

深宇宙OTV：輸送系の太陽系探査

（コミュニティ）

（への貢献の仕方）

：太陽系探査のための輸送システム

丸 祐介, 佐伯孝尚, 津田雄一, 野中 聡

JAXA宇宙科学研究所

ISAS宇宙輸送系専門委員会 =工学GDI輸送サブ

第25回惑星圏シンポジウム(SPS2024)

2024.2.21

伝えるべきメッセージの検討（要旨に代えて）

- 狭義の輸送系（ロケット屋）の目標は再使用→目的は低コスト（高頻度），双方向
- 現在のロケットの低コストの手立ては，標準化・共用化→cf)打ち上げロケット
- 宇宙空間の航行機能に「標準化・共用化」を適用する→輸送系コミュニティのやるべきこと，輸送系の仕事
- 軌道間輸送ネットワーク：輸送系研究コミュニティの使命，打ち上げロケットだけじゃなく，軌道上輸送も守備範囲
- DSOTVは，究極にネットワーク化された世界では必須，ただ，今はどうか？解があるかわからない
 - メリット：低コスト？共用性の概念敷衍～輸送系研究
- （それでも）宇宙科学における軌道間輸送ネットワークの始め方→深宇宙OTV.
- 宇宙科学の枠組みでの始め方：ミッション立ち上げ，プロジェクトに絡む，→次世代小天体SRでの輸送機／着陸機構想
- OTVの分類図：打ち上げロケットも軌道間輸送機，地上の輸送システムとのアナロジーで考えると，末端にいくほど（需要が減り，あるいは多様化するので）標準化・共用化は難しい（複数の標準が必要）
- ロケットとの比較，アナロジー
 - 境界条件，OTVは両端自由，現DSOTV検討では，地球側を固定している（ロケットを決める），**STARMINEの時の考え方**
 - ペイロードインターフェース規格の項目，これのDSOTV版？→足りてないのは：熱，電力
- 探査ミッションの輸送機に求められる機能はそもそも何か？共用すべき機能は何か？→工学GDI探査サブでの検討
- 次世代小天体SRでの検討状況から
 - 行ける範囲～ ΔV
 - 推進系への要求→必要最大推力／トータルインパルス，推力調整→（電動）ポンプ
 - 構造面への要求→フットプリントだけあれば良いのか？パッチ当ての場合，パッチの当て方も標準化されるべき
 - ランデブードッキング→探査の観点，輸送の観点：双方向性→必然的
- 今すべきこと→共用による無駄の定量化，メリット（究極的にはコストだが・・・）との比較
 - 多様な太陽系探査を限られた機会ですべて進めていくか，一つ一つの探査機を少しずつ安くする必要性→DSOTV
- （遠い）将来：再使用→軌道上再補給→探査の観点でメリットあるか？

輸送系（コミュニティ）の使命

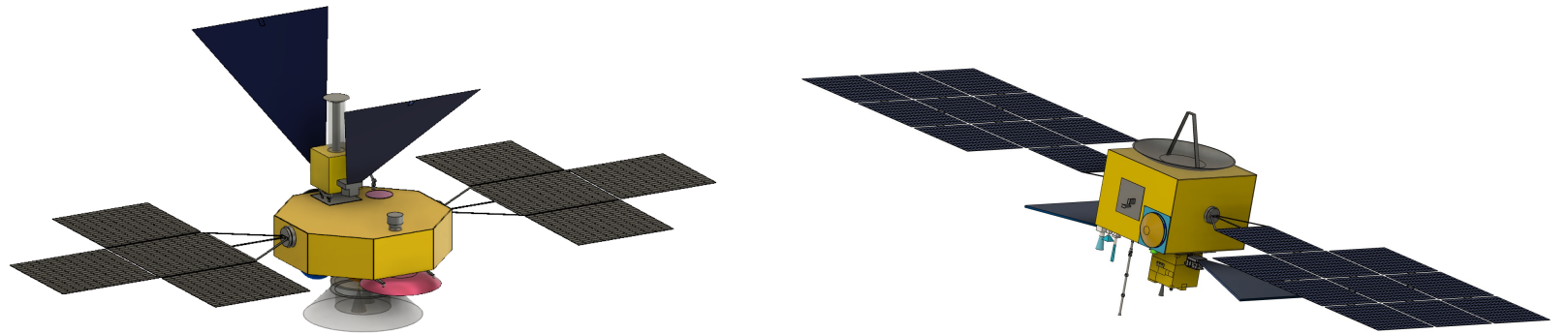
宇宙科学の現場におけるDSOTV

DSOTVの本質：共用性を如何に実現するか

まとめ：輸送系の太陽系探査への貢献

内容

1. 輸送系コミュニティの使命
2. 宇宙科学の場における深宇宙OTV
3. 深宇宙OTVの本質：共用性を如何に実現するか
4. まとめ：輸送系の太陽系探査への貢献



