

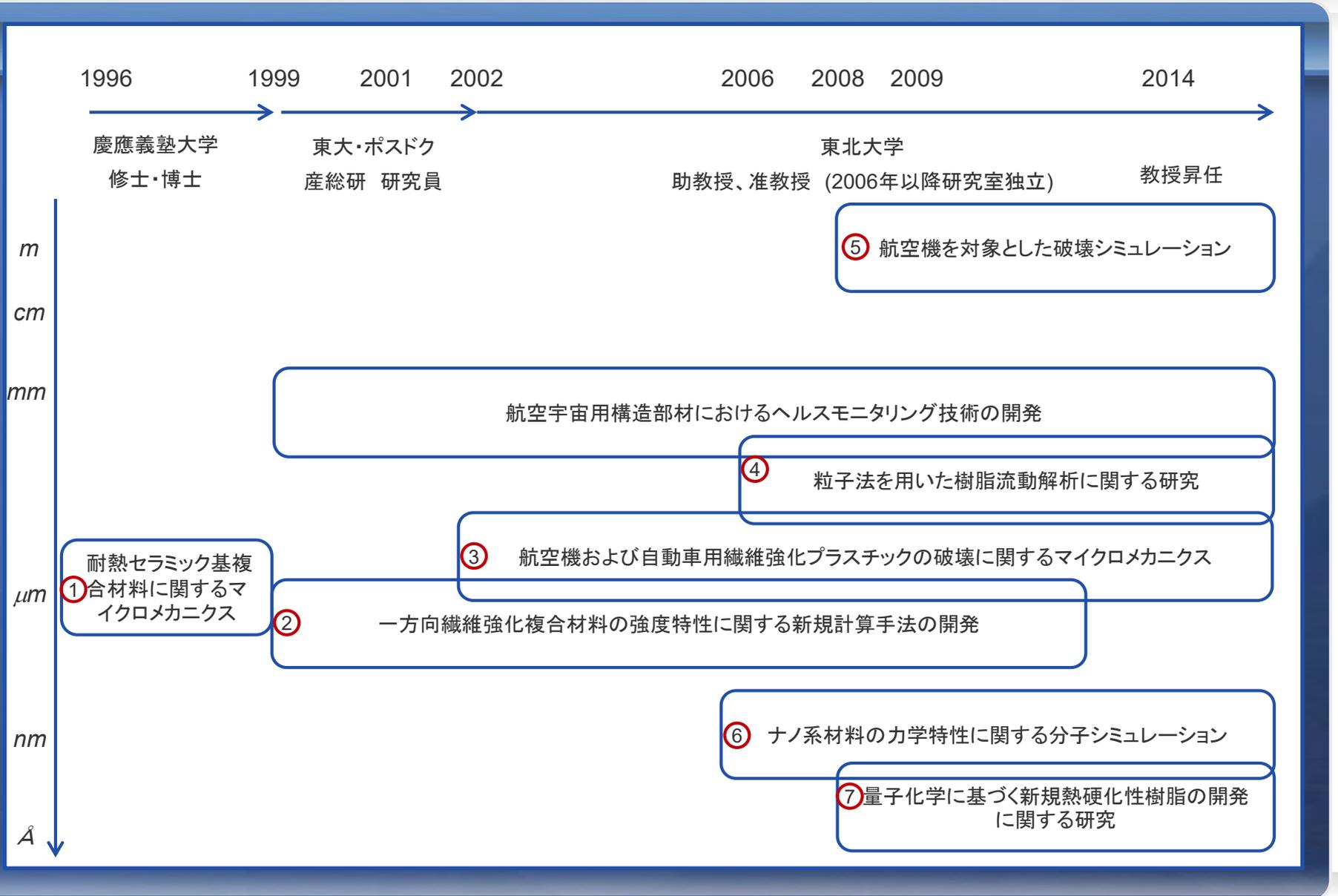


TOHOKU
UNIVERSITY

材料・構造スマートシステム学分野の紹介

航空宇宙工学専攻 岡部朋永

経歴



先進複合材料は急速な勢いで適用が拡大している



B787-8

航続距離: 14,200~15,200km

座席数: 210~300席

アスペクト比: 11

高効率エンジンの搭載

ボーイングは新型旅客機787において、機体の50%(重量比)まで複合材料を利用している。



TOHOKU
UNIVERSITY

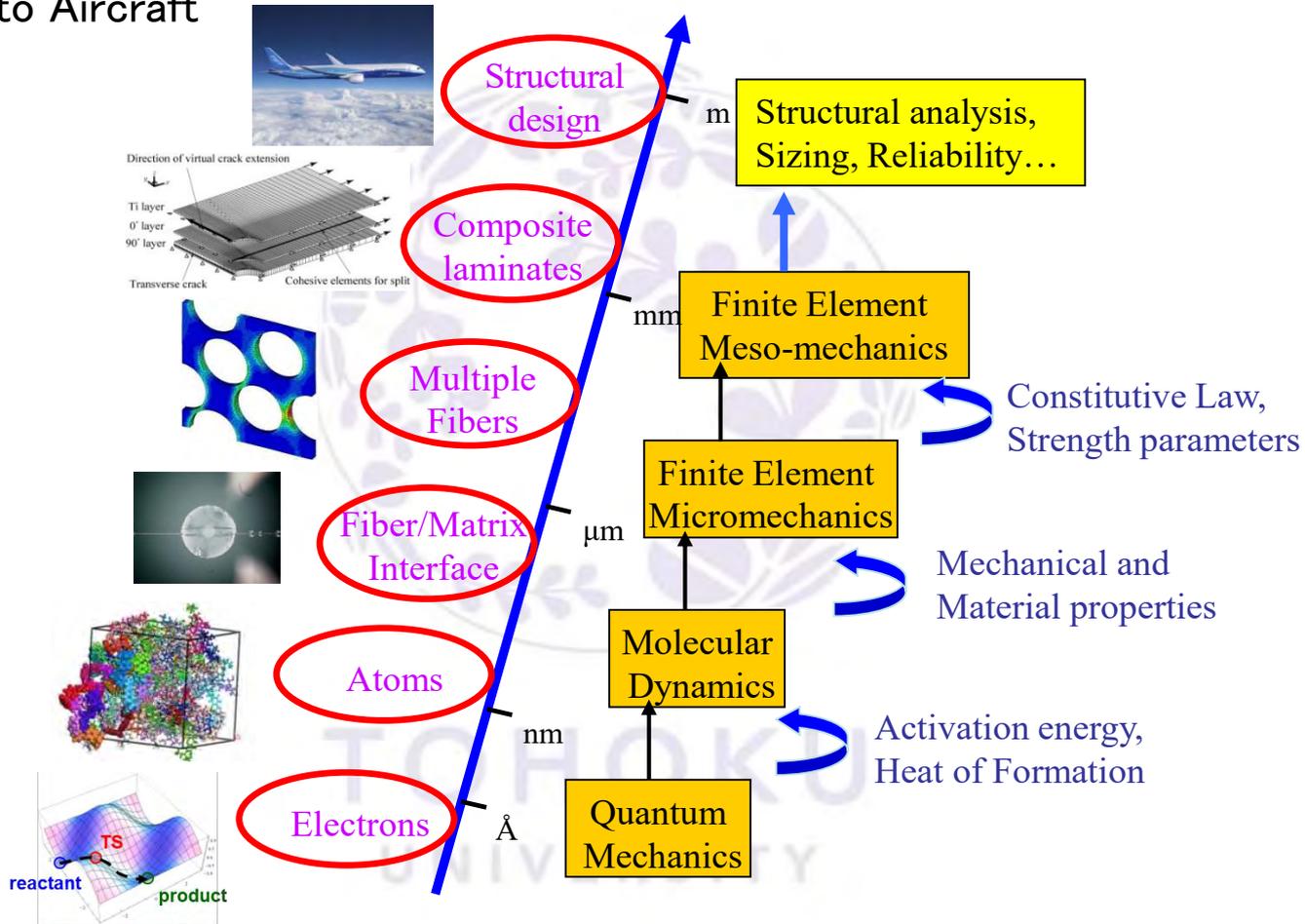
(内閣府) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)
統合型材料開発システムによるマテリアル革命

A3 「原子（分子）・構造体デザイン」

リーダー 岡部朋永（東北大学）

A3 原子(分子)・構造体デザイン

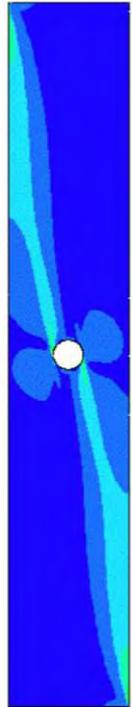
航空機における材料設計では、複数の現象(マルチフィジックス)を同時に扱いながら、原子(分子)から構造までを繋ぐ、マルチスケール技術が必要されている。
=> "Atoms to Aircraft"



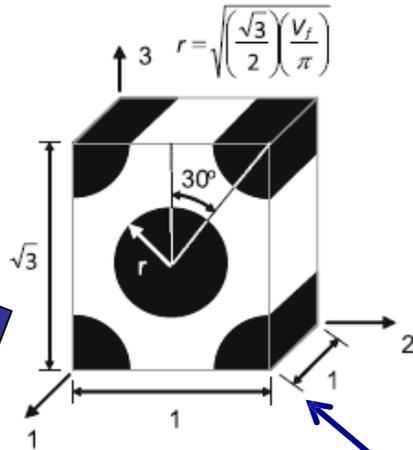
=> 現場に適用可能なツールの開発し、逆問題解析までにつなげる。

Boeing-Purdue Atoms to Aircraft (2011~)

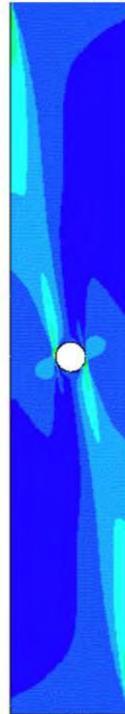
Homogenized strain fields
(均質化法)



Micromechanics
(微視力学)

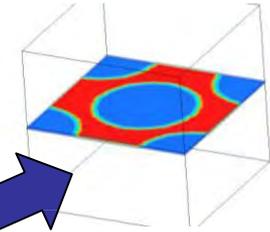


変形



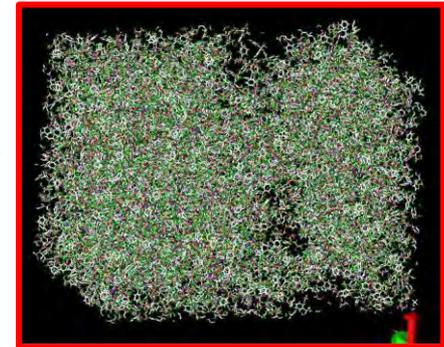
破壊

Onset criteria



Damage propagation

Molecular modeling
(分子シミュレーション)

