

ULTIMATE-Subaru: MBSEを用いたシステム設計



ULTIMATE
S u b a r u

大野 良人

美濃和 陽典、本原 顕太郎、田中 壺、柳澤 顕史 (国立天文台)



Australian
National
University



TOHOKU
UNIVERSITY



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



- 1. ULTIMATE-Subaruプロジェクト**
- 2. SE、MBSEとは？**
- 3. 実際の活動の紹介**
- 4. これまでMBSEをやってみての感想・課題など**

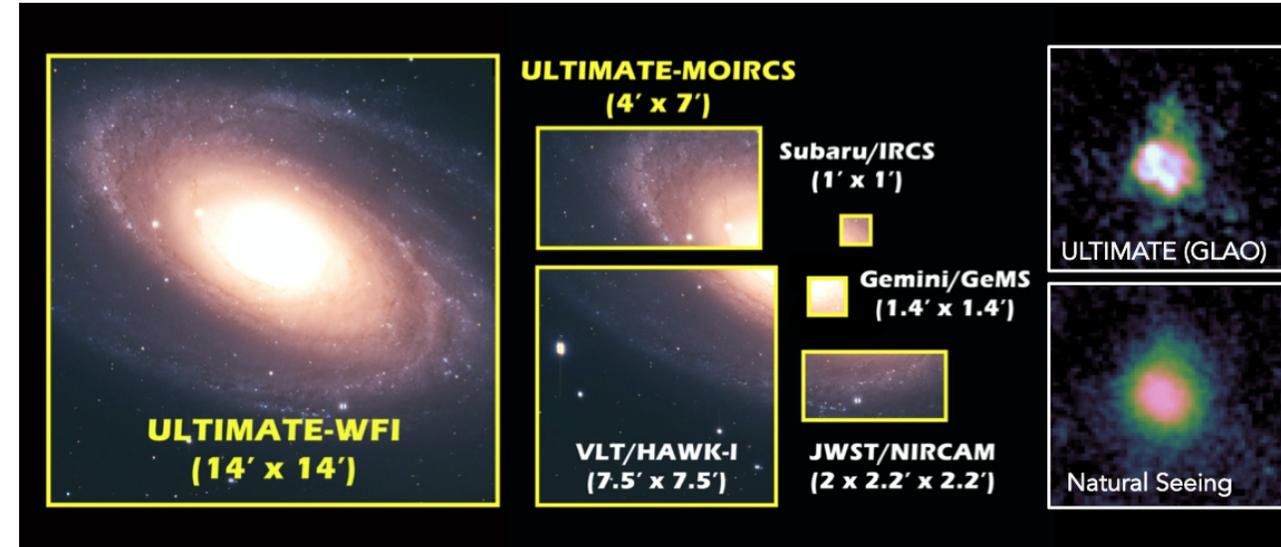
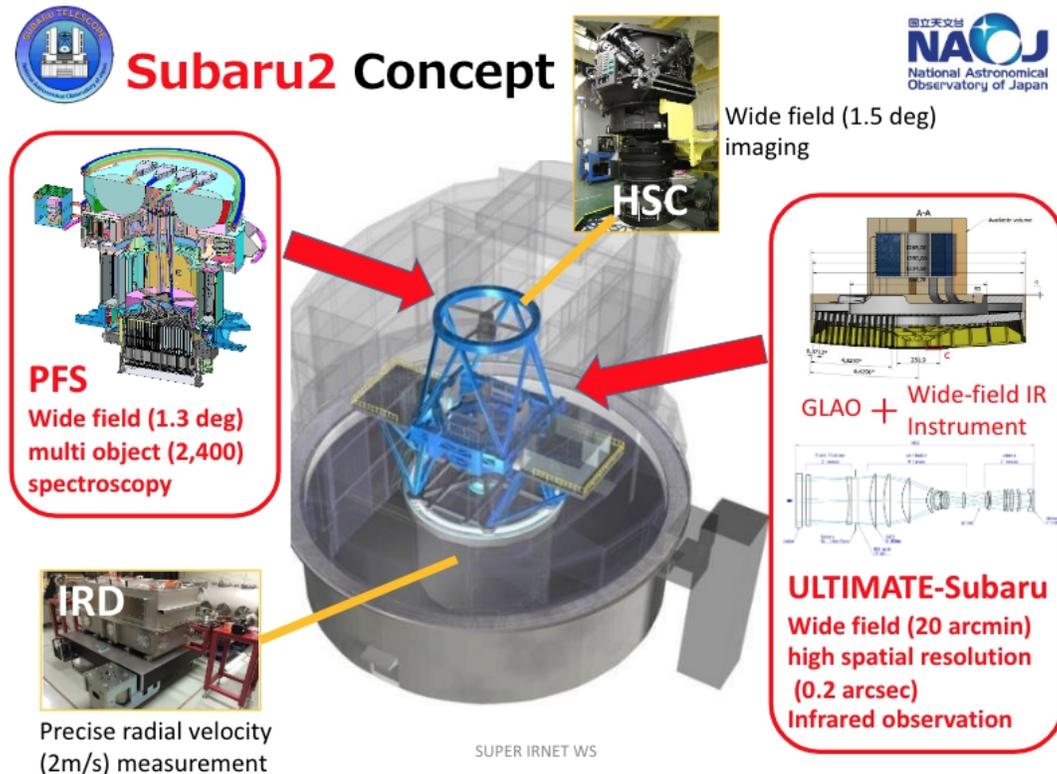
1. ULTIMATE-Subaruプロジェクト

ULTIMATE-Subaruプロジェクト



ULTIMATE
Subaru

HSC・PFSに続く「すばる2計画」の広視野3本柱の一つ。



広視野近赤外観測装置＋地表層補償光学(GLAO)によって、近赤外波長域で**広視野かつ高空間分解能な観測**を実現

Slide courtesy of M. Yoshida presented in the SUPER-IR net seminar #1

ULTIMATE-Subaruプロジェクト



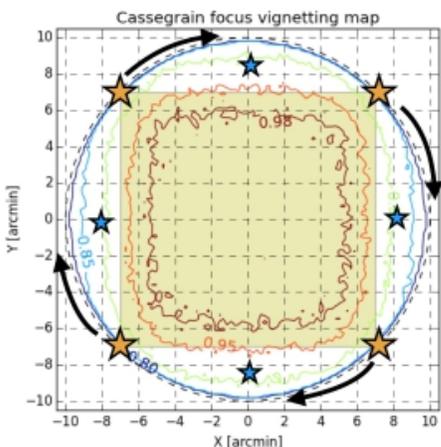
ULTIMATE
Subaru

補償光学・観測装置の開発のみならず、望遠鏡自体の改修も必要な大規模プロジェクト



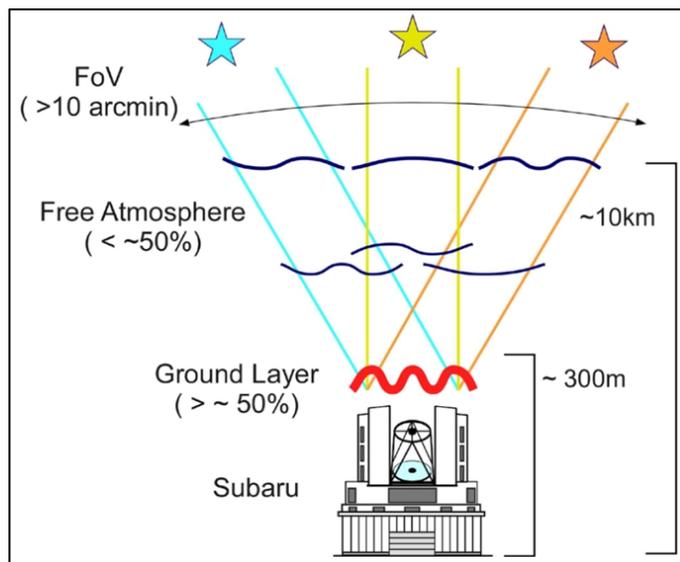
望遠鏡改修

望遠鏡視野の拡張

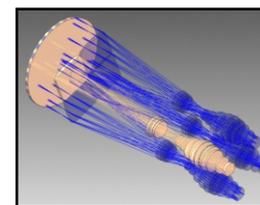


Φ20分角の視野

地表層
補償光学装置

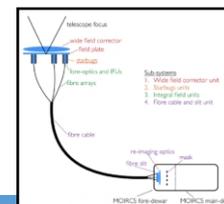
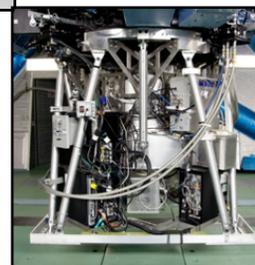


広視野
観測装置



Wide-Field Imager (WFI)

