例からの教訓として、能動的デブリ除去運用の国際枠組みが持つべき特性として以下の項目がまとめられた。

- ・ 能動的デブリ除去の運用の正当性を国際社会が認めていること
- ・ 国際枠組みの中で、参加国家は同等の責任を有すること
- ・ 科学的な知見に基づく能動的デブリ除去の具体的な施策提言を受けること

●能動的デブリ除去の運用の正当性

ADR 連合は、国際法人格としての保証を国連から得ることで、能動的デブリ除去の運用の正当性は、国際社会に認められていると考えられる。

さらに、能動的デブリ除去に関わる活動報告を、国連に提出すること、ADR 連合内で年一回開催の ADR 連合加盟国へのデブリ除去分担、割当てを決める会議への ADR 連合加盟国の参加を許可することで、ADR 連合は、「参加」と「説明責任」を有し、国際社会が能動的デブリ除去の運用の正当性を認める条件を満足していると判断できる。

●参加国の同等の責任

ADR 連合内での能動的デブリ除去の割当て配分は、既存の軌道上デブリ所有率や年間の人工衛星製造数の割合、運用する人工衛星の機数などの数値を総合的に取り扱って調整することで、ADR 連合加盟国間の責任配分の平均化を図る。

既存の宇宙デブリの由来の責任問題を問うことなく、活動対象をこれからの能動的宇宙デブリ除去活動に集中させることが、従来の宇宙大国の ADR 連合への加盟の動機づけとなる。

●科学的な知見に基づく能動的デブリ除去の具体的な施策提言

IADC は、デブリ状況を科学的に分析している。IADC を、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの外に配置することで、IADC の独立性を確保している。ADR 連合は、IADC のリストとデブリの状況情報に基づいて、除去対象のデブリのリストを作成する。

5.2 能動的デブリ除去の規則

2.2 法律の項でも整理したが、能動的デブリ除去の実行に伴う課題として、必要な手続きや、能動的デブリ除去での第三者賠償責任分担がある。

第三者賠償責任は、各国が個別に負うリスクとしては無視しがたく、ADR 連合への加盟の障害となり得る。また、所有権譲渡の手続きは、当事者間では解決が困難となる場合も想定され、その手続きを回避するために、自国由来のデブリのみ除去するという選択を取る恐れがある。

そこで、ADR 連合の規則として、以下を提案する。

①能動的デブリ除去責任

「持続的なデブリ除去活動を行い、宇宙環境保全を確保する。」

②除去実施責任

「除去対象デブリの除去作業に関して、失敗も含めて、ADR 連合がその全ての責任を負う。責任履行は国際宇宙法の規定に従う。」

③所有権

「ADR 連合の加盟国は、各国所有のデブリが除去対象に識別された場合は、所有権をADR 連合に無償譲渡する。所有権の譲渡に伴い、管轄権はADR 連合に移転する。」

①能動的デブリ除去責任

加盟国は ADR 連合を通じて、能動的デブリ除去の責任を負う、即ち、ADR 連合に加盟する各国で能動的デブリ除去責任を分担することになる。特に、過去の宇宙開発の遺産とも言うべきデブリに対する責任が分散される点は宇宙先進国にとっては、加盟の動機付けとなりうる。

具体的には 3.1 海洋：油濁賠償問題に記した「ADR 補償基金」を設立し、ADR 連合加盟国はこの基金に対して拠出金を出すことで、能動的デブリ除去に関わる責任を分担する。

②除去実施責任

ADR 連合が能動的デブリ除去作業の責任を全て負うことで、除去作業に伴うリスクを各国で分散でき、ADR 連合への加盟を促すことも可能となる。

③所有権

ADR 連合が除去対象のデブリの所有権を有することになる。除去作業に必要な対象デブリの情報の入手、開示の調整は、ADR 連合が実施する。

デブリの所有者にとっては、所有権を譲渡すれば、当該デブリに関する責任を、ADR 連合に一切移管できることが、ADR 連合への加盟の動機づけとなる。そして、所有権を有する軌道上物体が他衛星と衝突して損害を発生させる、地上に落下して人員の傷害を引き起こす、等の潜在的なリスクは加盟国間に分散される。

ただし、軍事衛星等の国家の安全保障に関わるデブリについては、所有権譲渡を拒否する国が存在しうると考えられることから、除去、及び、所有権譲渡について、ADR 連合と当事者国間の調整が必要である。

なお、以上の規則は、2 章で述べたように ADR 連合が国際法人格を取ることと、「国」としての責任を負えることを国連／事務総長が保証することが前提として機能する。

