

磁界解析と磁気測定を援用した 電磁装置の最適設計

岡山大学大学院
自然科学研究科
高橋 則雄

磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

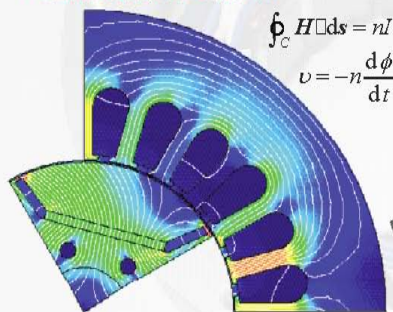
岡山大学大学院自然科学研究科
電磁デバイス学研究室

高橋則雄

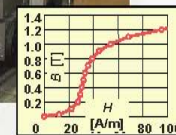
電磁デバイス学研究室

環境に優しい電気機器の開発

目に見えない
「電磁現象」の解析



解析に必要な
「材料特性」の測定



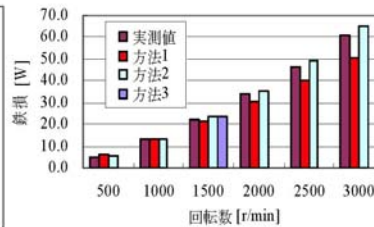
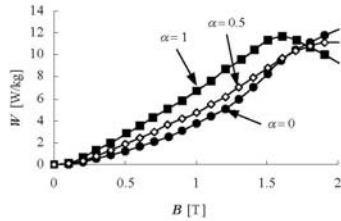
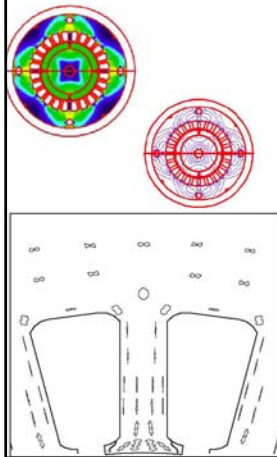
快適な生活の実現



1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

1. 有限要素法を用いた実機の現象に即した解析 各種電気機器の磁界の数値解析を、有限要素法(FEM)を用いて行っています。

モータの例



有限要素法を用いた磁界解析とは？

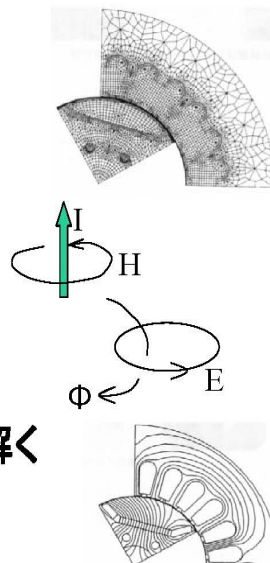
(a) 解析したい領域を
要素に分割

(b) 磁界分布を表す法則

電流の周りに磁界ができる
(アンペアの周回積分の法則)
磁束が変化すると電圧が生じる
(ファラデーの電磁誘導の法則)

(c) 連立方程式を作成して解く

(d) 磁束分布などを求める

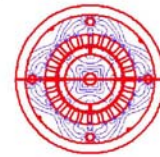


1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

有限要素法を用いた磁界解析で何が できるか？

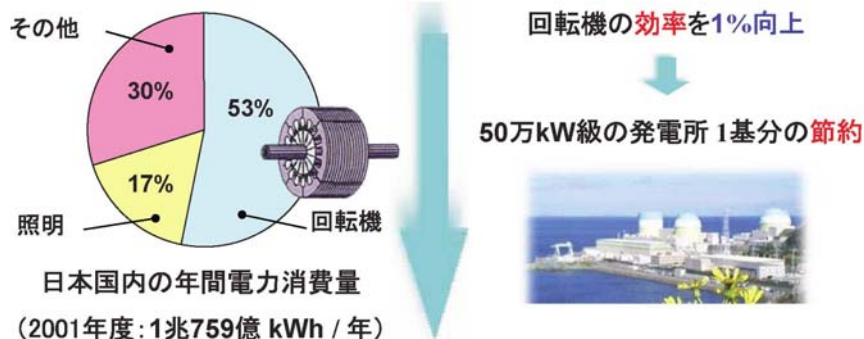
各種電磁装置の磁束分布、損失解析 →最適 設計

モータ(エアコン用、ハイブリッド自動車用、産業用、リニア
モータ、---)
磁石応用機器(MRI, 加速器---)
誘導加熱(インダクションヒーティング、---)
変圧器、リアクトル
磁気探傷
磁気シールド、建築物等による磁場の乱れ
超電導ケーブル



モータを解析する目的

- 回転機の需要の高まり(電力消費量の50%以上)
- 環境問題・省エネルギーに対する関心



高効率化を図ることが強く望まれている

1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

モータを解析する際の問題点

回転機の鉄損の解析値が実測結果と異なる

回転機製造時の応力歪による磁気特性の劣化が原因(?)

Punching

Shrink fitting

Stress Stator yoke

Case

有限要素法の解析モデル

解析モデル (3D)

- 回転子磁石の渦電流損失の解析

Analysis model (3D)

解析モデル
中心角180度, 積み厚:15mm
永久磁石:1.20T, ラジアル配向
節点数:211212, 要素数:184128
辺:総数 606082, 未知 506422

解析条件
有限要素法(非線形渦電流解析)
固定子:測定値
回転子:S45C
無負荷
ICCG法 収束判定値: 10^{-6}
NR法 収束判定値: 10^{-3}

1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

焼きばめ時の磁気特性の測定

- 焼きばめ(Shrink fitting)が施されている状態で回転子を取り除く
- バックヨーク部と焼きばめ部にかけて励磁巻線を巻く

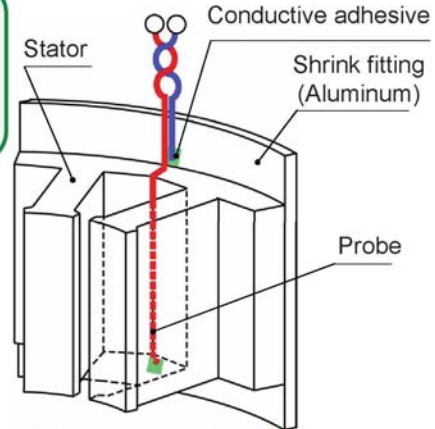
$$H = \frac{NI}{l}$$

$$B = \frac{\phi}{S}$$

N : コイルの巻数
 I : 電流
 l : 平均磁路長
 S : 断面積
 ϕ : 鎖交磁束数

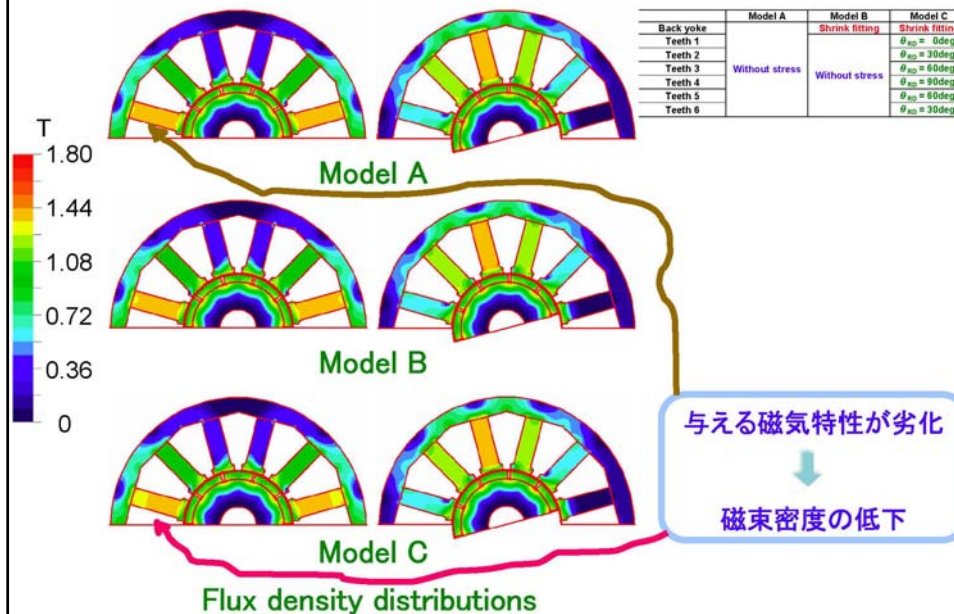


Measurement under Shrink fitting

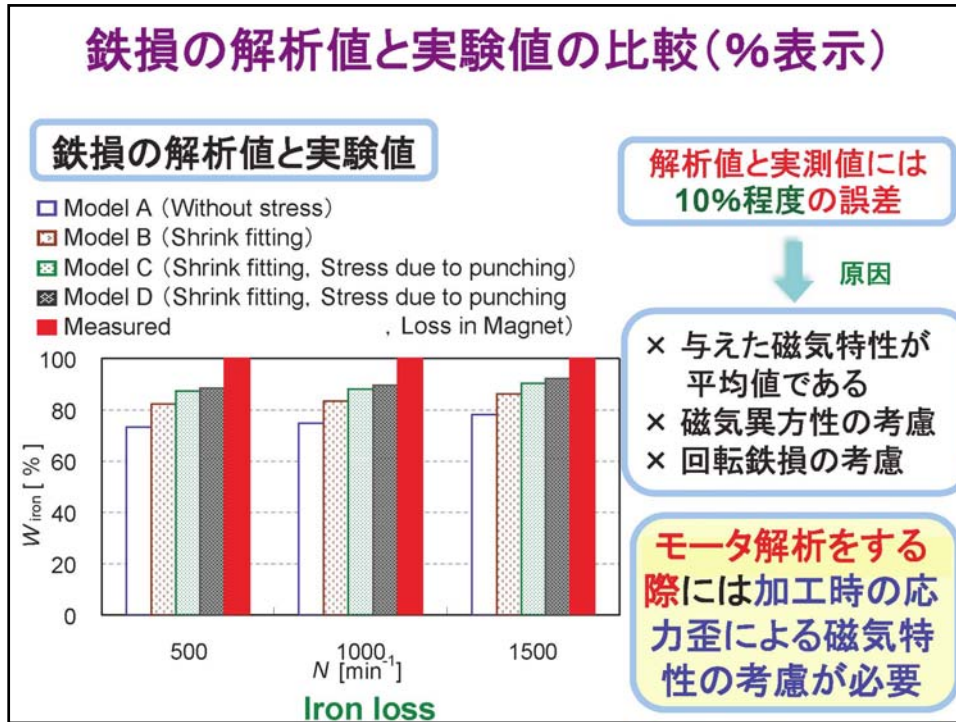


Measurement of B

磁束密度分布 (0deg./15deg.)



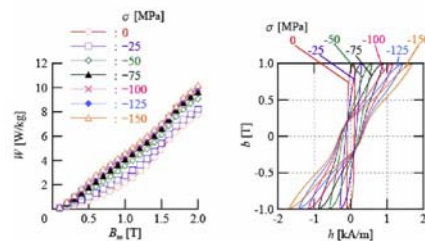
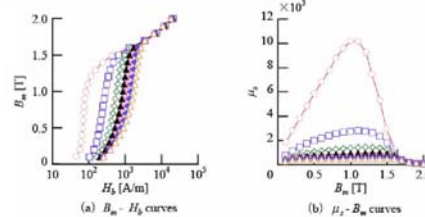
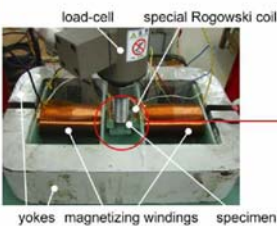
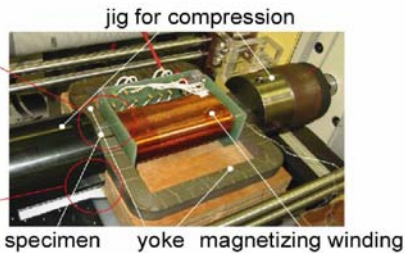
1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計



2. 解析精度向上のための磁気特性測定技術

磁性材料の材料定数を高精度に測定できる試験器を用いて、種々の使用条件下での磁気特性測定を行っています。測定された結果は、有限要素法による磁気回路解析に使用します。

応力の影響の測定例



1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

回転磁界の測定

magnetizing winding air-cooling device

yoke

B_t [T] B_0 [T]

機械角 [deg]

電磁石による磁気特性の測定

hole probe

magnetizing winding for TD (outside) magnetizing winding for RD (inside)

supporting jig

specimen

slit auxiliary yoke

3. 電気電子機器磁気回路の最適化

磁気ヘッドの例

650 100 100 650

2000

20 100

coil mail pole

shield

1000

70

SUL

medium

Intermediate layer

Y

Z

40

50 40 60

40 40 40

1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

最適化手法

進化戦略

遺伝的アルゴリズム



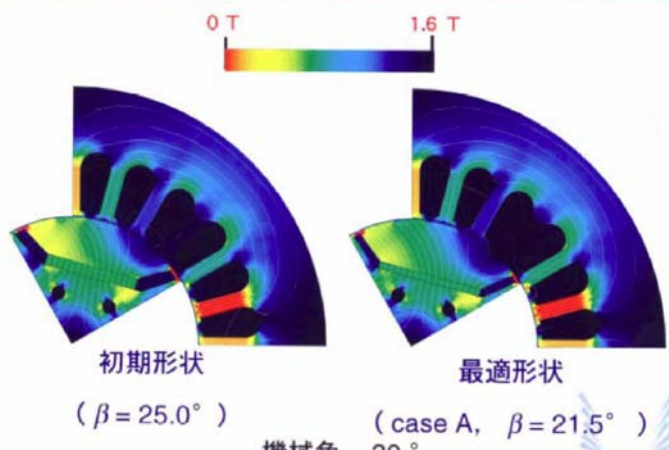
Charles DARWIN (1809-1882)
Evolution Strategy

John Gregor MENDEL (1822-1884)
Genetic Algorithm

Josiah Willard GIBBS (1839-1903)
Founder of Statistical Physics

進化戦略 (ES) による最適化 (磁石の体積を最小)

磁束密度分布の比較 (ES)



0 T 1.6 T

初期形状
($\beta = 25.0^\circ$)

最適形状
(case A, $\beta = 21.5^\circ$)

機械角 = 30°

1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

共同研究を行なった例

1つのコイルで**均一**に加熱することは不可能

誘導加熱装置の渦電流解析

- (1) 中心部の渦電流損が小さいという問題を解決したい
- (2) 均一加熱を実現する電流パターンを求める

ゾーンコントロール

誘導加熱コイルを**数個**に分け、各コイルの電流や周波数を調整し、グラファイトに生じる渦電流を操作

ゾーンコントロールの解析結果

ゾーン	電流値
1	5.5
2	1.5
3	2.5
4	1.5
5	1.0
6	1.5
7	1.5
8	2.0

ゾーン	analyzed value [W/mm³]	theoretical value [W/mm³]
1	0.25	0.32
2	0.32	0.32
3	0.29	0.32
4	0.29	0.32
5	0.29	0.32
6	0.32	0.32
7	0.35	0.32
8	0.32	0.32

- ・実現可能な電流値において**均一加熱**が可能
- ・得られる渦電流損も十分な値

1. 磁界解析と磁気測定を援用した電磁装置の最適設計

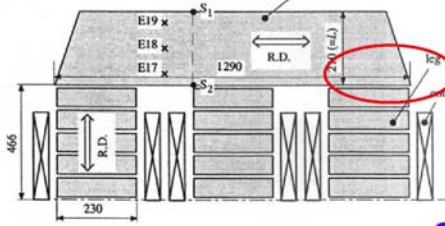
磁界解析のリアクトル設計への適用

三相リアクトルヨーク部に方向性ケイ素鋼板を使用

小型軽量化および高効率化が可能



リアクトル...90度接合(バット接合)

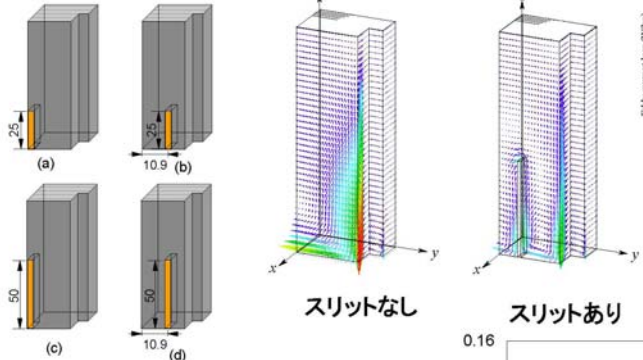


フリッジング磁束による渦電流が鉄心のギャップ部に集中

温度上昇, 局部過熱

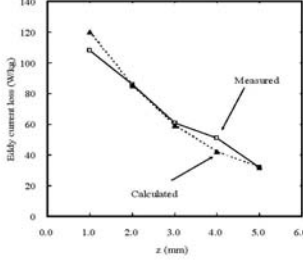


スリットによる損失低減



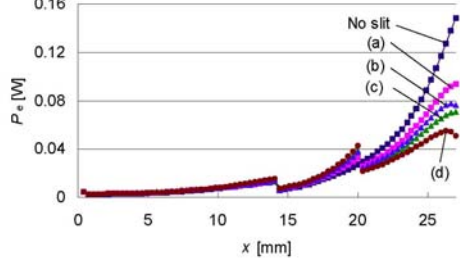
スリットなし スリットあり

渦電流損の解析と実測の比較



周波数[Hz]	60	300	Total
スリットなし	47.5	60.8	108.3
スリット位置(a)	40.0	53.1	93.1
スリット位置(b)	37.8	50.5	88.4
スリット位置(c)	36.1	49.0	85.1
スリット位置(d)	33.3	45.9	79.3

渦電流損が25%程度低減



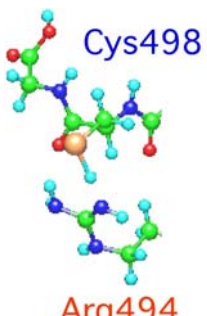
スリットによる渦電流損の変化

分子軌道計算に基づく
酵素の精密分子設計と実験による検証

岡山大学大学院
自然科学研究科
田村 隆


2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証


分子軌道計算に基づく酵素の
精密分子設計と実験による検証

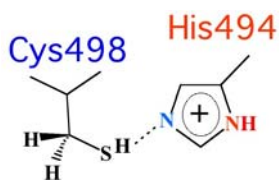


Cys498

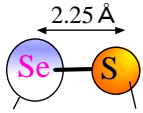
Arg494



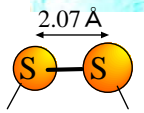




Cys498 His494



2.25 Å



2.07 Å

田村 隆 (岡山大学大学院自然科学研究科農学系)

遺伝子と量子は20世紀の科学を大きく変革した。



J. Watson



F. Crick



F. Sanger



M. Planck



N. Bohr



W. Heisenberg



S. Cohen



H. Boyer



P. Berg



W. Gilbert



E. Schrodinger



P. Dirac



R. Hoffman



L. Pauling



K. Mullis



M. Smith



福井謙一



J. Pople



W. Kohn

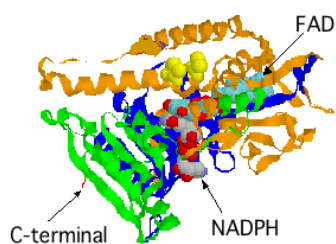
- 遺伝子の発見は遺伝子組換え技術に発展し、**蛋白質工学**が登場した。蛋白質の構造と機能を詳細に研究することが可能になった。
- 21世紀の生命科学にさらに大きなインパクトを与えるものは...それは**量子**ではないだろうか。

2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証

量子酵素化学の発想

- 化学反応とは電子の挙動が支配する現象。
- 酵素分子内で起こる化学反応を量子化学計算で予測できれば、酵素の反応機構解析や精密な分子設計ができるだろう。
- 計算の専門家でないタンパク屋にも出来る方法はないだろうか。
- 律速段階に直接関わるアミノ酸残基に限定する。
- 溶媒としての水分子は計算しない。
- 市販のパソコンで計算を行う。
- 半経験的分子軌道計算MOPACを使う。
- 実験による検証をする。