既存のMOIRCS
の改造・再利用



多天体IFU
装置？

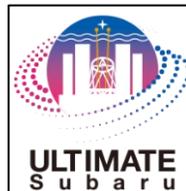
データ管理
システム

ULTIMATE-Subaruプロジェクト

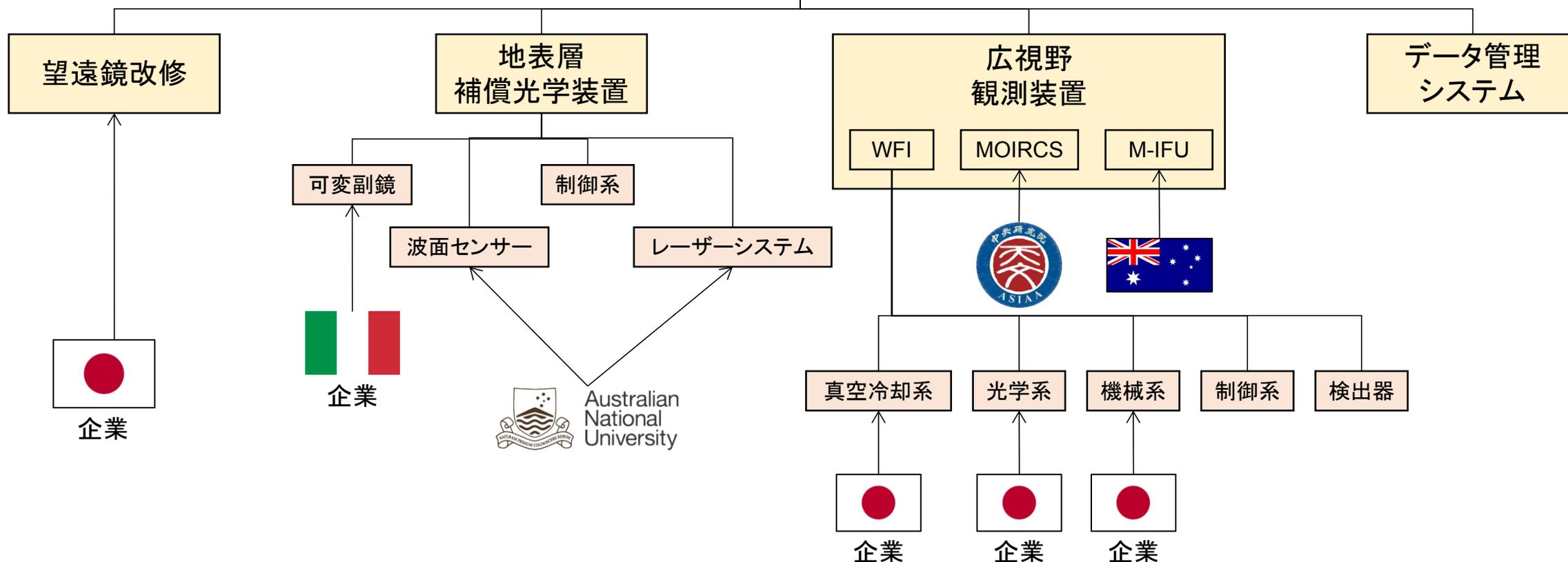


ULTIMATE
Subaru

補償光学・観測装置の開発のみならず、望遠鏡自体の改修も必要な大規模プロジェクト



国内・国外の研究機関・企業との共同開発・外注
各サブシステムは独立ではなく、システム間のハード・ソフトのインターフェイス管理も必要



ULTIMATE-Subaruプロジェクト

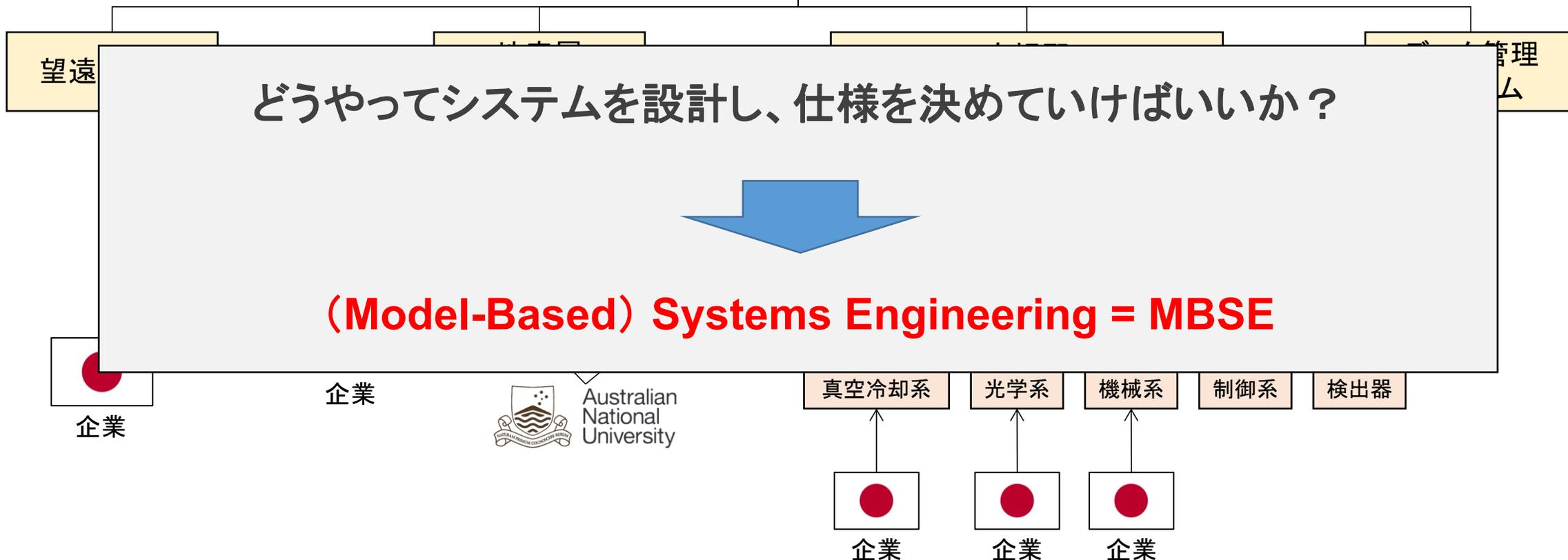


ULTIMATE
Subaru

補償光学・観測装置の開発のみならず、望遠鏡自体の改修も必要な大規模プロジェクト



国内・国外の研究機関・企業との共同開発・外注
各サブシステムは独立ではなく、システム間のハード・ソフトのインターフェイス管理も必要



2. SE、MBSEとは？

素人説明なので、詳細はGoogle先生か専門家に聞いてください。。。

Systems Engineeringとは？



ULTIMATE
Subaru

- システムの目的(ミッション要求)を実現するための工学的的方法論(及び、その一連の活動)である。(JAXA:システムズエンジニアリングの基本的な考え方より)
- システムを成功させるための複数の専門分野にまたがるアプローチと手段である。(Japan Council on Systems Engineeringより)
- 基本的な考え方としては、これまで誰も(なんとなく)やってきたこと。





開発環境の変化

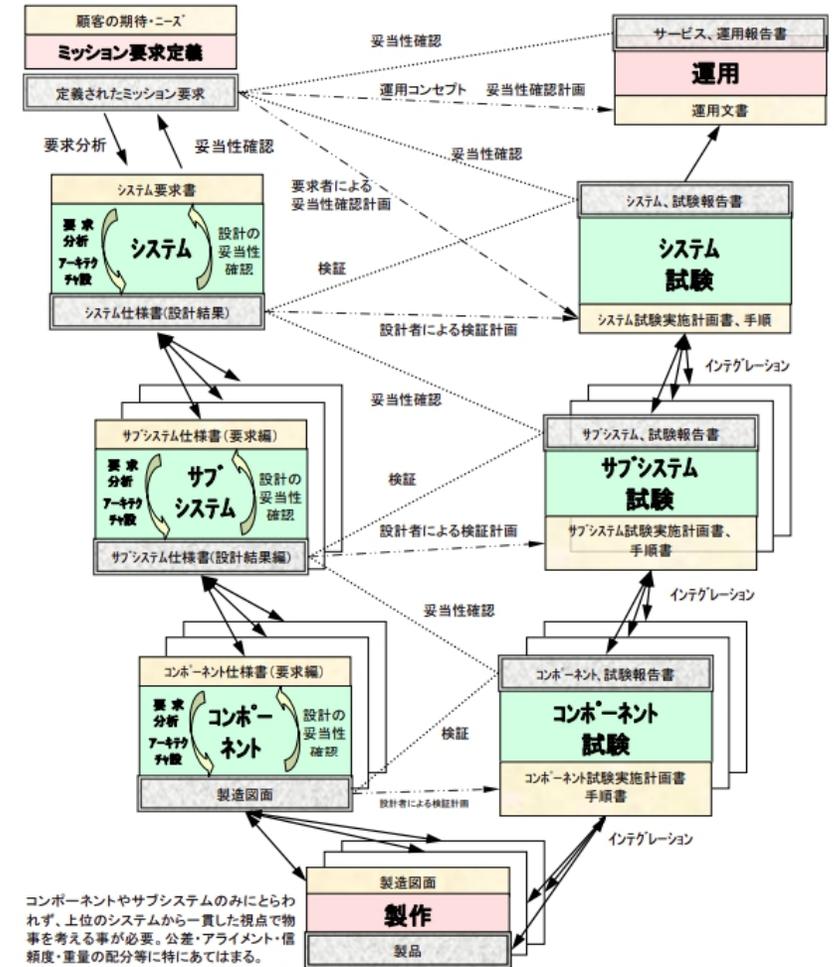
- システムが巨大化・複雑化
 - これまでは誰か一人で全体から細部まで把握できたが、それはもはや不可能
 - 一つのミスが大きな問題になりうる
- 国内・国外の複数の機関による共同開発
 - しっかりといた認識や情報共有が必要不可欠
- 開発の長期化
 - 技術の進化や人の出入りなどの変化への対応
- 人・コスト・時間の制限の中で最適化・トレードオフが必要
 - どこに力を入れるべきか？ どこで楽できるか？

より体系化された手法が必要になってきた

Systems Engineeringとは？



- Vサイクル: SEのプロセス。時系列を表現しているわけではない。
- 目的思考: 常に目的を意識して、システムの検討をしていく。
- 抽象化: 抽象的な段階から検討を行い、徐々に下位のサブシステムの要求に具体化していくことで、システムの本質の理解や異なる専門分野間での共有を促進。
- 構造化: 構成要素とそのつながりを意識する (Traceability)。各要素のシステム内での立ち位置、根拠を明確に。
- 全体俯瞰: 視点と視野を変えながら全体を捉える。単なる性能だけでなく、どのようにシステムが使われるか(製作、輸送、運用、廃棄など)も意識しながら検討していく。必要に応じて下から上へ立ち戻る。



コンポーネントやサブシステムのみにとらわれず、上位のシステムから一貫した視点で物事を考える事が必要。公差・アライメント・信頼度・重量の配分等に特にはまる。システム・サブシステムなどの各階層において同様なプロセスが繰り返し実施されるが、必要に応じて上位の階層にも立ち戻る。

システムズエンジニアリングの基本的な考え方 (JAXA)