宇宙輸送系のゴール

■ 宇宙輸送のゴール～宇宙活動のゴール

✓ **低コスト**

✓ 双方向（往還）

■ 低コスト化の手段？

✓ 再使用→将来輸送系；双方向の手段でもある

✓ **標準化／共用性**：現在の打ち上げロケット

■ 宇宙空間の航行機能に「標準化・共用性」の概念を適用する

✓ 特に、深宇宙まで航行する機能に適用
→「深宇宙OTV」

宇宙輸送系コミュニティの仕事

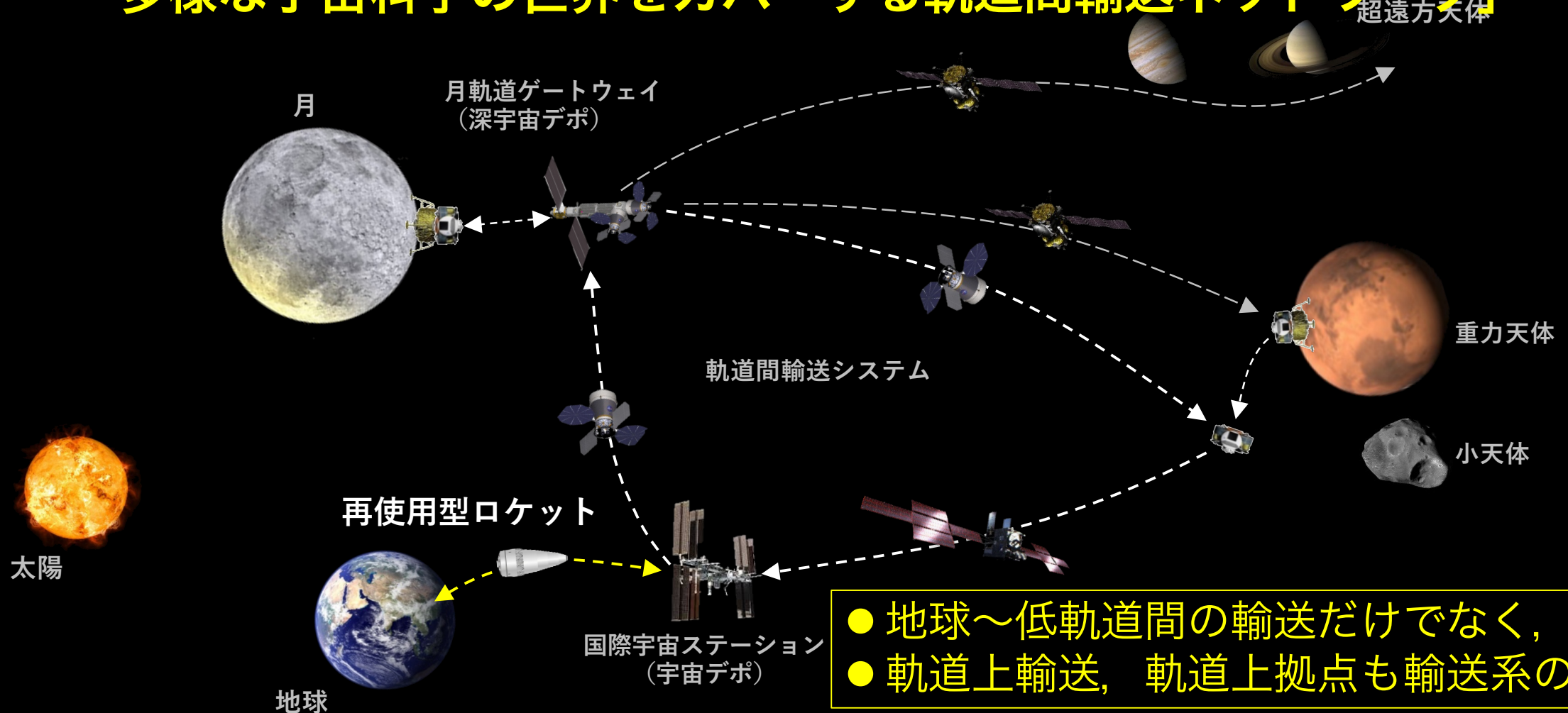


長友信人「宇宙活動の新しい展開」(1988)より
元は、宇宙開発委員会長期政策懇談会報告、
「宇宙開発の新時代を目指して」昭和62年

Fig. 1 General view of space activities in the 21st century¹⁾

輸送系コミュニティの究極の目標：

「多様な宇宙科学の世界をカバーする軌道間輸送ネットワーク」



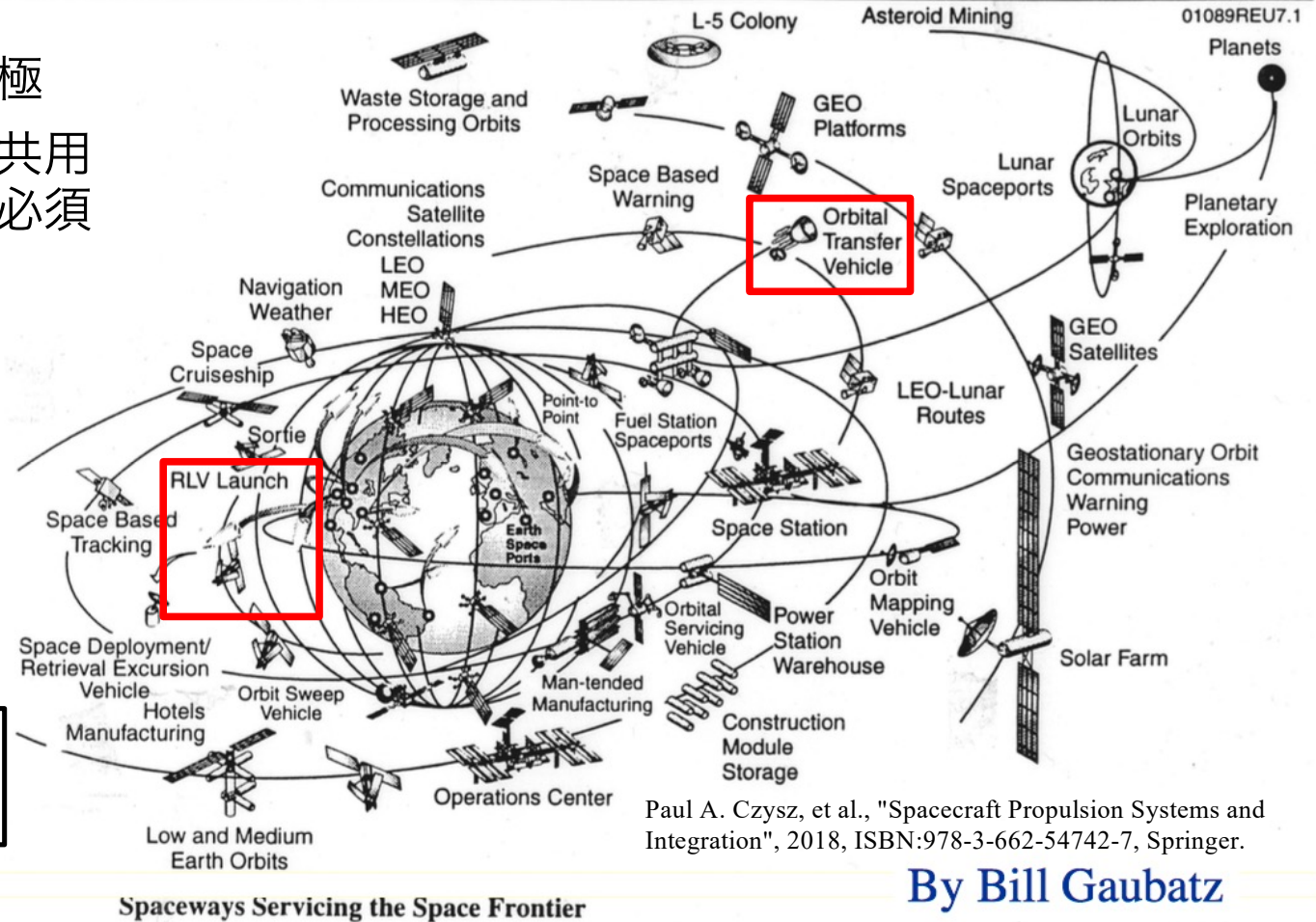
- 地球～低軌道間の輸送だけでなく、
- 軌道上輸送, 軌道上拠点も輸送系の範疇

