



CAE、CPSとデータ同化のつながり

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
加藤 博司

第2回 理研データ同化ワークショップ
2017年9月26日(火) 理化学研究所計算科学研究機構

- データ同化
- CAE
- データ同化とCAE
- 航空流体力学分野でのデータ同化研究紹介
- データ同化とCPS
- まとめ



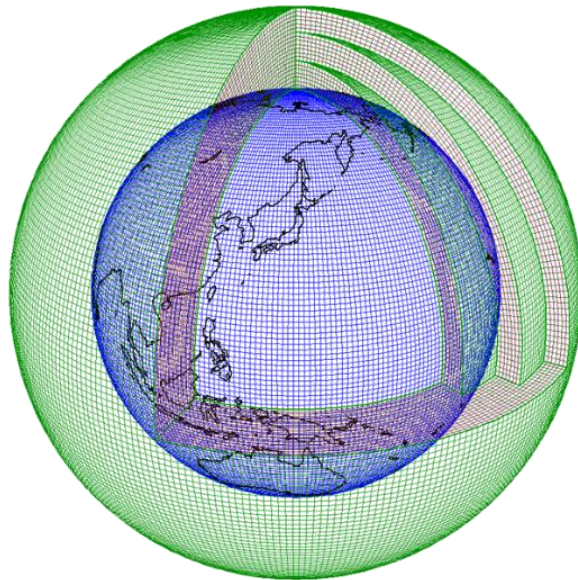
→ データ同化

→ データ同化

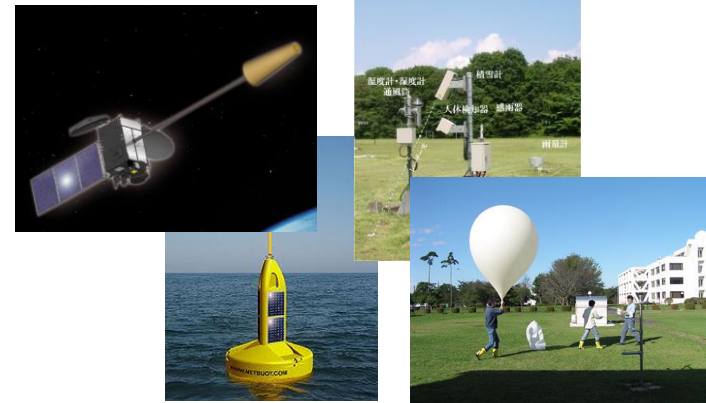
– データ駆動型シミュレーション技術

– 複雑な実世界を忠実にシミュレーションするための統計数理手法

- 実世界をモデル化したシミュレーションには、必ず**不確かさ**が存在する
- 実世界を切り取った計測データは、(多くの場合)疎である



数値天気予報
(不確かさ: 初期境界場)



(疎な)観測データ

高精度な数値天気予報の実現のために、
(疎な)観測データから初期境界場を推定

- “実世界”をシミュレーションするための方法の1つ
 - シミュレーション科学(仮想空間)だけでは“実世界”を表現できない

実世界

$$z_t = f_t^{true}(z_{t-1})$$



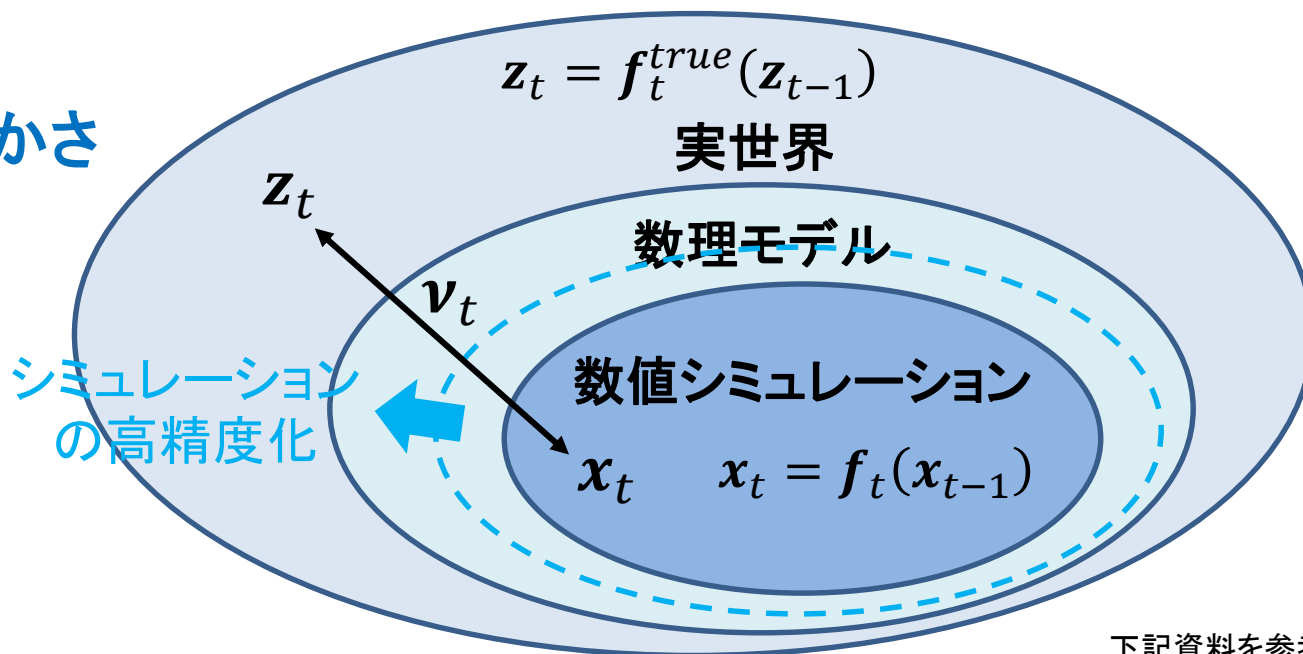
数理モデル



数値シミュレーション

$$x_t = f_t(x_{t-1})$$

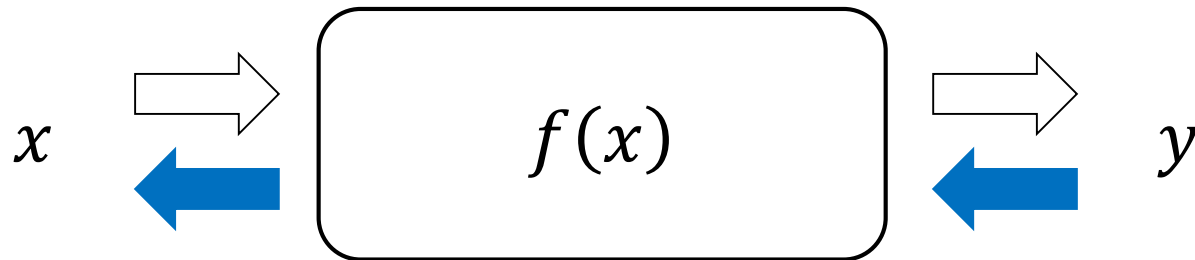
v_t : 不確かさ



下記資料を参考
「データ同化入門」樋口知之(統数研)

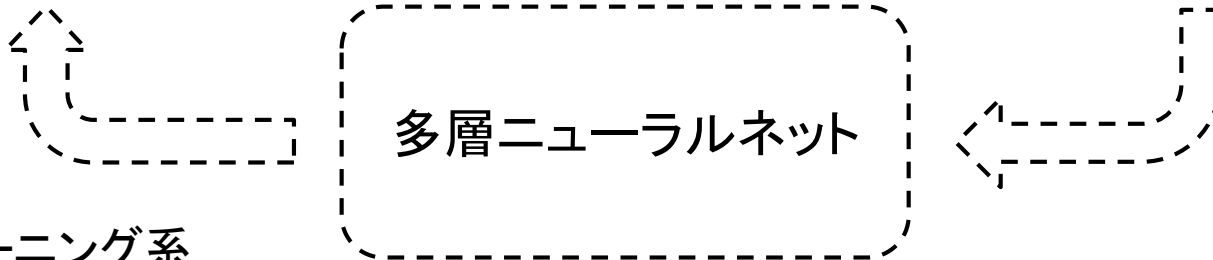
→ ただし、データ同化は、逆問題解法の1つ

- なんらかの観測情報 y が得られた時、 $f(x)$ を制約条件とし、 x を推定しよう
 1. 最尤法: $f^{-1}(x)$ (アジョイント)を使って、 x を最適化する
 2. ベイズ推定: $f(x)$ のサンプルから確率分布を定義し、確率密度を最大化させる