Model-Based Systems Engineeringとは？



- SEのプロセスをモデルを使って進める手法。内容はあくまでSEである。
- SysMLというモデル言語で、専用のツールを用いて記述される。
- 目的に応じて様々な図・モデルが用意されていて、それを駆使してSEを進めていく。

図5 SysML ダイアグラムの種類

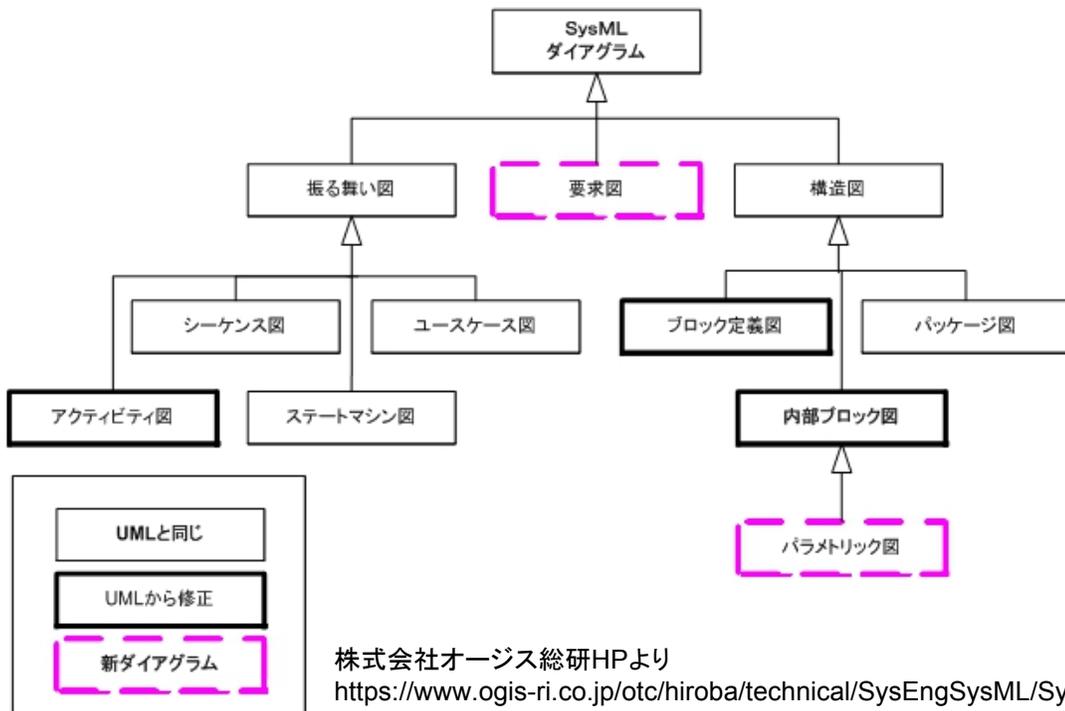


表1 ISO/IEC 15288 (JIS X0170) のテクニカルプロセス (設計工程) と SysML

プロセス	規定の成果物	利用可能なSysML要素例
利害関係者 要求定義 プロセス	a) サービスで要求される特性及びサービスで要求される利用のコンテキスト(内容、状況、背景)が明記されている。	ユースケース図・内部ブロック図(コンテキスト図として利用)
	b) システムソリューションにおける制約が定義されている。	要求図・制約ブロック
	c) 利害関係者の要求から、利害関係者及び利害関係者ニーズへの追跡可能性が樹立されている。	ユースケース図・要求図 アロケーション記述
	d) システム要求を定義するための基礎が記述されている	要求図・アクティビティ図 ステートマシン図
	e) サービスの適合の妥当性を確認するための基礎が定義されている。	要求図(テストケース)
	f) サービス又は製品を供給するための交渉及び合意のための基礎が提供されている。	N/A
要求分析 プロセス	a) 製品ソリューションの要求の特性、属性、機能/性能要求が明示されている。	要求図・ブロック定義図
	b) システムの方式設計及びそれを実現する手段に影響する制約が明示されている。	要求図 パラメトリック図
	c) システム要求から利害関係者の要求へのリスク抑制のための完全性及び追跡可能性が樹立されている。	ユースケース図・要求図 アロケーション記述
方式設計 プロセス	a) 方式設計のベースラインが確立されている。	N/A
	b) システムに対する要求を満足する実装可能なシステム要素記述の集合が明示されている。	パッケージ図・ブロック定義図 内部ブロック図・アクティビティ図 ステートマシン図・シーケンス図 パラメトリック図
	c) インターフェース要求は、方式設計ソリューションに組み込まれている。	要求図・ブロック定義図 内部ブロック図
	d) 方式設計からシステム要求への追跡可能性が確立されている。	要素間のアロケーション記述
	e) システム要素を検証するための基本事項が定義されている。	要求図(テストケース)
	f) システム要素の結合のため基本事項が確立されている。	内部ブロック図



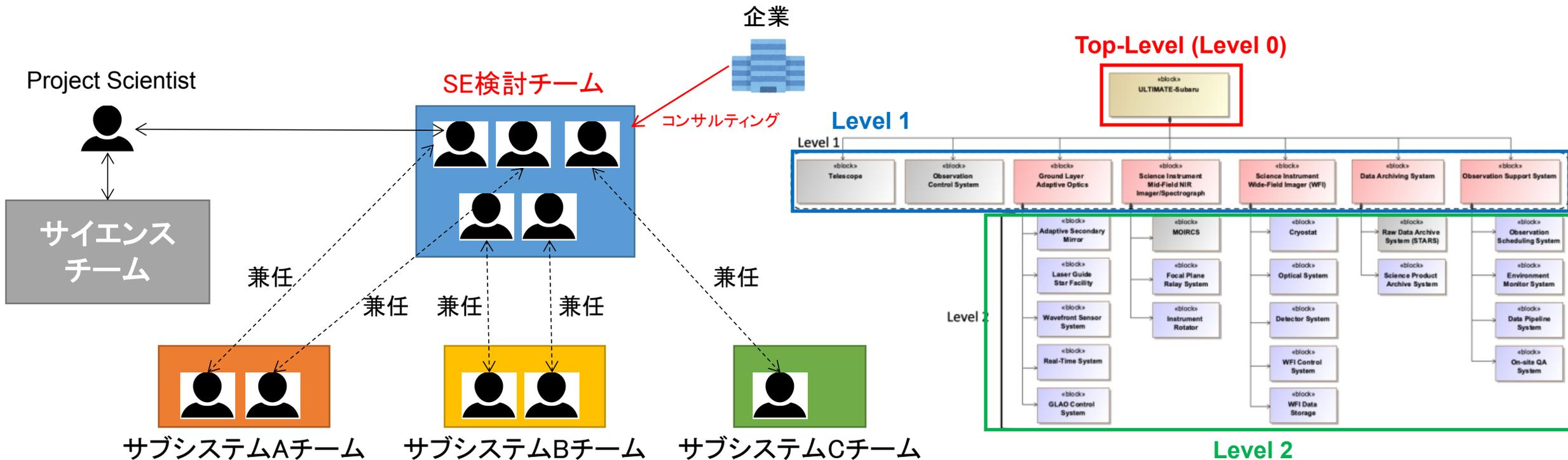
- そもそもの入り口としては、海外の協力機関がMBSEを使っていたのでそれを参考にした
- とはいえ実際に取り入れて、実感・期待すること
 - 情報の集約
 - 情報をモデルに集約してシステム要求を管理することで食い違いを防ぐ
 - 必要に応じてモデルから書類を生成する
 - SEプロセスの可視化
 - モデル・図にすることで各プロセスやシステムの理解を深める。
 - Traceabilityの確保
 - 各要素のつながりもモデル上で記録されるので、要求と各要素間のTraceもとりにやすくなる

3. 実際の活動の紹介

ULTIMATEにおけるSEの進め方



- SEの検討は主に5人で進めている。SEだけの専任者はいない。
- サイエンスチームとのやりとりは主にProject Scientistを通じて行っている
- システムをレベル分けして、レベルごとに検討している。作業としては上位から順番に検討しているわけではなく、情報があるところ、必要なところから検討を進めている。最終的に上から下にちゃんと繋がれば良い。