5.3 枠組み構築プロセス

海洋、大気、南極、宇宙での課題解決のための国際枠組みの分析を通じて、得られた国際枠組み構築の流れを整理する。検討作業の中から、国際的な問題を解決した事例に国際枠組み構築の流れには、共通性があることを読み取った。構築の流れを図 5-1 に示す。本提案で分析した事例でのこの国際枠組みの流れの要素を分析した結果を表 5-1 に示す。

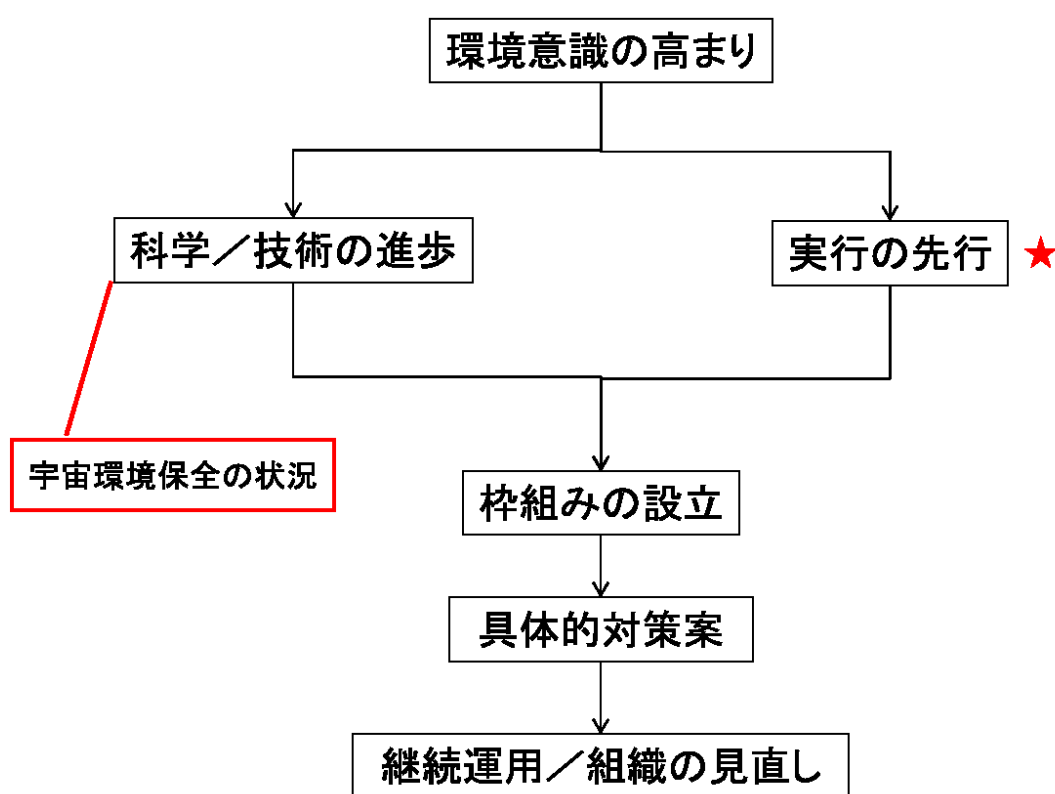


図 5-1 国際枠組み構築の流れ

[筆者作成]

表 5-1 各事例での国際枠組み構築の流れの要素の分析

国際枠組み	問題意識の高まり	科学／技術の進歩	実行の先行	枠組の設立	具体的対策案	継続運用／ 組織の見直し
海洋： 油濁補償	地球環境問題への 意識の高まり	タンカーの大型化	石油メジャーによる 石油輸送業務を中断 させないという意向による 民間自主協定による 油濁補償制度	油による汚染損害の 補償のための 国際基金の設立に 関する国際条約	国際条約および 民間自主協定 補償制度の組合せ	油濁問題の増大に応じた 補償額の見直し
大気： 地球温暖化問題	地球環境問題への 意識の高まり	科学分析能力の向上	京都議定書→パリ協定	COP	京都議定書など	具体的なアクションの 更新(進行中)
南極大陸： 南極条約	地球環境問題への 意識の高まり	技術の向上による 極地での永住の可能性	領土権の凍結による 環境維持の先行	南極条約	南極条約体制下での 各種取り決め	南極条約体制の 見直し(進行中)
宇宙： INTELSAT	宇宙通信技術の 公平な分配	人工衛星による 通信技術	暫定協定での 運用開始	恒久協定	暫定協定下での グローバル衛星 システム構築	民営化に転換

[筆者作成]

国際枠組み構築の流れで注目したいのは、科学や技術の枠組み構築への影響の大きさである。

南極条約の課題は、技術の進歩により南極という極地への永住の可能性がでてきたことにより、領土問題が現実なものとなったことに起因する。しかし、機微な領土問題を凍結するという国際調整の結果、南極大陸での科学観測を可能とした点は、科学、技術の国際問題への影響力の大きさについて深く考えさせられる。INTELSAT が民営化に変革したのも、宇宙通信技術の向上が影響している。

