

「工学とは何か」

～機械、流体、設計、航空宇宙～

東京大学

工学部 航空宇宙工学科

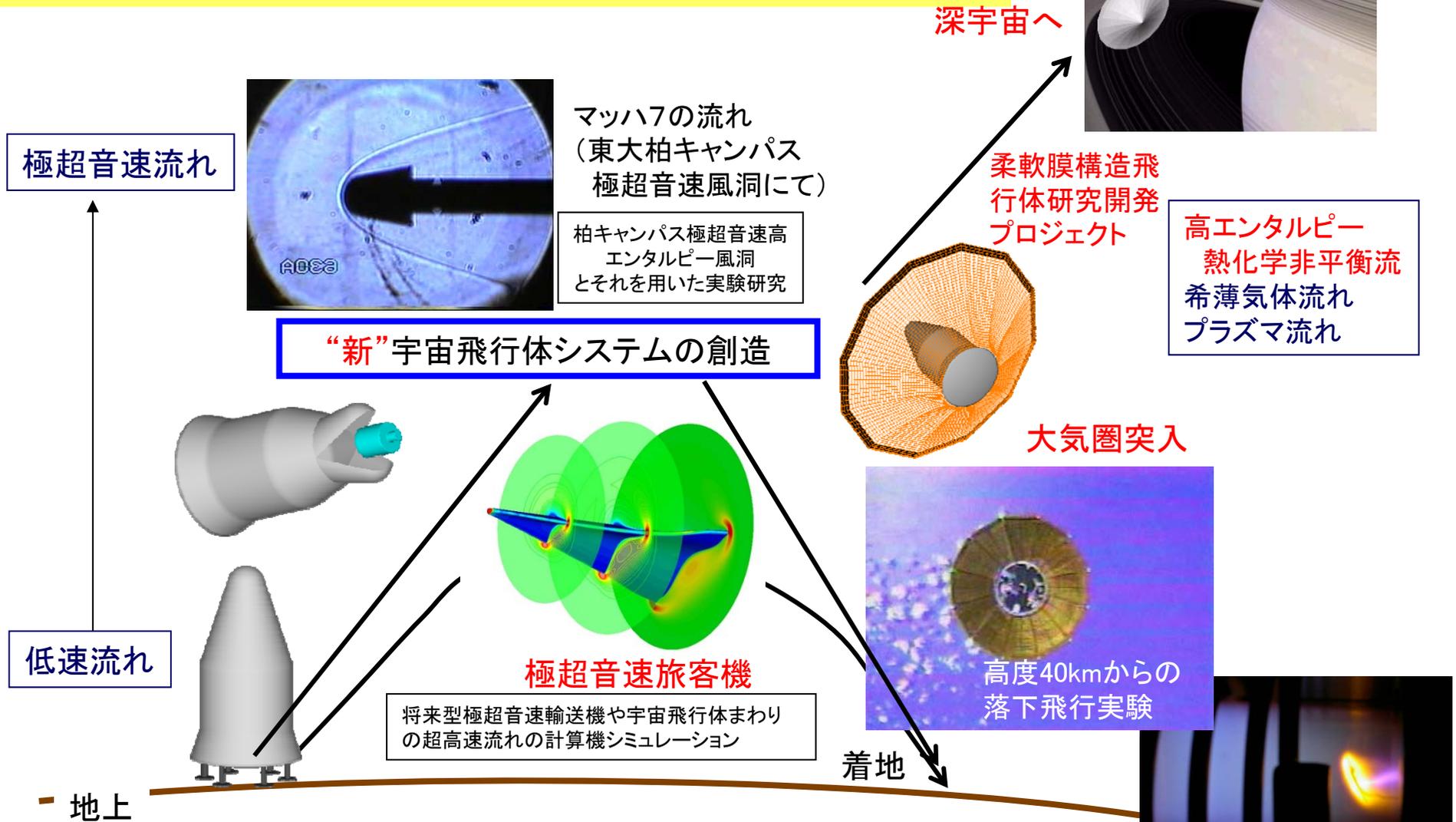
中須賀真一

機械、航空宇宙を取り巻く4つの力学+ α

- 流体力学(空気力学含む)
運動方程式、仕事、エネルギー、圧力、浮力、空気の抵抗、---
- 構造力学(材料力学ともいう)
運動方程式、仕事、エネルギー、バネ、弾性力、単振動、摩擦---
- 動力学・制御工学
運動方程式、仕事、エネルギー、剛体の運動、位置・運動エネルギー、重力、運動量保存則、天体の運動、斜面、滑車、--
- 熱力学
仕事、エネルギー、温度、圧力、体積、ボイル・シャルルの法則、熱力学第1, 2法則、等*変化、可逆変化、熱効率、---
- さらに上記をベースにした「設計」工学

流体力学

空気の流れの速さで「性質」が変わる
 遅い(低速)⇒音速と同じ程度(遷音速)
 ⇒もっと速い(超音速)⇒さらに速い(極超音速)



宇宙の研究でも「流体力学」は使われる

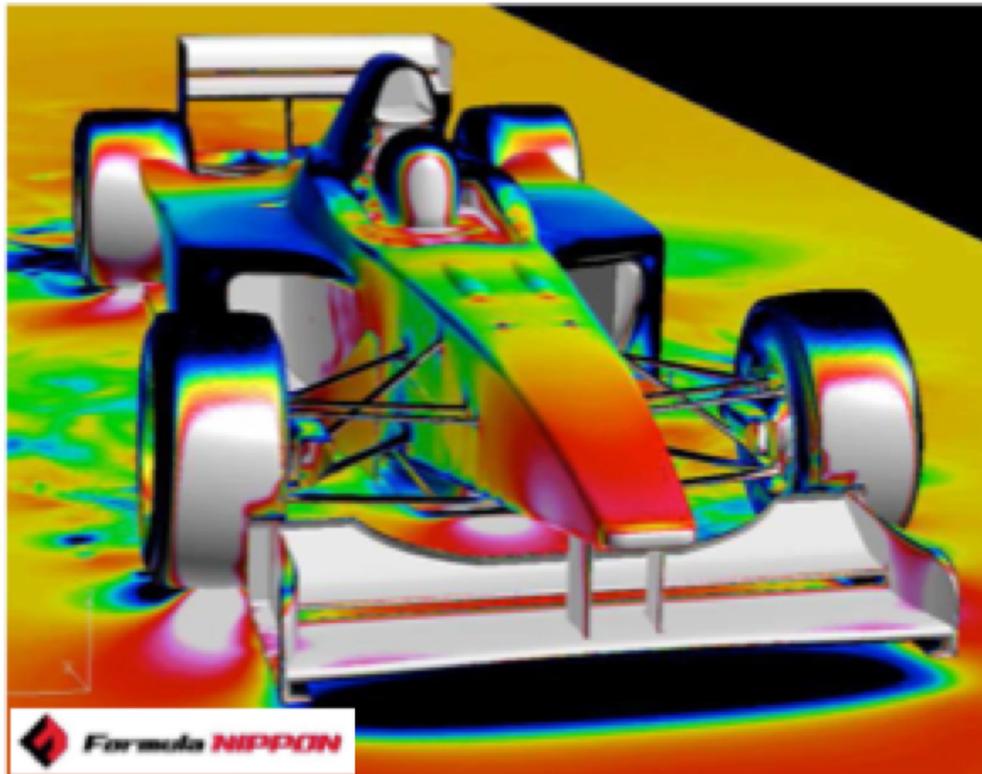
空気の抵抗の推算式

- $F = k v$ (k: 比例定数、v: 速度)
 - 速度が遅いところで成り立つ式
- $F = k v^2 = \frac{1}{2} \rho C_D S v^2$
 - 速度が速くなると速度の2乗に比例する
 - 空気密度 ρ 、正面面積 S 、抵抗係数 C_D に依存
 - C_D は形状に依存
 - ・ 円板: 1.1 半球: 0.34 円錐: 0.3~0.5 **流線型: 0.03**
 - 宇宙ステーションも1ヶ月に2.5km落下

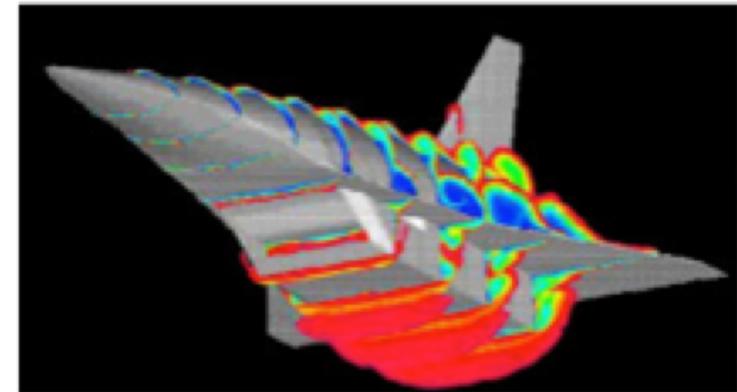
流れの数値解析と機械の設計

流体力学： 水や空気などの流れを統一的に理解しようとする学問。

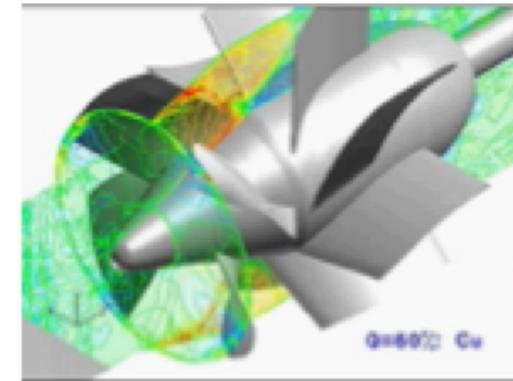
数値流体力学 (CFD)： 流体力学で出てくる方程式をコンピュータ上で解いて流れを調べる手法。



フォーミュラーカー周りの流れの解析
(車表面の圧力分布)

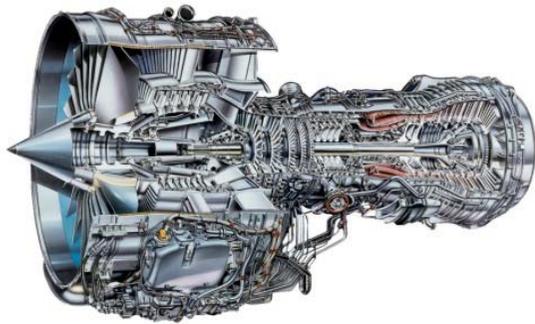


スペースプレーン周りの流動解析



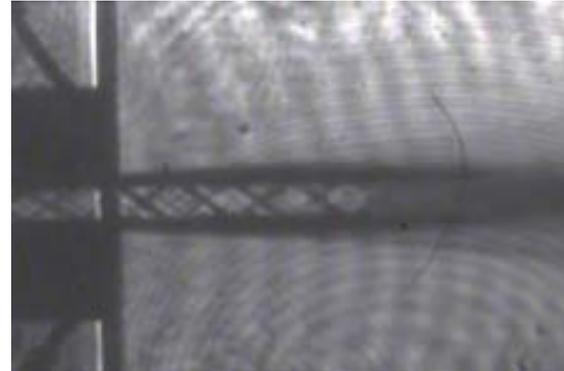
ターボ機械内部の流れの解析

熱のあるところでの流動現象：ジェット推進機関内部



© International Aero Engines

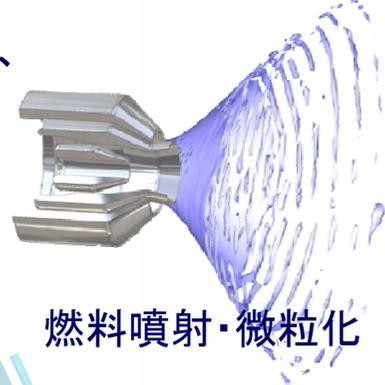
航空機・宇宙機用**エンジン**の
高性能化・高信頼化・環境適合化を目指し、
関連する熱流動現象について、
理論・実験・数値解析により
現象解明と制御に取り組んでいます。