ULTIMATEにおけるSEプロセス

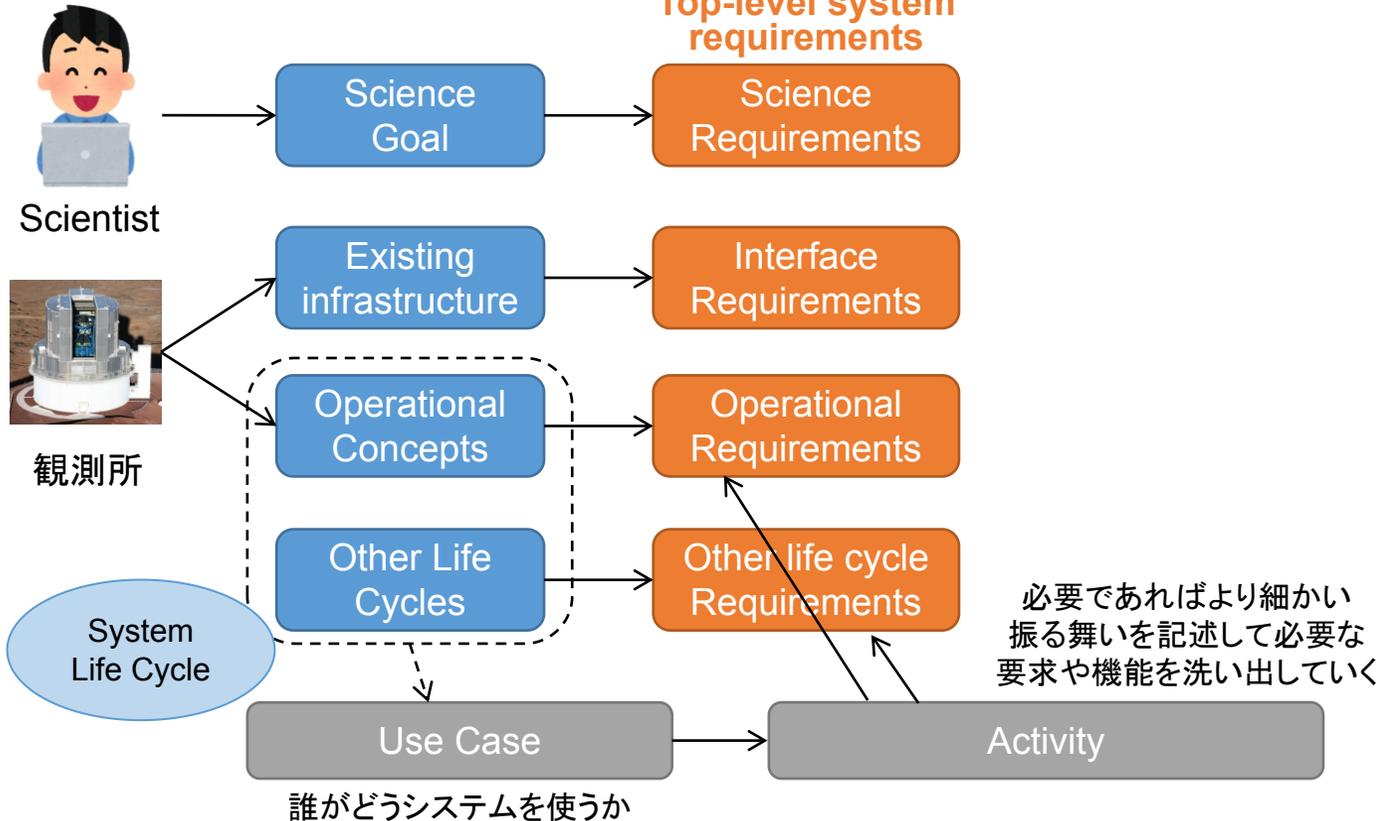


ULTIMATE
Subaru

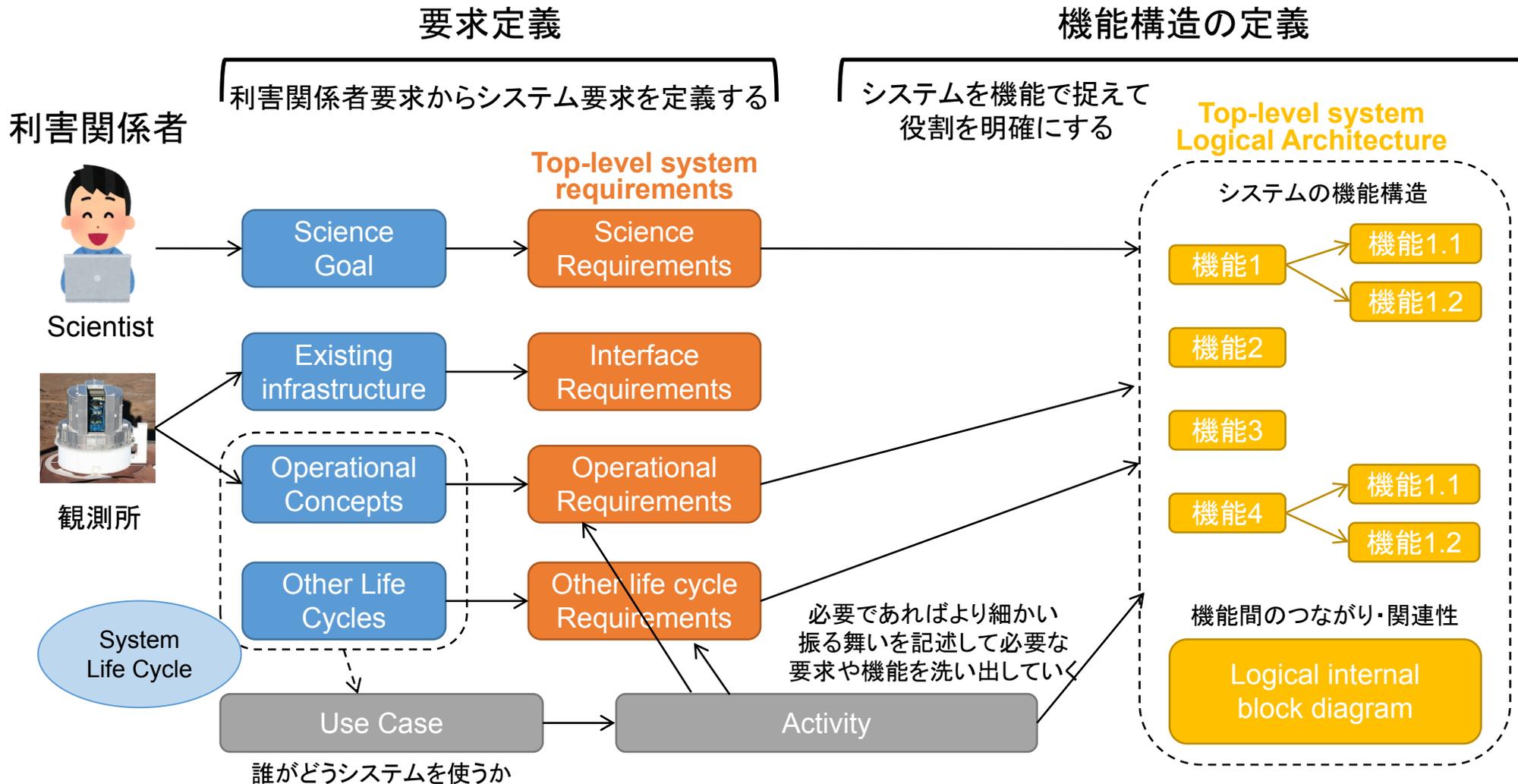
要求定義

利害関係者要求からシステム要求を定義する

利害関係者



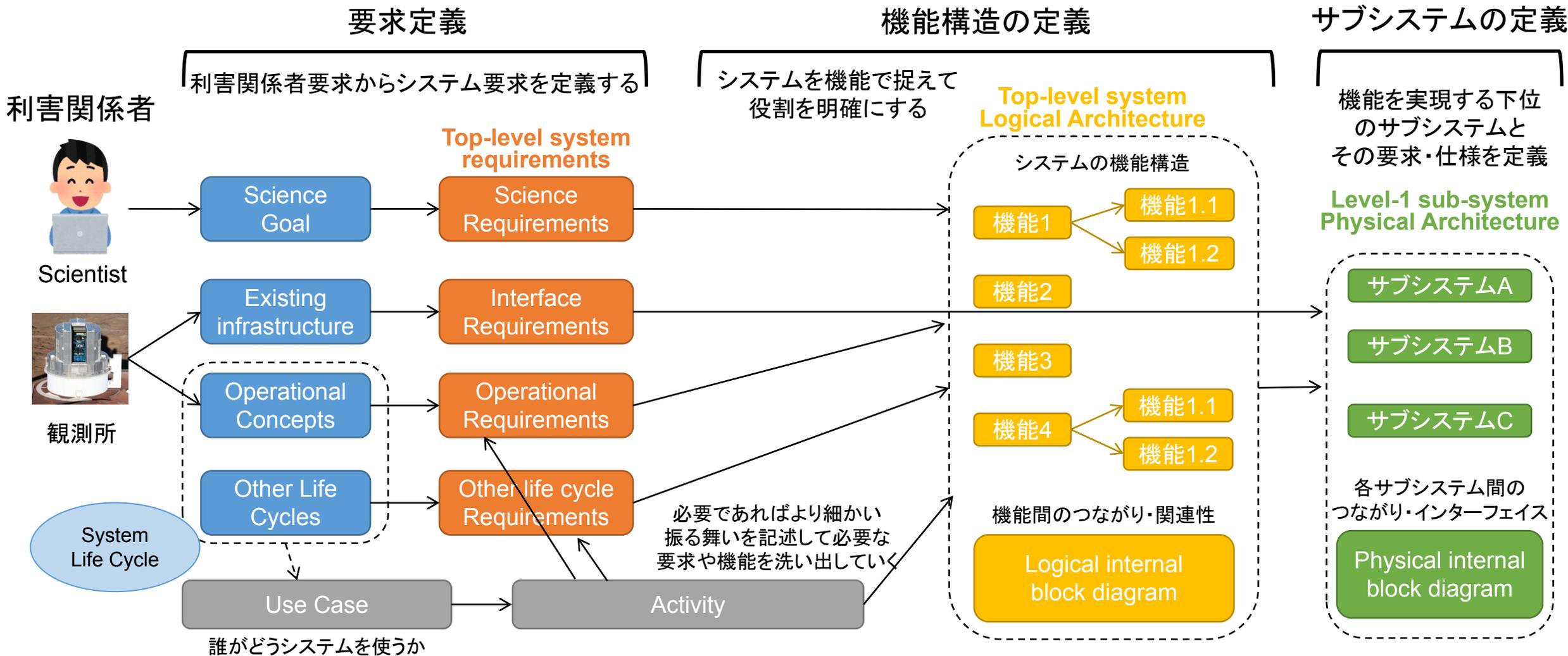
ULTIMATEにおけるSEプロセス



ULTIMATEにおけるSEプロセス



ULTIMATE
Subaru

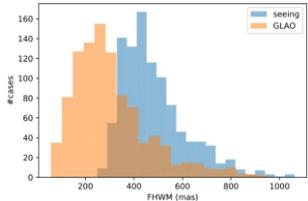


科学目標と要求定義



- 初期の性能予測を基に、サイエンスチームにULTIMATEで達成したい科学目標をまとめてもらった。
- 各科学目標ごとに必要とされる性能のシステム要求を洗い出した。
- 要求とサイエンスのTraceabilityが確保される。

