

# 小型科学衛星LiteBIRDのシステム要求分析III

JAXA小型科学衛星LiteBIRDワーキンググループ

竹井 洋, 福家 英之, 松原 英雄, 満田 和久, 山崎典子, 吉田 哲也, 坂井真一郎, 佐藤 洋一, 篠崎 慶亮, 杉田 寛之, 四元 和彦, 河野 功, 野田 篤司 (JAXA)

石野 宏和, 樹林 敦子, 岐部 佳朗, 三澤 尚典, 美馬 覚 (岡山大)

Adnan Ghribi, William Holzapfel, Bradley Johnson, Adrian Lee, Haruki Nishino, Paul Richards, Aritoki Suzuki (カリフォルニア大バークレー校)

Julian Borrill (ローレンスバークレー研究所)

大田 泉 (近畿大)

吉田 光宏, 石徹白 晃治, 片山 伸彦, 佐藤 伸明, 田島 治, 茅根 裕司, 永井 誠, 永田 竜, 羽澄 昌史, 長谷川 雅也, 服部 香里, 松村 知岳, 森井 秀樹, 木村 誠宏, 鈴木 敏一, 都丸 隆行 (KEK)

井上 優貴, 清水 景絵, 渡辺 広記 (総研大)

小松 英一郎 (テキサス大オースティン校)

鵜澤 佳徳, 関本 裕太郎, 野口 卓 (国立天文台)

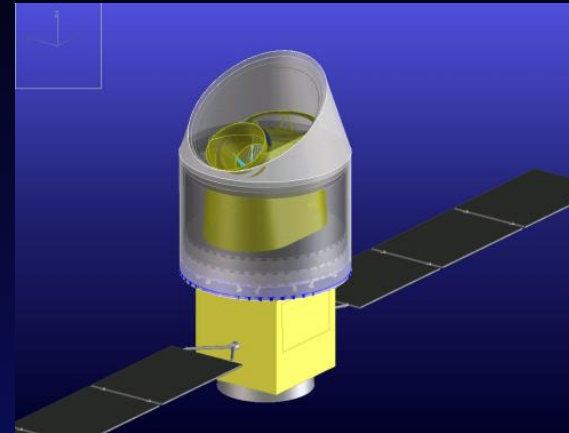
服部 誠 (東北大)

高田 卓 (筑波大)

Matt Dobbs (マギル大)

夏目 浩太, 村山 慧, 高木 雄太, 中村 正吾 (横国大)