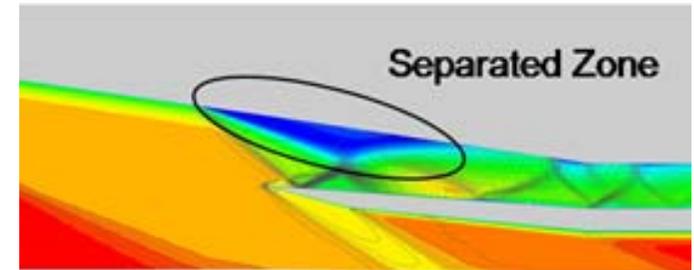
ジェット騒音低減



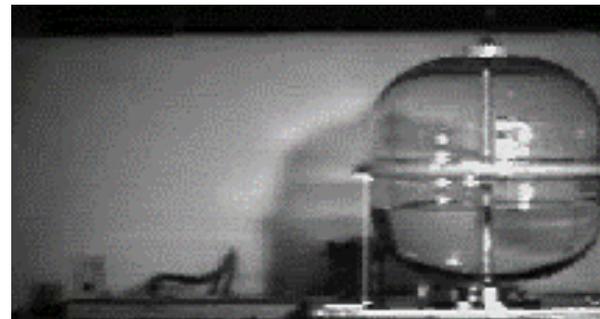
翼列内部流



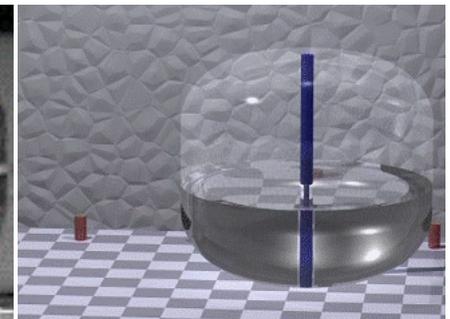
燃料噴射・微粒化



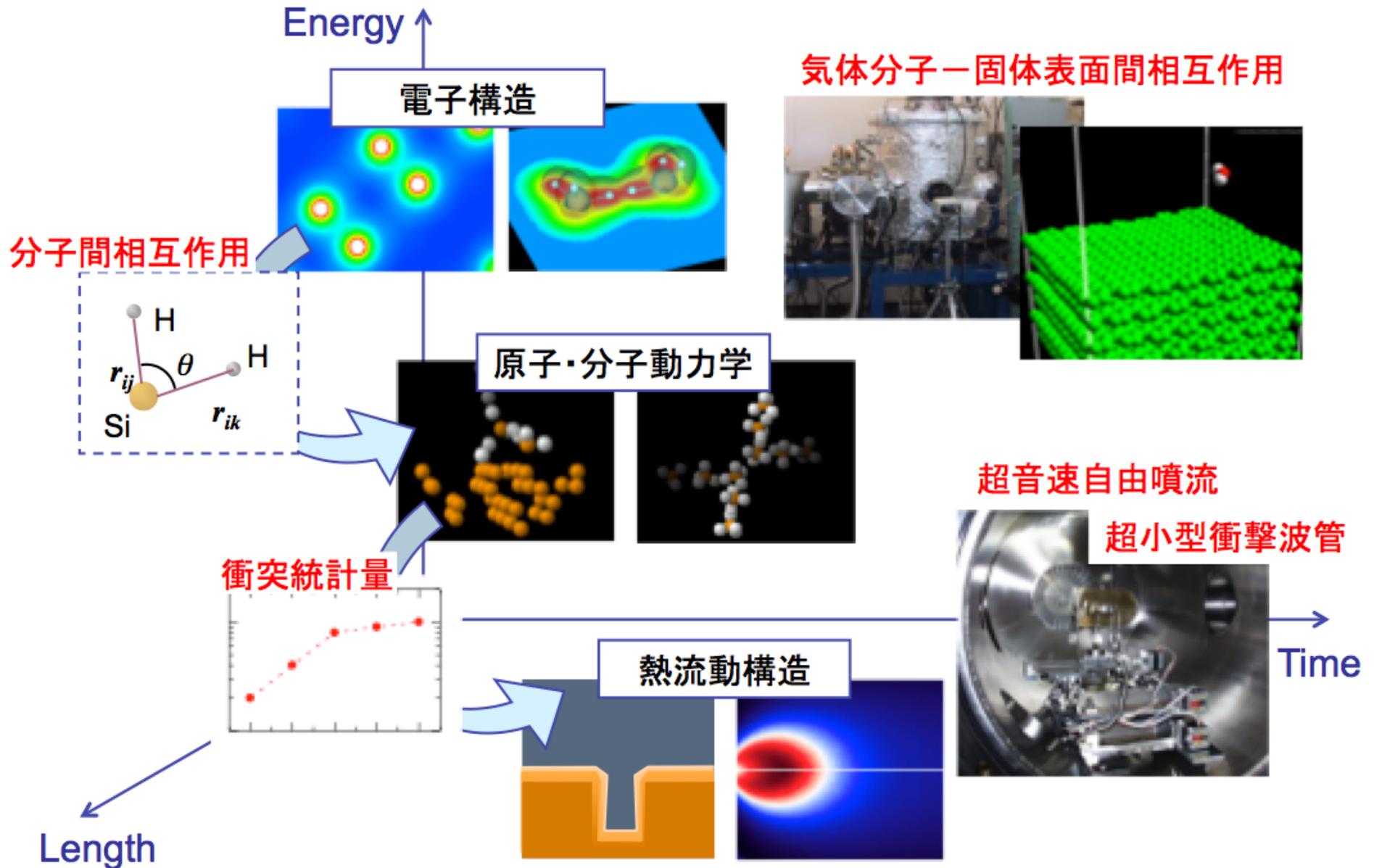
空気取入口超音速流



燃料タンク内部流



半導体成膜プロセスの詳細解析 (量子力学から流体力学まで)



流れるものは水や空気とは限らない

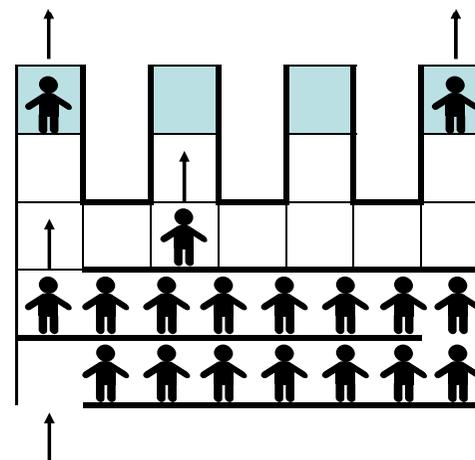
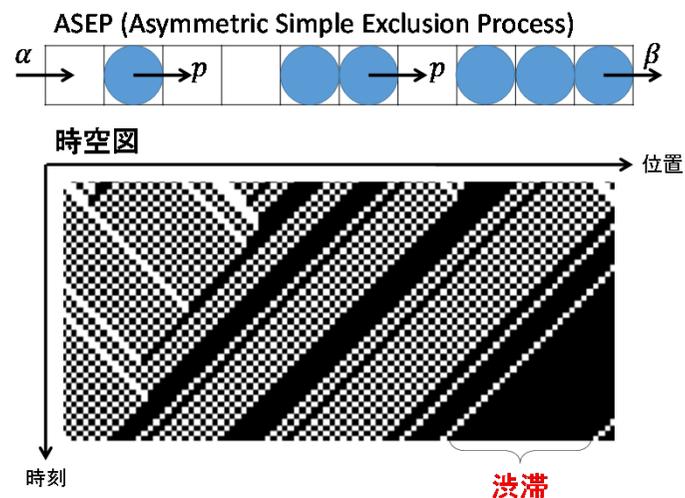
流体力学の新しい応用—車・人・生物などの集団行動

自己駆動粒子系の「渋滞学」

高速道路の
自然渋滞の解析



券売機での
待ち行列の解析



構造・材料力学

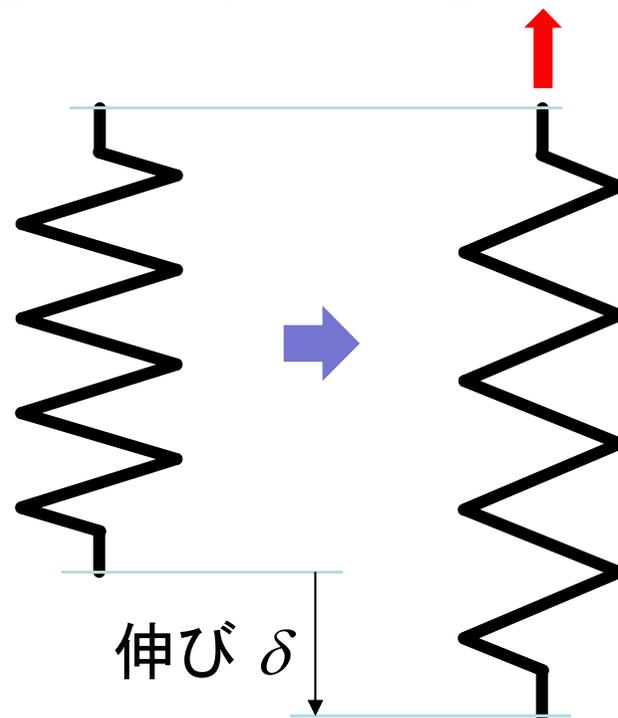
変形と力の関係



そのときのバネの見かけ上の関係;
フック(Hooke)の法則
 $F = k\delta$

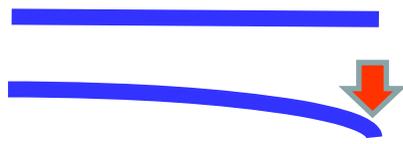
同様に,
棒を引張れば, 伸び変形
板を曲げれば, 曲げ変形

力を加える前 力を加えた後



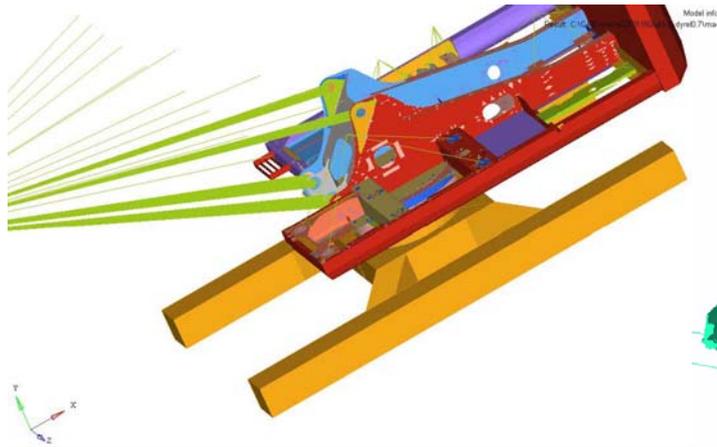
コイルばねの各部分に:
ねじり荷重が加わる
↓
ねじり変形が生じる

- ・どれだけの力でどこまで変形するか?
- ・固有振動数はいくつか?
- ・どこまでの力に耐えられるか?

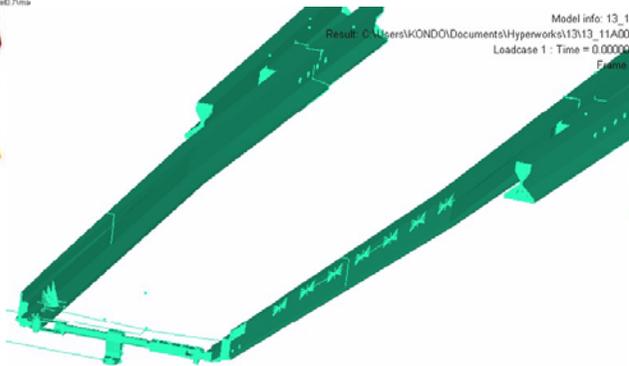


構造物の強度のコンピュータシミュレーション

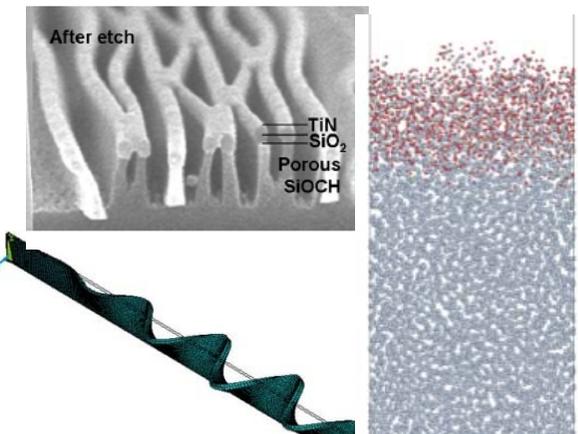
- 発電所や鉄道などの大規模構造や、ナノスケールの半導体素子まで、すべてのモノは構造を持っています。
- 機械工学、特にものづくりにおいて、構造物の強度を知ることには不可欠な技術です。
- 鉄道、自動車、火力発電所、半導体、燃料電池などの幅広い分野の問題に対して、原子から大型構造物までのコンピュータシミュレーションによる研究を行っています。



自動車・重機の衝撃シミュレーション

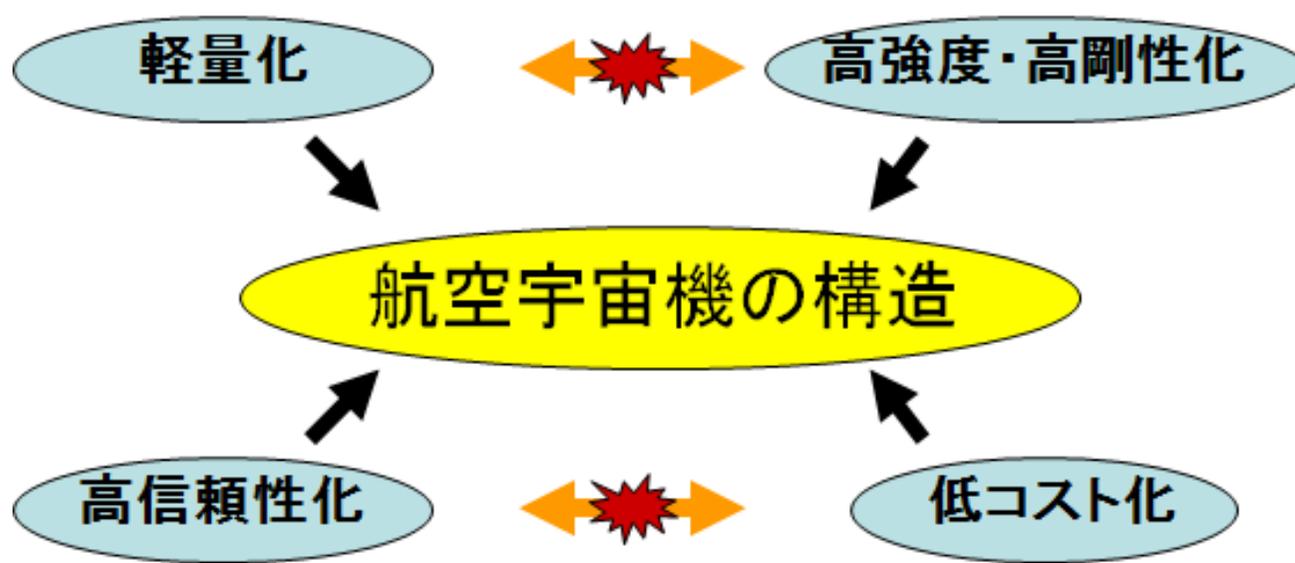


鉄道・軌道の衝撃シミュレーション

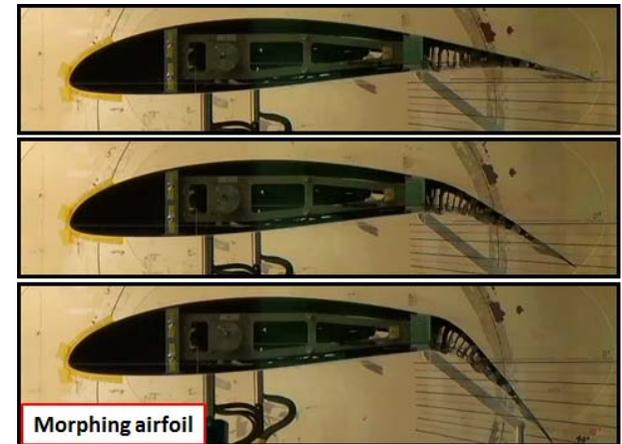


半導体素子の変形・分子動力学シミュレーション

航空機用とにかく軽くて強い構造を作るか



可変翼構造
(モーフィング翼)