ULTIMATEの性能予測



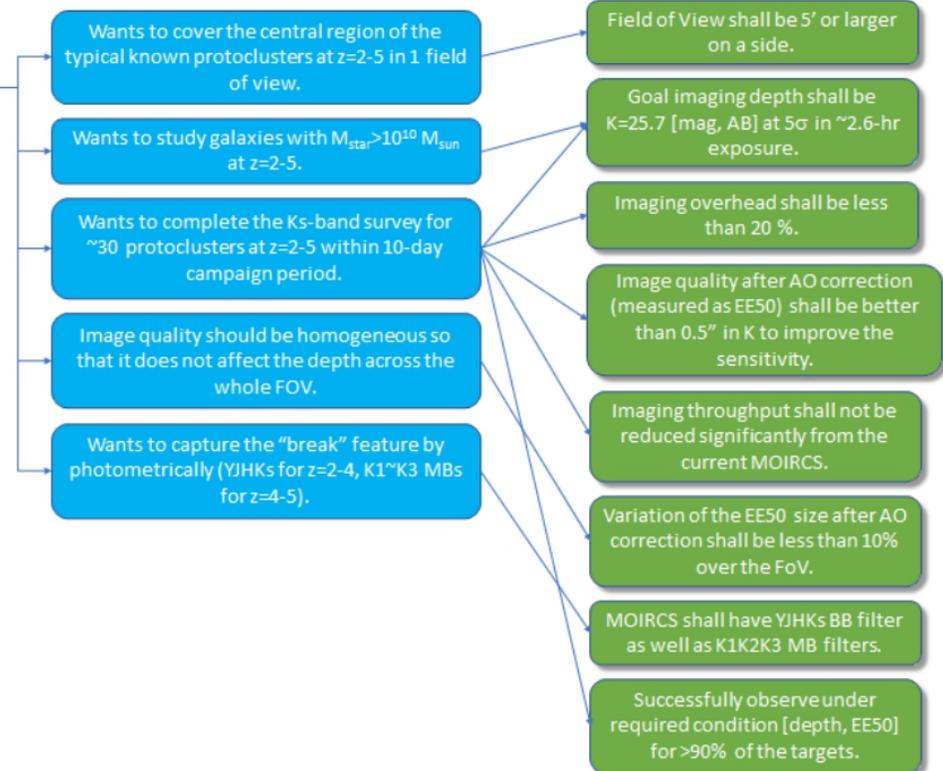
サイエンス
チーム

Science Goal
Document



- SG1-1**
Detect Balmer-break galaxies at $z \sim 4-5$ in HSC-selected (rest UV-selected) proto-clusters down to $M_{\star} \sim 10^{10} M_{\text{sun}}$
- SG1-2**
Spatially resolve H α (and [OII]) lines of proto-cluster galaxies at $z=2$ on <2 -kpc. Detect extended H α of massive SF galaxies at $z=2$ out to $r=2 \times r(1/2)$. Detect low-mass SF galaxies down to $M_{\star} \sim 10^8 M_{\text{sun}}$ with $\text{SFR}_{\text{H}\alpha} \sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$.
- SG1-3**
Detect H α , [OIII], H β , [OII] emission lines of $\sim 10,000$ galaxies at $z \sim 2$ (down to $\text{SFR}_{\text{H}\alpha} \sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$) selected from 1-deg 2 area
- SG1-4**
Spatially resolve SF activity in local starburst galaxies (at 100Mpc) into an elementary scale (GMC; $<100\text{pc}$).

ULTIMATE-Subaru : Science Instruments CoDR documentより



科学目標と要求定義

- 最終的なシステム要求は、すべての科学目標を達成できるように設定。
- 検討が進むと予測される性能も更新されていくので、このプロセスも繰り返し行う必要がある

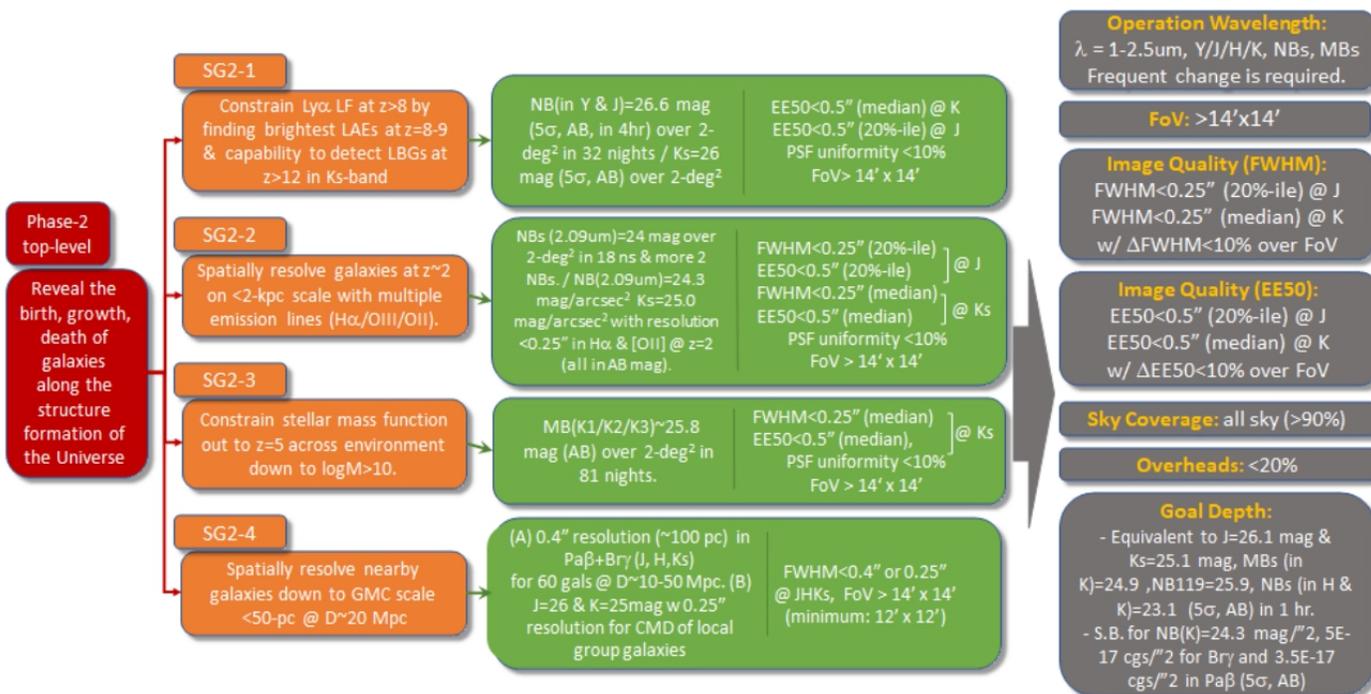


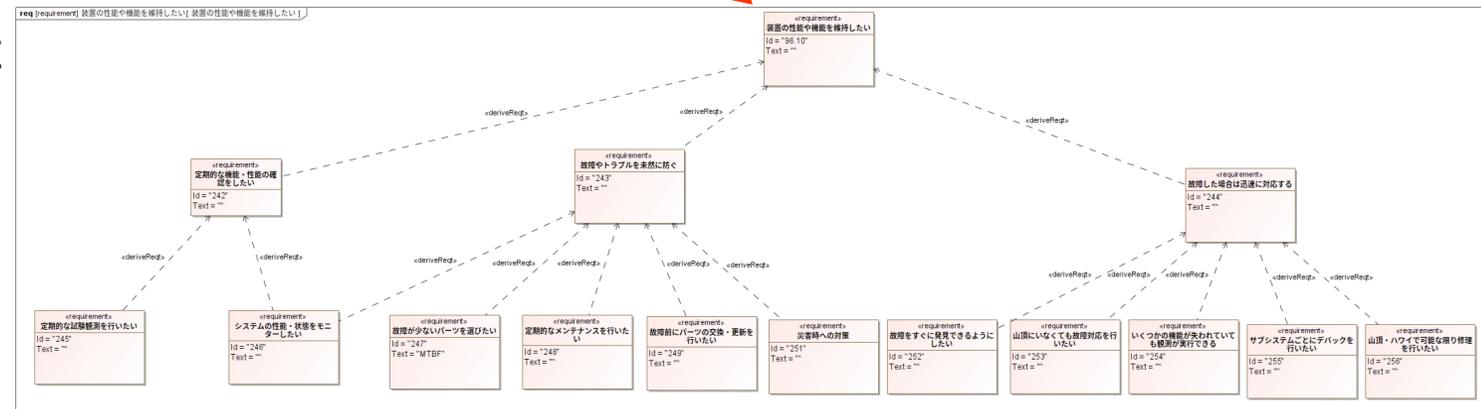
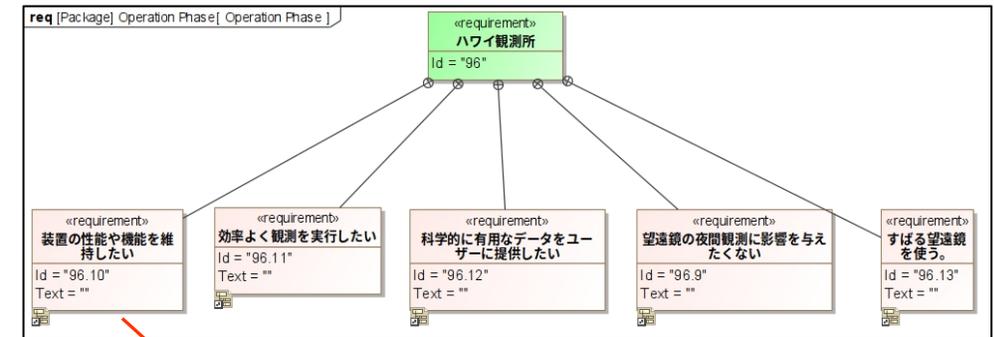
Table 4: Summary of the top-level science requirements.