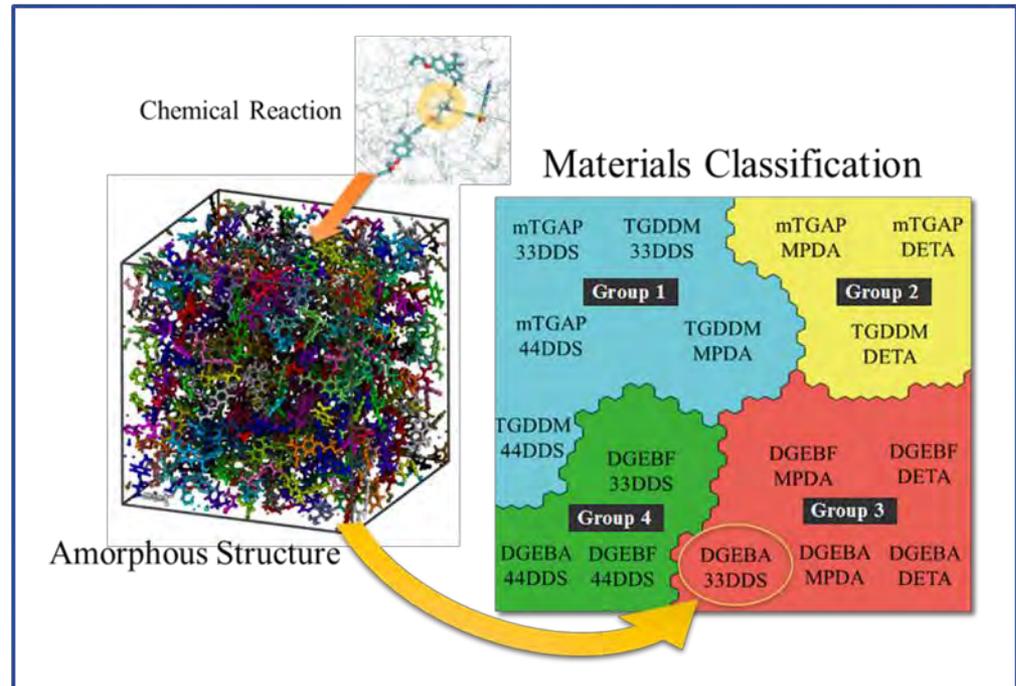
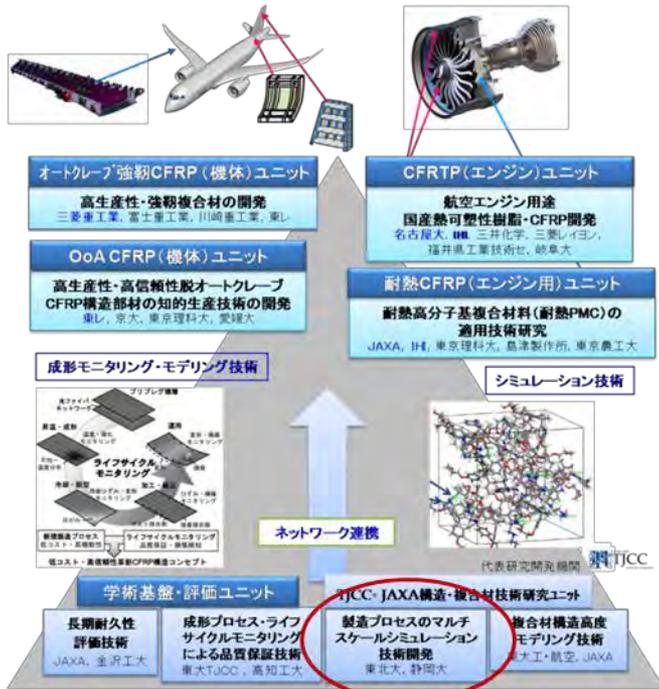


Non-linear viscoelastic model
Physics-based – no fitting parameters
(粘弾性力学)



現状では原子からクーポンまでのスケールブリッジにとどまっている

製造プロセスのマルチスケールシミュレーション技術開発のうち、 分子シミュレーションに基づく高性能かつ高生産性を有する樹脂の開発を担当



1. 主剤と硬化剤の反応プロセスを再現する新たな手法を開発しアモルファス構造を再現。
2. 得られた構造に対して、材料特性解析を実施。
3. 自己組織化マップを用いた多目的材料探索を行い、樹脂を選別する。

分子スケールモデリング(順解析)

Polymer 54 (2013) 4660–4668

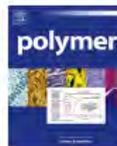


ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Polymer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/polymer



Curing reaction of epoxy resin composed of mixed base resin and curing agent: Experiments and molecular simulation



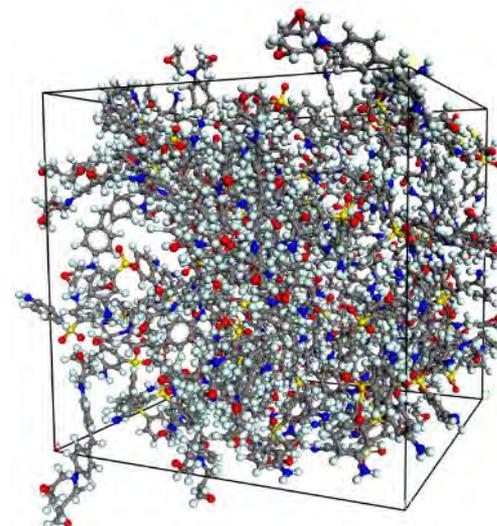
Tomonaga Okabe^{a,*}, Tomohiro Takehara^a, Keisuke Inose^b, Noriyuki Hirano^b, Masaaki Nishikawa^c, Takuya Uehara^d

^a Department of Aerospace Engineering, Tohoku University, 6-6-01, Aoba-yama, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^b Composite Materials Research Laboratories (CMRL), Toray Industries, Inc., 1515 Tsutsui Masaki-cho, Iyogun, Ehime 791-3120, Japan

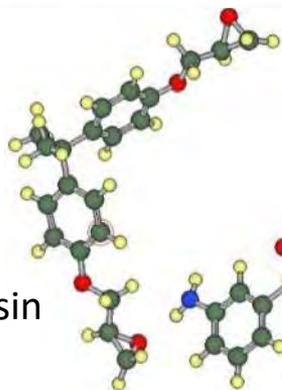
^c Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University, C3 Kyoto Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

^d Department of Mechanical Systems Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

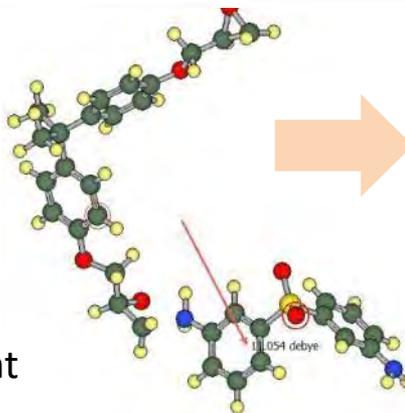
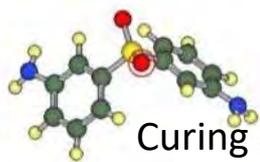


Before

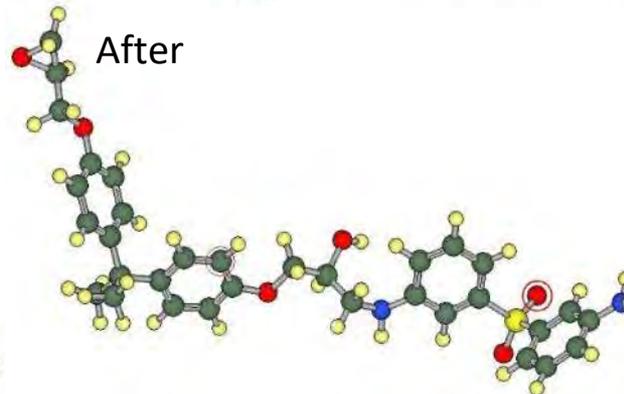
Base resin



Curing agent



After



航空機用熱硬化性樹脂を対象とし、これまでにない分子シミュレーション手法 (MO/MC/MD) を提案した。



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

分子スケールモデリング(順解析)

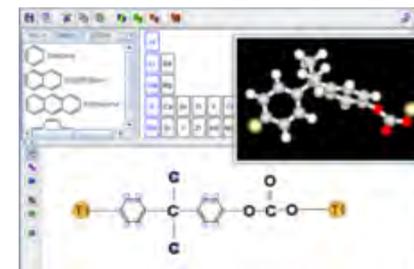


Materials Studio

本研究Gで開発した
化学反応計算手法が実装

(<http://accelrys.com/products/collaborative-science/biovia-materials-studio/visualization-and-statistics-software.html>)

J-OCTA[®]
JSOL CORPORATION
NTT DATA Global IT Innovator
NTT DATA Group

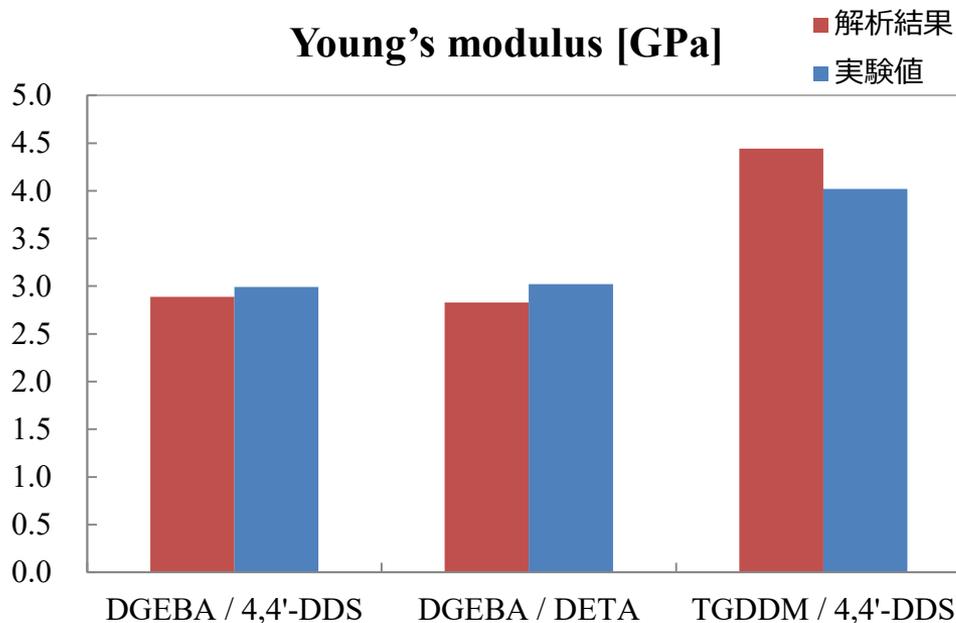


(<http://www.j-octa.com/products/function1.html>)