両立させることが難しい要求に応える構造

- 高機能複合材料の利用
- 新材料に対応する新しい構造概念

新しい概念の構造

- スマート化・モーフィングの概念
(可変翼断面など)
- 膜構造(宇宙用大型膜構造)
- インフレータブル構造
(高収納性宇宙構造)

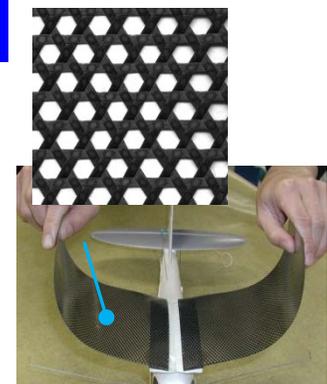
先進構造の高性能化

- 複合材料構造
(ナノ複合材, サンドイッチ構造など)

宇宙用高圧
インフレータブル構造



ボーイング777
胴体外板構造



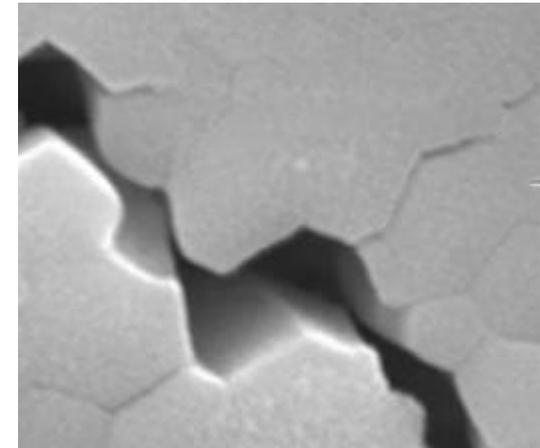
三軸織物
複合材料

破壊のメカニズムの解明

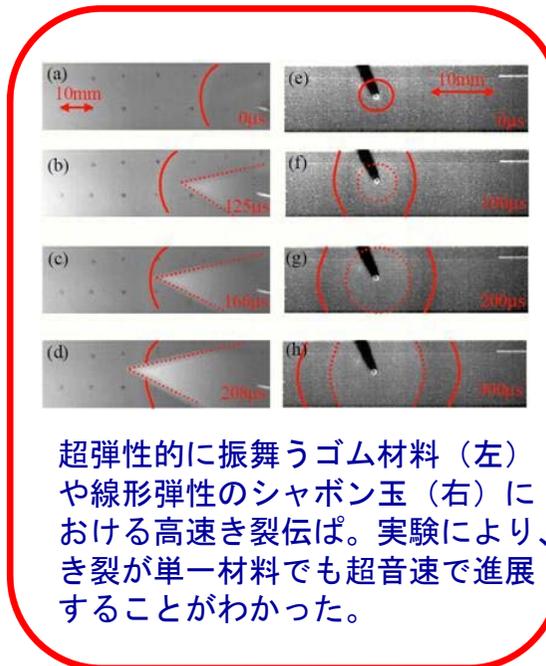
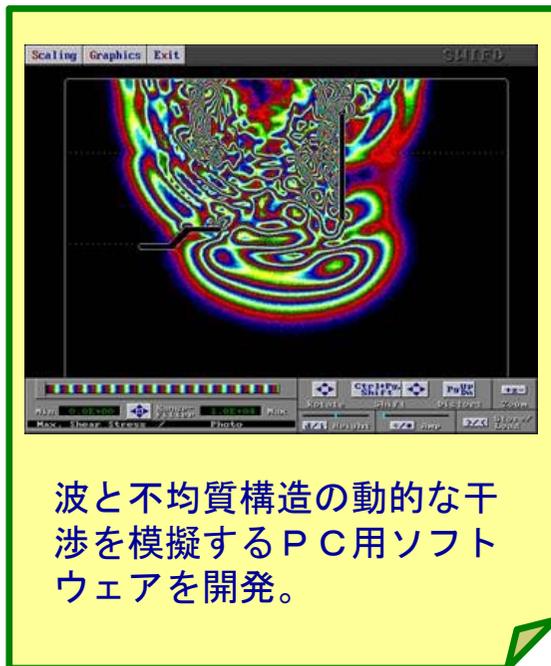
航空宇宙分野で用いられる材料は、**極限環境**、**安全性**などの観点から厳しい制約を受けるので、**変形**や**破壊**についての正確な知識が不可欠である。

また、材料の変形や破壊については、経験的には既知の現象であっても、メカニズムが不明なものも多い。

航空宇宙分野特有の環境が材料に及ぼす影響、先進材料の変形・破壊挙動などについて実験、数値シミュレーションにより研究を行っている。

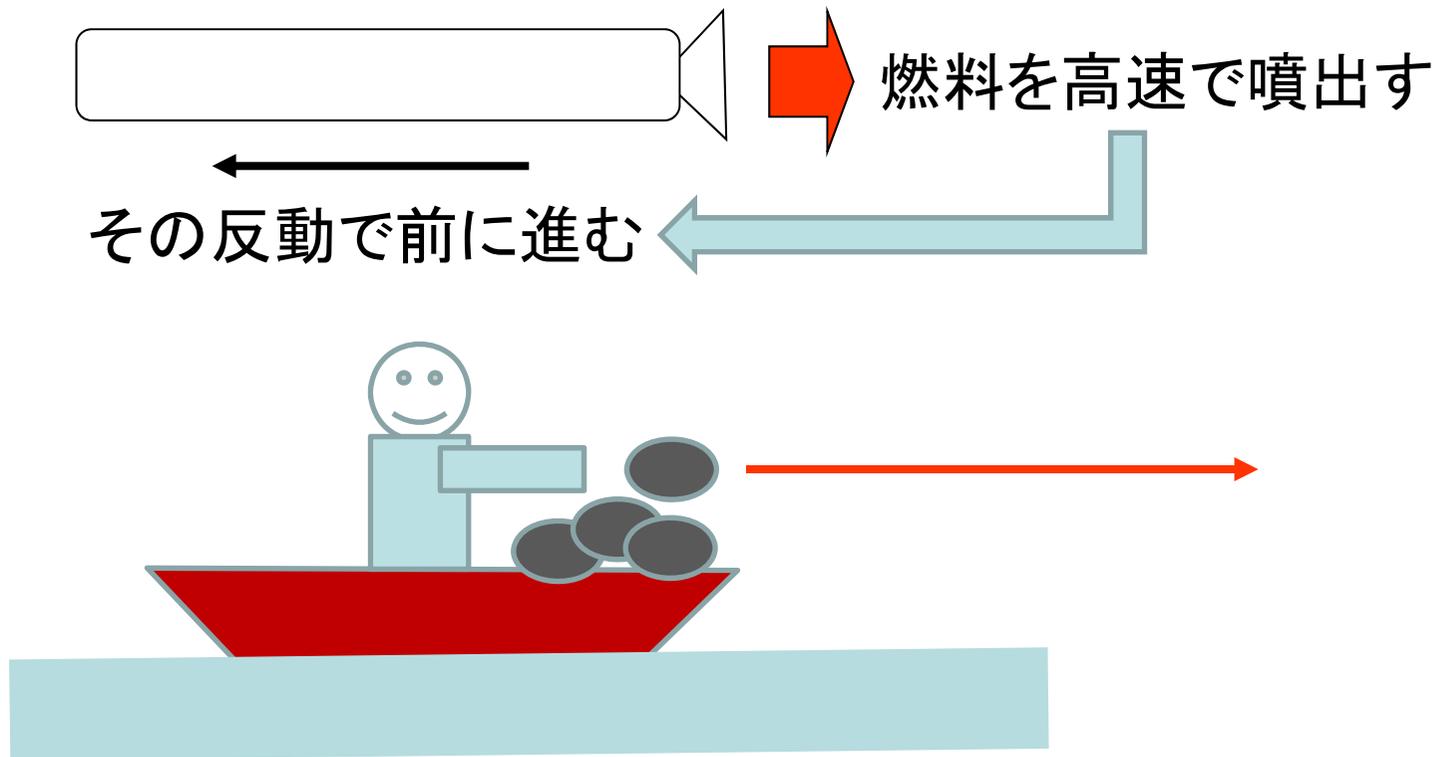


TBC(熱遮蔽皮膜)としてのジルコニア皮膜のスプラット内に生じた粒界き裂



動力学・制御工学

ロケットはなぜ飛ぶんだらう？

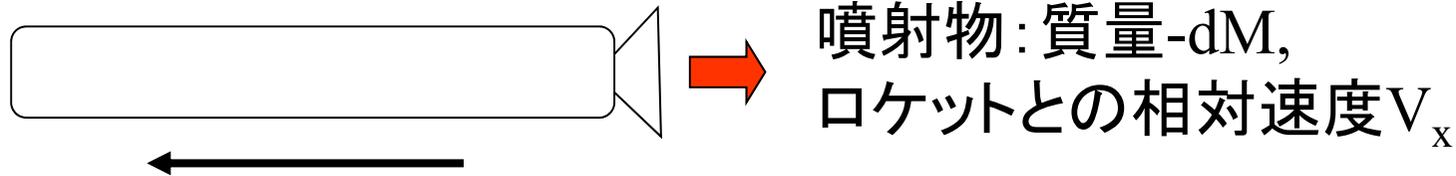


石を投げた反動で、船は前に進む。
より早く進むためには、①重い石を ②できるだけ早く投げた方がいい

- ①燃料の量をできるだけ多くする(通常は全体の80%程度)
- ②エンジンの排気速度をできるだけ早くする(性能を上げる)

ロケットの推進のメカニズム

- 運動量保存則



速度: 最初 $V \rightarrow$ 噴射後 $V+dV$

質量: 最初 $M \rightarrow M+dM$ (ただし $dM < 0$)

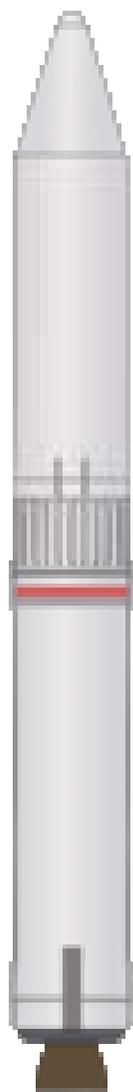
$$(M+dM)(V+dV) + (-dM)(V-V_x) = MV$$

より $dV = -V_x dM / M$

M で積分すると $V = V_0$ (初速) $+ V_x \ln(M_0/M)$

速度増分(ΔV) = 排気速度 $\times \ln$ (最初の質量 / 最後の質量)

EPSIRON (Japan) 1/1



開発費用	205億円(目標)
打ち上げ費用	E-X:53億円(1号機) E-I:30億円以下(目標)
原型	SRB-A, M-Vロケット
公式ページ	JAXA イプシロンロケット