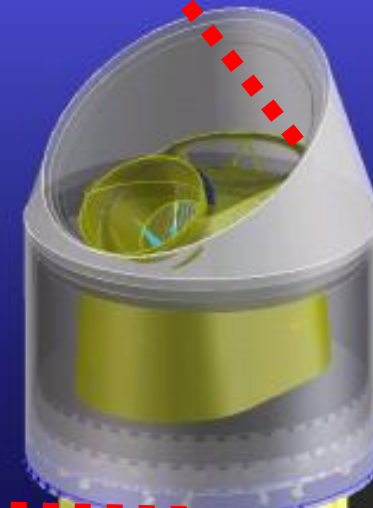
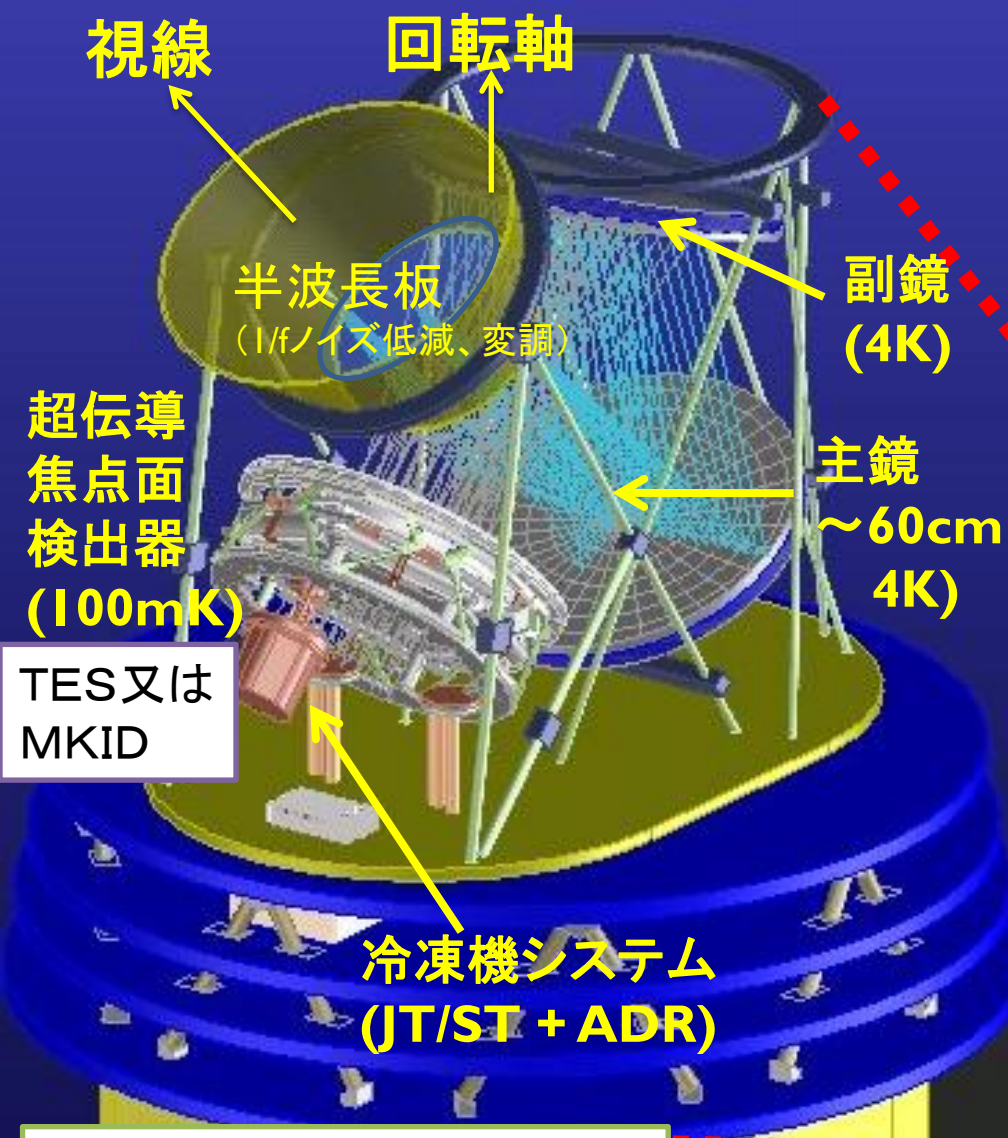
大谷 知行 (理研)



コンサルタント: 小玉英雄 (KEK)、中川貴雄 (JAXA)、川邊良平 (NAOJ)

# LiteBIRDとは

- 2020年頃の打ち上げを目標とするミリ波 (50–250GHz) の偏光度全天観測衛星
- 宇宙背景放射 (CMB) 偏光Bモード観測によるインフレーションと量子重力検証
- 地上観測 (POLARBEAR、GroundBIRD) で実証した技術を使用



軌道:  
LEO 500km程度  
(L2オプションも  
検討中)

ソーラーパネル

小型衛星  
標準バス

重量目標: 450kg  
電力目標: 500W

SPICA(予冷)、  
X線ミッション(ADR)  
と冷凍技術の共有・効率化

# LiteBIRDのミッション

- 代表的インフレーションモデルを完全に検証

- テンソル・スカラー比 $r$ の誤差(統計 $\oplus$ 系統 $\oplus$ 前景放射 $\oplus$ 重力レンズ)への要求

$$\delta r < 0.001 \quad (\text{full success})$$

## No lose theorem of LiteBIRD

- 代表的インフレーションモデル(=Single-Large-Field Slow-roll Model)の多くは $r > 0.01$ を予言

- 10 $\sigma$ 以上で原始重力波発見

- インフレーションエネルギー決定

3 $\sigma$ 発見領域

$$V^{1/4} = \left( \frac{r}{0.01} \right)^{1/4} \times 1.1 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