※気象予報の場合、 $f(x)$ は、気象予報モデル

余談

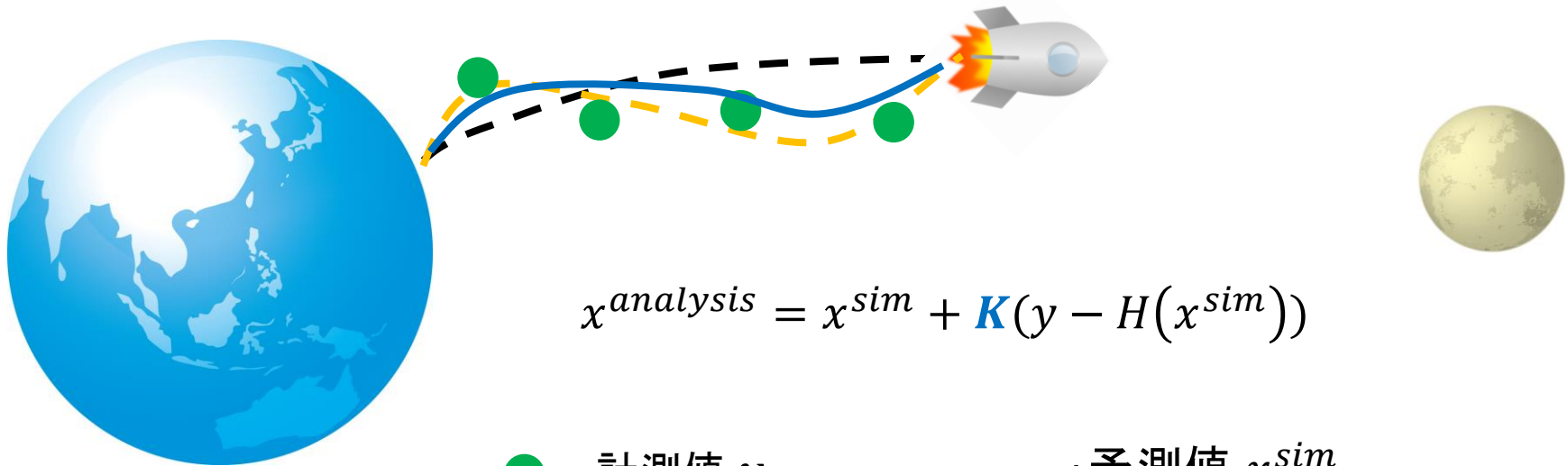


ディープラーニング系
のアプローチ

※入カー出力間のシステムがよく分からない時、特に有効

→ ただし、データ同化は、制御技術の1つ

- 逐次型データ同化手法として、非線形カルマンフィルタがある
- 計測情報を使ってシステムの状態(モデル空間)を逐次的に推定し、実世界に近づける(※最古のカルマンフィルタは、アポロ11号で利用)

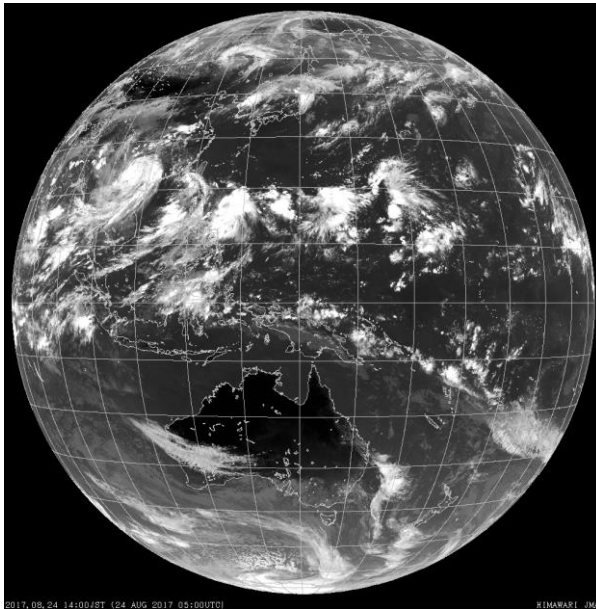


$$x^{analysis} = x^{sim} + K(y - H(x^{sim}))$$

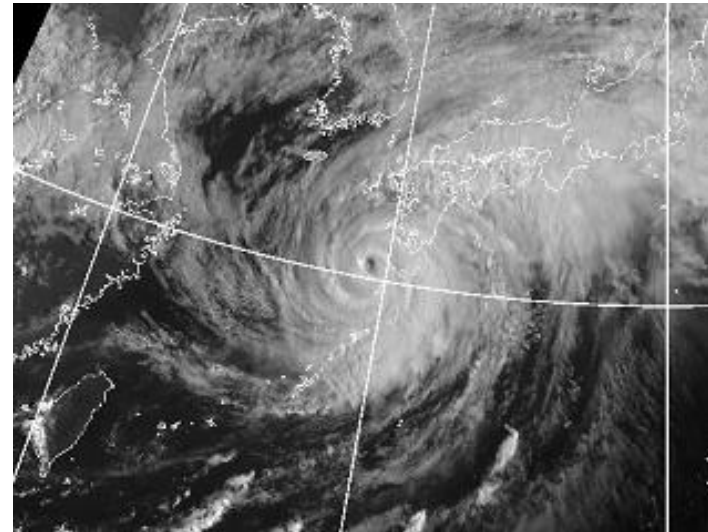
- : 計測値 y
- : 予測値 x^{sim}
- : 真の軌道 x^{true}
- : 推定値 $x^{analysis}$

→ データ同化の特徴

- データ同化は、気象海洋分野で磨かれてきた理論体系
- 気象海洋分野が扱うのは、**大規模・強非線形システム**の1つの**“流体”**
- つまり、データ同化は、**大規模・強非線形システム**を対象とした逆問題解法、制御手法の1つ



<http://www.jma.go.jp/jp/gms/large.html?area=6&element=0>

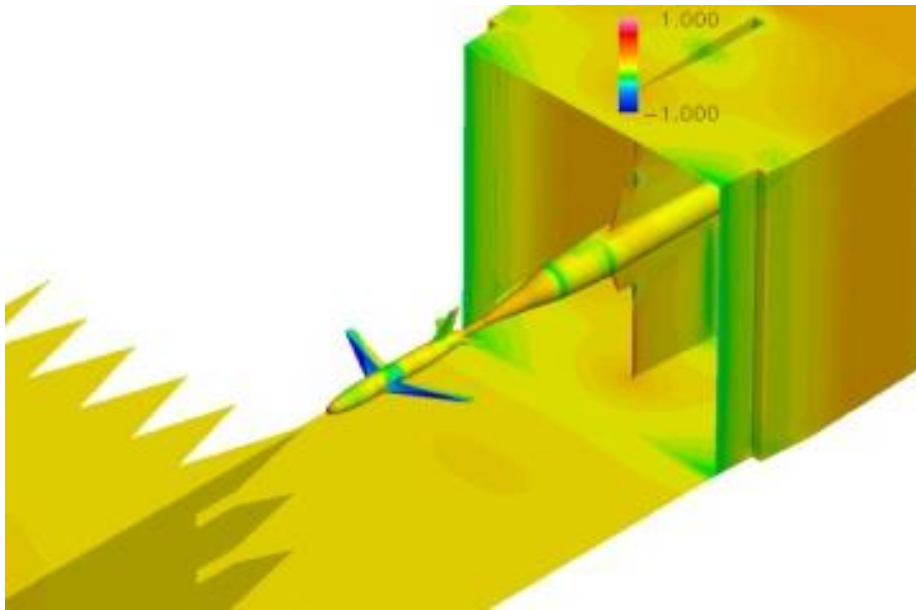


<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/typhoon/1-2.html>

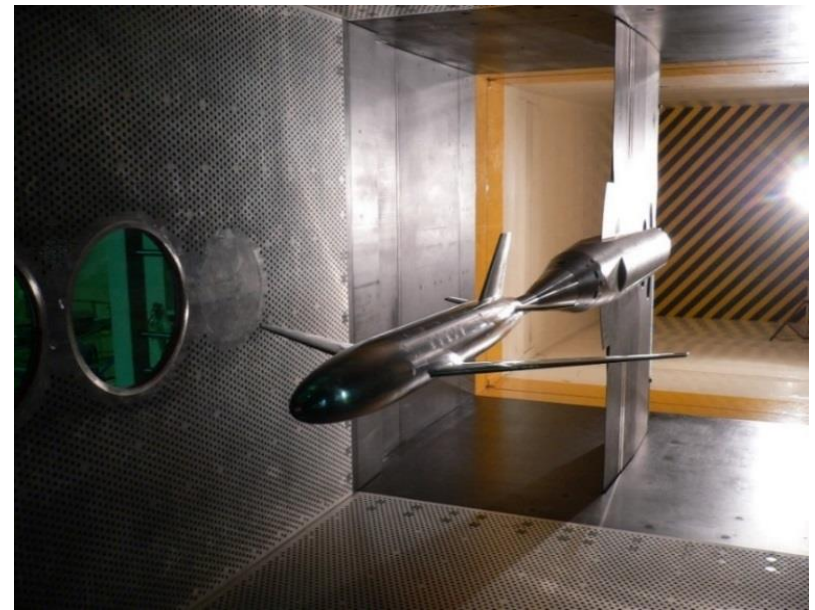
→ CAE

→ CAE

- Computer Aided Engineeringの略語
- 多くの制約条件の中で実施されるモノづくりを計算機内(仮想空間)で実現



仮想空間: 流体シミュレーション(CFD)