Science requirements		
Item	SG1	SG2
Wavelength Coverage	1-2.5 μm	
Science FoV	$> 20 \text{ arcmin}^2$	$> 14 \times 14 \text{ arcmin}^2$
Image Quality (FWHM)	$< 0''.25$ at J (20%-ile)	
	$< 0''.25$ at K (50%-ile)	
	$< 0''.4$ at J,H,K	
Image Quality (EE50)	$< 0''.5$ at J (20%-ile)	
	$< 0''.5$ at K (50%-ile)	
Image Uniformity	$\Delta\text{EE50} < 10 \%$	
Sky Coverage	$> 90 \%$	
Overhead	Observing Efficiency $> 80\%$, Exposure Overhead $< 20\%$	
Number of Filters	> 10	> 30
Spectral Resolution	R=3,000-5,000	

ULTIMATE-Subaru : Science Instruments CoDR documentより

システムのライフサイクルを定義して、各サイクルごとに要求を定義する

1. Design
2. Manufacturing
3. Off-site assembly
4. Transportation
5. On-site assembly, Integration, Test
6. Commissioning
7. Operation



ライフサイクル



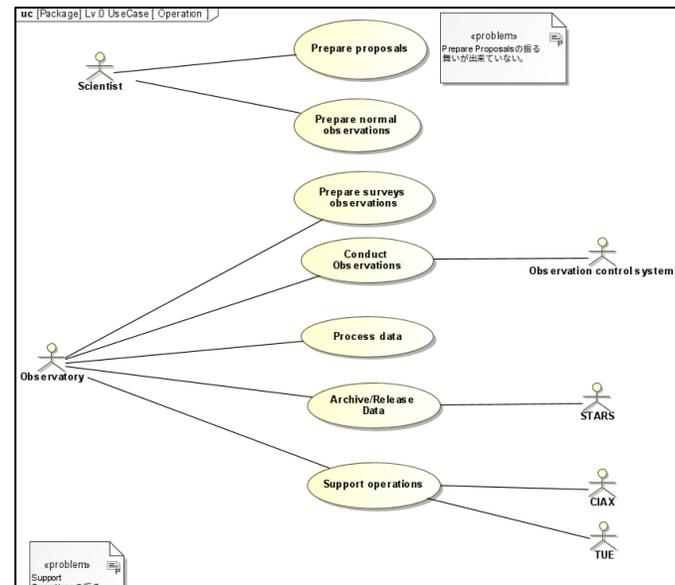
ULTIMATE
Subaru

システムのライフサイクルを定義して、各サイクルごとに要求を定義する

1. Design
2. Manufacturing
3. Off-site assembly
4. Transportation
5. On-site assembly, Integration, Test
6. Commissioning
7. Operation

