

(社)日本機械学会材料力学部門
M&M 2009 材料力学カンファレンス(2009.7.24-26,札幌)
パネルディスカッション「材料力学はこれでいいのかPart3」より



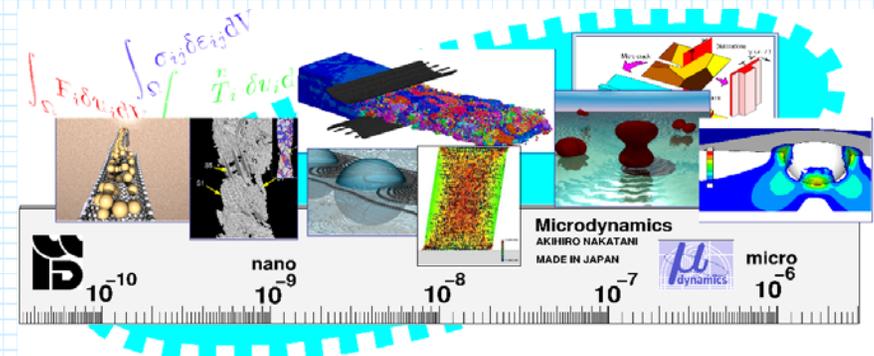
材料力学の持つ科学的・工学的側面 ～ポアンカレ「科学と方法」を読む～

大阪大学大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻
中谷彰宏

<http://www.md.ams.eng.osaka-u.ac.jp/>



Microdynamics
since 1997



プロローグ: 将来を案じる若手研究者の声

産学連携や、「役に立つ研究」を、とのプレッシャーからか、理論研究や基礎研究が軽視され、応用研究にシフトしている。このままでは知識資源を使い果たしてしまい将来が危うい。

(AN) 基礎、応用という言葉が先行して自由な発想を妨げている危険性がある、大学側も認識を柔軟に考える必要がある。グループ連携研究においては、互いに相手の研究を文化的レベルで理解して、敬意を持って臨むことが肝要か。

「これでいいのか？」の主語は「材料力学」なのか「材料力学部門」なのか？ 計算力学部門の発足以降、計算(材料)力学部門と(実験)材料力学部門に分かれていることが機械学会の材料力学分野に特有の問題なのではないのか。多様な研究者が参加し、お互いの方法を理解し、材料力学の発展や応用に向けた議論を行う場が必要なのでは。

(AN) 計算、実験という言葉が先行してラベリングに結びついた経緯は否めない。というよりもダブルメジャーになるには忙しすぎる(講演会も多すぎる)。連携が必要。

教育の現場で実験が難しくなりつつある。安全・安心を大学で体得するには一層の工夫が必要だが研究費や人的な縮小傾向で難しい。日本の技術レベルが維持できるのかが不安。

(AN) 紙をちぎって見せるような実験では、鉄の重さも知らない学生に重厚長大の機械構造の安全のイメージを理解させられない。教育にも一層企業の協力を期待。

変形体力学(≒材料力学)の基本的立ち位置

「連続体物理学が核物理学から導かれなからといって軽蔑するのは、それが聖書に基礎を置かないとしてとがめるのと同じくばかげたことである。」

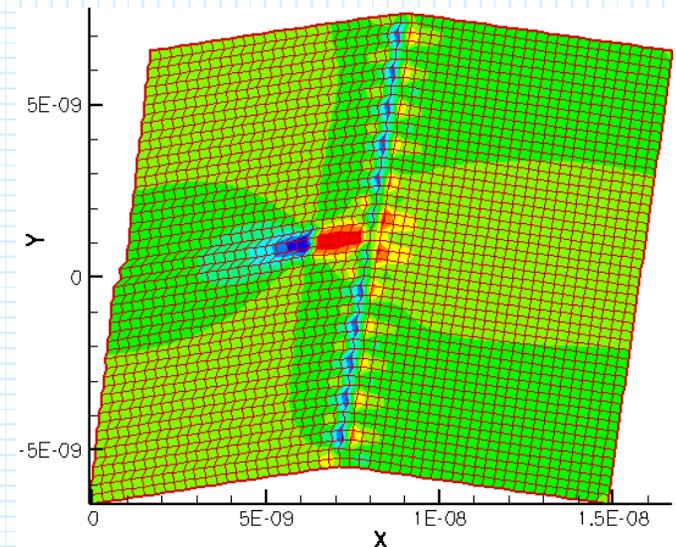
「理論研究者の仕事は、自然現象の混沌の中に、効率的かつ単純に一群の現象を記述できるような言語を創案することにより、秩序を持ち込むことである。」

... けれども、...