能動的デブリ除去は、技術のみでは実行できず社会、経済、国際関係等の課題解決が必要である。デブリの問題解決には、デブリ観測技術、デブリ予測技術など様々な技術が関連している。技術開発の方向性を決定する際には、問題との関連性分析に基づき、国際枠組み構築を見据えて、技術がどのように貢献できるかを考慮する必要がある。

能動的デブリ除去の状況は、数年内に能動的デブリ除去の技術が軌道上実証されると予想され、したがって、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの構築の手前の段階であると判断できる。(図 5-1 中の赤字注記箇所)

能動的デブリ除去運用の国際枠組みの設計にシステムズエンジニアリング手法を用いた。つまり、最上位の目標を達成するための最終形態を構築したことになる。他の事例では、枠組みを構築した後に、具体的対策案を反映するために、枠組みの構成の見直しを行い、運用を継続している。組織設計にシステムズエンジニアリング手法を取り込むことで、より確実な組織が構築され、構成の見直しプロセスは少なくなると予想される。

一方、システムズエンジニアリング手法では、図 5-1 での実行の先行段階(図中、赤星箇所)の設計がされない。以降、能動的デブリ除去運用の国際枠組みを構築するプロセスを設計する。

宇宙環境の悪化および能動的デブリ除去の重要性が世界各国で認識されつつあることは事実であるが、ADR 連合のような国際機関を突然立ち上げることは抵抗があると考えられる。

INTELSAT での暫定協定から恒久協定と 2 段階にわたっての枠組みを構築事例から、能動的デブリ除去運用の国際枠組みも段階的に構築するプロセスを採用する。

●第一段階

能動的デブリ除去の推進の方針を各国で議論、合意する。実行的な作業は実行しないため、多くの国の参加を募ることが目標である。また、制定済みのデブリ低減に関するガイドラインの遵守を義務付けることで、ADR 連合設立に円滑に繋げるようにする。

●第二段階

「ADR 実施機関」、「ADR 法制定機関」を持つ「ADR 連合」を国連事務総長の保証の下、設立する。

ADR 連合設立調整と並行して、具体的な除去数値目標、除去分担割合決定方法、等々の実行的な能動的デブリ除去に関する内容を加盟国間で合意する。

この段階では、ADR 連合への加盟国は、能動的デブリ除去に重要性を認め、かつ除去技術を有する国が主となると予想されるため、例えば、二国間の協定レベルでスタートを切ることもあり得る。そのようなローカルな活動の場合でも、その後の発展段階を見据えて、除去ルールへの遵守や除去活動の監視などは実施して、活動の正当性は確保する。

●第三段階

本段階における参加国は、宇宙先進国中心になると想定される。宇宙先進国が、ADR 連合と調整した能動的デブリ除去を逐次実施していくことで、能動的デブリ除去の機運を醸成していく。

●第四段階

宇宙先進国による能動的デブリ除去が定常化して、世界的に宇宙環境保全に対する気運も醸成され、宇宙途上国も ADR 連合に加盟してくることを想定する。宇宙先進国が引き続き能動的デブリ除去の実行の主体を占めるが、宇宙途上国分担も増えてきて、持続的な枠組みが構築される段階となる。