宇宙科学・探査ロードマップ (B改訂)

<https://www.isas.jaxa.jp/researchers/info/files/RSQ-2019004-0B.pdf>より

軌道間輸送ネットワークに向けて…

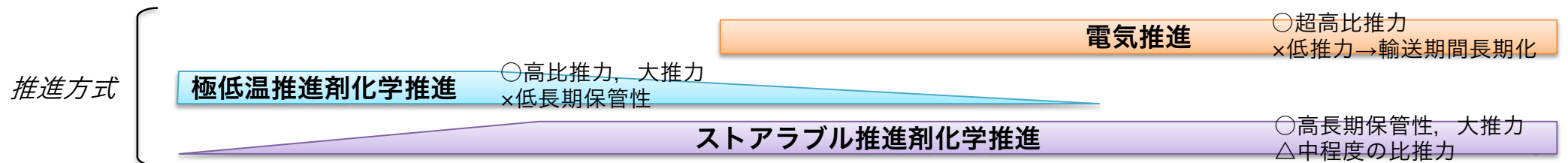
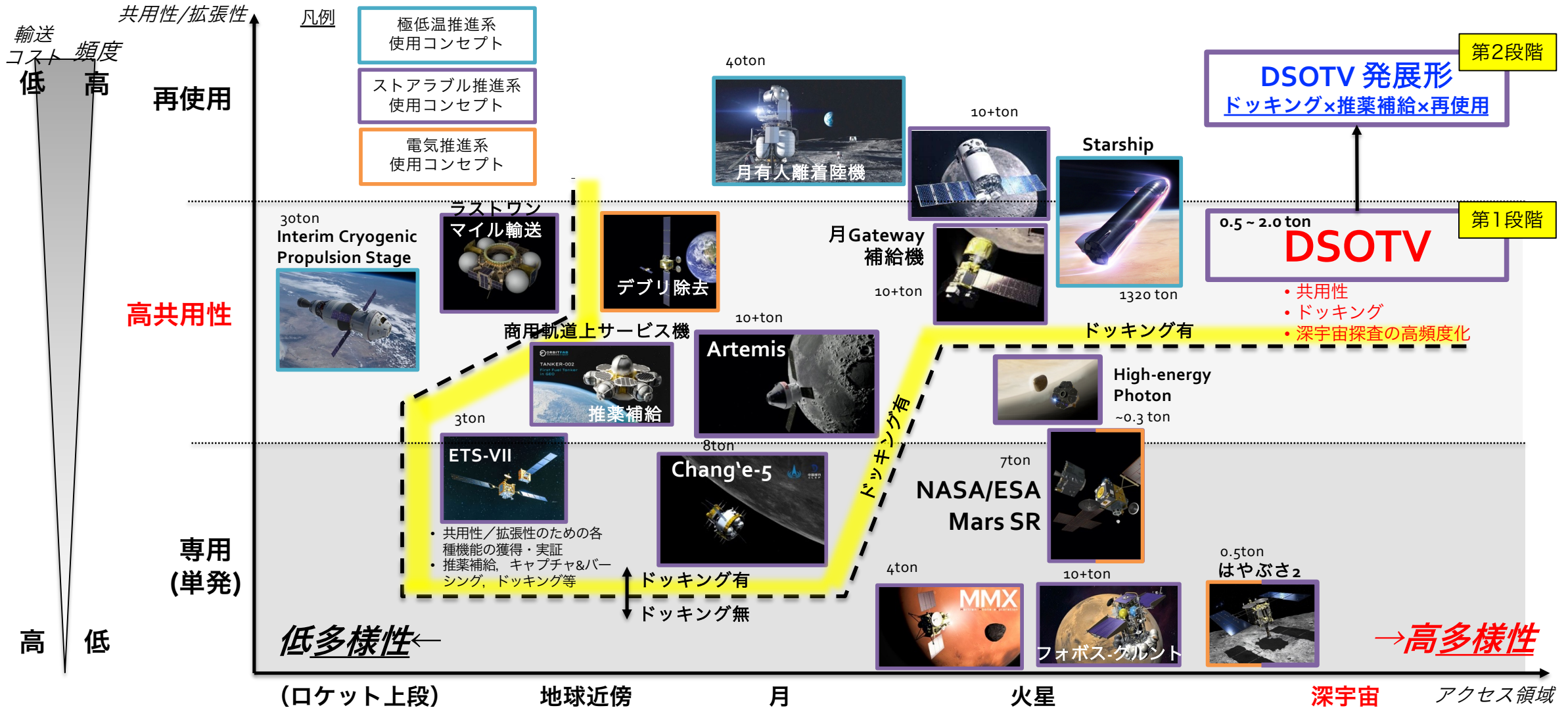
- 軌道間輸送ネットワーク：低コストの究極
- 軌道間輸送ネットワークでは、標準化／共用化（あるいは再使用化）された輸送機は必須
 - ただ、今はどうか？
 - 解があるかわからない。けど…
- 第一歩目をどうするか？
- 宇宙科学の場で何を始められるか？