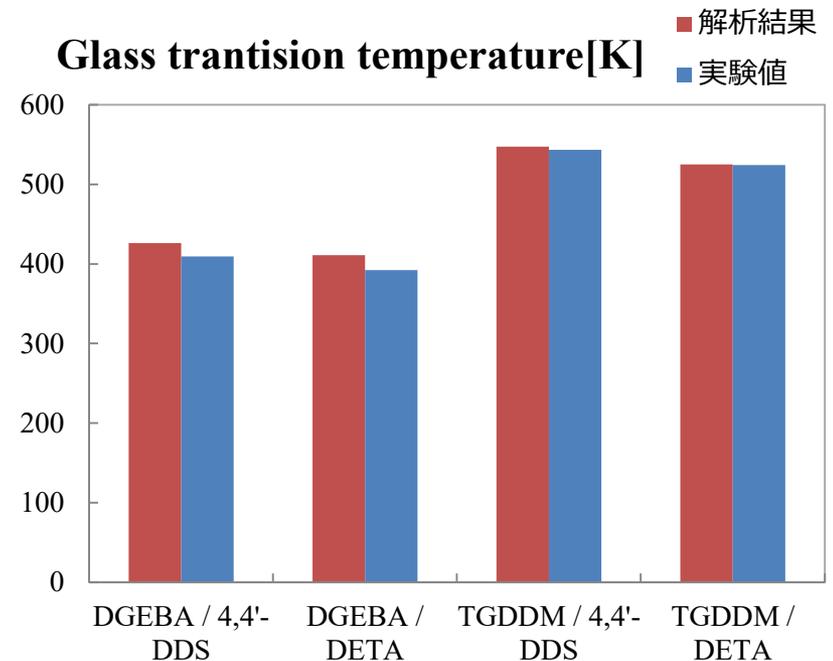
1成分系エポキシ樹脂の評価

materials	conversion [%]	density [g/cm ³]		Glass temperature[K]		Young modulus [GPa]		Thermal conductivity[W/m K]	
		SIM	EXP	SIM	EXP	SIM	EXP	SIM	EXP
DGEBA / 4,4'-DDS	82.0	1.130	1.243	426.1	409.3	2.887	2.99	0.234	0.22-0.26 [6]
DGEBA / DETA	83.0	1.102	1.15 [1]	411.1	392.2 [2]	2.827	3.02 [5]	0.235	-
TGDDM / 4,4'-DDS	83.4	1.186	1.290	547.3	543.2 [3]	4.442	4.02	0.264	-
TGDDM / DETA	85.4	1.131	-	525.1	524.2 [4]	5.434	-	0.324	-

Young's modulus [GPa]



Glass transition temperature [K]

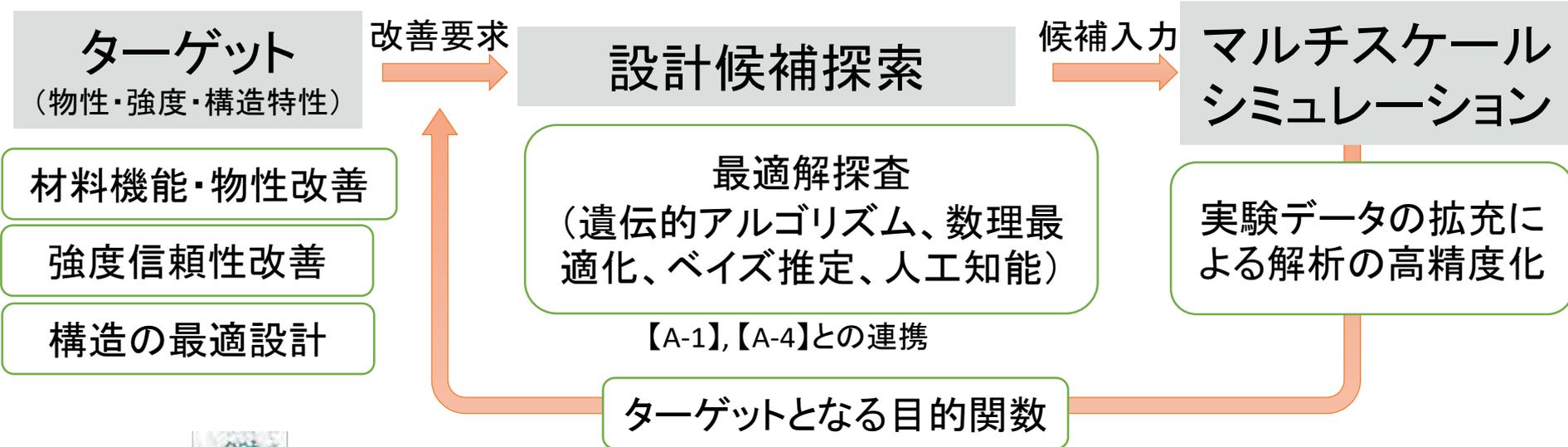


Tomonaga OKABE, Yutaka OYA, Koichi TANABE, Gota KIKUGAWA, Kenichi YOSHIOKA, " Molecular Dynamics Simulation of Cross-linked Epoxy Resins: Curing and Mechanical Properties", European Polymer Journal 80 (2016) 78–88.

逆問題MI(トップダウンアプローチ)

先進複合材料あるいは構造の開発における問題点

- 膨大な設計変数(材料素材、組み合わせ、組成比、部材寸法、形状など)
 - 社会実装上の多様な目的関数への対応(重量、強度、靱性、剛性、機能など)
- ⇒革新的な物性・構造探索手法としてのマルチスケール逆問題解析手法の確立が不可欠



材料機能・物性改善

強度信頼性改善

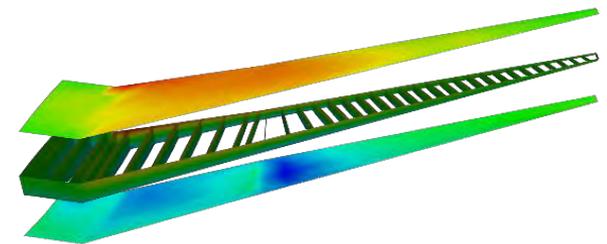
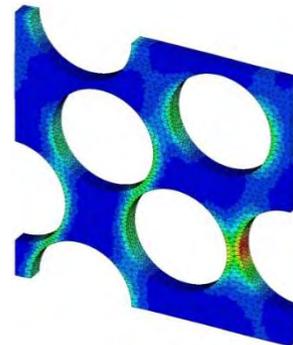
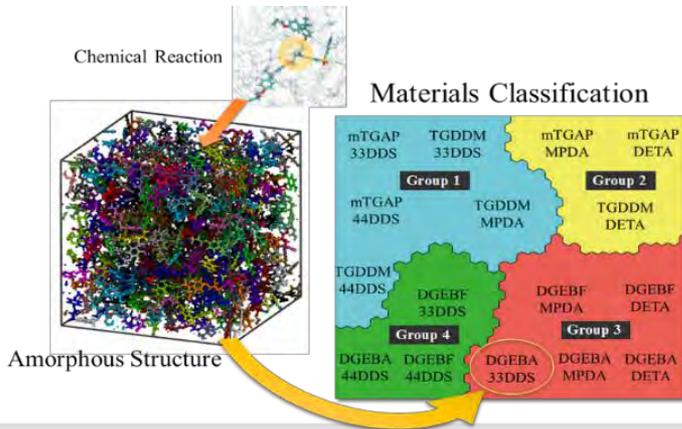
構造の最適設計

最適解探査
(遺伝的アルゴリズム、数理最適化、ベイズ推定、人工知能)

【A-1】、【A-4】との連携

実験データの拡充による解析の高精度化

ターゲットとなる目的関数



A3-B1連携研究開発体制

【A-4】MI統合システム

システム
技術提供

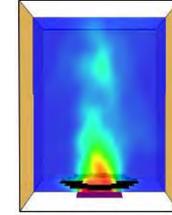
データ提供

【A-5】構造材料DB

DB技術
提供

データ提供

【B-1】多機能(多成分)CFRP開発による高付加価値化



東レ(吉岡所長)/兵庫県立大(岸教授)
多機能複合材料の設計、評価

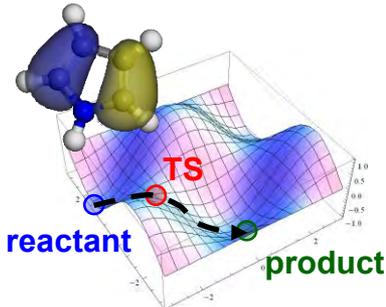
【A-3】原子・構造体デザイン
マルチフィジックス/マルチスケール
(MP/MS)シミュレーター開発

MIインターフェイス

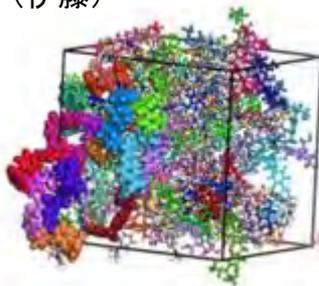
東北大(岡部教授)、京大(西川准教授)、
金沢工大(田中教授)、東レ(伊藤)

統合解析ツール開発: 東北大(岡部教授)

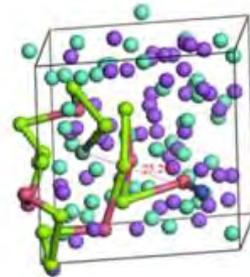
量子化学計算ツール開発:
東北大(岸本准教授)



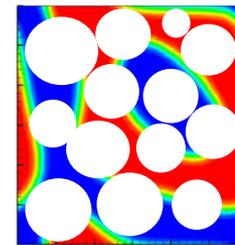
全原子MD計算ツールの
評価・高精度化: 東レ
(伊藤)



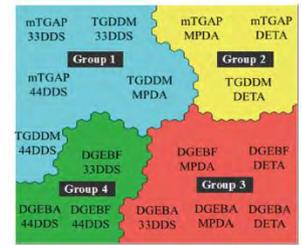
反応DPD計算ツール開発:
東北大(菊川准教授)



熱硬化性・熱可塑性高分子の粗視化シミュレーション開発:
東北大(川勝教授)



逆問題解析手法開発:
東北大(岡部教授)