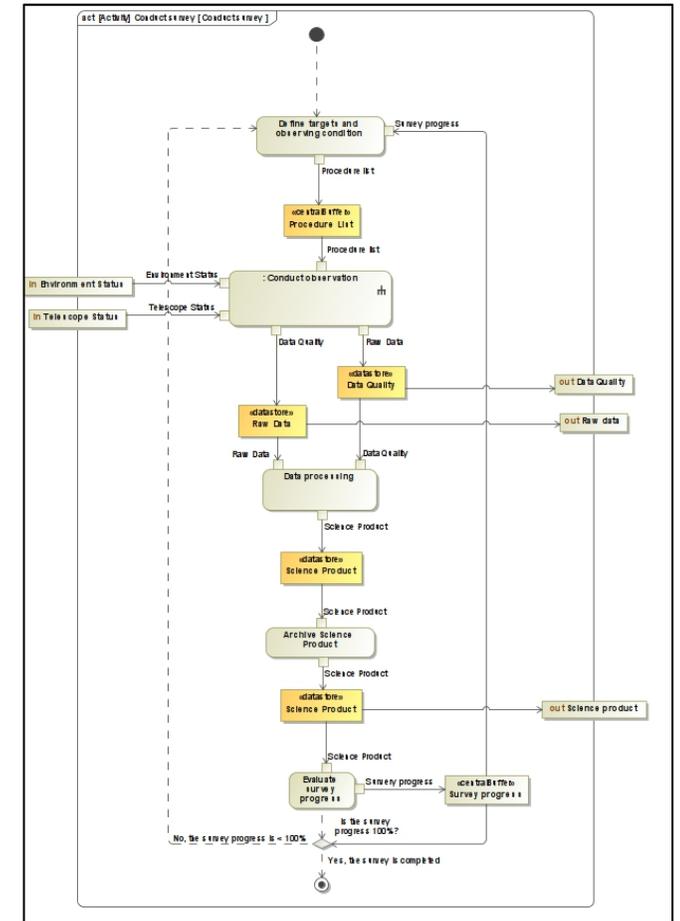
ユースケース図

誰がどのようにシステムを使うかを表現

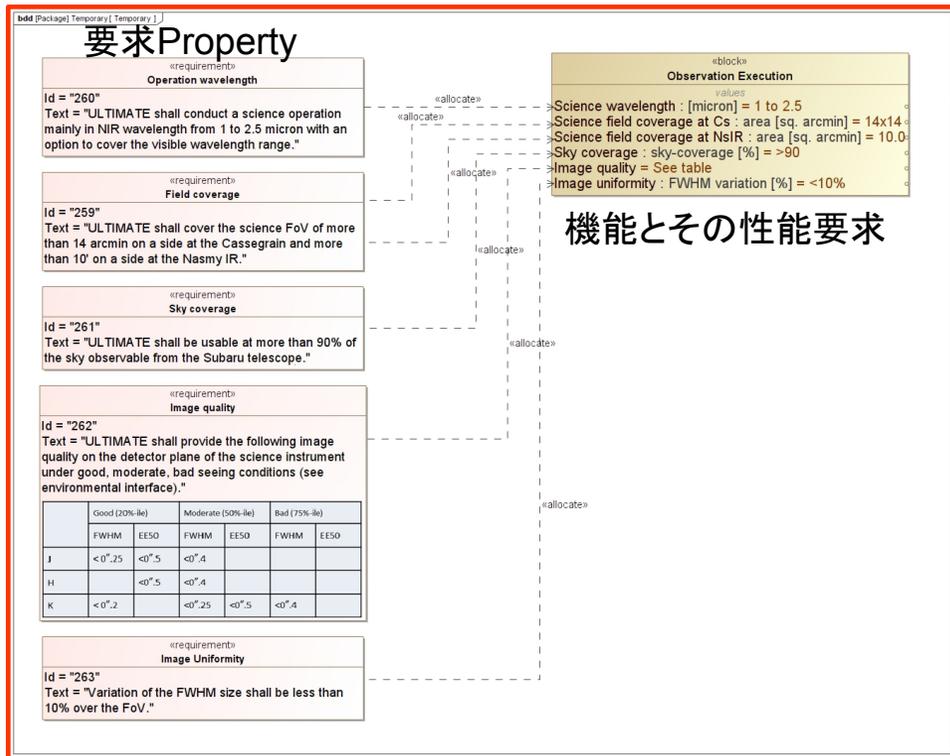


アクティビティ図

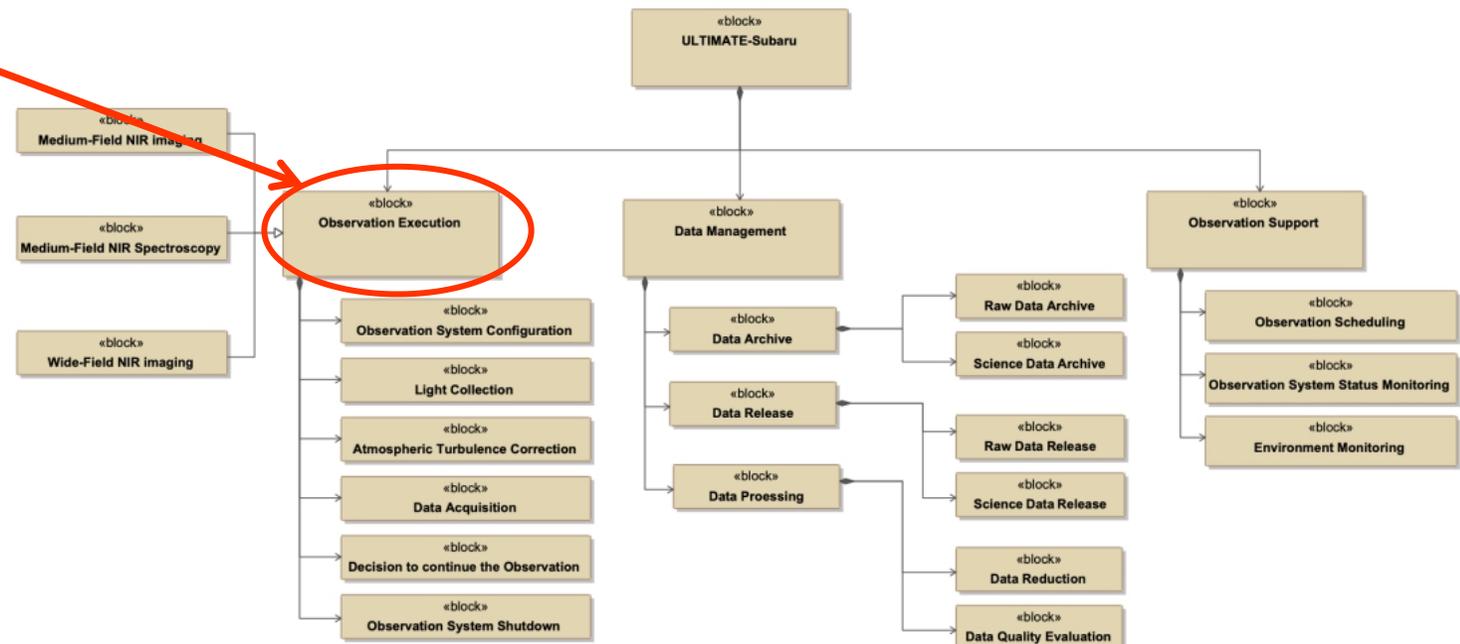
ユースケースの流れを表現



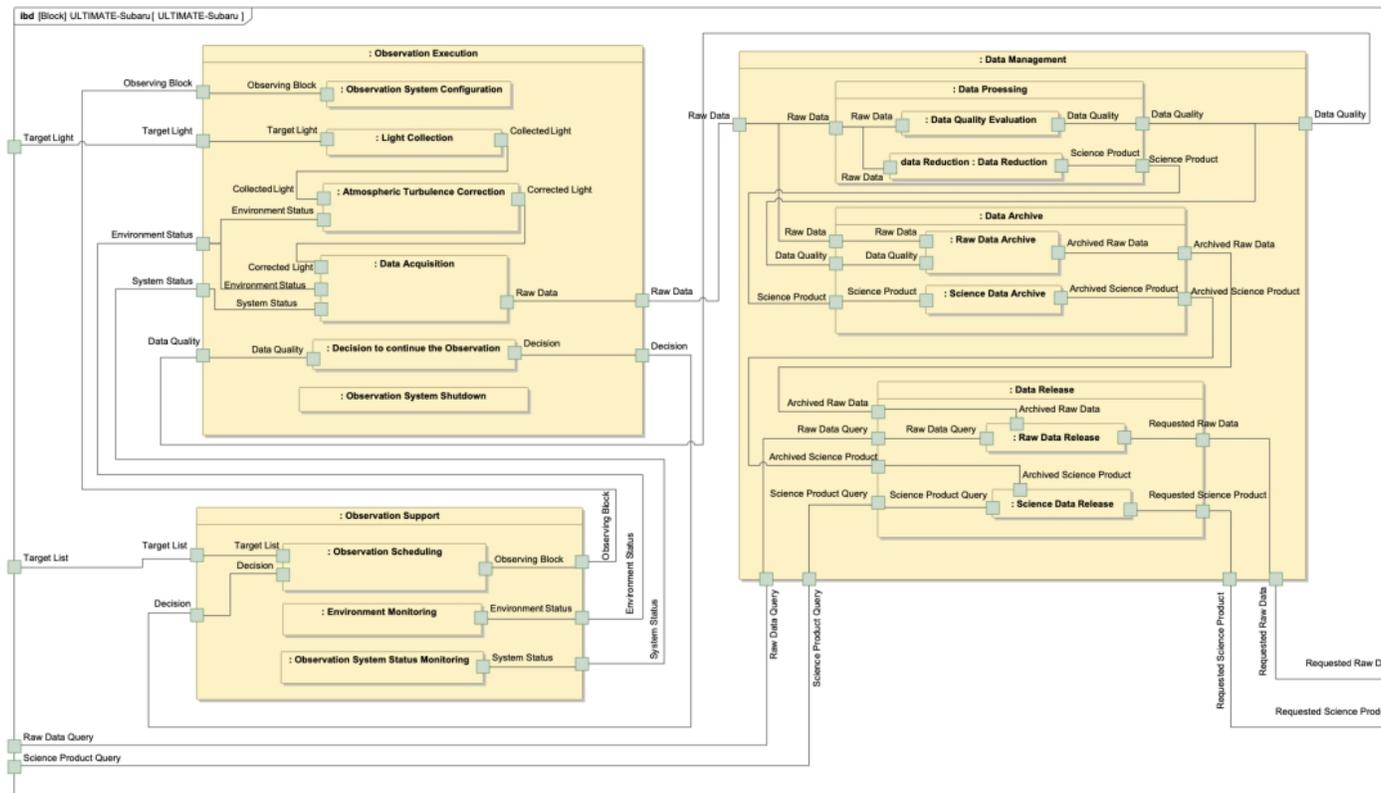
- これまでの要求・振る舞いから、それを実現する機能構造を検討する
- 各機能の性能要求は、根拠となるシステム要求に紐付けられている



機能構造 (Logical Structure)



- 機能間のつながり・関連性は内部ブロック図で表記



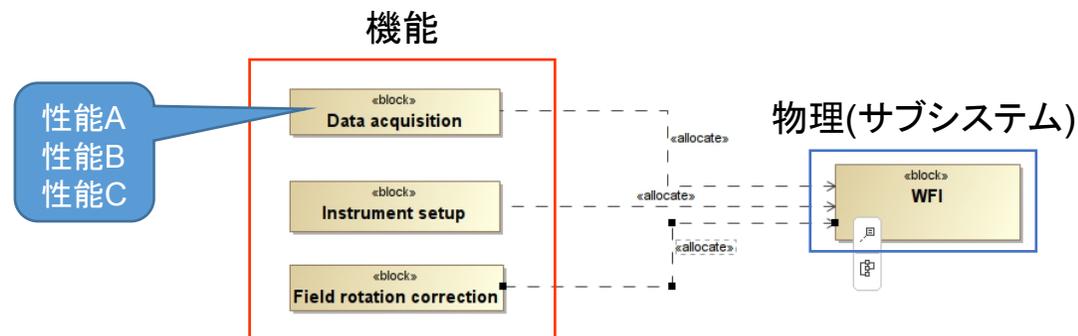
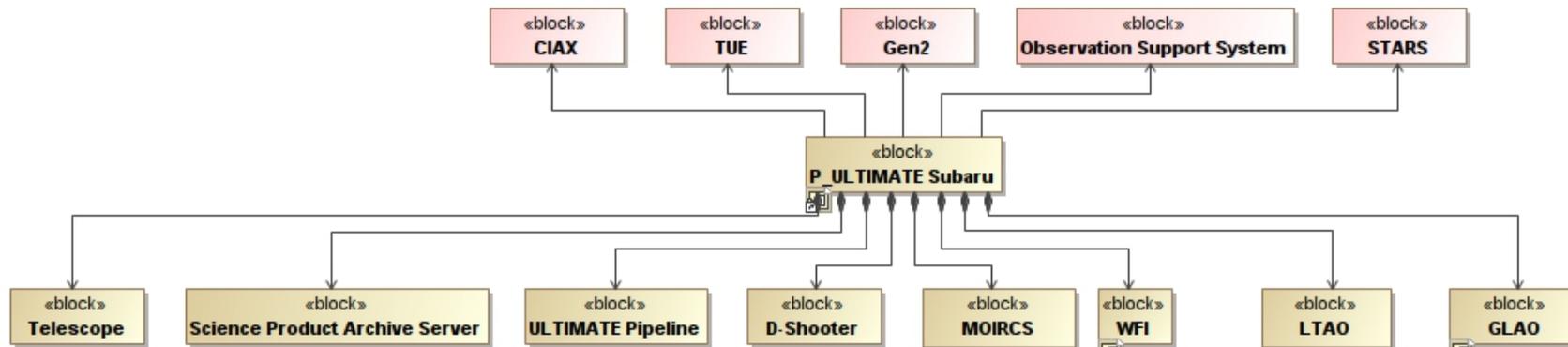
機能とポート



物理構造、サブシステムの定義



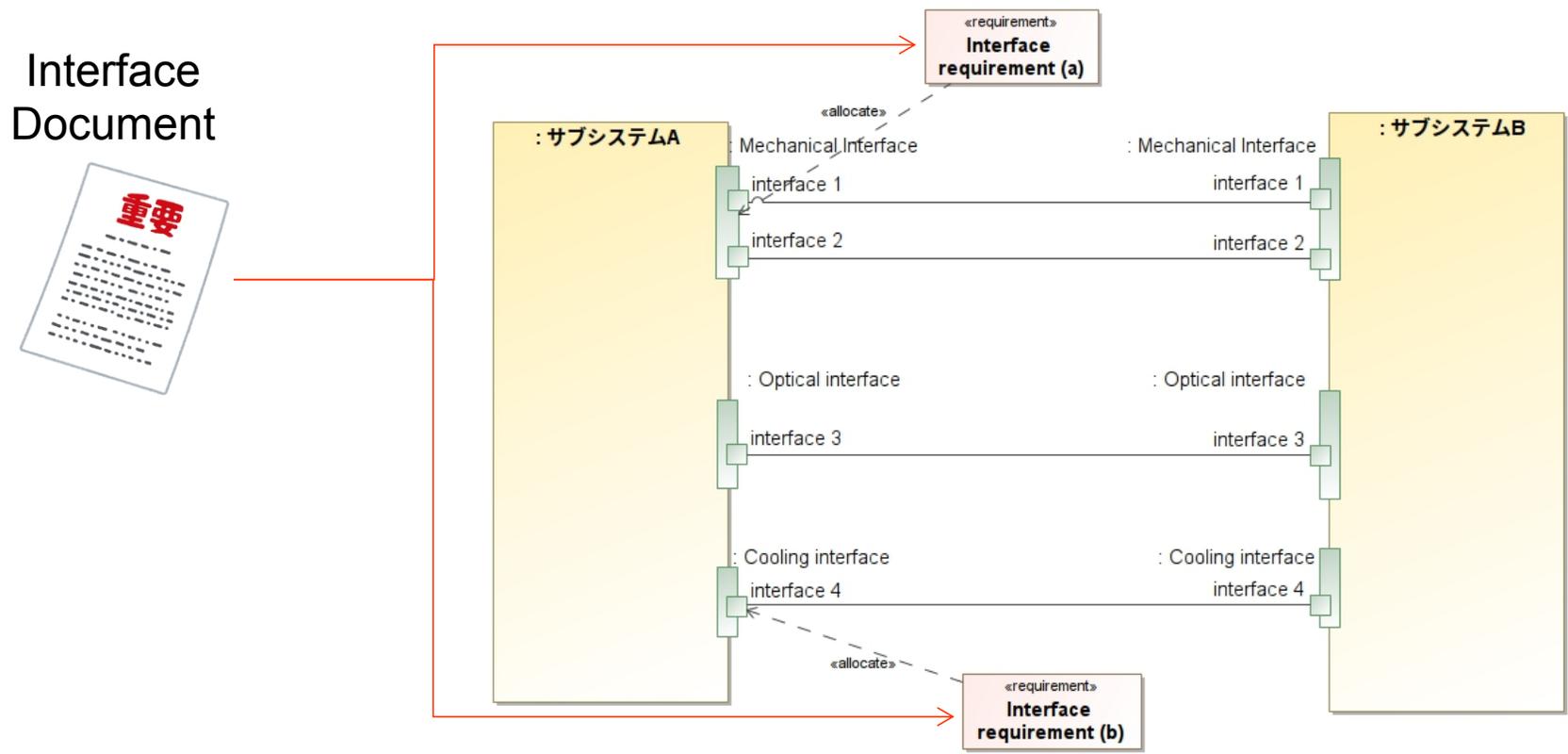
- 機能構造を実現する物理構造(サブシステム)を定義する。各物理が下位のサブシステムであり、次の検討対象となる
- 新規システムと既存システムで分ける。
- 各物理は機能や要求と紐付いていて、基本的にそれがサブシステムへの要求となる