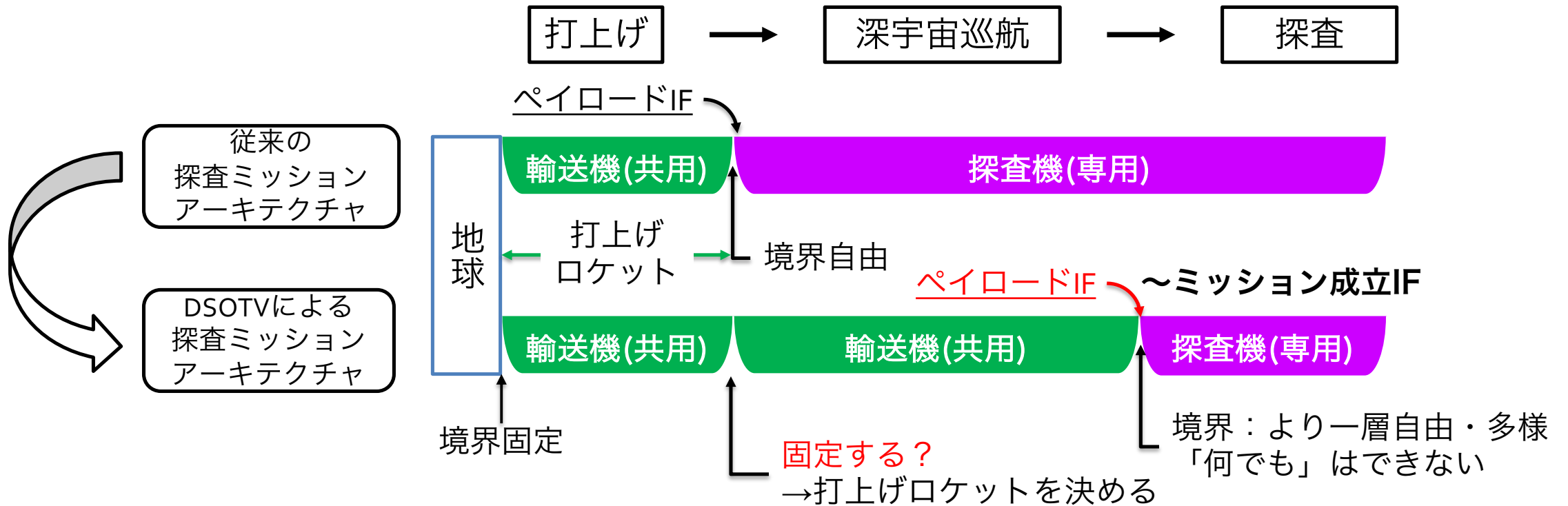
深宇宙への宇宙輸送機能の標準化／共用化
=深宇宙OTV (DSOTV)

宇宙科学の場での始め方
太陽系探査ミッションで、DSOTVを始めてみる

次世代小天体SRミッションの
「輸送機」検討



輸送と探査の分界点の“パラダイムシフト”



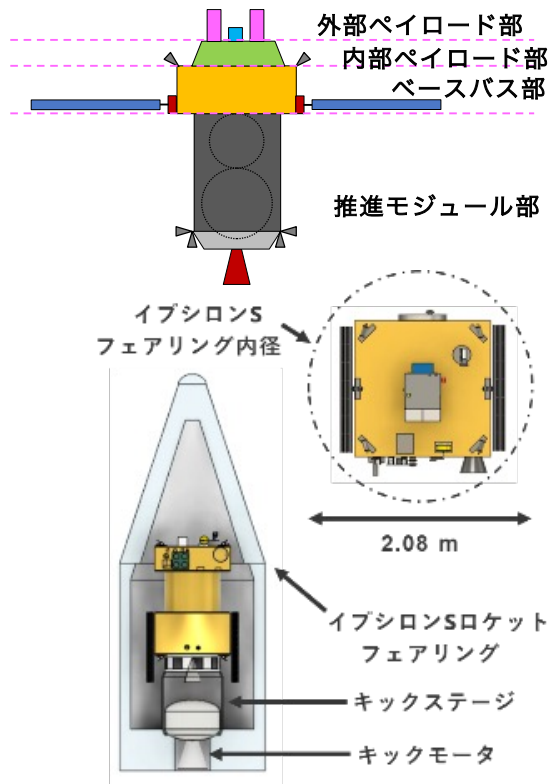
- 深宇宙OTVの検討
- 境界（守備範囲）を定めること
 - 境界のIFを考えること（共用性の功罪の定量化）

公募型小型(2022.8)に提案した「STARMINE」

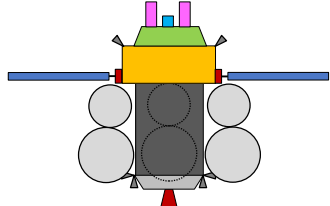


イプシロン打上げ
(公募型小型)

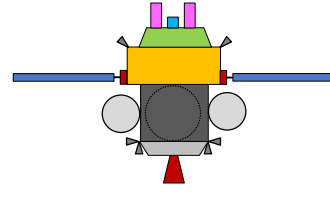
H3打上げ
(戦略的中型)