チオレドキシン還元酵素のC末端配列



Cys 残基の解離を促進するアミノ酸残基の導入

分子軌道計算(WinMOPAC)に基づく変異設計

-Ser-Ile-Leu-Gln-Ala-Gly-Cys-**SeCys**-Gly
野生型酵素; *E.coli* で発現しない。

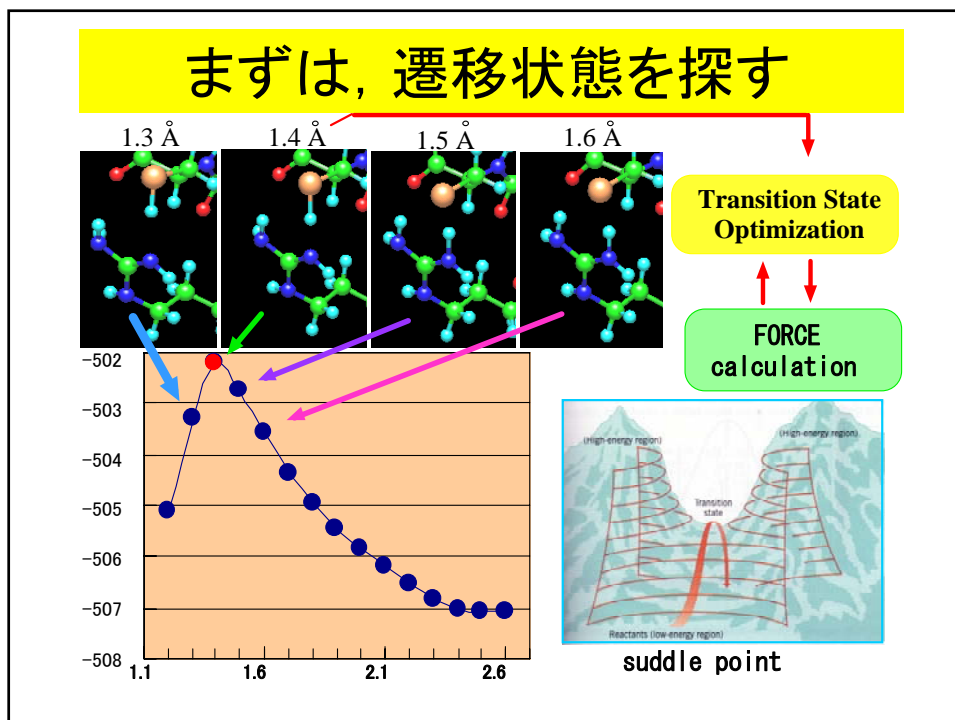
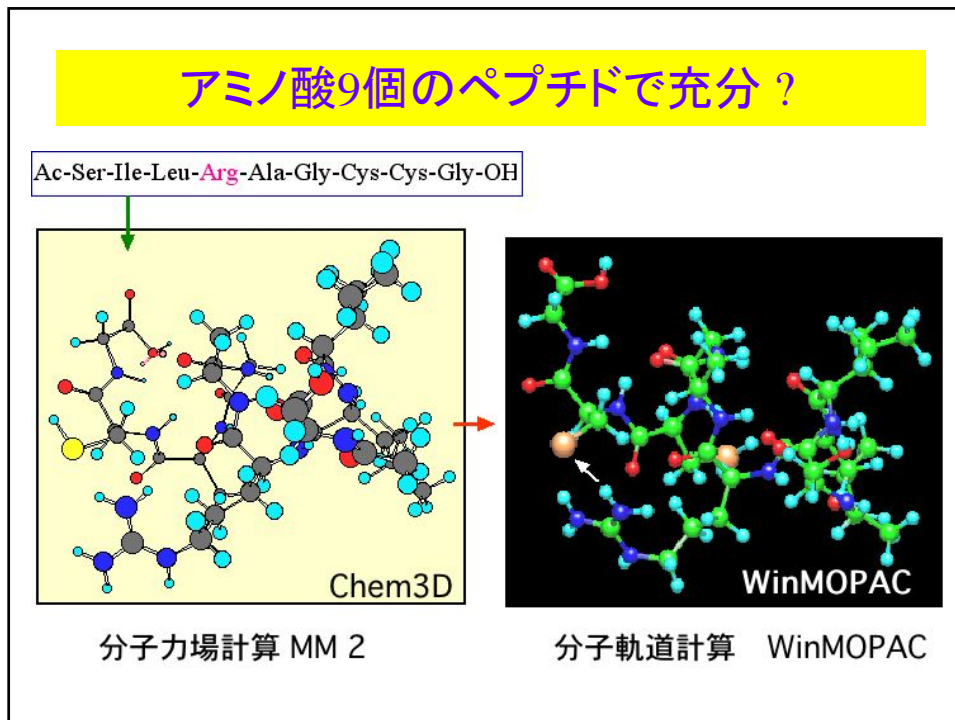
↓

-Ser-Ile-Leu-**Gln**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
E.coli で発現するが、活性は低い。

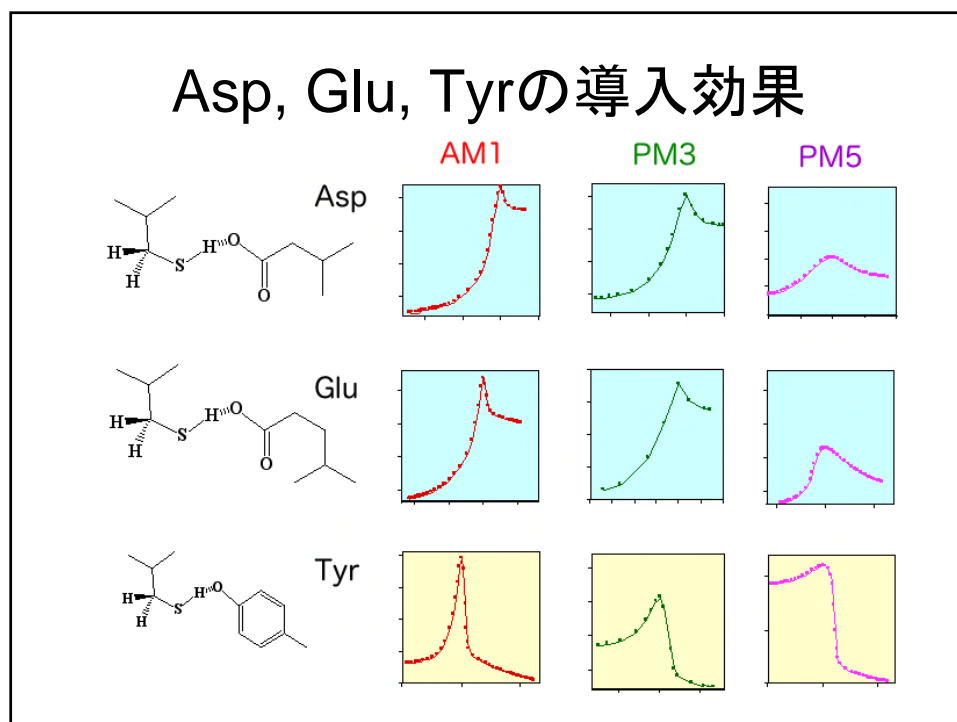
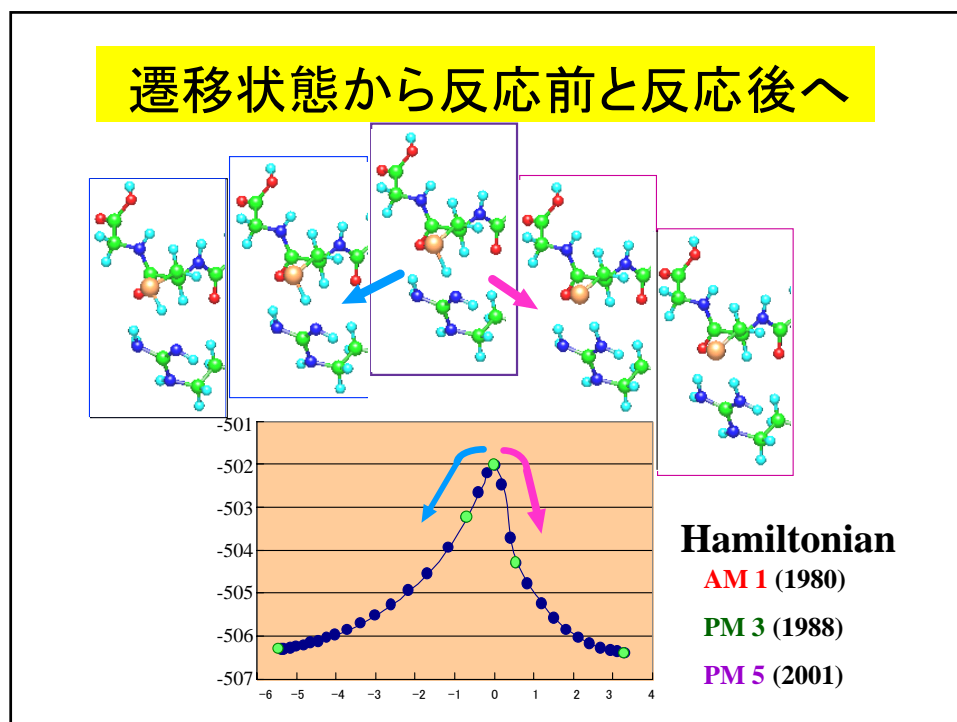
↓

-Ser-Ile-Leu-**His**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
-Ser-Ile-Leu-**Tyr**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
-Ser-Ile-Leu-**Glu**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
-Ser-Ile-Leu-**Asp**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
-Ser-Ile-Leu-**Lys**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly
-Ser-Ile-Leu-**Arg**-Ala-Gly-Cys-**Cys**-Gly

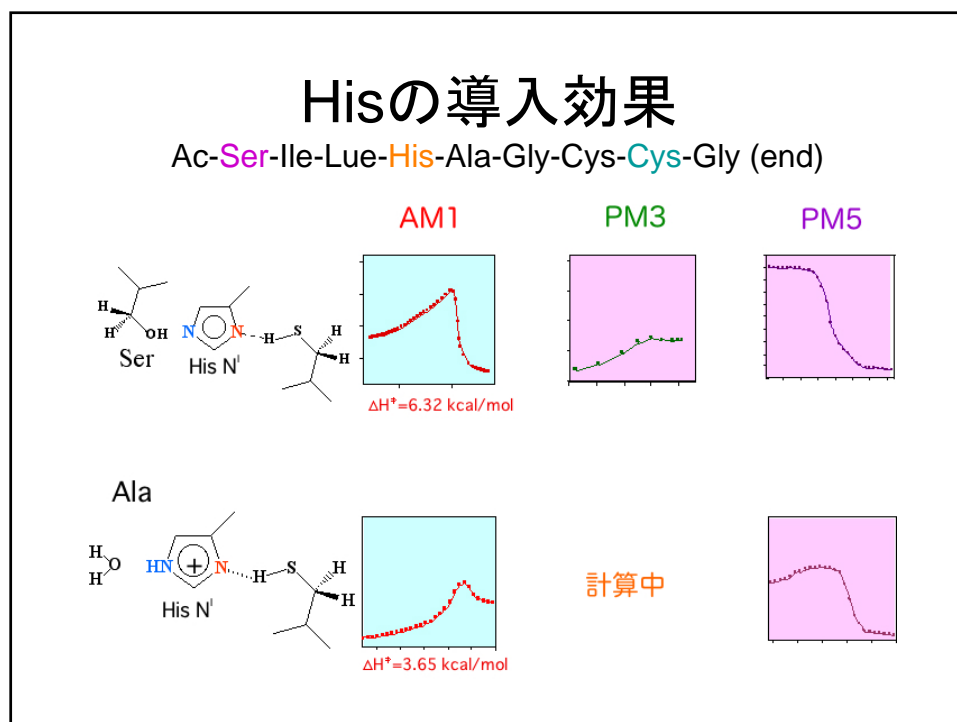
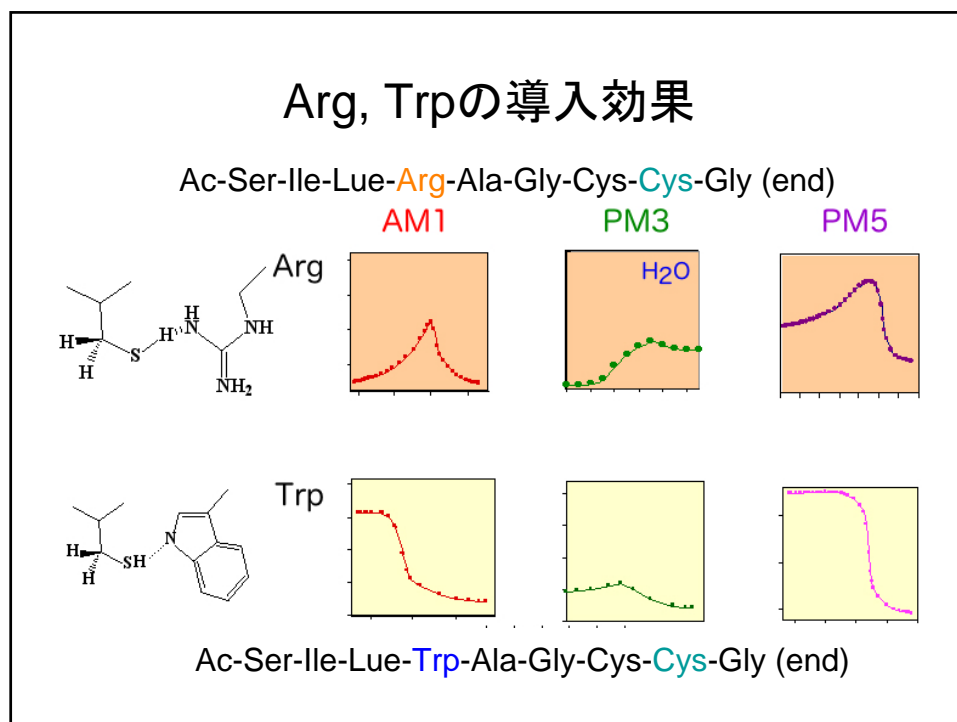
2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証



2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証



2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証

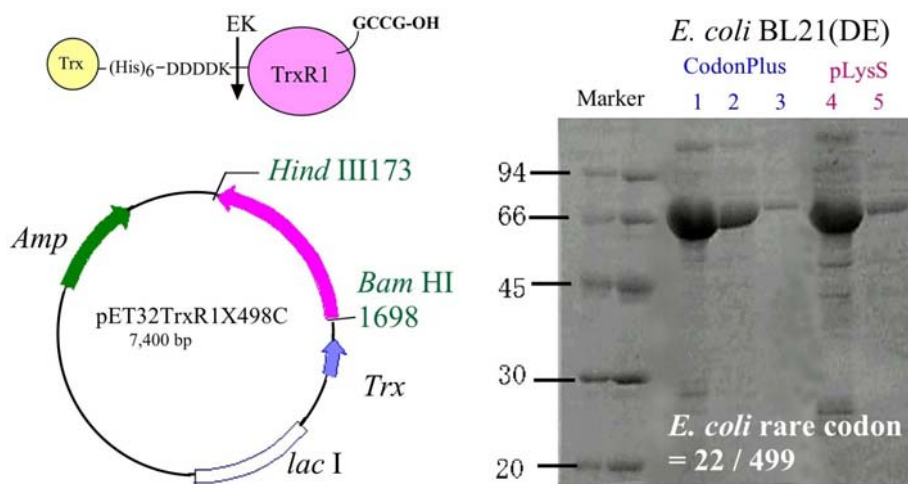


2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証

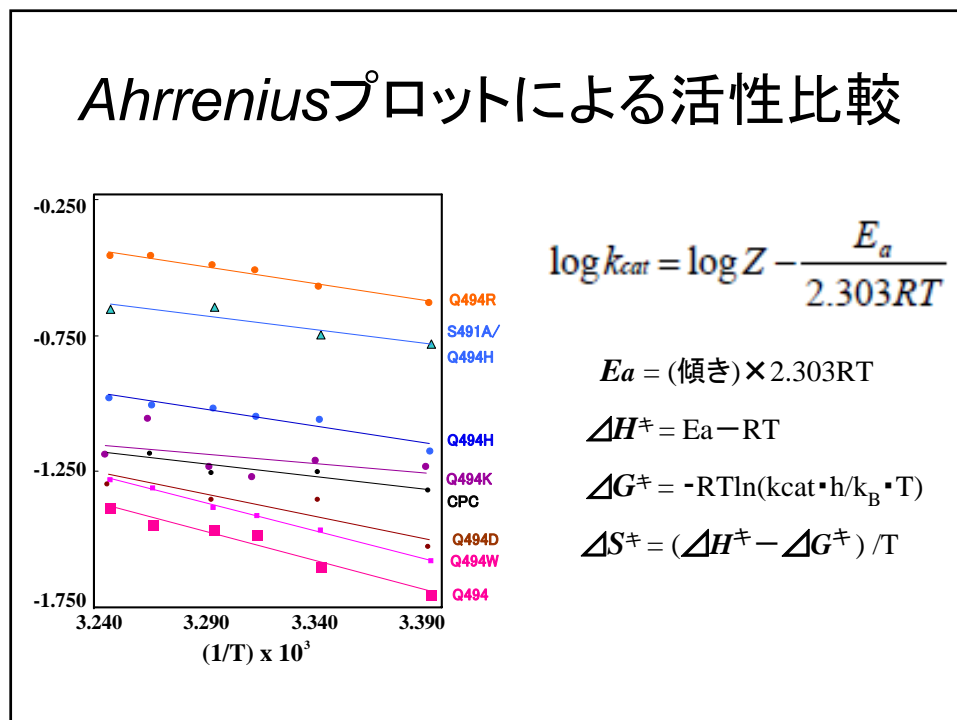
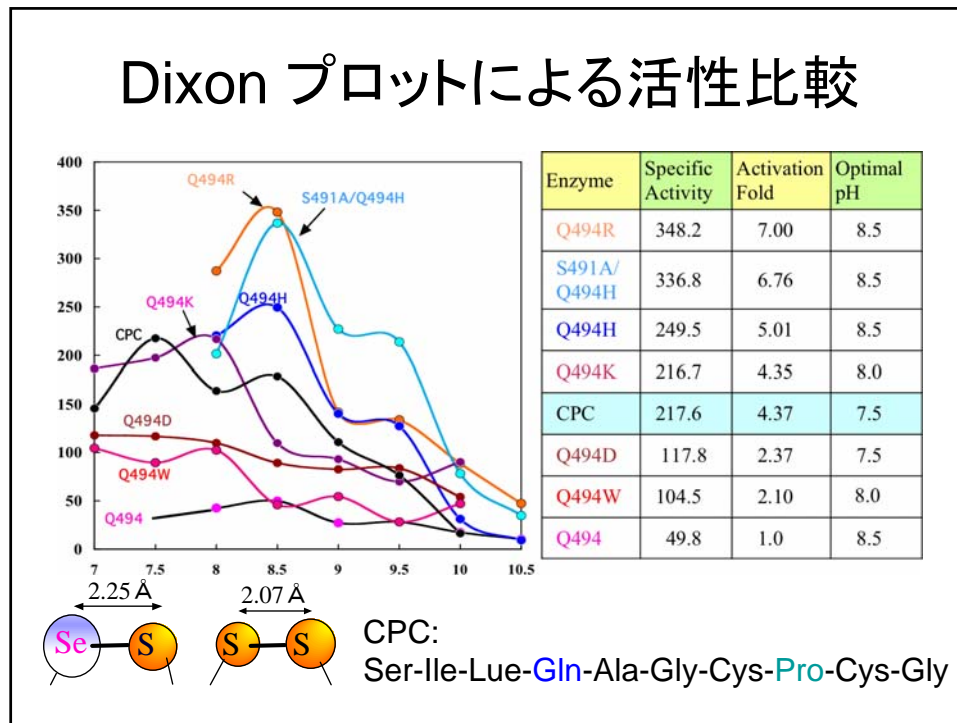
活性化エンタルピー ΔH^\ddagger 計算予測値 (kcal/mol)

	AM1		PM3		PM5	
	正反応	逆反応	正反応	逆反応	正反応	逆反応
Asp	9.59	1.78	7.97	2.31	3.35	1.75
Glu	9.17	3.40	8.16	2.07	4.30	2.55
Tyr	8.18	9.46	6.62	3.54	1.79	10.90
Trp	0.05	6.83	0.65	1.93	0.10	12.82
Arg	4.26	4.36	3.21	0.66	3.21	5.71
Ser--His I	3.65	6.32	2.65	0.27	0	16.40
Ala--His I	4.19	1.48	n.d.	n.d.	5.47	1.25

TrxR1-Q494X-U498Cの発現



2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証



2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証

分子軌道計算の理想と現実

1 cal = 4.184 J

活性化エンタルピー実測		分子軌道計算による活性化エンタルピー		
	ΔH^\ddagger (kcal / mol)	AM1 (kcal / mol)	PM3 (kcal / mol)	PM5 (kcal / mol)
Q494	7.67			
Q494R	4.46	4.26	3.21	3.21
Q494H	4.41	6.32	2.65	0.00
S491A/ Q494H	3.43	4.19	計算中	5.47
Q494W	7.12	6.83	1.93	12.82
Q494D	8.56	9.59	7.97	3.35
Q494K	2.34	計算中	計算中	計算中

次世代型の蛋白質工学を目指して

分子軌道計算MOPACに基づく酵素の精密分子設計は可能である。

AM1による予測値は実験値とよく一致した。



律速段階に関わる数個のアミノ酸残基だけを計算対象とするだけでよい。計算は市販のPCで行える。

2. 分子軌道計算に基づく酵素の精密分子設計と実験による検証

量子の世界に飛び込んでみよう！



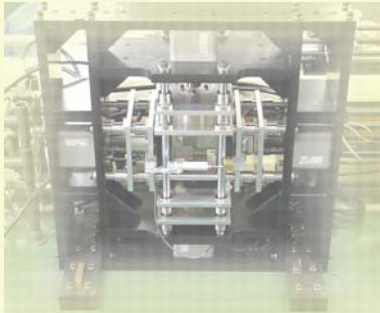
塑性加工解析における摩擦の考え方

岡山大学大学院
自然科学研究科
清水 一郎

3. 塑性加工解析における摩擦の考え方

解析支援ネットOKAYAMA 第2回セミナー 16 April 2007

塑性加工解析における摩擦の考え方



弾塑性工学分野

岡山大学大学院自然科学研究科

清水 一郎

塑性加工における摩擦問題

各種工業用材料

工具／被加工材界面
における
トライボロジ的条件

塑性加工

加工性(加工力)
最終表面精度
不均一流れ

課題 表面仕上げと摩擦低減の両立

特徴

- 接触圧力が高い (真実接触面積20~80%)

摩擦増大
温度上昇



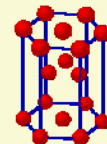
工具摩耗, 焼付き
潤滑剤粘度低下

- 被加工材が塑性変形

微視的構造変化
すべり状態変化



表面あれ
潤滑機構の変化



塑性加工における摩擦問題

岡山大学大学院自然科学研究科 清水 一郎

3. 塑性加工解析における摩擦の考え方

摩擦則

1. クーロン(Coulomb)摩擦則

- 摩擦応力は、面に作用する接触圧力に比例する

$$\tau = \mu p$$

τ : 摩擦応力 (MPa)
 μ : 摩擦係数 [=const.]
 p : 接触圧力 (MPa)

市販のFEM

2. せん断(Shear)摩擦則

- 摩擦応力は、材料のせん断応力（せん断抵抗）に比例する

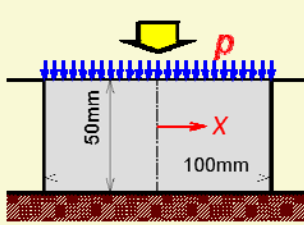
$$\tau = m\tau_Y$$

m : 摩擦せん断係数 ($0 < m < 1$)
 τ_Y : せん断応力 (MPa)

摩擦則

摩擦の影響 - 1 -

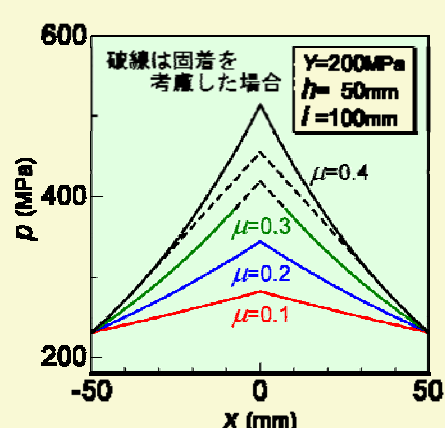
平面ひずみ圧縮の初等解析 (スラブ法)