「連続体物理学は、物質の構造に関して何も推定はしない。」

(The Non-Linear Field Theories of Mechanics: NLFT (1965) by C. Truesdell & W. Noll)

「要するに私は、理・工学上の“定義”は言葉を媒介にして、物質系との関わりを深めて行かざるをえないがゆえに、“定義”にこだわる態度(それがしばしば“厳密”とまちがわれるのだ)が、対象のゲシュタルトの変容に伴う認知構造(cognitive structure)の変化を妨げることが心配しているのだ。私たちがいくら学習しても研究しても、自然の法則性そのものは変革できるはずはない。変革可能な対象は、あくまで私たちの法則的把握のあり方しかない。」



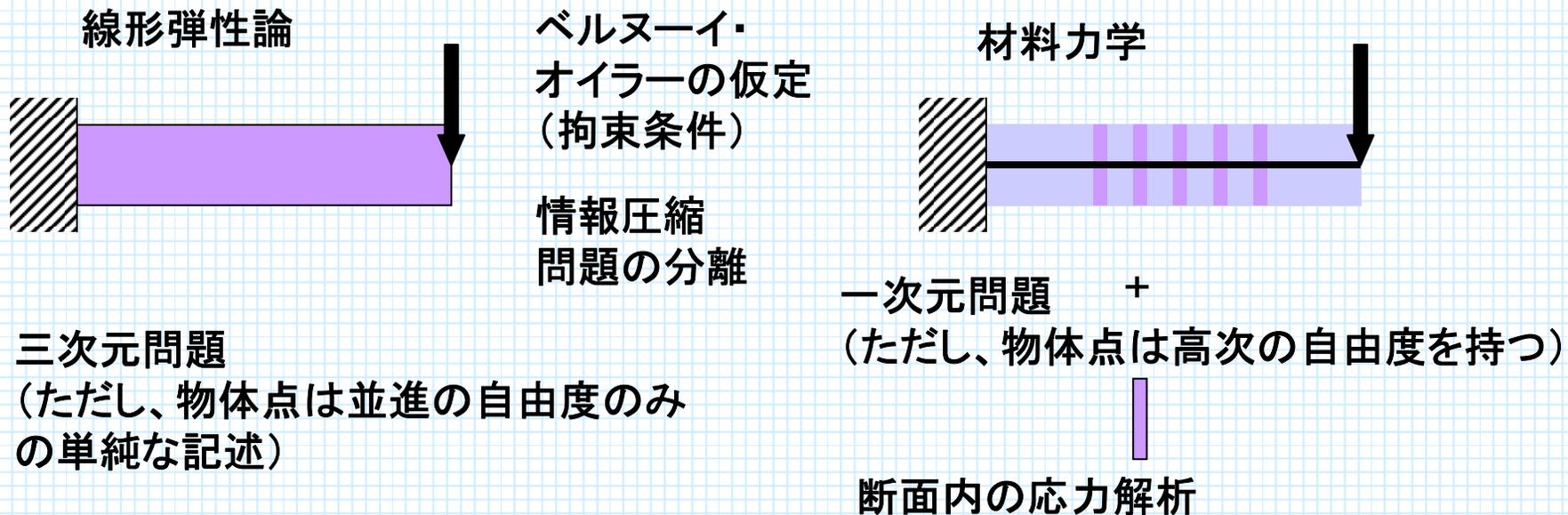
(基礎工学セミナー 場の理論/現象の論理と法則の構造をめぐる討論(1974) by高橋利衛)