事例提供

解析手法
展開

計算技術共有

【A-1】逆問題解析

【A-2】プロセスデザイン

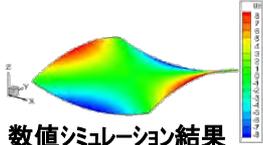
A3-B2 連携研究開発体制

MHI- 航空機(787)設計/製造

残留変形解析

東北大学 岡部教授

マクロスケールモデルで成形時の硬化収縮をシミュレーション



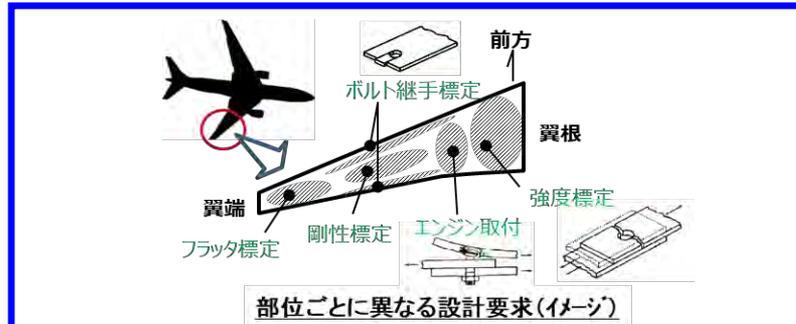
一致



実験で得られた成形時残留変形量

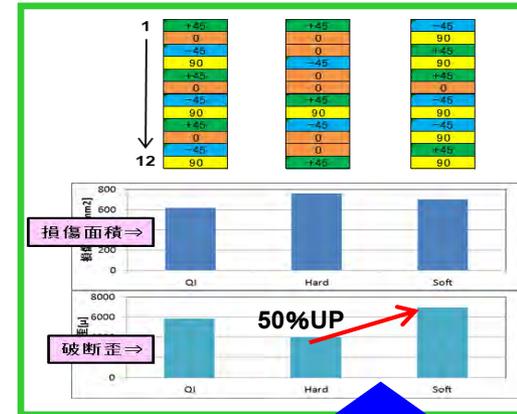
構造強度解析

名古屋大学 吉村准教授

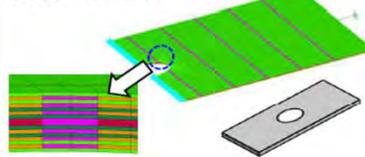


最適設計

北海道大学 本田准教授

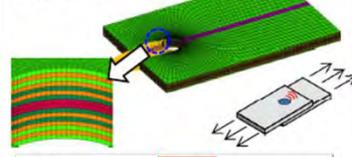


(1) 楕円孔まわり



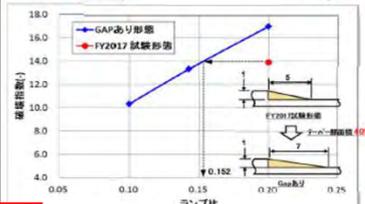
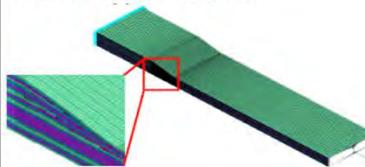
楕円孔周りにけるGap有無による破壊

(2) ボルト穴まわり



高速機械積層に伴う強度影響

(3) 板厚変化(Ply-Drop off)



遷移部におけるGap有無による破壊指数比較

同一板厚・材料
最適積層設計で
破壊歪み **50%UP**

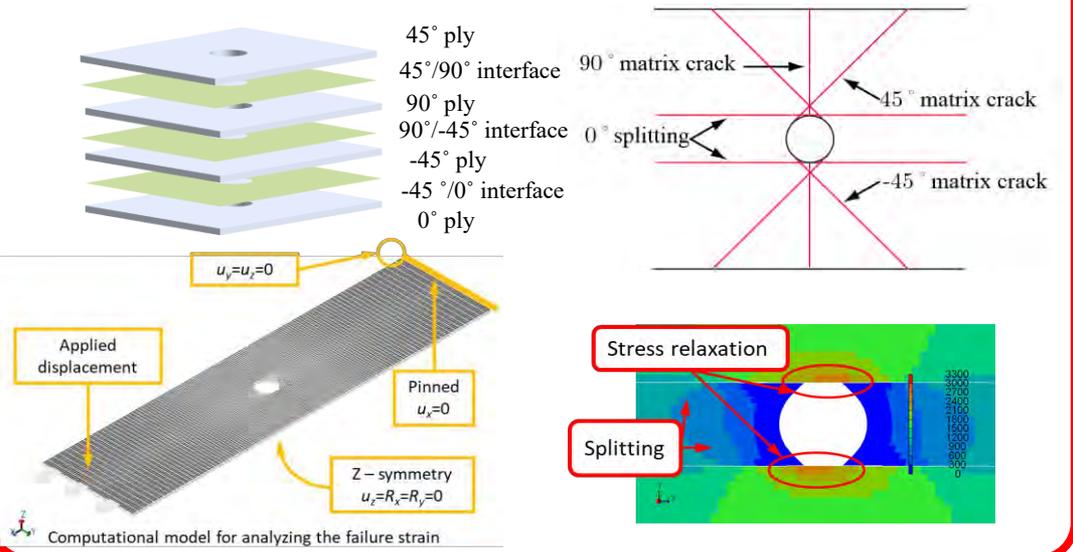
CAI(衝撃後強度試験)の例

A3-B3 連携研究開発体制

薄層×ステアリングにより激増する設計パラメータに対してMI技術(バーチャルテスト)を増強し、エアモビリティの実現に貢献する

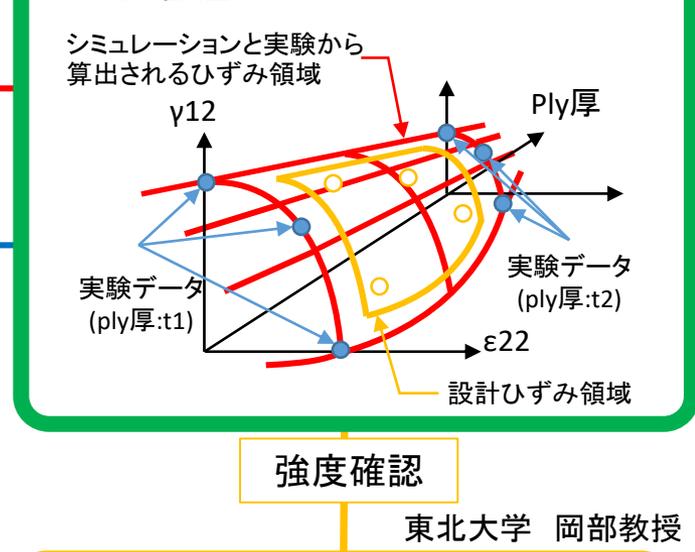
東京大学 横関准教授、樋口助教

順問題MIによる薄層複合材破壊シミュレーション



破壊基準

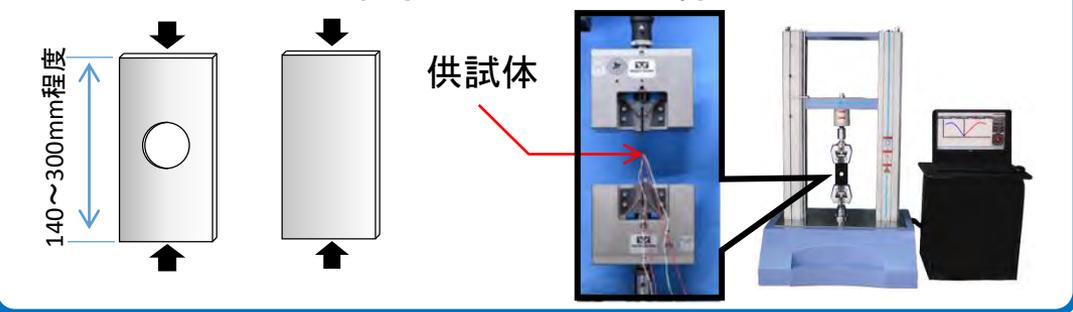
許容値データベース



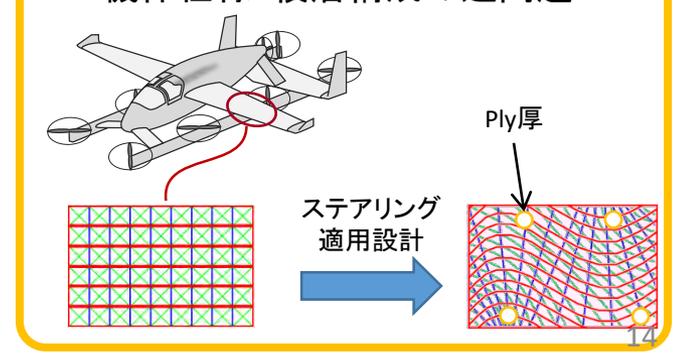
実験データ

東京農工大学 小笠原教授

試験によるデータ取得



ステアリングによる軽量化に関する機体仕様・積層構成の逆問題MI





TOHOKU
UNIVERSITY

国産旅客機MRJ



<今後のテーマ>

1. ベクトル型スーパーコンピューターを用いたマルチスケール解析システム構築
2. 熱可塑複合材小型航空機(B737後継)の主翼設計
3. 粒子法によるマルチフィジックシミュレーターの構築
4. セルオートマトンを用いた航空交通流シミュレーション
5. 3Dプリンターを用いた航空機メタ構造設計