- クーロン摩擦則 (μ)
- ミーゼス降伏条件 ($Y=200\text{MPa}$)
- 剛完全塑性体

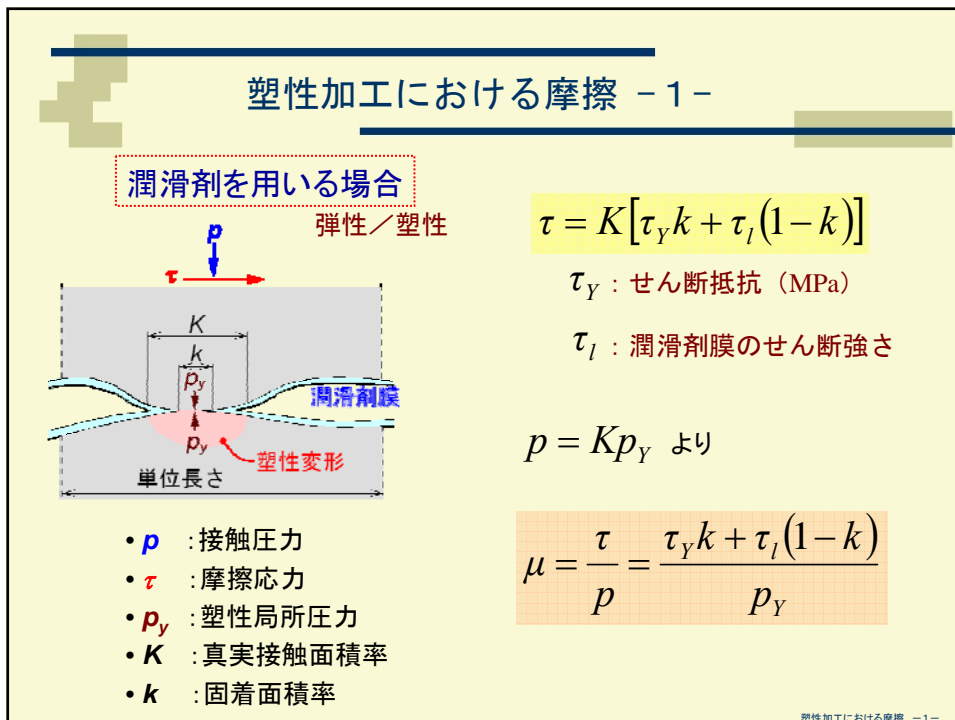
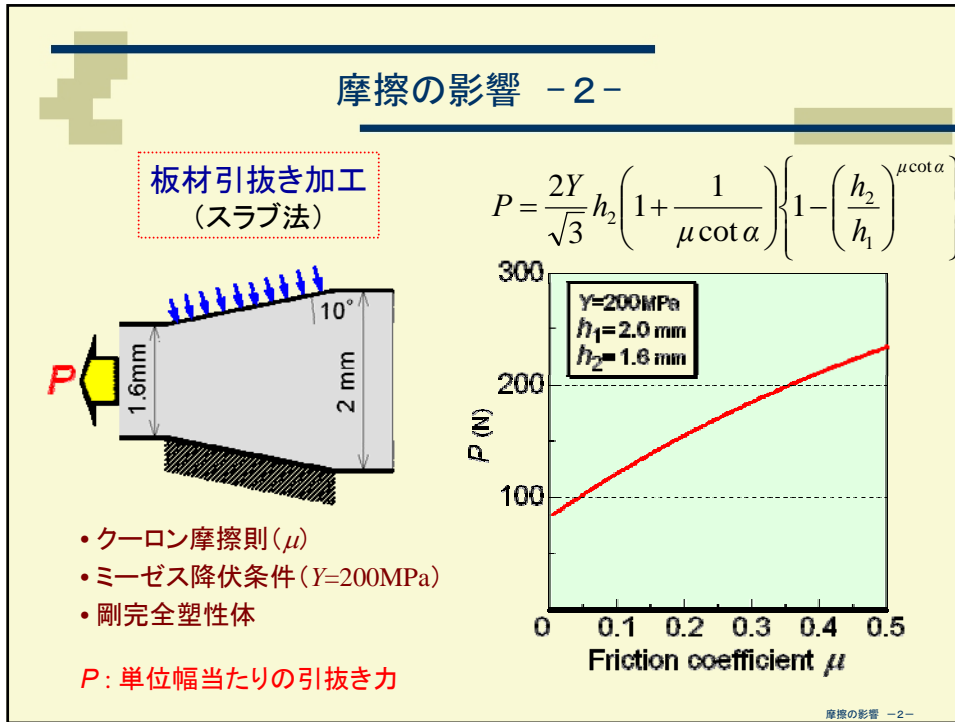
$$p = \frac{2Y}{\sqrt{3}} \exp\left\{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{l}{2} - x\right)\right\}$$

摩擦丘

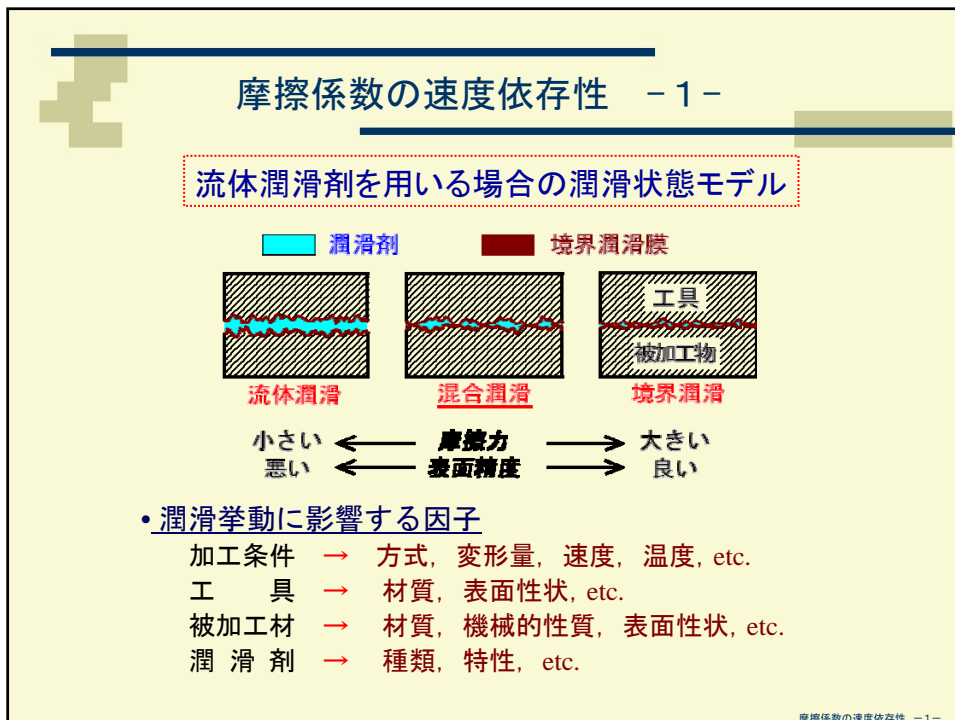
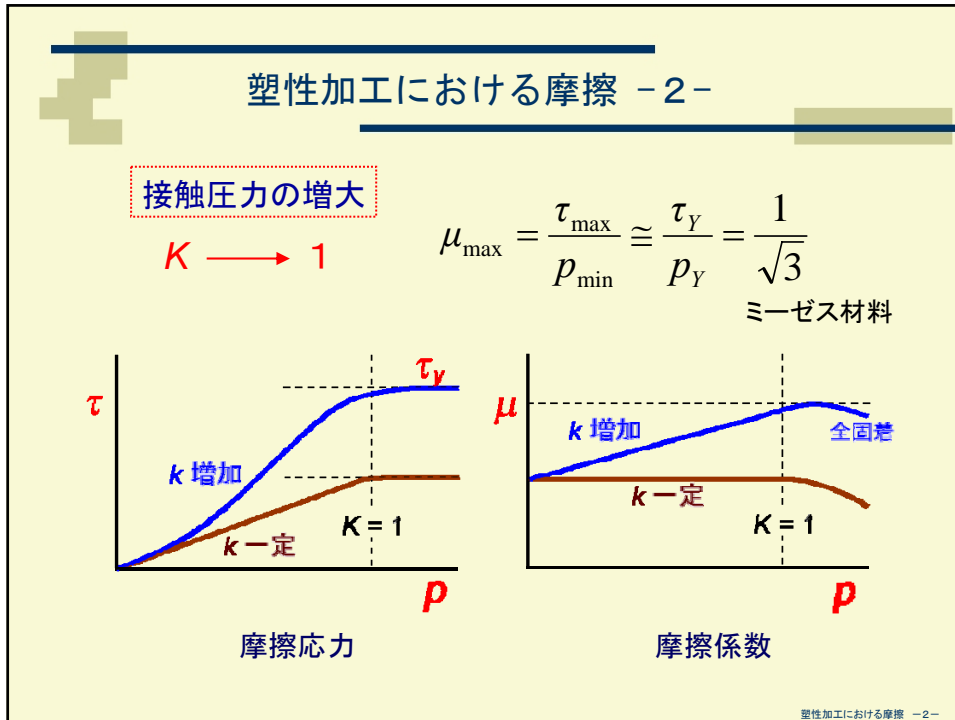


摩擦の影響 - 1 -

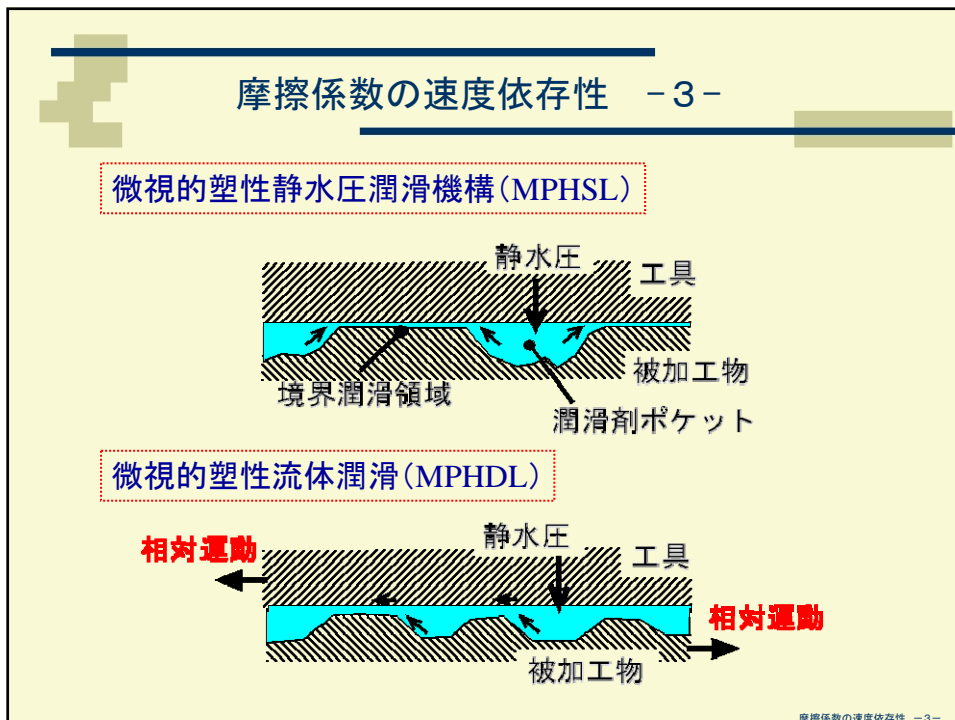
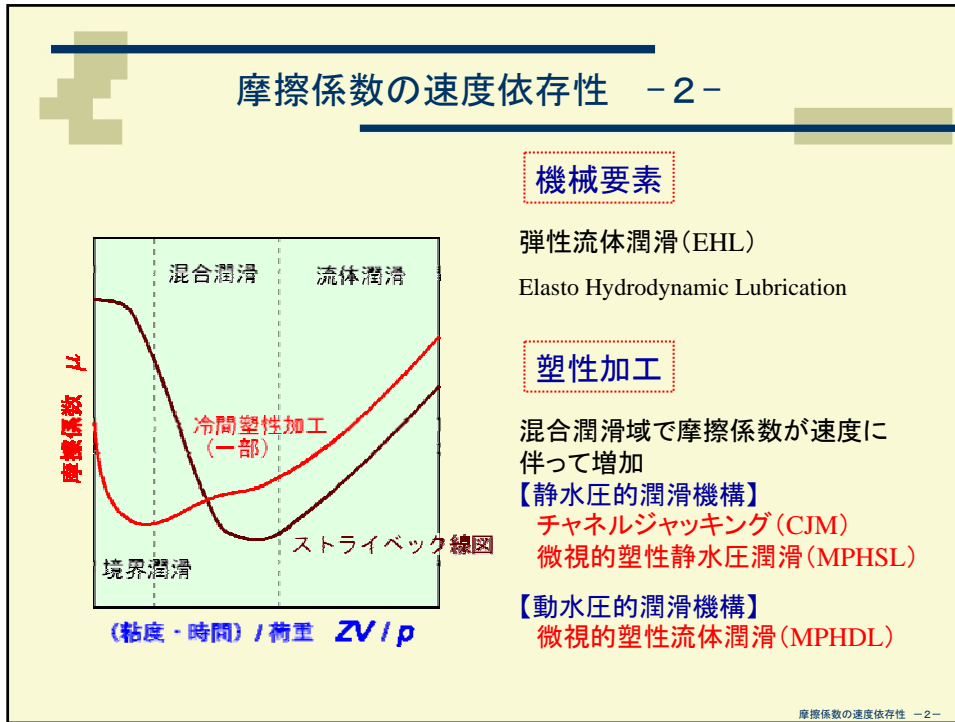
3. 塑性加工解析における摩擦の考え方



3. 塑性加工解析における摩擦の考え方



3. 塑性加工解析における摩擦の考え方



3. 塑性加工解析における摩擦の考え方

摩擦の重要性

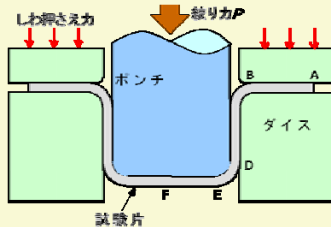
摩擦

→ 潤滑剤やコーティングによる低減

- ・ 増加すると... 加工力増大, 焼付き発生, 工具摩耗促進, 加工精度低下, 表面品質低下, 不均一流れ促進

摩擦が必要な場合

(例) 深絞り加工



容器底部の摩擦を増大させ, 板厚減少を抑制するとともに, 被加工材の滑りを防止し, 深絞り性を向上させる.



摩擦の重要性

まとめ

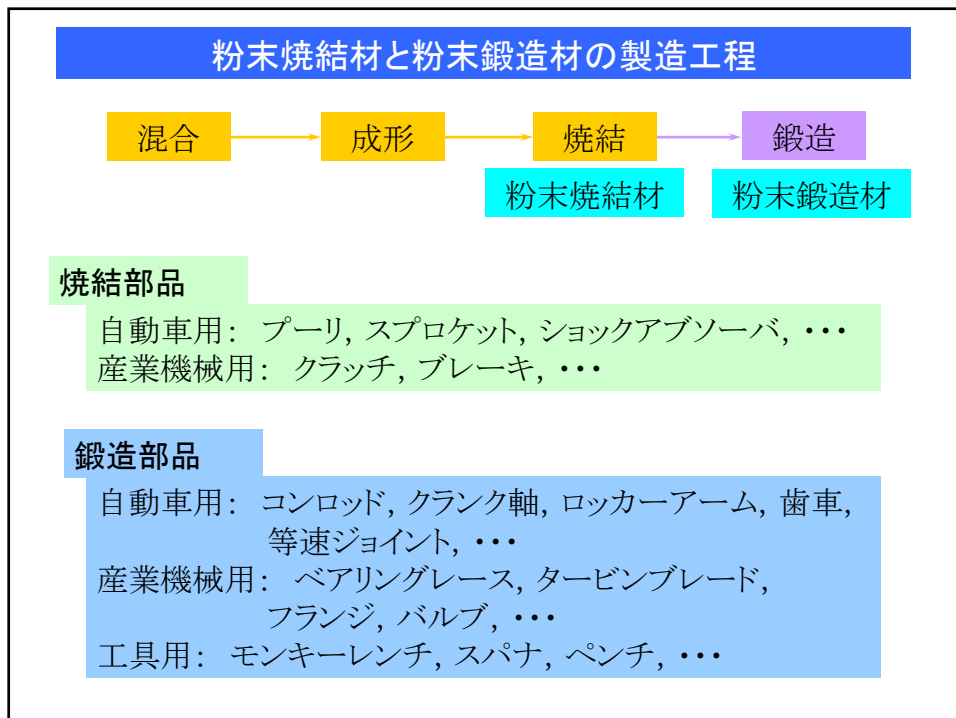
- 塑性加工解析において, 摩擦の考慮は不可欠である. 摩擦は加工状態に大きな影響を及ぼす.
- 市販の有限要素解析ソフトでは, 一般にクーロン摩擦則とせん断摩擦則の2つが組み込まれている. しかしながら, 塑性加工における実際の摩擦状態は, これら2つの摩擦則では正確に表現できない.
- 工具/被加工材のトライボロジ状態は加工様式や条件に伴って変化する. 加工状態に応じて適切な摩擦則を選択する必要がある.
- 一般に摩擦低減が望まれる一方で, 摩擦が重要な役割を担う加工法も存在する. 塑性加工では, 摩擦制御が加工成否を左右する重要な要素のひとつである.

まとめ

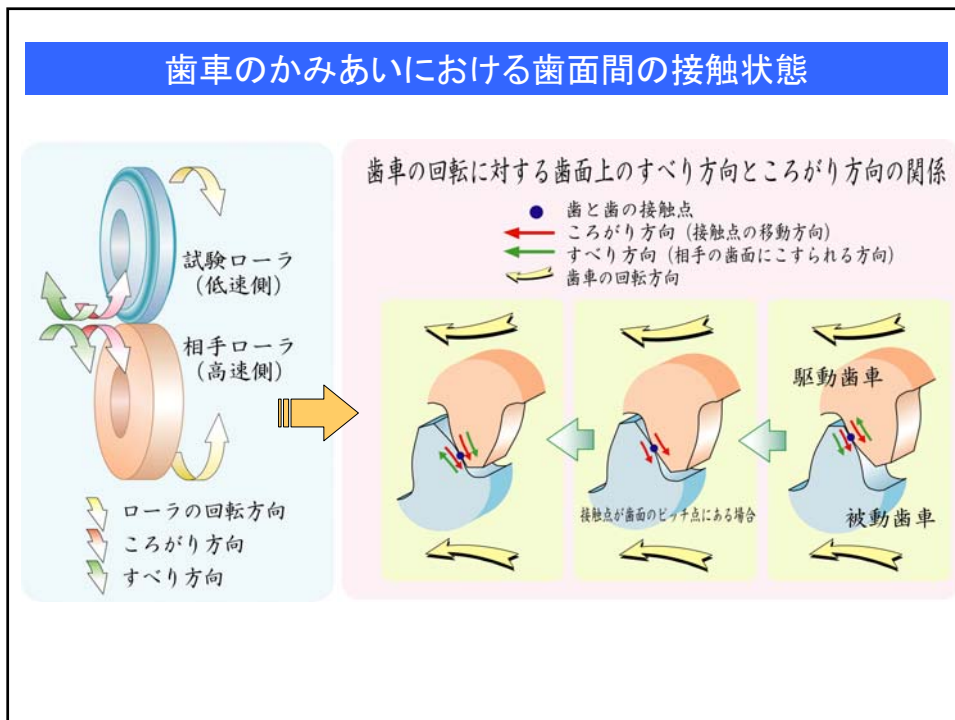
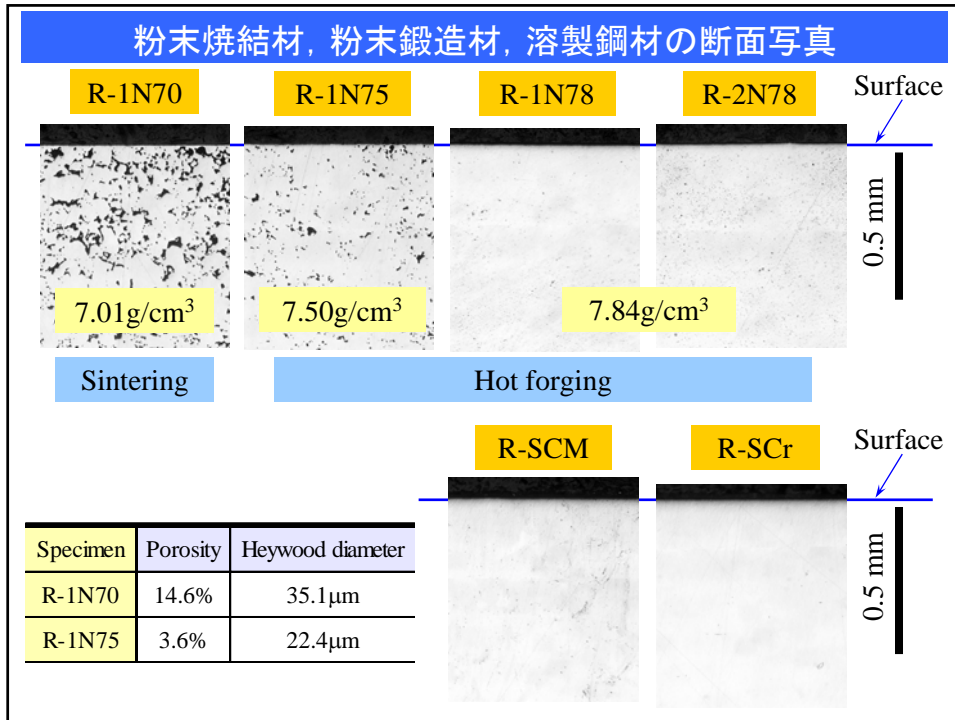
粉末焼結および粉末鍛造歯車の 疲れ強さと接触応力解析