【時間発展する現象とそのメカニズム】

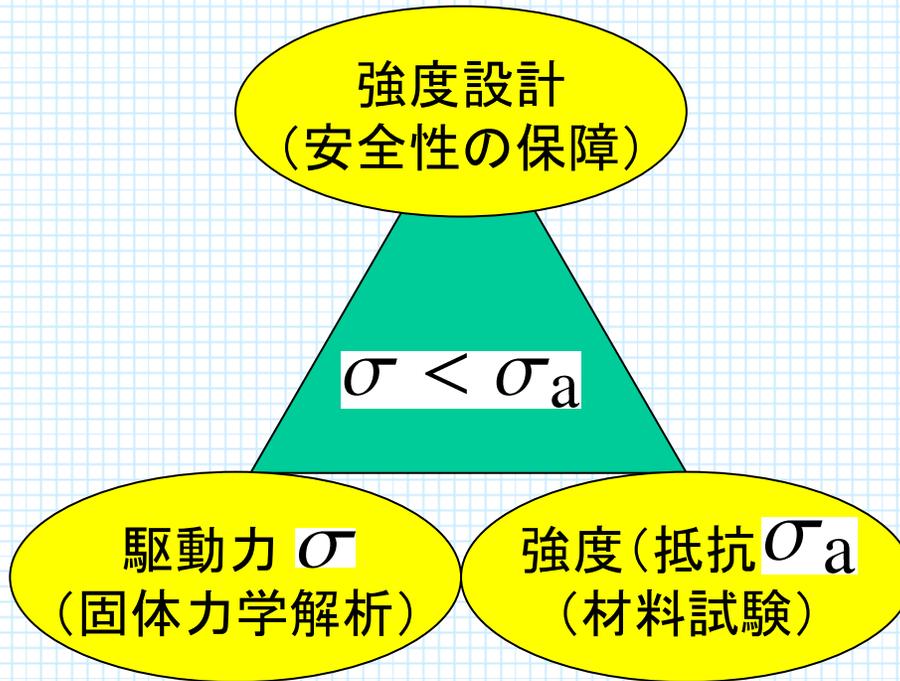
「素過程」(Elementary process)と「駆動力」(Driving force)

マルチスケール・マルチフィジックス解析の基礎を与える材料力学

- 拘束系 (ラグランジェ未定乗数法)
 - 剛体系 (任意の物体点の相対距離の一定保持)
 - 拡張系 (温度制御、圧力制御、アンサンブルの規定)
 - マルチフィジックス系 (流体関連振動、電磁固体力学などの連成系)
- 種々の内部構造記述
 - エネルギーの多重スケール展開 (均質化法)
 - 波数空間でのエネルギー表現
- 材料力学: マルチスケール解析の基礎を与える高次理論



駆動力と抵抗の比較の上に成り立つ力学基準の 安心と安全の保障



- 何が(現象を推進する一般化力としての)駆動力として採用されるべきか? 駆動力や強度は壊れ方によって選択の基準が異なる。また、時間・空間のスケールが変われば、駆動力や抵抗は違ったものになる。その発見は神わざ的。
- ミクロ材料では材料特性としての駆動力や強度が単純な数値では表現できない、強度設計はシミュレーションの中で行なわれるべきではないか?
- 強度や特性は材料力学問題の解として求まるはずである。
(北川・久保、1991)

「材料強度学」大路清嗣より
(大路トライアングル)

ナノテクノロジーのための材料力学

- 材料力学は必要か？
- 解析モデル構築・エンジニアリング的視点からの問題発見において材料力学的センスはやはり必要（濱田實先生）
- 体系化された材料力学は宝の山
 - はりの理論（3次元問題を1次元に情報圧縮している高次理論）を見直そう。
 - サン・ブナンの原理（分布荷重と集中荷重の置き換えを可能にする理論、粗視化・ローパスフィルター理論）
 - Bettiの相反定理を用いた裏の系の理解
 - エラスティカ問題を用いたリバーースエンジニアリング

基礎科学としての材料力学

- 専門家集団としての大学。必要となる知識や教養というものは本来何の役にたつかわからないもの。突然、眼前に現れる難問に対応できる底力。
- 学問体系の中に多様性が維持されていることが一つの解。
- 学会は専門分野ごとにさらに広い裾野。

大学における材料力学のひとつの理想像

意欲的学習者のための大学



ἀγεωμέρητος
μηδείς
εἰσίτω

“Let no one destitute of geometry enter my doors.” (プラトン)

“Let no one destitute of mechanics enter my doors.”