- 代表的インフレーションモデルでは $r \gtrsim 0.002$  (Lythの関係式による下限)

- LiteBIRD原始重力波が見えない場合、代表的インフレーションモデル棄却

- 地上で先に兆候があった場合( $r$ が比較的大きい場合)

- スペクトルの測定(標準宇宙論と比較、予期せぬ発見の可能性)

# これまでの物理学会発表

- ミッションの説明
- サブシステム設計進行状況
  - 軌道： L2とLEOの比較
  - 焦点面検出器アレイ： TESオプションの具体例、TES以外の検出技術R&D
  - 光学系： 反射光学系の具体例
  - テレメトリー： 機上データ圧縮と転送レート of 具体例
  - スキャン： コマ状スキャンの具体例
- システム要求の再定義
  - 測定誤差の要因(以下の4つ)のそれぞれについて考察
    - 統計誤差
    - 重力レンズBモード
    - 系統誤差
    - 前景放射 →  $r < 0.001$  達成

# 本発表の内容



## 1. 要求分析のシステムエンジニアリング

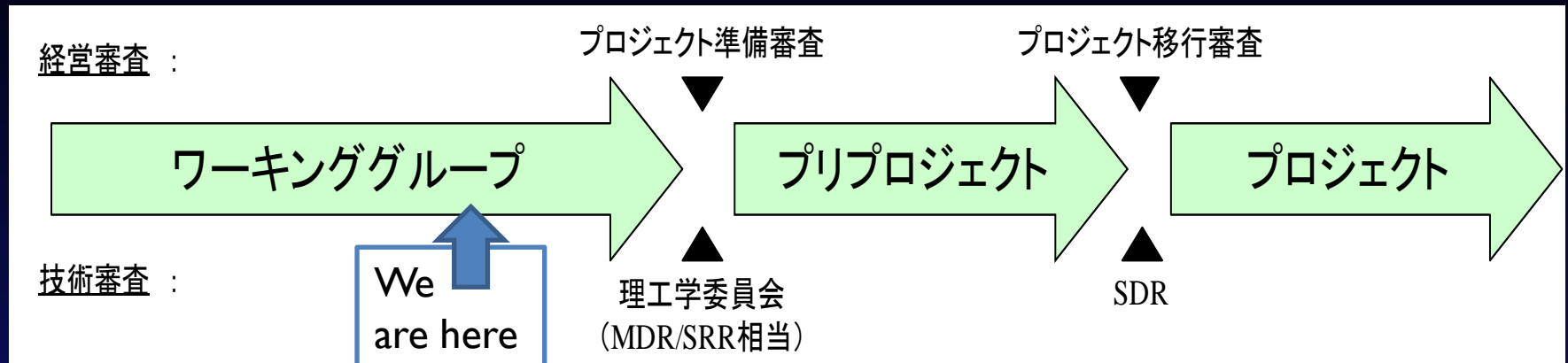
- 概要
- 具体例: テレメトリー要求設定

## 2. 成立性検討から要求分析へのフィードバック

- 概要
- 具体例: 鏡の大きさ

# 1. 要求分析のシステムエンジニアリング

- JAXAのMission Design Support Group (MDSG)の支援を得て実施
- JAXAの正統的システムエンジニアリング手法に基づいて実施
  - 「壊れたとき現場にいて直せないモノ」のモノ作りに関する知恵の集積
- プリプロジェクト化以前の作業を定義し、その一部として実施