岡山大学大学院
自然科学研究科
關 正憲

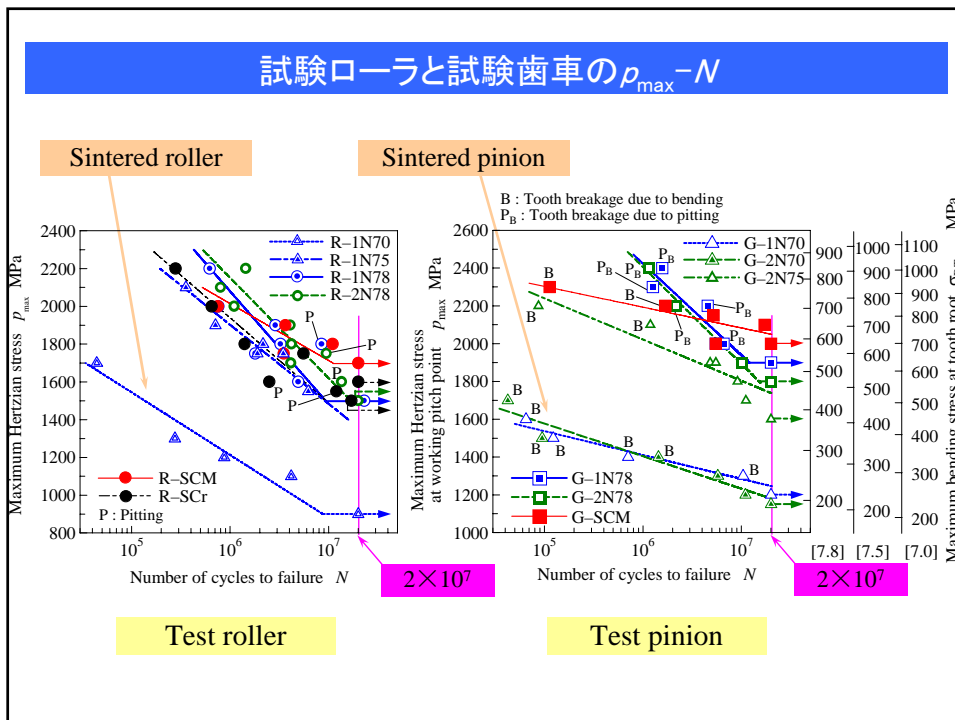
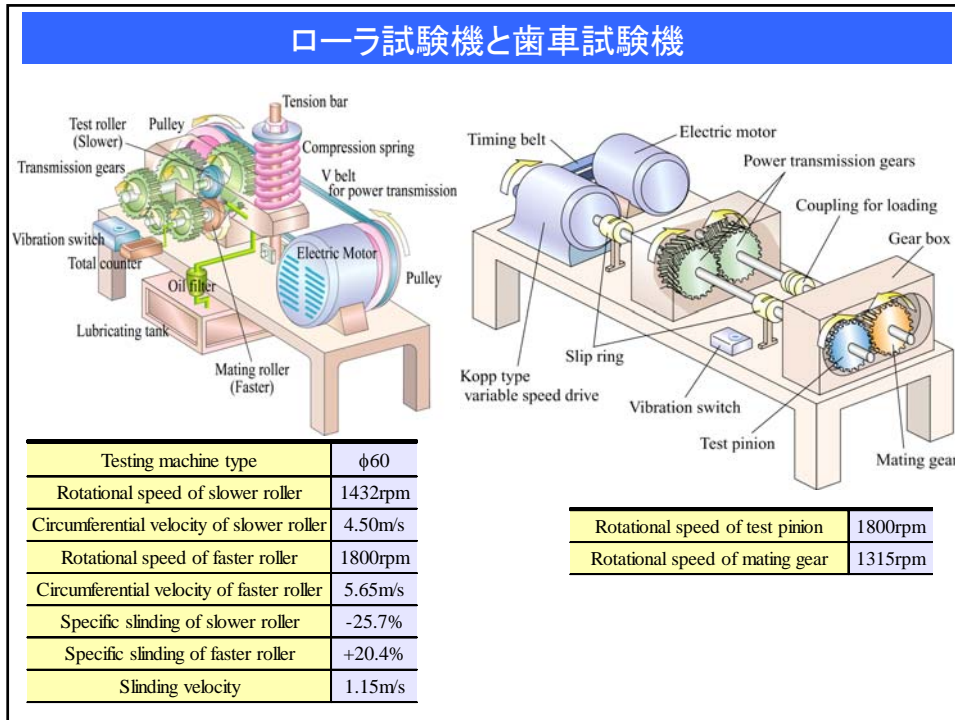
4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



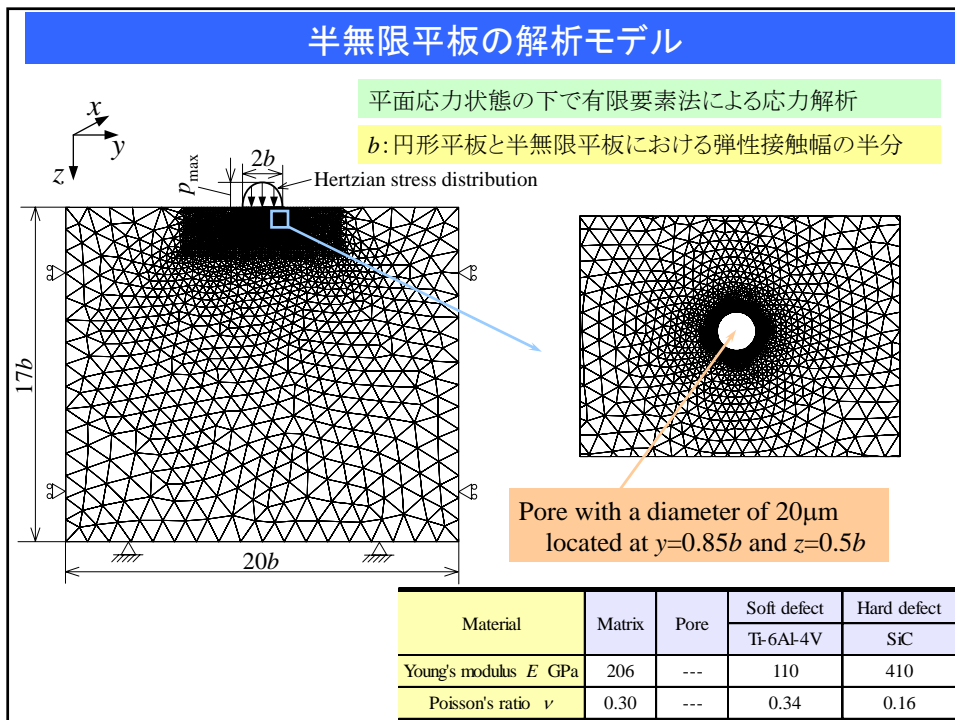
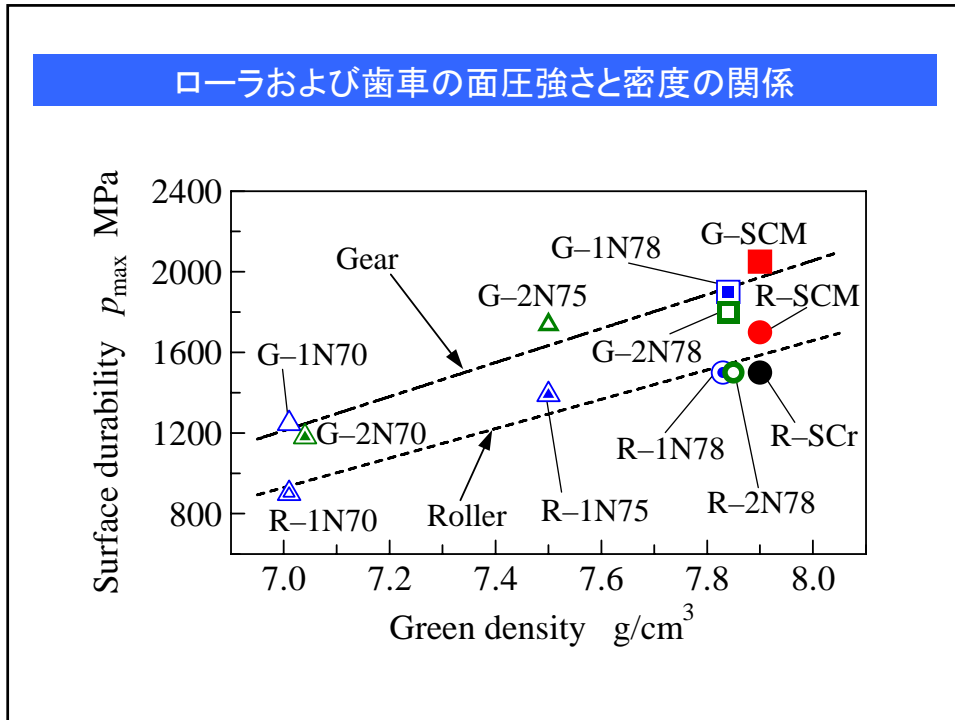
4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



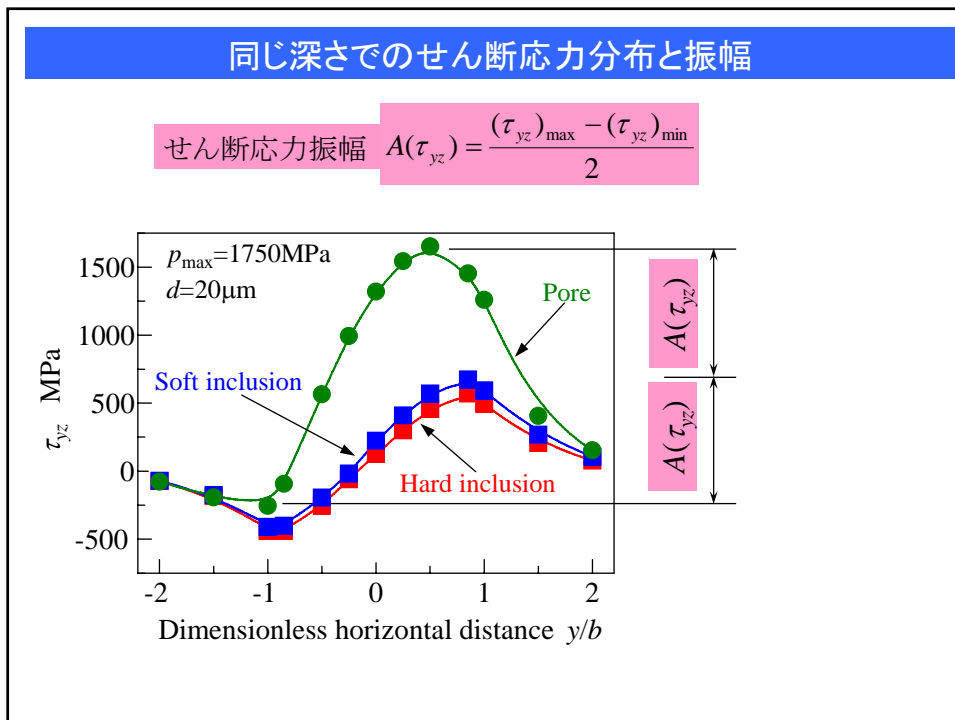
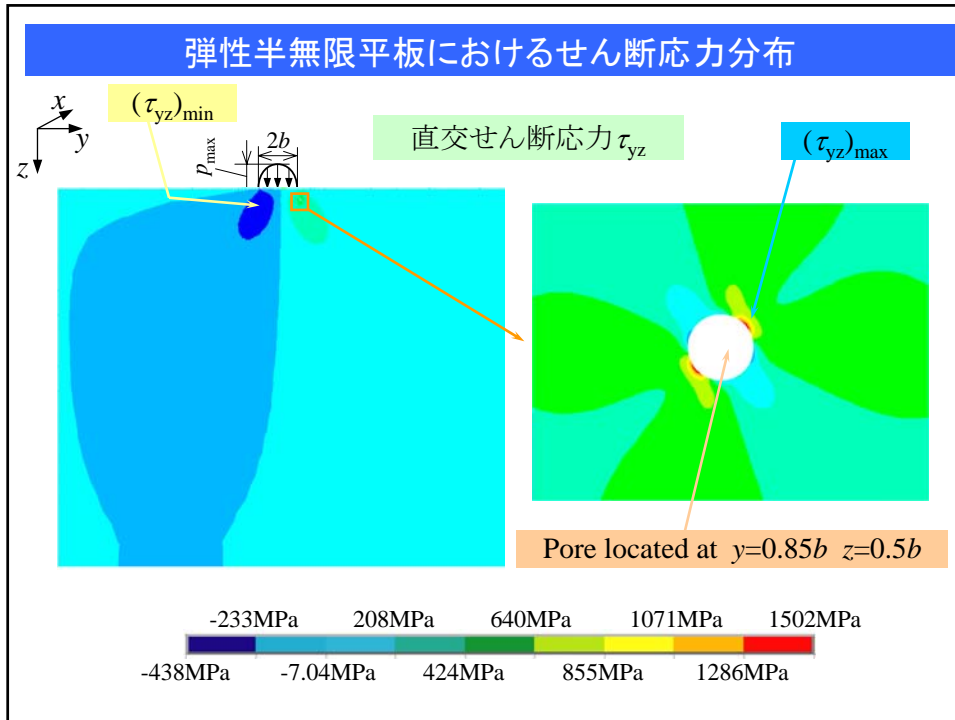
4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



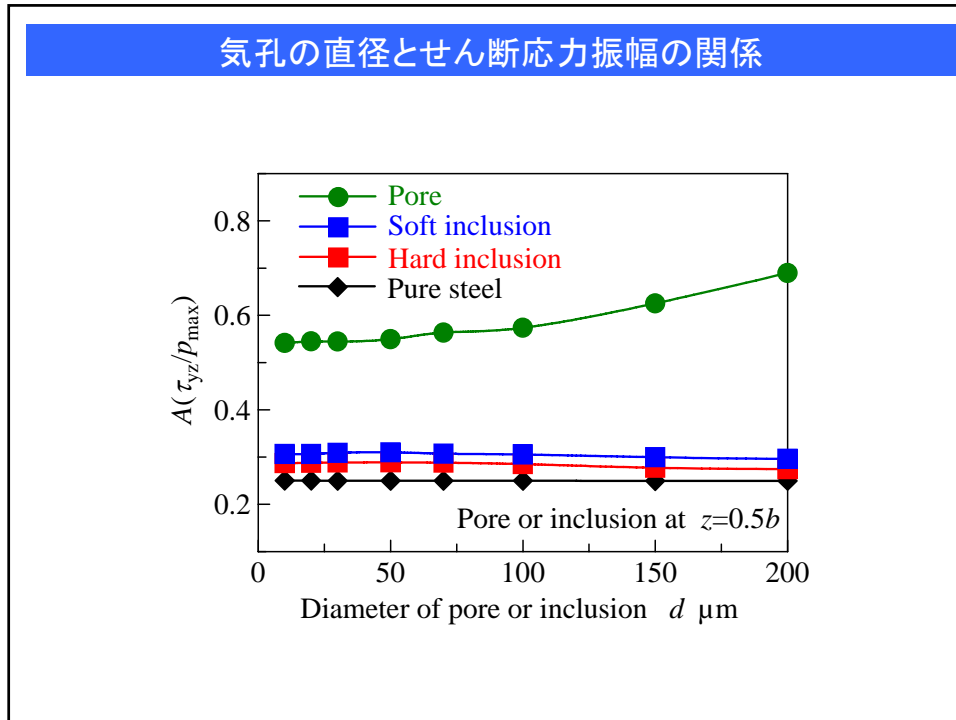
4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



4. 粉末焼結および粉末鍛造歯車の疲れ強さと接触応力解析



トライボ表面における解析の紹介

岡山大学大学院
自然科学研究科
藤井 正浩

5. トライボ表面における解析の紹介

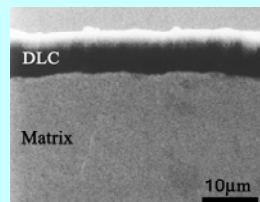
トライボ表面における解析

岡山大学 大学院自然科学研究科
藤井正浩

接触表面の改質被膜の強度解析

DLC被膜
(数nm～数 μm)

- ・高硬度
- ・低摩擦
- ・表面平滑性



機械要素へ適用

期待される効果

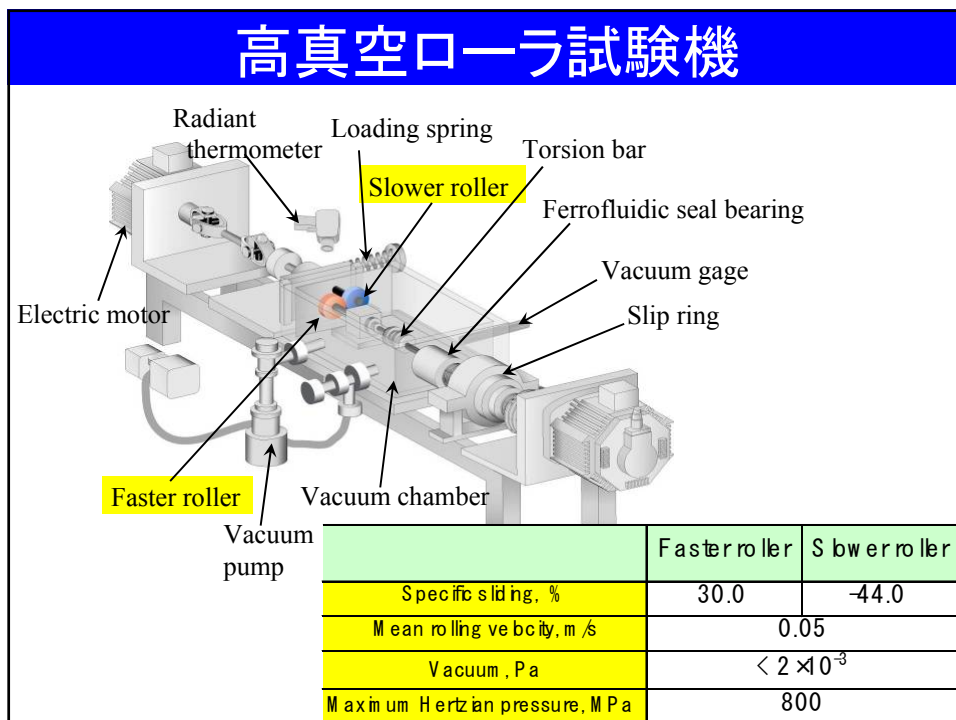
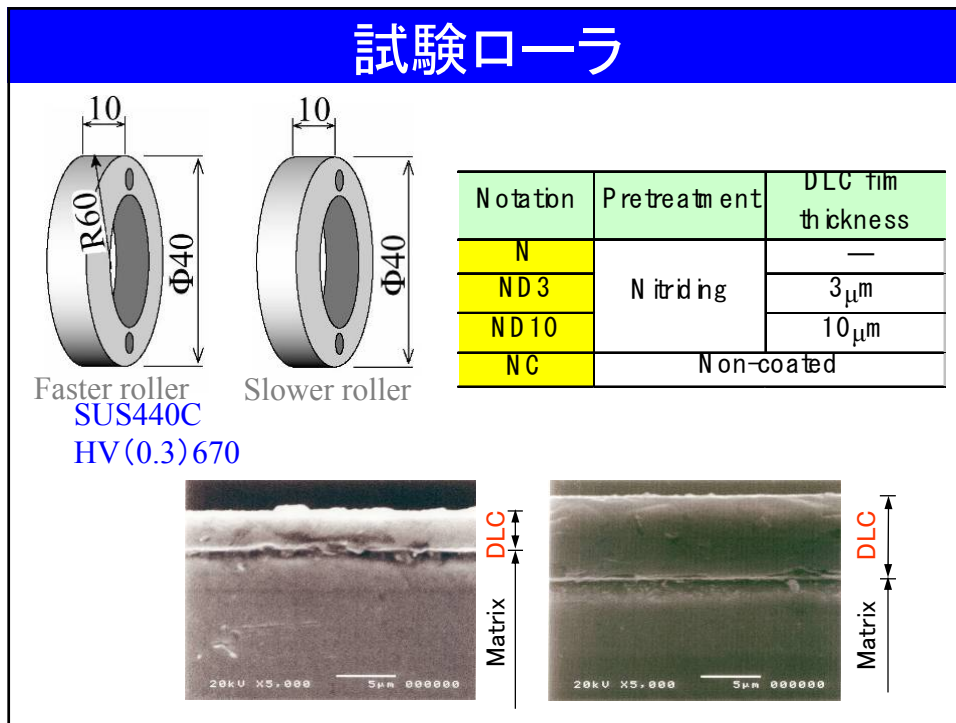
- ・摩擦低減
- ・耐摩耗性向上
- ・表面強度向上