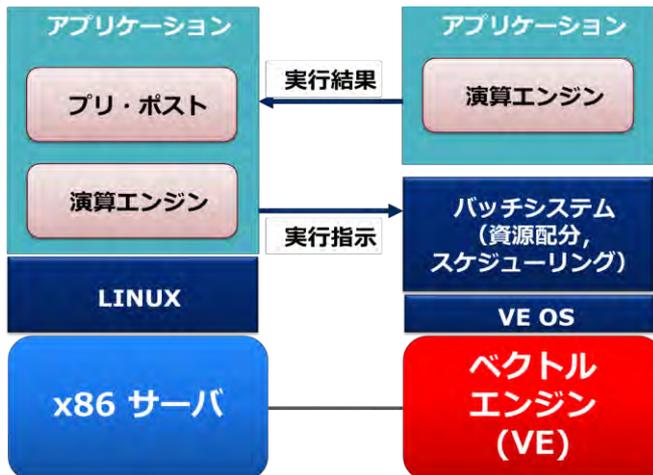
SX-ACE



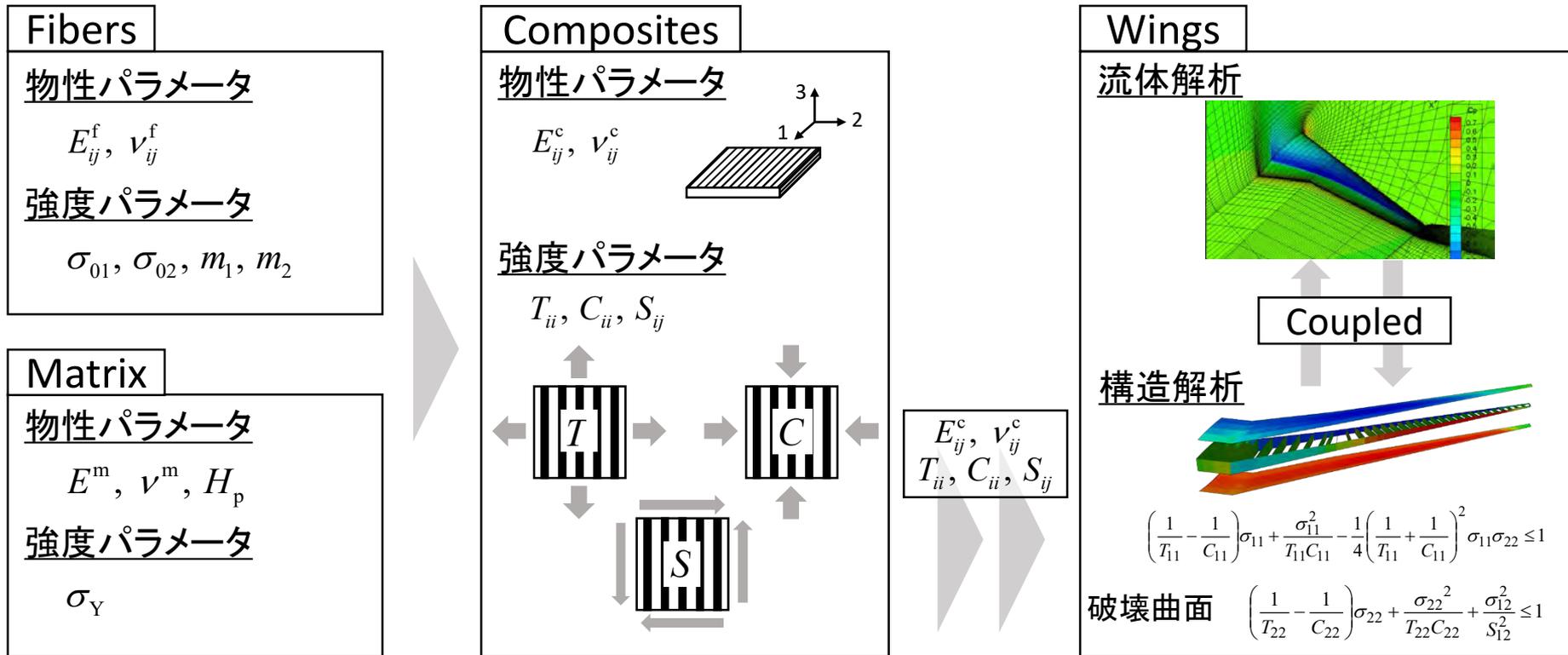
SX-Aurora

<CFRP_MIシステムプロトタイプ開発>

1. 反応硬化分子シミュレーション(完成済み)(菊川先生)
2. 反応硬化散逸粒子動力学(完成済み)(川越先生)
3. 化学反応経路自動探索GRRM(完成済み)(岸本先生・川越先生)
4. 架橋性を有するメゾ有限差分法(GL)シミュレーション(完成済み)(大矢先生)
5. マルチスケール残留変形シミュレーション(完成済み)(川越先生)
6. 自己組織化マップ(完成済み)(菊川先生)
7. テーラリング設計支援のための有孔破壊シミュレーション(完成済み)(樋口先生)
8. AFP時のギャップ成型を考慮に入れた複合材積層板の有限要素解析ツール(矢代先生)
9. ばね要素モデル(完成済み)(岡部)
10. マルチスケール破壊シミュレーション(完成済み)(岡部)
11. 等価剛性モデル(森・田中、均質化法、理論解)(完成済み)(岡部)
12. 複合材主翼の多目的最適設計シミュレーター(完成済み)(阿部先生)



航空機 (B737後継) の主翼設計



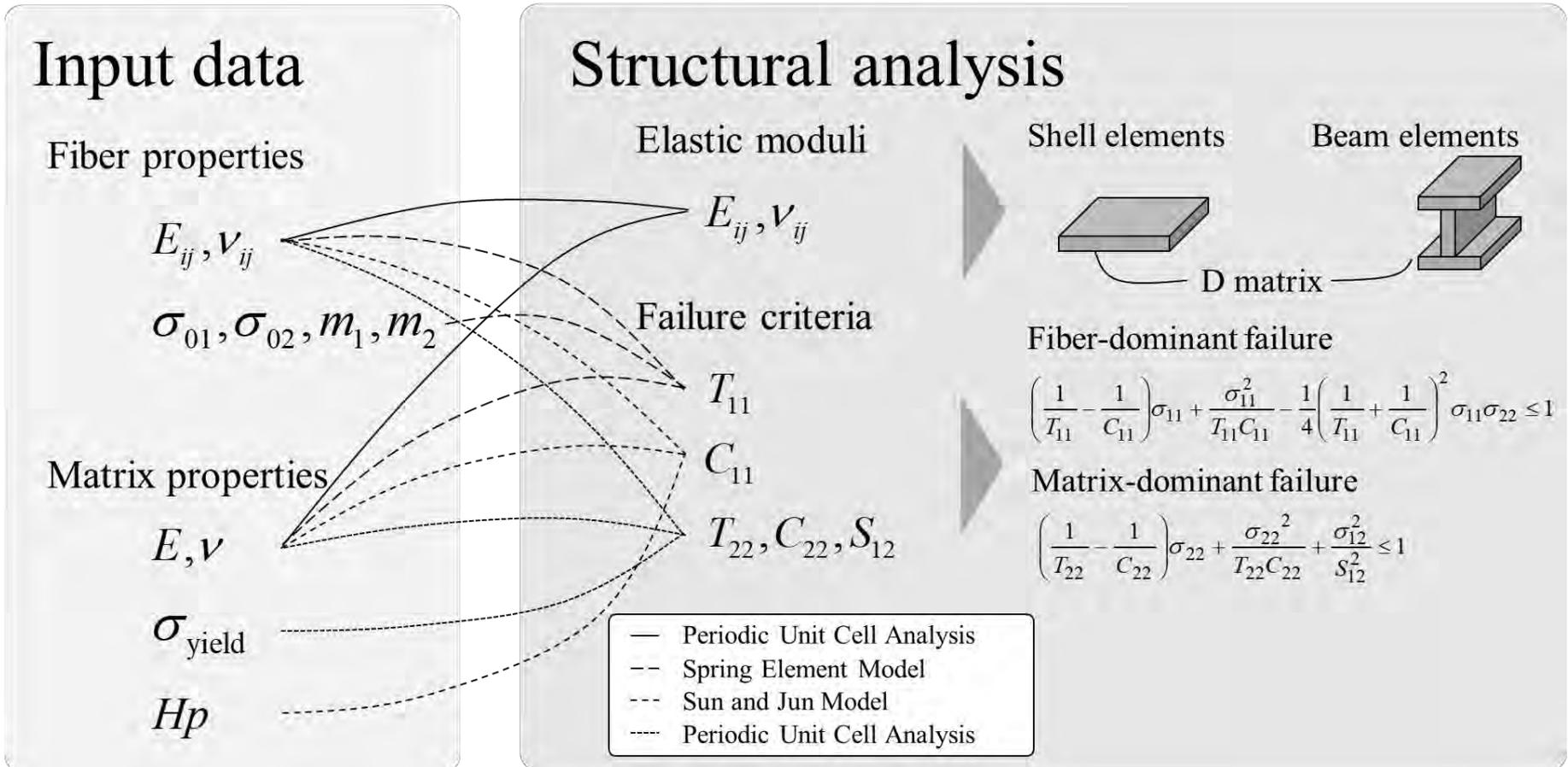
複合材料の物性推算 フェイズ

- ・ 物性パラメータの推算
- ・ 強度パラメータの推算

航空機主翼の設計フェイズ

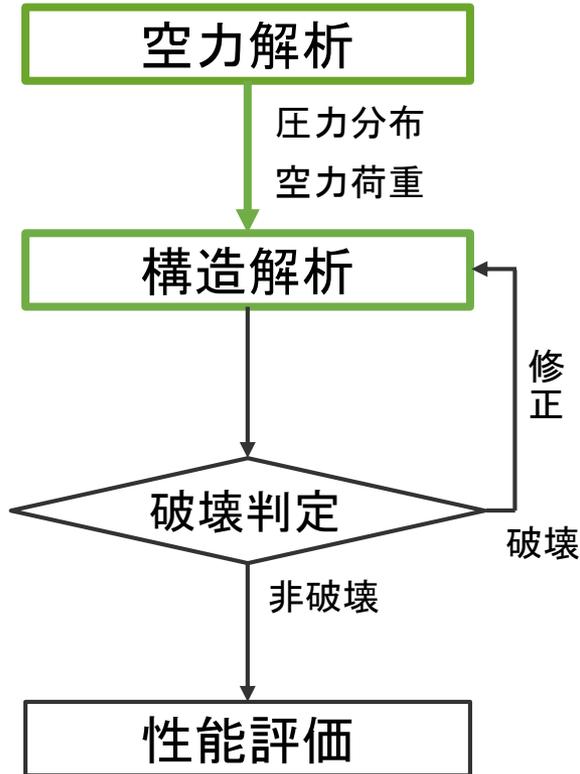
- ・ 流体構造連成解析
- ・ 破壊の検討、サイジング

➤ パラメータの関係図



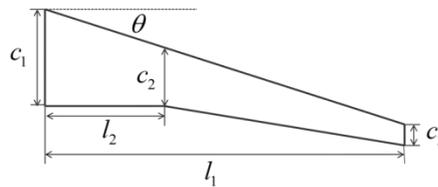
解析手法 - 主翼の設計

解析の流れ

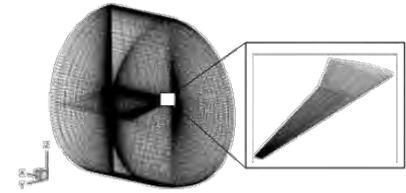


数値流体解析

翼プランフォーム(6変数)

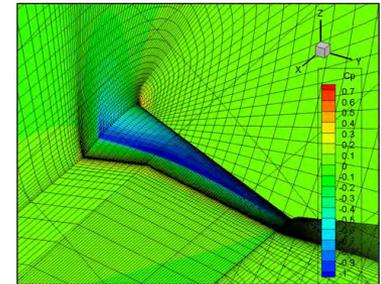


空力モデル



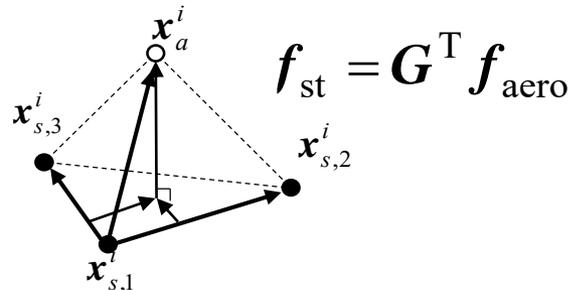
- ・ 数値計算手法 → 有限体積法
- ・ 支配方程式 → Euler方程式 (非粘性/圧縮性)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0$$