# MDSGの紹介

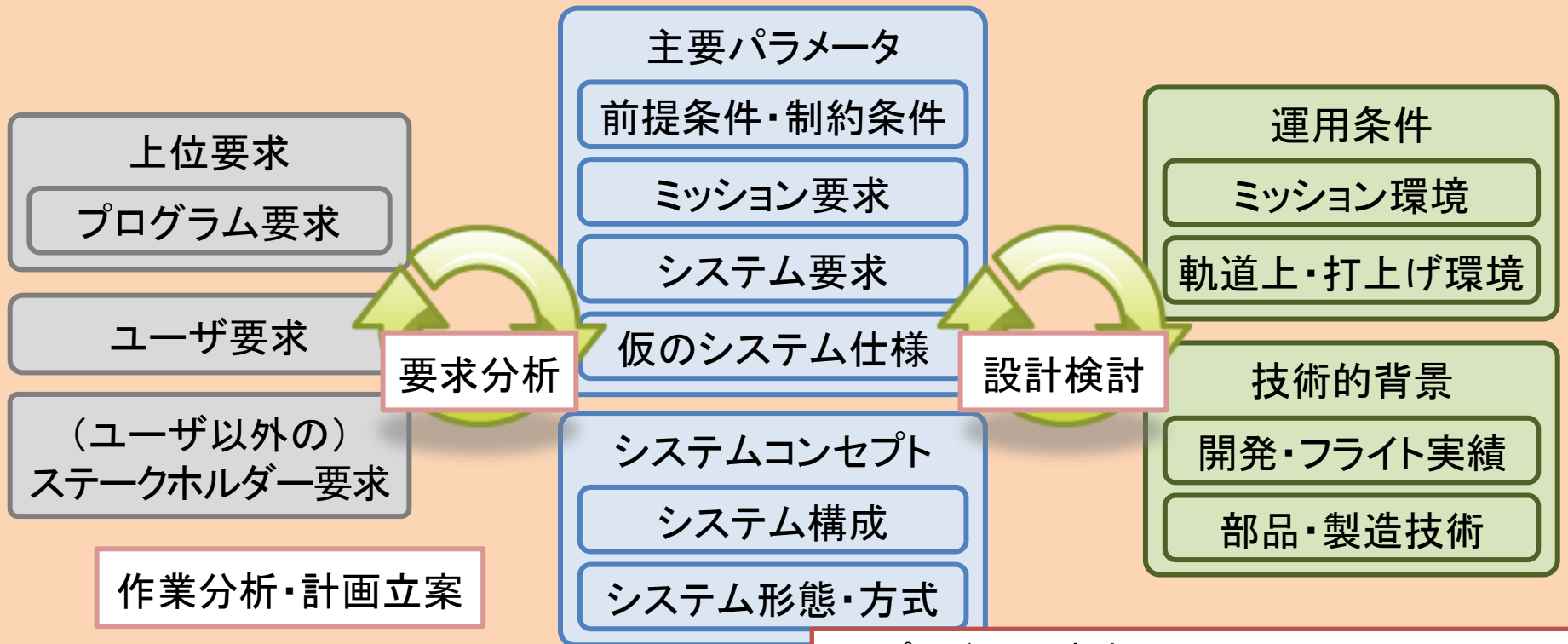


- JAXAのシステムエンジニアリング推進室ミッションデザイン支援グループ(MDSG)は上流設計を行い、新規ミッション創出活動の支援を専門とした組織である。
- MDSGの主要活動は下記の3つである。
  1. 上流設計の実施(ミッション創出活動)
  2. 上流設計プロセス・手法、設計環境などの整備、維持・改善(これまでの上流設計作業のベストプラクティスをまとめ、さらにシステムズエンジニアリングを適用した上流設計作業の体系化)
  3. コストエンジニアリング(上流設計段階で活用可能な宇宙機のコスト推算手法の作成・検証)
- 進行中の案件も含め、6年間で30件程度のミッションデザイン支援を実施
- JAXA内のサポートに限る(今回は、ISASからMDSGに支援を要請)