メカノケミカル的特性

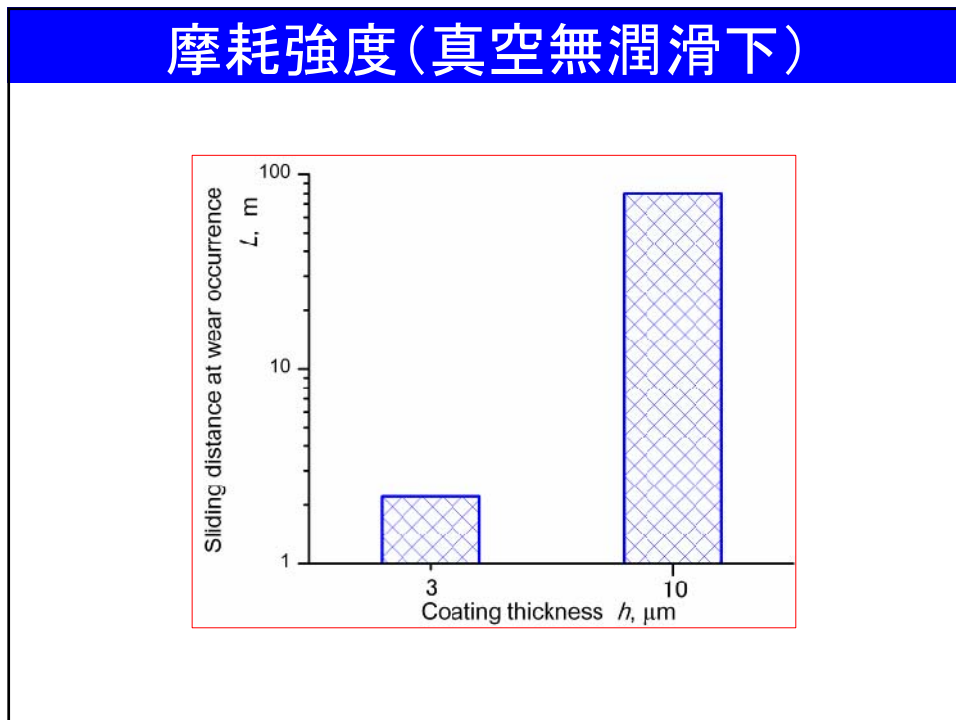
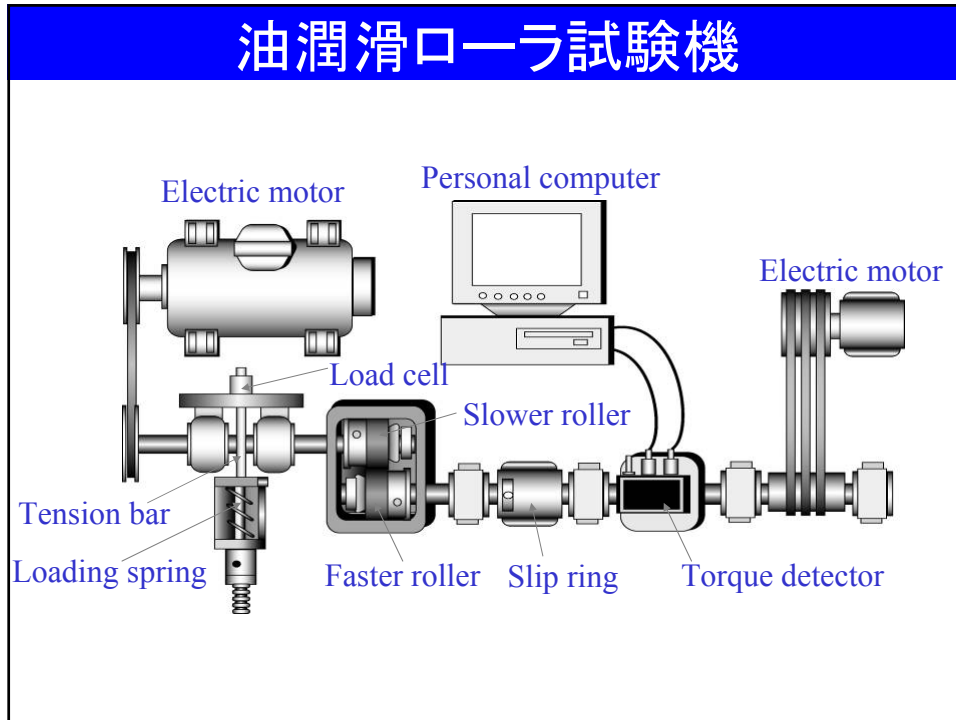
接触表面のトライボロジー特性
表面近傍の応力

接触表面の硬質被膜の耐摩耗性評価

5. トライボ表面における解析の紹介

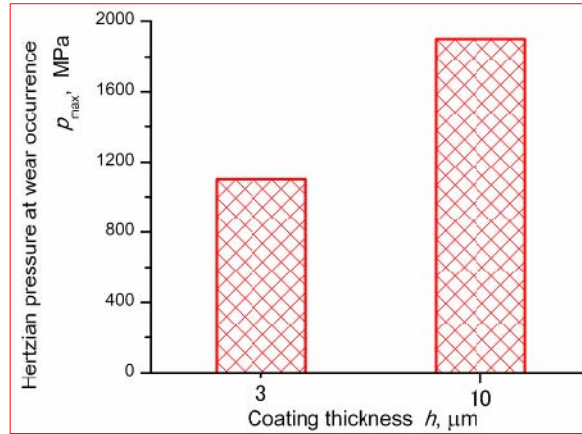


5. トライボ表面における解析の紹介

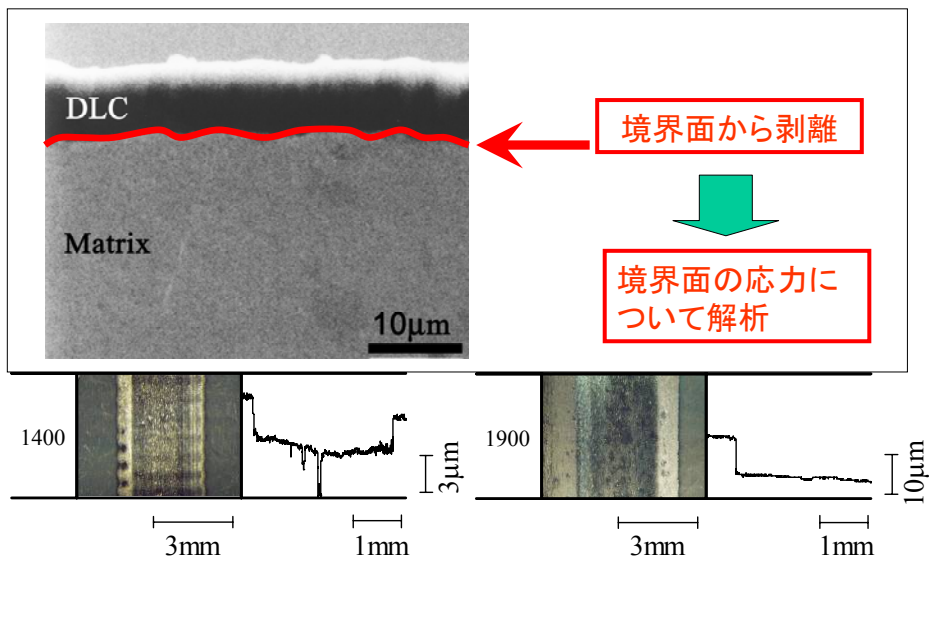


5. トライボ表面における解析の紹介

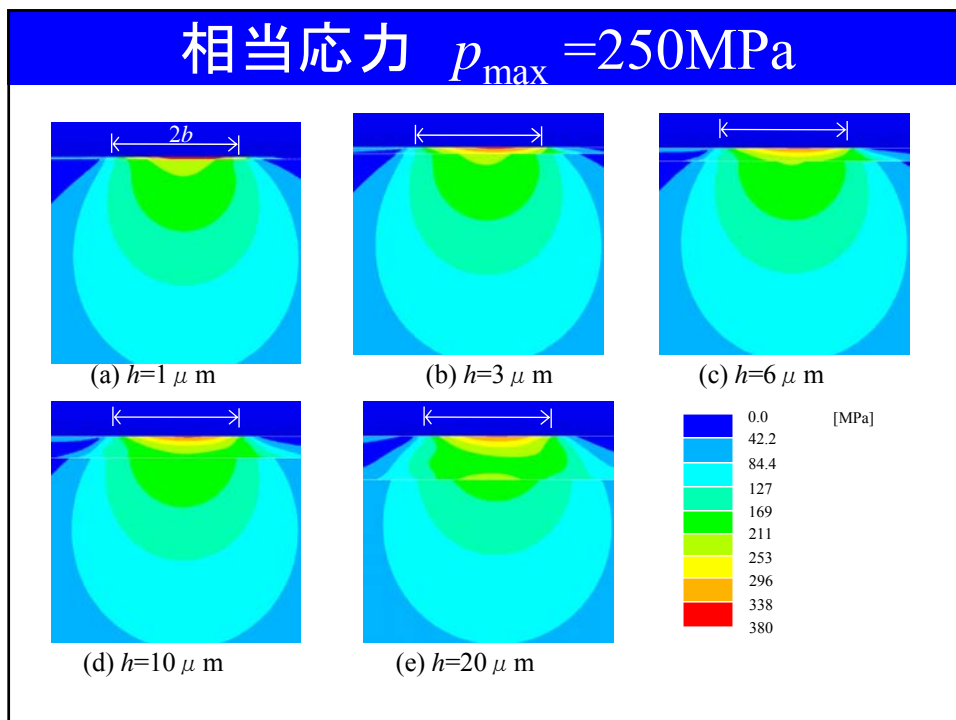
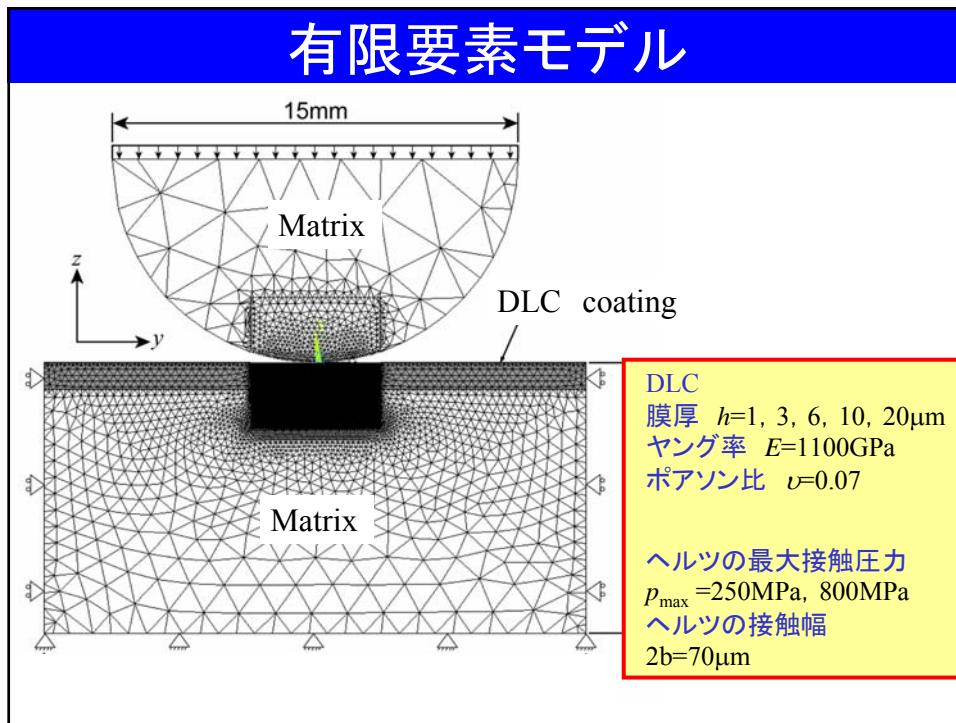
摩耗強度(油潤滑下)



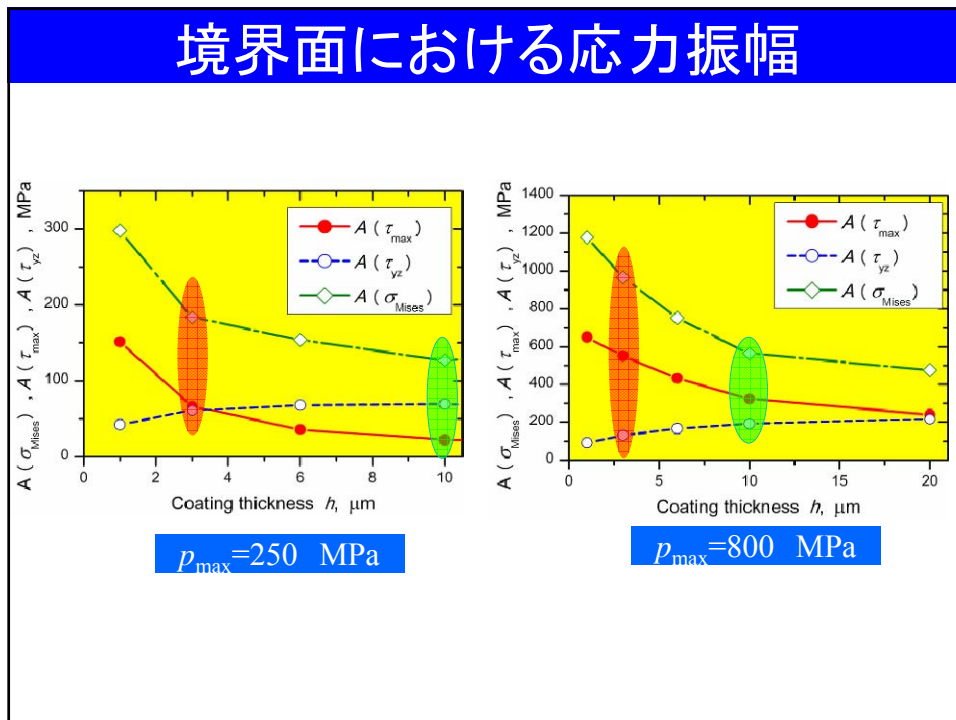
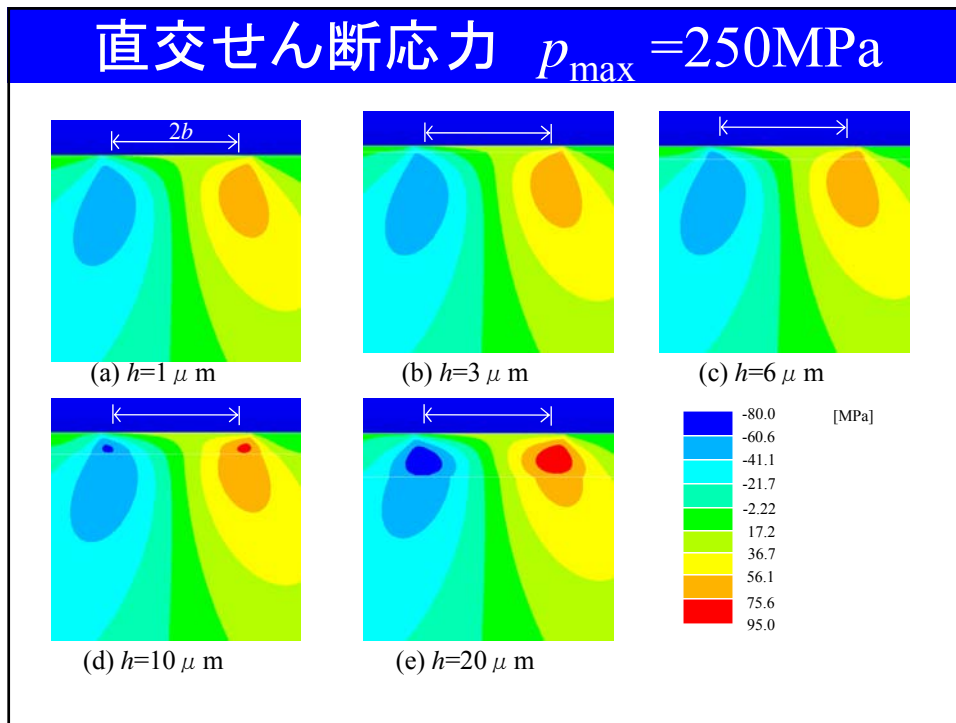
試験片のはく離状態(油潤滑試験)



5. トライボ表面における解析の紹介



5. トライボ表面における解析の紹介



画像処理を用いた生産工程の自動化

岡山大学大学院
自然科学研究科
宗澤 良臣

6. 画像処理を用いた生産工程の自動化

画像処理を用いた 生産工程の自動化

宗澤良臣

岡山大学大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻
(工学部システム工学科)

作業現場における画像処理, 作業分析による作業改善, 自動化

画像処理

見たいけど見えない！
常時監視のために人は割けない！
人の検査ではばらつきがある！

- ・加工, 組立装置の自動化における目としての役割
- ・目視検査(官能検査)における作業員の代わりとしての役割
- ・モノクロ画像処理からカラー画像処理への置き換え

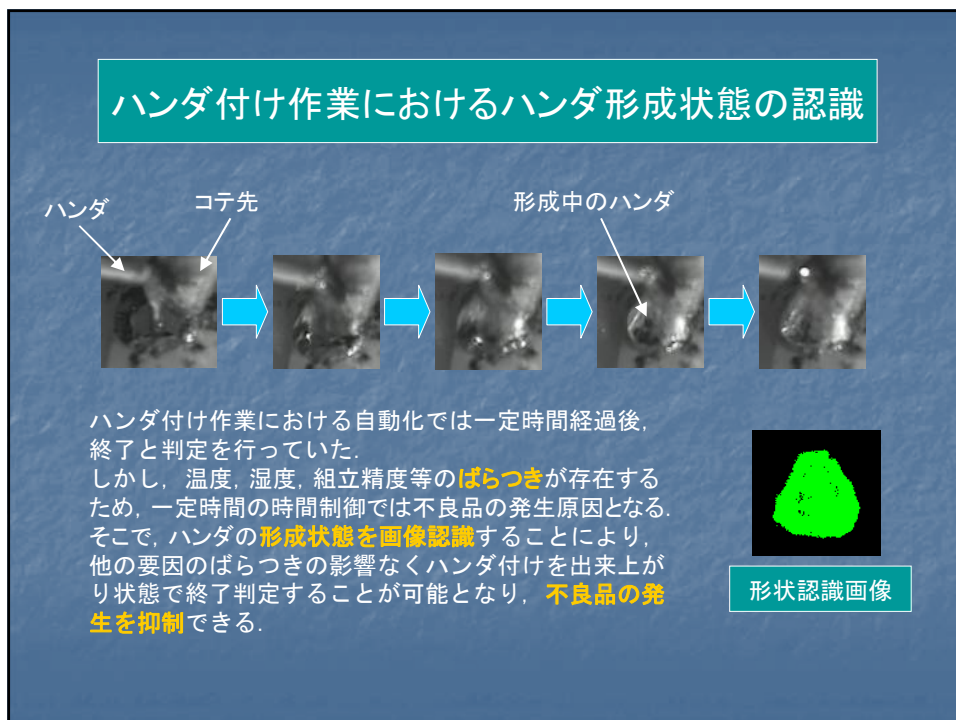
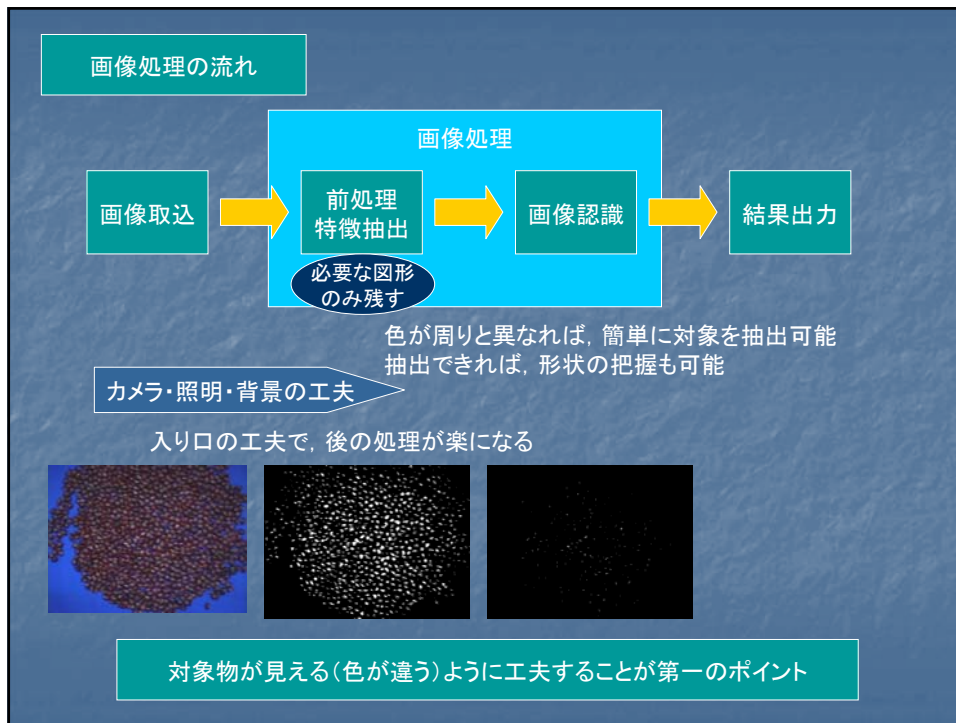
人が見てわかるなら画像処理はまず可能。
人がわからないことも画像処理で可能な場合も！

作業分析

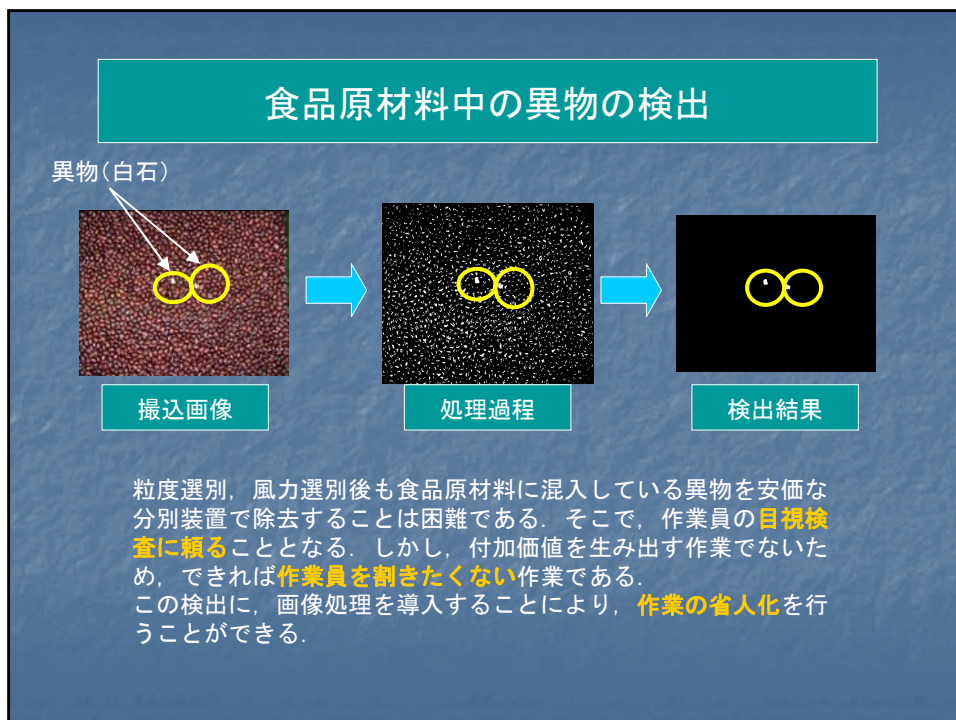
どんな格好で作業してるの！
作業負担を低減して作業効率をあげたい！
人間工学で評価したい！