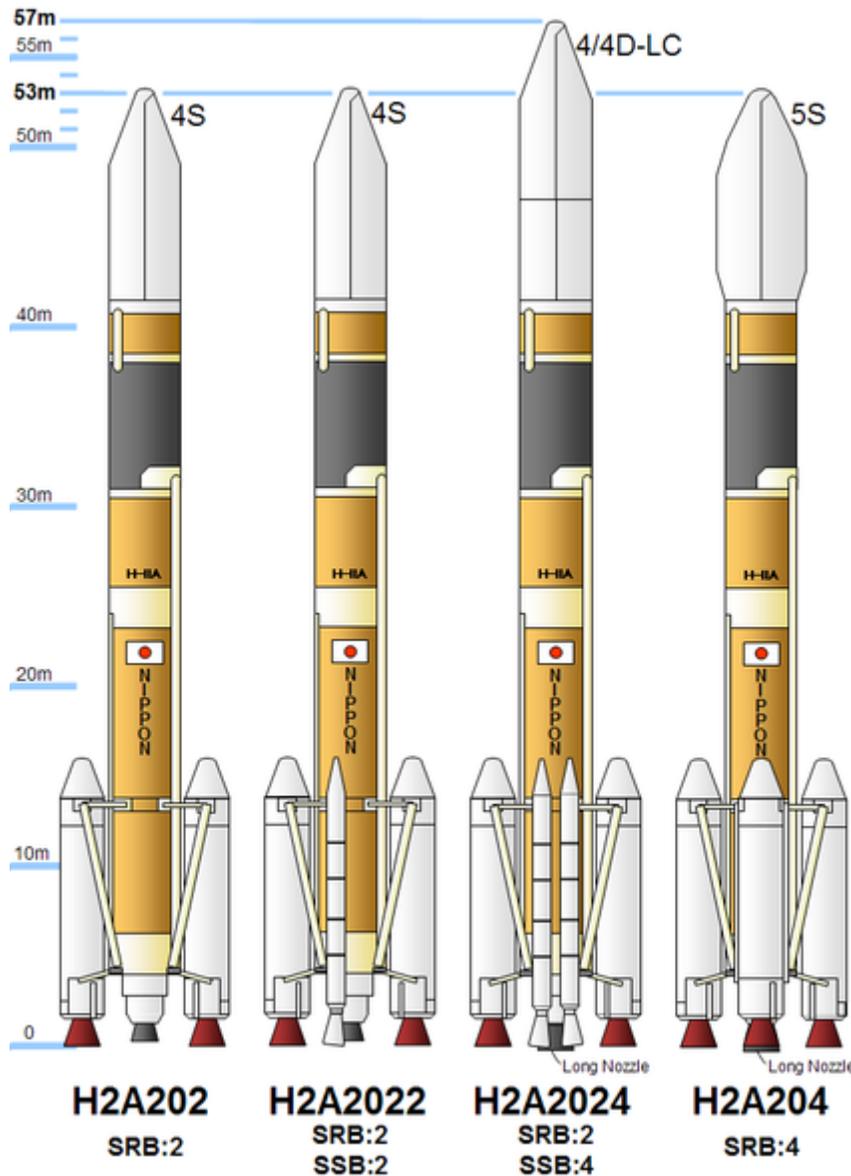
物理的特徴

段数	3段(基本型) 4段(オプション)
ブースター	なし
総質量	90.8t
全長	24.4 m
直径	2.6 m

軌道投入能力

低軌道	1,200 kg 250 km × 500 km
太陽同期軌道	450 kg 500 km × 500 km 内之浦から打ち上げた場合

H-IIA (31/32)



開発者

NASDA → JAXA →
三菱重工

運用機関

NASDA (1 - 5号機)
JAXA (6、8、10 - 12号機)
RSC (7、9号機)
三菱重工 (13号機以降)

使用期間

2001年 - 現役

打ち上げ数

28回 (成功27回)

開発費用

1,532億円

打ち上げ費用

85 - 120億円

物理的特徴

段数

2段

総質量

289 t / 445 t (4基)

全長

53 m

直径

4 m

軌道投入能力

低軌道

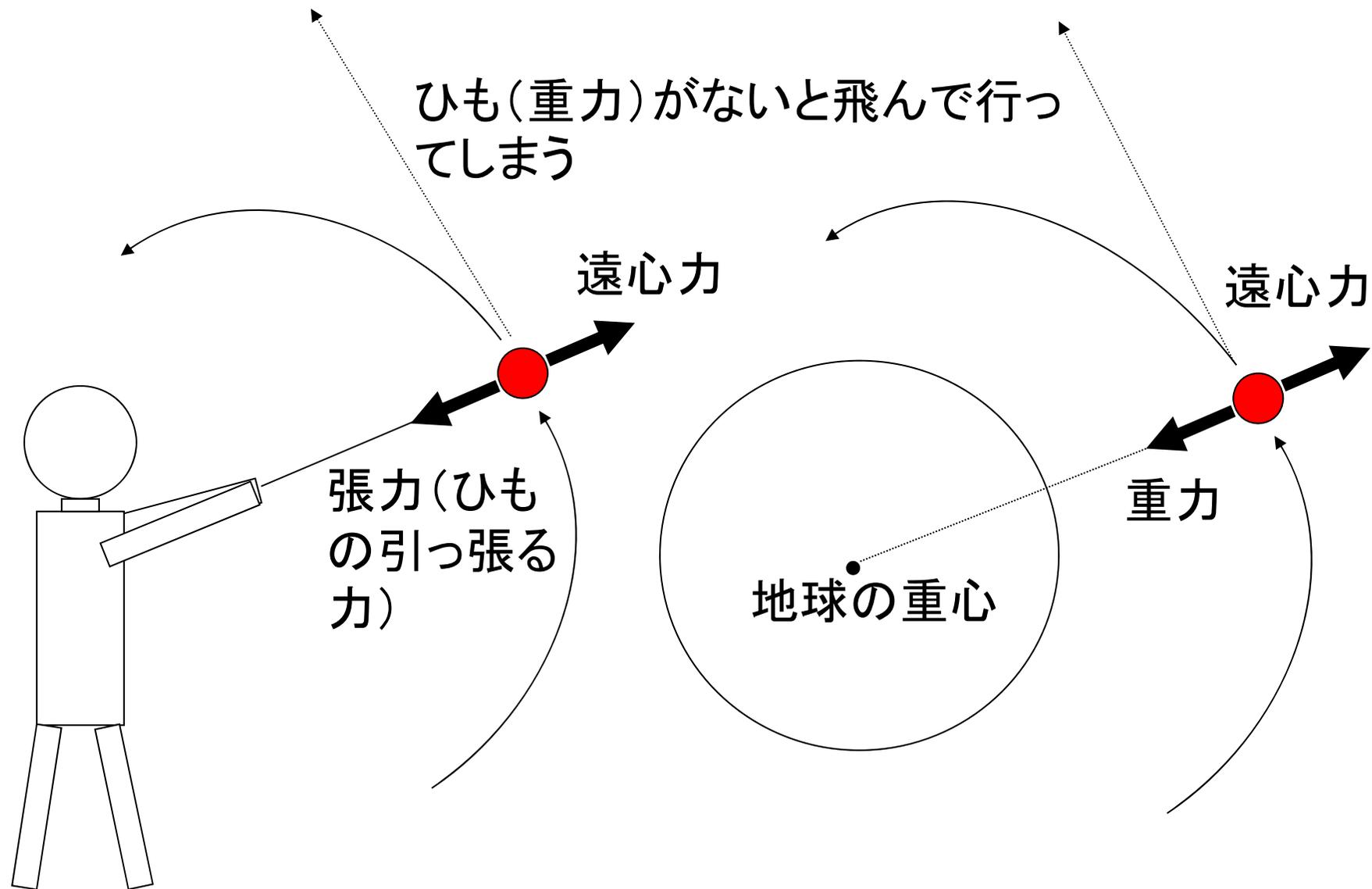
10,000 kg / 15,000 kg (4基)
300 km / 30.4度

太陽同期軌道

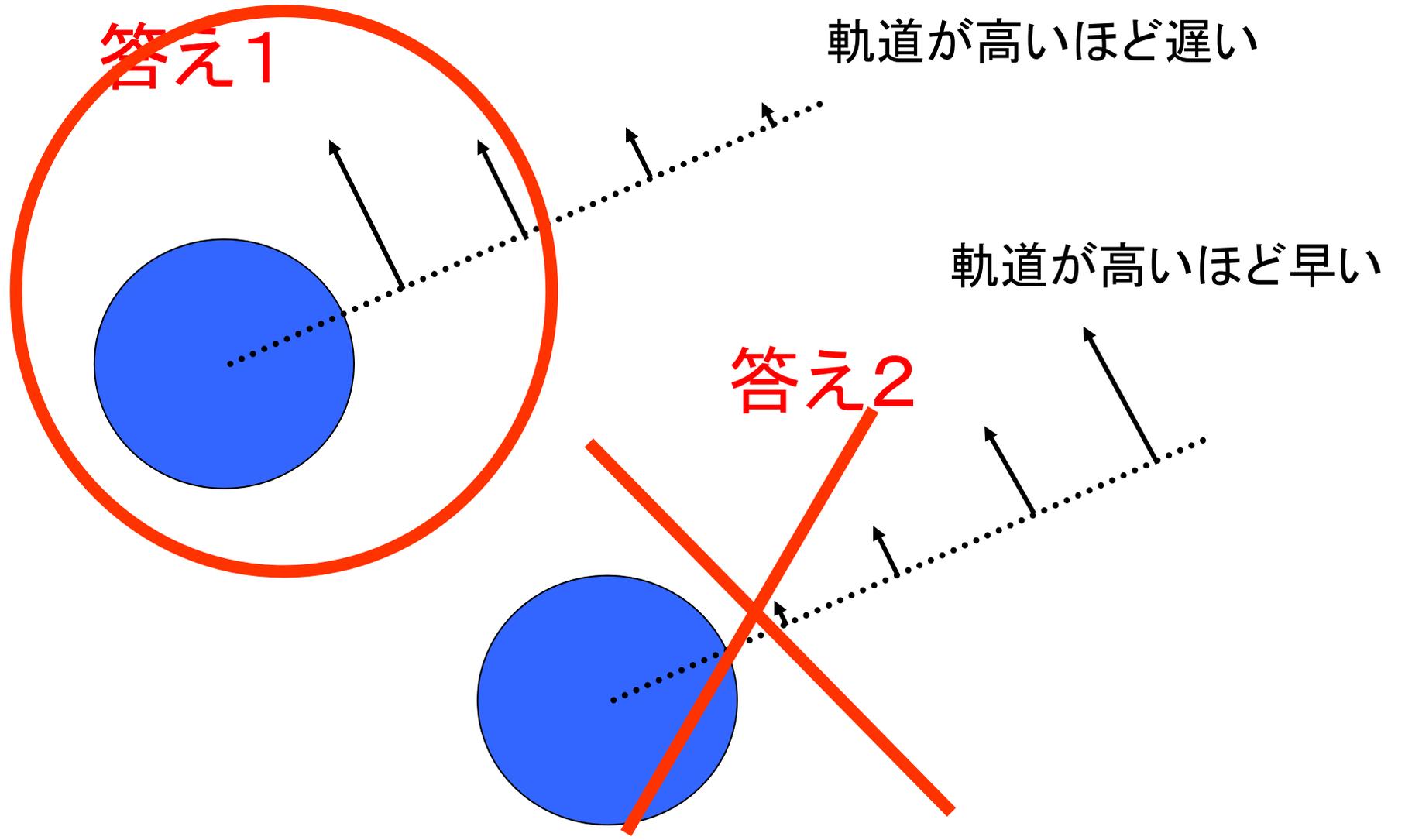
3,600 kg (夏) / 4,400 kg (夏以外)
800 km / 98.6度

静止移行軌道

4,000 kg / 6,000 kg (4基)
250 km x 36,226 km / 28.5度



人工衛星の飛ぶ原理ー1



答え1

軌道が高いほど遅い

軌道が高いほど早い

答え2

円軌道のつりあいの速度

$$\text{遠心力} = \frac{\text{質量} \times \text{速度}^2}{\text{軌道半径}} \quad \text{重力} = \frac{\text{質量} \times \text{地心重力定数}}{\text{軌道半径}^2}$$

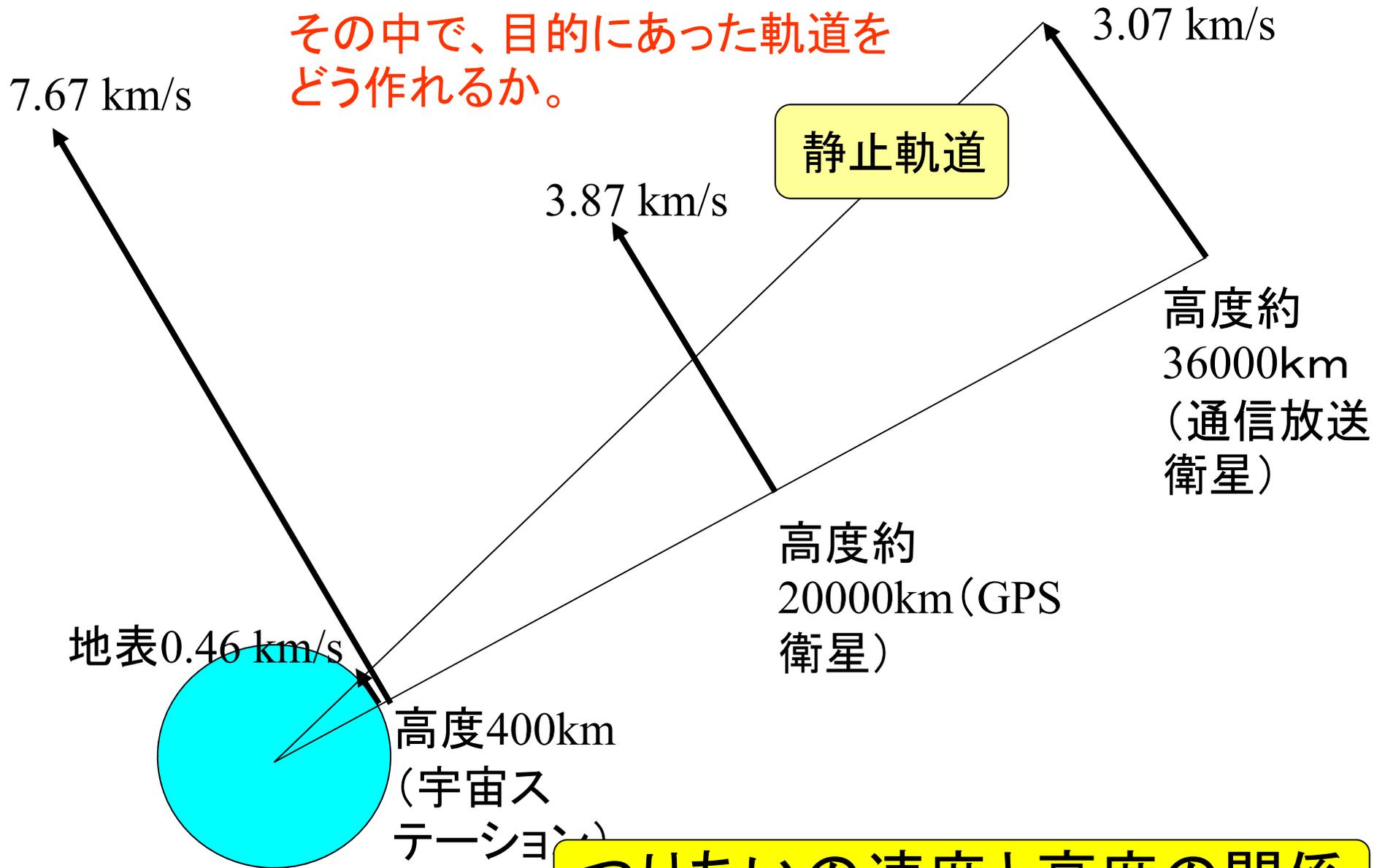
$$\begin{aligned} \text{地心重力定数}(\mu) &= \text{万有引力定数} \times \text{地球の質量} \\ &= 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2 \end{aligned}$$