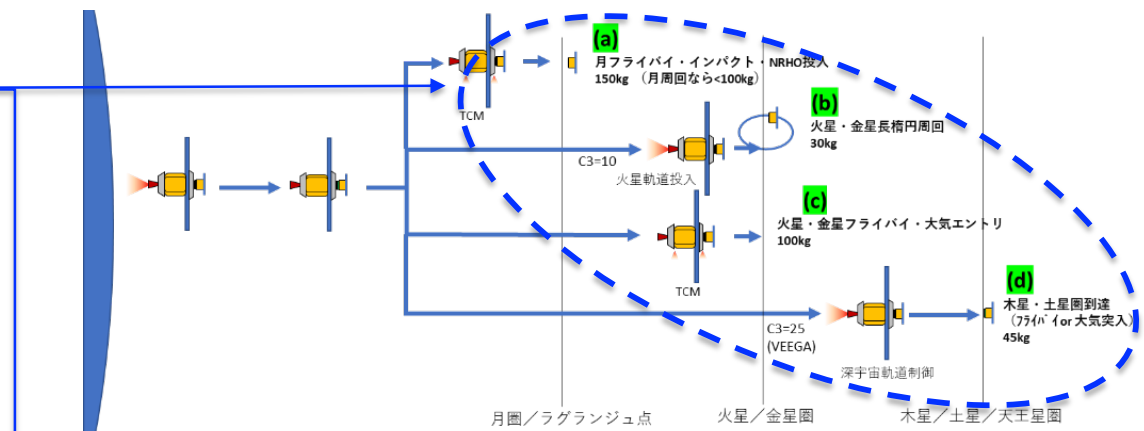
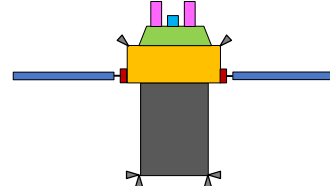
例1) 推薬量 1ton級に増量



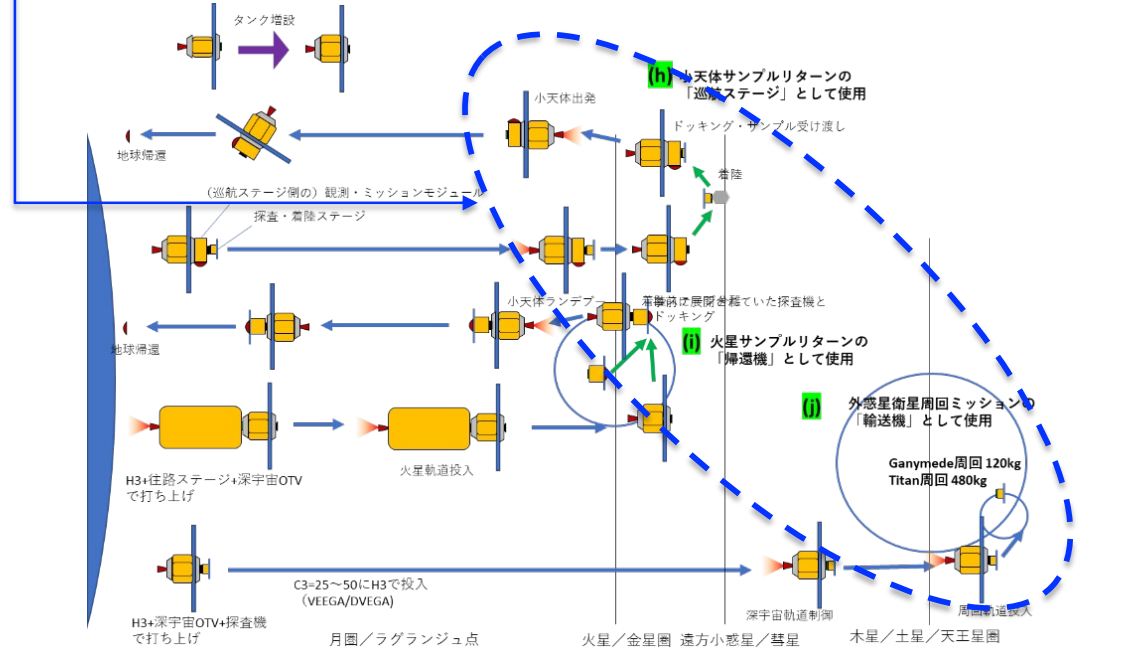
例2) 推薬量同じまま高さ低減



例3) 推薬量1ton級, OMEなし,
スラストチューブ内側をペイロード空間化



▲DSOTV基本形態, **イプシロン**打ち (公募型小型ミッション想定)



▲DSOTV推薬増量形態, **H3**打ち (戦略的中型ミッション想定)

ロケットのペイロードIF, アナロジー

打上げロケットのペイロードIF項目の規格 (ISO 15863)

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 4. 機械的インタフェース | 8. 環境 |
| 4.1. 座標系 | 8.1 機械環境 |
| 4.2 ペイロードの固有振動数 | 8.2 温度及び湿度環境 |
| 4.3 ペイロード包絡域 | 8.3 圧力環境 |
| 4.4 分離部のインタフェース | 8.4 アウトガス及びコンタミネーション |
| 4.5 アンビリアルコネクタと分離スイッチ | 8.5 電波放射と電磁的環境 |
| 4.6 パージと流体継手インタフェース | 8.6 環境モニタ |
| 4.7 フェアリング内への衛星アクセス | |
| | 9 検証試験 |
| 5. 電氣的インタフェース | 9.1 ペイロードの機械環境適合試験 |
| 5.1 アンビリアル系統 | 9.2 衛星とロケットの適合性確認試験 |
| 5.2 アンビリアルコネクタ | |
| 5.3 アンビリアル信号I/F | 10 射場整備作業 |
| 5.4 ロケットからペイロードへの電氣的コマンド | 10.1 射場施設設備 |
| 5.5 分離ステータスのテレメトリモニタ | 10.2 射場整備作業 |
| 5.6 衛星のロケット飛行中のテレメトリ | 10.3 射場作業時の制約条件 |
| 5.7 ロケットから衛星への電力供給 | 10.4 射場サービス |
| 5.8 接地及び電氣的連続性 | |
| | 11 標準スケジュール |
| 6. 電波および電磁的インタフェース | 11.1 打上げ輸送サービス期間 |
| 6.1 電波、電氣的システムの特性 | |
| 6.2 RFテレメトリとコマンド回線 | |
| | |
| 7 ロケット機体と衛星のミッション特性 | |
| 7.1 ペイロード特性データ | |
| 7.2 飛行経路及び性能解析 | |
| 7.3 ロンチウインドウ | |
| 7.4 衛星の分離 | |