実世界: 風洞実験

航空機の空力性能の評価の場合

→ 最適設計(設計探査)

- 多くの制約条件を満たす設計解(候補)を計算機内で求める



MRJのウィングレット形状など



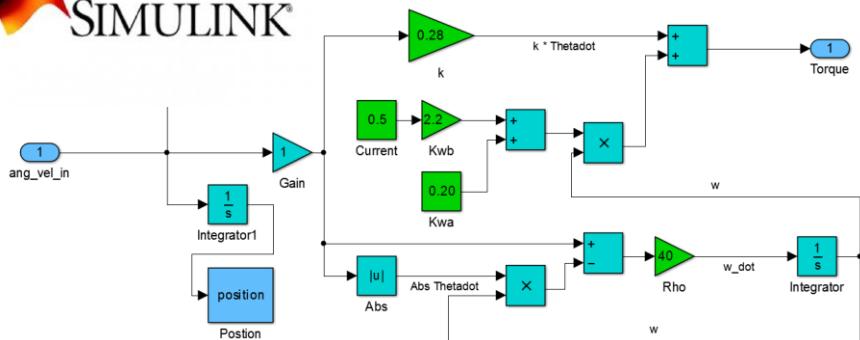
新幹線N700系のフロントノーズ
(エアロダブルウィング)

いずれも、遺伝的アルゴリズム(最適化手法の1つ)やデータマイニング手法を活用し、設計解候補を求めている

→ システムシミュレーション

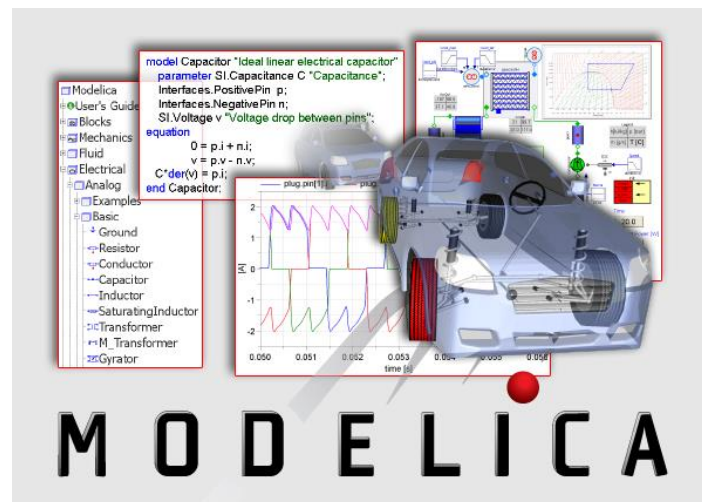
- モデルベース開発(MBD)を実現するための“**キー技術**”の1つ
- 物理モデルと制御モデルを組み合わせ、システムの挙動を計算機内で予測
 - 特に、自動車産業で利用されている(と認識しています)

(代表的なツール、または言語)



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Bilde_av_Dahl_model.PNG

MATLAB Simulink

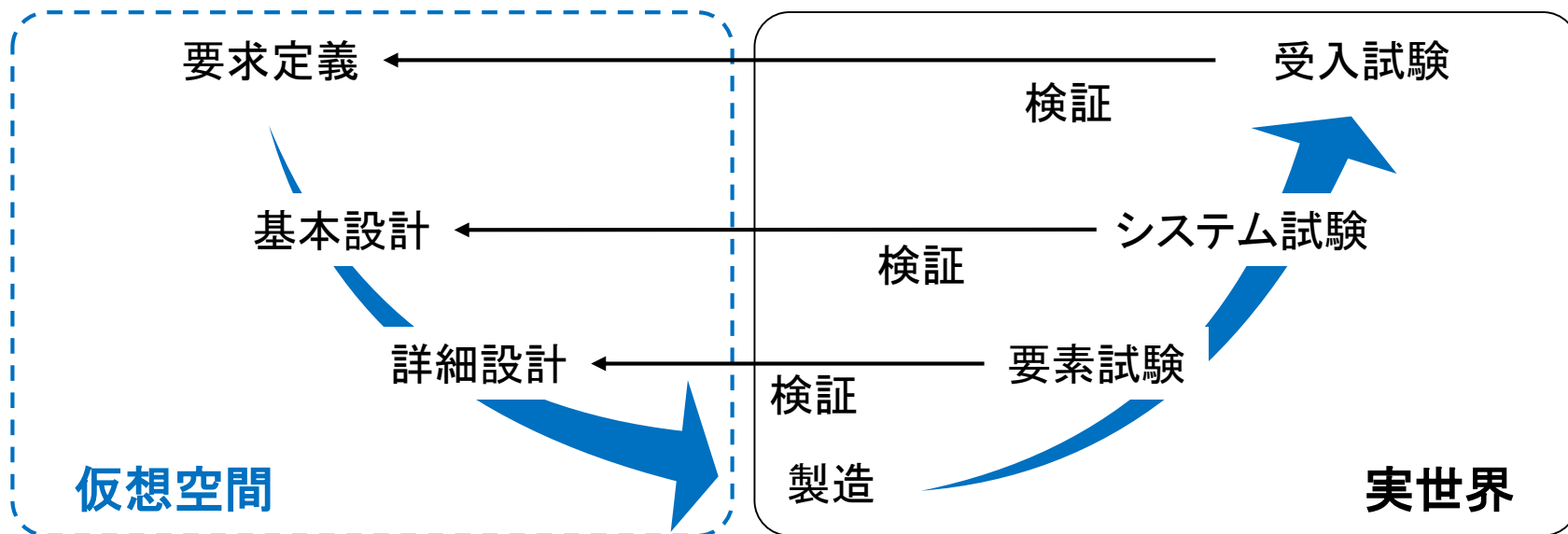


<https://www.modelica.org/images/Modelica-Collage-600px.png>

Modelica

→ 設計期間の短縮、設計の手戻り防止

- 上記を目指す時、“最適設計(設計探査)&システムシミュレーション”は、いずれも必須な“手段”(⇒ 既に多くの現場で導入されていると思う)



Vモデル(ウォーターフォールプロセス)

【課題】仮想空間を、いかに現実に近づけるのか(拡大させるか)?

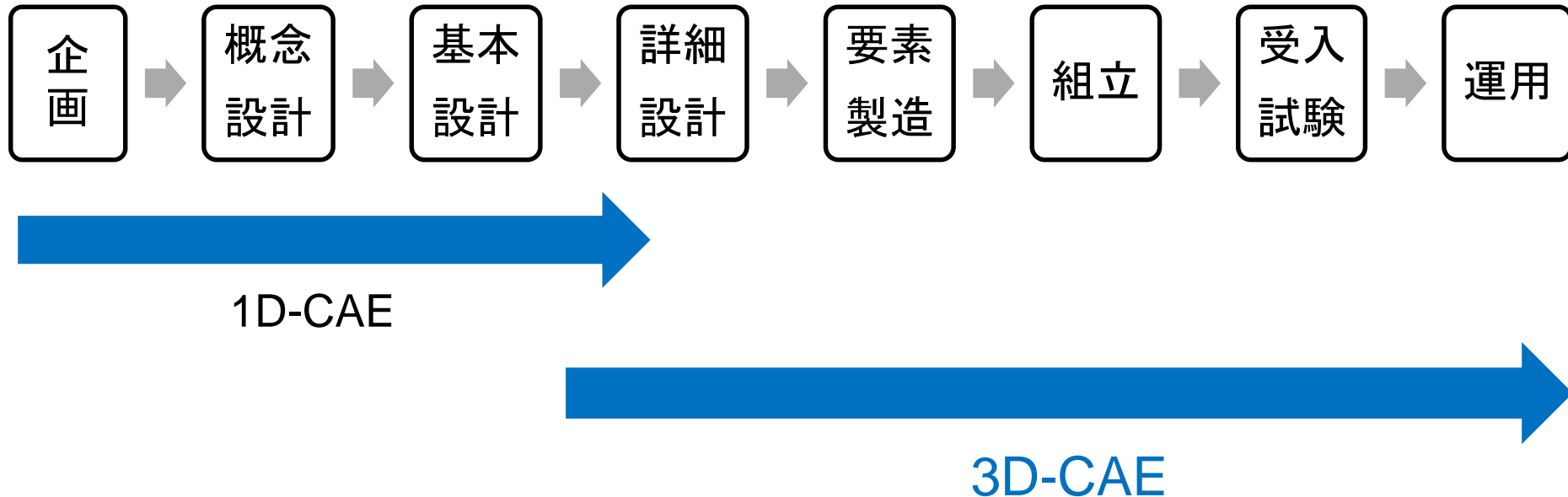
→ データ同化とCAE

→ データ同化の可能性

- ★ シミュレーションに必要な**初期・境界値を推定**する
(初期値推定については天気予報で実用化)
- ★ シミュレーション内で**経験的に与えられているパラメータの最適化**
シミュレーションと観測を融合して新たな統合データセットを作成する。
これは**再解析データセット**と呼ばれ、新しい科学的発見をもくろむ。
- ★ 感度解析を行い**観測システムの評価と改善策**を効率的に行う。
従来シミュレーション科学において副次的問題とされてきた
シミュレーションモデルの評価法に統一的視点を与える。