遠心力 = 重力 のつりあいの式を解くと

$$\text{速度} = \sqrt{\frac{\text{地心重力定数} (\mu)}{\text{軌道半径} (r)}}$$

円軌道のつりあいの速度の計算

すべては万有引力で支配される。
その中で、目的にあった軌道を
どう作れるか。

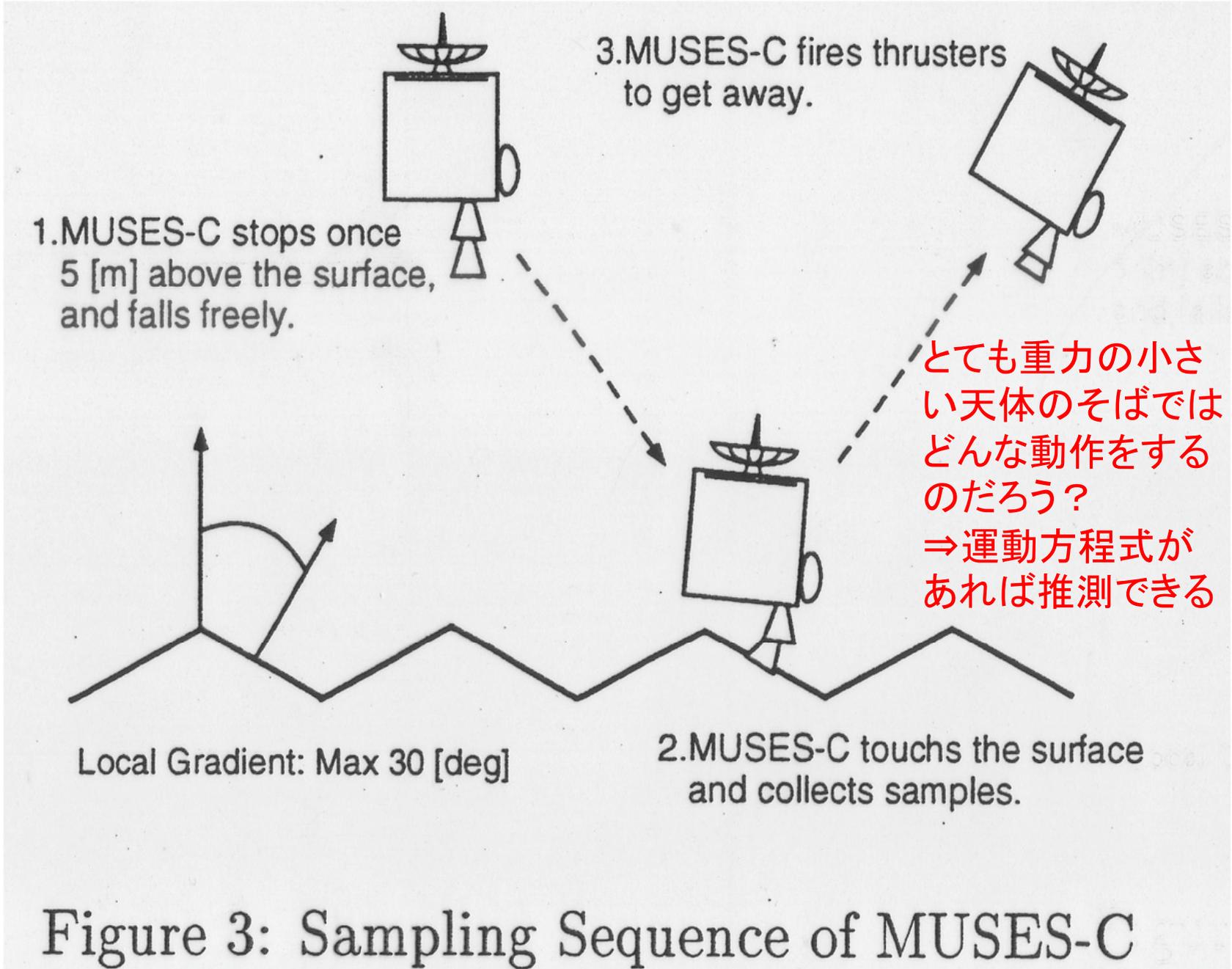


つりあいの速度と高度の関係

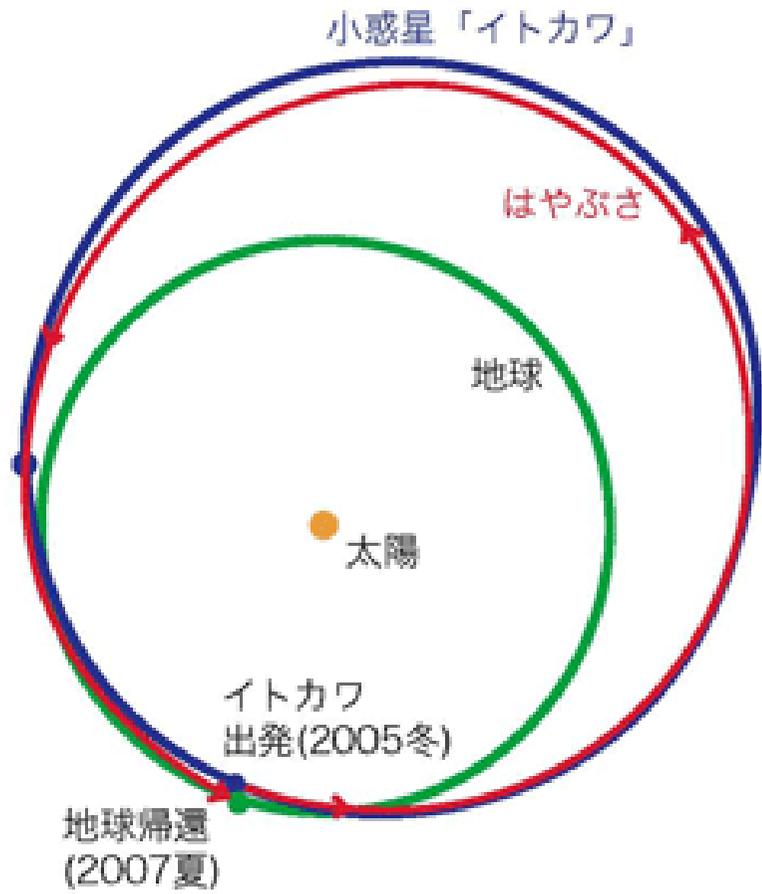
はやぶさ



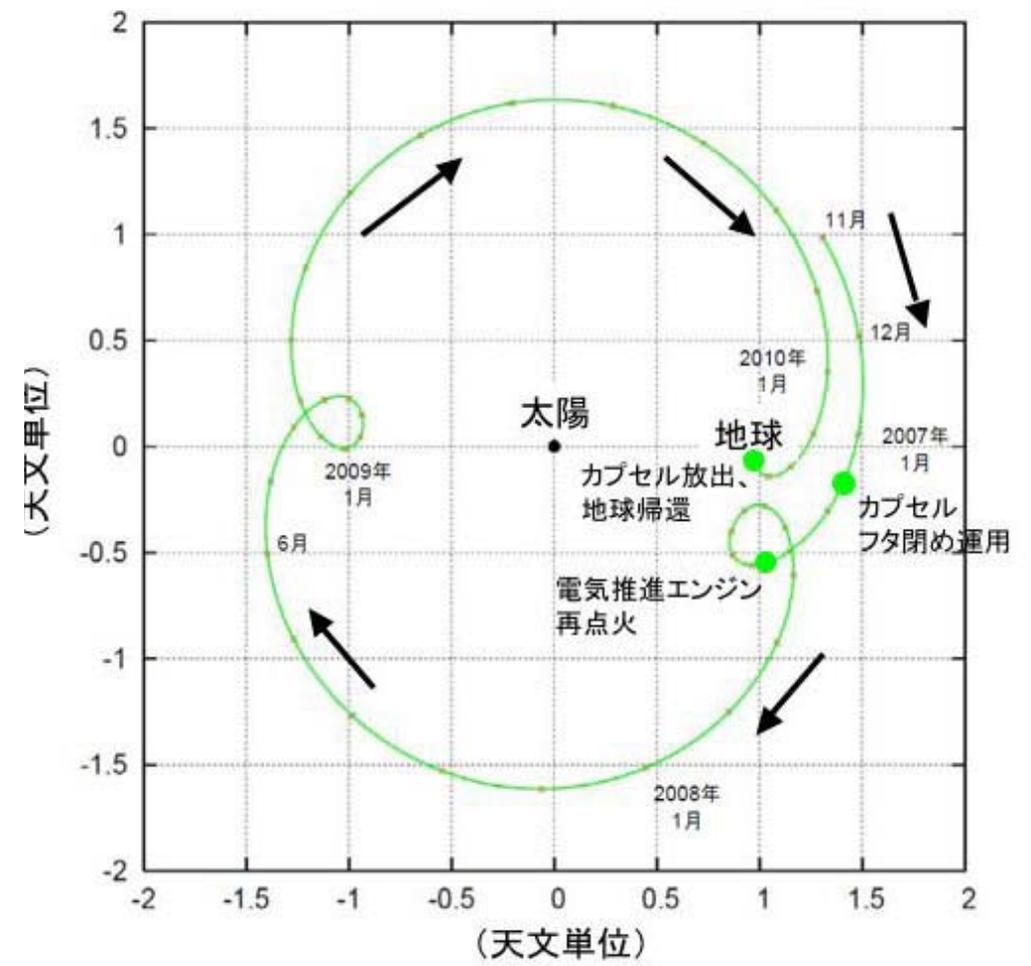
提供：JAXA



はやぶさの軌道



地球帰還軌道



大気圏突入

はやぶさ本体は燃え尽きた



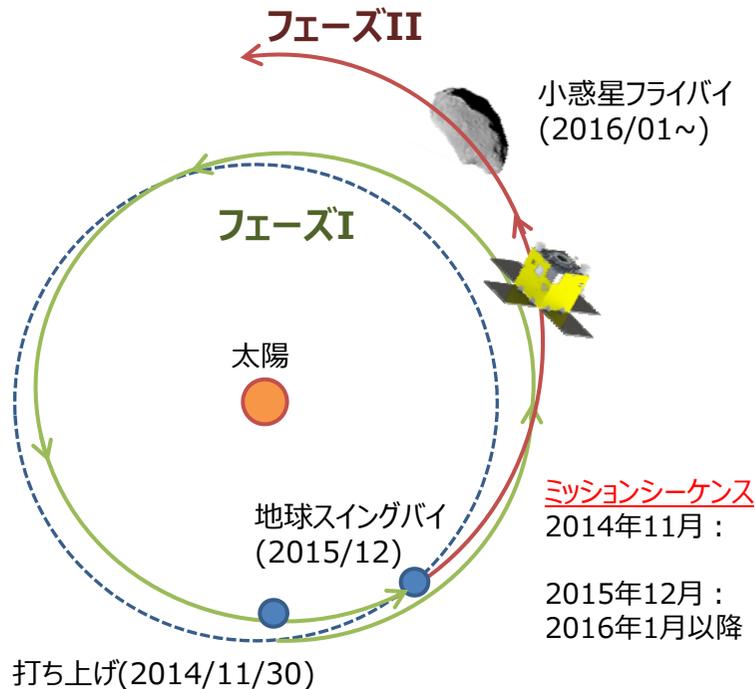
カプセルだけが燃えないで、
地上にもどってきた

軌道の正確な計算と、空力加熱から守る技術のおかげで、
カプセルは予定通り、オーストラリアの砂漠に着陸した。

超小型衛星初の深宇宙探査機

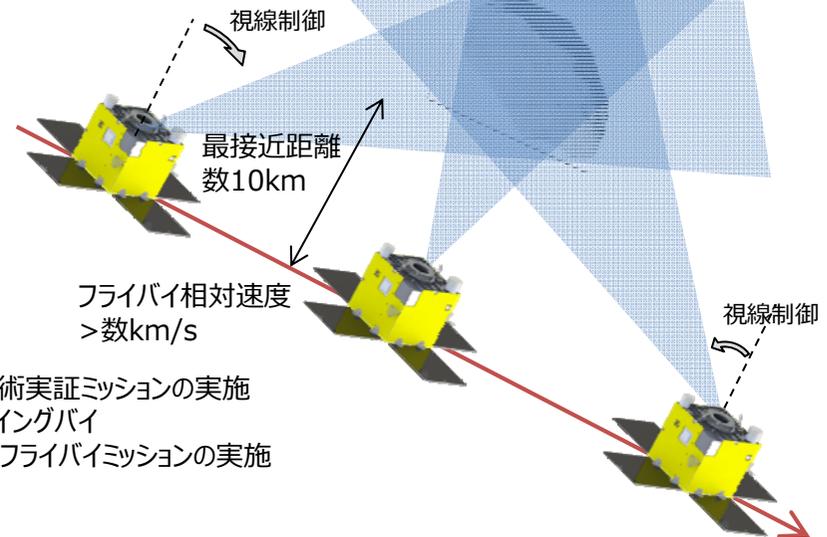
OPROCYONミッション(東大・JAXA共同、2014.11打上げ予定)