今回直接支援してくれたのは  
四元和彦・野田篤司・河野功氏の3人+バックに数人の専門家



# プリプロジェクト化のための作業概要



- ❖ 実際は、更に詳細なプロセスを設定
  - ❖ 要求分析以前の作業も多数: →

- ✓ プロジェクト憲章
- ✓ プリプロジェクト化以前の作業
- ✓ プリプロジェクト化までの主要作業プロセス
- ✓ 上流設計支援 本作業WBS&スケジュール
- ✓ ミッション実現性検討のWBS&スケジュール
- ✓ ステークホルダ識別・要求書
- ✓ ミッション・システム要求書
- ✓ 利用・運用コンセプト
- ✓ システムエンジニアリングマネジメント計画書
- ✓ プロジェクト化までのプロセス調査報告



# LiteBIRD要求分析マップ

プログラム要求

制約条件

前提条件

ユーザ要求

ステーク  
ホルダ要求

サイエンス  
要求

ミッション  
目的・意義

ミッション  
要求

総合  
システム  
要求

観測機器への  
要求

衛星システ  
ム要求

システム仕様  
(衛星ミッション  
部)

システム仕様  
(衛星バス部)

利用コンセプト

運用  
コンセプト

地上システム  
要求

システム仕様  
(地上)

# システム要求分析の具体例：テレメトリー

## 複数ステップを経て決まる例

出発点はLiteBIRDのシンプルなミッション： $\delta r < 0.001$

- 前景放射： $\delta r < 0.001$ を達成する周波数
- 統計誤差： $\delta r < 0.001$ を達成すること、  
検出器による雑音が重力レンズによる「雑音」より小さいこと
- 系統誤差：要求を仮設定、成立性検討によりフィードバック

### 基本性能要求

- ❖ 角度分解能  $< 30 \text{ arcmin}$  (FWHM) @ 150GHz
- ❖ 周波数：50-250GHzで4バンド以上
- ❖ 検出器： $2 \mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$  (素子雑音  $\text{NEP} = 2 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 素子数2000で成立)
- ❖  $1/f$  knee  $< 100 \text{ mHz}$  (TESで達成している値に基づく)