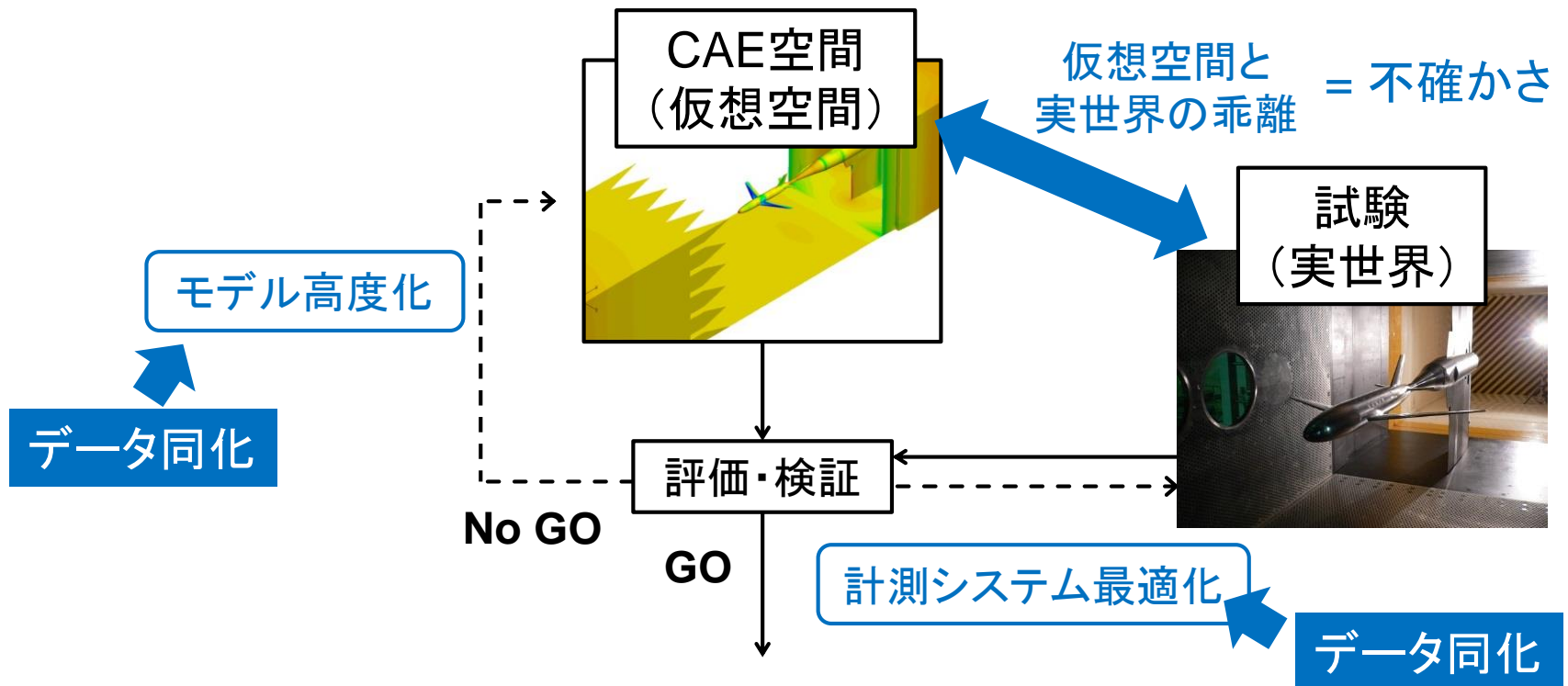
樋口(統数研)、蒲地(気象研)、他

- 設計プロセスには色々な段階が存在する
- データ同化は、詳細な形状や機能が決定し始める“詳細設計”以降に価値が高いのではないか？



→ データ同化の導入により、多くの不確かさ要因を“**システマチック(効果的&効率的)**”に推定・低減させる

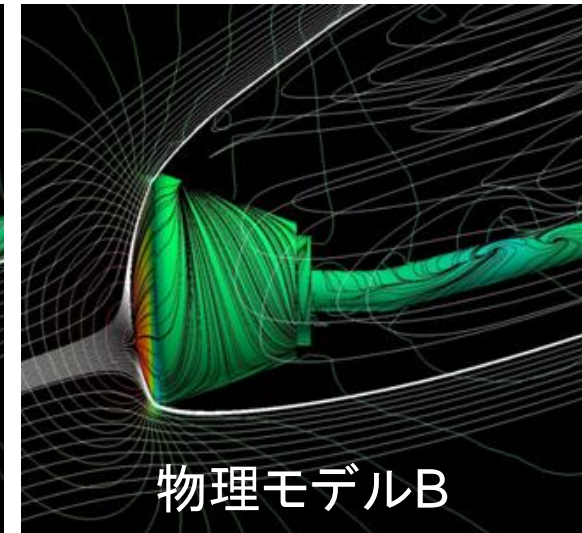
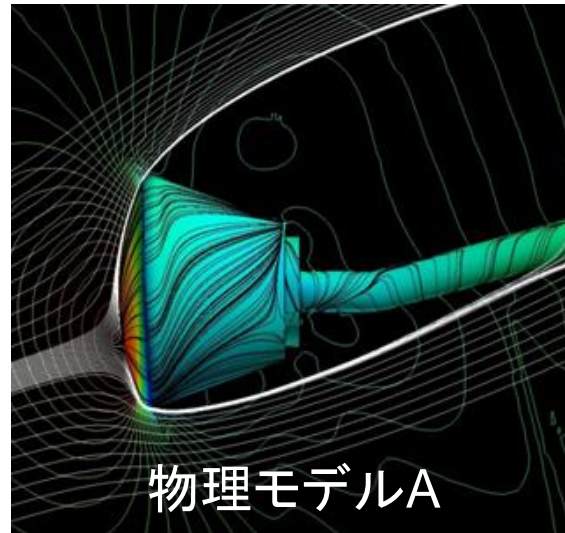
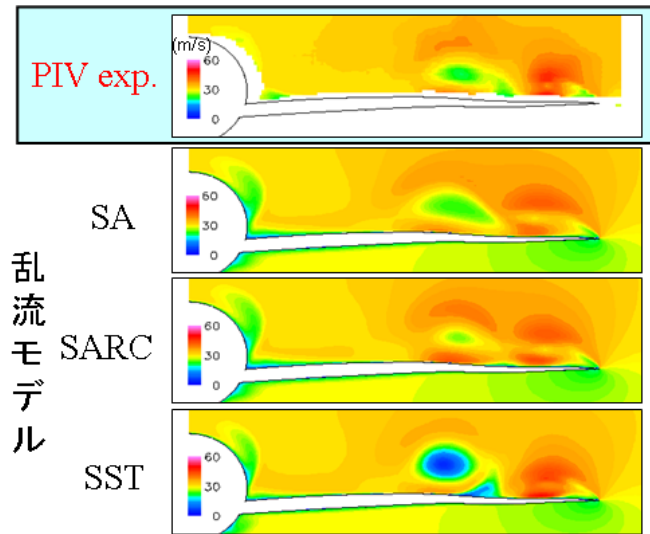
- 現状、人間の過去の経験を活用したり、試行錯誤で計測値に合わせこむ
- しかし、解析対象が複雑になればなるほど比較に頼る方法は困難