力学を学ばざるもの入るべからず(北川浩先生)

材料力学担当教員の仕事

- エンジニアの教養としての力学教育 (PBLや真の応用力は学生の教養を育てこそ真価を発揮できる)
- まずは古典(歴史に則った)機械工学教育の実践を基礎に、それを乗り越える新しい学問分野の確立
- 工学的問題解決のテクニクとしての力学だけでなく、力学教育を通じて、力学的世界観、変分学的自然観(瀬口靖幸先生)を持つ人材の育成、倫理観、道徳観を含む内面からのエンジニア教育に携わる。

材料力学

- 純粹理論：普遍化体系化
- 応用：実学
- 両方を兼ね備えた複雑な体系
- 多様な価値観を共有できる工学特有の人間・社会とのの関わりやシステム論を学問の中に内包している。

「科学と方法」を読む: 普遍的学問としての材料力学

工業の勝利は幾多の実際家を富ませた。しかも、世がもしかのような実際家のみであったならば、またもし、彼等にさきだっかつて実益を念頭におかず、しかもまた気紛れならぬあるものを指針としてはたらいだ幾多の私心なき狂熱家がなかったならば、この勝利は決して実現されることはなかったであろう。マッハのいったように、彼等狂熱家はその後継者のために思考の労を節約してくれた。ただ目下の応用ばかりを目当てにはたらいだ者は、後にのこすものとは何ものもなく、あたらしい必要に面しては、すべてをはじめから遣りなおさなければならなくなるであろう。

法則が普遍的であればあるほど貴重である所以は、実にここに存する。

技術家にとっては、それが第二十二世紀の技術家に役だつか否かを知ろうなどということはほとんどその関心するところではない。我々(科学者)は我々と同時代の人のために一時間労を省いてやるよりも、我々の孫に一日の労を省いてやる方をさらに大きな幸福と感ずることがときにあるのである。

今のエンジニアとは状況が違うが、ポアンカレはいわゆる純粹科学研究の大切さをうたえている。ただし、材料力学の基礎研究者は狂熱家とは違った意味(中長期の応用を見据えてそれを前提として)現象の普遍化・抽象化することに意義を見出している。すなわち基礎から応用までを、一つの学問体系の中に含んでいる。

「科学と方法」を読む: システム全体を考える材料力学

象を顕微鏡を用いて以外に研究したことのない博物学者は、この動物を充分に知ると信ずるであろうか。

巨匠の手になる建築を眺めるとき、もし我々にして建築家の設計を解し得ないならば、石工の仕事を嘆美しても何の役にたつであろうか。かくのごとく全体を見渡す力は純粹論理によっては与えられない。これは直感から求めるべきである。

それは中等教育を受けた青年たちが、その教えられた力学の法則を実世界に応用することに如何に迂遠であるかということである。これは単に彼等がそれを応用する力を欠くからではない、彼等はそのことを考えることさえもしないのである。.....もし彼らに力を矢で示す前に現実界の力を示したならば、かかる結果になることはなかったであろう。

材料力学には現象を深く洞察や先達の経験に基づく「直感」を含む学問体系であるといえる。そのような直感是要素還元論によるアナリシスとは逆のシステムのシンセシスと密接に関係しており、機械工学の根幹をなす部分でもある。純粹科学がどのように実社会に応用されるべきかを、学問体系それ自身の中に含んでいるといえる。

「科学と方法」を読む: 急激な社会の進化に教育の現場がどのように対応していくのか

動物学者によれば、動物の胎児の発達には地質学的時代におけるその祖先の歴史を極めて短い時間に繰返すのであるという。精神の発達についてもおなじことがいわれるように見える。教育者は児童をしてその祖先が通過した跡を一層すみやかに、しかも段階を破らずして、ふたたび通過せしめなければならぬ。この故に我々は科学の歴史を第一の指針としなければならないのである。