図 5-2 に枠組み構築プロセスを示す。

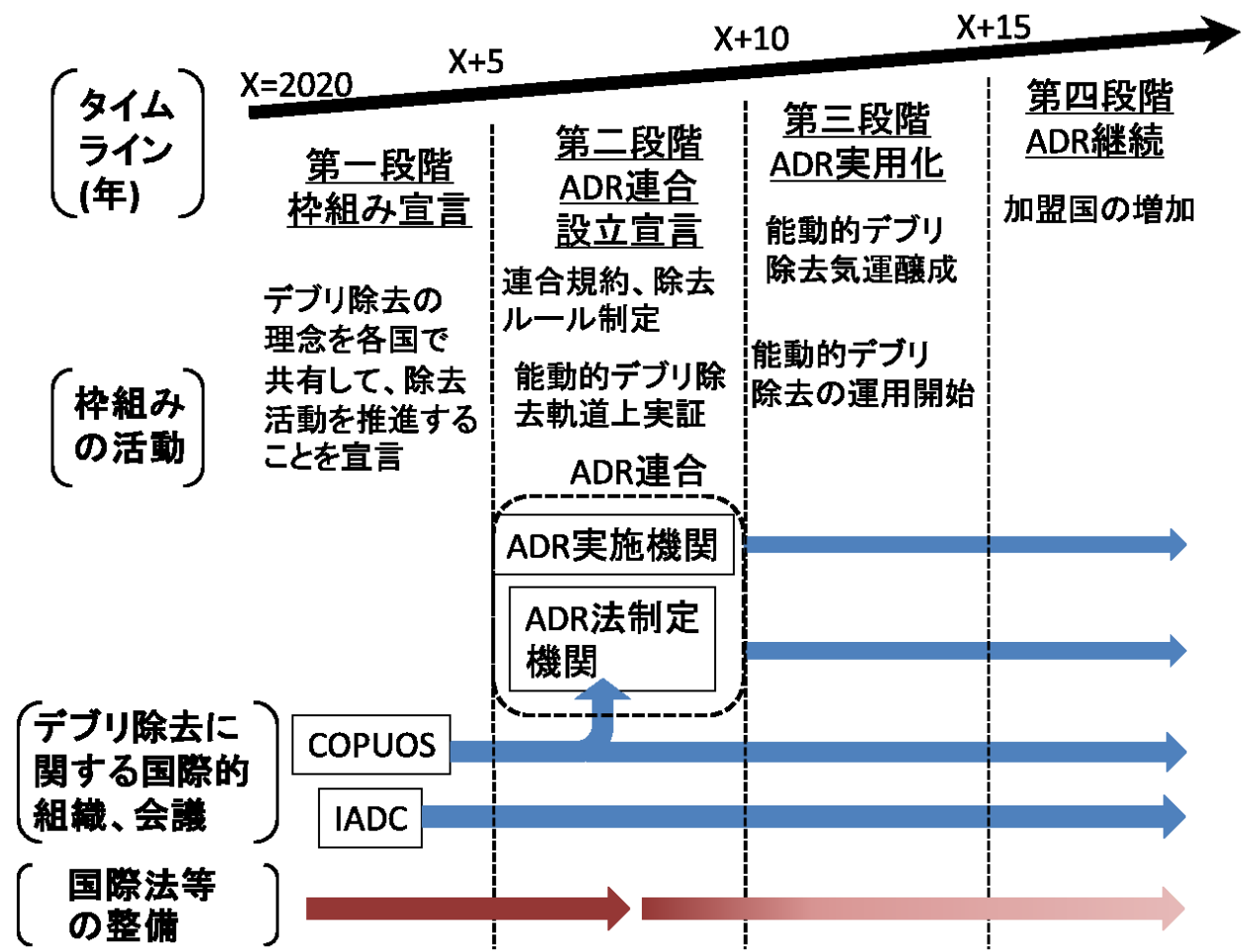


図 5-2 枠組み構築プロセス

[引用[28]記述に基づき筆者作成] [28] デブリ除去枠組み検討WG 活動報告書

5.4 総合評価

能動的デブリ除去運用の国際枠組み、ADR 連合の設計結果を総合評価する。

5.1 教訓の取込みで示したように、3章でまとめた事例からの教訓は適切に取り込まれた。

また、4.1. 要求分析で整理された要求は、4.2 機能設計、4.3 物理設計の工程の中で、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの機能で実現されている。

最上位目標である宇宙環境保全への有効性が示された PMD と能動的デブリ除去の要求への能動的デブリ除去運用の国際枠組みの適合性を以下の通り評価する。

①PMD90%以上

PMD 要求を規定しているデブリ低減ガイドラインを、ADR 法制定機関にて、ADR 連合内の除去ルールとして制定することで、参加国の遵守を実現する。また、枠組み構築の第一段階の枠組み宣言に、デブリ低減ガイドラインを遵守する旨を明記することで、多くの参加国と、理念として共有する。

②能動的デブリ除去を5回／年以上

各国への除去分担割合を定める機能を ADR 連合が有することで、能動的デブリ除去の設定を可能とした。

③持続性

能動的デブリ除去の実行責任を ADR 連合が負う仕組みにすることで、各国が加盟しやすい組織とした。また、ADR 連合は除去の指示をするだけで、除去方法等は各国に委ねることで、自由度を大きくして、受け入れやすい仕組みとした。さらに ADR 連合が除去指示を一括取り纏めすることで、各国の能動的デブリ除去の実施状況に応じて、適切に配分を決定し、除去負荷を分散可能にした。これにより、除去指示に対応が困難な状況に陥った国の脱退を防止する。

以上から、能動的デブリ除去運用の国際枠組みは、事例を適切に取り込みつつ、要求を満足していると判断した。

以上、本章をまとめる。

第4章で設計した、能動的デブリ除去運用の国際枠組みは、最上位目標である宇宙環境保全を達成するための要求を、適切に実現していることを確認した。海洋、大気、南極を含めた国際的な課題に取り組む枠組みからの教訓も繁栄している。