軌道上輸送で足りていない項目

(輸送機自身での課題；航行道中の課題)

- 熱
- 電力
- 放射線環境
- ...

検討すべきこと

- DSOTVの境界条件を仮定し、
- そのときのペイロードIFを検討してみる

他の輸送機とのアナロジー？

- 地球近傍のOTVのペイロードIFは？
- HTV-X(G)は？

→DSOTVとは、
境界条件の明確さで差違あり

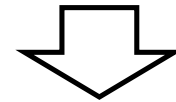
探査ミッションの輸送機に必要な機能

2. DSOTVを起点にしたミッション案・着陸系

2022年度探査サブでのミッション案 (第4回資料より)		dsotvだったらどのようなミッションになるか	DSOTV拡張機能 (タンク、通信、太陽電池など) の必要性	DSOTVを使わない場合はどうなるのか？あるいは理想とは一線を画す？ (※「ミッションに特化したシステムにはできるがコスト増・信頼性低下」というのは共通なので、それ以外で、特記事項があれば追記いただく。)
表面探査 (標準)	比較的平坦な地に着陸し、ローバ等を用いて、標準的な表面探査をおこなう。	<ul style="list-style-type: none"> 火星表面への標準的な直接着陸探査 (軟着陸+ローバ+地下探査) を実現するためには、500~1000kg※の突入機質量が必要となり、OTVで実現するには、惑星間軌道から直接の大気圏突入をすることになる。OTVは周回軌道に入れないので、OTVの役割はそこまでとなり、1機目としてのOTVの自在性は活かせない (が、2機目以降はコスト低減化)一方で、EDL技術のリスクが非常に高いミッションとなり、このミッションの実現のためには、EDL技術への投資が大規模になる。 	<ul style="list-style-type: none"> エアロブレーキ多用 DSOTV側ではないが、EDLシステムの小型化が必須、あるいはEDL搭載用のスペースが必須。 火星探査であれば、共通通信機器 (Electra) もDSOTVに搭載する？ 	<ul style="list-style-type: none"> 火星本体への惑星間軌道からの直接大気圏突入というリスクの高いミッションを一発勝負で実施することになる。世界の情勢を見ても、成功確率は高くはないので、もし失敗した場合、あとに残すものが少なくて、宇宙開発全体へのダメージは大
表面探査 (発展)	傾斜地や非整地への着陸、飛行による移動など、発展的な表面探査をおこなう。			

検討の問い@工学GDI探査サブ

- DSOTVを使うと、どういう探査ミッションになるか？
- DSOTVに必要な機能？
- DSOTVを使わないとどうなるか、どういうことが考えられるか？



DSOTVによって、探査機を、様々な軌道に輸送・分離・通信中継できること

- 搭載デッキ
- 分離機構 (＜ランデブー・ドッキング能力)
- 中継通信機能 (国際標準との整合)

これらをIF項目として定量的に決められるか？

2. DSOTVを起点にしたミッション案・非着陸系

2022年度探査サブでのミッション案 (第4回資料より)		dsotvだったらどのようなミッションになるか	DSOTV拡張機能 (タンク、通信、太陽電池など) の必要性	DSOTVを使わない場合はどうなるのか？あるいは理想とは一線を画す？ (※「ミッションに特化したシステムにはできるがコスト増・信頼性低下」というのは共通なので、特記事項があれば追記いただく。)
多点探査	コンステレーション、フォーメーションフライトなど、複数の探査機を用いた軌道上の観測をおこなう。	<p>(船瀬先生)</p> <ul style="list-style-type: none"> Astromine (尾崎・兵頭) のような多数機の深宇宙コンステ。地球スイングバイを繰り返しながらそれぞれの探査機が別の小天体をフライバイ探査する。打上げC3は〇〇程度。(記述は要update by 尾崎) <p>(坂本先生)</p> <ul style="list-style-type: none"> 火星圏などでのコンステレーション (どんな観測ニーズ?) : A-train (含「しずく」) のような集約的観測データ取得。Themis, Geotail, LANLのような磁気圏多点同時観測。 <p>(吉光先生)</p> <ul style="list-style-type: none"> 小天体SRと同じである。ローバ、ペネトレータと同じく、軌道上で小型衛星を分離してばら撒く。その後は中継衛星として活用する。 	<p>(坂本先生)</p> <ul style="list-style-type: none"> 超小型衛星の軌道投入のための分離機構 	
エアロキャプチャ	大気制動を用いて惑星間軌道から周回軌道に探査機を投入する。	<ul style="list-style-type: none"> エアロキャプチャ技術の実証ミッションでは、目標天体まで実験機を輸送して、正確な軌道に実験機を投入することがOTVへの要求になる。 DS-OTVで実施するのであれば、このミッションだけでなく、複数のミッションを相乗りして、エアロキャプチャ実験機を切り離れたあとに、OTVも軌道に入って、他のミッションもこなすようなミッションを考えるとよい。エアロキャプチャ実験機とOTVの2つの周回機が連携したミッションが考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 正確な突入軌道に実験機を投入し、その後、軌道から離脱する機能。 	
惑星大気S&R	惑星フライバイ時に大気をかすめて飛行し、惑星大気のサンプルを取得し地球に持ち帰る。	<ul style="list-style-type: none"> エアロキャプチャと同様で、目標天体までサンプル取得装置を輸送して、それを正確な軌道に実験機を投入することがOTVへの要求になる。ただ、OTVが直接大気圏 (サンプルが浮遊している高度) まで突入することが現実的でないよ 	<ul style="list-style-type: none"> 子機方式を取らない場合は、OTV本体が大気圏に入れることを要求するが、ダストがある高度まで下れようとする (太陽電池の保護) 	