インターフェイス要求



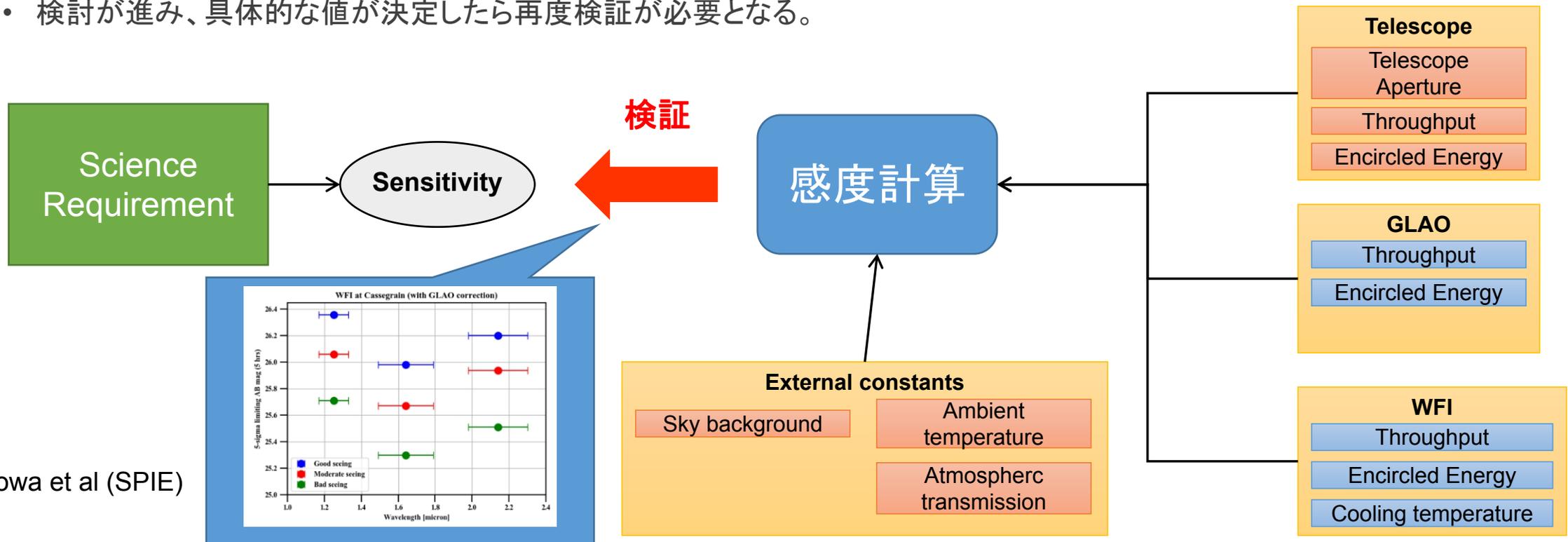
- トップレベルのインターフェイス要求は書類にまとめた
- サブシステム間のインターフェイスについては、物理の内部ブロック図とポートでモデル化する(予定)





検証とサブシステム要求への分解

- いくつかのトップレベル要求は、複数のサブシステムの要素にBreak downする必要がある
- 今後の検討で決まる値に対して仮定を置く（Simulationの結果、似てような装置の値など）
- トップレベルの要求が満たされているかを検証し、問題がなければ仮定した値をサブシステムへの要求として扱う。
- 検討が進み、具体的な値が決定したら再度検証が必要となる。

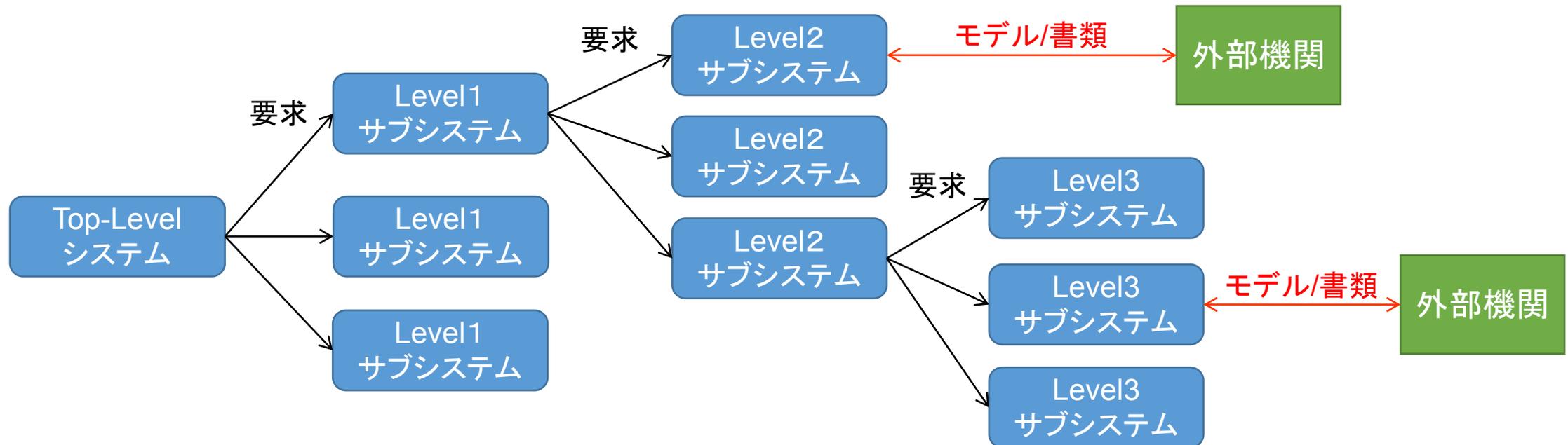


See Minowa et al (SPIE) 2020

下位のサブシステムの検討へ



- 上位のシステムから降りてきたの要求をスタート地点として、各サブシステムに対してSEのプロセスを進めていき、さらに下位のサブシステムやその要求を検討していく。
- 検討の結果修正が必要な場合は、上位のシステムやサイエンス要求まで立ち戻り確認する。
- 外部の機関に任せる部分は、モデル/書類で要求や仕様を共有する。



4. これまでMBSEをやってみての感想・課題など

これまでの活動を振り返ってみて



ULTIMATE
S u b a r u

- 具体的な活動を開始したのは2020年初めくらい、企業にコンサルを依頼したのが2020年夏頃
 - Systems Engineeringの基本的な考え方、進め方は学ぶことができた。
 - 2021年夏前に装置のCoDRがあったが、要求から装置の仕様を決めるにあたりSEの活動での経験を活かしたと感じている
- MBSEについて
 - 基本的な図の意味、ツールの使い方などは学ぶことができた。
 - 実際にモデル上で作業することで、システムへの理解が整理された。
 - 繋がっている箇所、繋がっていない箇所、辻褄が合わない箇所などがわかりやすい

MBSEの有用性については手応えを感じている が……



- 各サブシステムの具体的な検討が進むにつれて、Systems Engineeringの活動に手が回らなくなってきた。
- Top-levelの検討はまだいいが、各サブシステムの検討を5人で毎回議論するのは不効率・不可能。
- 特にMBSEの場合、モデルの管理も必要。**やはり専任の人が必要か**
- 協力しているオーストラリアの機関(ANU)ではSE専任がいる。
 - 毎回の議論に参加している。具体的な議論は、すばる側やオーストラリアの開発側との間で行われるが、その結果出てきた要求やインターフェイスの情報を逐一モデルに反映して管理してくれる。
 - 最終的にレビューなどで情報が必要な場合、モデルから書類を自動生成できるようだ
- 一方で、SEの講習などで話を聞くと・・・
 - 研究者・技術者は基本的に「専門家」なので、「全体を俯瞰的に見る」という点ではトレーニングが必要。これが結構大変。時間がかかる。
 - 我々も基本は学んだが、実践できるかということそれはまた別の話。もっと経験が必要。



- まだまだ新しい分野。情報が少ない。
 - SE講習などを聞くと、だいたい「今後のSEについて」などの最後で紹介されるほど最新の話題
- 色々なモデルや図が用意されているが、絶対的な使い方があるわけではない。他のMBSEの活動を見ても、図の使い方は様々。
- どういう時にどういうモデルを採用するのがいいかは、経験が必要
 - まずは企業のプロにモデルの作成を依頼して、やり方を学んでいる
- MBSEを使う目的を明確化する。
 - 色々できるが、必要な作業に的を絞ったほうが良い
 - 単なる作図にならないように。モデルはある程度適当でも良いので、本質を捉えることが重要



- Scientistの議論について
 - 最初は科学要求に「as good as possible」とか「better than 他の装置」という記述が多かった
 - これだと科学的根拠が乏しい。トレードオフが必要な際に判断が難しい。
 - Scientistは「どこまでできるか」が知りたい、開発者は「何がやりたいのか」が知りたい
 - イテレーションが必要
- メンバーについて
 - ある程度大きなサブシステムについては担当者がSE活動に参加したほうがよい
 - メンバーがいるシステムは検討が進むが、メンバーがいないとSEの検討もなかなか進まない(SEに限らないかもしれませんが。。。)



- ULTIMATE-Subaruのシステム検討をMBSEを用いて検討を進めている
- Top-Levelの要求からシステム、サブシステムの要求・仕様までTracabilityを管理したい
- モデルの大枠は完成している。細かい要求や要素間のつながりについては現在作業中
- SE、MBSEの基本的な考え方、進め方については学ぶことができ、実際のレビューでも活かしている。
- 一方で人員不足・経験不足は否めない。今後どのように進めていくかは要検討。