- ・三次元位置, 姿勢の測定による作業姿勢の評価
- ・手のひらの把持圧力分布測定による手の負担の評価
- ・道具を用いた技能の伝承における訓練方法の開発

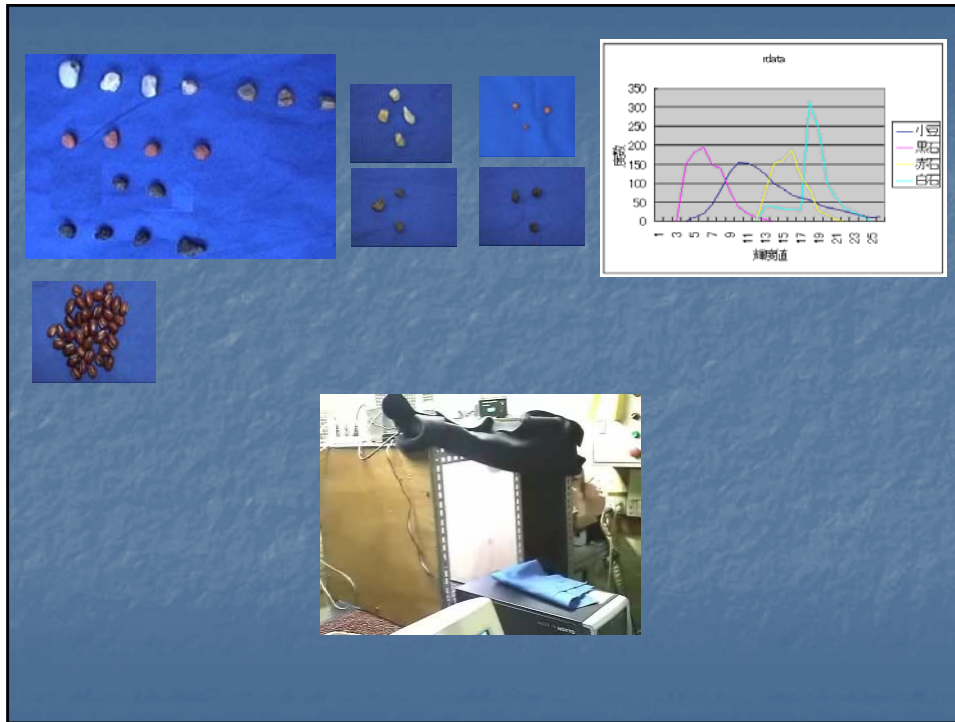
6. 画像処理を用いた生産工程の自動化



6. 画像処理を用いた生産工程の自動化




6. 画像処理を用いた生産工程の自動化



6. 画像処理を用いた生産工程の自動化

作業の測定と訓練




センサ

動作入力装置

三次元空間の位置, 姿勢を計測


➔



動作訓練装置

三次元空間の位置, 姿勢を再現


作業中の**作業者の動作**, **視点の移動**を測定し, 作業分析を行う。
その結果を用いて, 作業訓練, 作業改善を行い, **作業効率を高める**。



アイカメラ

視点の測定

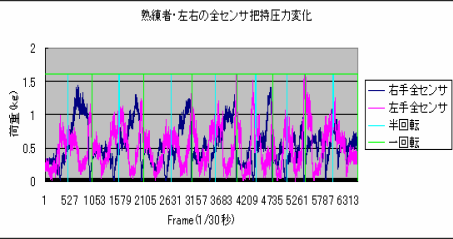
把持圧力分布測定を用いたハンドル操作の評価



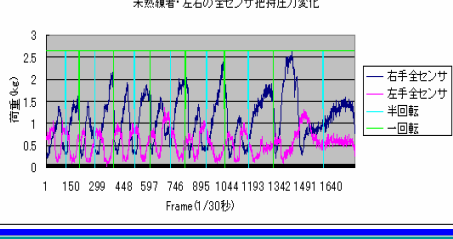
把持圧力測定センサ

技能者の行う作業は**手先の感覚**が重要なことが多い。そこで, 把持圧力分布より技能者の特徴を分析する。
また, ユーザが製品に接する箇所としては手先が最も多く, その部分を評価することにより, **人間工学**に基づいた製品設計を行える。

熟練者・左右の全センサ把持圧力変化



未熟練者・左右の全センサ把持圧力変化



旋盤作業におけるハンドル操作の評価

医療分野における 流体シミュレーション適用例の紹介

岡山大学大学院
自然科学研究科
百武 徹

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介



お話の内容 その1

1. 微小血管内における人工赤血球の
流動シミュレーション
2. マイクロチャネル内の運動良好精子
分離シミュレーション



1

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

背景（人工赤血球とは？）

輸血用血液製剤不足の解消
現行の血液製剤のリスク軽減

赤血球製剤の代価物
人工酸素運搬体の開発



カプセル型人工赤血球
直径 200 - 250 nm



Liposome-encapsulated hemoglobin (LEH)

その特徴を生かして、微小循環障害、狭心病、貧血などへの利用



2


人工赤血球の利用例

微小循環障害

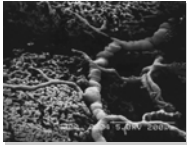
- 赤血球が到達できない微小血管部位にも酸素を運搬可能
⇒ 酸素不均一性の軽減（特に心筋組織内など）
- 微小循環障害治療薬としての用途が期待
⇒ 流体力学的観点からの効果の検証が必要

原発性肺高血圧症


細動脈レベルでの血管収縮
↓
肺動脈の血管抵抗が上昇
⇒ 人工赤血球投与による治療



正常な肺細動脈



肺高血圧症の肺細動脈



3

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

シミュレーションの必要性

現状 微小血管内(数十~数 μm)の流れの実験
.....その複雑性や微細であることから困難
適切な流体解析ソフトがない

この現状を打破するためには...

新しい流体シミュレーション技術による
効果的且つ安全な方法が有効

まずは簡単なモデルで、効果の目安
を知ることが重要

現在期待されている人工赤血球の様々な治療効果を流体
シミュレーションによりある程度定量化できないだろうか？

微小循環レベルでの新しい人工赤血球流動
シミュレーション技術の開発を目指す！

4

研究内容 (微小循環障害の場合)

赤血球が排除される
血しょう分離
plasma skimming

赤血球と血しょうの分布が不均質になる
→ 酸素が行き渡らない

赤血球より微小である人工赤血球
→ どの程度の効果がある？

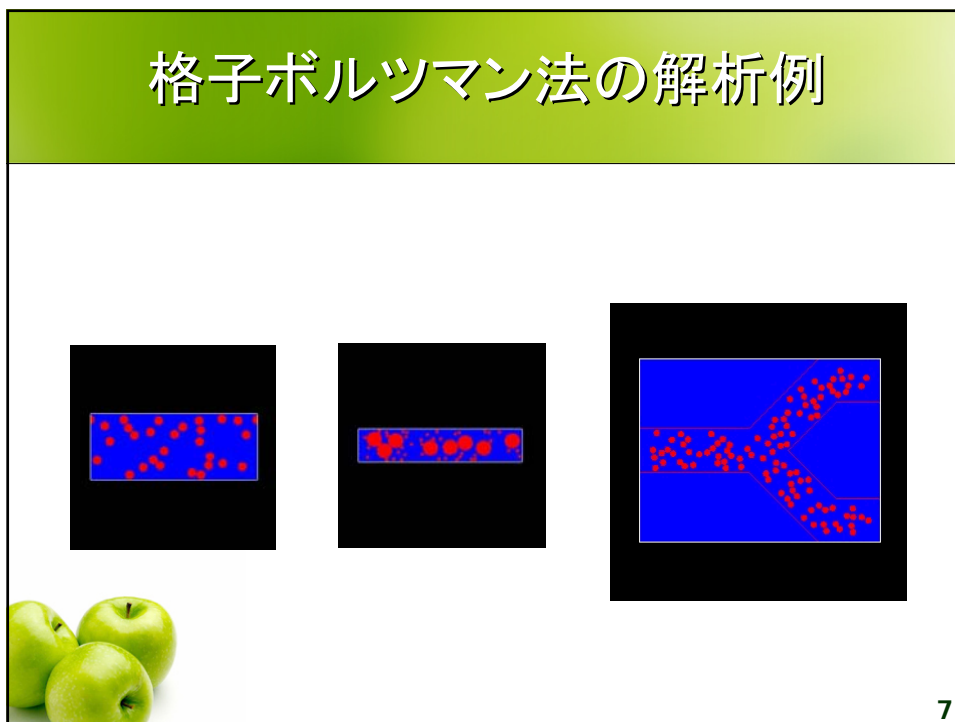
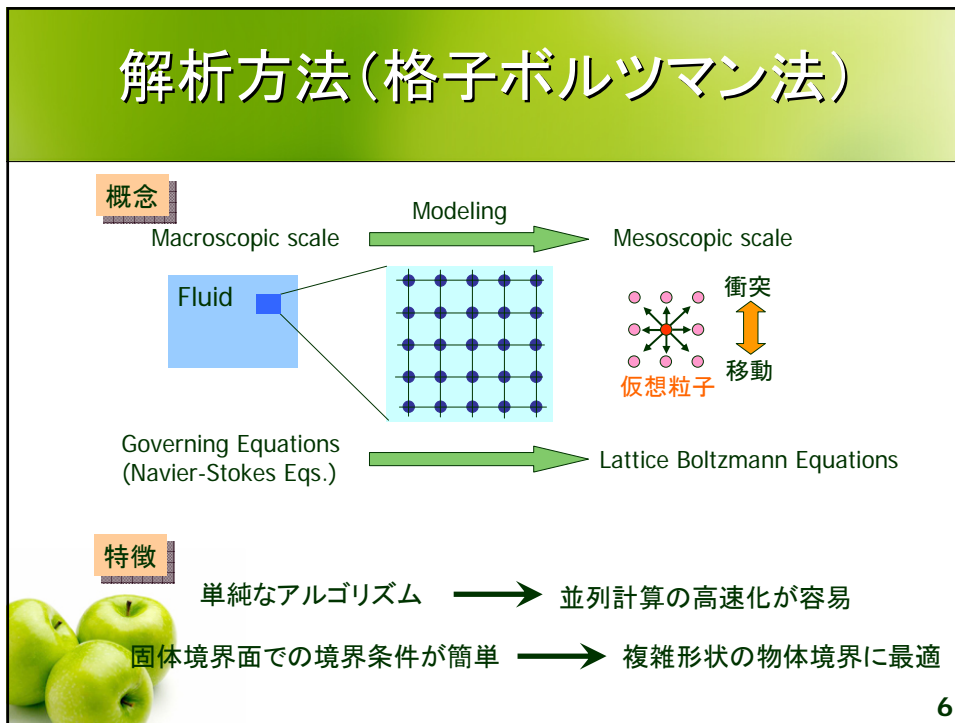
大動脈 動脈 細動脈 毛細血管 細静脈 静脈 大静脈

細動脈-毛細血管(20 μm)の分岐部

2D分岐部モデルで人工赤血球に
よる微小循環改善作用の可能性を
検証

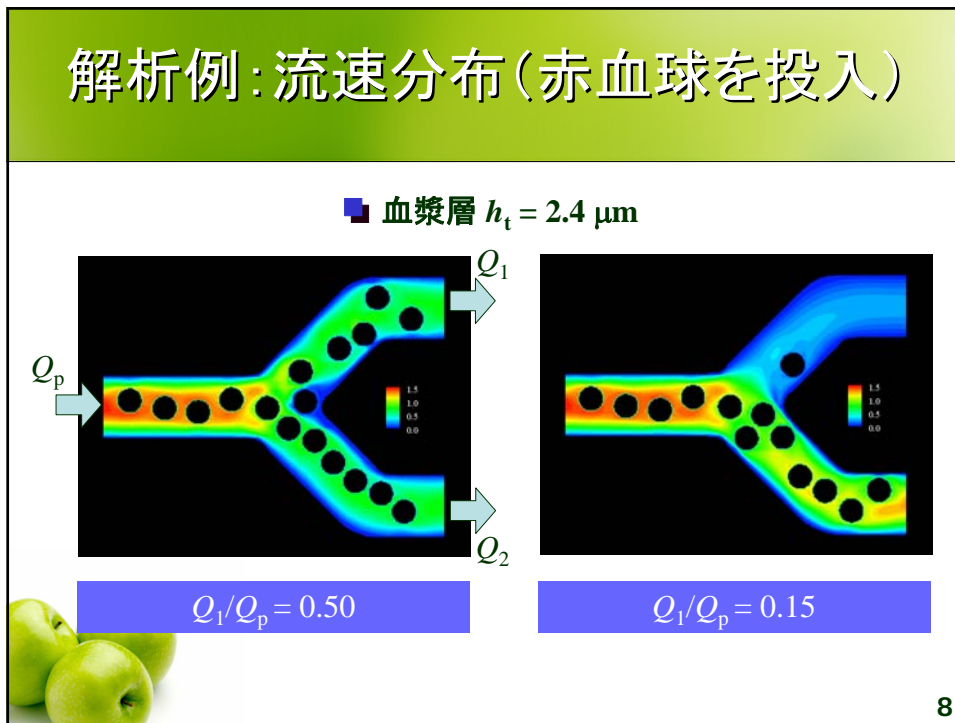
5

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

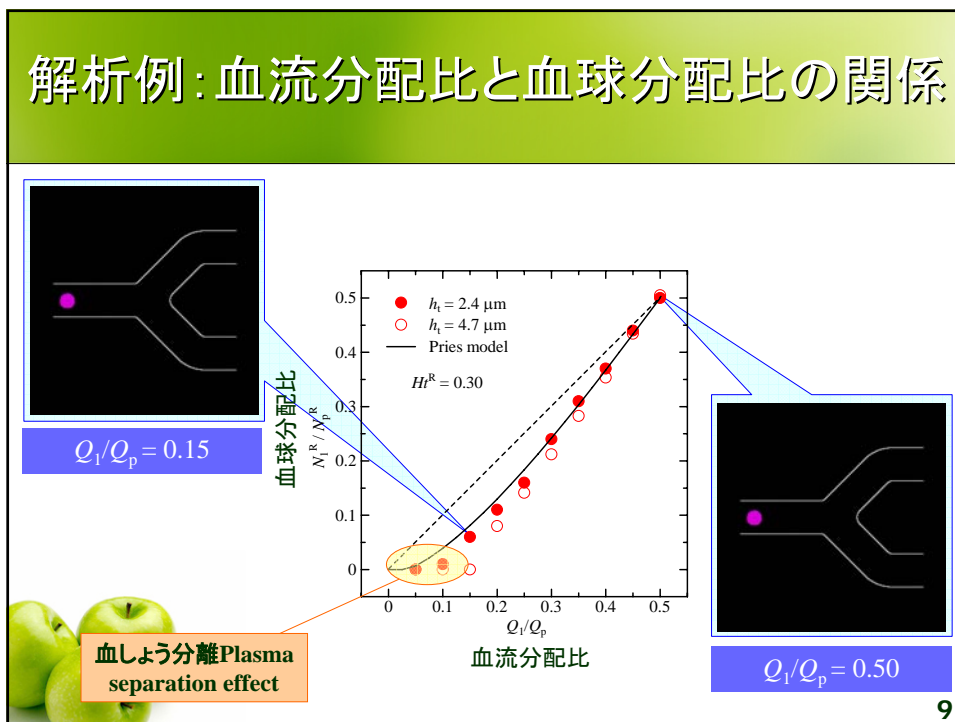


7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

解析例：流速分布（赤血球を投入）



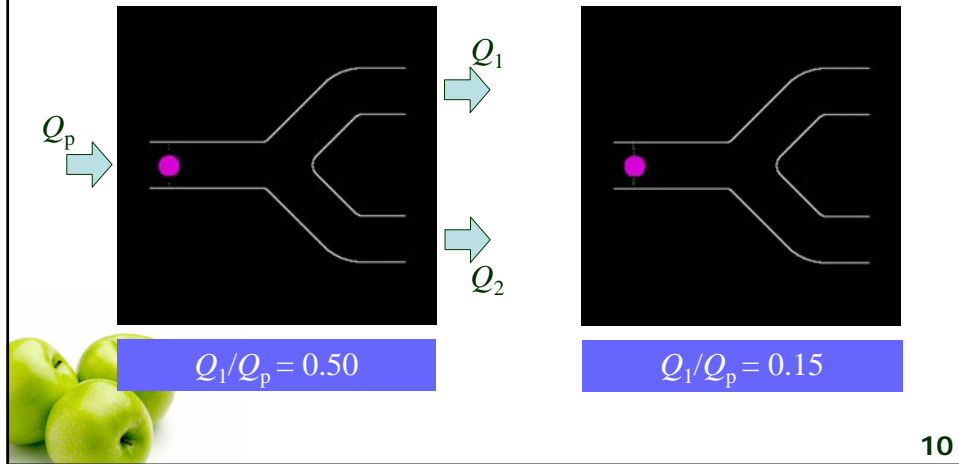
解析例：血流分配比と血球分配比の関係



7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

解析例：人工赤血球に置換した場合

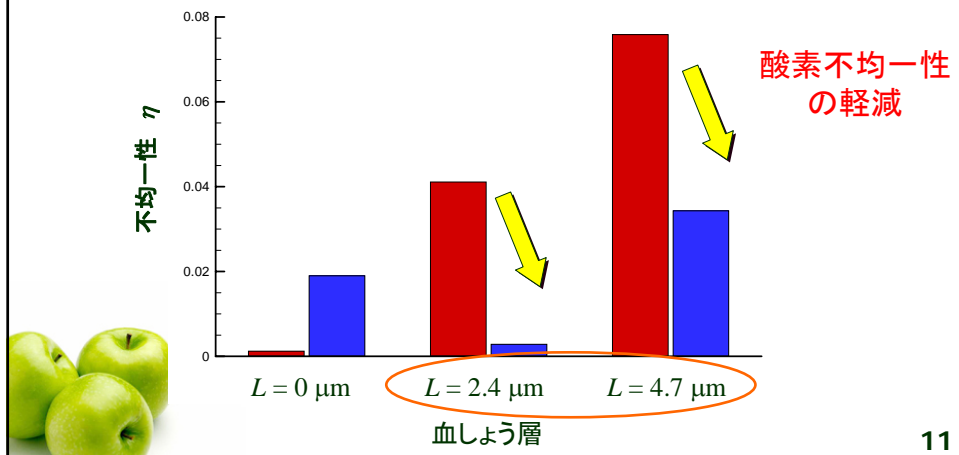
■ 血漿層 $h_t = 2.4 \mu\text{m}$



酸素不均一性の検証

$$\eta = \sum_{n=0}^{10} (Q_i/Q_p - N_i/N_p)^2, \quad n = 20Q_i/Q_p$$

■ $Ht^R = 30\%$
■ $Ht^R = 15\%, Ht^L = 15\%$



お話の内容 その2

1. 微小血管内における人工赤血球の流動シミュレーション
2. マイクロチャネル内の運動良好精子分離シミュレーション



12

背景・目的

出生率の低下による少子化

→ 不妊カップルが10組に1組、不妊原因の半数が男性側の異常、その要因の大半が精子の異常

↓ 受精には運動能力の良い精子が必要

→ 運動能力良好の精子を、簡便に、かつ効率よく分離することが求められている

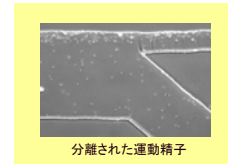
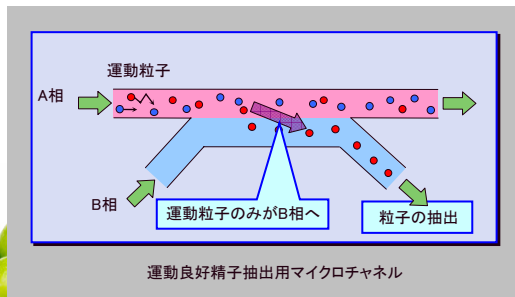


13

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

マイクロチャネルの原理

- マイクロ、ナノ加工技術進展に伴い、マイクロチャネルなどのダウンサイジング効果を利用した研究開発が進展
- チャネル内は**安定した層流**
→2液を同時に平行して流す際、片方の相に含まれる**特定の物質のみをもう片方の相に抽出可能**と考えられている



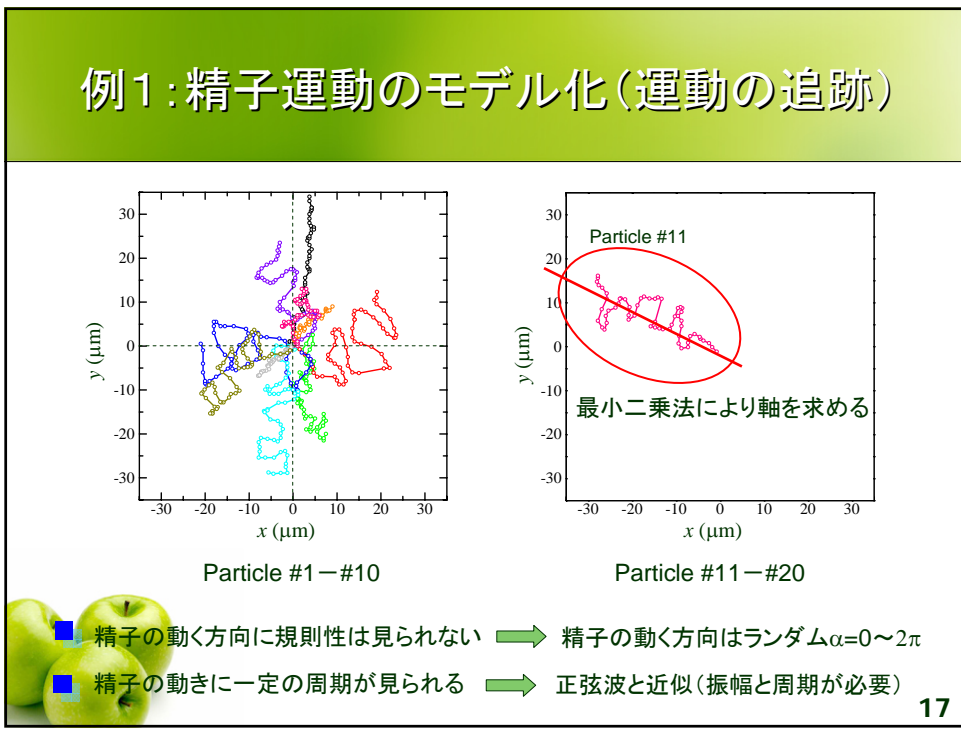
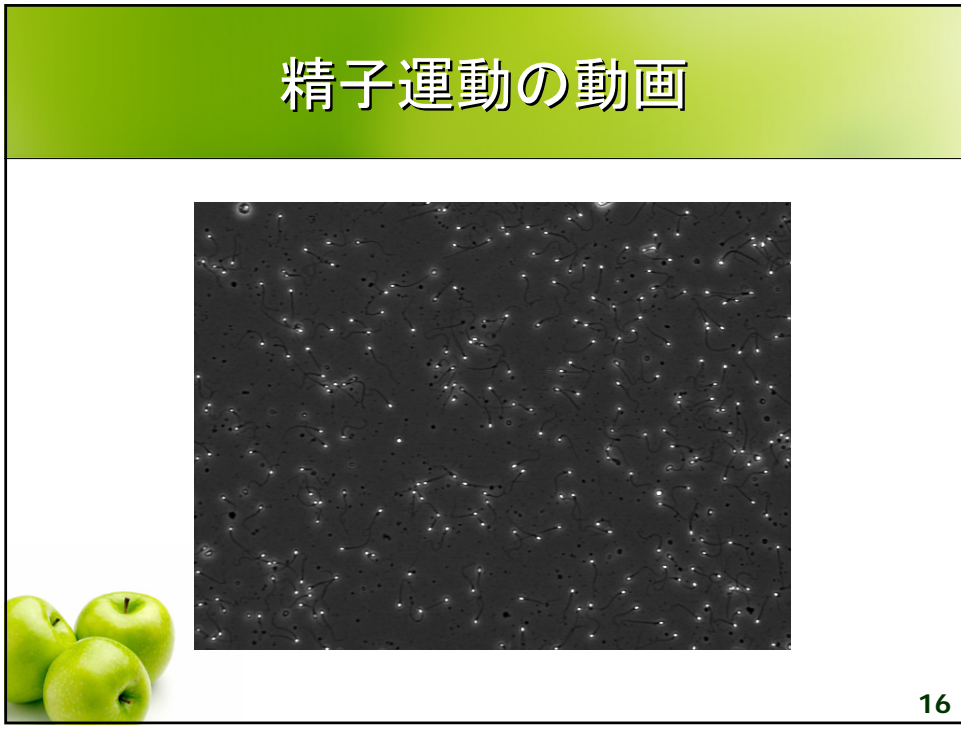
岡山大学大学院医歯薬総合研究科システム管理生理学講座より提供 14