学会発表済

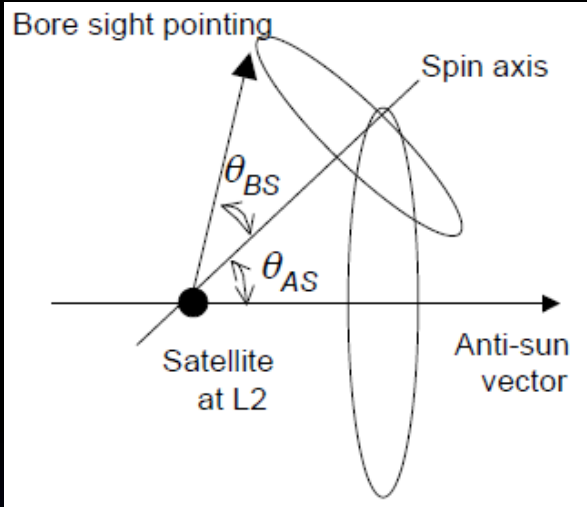
### スキャン要求、変調要求

- ❖ 観測頻度の高い一様性
- ❖ 観測偏光角(クロスリンク)の高い一様性

学会発表済

## テレメトリー要求

# システム要求分析の具体例：テレメトリー



- 歳差運動するこまのようなスキャン
  - 左図はL2の例 (LEOでも同様のスキャン)
- 1/fノイズを抑えるため、十分速い回転速度 (3rpm) を設定

学会発表済

## データ転送レート要求

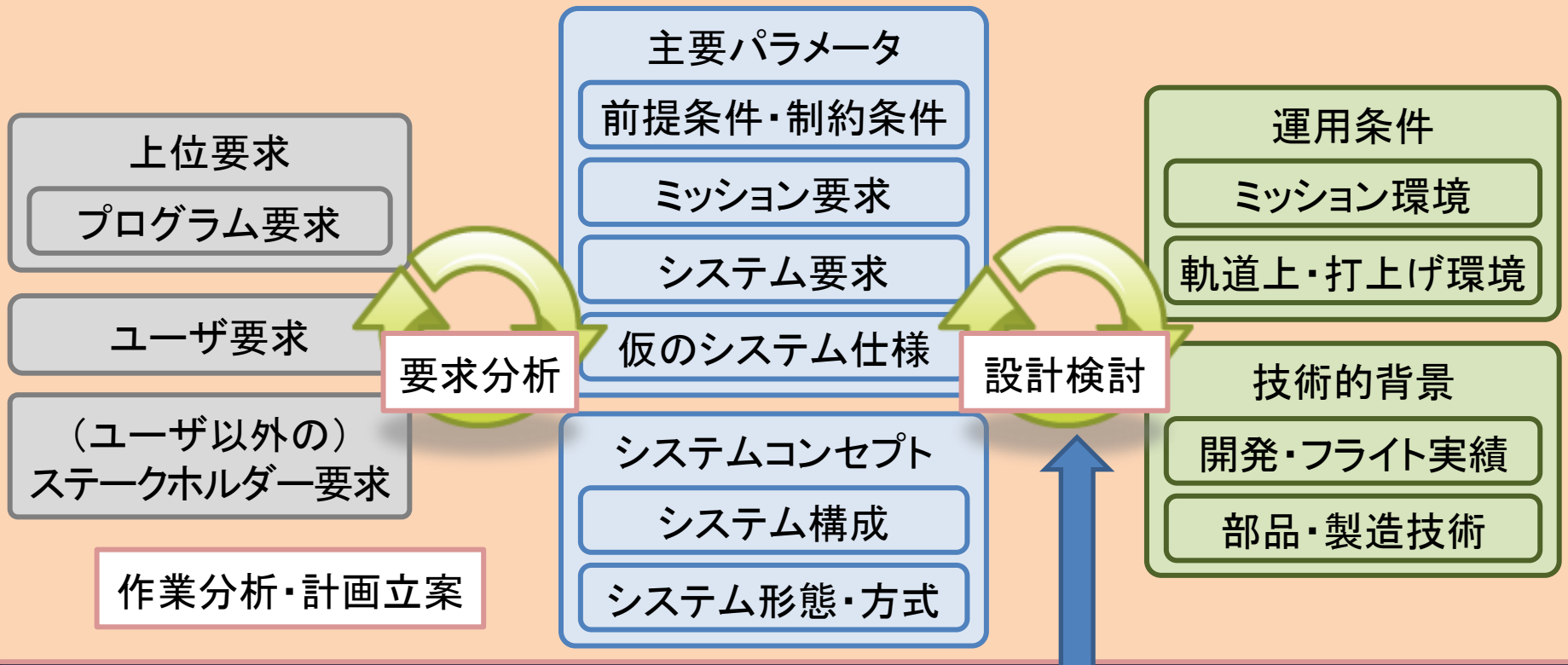
| orbit | mission data rate [kbps] | total data rate* [kbps] | data rate [GB/day] | downlink rate** [Mbps] | downlink time [hours/day] |
|-------|--------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|
| LEO   | 397.8                    | 755.9                   | 8.2                | 8                      | 2.3                       |
| L2    | 582.8                    | 1107.3                  | 12.0               | 4                      | 6.6                       |