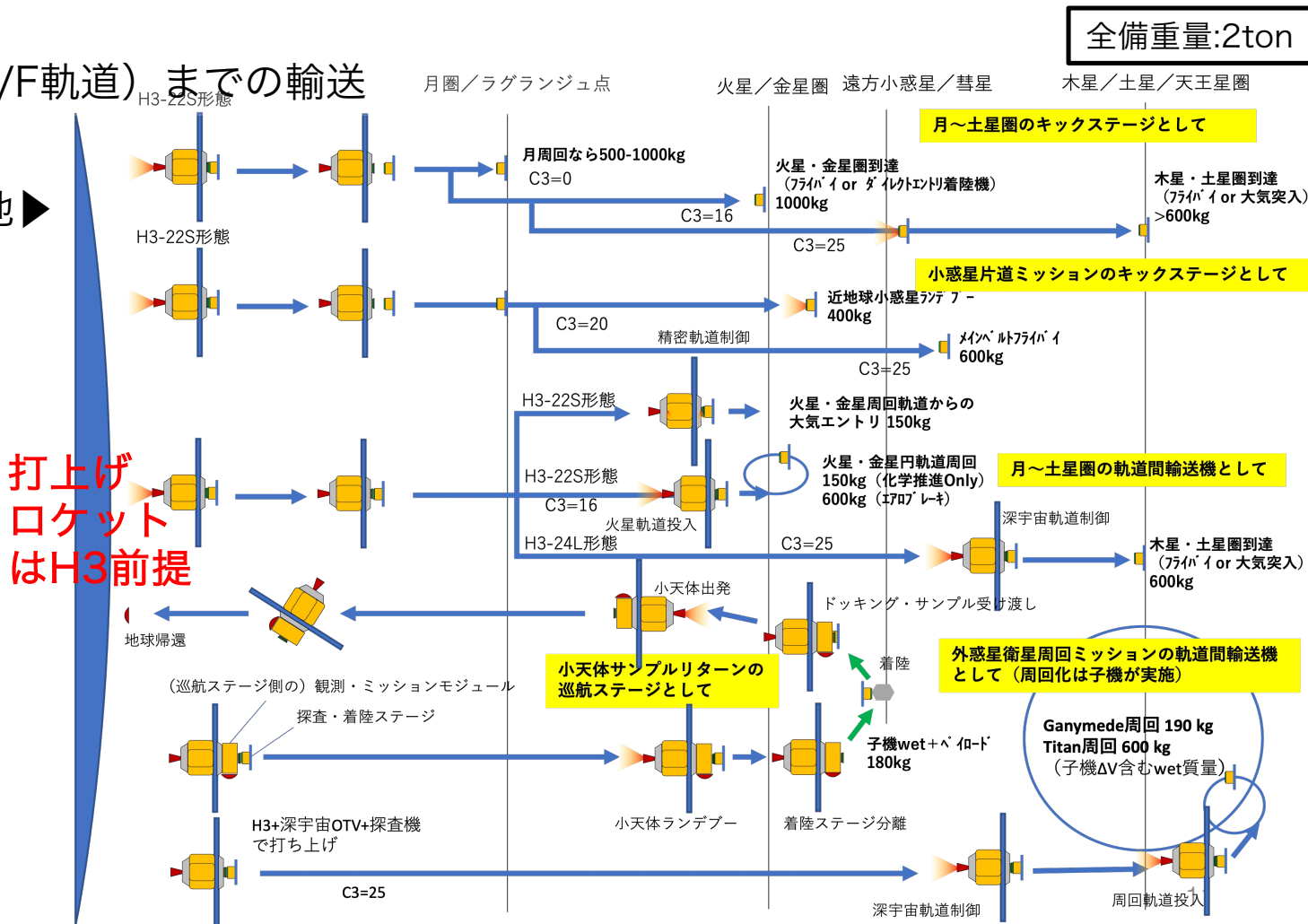
次世代小天体SRミッションで始めるDSOTV検討

■ スcope = 大枠の境界条件設定

- ① 火星軌道投入能力を有するオービター
- ② 遠日点6au距離の小天体往還巡航機
- ③ 超小型機の深宇宙輸送3.5au（外惑星I/F軌道）までの輸送

■ 想定scopeで、DSOTVが行ける目的地

- ✓ ΔV とペイロード質量の関係
- ✓ この裏で、**熱**や**電力**等の成立が必要



深宇宙OTVの共用コンフィグレーション (イメージ)

- Wet質量2000kg, Dry1000kg, 子機100kg
- ロケットは, H3-22S形態を想定
- 総増速能力 (ΔV) $\sim 2\text{km/s}$ 程度
- 親機: 汎用巡航機 (金星 \sim 木星域をカバー)
子機: 着陸機 (複数回着陸 \cdot レーダー地中探査)

着陸機の分離/結合

次世代小天体SR
輸送機/着陸機形態の探査ミッション

必要な技術

- 分離 \cdot 結合
- 周回 \cdot 滞空
- 編隊飛行

火星着陸機の輸送

火星着陸機

必要な技術

- 分離
- 周回 \cdot 滞空
- 編隊飛行

超小型機の深宇宙輸送ミッション

複数の天体, 複数の軌道へ同時に
超小型深宇宙探査機を輸送

必要な技術

- 分離 \cdot 結合
- 周回 \cdot 滞空
- 編隊飛行

ペイロードIF項目への整理とその定量化?