システムズエンジニアリング手法による組織設計の解は、最上位目標を達成する最終形態の組織像となり、構築のプロセスが定義されない。海洋、大気、南極の国際枠組みの構築のプロセスを分析すると、国際枠組み構築の共通性が見出された。宇宙環境保全の取り組み段階を踏まえ、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの構築のプロセスを設計した。

構築の過程では技術の進歩が課題解決に影響を及ぼしていることも明らかになり技術開発推進の重要性が認識された。技術は、課題解決の加速化に貢献できる可能性があり、技術開発の方向性の決定は重要である。

第6章 結論

社会インフラストラクチャを支える重要技術となった宇宙開発においては、更なる社会要求を満たすために、人工衛星の打上げが計画されている。打上げ増加は、宇宙デブリの増加につながり、人工衛星は、現在、宇宙デブリ増加による宇宙環境悪化という危機に曝されている。宇宙デブリとの衝突により、高価かつ貴重な人工衛星を喪失するというリスクの可能性が大きくなっている。

現状は、人工衛星と宇宙デブリとの衝突の事例は少ないため、宇宙産業は回避、転嫁、容認することでリスク許容している。しかし宇宙デブリの増加に伴い、リスクの発生確率は高くなり、リスクの軽減の対処を積極的に行う必要が出てくる。廃棄運用(PMD)と、特に、能動的デブリ除去(ADR)の早期着手が望まれる。

能動的宇宙デブリ除去は、その有効性が確認されている一方で、実運用に向けての動きが鈍い。本研究では、ADR 運用の障害を分析し、その対策方を設計し、人類全体に開かれた空間である宇宙の環境を世界規模で取り組む仕組みと新組織の構築を試みたものである。国際的な仕組みとしたのは、宇宙開発が国家主導で行われてきたこと、宇宙技術が国家の安全保障に深くかかわっていることによる。

能動的デブリ除去の運用を、技術、法律、運用の仕組みの三つの視点から分析した結果、デブリ情報授受／管理、第三者賠償責任、資金調達の課題が識別された。(2章)

また、宇宙デブリ問題と類似性を持つ課題を解決した、海洋、大気、南極大陸に関する事例を分析して、能動的デブリ除去の運用の仕組みが取り込むべき教訓を得た。同じ宇宙関係で構築された INTELSAT の設立の経緯から、国際的な組織の構築の流れも見出した。

国際的な課題に取り組む枠組みの特性から、能動的デブリ除去運用のための国際枠組みは次のような特性を持つべきと考えた。

- ・ 能動的デブリ除去の運用の正当性を国際社会が認めていること
- ・ 国際枠組みの中で、参加国家は同等の責任を有すること
- ・ 科学的な知見に基づく能動的デブリ除去の具体的な施策提言を受けること

また海洋での油濁補償基金に倣い、「ADR 補償基金」を設立し、技術的な課題の残る能動的デブリ除去ミッションへの挑戦を促進する仕組みを考案した。(3章)

次に、能動的デブリ除去の運用の枠組みという組織をシステムとして捉え、大規模システムの開発用いられるシステムズエンジニアリング手法により、組織構築を行った。仕組みに要求される最上位の目標「宇宙環境保全」を達成するための方策としての能動的デブリ除去への要求の他に、2章で識別された課題解決の方策も要求として取り込んだ。設計の結果、ADR 連合と名付けた新組織を含む国際枠組みが構築された。

ADR 連合が国連事務総長から国際法人格としての保証を得る、ADR 連合が国連に活動報告を提出する、ADR 連合が開催する会議において、加盟国がデブリ除去分担、割当てを決めるといった一連の活動によって、ADR 連合の国際社会における信頼性／透明性を確立し、デブリ所有国からデブリ情報の授受／管理を任せられる組織として設計した。既存の宇宙デブリは、宇宙先進国由来のものが多く、その所有率によらず、除去対象リストから加盟国が除去する対象を選択するシナリオを設計したことで、既存の宇宙デブリに関する責任問題を問わず、枠組みの活動対象を能動的宇宙デブリ除去活動に集中させ、宇宙先進国が加盟しやすい構造とした。また ADR 連合が設立／管理する「ADR 補償基金」により、能動的宇宙デブリ除去活動に起因する補償問題は、ADR 連合が責任を取り、加盟国は除去実行のコストのみを負担することとした。

システムズエンジニアリング手法による組織設計の解は、最上位目標を達成する最終形態の組織像となり、構築のプロセスが定義されない。海洋、大気、南極の国際枠組みの構築のプロセスを分析して見出された国際枠組み構築の共通性に基づき、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの構築のプロセスも設計した。