\* 全データはヘッダー・CRC等を含み、その量は高く見積もってミッションデータの1.9倍になる。

\*\* テレメトリーデータ転送にはXバンドを使用すると仮定。

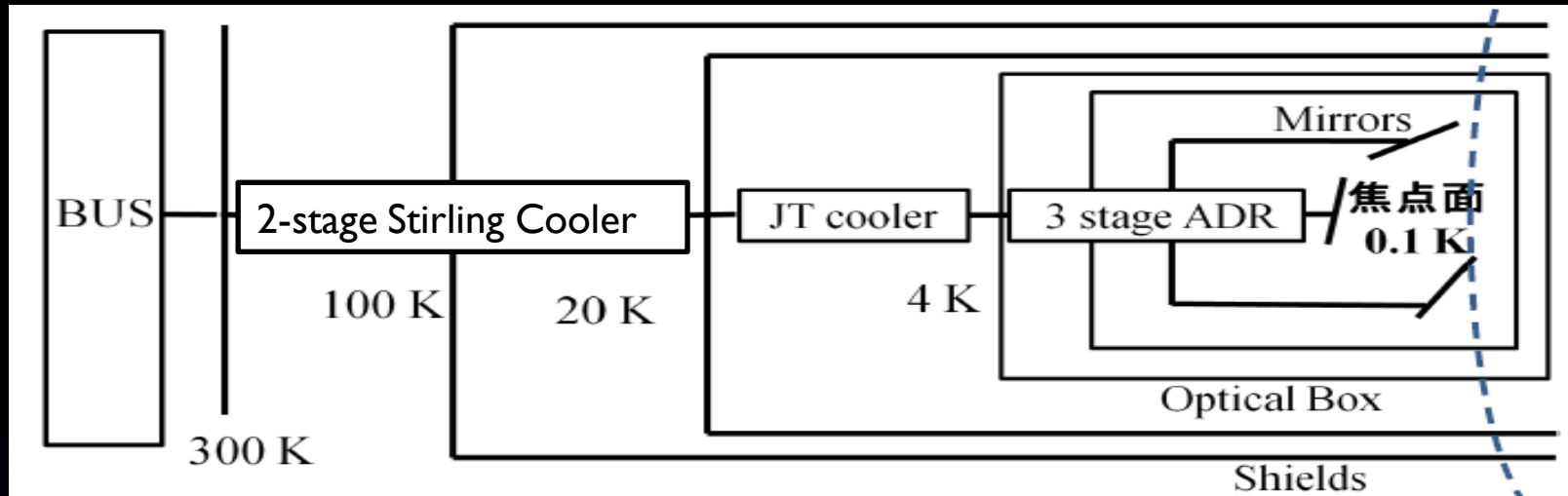
成立性検討については、次の講演 (片山)

## 2. 成立性検討から要求分析へのフィードバック



ここを回してトレードオフの検討を進めることが肝心  
仮のシステム仕様へダメだし  
→ 新しいシステム仕様、システム要求見直し等

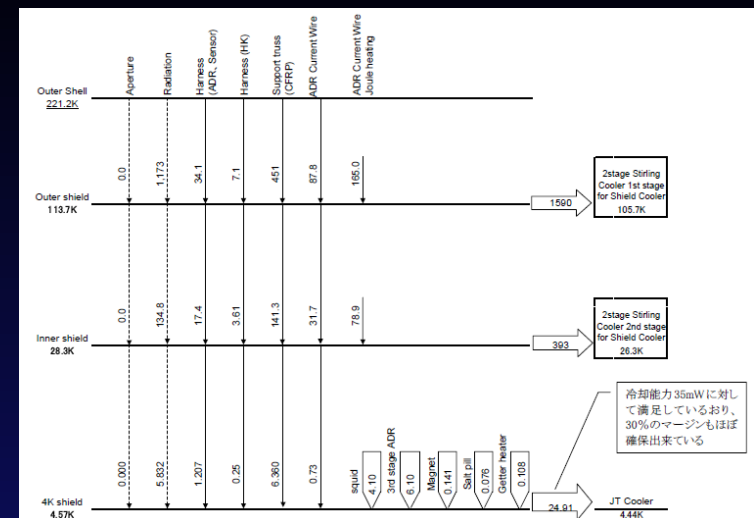
# 熱設計成立性検討



- 予冷系の熱解析を行った結果、冷却マージン28.8%の解が成立。構造解析も併せて行い、トラス構造の場合の剛性評定は小型衛星の要求仕様に近い値を達成。
- 3段ADRについて検討。観測中漏洩磁場はADRから100mmの距離を取れば0.5Gaussまで下げられる。重量は32kg。