→ 航空流体工学分野でのデータ同化研究紹介

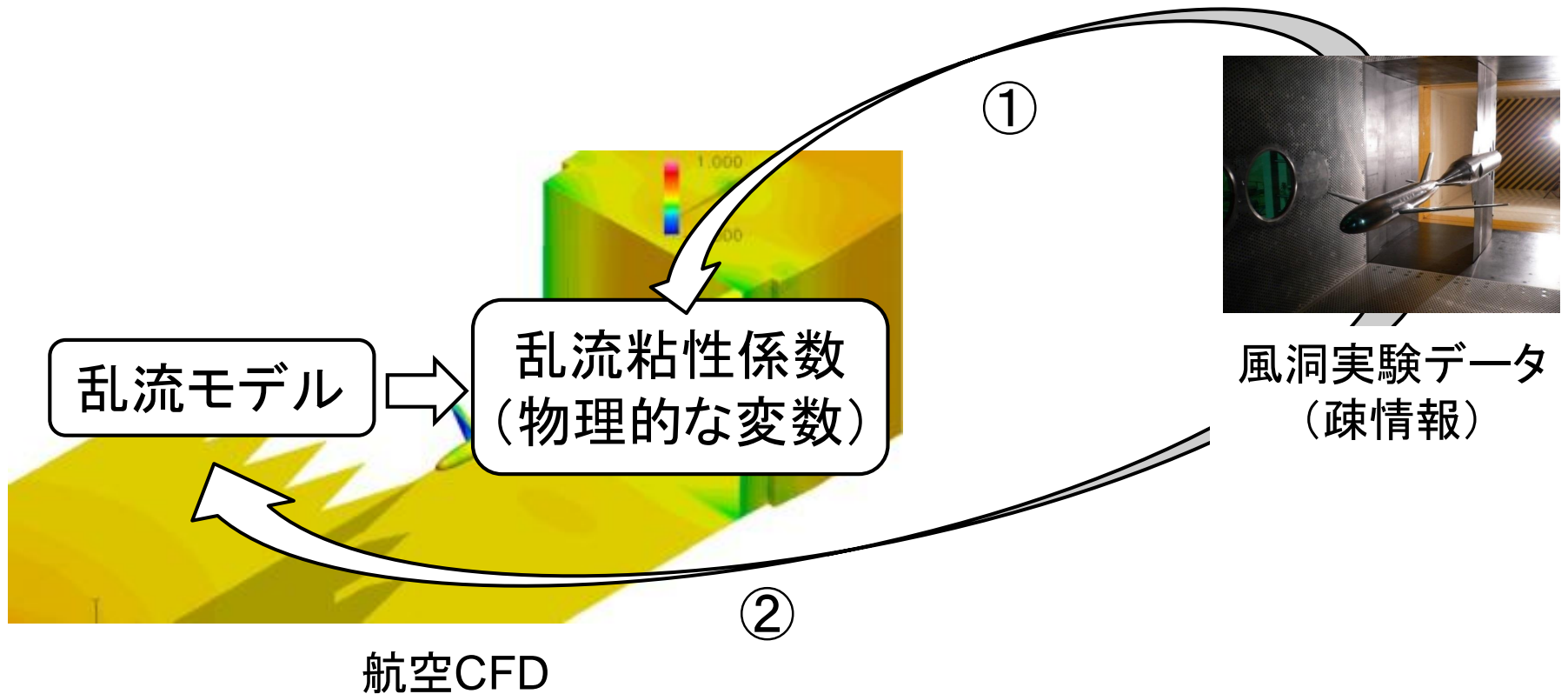
→ 航空流体分野に対するデータ同化の応用

- 航空流体シミュレーション(通称、CFD)の主要な“不確かさ”である“乱流モデル”へデータ同化を適用



乱流モデルの選択による解析結果への影響

→ 航空流体分野に対するデータ同化の応用事例



①乱流粘性係数の推定(モデル空間の推定)

②乱流モデル内パラメータ値の最適化(モデル予測性能最大化)

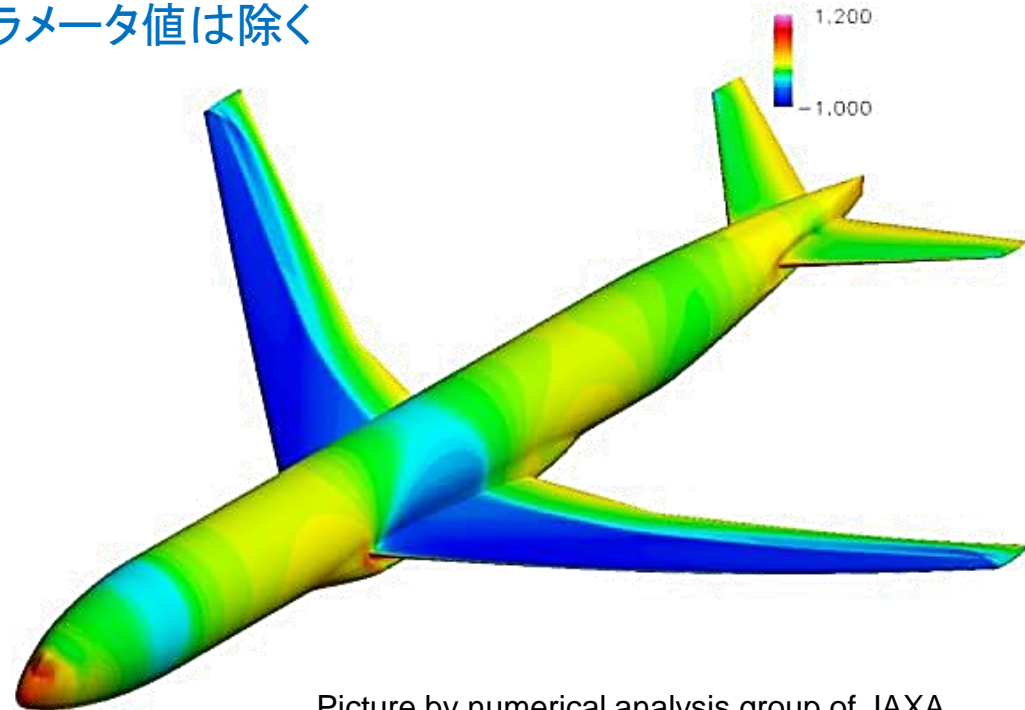
→ 乱流モデル

- 数多くの乱流モデルが存在する
- 内在する“不確かさ”
 1. モデル式自体
 2. 経験的・実験的に決まるモデルパラメータ値

※理論的に導出されるパラメータ値は除く

- Cebeci-Smith
- Baldwin-Lomax
- P. D. Thomas
- Baldwin-Barth
- Spalart-Allmaras
- Menter SST
- Compressible SST
- Chien $k - \varepsilon$
- Rumsey-Gatski EASM

etc.



Picture by numerical analysis group of JAXA

→ Menter k- ω SST turbulence model

– 航空流体力学分野で多用される乱流モデルの1つ

- 境界層内層(k- ϵ)と外層(k- ω)で乱流モデルを切り替える

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}.$$

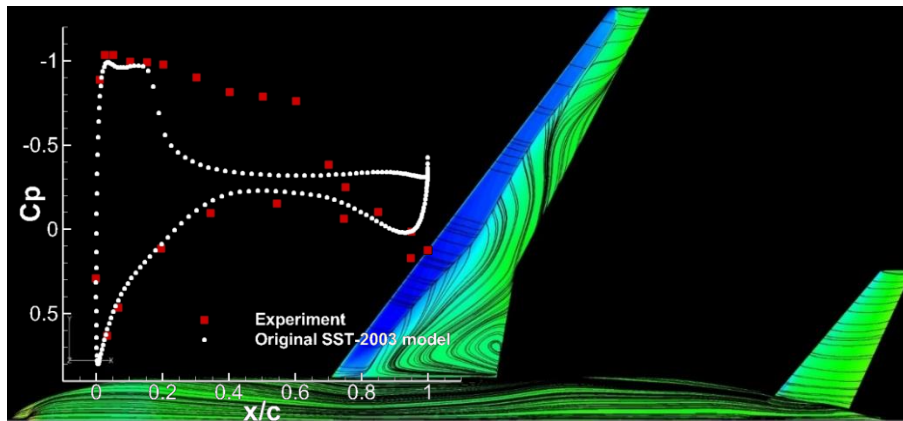
← データ同化の対象

1. 逆圧力勾配(剥離の原因)をモデル化した部分の1つ
2. モデル導出の過程で a_1 というパラメータが導入される
3. この a_1 のパラメータ値をデータ同化により最適化
4. データ同化に使った実験値は、基礎的な流れ(バックステップ流)から抽出

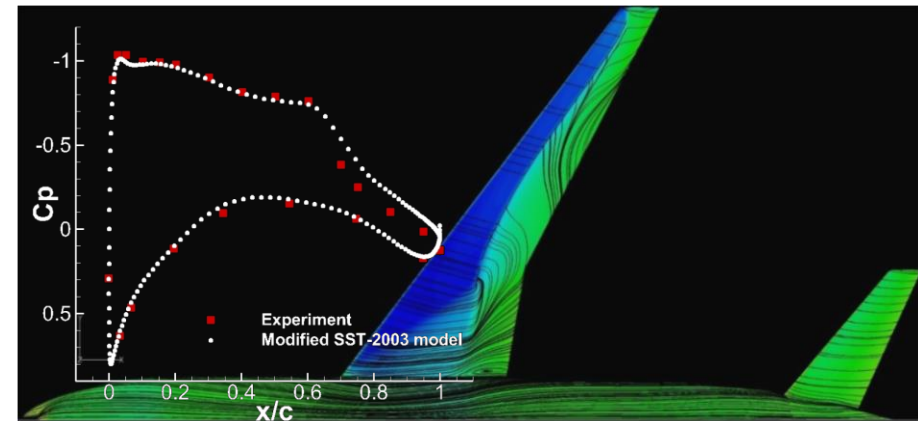
→ NASA CRM模型周りの流れ場での計算結果

- 最適パラメータ値 ($a_1 = 1.0$) での計算は、翼根での過大な剥離を抑制
- 他の流れ場でも最適パラメータ値の有効性確認

(参照) H. Kato, K. Ishiko, and A. Yoshizawa, "Optimization of Parameter Values in the Turbulence Model Aided by Data Assimilation," *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 5, Pages 1512-1523, 2016.