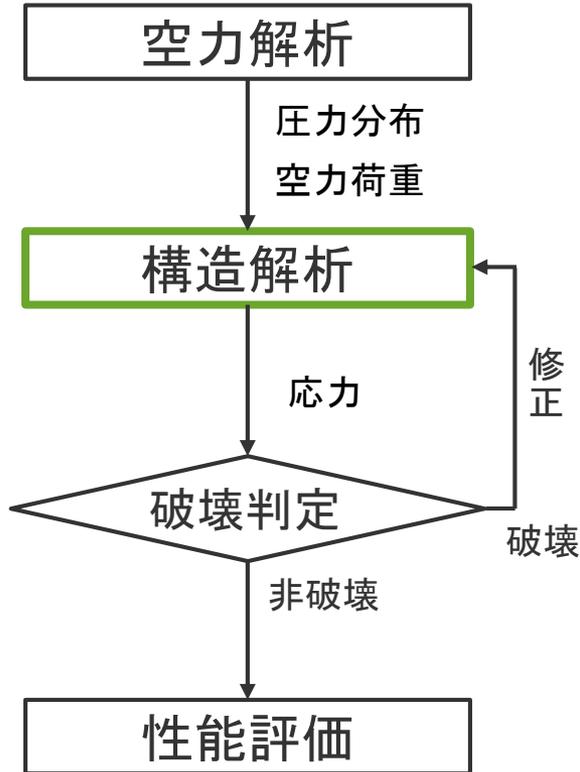
流体-構造間のデータ補間

- ・ Constant Volume Tetrahedron法



2. 解析手法 – 主翼の設計

解析の流れ



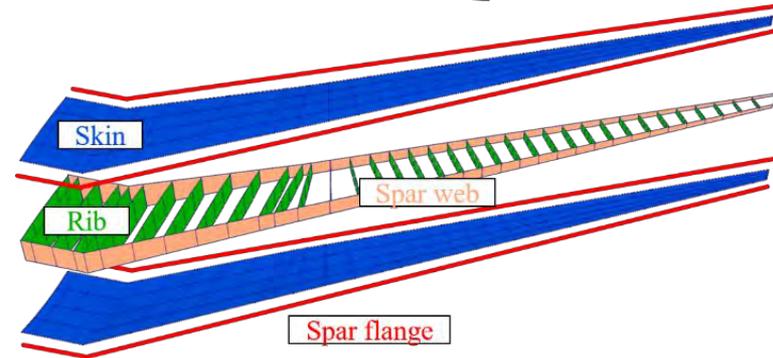
構造解析

- ・ 数値計算手法 → **有限要素法** $Ku = f$ }
 - K : 剛性マトリクス
 - u : 節点変位
 - f : 節点荷重

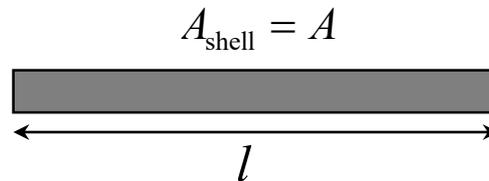
- ・ 有限要素モデル

– Rod要素:
桁フランジ

– 積層板Shell要素:
外板・桁ウェブ・リブ

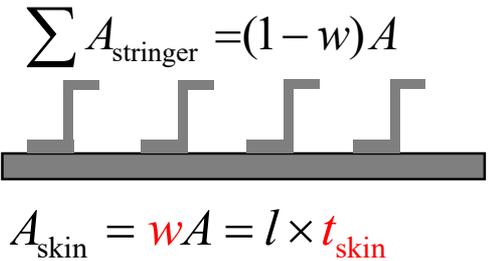


※ スtringer単体のモデル化は行っていない
EA比が1:1となるように補強板をモデル化



A : 断面積

l : 幅



t : 外板のみの厚さ

w : 重み関数 (=0.5)

(断面積の比を表す)

SPH法による損傷シミュレーション

✓ SPH法: Smoothed Particle Hydrodynamics

- 空間に配置された粒子を計算点として用いる手法.
 - ⇒ 格子や要素による空間離散化を必要としない.
 - ⇒ **大変形**や**破壊**を伴う問題にも適用可能.

✓ SPH法による離散化手法

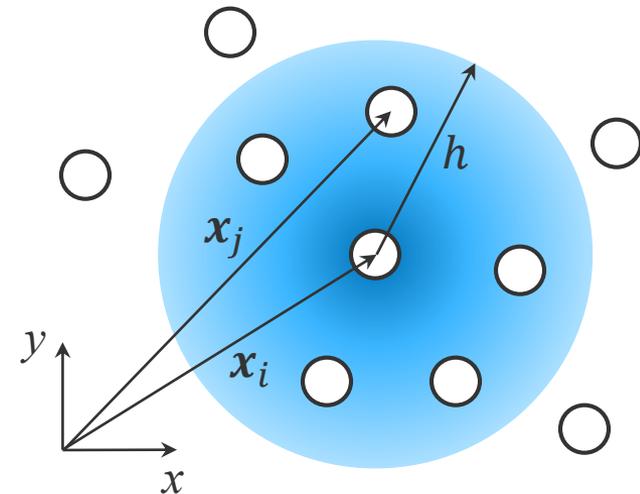
- 各粒子の物理量は**カーネル近似**により補間^[4].

$$f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N f(\mathbf{x}_j) W(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|, h) \frac{m_j}{\rho_j}$$

$$\nabla f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N \{f(\mathbf{x}_j) - f(\mathbf{x}_i)\} \nabla W(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|, h) \frac{m_j}{\rho_j}$$

$f(x)$: 任意の点 x での物理量, W : カーネル関数

ρ : 密度, m : 質量, h : 影響半径, N : 近傍粒子数 (影響半径内の粒子の数)



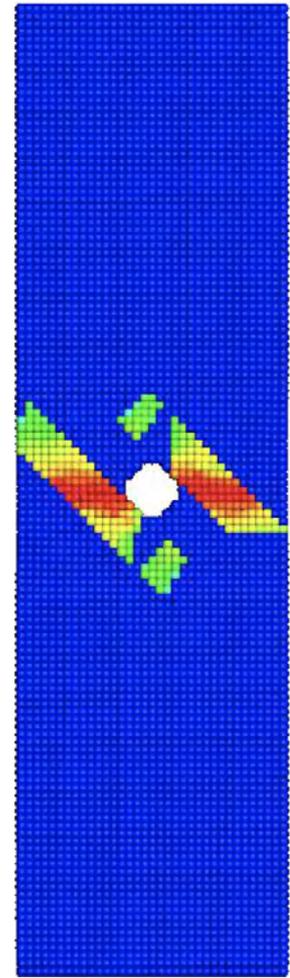
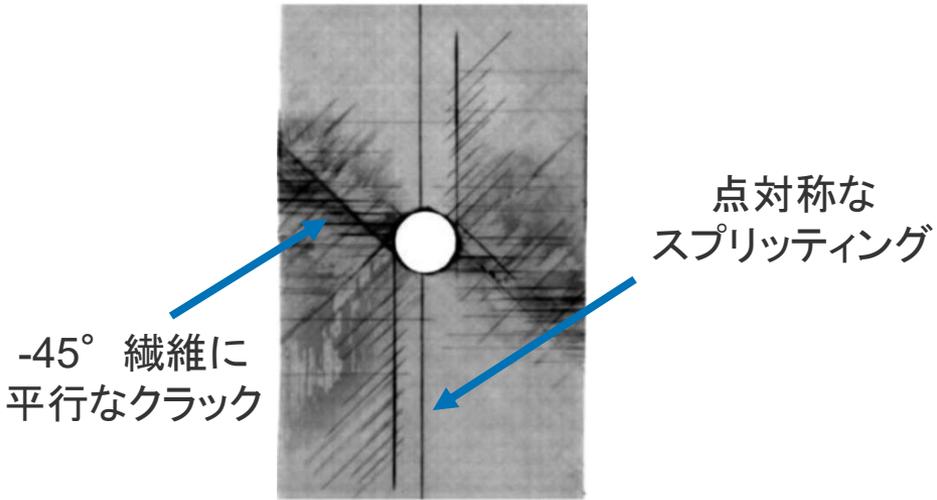
SPH法による損傷シミュレーション

✓ 有孔平板引張(OHT)

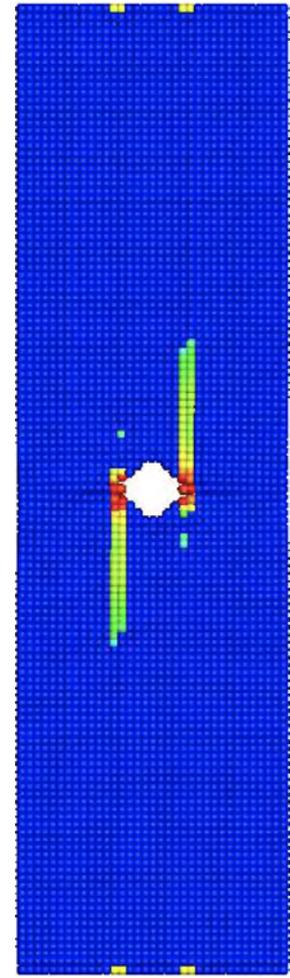
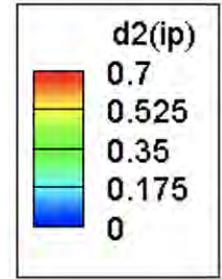
- 損傷変数の分布 (-45° , 0° 層)