数学教育の主たる目的は、ある精神能力を発達させるためのものであって、なかにも直観力は決して軽視すべきものではない。数学の世界が現実の世界と接触を維持するのもこれによるのであって、純粋数学はこれなしに済まし得るにしても、象徴と現実とを分かち溝渠をうずめるためには必ずこれに頼らなければならぬ。実際家は常にこれを必要とするのであって、しかも純粋数学者一人に対して実際家が百人も存在しなければならないのである。

急激な社会の進化に教育の現場がどのように対応していくのかは、「科学と方法」が書かれた100年前も今も同じである。結局のところ、多様化し、高度化した学問全てを短時間に教授することは不可能であり、個人の自発的な能力開発に期待せざるをえない。材料力学教育にあっても従来と同じカリキュラムの実施は不可能であり、動機付けと自己学習能力の種を蒔く方法による以外にない。そういった人材を受け入れる側にも自身が受けてきた教育とは異なることに理解を求める必要がある。

「科学と方法」を読む: 材料力学は古典なのか?

今後幾年か過ぎてこれらの(量子力学や相対論といった新力学の)理論が新しい試練を経て勝利を得たものと想像しよう。かくなるとき我が国の中等教育は非常な危機に遭遇するであろう。すなわち、ある教師たちはおそらく新しい理論を採り入れようと欲するであろう。新奇なものはそれほど魅力あり、また進歩していないと見られることは、それほど辛いことなのである。少なくとも、生徒にその要領を示そうと欲し、彼らに通常の力学を教えるに先立ち、この力学はその時代が過ぎてしまった、たかだかラプラスの如き愚物に対してのみ役だつものであったと吹聴するであろう。かくて生徒は通常の力学に親しまないことになるであろう。

通常の力学は近似的のものに過ぎないと生徒に告げることはよいことであろうか。如何にも結構ではあろう。ただし、これはもっと後に至ってのことである。すなわち、彼等が力学の真髓に徹して、ただこの力学によってのみ考える習慣を得、これを忘れる危険のなくなったとき、かかるとき初めて人は彼等にその限界を教えても何等の不都合をも生じないであろう。

「科学と方法」のポアンカレの危惧は、まさに現在の我々の教育に問いかけられている。「材料力学が近似的なものに過ぎないと告げる。まだまだ扱える問題が山ほどある。」というような保身的な表現ではなく「真髓である」ことを真に学生たちに認知させることを通じて、確実な技術の進歩を担う人材を育成することが肝要であると考えらる。

古今の吊り橋にみる構造設計の課題



祖谷のかずら橋
(1646阿波国図)



Tacoma Narrows Bridge (1940)

人 ⇒ 横揺れ



Millennium Bridge (2000)

2年間通行止め。Nature でも
研究成果が取り上げられ社会的
関心に

風 ⇒ 縦揺れ

- 情報圧縮により粗視化したモデルに潜む見落とし
- 「駆動力」が規格・法律あるいは
解析者・設計者の過去の経験に基づいている
- 開放系のダイナミクスが重要



谷瀬の吊り橋(1954)
危険ですから
一度に20人以上渡れません。

Goalsアルゴリズム(Oden, 2002)

Goals(goal-oriented adaptive local solution)

A physical event is depicted by a **mathematical model**:

$$A(u) = F, \quad \text{in } V'$$

A goal is to calculate a **quantity of interest**:

$$Q(u) = ?$$

$$Q: V \longrightarrow \mathbb{R}$$

The problem is generally **unsolvable**, so it is replaced by a **surrogate problem**:

$$A_0(u_0) = F_0, \quad \text{in } V'$$

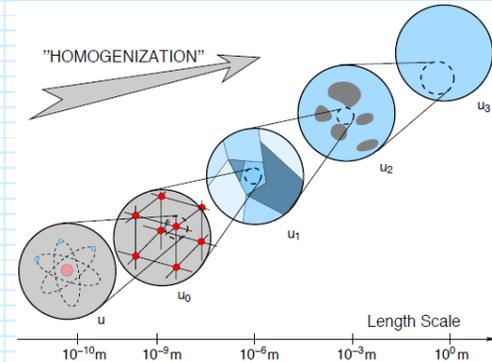
1) The (wrong) value of Q is:

$$Q(u_0) \neq Q(u)$$

2) Can we estimate the error?