SST-2003 with $a_1 = 0.31$



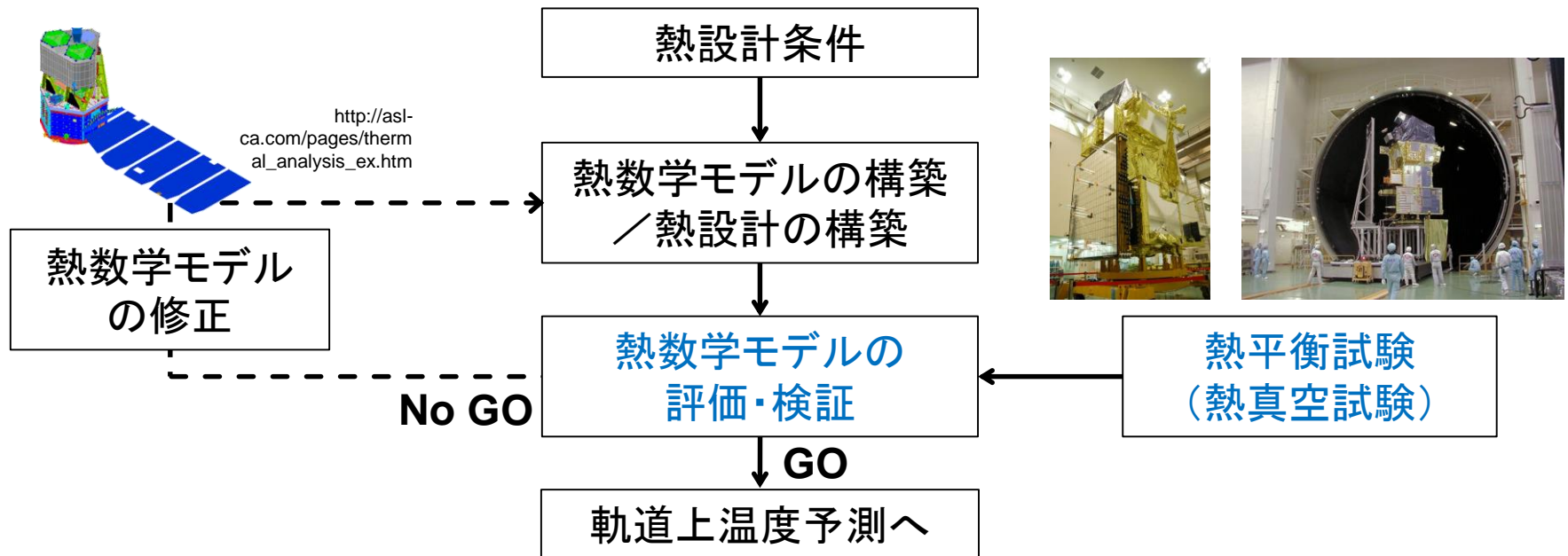
SST-2003 with $a_1 = 1.0$

モデルの予測性能を最大化させることで、最適設計が適用できる仮想空間を拡大させることが可能になる

→ データ同化とCAE(続き)

✖ データ同化によるモデルパラメータ値最適化の【他応用候補】

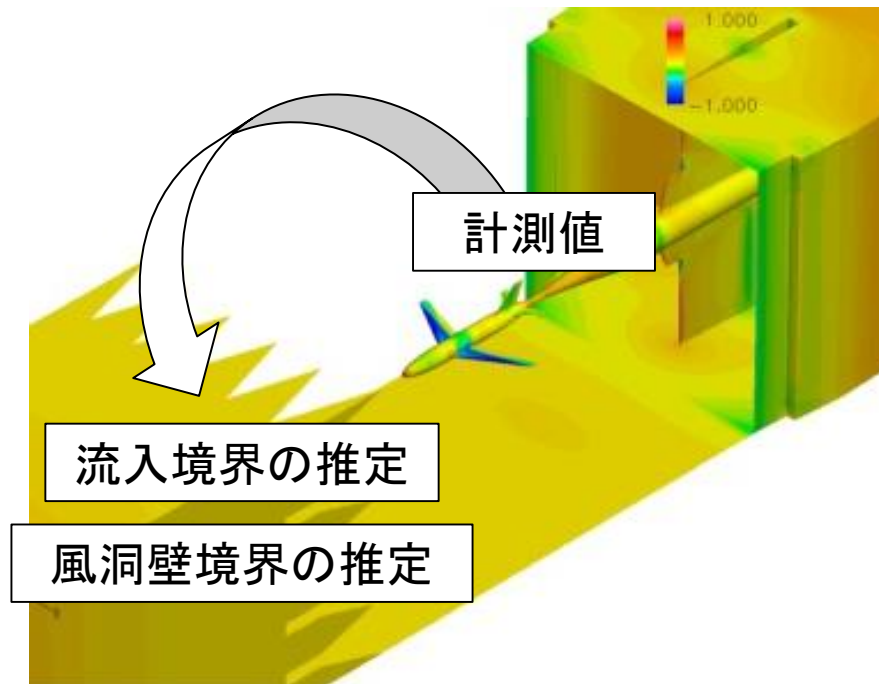
- 衛星熱設計プロセスの中では、熱平衡試験結果にモデルパラメータ値（多くは接触熱抵抗値）を合わせ込む作業が存在する
- 人間でもある程度の精度で合わせ込めるが、その“効率化”に貢献できる可能性はある



衛星熱設計プロセス(の一部)

→ モデル高度化

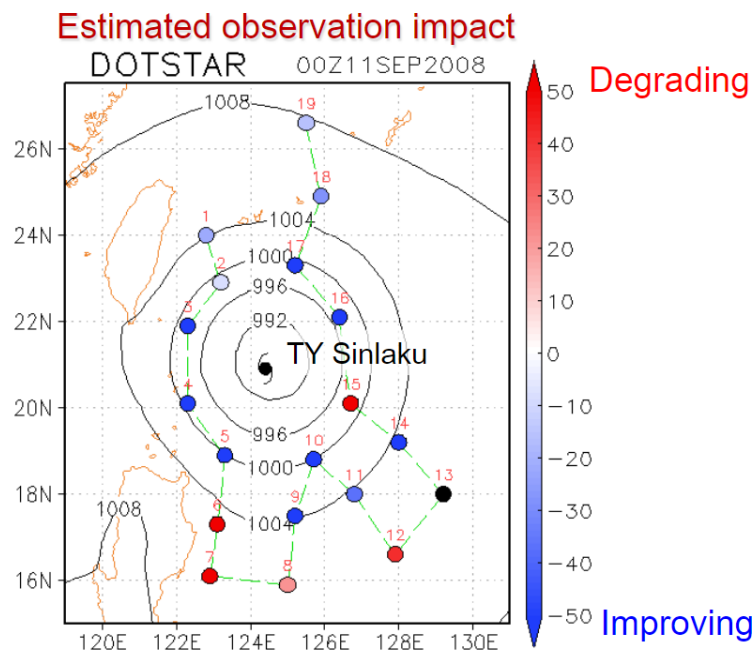
- モデル高度化 = “モデル自身”の高度化だけではない
- モデル空間を現実に則するように設定し、モデル予測性能を最大化することも解決すべき
 - 初期・境界条件など



航空機の空力性能の評価の場合

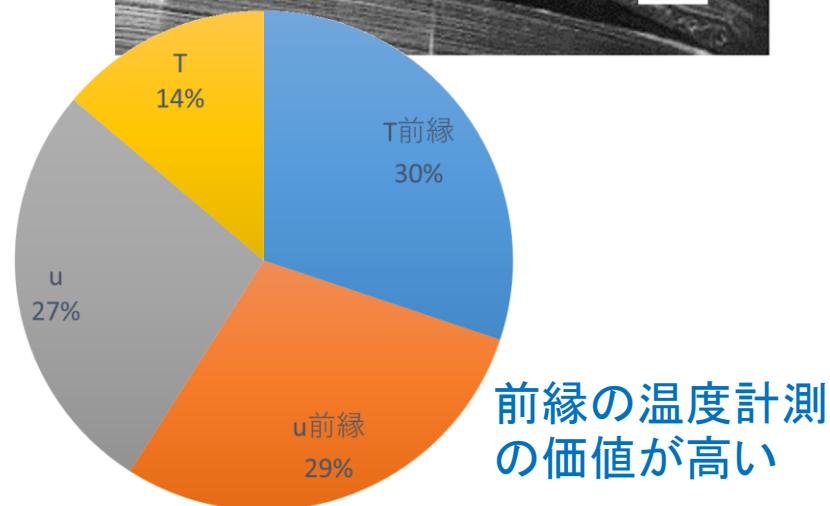
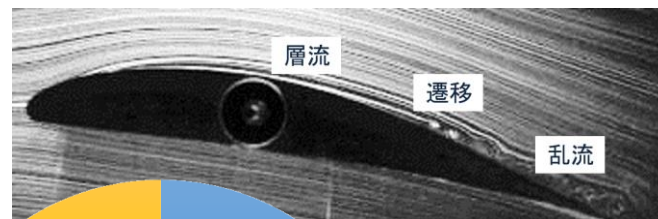
→ 計測システム最適化

- モデル高度化にとって“**最適な計測情報・計測箇所**”の“**事前検討**”がデータ同化の導入により可能になる(?)