**フィードバック: 鏡を小さくできないか?**



# フィードバックの具体例

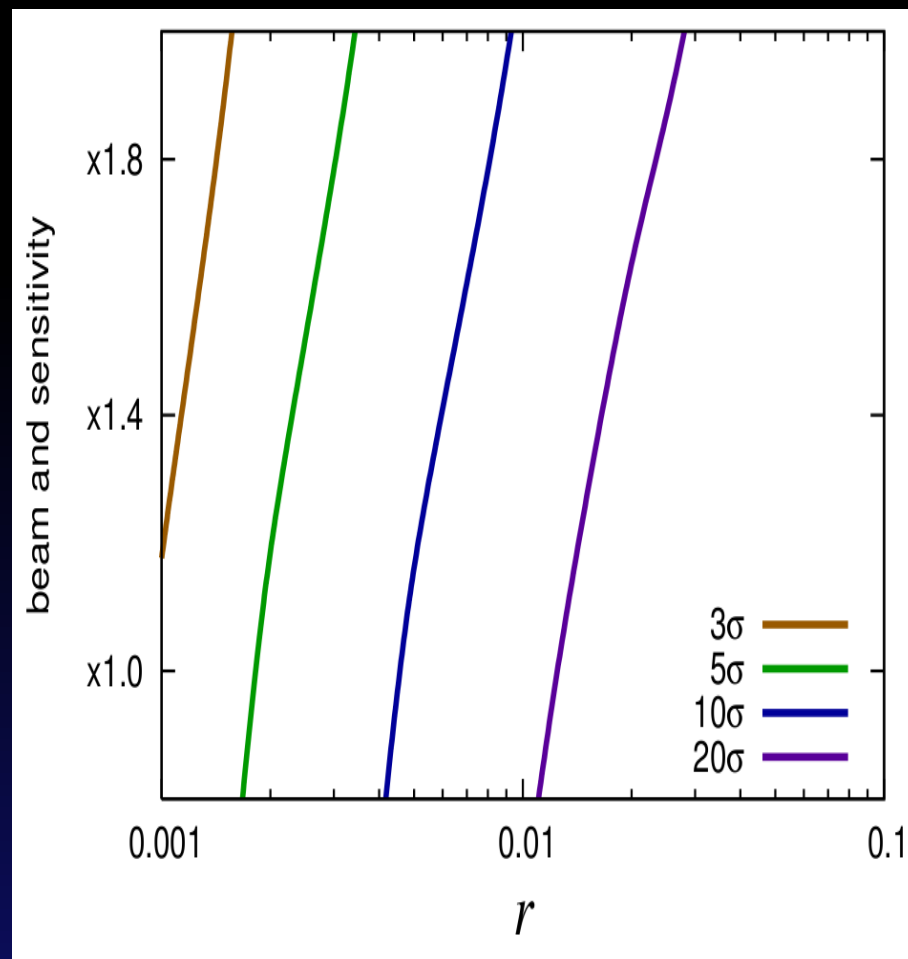
## — 鏡の大きさ —

- 鏡を小さくすると
  - 角度分解能悪化
  - 使用できる焦点面の面積が小さくなる

鏡の直径を半分になると、 $\delta r$ が40%大きくなる。  
それでも統計誤差に関しては、ミッションが成立する。



この解析のみでは決められない。  
今後のトレードオフスタディ  
の中で最適化をはかる



# まとめ

- JAXAの正統的システムエンジニアリング手法に基づいたLiteBIRDシステム要求を開始した。
- 成立性検討(次の講演)の第一ラウンドに必要なシステム要求をまとめることができた。
- 成立性検討からのフィードバックに基づいたシステム要求再検討のサイクルを開始した。
- 今後の急務:  
仮設定になっている要求分析アイテムの検証