以上、能動的デブリ除去運用の国際枠組みの設計結果は、最上位目標である宇宙環境保全を達成するための要求を、適切に実現していることが確認され、また海洋、大気、南極を含めた国際的な課題に取り組む枠組みからの教訓も反映されている。(4/5章)

本研究では、能動的宇宙デブリ除去の実施が継続運用される時に機能する国際枠組みを想定して設計／提案している。実証に向けて、様々な技術検討が進められている能動的宇宙デブリ除去に対して、最終運用形態を提示することは、開発の方向性を考える上でも有益である。

筆者自身は長年、能動的デブリ除去のシステム開発を技術面で研究してきた。周囲には、筆者と同じく研究を続け実証プロジェクトの開始を待ち望んでいる仲間が多くいる。技術面だけでなく、法律、運用の仕組みにまで踏み込んだ本研究が、能動的宇宙デブリ除去の実用化を加速することを願う。また、今後は国内外の宇宙機関に積極的に働きかけ、国際枠組み構築のスタートを切るよう、活動をしていく。

謝辞

本研究は、多くの方々のご支援で完遂することができました。特に、多大なご支援を賜りました方々への感謝をここに記します。

指導教官であり博士論文審査の主査である、システムデザイン・マネジメント(SDM)研究科の神武准教授には、大局的な研究の方向性から、論文の具体的な記述内容まで、研究活動全てにわたるご指導を頂きました。また社会人学生である私のために、手続き面などでも便宜を図って頂き、快適な環境で研究をすすめることができました。神武先生が主催されるスマートシステムデザインラボの所属学生は、学部卒業直後の若い学生から私同様の社会人学生まで構成が多様で、新鮮なアイデアや活力を頂きました。神武研の秘書の菅野さん、水野さんにも、細やかなアシストを頂き、論文を完成させることができました。

狼前 SDM 研究科委員長は、私の初めての国際学会発表時の座長をして頂いた以来のお付き合いです。SDM への入学申し込み前にご相談に伺い、「是非、博士課程に入学しなさい」と後押しして頂かなかっただら、この研究をスタートさせることはできませんでした。今なお、新しい領域に挑戦される狼先生からのご指摘は、奥が深く、気付きの宝庫でした。

山川教授と青木教授には、博士論文審査の副査をお引き受け頂きましたが、宇宙政策、宇宙法の第一人者のお二人に審査頂けたことだけでも、大変光栄なことです。青木先生には、法律は門外漢の私に、きちんと向き合い、丁寧に説明頂き、法律という新しい分野の理解が進みました。また別分野からの視点でのご指摘を頂き、研究の深みを持たせることができました。山川先生には、東京出張の合間を最大限に占有させて頂きました。また慶應/SDM 外からのご指摘には、ついつい見逃しがちな視点が含まれており、説明の完成度を高めることができました。

前野 SDM 研究科委員長、白坂教授、中野教授、日比谷 SDM 研究所顧問をはじめとする、SDM の教員の各位には、ゼミや授業を通じて、豊富な知識に基づく有益なご助言を頂きました。

JAXA と SDM とのデブリワーキンググループにより、この研究が加速させることができました。参加して下さった、辻田大輔氏、河本聡美氏、後藤大亮氏との議論は、大変刺激的で研究を進める意欲を新たにすることができました。

SDM を通じて、Purdue 大学に数週間滞在し、別の大学の学生達と交流したことも研究意欲の刺激となりました。

最後に、この留学を認め、業務との両立に様々なご配慮を頂いた NEC の近藤執行役員、木下元事業部長、春日前事業部長をはじめとする職場の皆さんに深く感謝いたします。SDM 在学は、私の人生の中で、大変貴重な時間となりました。

平成 30 年 3 月

大塚聡子

文献目次 (1/3 : 含む参照サイト情報)

- [1] Union of Concerned Scientists (UCS) Satellite Database
<https://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database#.WixT0kJrzIU>
- [2] IADC Space Debris Mitigation Guidelines
IADC-02-01 Revision 1 September 2007 (2007)
- [3] 国土交通省ホームページ
「海難残骸物の除去に関する国際条約」の採択について
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/10/100522_.html
- [4] International Council on Systems Engineering (INCOSE)
Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBOK)
[http://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_\(SEBoK\)](http://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))
- [5] http://iss.jaxa.jp/iss_faq/astronaut/astronaut_010.html
- [6] UNITED NATIONS Office for Outer Space Affairs
Online Index of Objects Launched into Outer Space, available at
http://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id=
- [7] One Web ホームページ
<http://www.oneweb.world/#home>
- [8] SKY AND SPACE GLOBAL ホームページ
<https://www.skyandspace.global/>
- [9] Los Angeles TIMES 掲載記事
‘Elon Musk and Richard Branson invest in satellite-Internet ventures’ (Jan. 16, 2015)
<http://www.latimes.com/business/la-fi-satellite-entrepreneurs-20150117-story.html>
- [10] Planet ホームページ
<https://www.planet.com/>
- [11] アクセルスペースホームページ
<https://www.axelspace.com/>
- [12] India Space Research Organisation(ISRO)ホームページ
<https://www.isro.gov.in/update/15-feb-2017/pslv-c37-successfully-launches-104-satellites-single-flight>
- [13] Elizabeth Buchen (Space Works):2014 Nano/Microsatellite Market Assessment
30 September, 2014,
<http://www.sei.aero/archive/IAC-14.E6.1.3.pdf>