(PRoximate Object Close flyby with Optical Navigation)



<小惑星に対する超近接・高速フライバイ観測の概要>

超近接距離でフライバイし、駆動鏡を用いた機上の画像フィードバック視線追尾制御により高分解能画像を取得する。



1. 50kg級超小型深宇宙探査機バス技術実証 (ノミナルミッション)

- a. 深宇宙での発電・熱制御・姿勢制御・通信・軌道決定
- b. 超小型電気推進系による深宇宙での軌道操作

2. 深宇宙探査技術の実証

(アドバンストなミッション：加点対象ミッション)

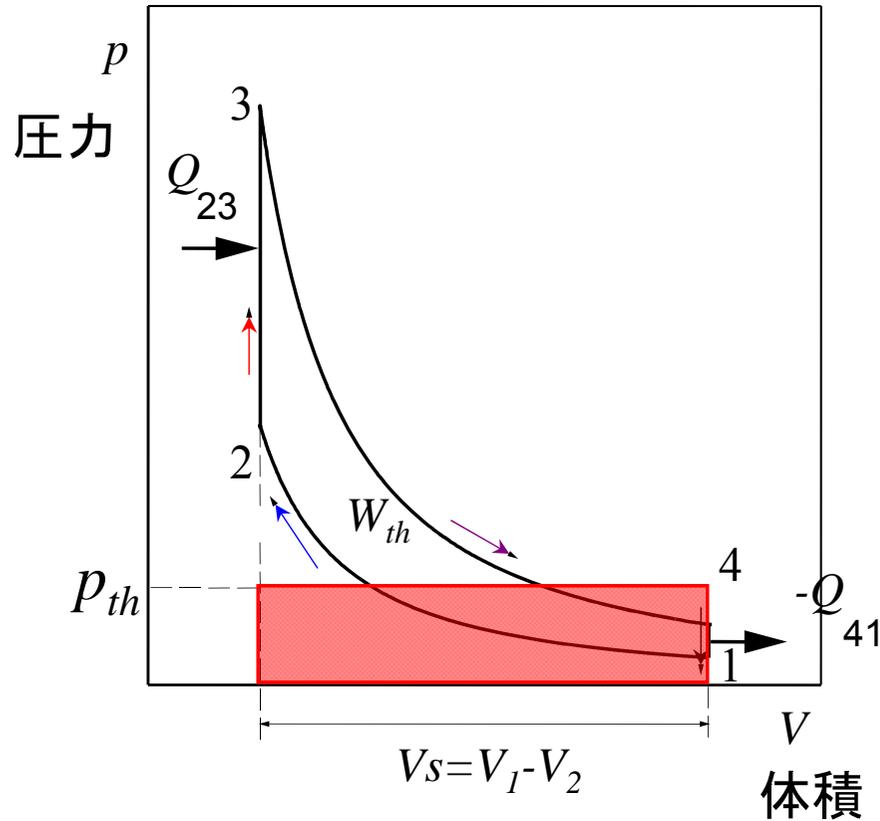
- c. 窒化ガリウムを用いた高効率X帯パワーアンプによる通信
- d. 深宇宙での超長基線電波干渉法による航法
- e. 小惑星に対する電波・光学複合フライバイ航法
- f. 視線追尾制御による小惑星の超近接・高速フライバイ観測

3. サイエンス観測

- g. ジオコロナ (地球コロナ) 撮像

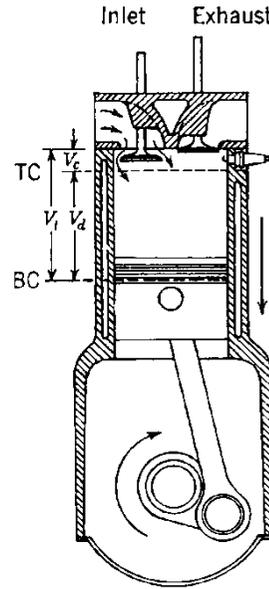
熱力学・燃焼

火花点火機関の理想(ガス)サイクル(1)



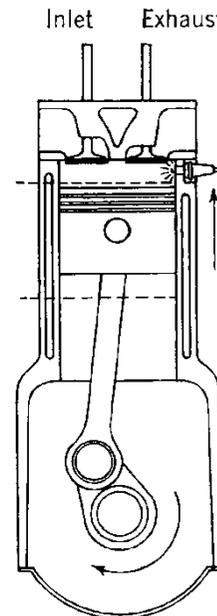
V_1 : 下死点での体積
 V_2 : 上死点での体積

オットーサイクルのP-V線図



吸気行程

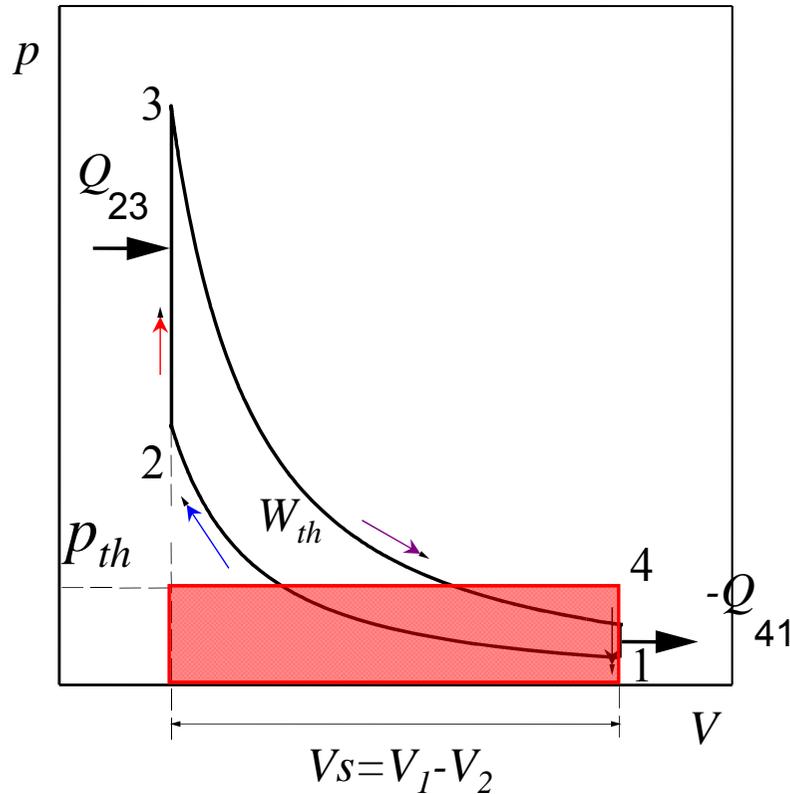
ピストンが一番下まで降りた状態(下死点)が状態1



圧縮行程(1→2)

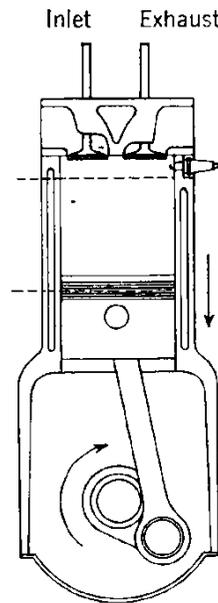
完全に密閉された状態でピストンにより圧縮される(断熱圧縮)
 ピストンが一番上がった状態(上死点)が圧縮終了時(状態2)

火花点火機関の理想(ガス)サイクル(2)



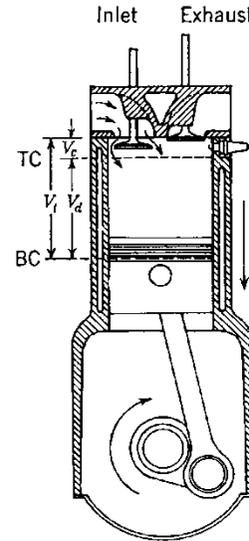
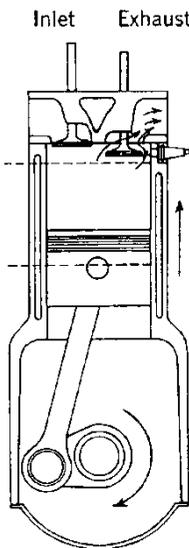
V_1 : 下死点での体積
 V_2 : 上死点での体積

オットーサイクルのP-V線図



燃焼(2→3) (等容加熱 Q_{23})
 ピストンが上死点にとどまっている間に燃焼.

膨張行程(3→4)
 高温高圧ガスによりピストンが押し下げられる(断熱膨張)
 ピストンが一番下がった状態(下死点)が膨張終了時(状態4)



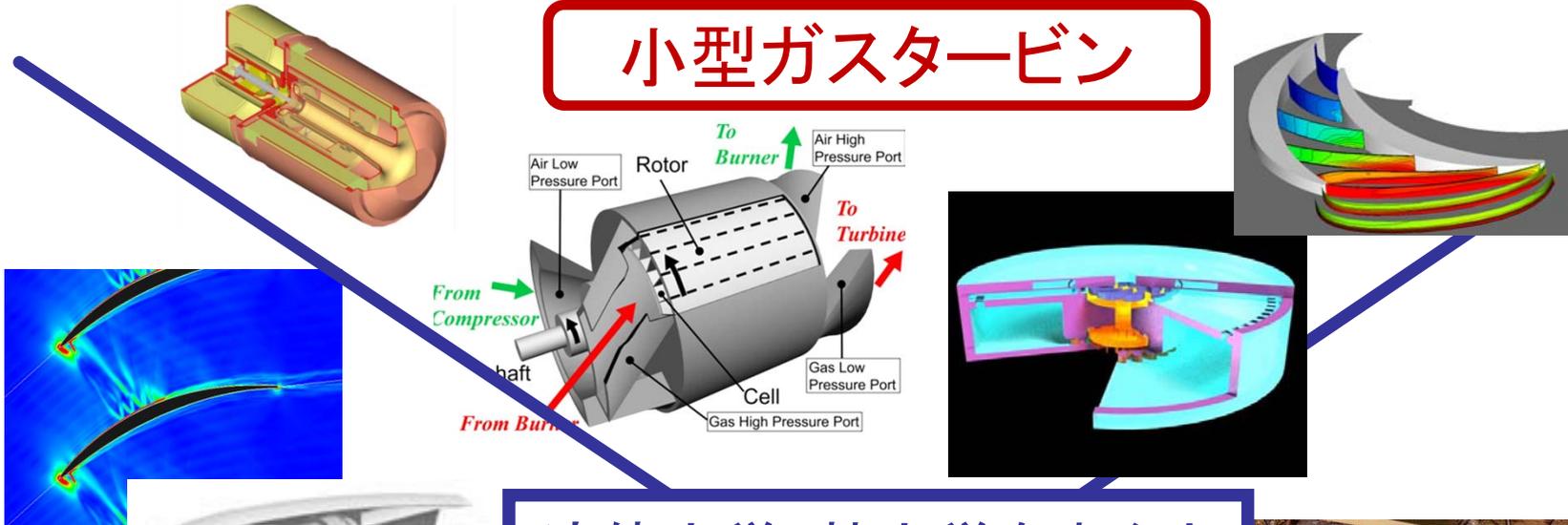
排気, 吸気行程
 (4→1) (等容冷却)
 排気により熱(Q_{41})を放出. その後吸気により再び状態1にもどる.
 理想サイクルではガス交換を無視して考えるので, これらが同時に生じたとみなす.