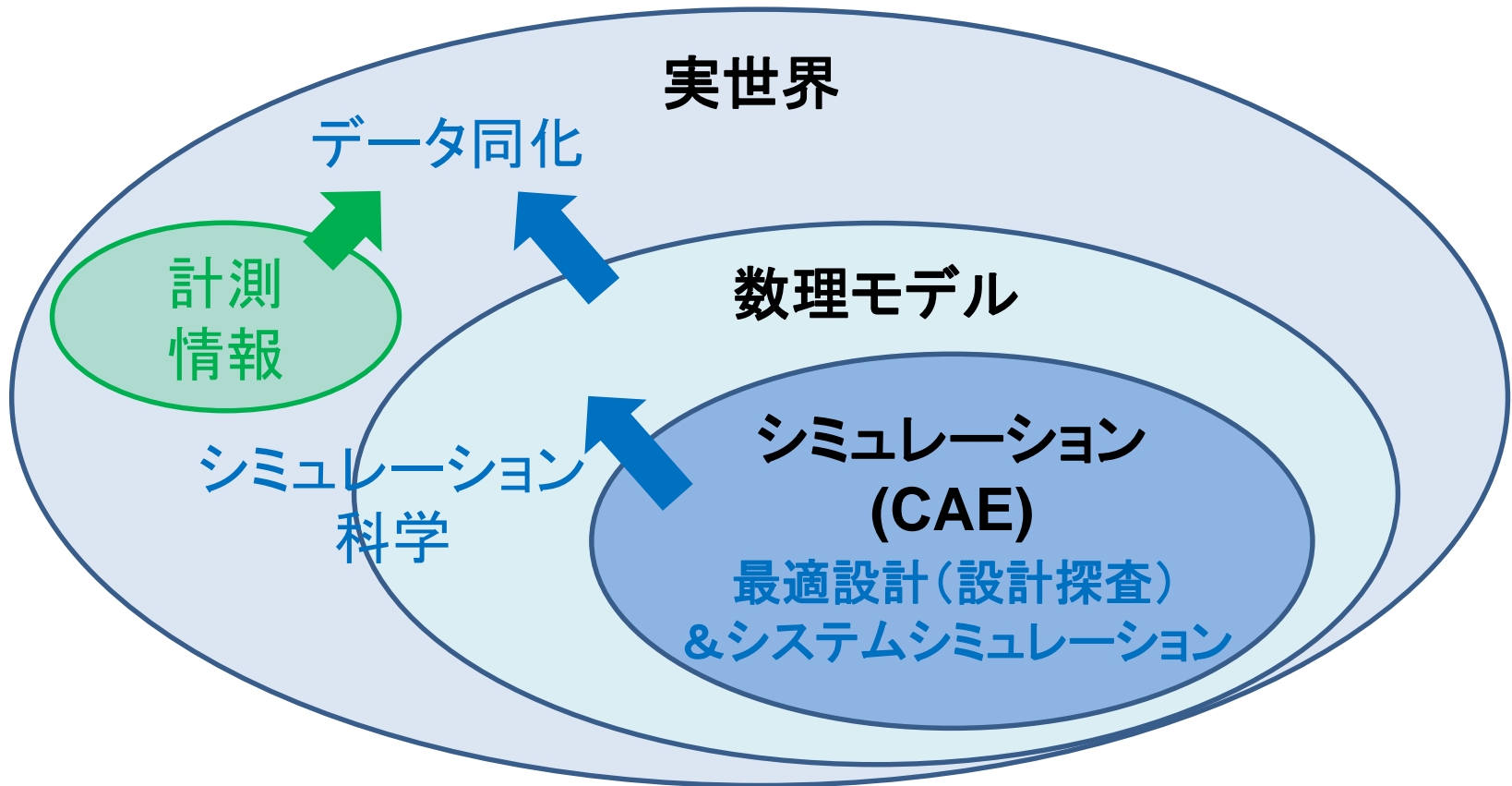
台風観測情報の評価
(赤:効果なし、青:効果あり)

(Prof. Eugenia Kalnay(Maryland Univ.)講演資料より)



遷移計測情報の評価
(数値実験上での評価)

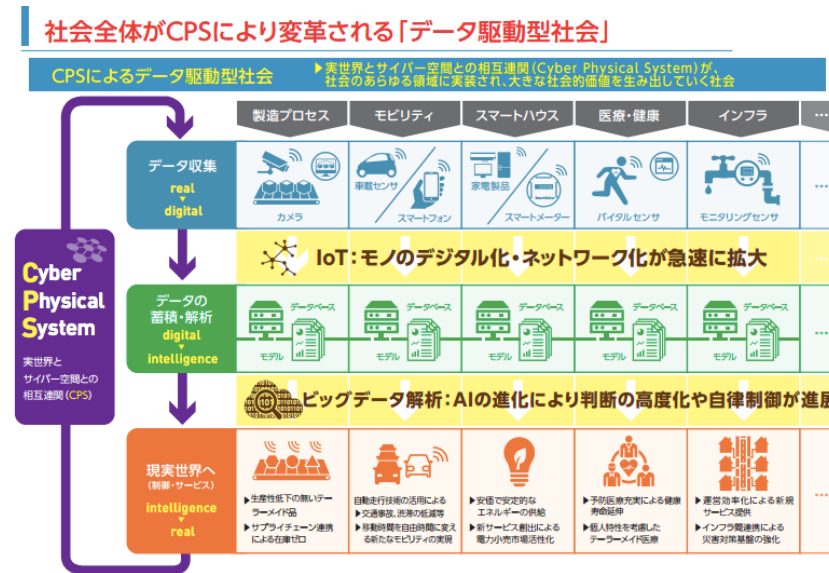
- データ同化の導入により、“最適設計(設計探査) & システムシミュレーション”の適用領域の拡大に貢献したい



→ データ同化とCPS

→ Cyber Physical Process (CPS)

- “実世界(フィジカル空間)”のセンサー情報と“サイバー空間”を連携・融合させ、新しい価値・サービスを提供
 - データ同化の目指す方向性と同じ
- データ同化は、“物理シミュレーション”が絡むCPS実現のための1つの具体的方法論？



産業構造審議会 商務流通情報分科会 情報経済小委員会
中間取りまとめ ～CPSによるデータ駆動型社会の到来を見据えた変革～ 資料より

→ データ同化の可能性

シミュレーションに必要な**初期・境界値を推定**する
(初期値推定については天気予報で実用化)