文献目次 (2/3 : 含む参照サイト情報)

- [14] 2015 Commercial Space Transportation Forecasts
Federal Aviation Administration April, 2015
https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/Commercial_Space_Transportation_Forecasts_2015.pdf
- [15] D. Kessler et al.: Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt
Journal of Geophysical Research, Vol. 83, Issue A6, p.2637-2646 Jun, 1978
- [16] M. NAGATOMO: Some Considerations on Utilization Control of the Near Earth Space in Future,
9th ISTS, Tokyo 1971
- [17] 宇宙環境リスク事典 五家建夫 丸善(2006)
- [18] Orbital Debris Quarterly News Volume 21, Issue 1 February 2017
<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv21i1.pdf>
- [19] PMBOK, A Guide to the Project Management Body of Knowledge – Fifth Edition
Project Management Institute、2013
- [20] Vandenberg Air Force Base ホームページ
<http://www.vandenberg.af.mil/>
- [21] Liou, J. C.: An Active Debris Removal Parametric Study for LEO Environment Remediation
Advances in Space Research, 47(2011), pp. 1865-1876
- [22] Jakhu, R. et. al. : Active Debris Removal – An Essential Mechanism
for Ensuring the Safety and Sustainability of Outer Space, A/AC.105/C.1/2012/CRP.16,
UN COPUOS, 2012
<http://www.oosa.unvienna.org/oosa/en/COPUOS/stsc/2012/docs.html> (cited on 20 October 2014)
- [23] Kenji Saito et al.: Digital Currency Design for Sustainable Active Debris Removal in Space,
Cornell University Library, Oct. 2017 (2017)
<https://arxiv.org/abs/1710.05141>
- [24] http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150421_2/
- [25] 宇宙ビジネスのための宇宙法入門 小塚莊一郎・佐藤雅彦編著 有斐閣(2015)
- [26] 宇宙法ハンドブック 慶應義塾大学宇宙法センター 柳みどり編集室 (2013)
- [27] Ishii, K. Course Materials, Design for Manufacturability (ME317)
Stanford University. USA, 2003
- [28] 高橋大祐 海洋汚染事故における損害賠償実務と企業の法的・社会的責任
環境管理 Vol.49 No.9 p057-071
- [29] 佐久間敬一 国際油濁補償制度について
http://www.umitonagisa.or.jp/pdf/88-3_kokusaiyudaku.pdf (石油海事協会)

文献目次 (3/3 : 含む参照サイト情報)

- [30] 松橋隆治 京都議定書と地球の再生 日本放送出版協会
- [31] IPCC ホームページ <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>
- [32] UNFCCC ホームページ <http://unfccc.int/2860.php>
- [33] 金島正治 地球温暖化防止技術読本 オーム社(2007)
- [34] 「地球環境と安全保障」研究委員会報告書
2050年のサステナビリティ研究委員会 WG2(1996)
- [35] 南極をめぐる課題と南極条約
わかる！国際情勢 Vol.31 外務省
<http://www.mofa.go.jp/mofag/press/pr/wakaru/topics/vol31/index.html>
- [36] 南極条約
外務省文書
<http://www.mofa.go.jp/mofag/gaiko/treaty/pdfs/B-S38-P1-7-79.pdf>
- [37] Statement by Zainal Abidin (malaysia), UN Doc.A/C. 1/38/PV, 42 (28 November 1983)
- [38] Statement by Jacobs (Antigua and Barbuda), UN Doc. A/C. 1/41/PV, 49 (18 November 1986)
- [39] 柴田明穂 国際法形成フォーラムとしての南極条約協議国会議の『正当性』
国際法外交雑誌 99 巻 1 号(2000 年)
- [40] 柴田明穂 南極条約事務局設置の法的意義
岡山大学法学会雑誌 第 53 巻 第 3・4 号 p533 (2003 年)
- [41] 佐藤正武 国際電気通信精鋭機構の高級組織の発足
電気学会雑誌 J.I.E.E.U. 6/773 UDC 629.19 : 621.39 : 654.16(1973)
- [42] デブリ除去枠組み検討 WG 活動報告書
- [43] IADC Space Debris Mitigation Guidelines
http://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines-Revision1.pdf
- [44] Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space
<http://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS-GuidelinesE.pdf>
- [45] 加藤明 スペースデブリ 地人書館
- [46] Iridium ホームページ <https://iridium.com/network/globalnetwork>
- [47] FCC Greenlights Iridium Plan for Deorbiting Its 1st-generation Constellation
<http://spacenews.com/41898fcc-greenlights-iridium-plan-for-deorbiting-its-1st-generation/>