$$\mathcal{E} = Q(u) - Q(u_0)$$

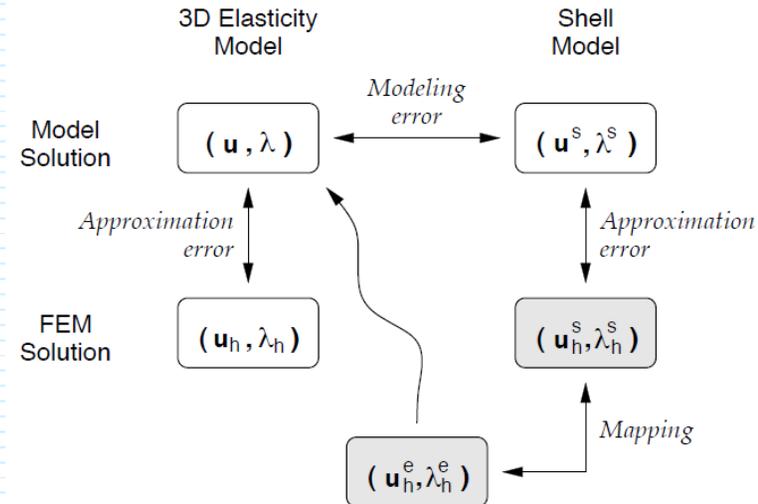
3) Can we **adapt** the surrogate model and **control the error**?



Major Open Problem:
Find homogenized model with $Q(u_0)$ close to $Q(u)$

$$Q(u) - Q(u_3) = \underbrace{Q(u) - Q(u_0)} + \underbrace{Q(u_0) - Q(u_1)} + \underbrace{Q(u_1) - Q(u_2)} + \underbrace{Q(u_2) - Q(u_3)}$$