DSOTVの必要機能—オプションな項目, 自明ではない項目

■ 推進系観点

- 推進方式：極低温／ストアラブル／電気／固体／液固体ハイブリッド
 - ✓ NASA/ESA Mars SRでの検討例→ストアラブル化学／電気併用
- 必要最大推力（軌道投入で大推力必要）／トータルインパルス（総 ΔV ）
 - ✓ 推力調整→（電動）ポンプ方式

■ 構造系観点

- フットプリントだけあれば良いか？（ペイロードIF）
- パッチ当て対応→パッチの当て方も標準化されるべき

■ ランデブードッキング機能

- 探査の観点→親機子機（輸送機／探査機分離）方式
- 輸送の観点→双方向性（輸送系の究極目標：軌道間輸送ネットワークから必然的）

まとめ：輸送系の太陽系探査への貢献

- 輸送系の目的の一つは**低コスト**。標準化／共用化は低コスト化の**手段**。
- 遠い将来の究極の目標：軌道間輸送ネットワークに向けた第一歩→次世代小天体SRで始める深宇宙OTV検討
- 深宇宙OTVを考える：
 - ◆ **境界**（守備範囲）を定めること
 - ◆ 境界のIFを定量化すること=共用性の**功罪**の定量化
- 多様な太陽系探査を、限られた機会でどのように進めていくか
 - ◆ 低コストがキーワードの一つ？→深宇宙OTV
 - ◆ 深宇宙OTVを育てていく（柔軟さを残す）戦略はあり得るか？

Focus of the Symposium 2024

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy

行き先

Splinter meetings

どこまでをカバーすべきか？
最も効果的な最大公約数は？

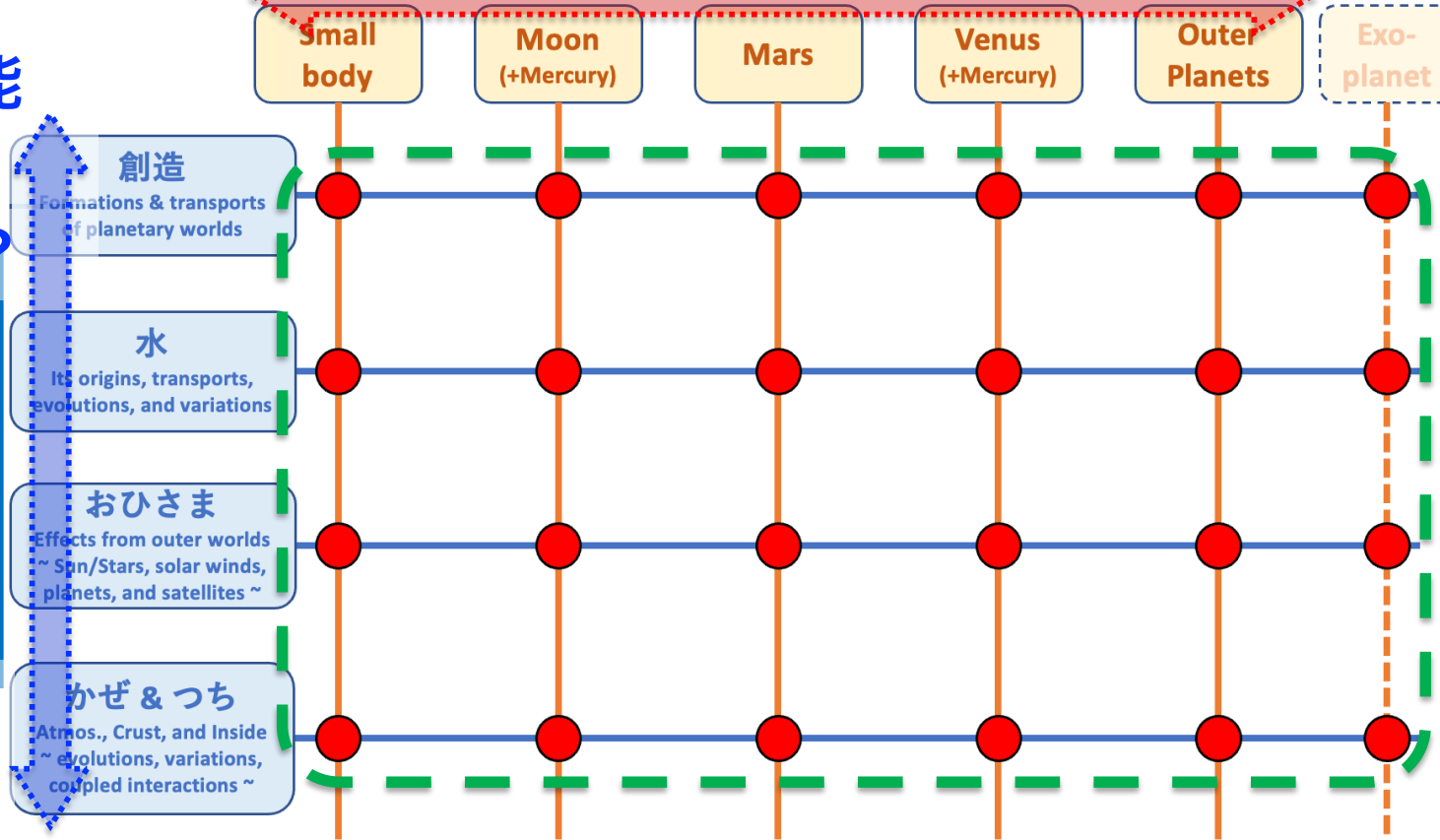
探査機（輸送機）
が具備すべき機能
は何か？

何を共用するか？

探査の
種類

Cross-Boarder sciences

共用化による
「無駄」はどこ
まで許容できる
か？



理想は
全領域カバー

現実的な境界線
をどう引くか

Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

DSOTVの守備範囲