関連著作等リスト(1/2)

1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

Akiko Otsuka, Daisuke, Tsujita, Satomi Kawamoto, Daisuke, Goto, Naohiko, Kohtake, Yoshiaki Ohkami: Designing the International Framework for Active Debris Removal Operations, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN Vol. 14(2016) 30th International Space Technology and Science (2016)

和文題目：能動的デブリ除去(ADR)の運用国際枠組みの設計

日本航空宇宙学会論文誌

掲載日：2016年12月2日

Akiko Otsuka, Naohio Kohtake, Yoshiaki Ohkami: SYSTEM ENGINEERING ANALYSIS ON THE ACTIVE DEBRIS REMOVAL (ADR) ARCHITECTURE, Journal of Harmonized Research in Engineering 3(1), 2015, 28-36 (2015)

和文題目：能動的デブリ除去(ADR)の運用アーキテクチャに関するシステム分析)

掲載日：2015年1月29日

2. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）

Akiko Otsuka, Yoshiaki Ohkami: System Architecture of the Active Debris Removal (ADR), The Council of Engineering Systems Universities (CESUN) 2014 4th International Engineering Systems Symposium (2014)

和文題目：能動的デブリ除去(ADR)のシステムアーキテクチャ

Akiko Otsuka, Yoshiaki Ohkami: Proposal of Space Debris Indemnification Fund, 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation System (ITSC) (2014)

(<http://ieeexplore.ieee.org/document/6957693/>) 2017年11月30日閲覧

※The Asia-Pacific Council on Systems Engineering Conference (APCOSEC)2014

和文題目：デブリ賠償基金の提案

Akiko Otsuka, Masanobu Nishio, Fumihiro Kuwao, Yasuhumi Wakabayashi, Naoki Satoh : Ground Validation of JEMRMS, i-SAIRAS2003 International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space (iSAIRAS) (2003)

(国際宇宙ステーションきぼうロボットアームの地上検証)

関連著作等リスト(2/2)

2. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）（続き）

Akiko Otsuka, Yasuo Shinomiya, Shin-ichiro Nishida, Yoshitsugu Toda, Toshiaki Iwata, Kazuo Machida : The Manipulator Control System For Space Robots, Automatic Control in in Space 11th International Federation of Automatic Control (IFAC) (1989)

(宇宙ロボットのためのマニピュレータ制御系)

Akiko Otsuka, Hidetoshi Toriu, Yasuo Shinomiya, Toda Yoshitsugu, Toshiaki Iwata, Kazuo Machida : Development of Flying Telerobot Model for Ground Experiments, 42th congress of the International Astronautical Federation (IAF) (1989)

(自由飛行型テレロボット開発のための地上試験装置)

3. その他の国際会議発表

Akiko Otsuka: Space Environment Experiments～Active Debris Removal, International Symposium on Sustainable Space Development and Space Situational Awareness (S2DS2A 2015), (2015)

4. その他

大塚聡子、 辻田大輔、 河本聡美、 後藤大亮、 神武直彦、 狼嘉彰 : デブリ除去研究の現状、第 58 回 宇宙科学技術連合講演会 (2014 年 11 月)

辻田大輔、 河本聡美、 後藤大亮、 大塚聡子、 神武直彦、 狼嘉彰 : デブリ除去枠組み検討、第 58 回 宇宙科学技術連合講演会 (2014 年 11 月)

後藤大亮、 河本聡美、 辻田大輔、 大塚聡子、 神武直彦、 狼嘉彰 青木節子 : デブリ除去のための法体系などの研究、第 58 回 宇宙科学技術連合講演会 (2014 年 11 月)

大塚聡子、 白坂成功、 狼嘉彰 : デブリ除去ミッションの法律面の考察、第 57 回 宇宙科学技術連合講演会 (2013 年 11 月)

大塚聡子、 桑尾文博、 峰正弥、 仁田工美 : デブリ除去ミッション事業のプロジェクト考察、第 56 回 宇宙科学技術連合講演会 (2012 年 11 月)