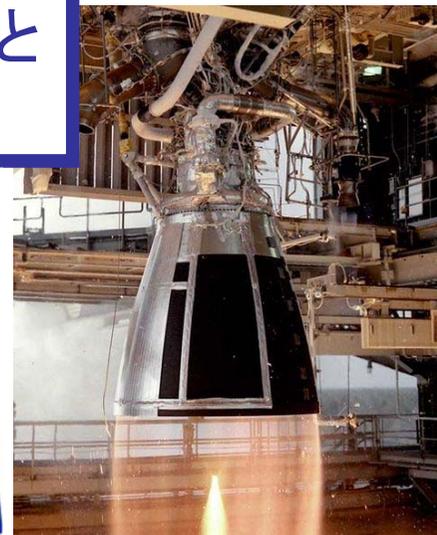
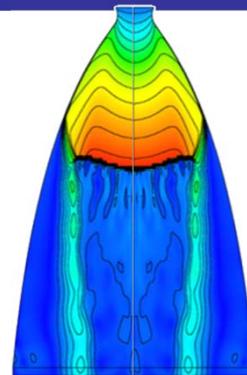
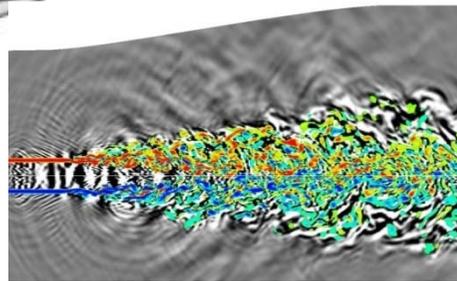
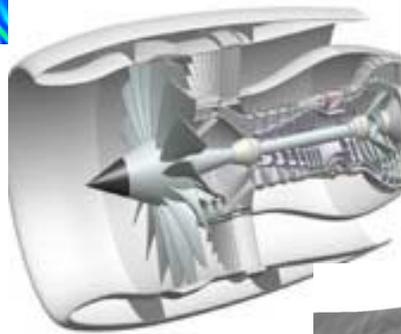
ロケット、エンジンの性能を上げる研究



小型ガスタービン



流体力学・熱力学を中心とした航空宇宙推進機関



ジェットエンジン

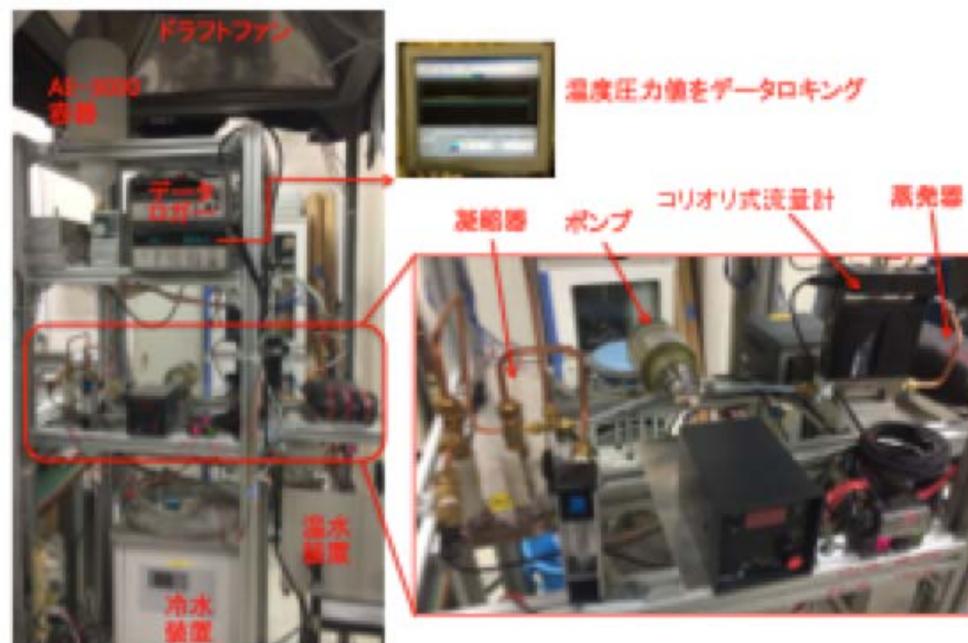
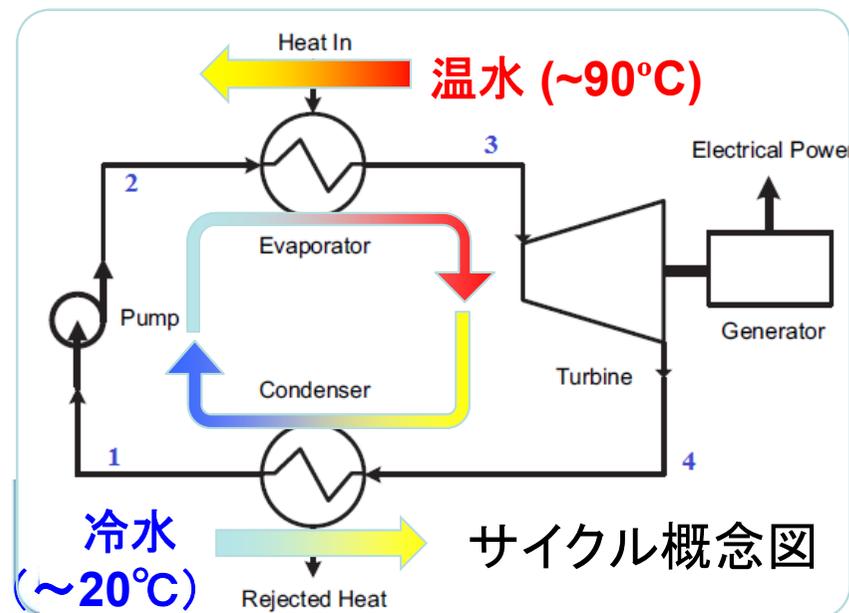
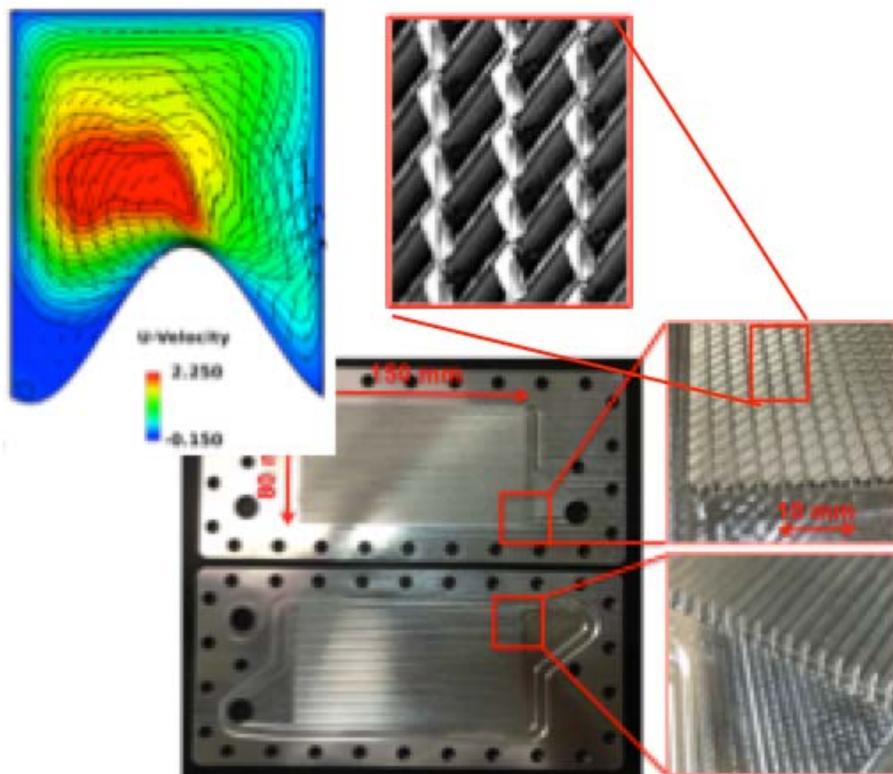
ロケットエンジン

蒸気サイクルを用いた小型地熱発電システム

✓ 環境低負荷・伝熱特性を考慮した
新作動流体の開発

✓ 高性能熱交換器の開発

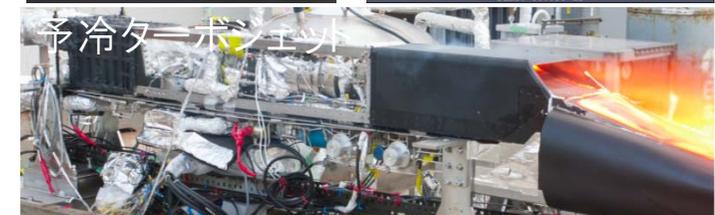
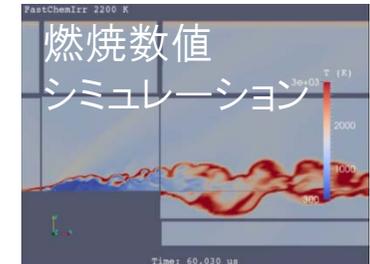
熱と流体のシミュレーションに基
づく高性能小型熱交換器の設計



燃えること・燃やすことの研究

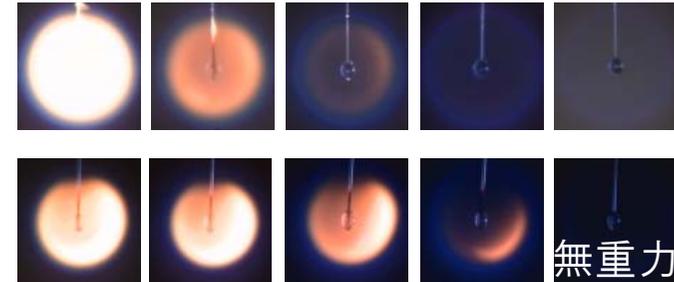
▶ 自動車，航空機，宇宙機に至るあらゆるエンジンのエネルギー変換過程

- 極超音速機用予冷ターボジェット
- スクラムジェット（超音速燃焼）
- ロケットエンジン（エタノール/LOX）
- 革新的点火技術（レーザー，マイクロ波，放電）



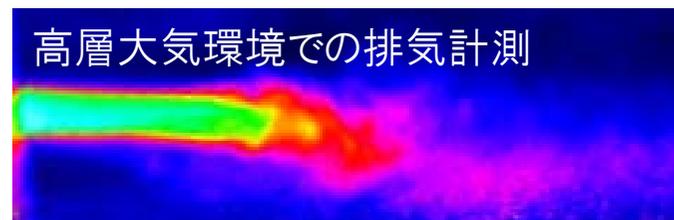
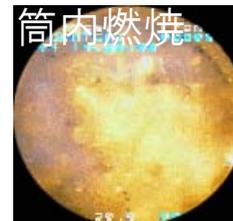
▶ 宇宙環境利用

- 無重力環境化での科学実験
- 宇宙防災
- 液体燃料の燃焼



▶ 環境適合型エンジンと排気の影響

- 超音速機の排気が環境に及ぼす影響
- 窒素酸化物
- 非接触測定技術
- すす低減



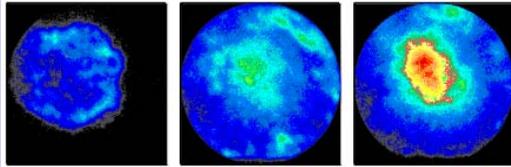
超高効率の次世代エンジンシステム

熱効率50%（現在ガソリンエンジンは最高38%）を目指す

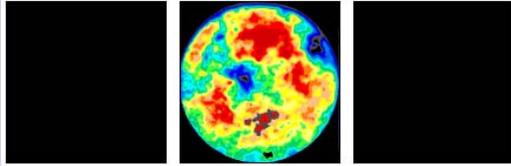
新たな燃焼方式の採用

最適な運転条件の実現

従来
燃焼



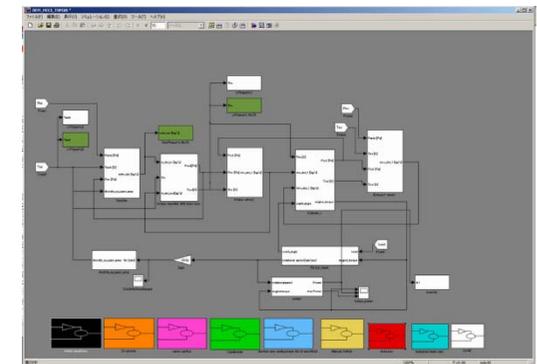
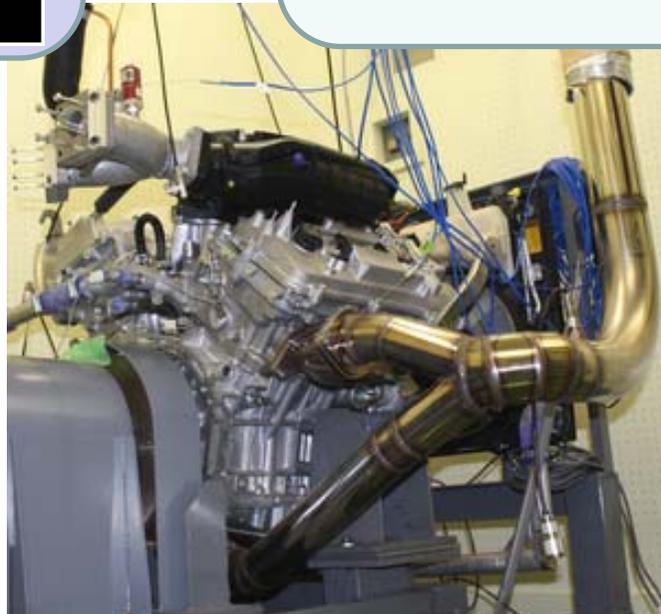
新燃
焼



物理モデ
リング
（現象の
数式化）

$$\begin{bmatrix} n_{O_2, RG, k+1} \\ T_{RG, k+1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} n_{O_2, RG, k} \\ T_{RG, k} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} Q_{fuel, k} \\ \theta_{INJ, k} \\ P_{boost, k} \end{bmatrix}$$