シミュレーションの必要性

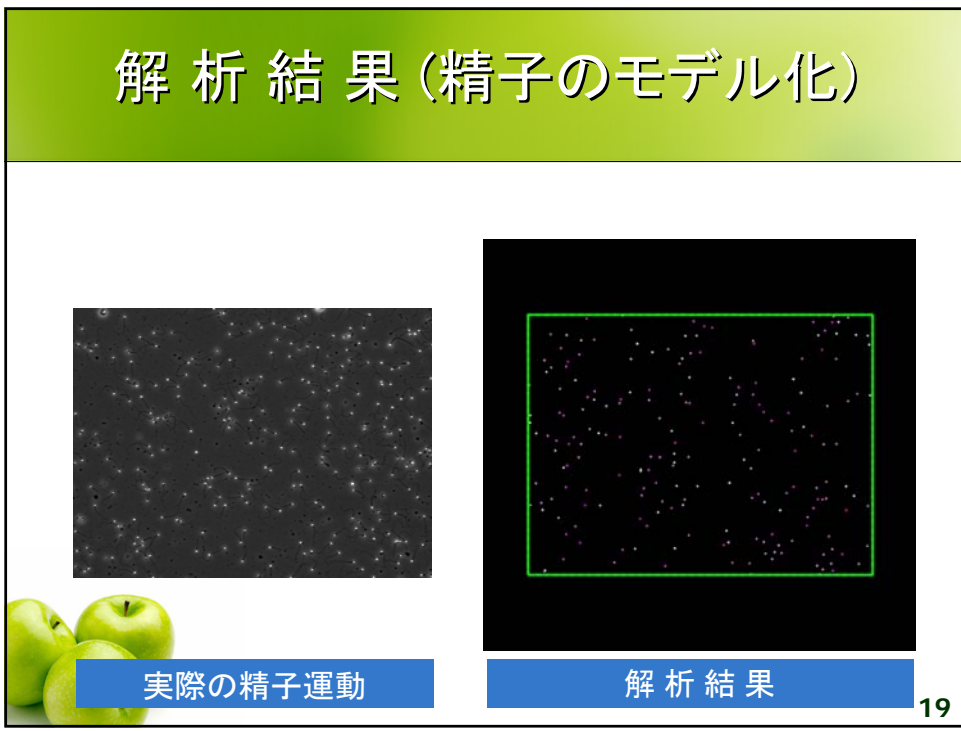
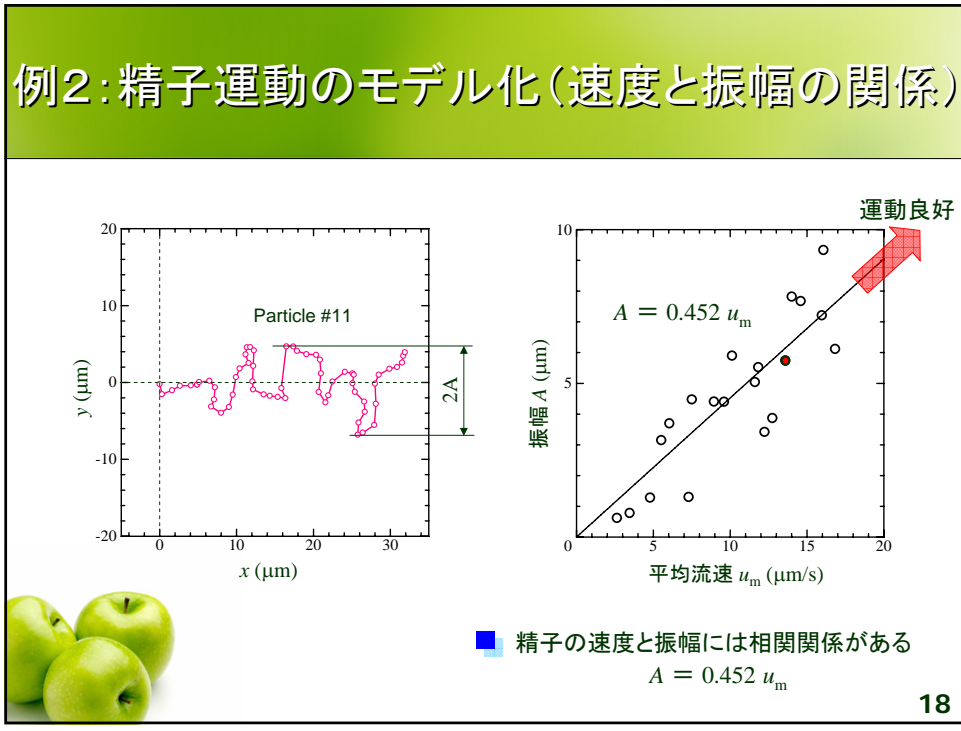
- さまざまな装置開発は進んでいるが、シミュレーションによる最適設計の検討はなかなか進んでいない
- 必要に応じて多数のパラメータを簡単変更
- 本研究対象のマイクロチャネル内での運動粒子抽出の有効性を検証する上での**迅速な対応**(最適形状の寸法、精子の数を具体的な数値として求められる)
- 予測結果をもとに最適設計の検討
→製品化する過程で**大きなコストダウン**につながる

15

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

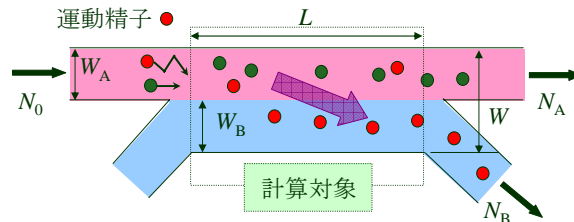


7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介



7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介

マイクロチャネル内シミュレーション

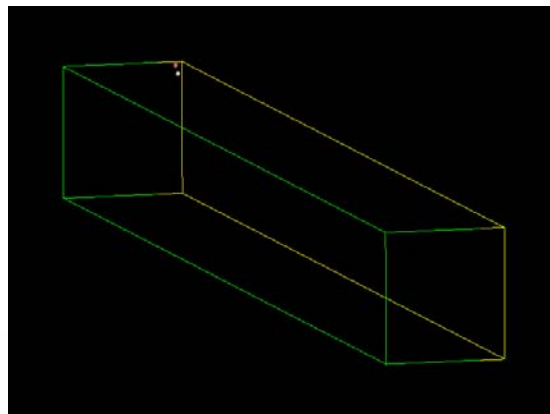


- 寸法 → 長さ L , 幅 W , 深さ D , A相の幅 W_A , B相の幅 W_B
- 精子数 → A相から流入する全精子数 N_0 , A相到達数 N_A , B相到達数 N_B
運動良好数 N^G ($S \geq \frac{S_{\max}}{2}$) (B相到達運動良好数の場合 N_B^G)



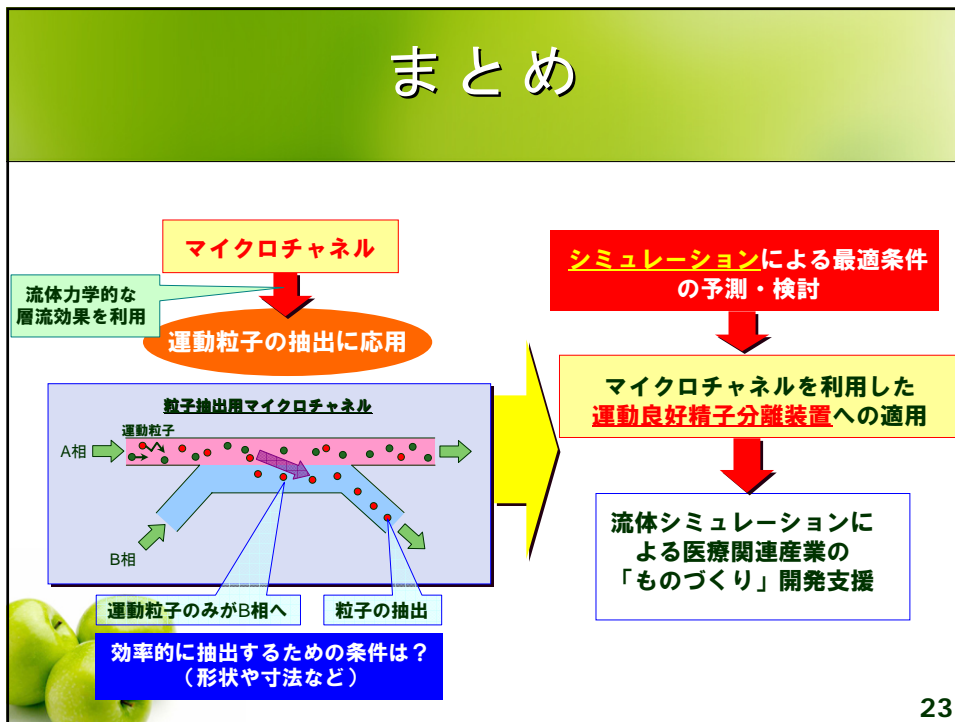
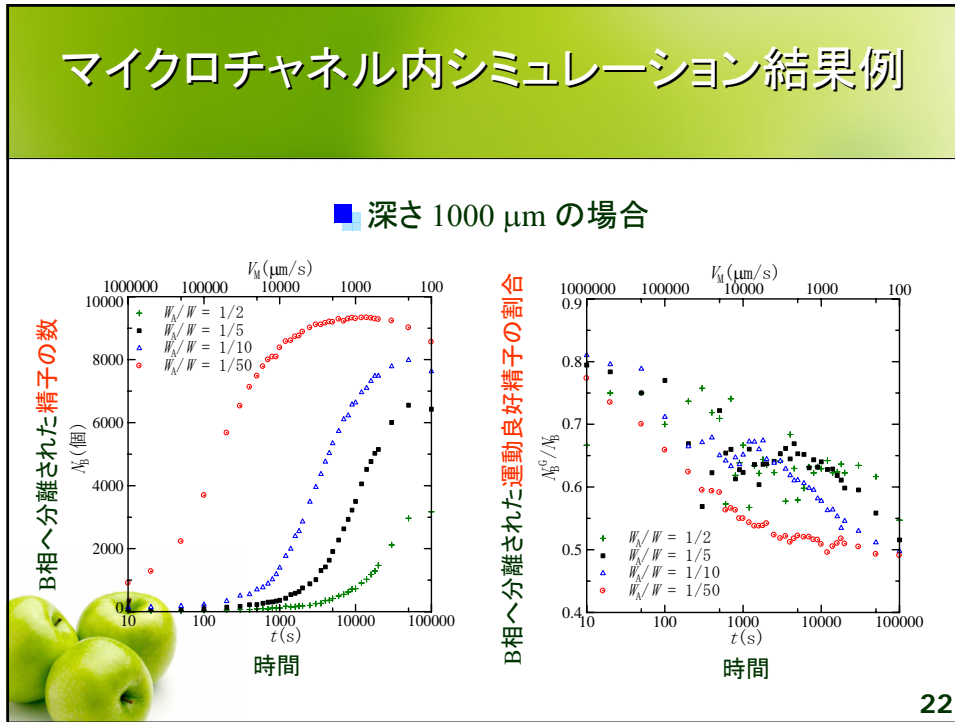
20

マイクロチャネル内3D解析例



21

7. 医療分野における流体シミュレーション適用例の紹介



振動ポアズイユ流の遷移過程

岡山大学大学院
自然科学研究科
柳瀬 眞一郎

振動ポアズイユ流の遷移解析

岡山大学大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻
流体力学
柳瀬 眞一郎

背景

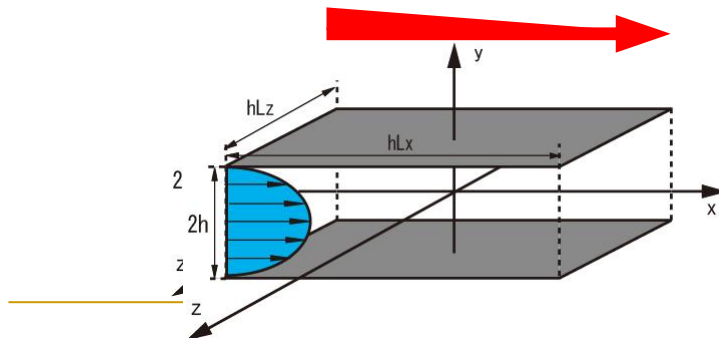
- エンジンからの排気ガス
- ポンプで輸送される流れ
- 血液の流れ など

➡ 脈動を伴った流れであり、
脈動流の解析は重要

過去の研究

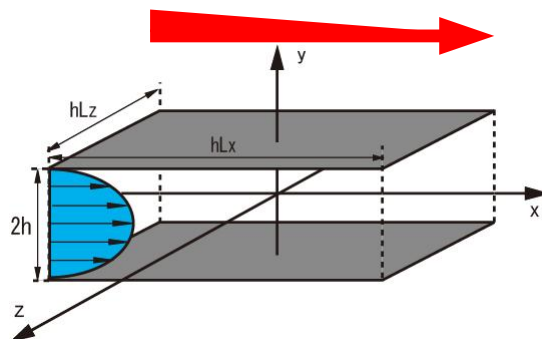
- DNSによる高レイノルズ数領域での脈動流の解析
- 線形安定性理論による臨界レイノルズ数の解析

➡ 圧力勾配の方向が逆転しない脈動流の解析はあまりされていない



8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

目的



本研究の目的

- 圧力勾配の方向が逆転しない脈動流に関して
1. 脈動の強さが臨界レイノルズ数に与える影響の調査
 2. 壁面抵抗と渦管およびストリーク構造の関係の調査

計算モデル

基本流 $U(y) = 1 - y^2$
x軸方向z軸方向は周期境界条件
 $Lx = 2\pi$
 $Lz = \pi$

全ての変数を無次元化
平板間距離の半値 h
基本流の最大流速 U_0
動粘性係数 ν

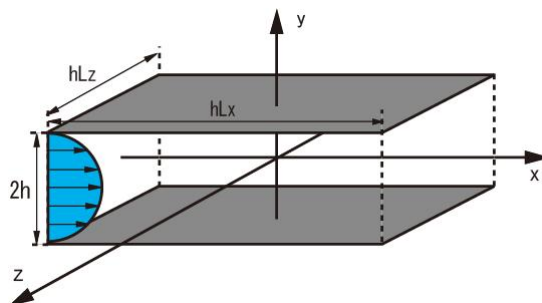


図1. 計算モデル

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

基礎方程式

連続の式とNavier-Stokes方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \omega) + \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega$$

$$\frac{\partial \nabla^2 \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla \times \{ \nabla \times (\mathbf{u} \times \omega) \} + \frac{1}{Re} \nabla^4 \mathbf{u}$$

$$Re = \frac{hU_0}{\nu}$$

フーリエ級数展開

$$u_y = \sum_{m=1-M}^M \sum_{n=1-N}^N u_{ymn} e^{i(m\alpha x_i + n\beta z_k)}$$

$$\omega_y = \sum_{m=1-M}^M \sum_{n=1-N}^N \omega_{ymn} e^{i(m\alpha x_i + n\beta z_k)}$$

$$\omega_{ymn} = \sum_{l=0}^L \omega_{ymnl} T_l(y_j) \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial u_y}{\partial z}$$

$$u_{ymn} = \left(\omega_y, u_y, u_{x00}, u_{z00} \right)$$

$$u_{x00} = \sum_{l=0}^L u_{x00l} T_l(y_j)$$

$$u_{z00} = \sum_{l=0}^L u_{z00l} T_l(y_j)$$

ここで、
 $T_l(y) = \cos(\arccos(y))$
 は、 l 番目のチェビシェフ多項式を表す

時間発展方程式

$$\frac{\partial \omega_y}{\partial t} = H_1 + \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega_y,$$

$$\frac{\partial \nabla^2 u_y}{\partial t} = H_2 + \frac{1}{Re} \nabla^4 u_y,$$

$$\frac{\partial u_{x00}}{\partial t} = H_{300} - \frac{\partial P_{00}}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_{x00},$$

$$\frac{\partial u_{z00}}{\partial t} = H_{400} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_{z00}.$$

ただし

$$H_1 = [\nabla \times (\mathbf{u} \times \omega)]_y$$

$$H_2 = -[\nabla \times \{ \nabla \times (\mathbf{u} \times \omega) \}]_y$$

$$H_{300} = (u_y \omega_z - u_z \omega_y)_{00}$$

$$H_{400} = (u_x \omega_y - u_y \omega_x)_{00}$$

$$\frac{\partial P_{00}}{\partial x} = -\frac{2}{Re} \left(1 + A \sin \frac{2\pi t}{T} \right)$$

A: 振幅 T: 振動周期

計算方法

Crank-Nikolson 法
 Adams-Bashforth 法
 FFT により計算

を適用し

初期条件

$\omega_{ymnl}, u_{ymnl}, u_{x00l}, u_{z00l}$
 に乱数から生成される
 $10^{-3}/(|m| |n| |l+1|)$
 以下の初期攪乱を与えた

展開項数および選点

展開項数

$$(M, N, L) = (32, 32, 128)$$

各方向の選点

$$x_i = \frac{i\pi}{\alpha M} \quad (i = -M, -M+1, \dots, M)$$

$$z_k = \frac{k\pi}{\beta N} \quad (k = -N, -N+1, \dots, N)$$

$$y_j = \cos \theta_j \quad \theta_j = \frac{\pi j}{L} \quad (j = 0, 1, \dots, L)$$

臨界レイノルズ数

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

層流・乱流の判断

12周期分の流速の変化より層流であるか乱流であるかを判断

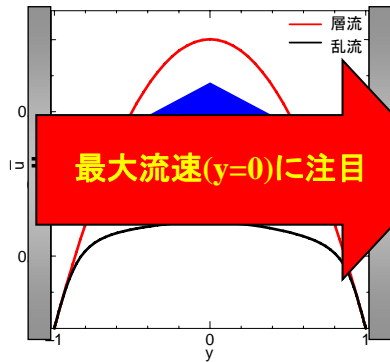


図2. 流れ方向流速分布

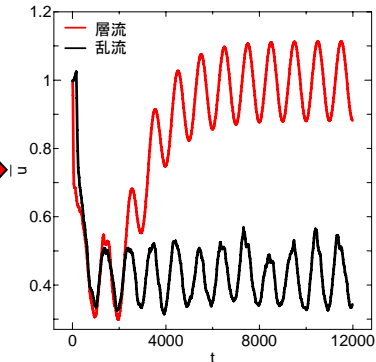


図3. (y=0)における流速の変化

解析条件

$$\frac{\partial P_{\infty}}{\partial x} = -\frac{2}{Re} \left(1 + A \sin \frac{2\pi t}{T} \right)$$

A	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1
T	1000

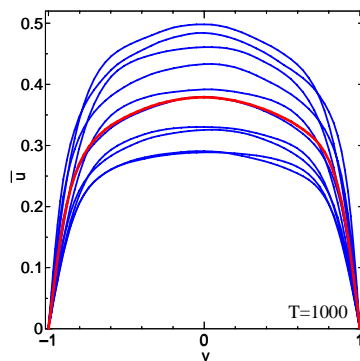
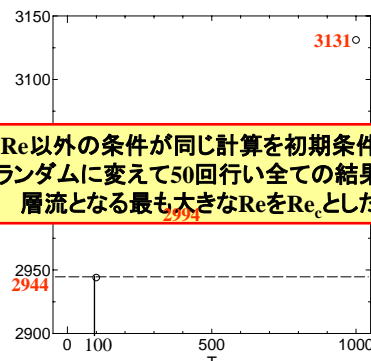