シミュレーション内で**経験的に与えられているパラメータの最適化**

★ シミュレーションと観測を融合して新たな統合データセットを作成する。
これは**再解析データセット**と呼ばれ、新しい科学的発見をもくろむ。

感度解析を行い**観測システムの評価と改善策**を効率的に行う。

従来シミュレーション科学において副次的問題とされてきた
シミュレーションモデルの評価法に統一的視点を与える。

樋口(統数研)、蒲地(気象研)、他

- 気象予測の場合は、密なフィジカル空間(センサー情報)と密なサイバー空間(シミュレーション)を連携させれば、局地気象予測も実現できそう



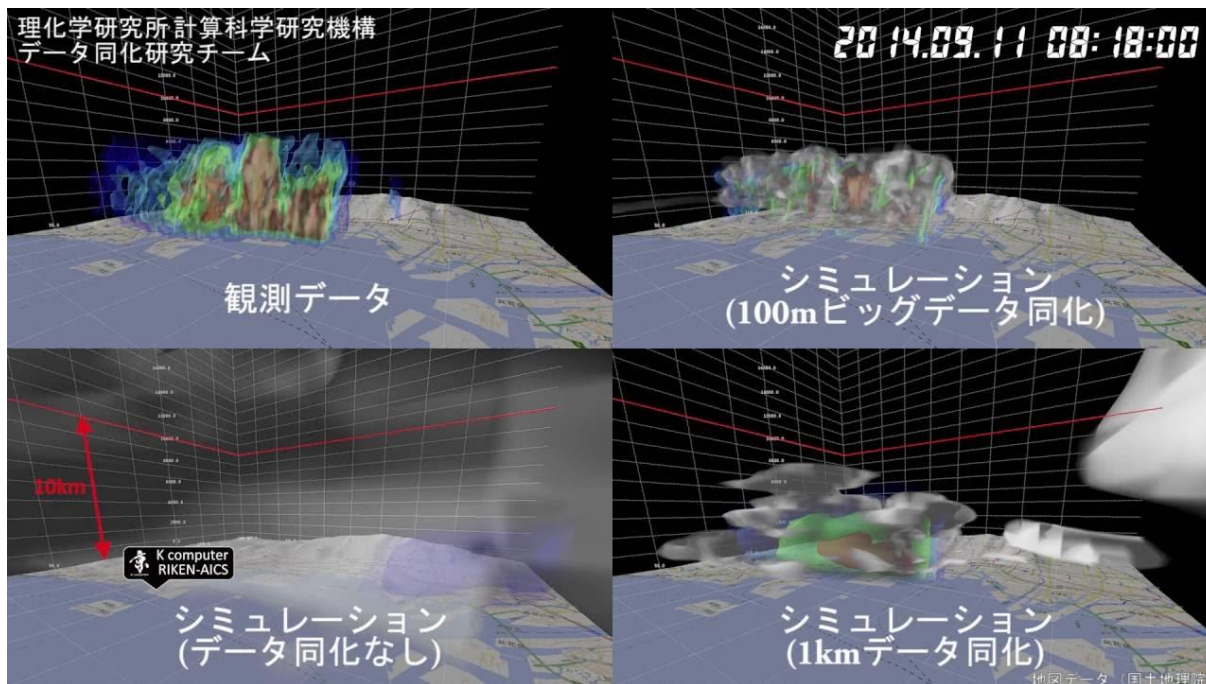
<https://www.nict.go.jp/press/2012/08/40/tfsk0000073fx5-img/20120831-01.png>

フェーズドアレイ
気象レーダー



<http://www.aics.riken.jp/>

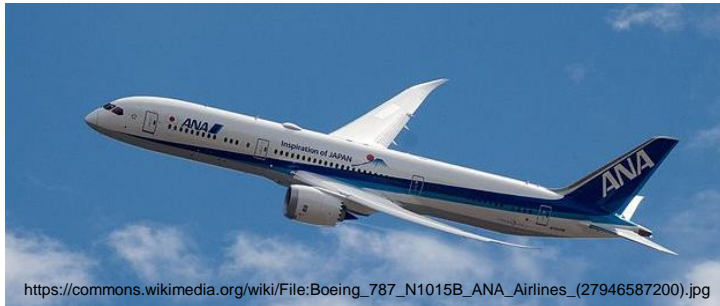
スパコン京



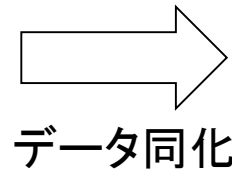
<https://i.ytimg.com/vi/s2PgH0mZ7G0/maxresdefault.jpg>

理研データ同化研究チームのゲリラ豪雨に対する取り組み

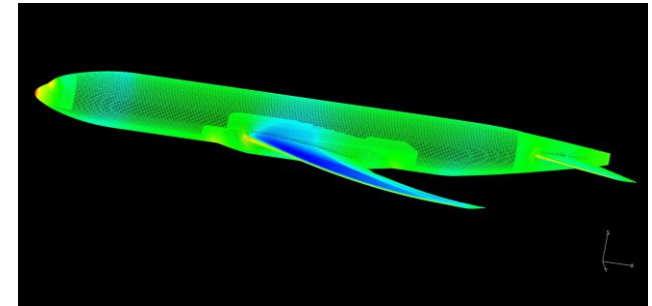
- ただし、設計に再解析データセット(≒CPS)をどう使う？
 - 例えば、以下のことは実現できそうだが...



飛行中の航空機



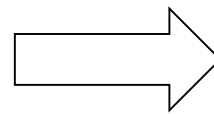
データ同化



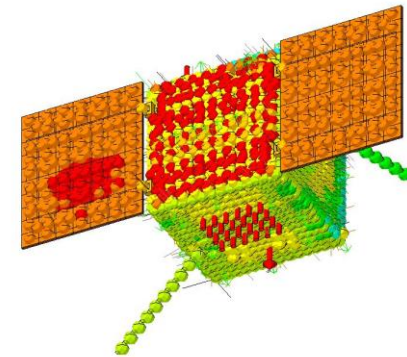
飛行中の航空機の表面圧力を推定



軌道上の衛星

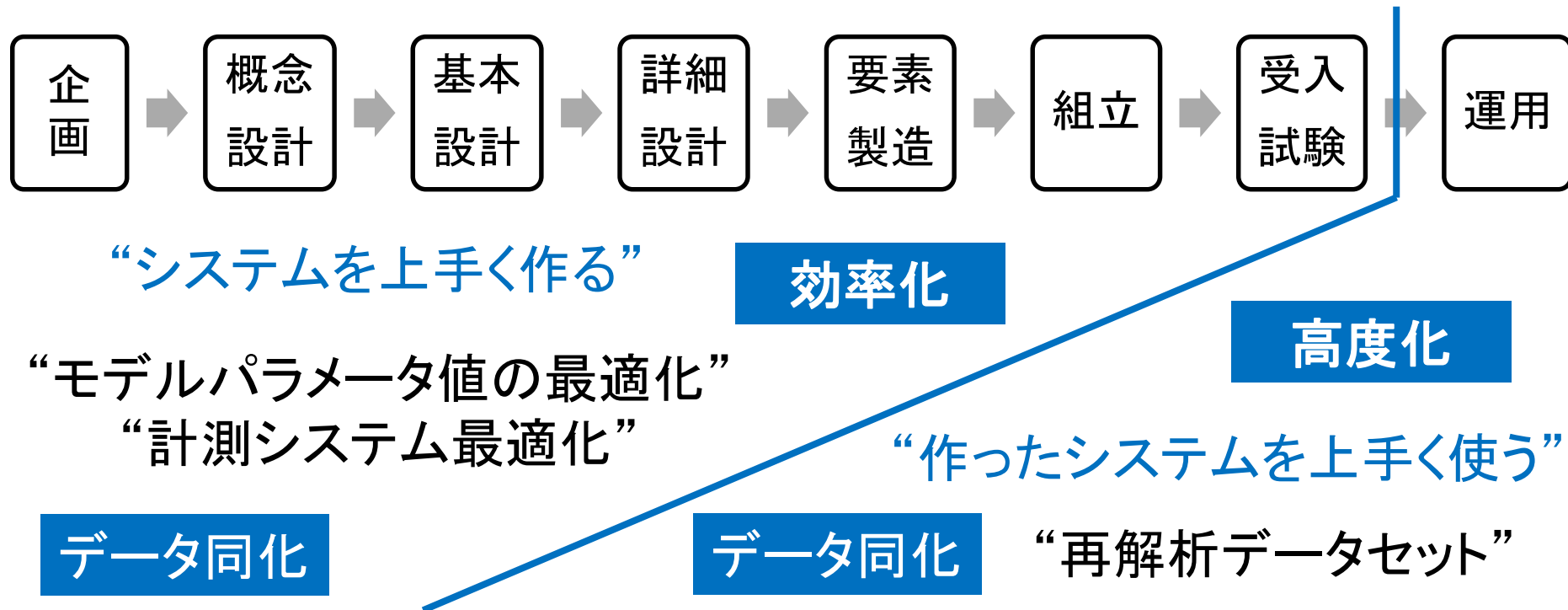


データ同化



軌道上衛星の表面温度分布を推定

- 再解析データセット(≒CPS)を“設計プロセス”へ活用するメリットは現時点では整理できていない
- 一方、実運用下のシステム制御に再解析データ・セット(≒CPS)は活用できる可能性は高いのではないか？



→ まとめ

- データ同化は、実世界における計測情報とシミュレーションを結びつける方法論
 - 大規模・強非線形システムに対する逆問題、制御手法の1つ

- データ同化の導入により、仮想空間と実世界の乖離の原因となっている“不確かさ”をシステムチックに低減させる
 - 最適設計(設計探査)、システムシミュレーションの領域拡大

- データ同化は、物理シミュレーションが絡んだCPS実現のための1つの具体的方法論(だと考える)
 - 設計へのメリットは現時点では整理できていないが、運用の仕方に関わらずの貢献はできる可能性がある



ご清聴ありがとうございました