	Reactions
1	$H + O_2 = O + OH$
2	$O + H_2 = H + OH$
3	$OH + H_2 = H + H_2O$
4	$2OH = O + H_2O$
5	$2H + M = H_2 + M$
6	$H + OH + M = H_2O + M$
7	$H + O_2 + H_2 = HO_2 + H_2$
8	$H + HO_2 = 2OH$
9	$H + HO_2 = H_2 + O_2$

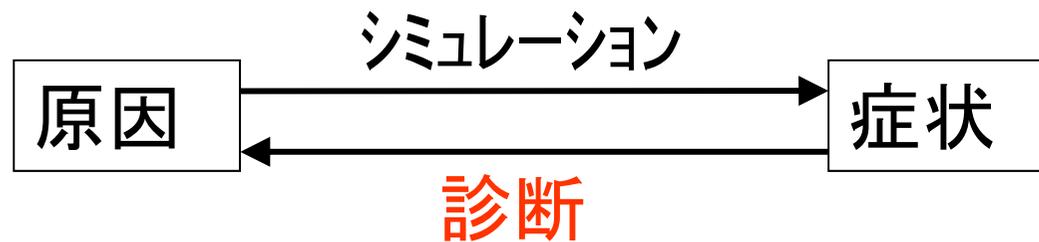
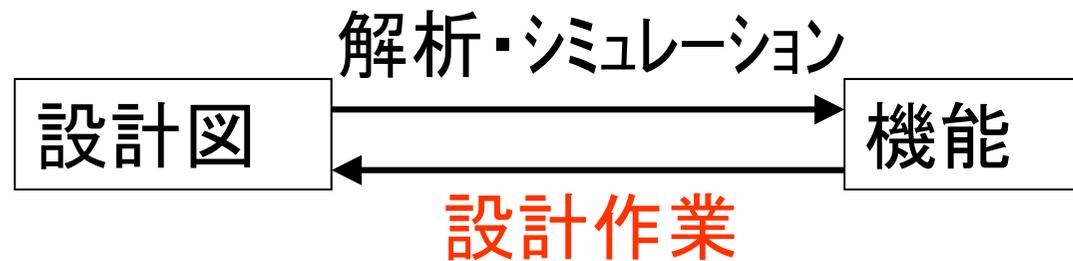


燃焼（化学）反応メカニズムの解明

シミュレーションを用いた革新的な設計

設計工学

設計：「順問題」と「逆問題」

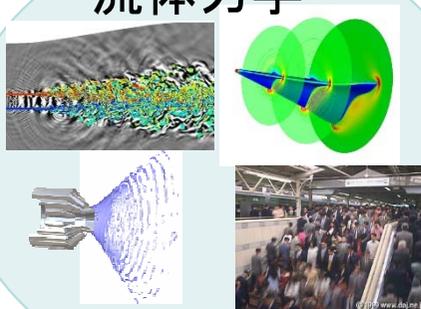


システムを作るには多分野の統合が必要

燃烧



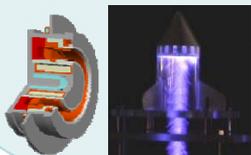
流体力学



プロジェクトマネジメント



宇宙推進



ものづくり



航空機
ロケット
人工衛星
「システム」



飛行力学・制御



設計

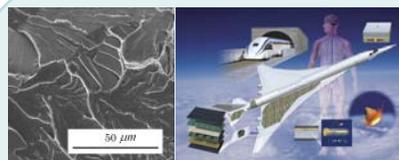


設計は多分野それぞれからの要望をバランスよく統合して、全体として最適なシステムを目指す。

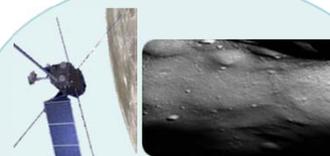
構造力学



航空宇宙材料



宇宙利用

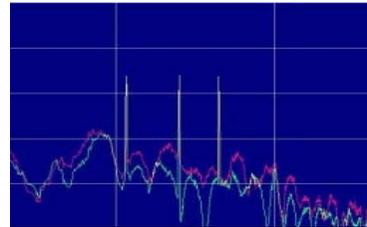
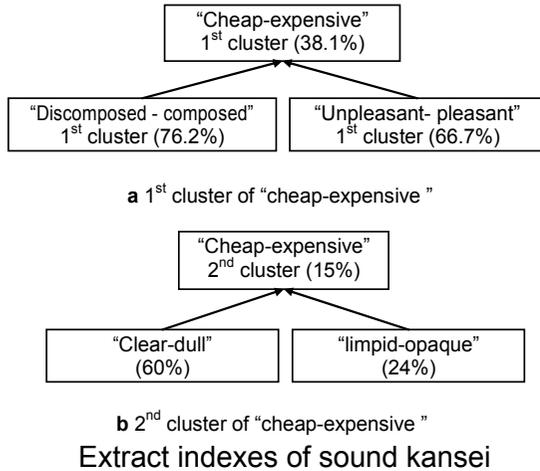


人工知能



感性設計学 ~ 感性を設計する

聴覚

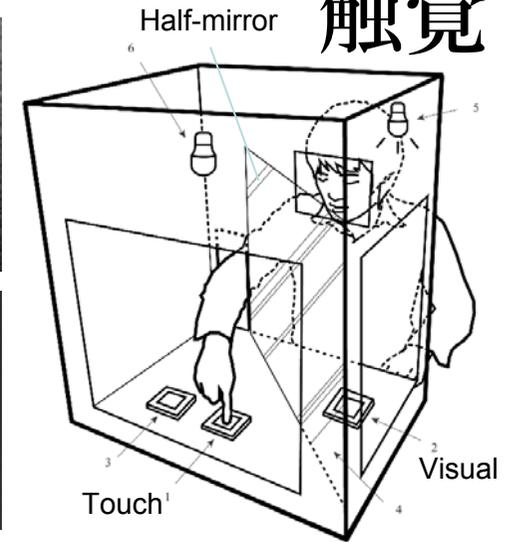


Synthesized harmonic sound



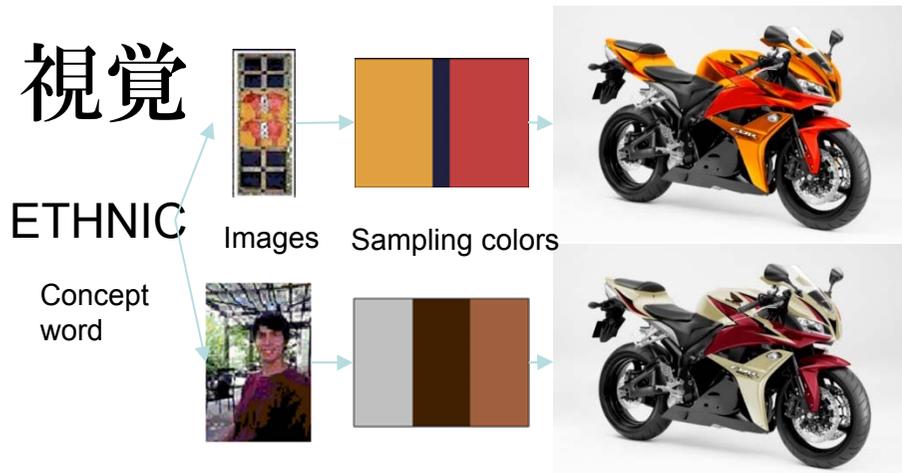
感性の多様性と和音性を利用した製品音の設計

触覚

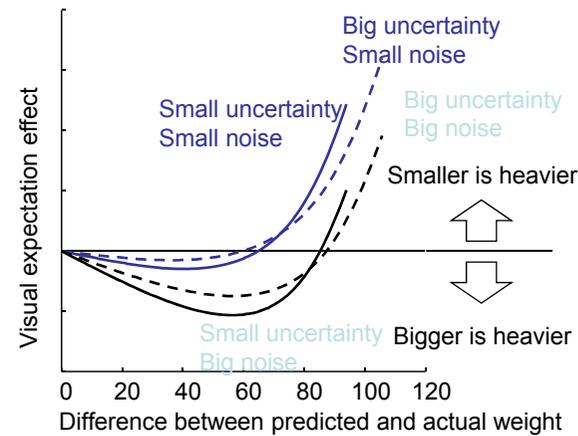


視覚と触覚の仮想合成による材質感の先導設計

視覚

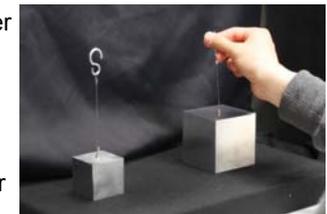


コンセプト画像と色彩調和論を用いた配色の生成



Computer simulations of weight perception

力覚



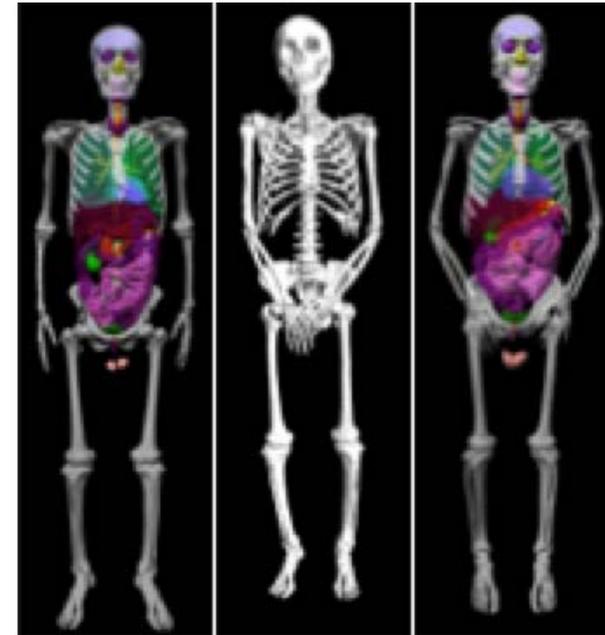
Compare identical weight but different size objects

「軽さ感」の設計のための視覚効果の解明

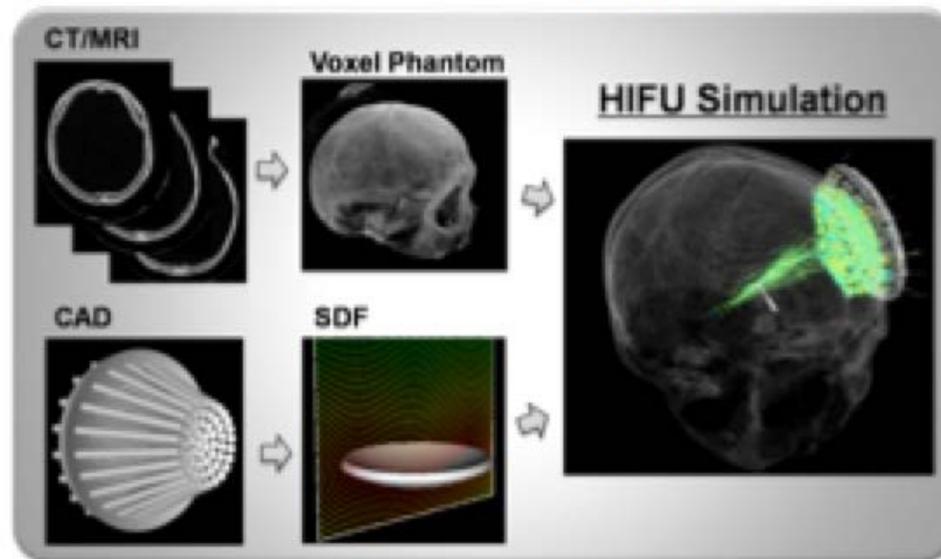
スーパーコンピュータによる 次世代型診断・治療システムの開発と設計



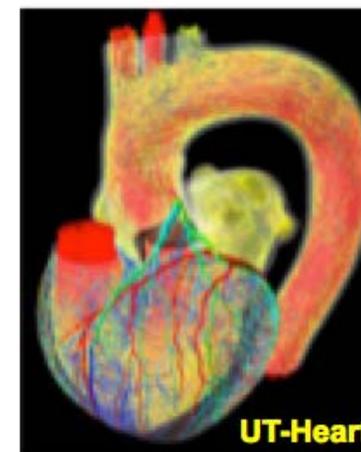
<http://jp.fujitsu.com/about/tech/k/>



生きているヒトの医用画像データから
コンピュータ上に作られた人体



患者ごとの画像データと機器の設計データを利用したシミュレーションによる超音波治療器の開発



心臓の細胞一つ一つから心臓全体の動きを再現。世界で最も注目されている心臓シミュレーション。You Tubeで20万回以上の動画再生。
<https://www.youtube.com/watch?>

機械、航空宇宙を取り巻く4つの力学+ α

- 流体力学(空気力学含む)
運動方程式、仕事、エネルギー、圧力、浮力、空気の抵抗、---
- 構造力学(材料力学ともいう)
運動方程式、仕事、エネルギー、バネ、弾性力、単振動、摩擦---
- 動力学・制御工学
運動方程式、仕事、エネルギー、剛体の運動、位置・運動エネルギー、重力、運動量保存則、天体の運動、斜面、滑車、--
- 熱力学
仕事、エネルギー、温度、圧力、体積、ボイル・シャルルの法則、熱力学第1, 2法則、等*変化、可逆変化、熱効率、---
- さらに上記をベースにした「設計」工学