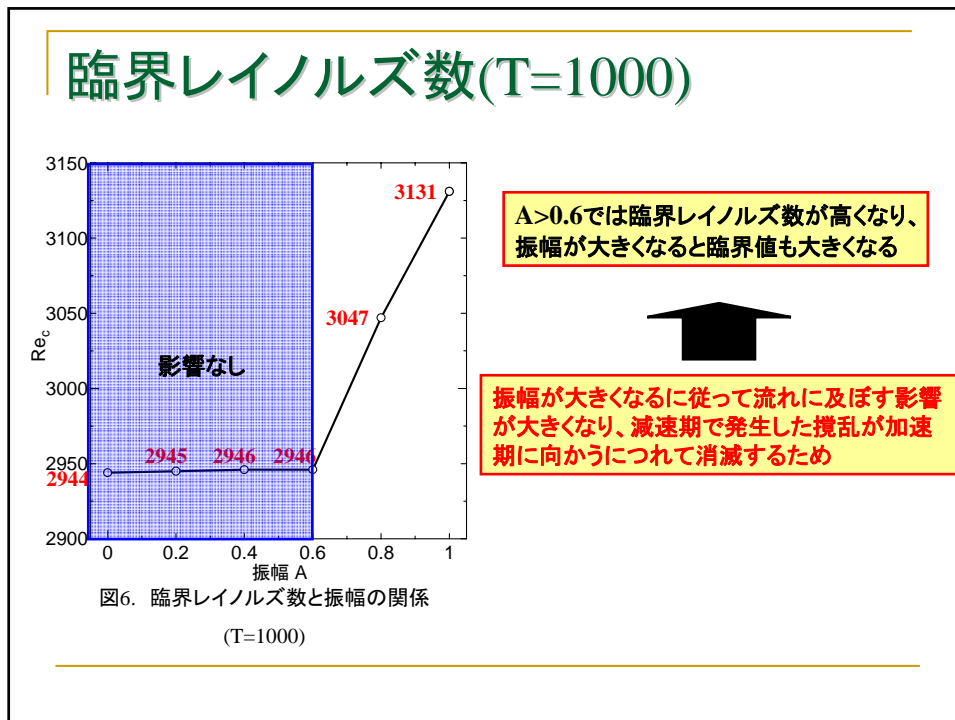
図4. A=1における周期による変化の違い
(Re=4000, A=1, T=100, 500, 1000, ∞)



Re以外の条件が同じ計算を初期条件をランダムに変えて50回行い全ての結果が層流となる最も大きなReをRe_cとした

図5. 周期による臨界レイノルズ数の違い
(A=1, T=100, 500, 1000, ∞)

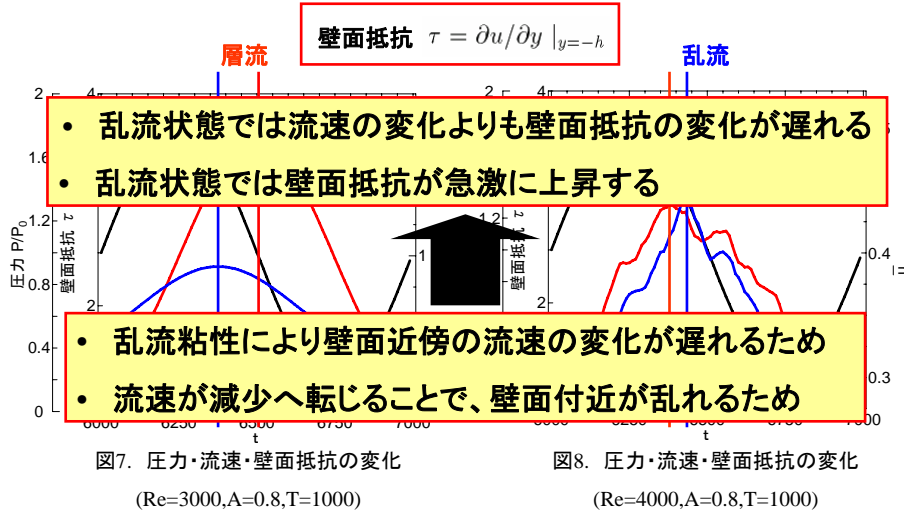
8. 振動ポアズイユ流の遷移過程



流れ場の解析

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

圧力・流速・壁面抵抗の変化(A=0.8)



渦管およびストリークの可視化方法

■ 渦管

速度勾配の2次不変量 $\nabla u = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$

■ ストリーク構造(壁面付近に高速・低速の流体が集まってできる縞状の構造)

流れ方向速度変動成分 u'

可視化にはそれぞれの等値面を使用

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

ストリーク構造・渦管の変化(脈動なし)

ダークグレイ: 高速ストリーク
 ライトグレイ: 低速ストリーク
 白: 渦管

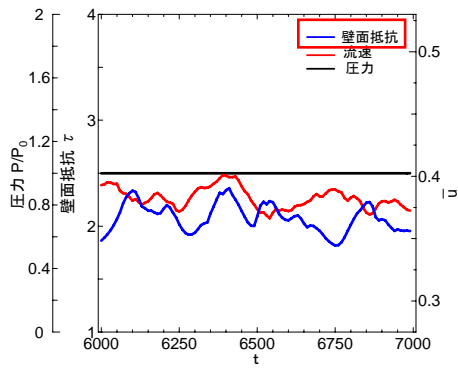


図9. 脈動なし($Re=4000, A=0, T=1000$)

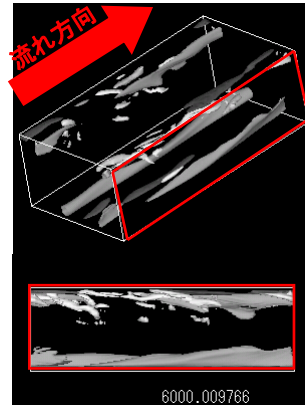


図10. ストリーク構造・渦管の変化
 ($Re=4000, A=0, T=1000$)

ストリーク構造・渦管の変化(脈動あり)

- 壁面抵抗の増加とともに渦管が多数発生し、ストリークも乱れる
- 壁面抵抗の減少とともに渦管は消滅し、ストリークも細く切れ切れになる

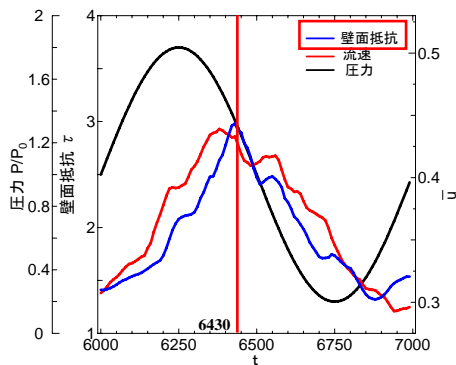


図11. 脈動あり($Re=4000, A=0.8, T=1000$)

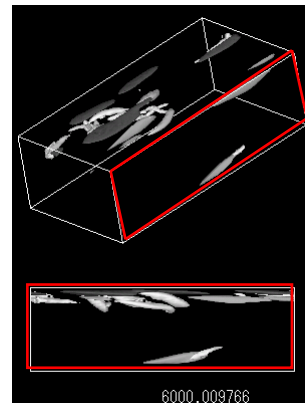


図12. ストリーク構造・渦管の変化
 ($Re=4000, A=0.8, T=1000$)

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

流速分布の比較

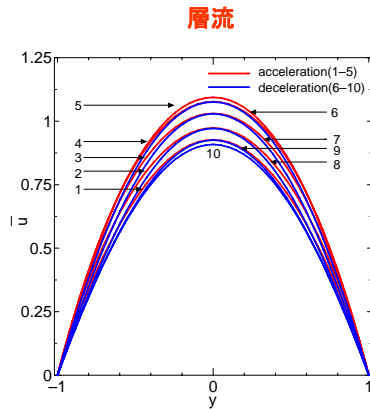


図13. 圧力・流速・壁面抵抗の変化

($Re=3000, A=0.8$)

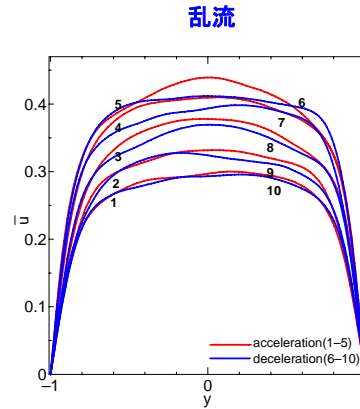


図14. 圧力・流速・壁面抵抗の変化

($Re=4000, A=0.8$)

圧力・流速・壁面抵抗の変化

t=2000~7000の5周期分の平均

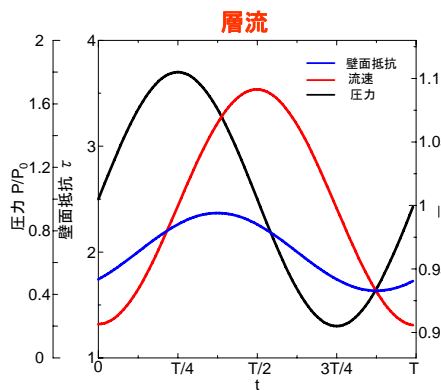


図15. 圧力・流速・壁面抵抗の変化

($Re=3000, A=0.8$)

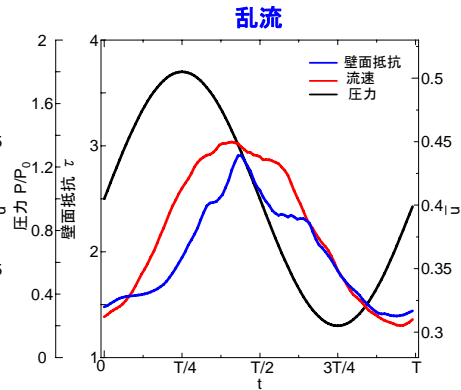


図16. 圧力・流速・壁面抵抗の変化

($Re=4000, A=0.8$)

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

流速分布の変化(層流)

t=2000~7000の5周期分の平均

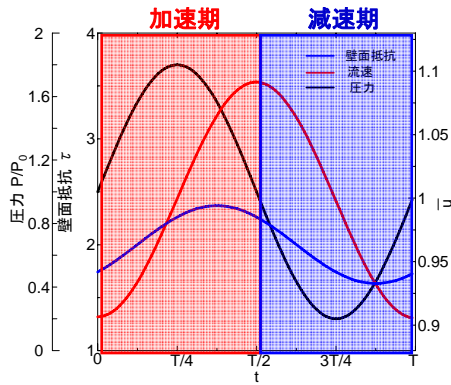


図15. 流速と壁面抵抗の変化(層流)

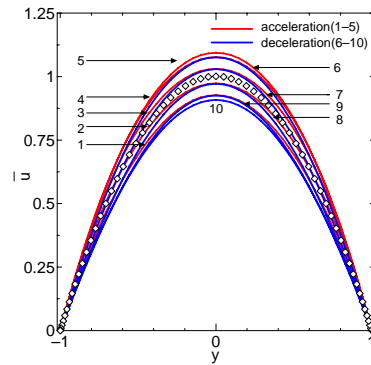


図17. 流速の変化(層流)

流速分布の変化(乱流)

t=2000~7000の5周期分の平均

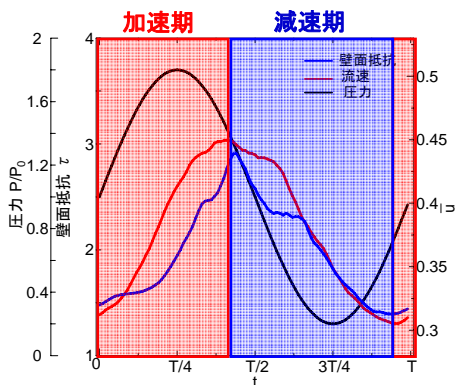


図18. 流速と壁面抵抗の変化(乱流)

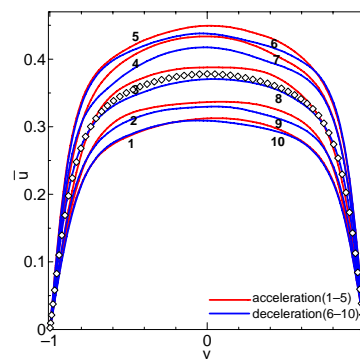


図19. 流速の変化(乱流)

8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

流速と乱流運動エネルギーの変化

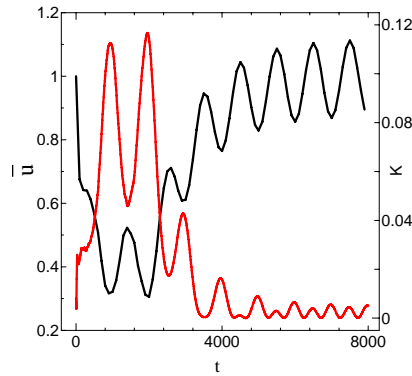


図20. X方向流速の時間変化(層流)

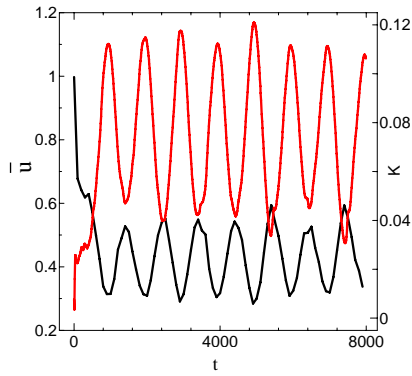
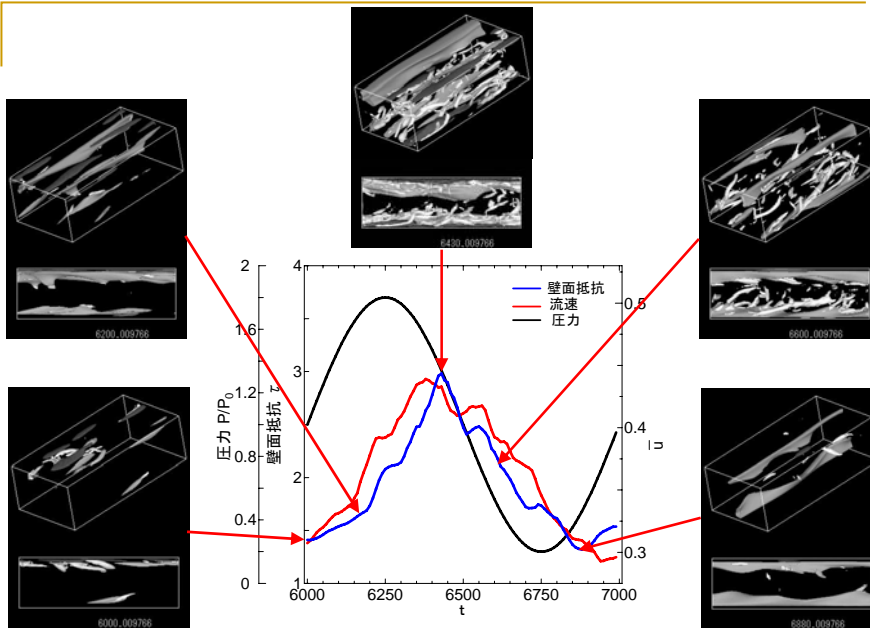


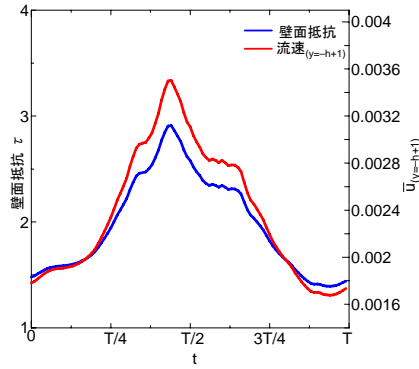
図21. X方向流速の時間変化(乱流)



8. 振動ポアズイユ流の遷移過程

壁面近傍における流速と壁面抵抗

t=2000~7000の5周期分の平均

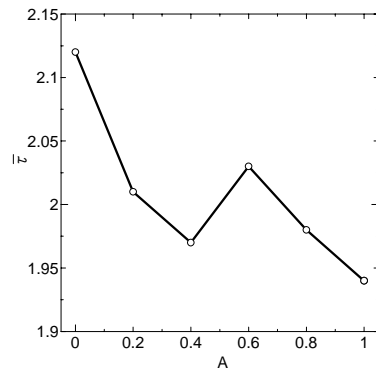


流速と壁面抵抗が
同様の変化を示す

図22. 流速(壁面付近)・壁面抵抗の変化

壁面抵抗の平均値

t=2000~7000の5周期分の平均



脈動により周期性がもた
らされることで壁面抵抗
の平均値も減少する

図22. 壁面抵抗と振幅の関係

結論

- $A > 0.6$ の範囲で振幅が大きくなるにつれて臨界レイノルズ数が高くなる
- 層流状態では壁面抵抗が流速の変化よりも早く変化するのに対し、乱流状態では壁面抵抗の変化が流速の変化よりも遅い
- 壁面抵抗の増加にともなって渦管がたくさん発生し、ストリークも乱れた構造となる。壁面抵抗が減少すると渦管が消滅し、ストリークも細く切れ切れになる

ご静聴ありがとうございました

FEMによる高性能複合超電導線 の線材設計

岡山大学大学院
自然科学研究科
村瀬 暁

9 FEMによる高性能複合超電導線の線材設計

解析支援ネットOKAYAMA 第2回セミナー2007.4.16 at 岡山大学

FEMによる高性能複合超電導線の線材設計

岡山大学大学院自然科学研究科
村瀬 暁

背景

Nb₃Sn複合超電導体 …… 高磁界での
高電流密度通電が可能

高磁場超電導マグネットなどに応用

複合超電導線の構成材



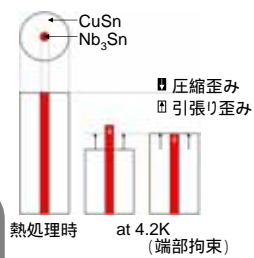
- 超電導体(Nb₃Sn)
- 母材(Cu-Sn)
- 補強材(Cu-Nb, Ta)
- 安定化材(Cu)

熱処理温度
↓ 約1000K
使用温度(4.2 K)

各構成材の熱収縮率の違い

冷却時に残留歪が発生

超電導特性が低下

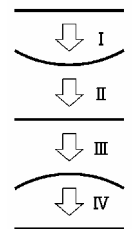


事前曲げ歪処理 (pre-bending) について

事前曲げ歪処理

室温で超電導線材に
加える曲げ歪のこと

↑ コイル巻線時における
曲げ歪の様子を模擬



事前曲げ歪処理の概略図

目的

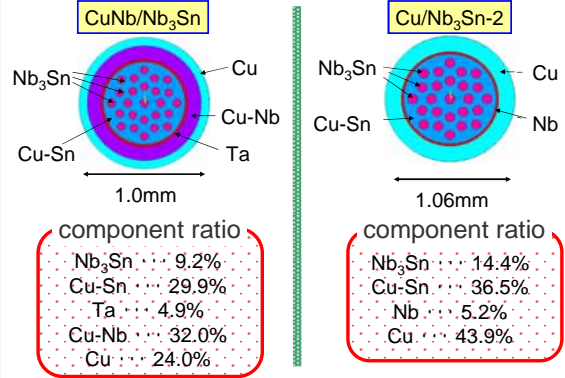
ゼロ歪下での I_c の上昇
 I_{cm} の上昇、低歪方向へのシフト

ゼロ歪下での長手方向歪のみで説明することは難しい

高性能超電導線の開発のため、
 事前曲げによる超電導特性向上の機構を、
 三方向歪(r , θ , z)について有限要素法を用いて解析する

使用ソフト: ANSYS

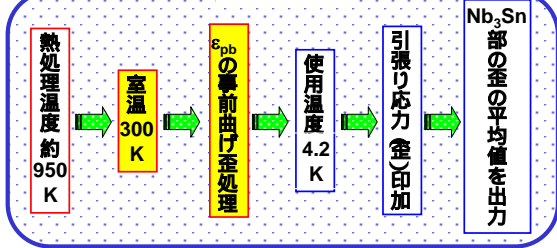
三次元解析モデルの断面



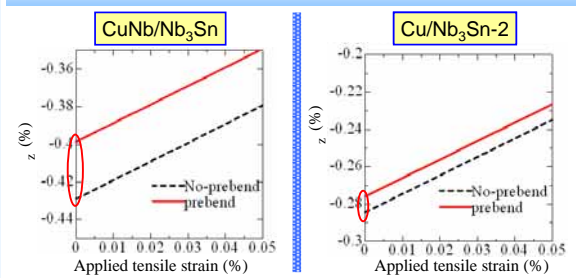
解析条件

- 各構成材はすべりがなく、変形後も両端部は平面
- 模擬する事前曲げ歪処理は2回印加($\epsilon_{pb} = 0.5\%$)
- 温度は数段階に分けて解析

解析の流れ



解析結果1 (長手方向歪-引張り歪特性)



ゼロ歪下で長手方向の残留歪
 約7.0%緩和 | 約3.2%緩和

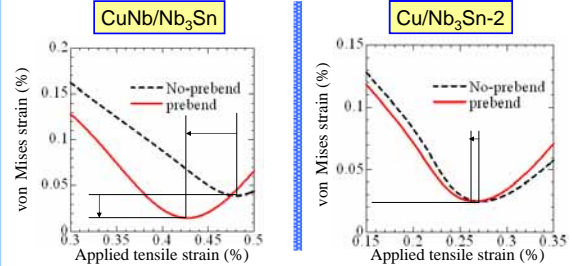
解析結果 2

事前曲げ(0.5%, 2回)による伸び

CuNb: 0.37%
Cu: 0.01%

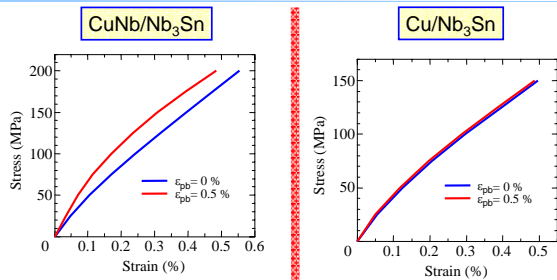
この伸びがゼロ歪下で長手方向歪の緩和
→ ゼロ歪下で I_c が増加する理由

解析結果3 (von Mises 歪-引張り歪特性)



von Mises 歪の最小値は I_{cm} と同じ傾向を示している
→ I_{cm} の増加と低歪方向シフトの理由

解析結果4: 機械特性の変化(軸方向)



機械特性...向上

機械特性...変化なし

これまでに得られた成果

事前曲げにより超電導線の高性能化

- 3方向歪解析を行い, von Mises歪で評価することにより, **最大臨界電流値 I_{cm} の向上**, **ピーク位置の低歪方向へシフトする理由**を明らかにした。
- **事前曲げ歪処理の効果は, CuよりCuNbの方が効果的** **構成材の機械特性(塑性変形能)に依存する**

これからの線材設計

- CuNb補強材の配置位置(中心部or周辺部)による事前曲げ効果の影響
- 構成材の機械特性, 配置, 体積比, 事前曲げの回数・歪をパラメータにして, 各プロセスでの3方向歪の挙動を明らかにして, **事前曲げ効果が最大となる線材設計**を行う。

謝辞

- 本研究の一部に, 東北大学金属材料研究所計算材料科学センターのスーパーコンピューティングシステムを利用した。ここに謝意を表す。