- -45° 層: 繊維と平行な方向にき裂
- 0° 層: 点対称なスプリットイング

- Hallett^[16]らによるX線観察結果



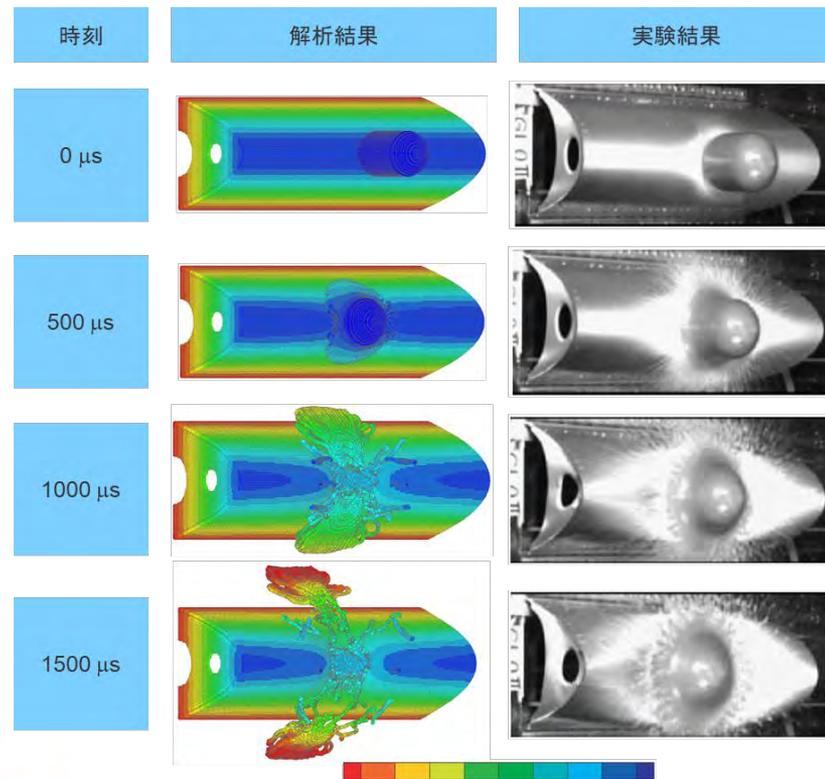
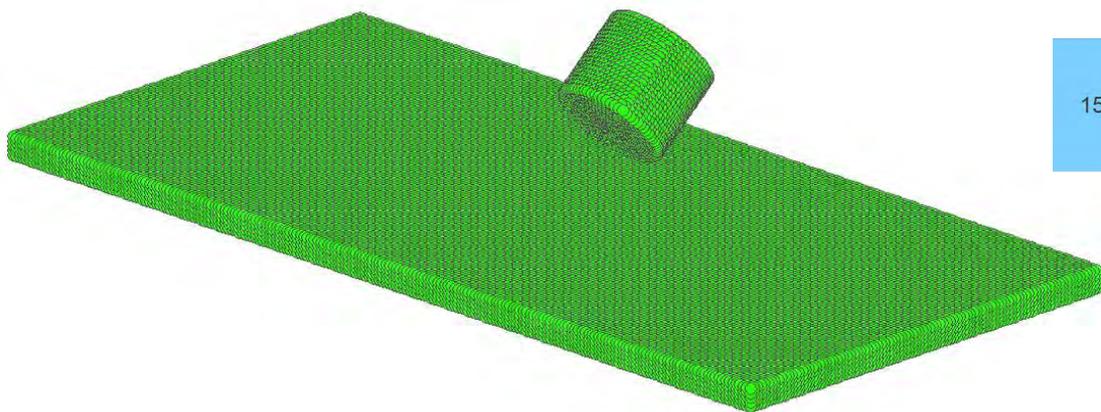
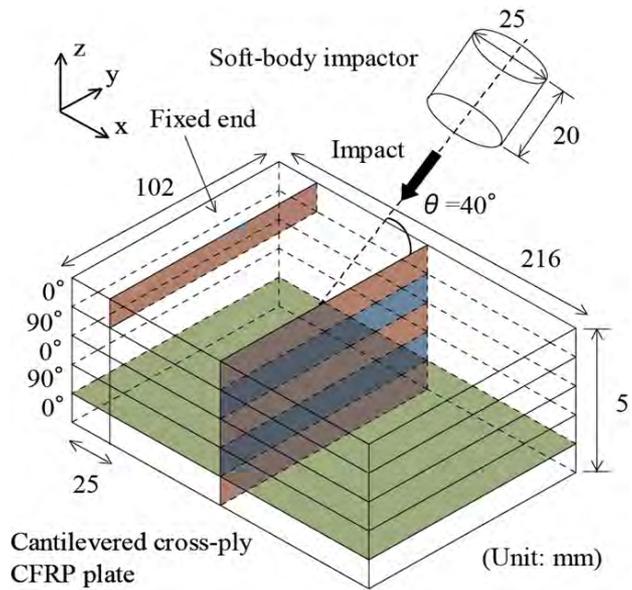
$n = 4, -45^\circ$ ply



$n = 4, 0^\circ$ ply

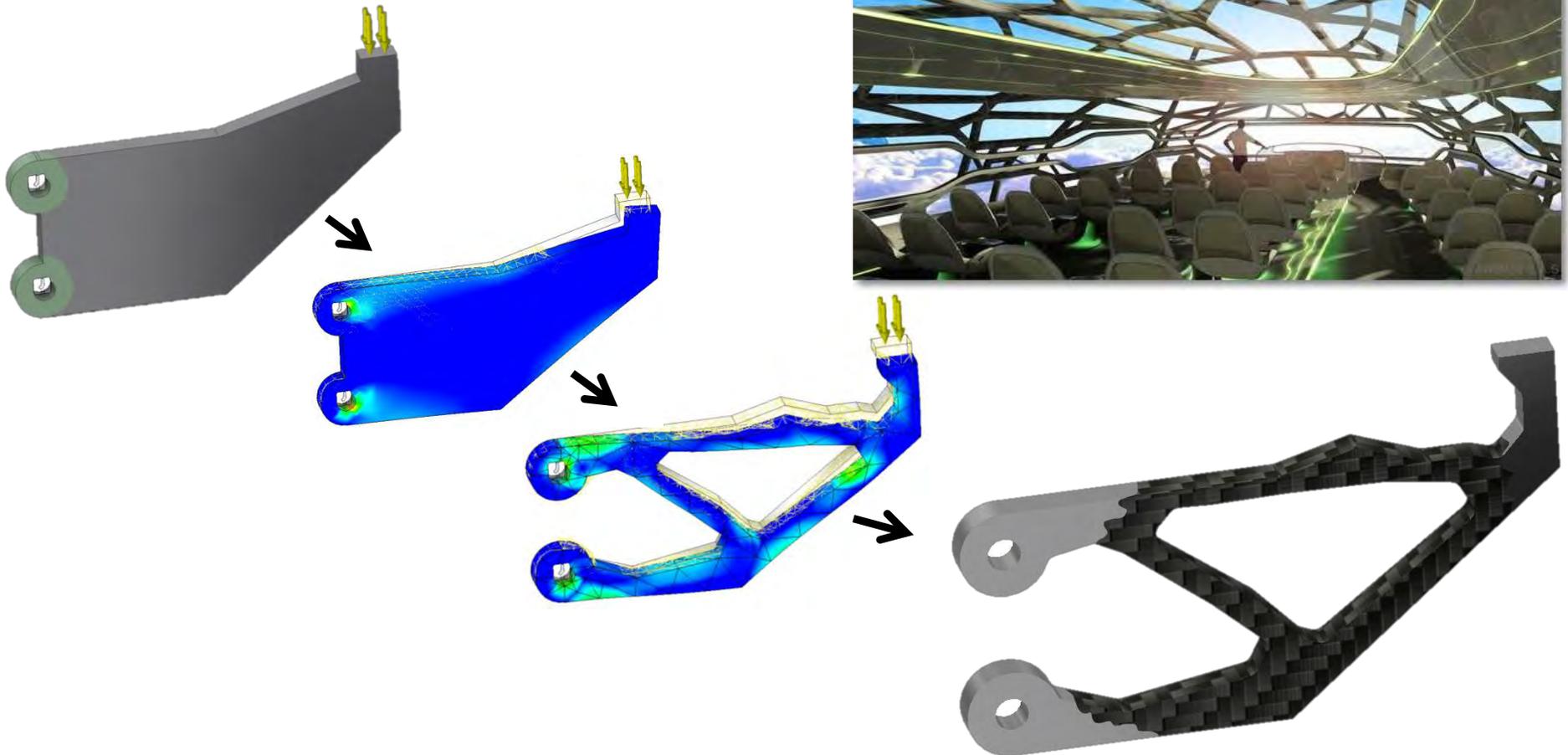
[16] Hallett, S. R., Green, B. G., Jiang, W. G. & Wisnom, M. R. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **40**, 613–624 (2009).

SPH法を用いたバードストライクを受けるファンブレードの損傷・貫通数値解析



3Dプリンターを用いた航空機メタ構造設計

- CF3Dプリンティングは、極めて高い曲率の繊維配向が可能になる。
- したがって、異種材料の配置だけでなく、トポロジーを含めたCF繊維配向の最適化技術の確立が必要。
- 材料とトポロジーの同時最適によって初めて、炭素繊維の実力を発揮できる





PEOPLE

[Home](#) > [People](#) > [Adjuncts, Affiliates, Emeriti, Lecturers](#)

Adjuncts, Affiliates, Emeriti, Lecturers

[Adjunct faculty](#) [Affiliate faculty](#) [Emeritus faculty](#) [Lecturers](#)



Hong Ma

- MSE Affiliate Professor
- Accountant, AtWork!

Materials chemistry, self-assembly, additive processing, renewable energy, flexible electronics, bionanotechnology



Tomanaga Okabe

- MSE Affiliate Professor
- Chair, Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

okabe@plum.mech.tohoku.ac.jp

Prof. Okabe's research is broadly focused on the microstructure and properties (physical and mechanical) of structural composite materials. His primary expertise is in the area of fiber reinforced plastics.



Marco Rolandi

- Affiliate Associate Professor
- Electrical Engineering, University of California Santa Cruz

mrolandi@ucsc.edu

Bioelectronic and bioprotonic devices and translational applications; technological integration of biological and bioinspired materials; visual communication in science and engineering

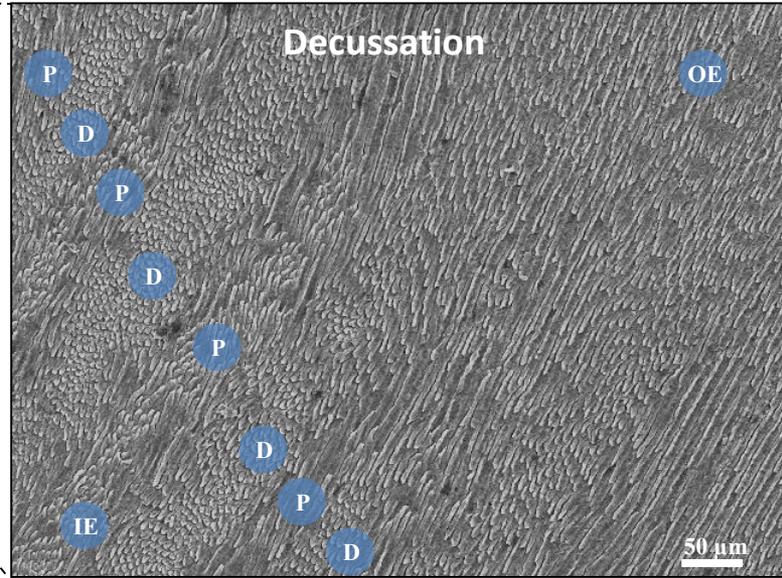
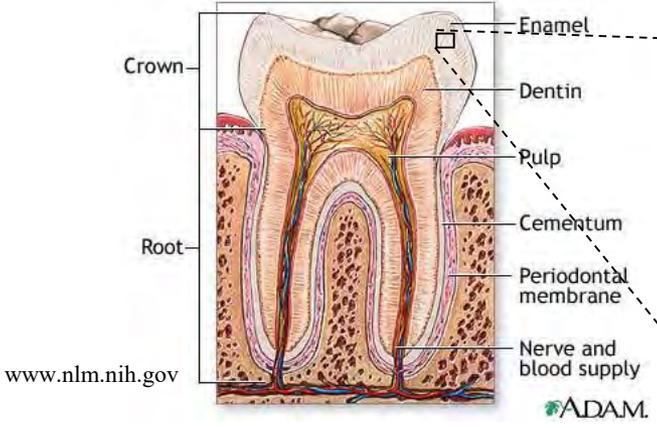
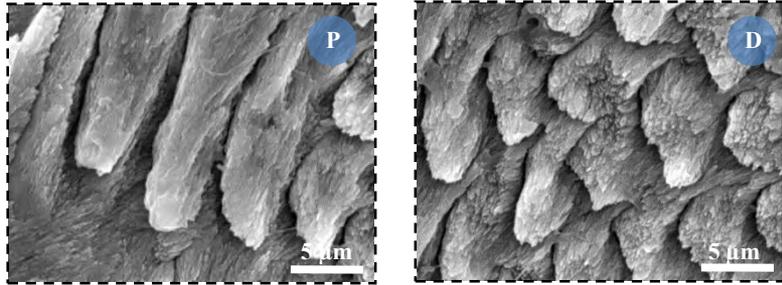
People

[MSE Directories](#)

[Core Faculty](#)

Decussation of Enamel Rods

The microstructure consists of an assembly of rods composed of apatite crystallites. The rods extend through the thickness of enamel.