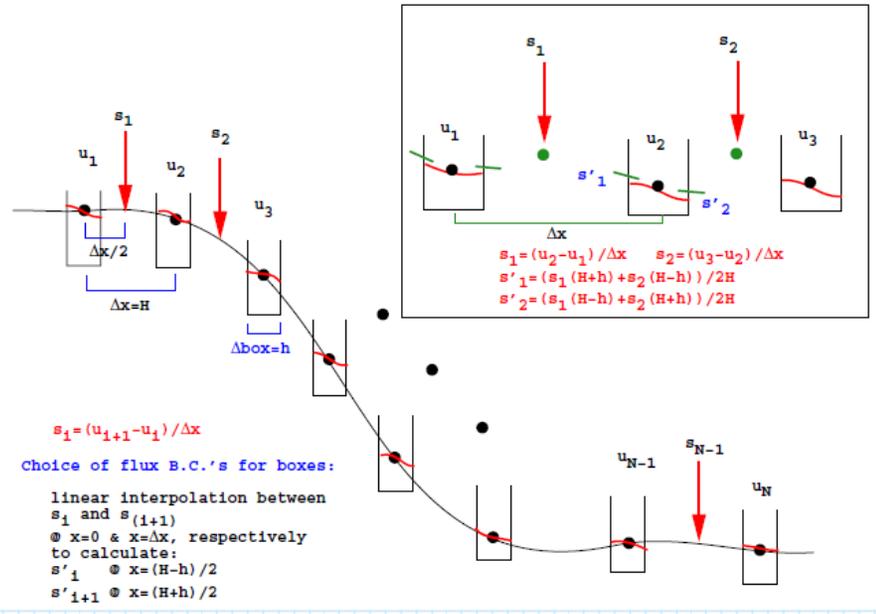
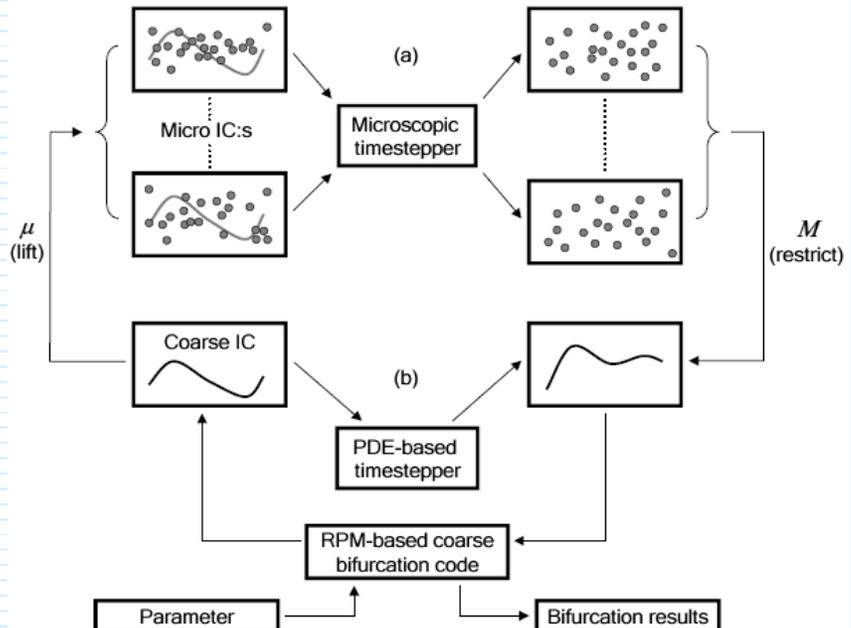
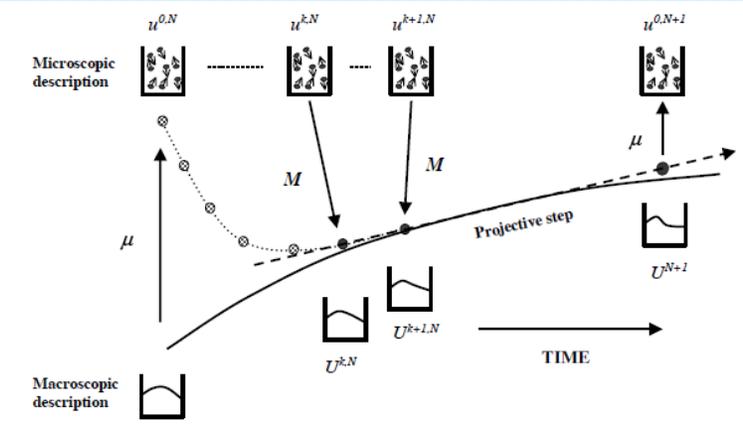
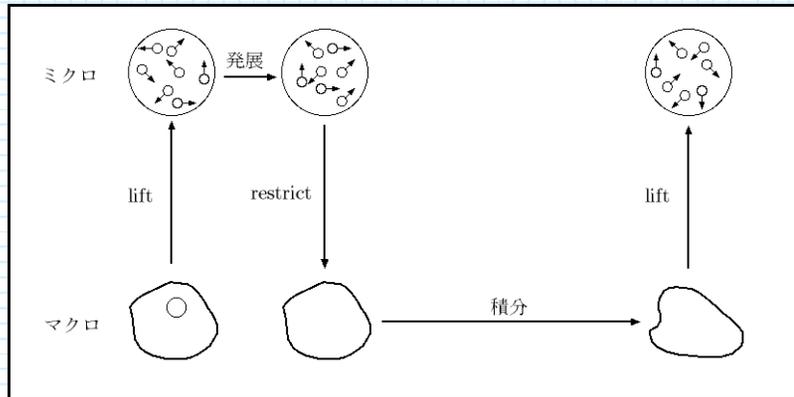
V&V: Verification and Validation
ソフトウェアとしての「検証と妥当性確認」
計算力学がエンジニアリング手法として
市民権を得るための重要な視点



Equation-Free法(Kervekidis,2003)

「駆動力」が何かを発見するための学問

研究者の直感に頼らない方法論のための方法論



エピローグ

- 材料力学の教育現場の意見を例示した。
- 材料力学の持つフィロソフィーとその応用について例示した。
- ポアンカレ「科学と方法」の中に現在の材料力学がおかれている状況に通じる記述を見出し、その解釈を通じて問題提起を行った。
- 計算力学との接点で今後重要となる二、三の話題に触れた。

**Mechanical Engineering
for the Next Generation**