In the outer enamel the rods are perfectly aligned, but they intertwine in bands of misaligned rods about mid-thickness. This is referred to as decussation.

セルオートマトンを用いた航空交通流シミュレーション

アジアの経済成長に伴い，世界の航空交通量は向こう20年で250%増加すると予想されている

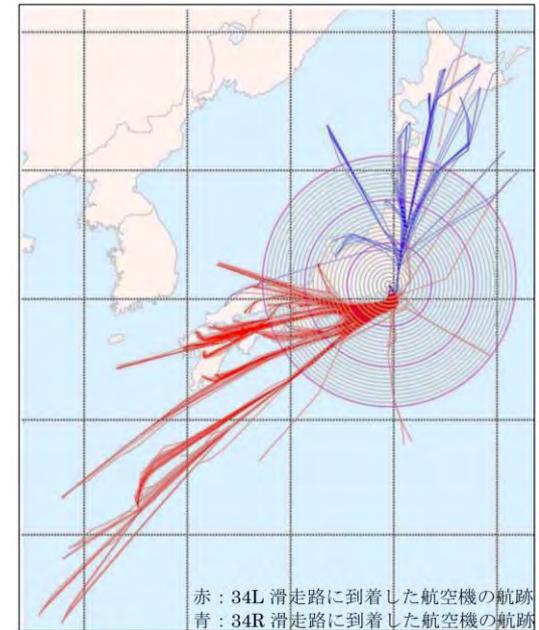
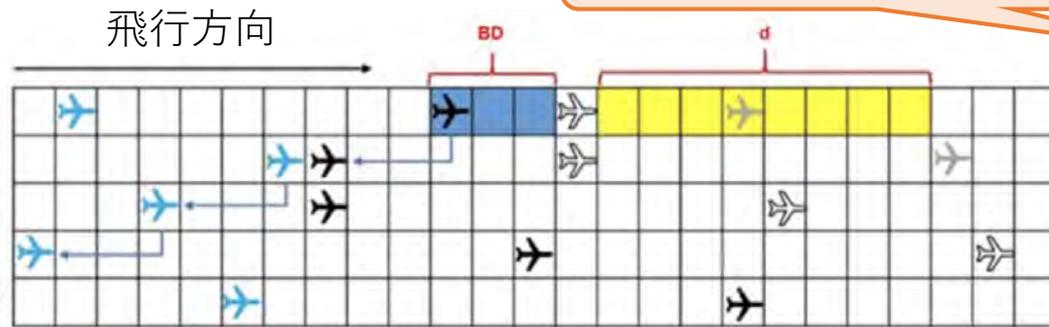


効率的な航空機の運用（航路・離発着オペレーションの最適化）が求められている。

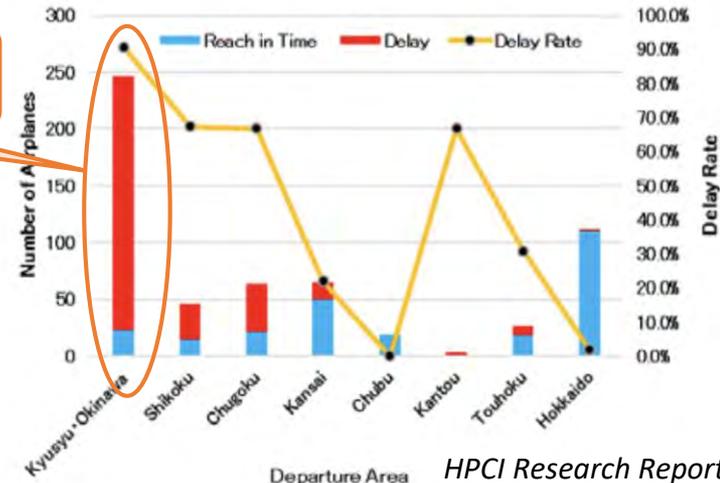
実際の航空交通流は個々の航空機の相互作用により挙動が変化する複雑な現象
（自動車や鉄道と違いその場に留まらず，前後左右の航空機間距離が厳密に定められている）

セルオートマトン (Cellular Automaton) :
複雑な現象のモデル化を簡素なルール設定のみで行うことができる

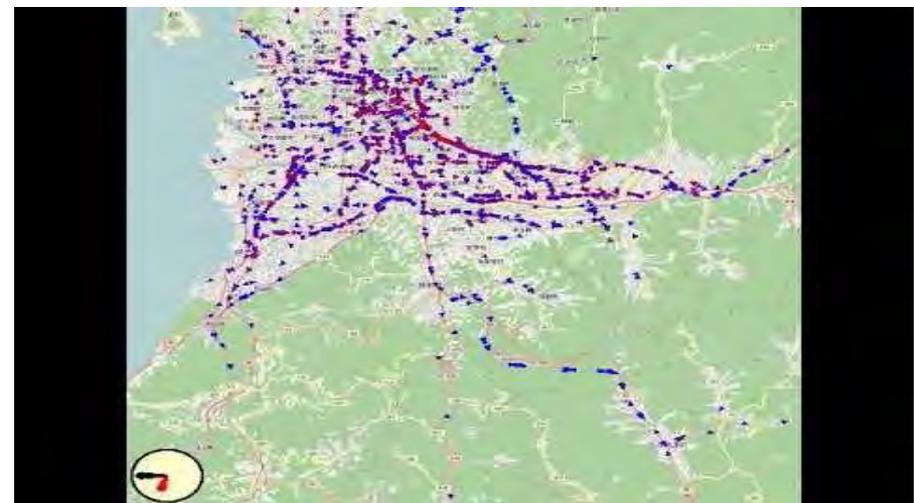
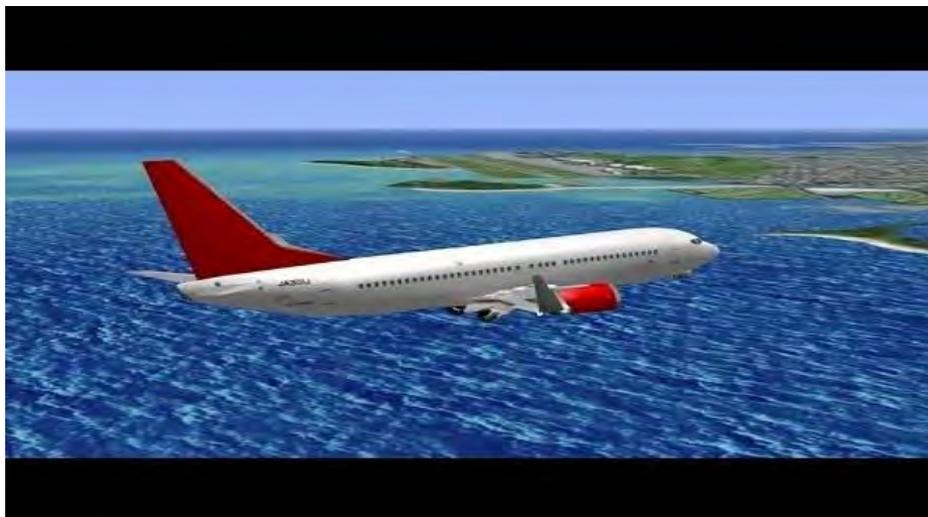
時間ステップ



1日の羽田空港到着便の航路
1日平均約569便（最大毎時40便）
Aeronautical Journal, Vol. 124 (2020), 447-471



航空機運用をモデリングする(マルチエージェントシミュレーション)



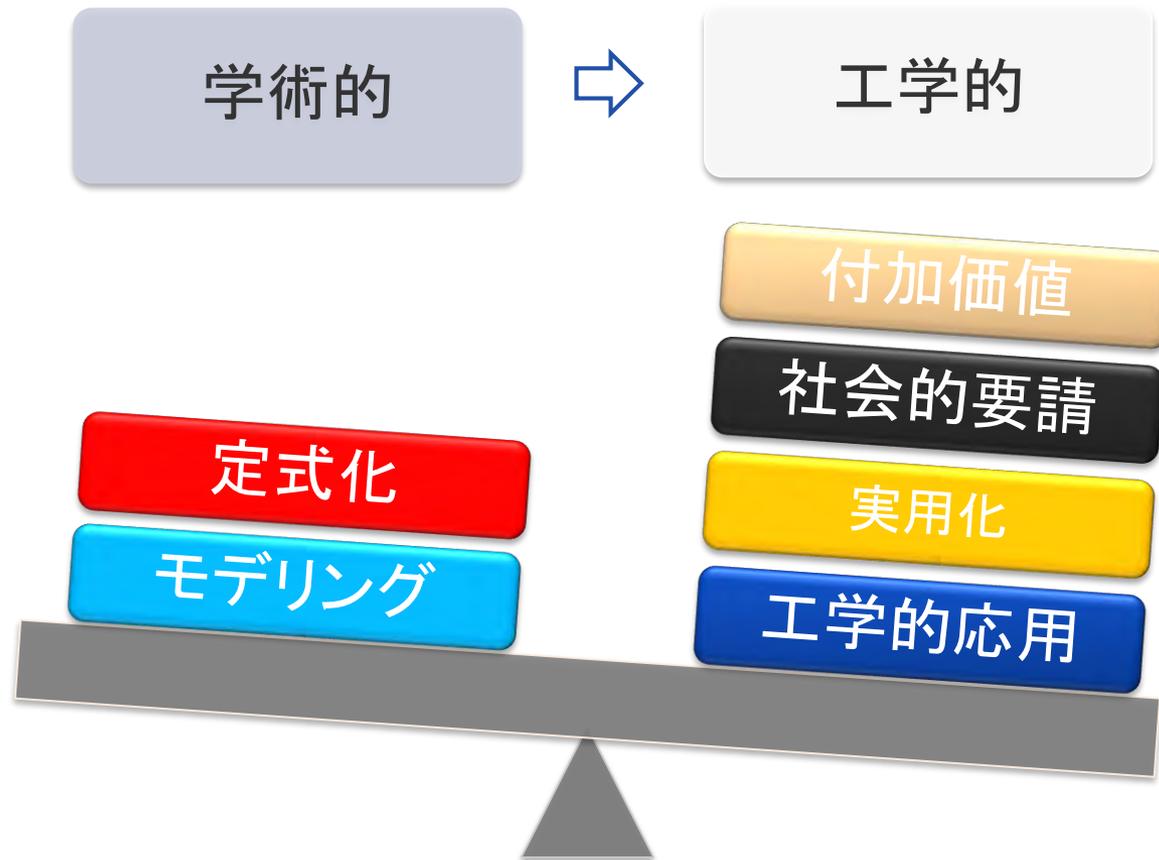
材料・構造スマートシステム学分野における目標

航空機に関する統合システムの構築

材料選択 + 機体設計 + 運行 + 航空管制・運用

研究室運営の考え方

学生さんが社会に出たあとにでも役に立つ実学的研究教育



次世代航空機研究センター

