

今の材料系CAE、現象記述＝モデル化？

辛平

CAEは、定義が色々あるものの、ありありとの中身で自明となっている。CAEは現象観測、現象記述、現象の数値解析のスパイラルによる技術課題の解決プロセスである。とりわけ現象のモデルを数値化方法で決められた手順で計算機上で行うことを特徴とする。CAEによる課題解決には汎用CAEツールの進歩が大きな役割を果たした。

材料系CAEは、敢えて機械系CAEと区別する言葉だが、厳密にその範囲を限定されない、できない。技術課題の解決という目的、さらにこの目的を達成するための基本手順は材料系CAEも機械系CAEも同じだが、現場のCAE技術者が工夫・苦勞している方向が偏っている。機械系CAEは基本的に決まった運動量、エネルギー輸送現象においても、数値計算アルゴリズムや離散化手法などには工面するのに対して、材料系CAEは、まず物理現象の抽出及び現象論の数学記述に大きな労力を落としている。この現象は、コンピュータハードウェアや汎用CAEツールに大きく関わり、材料系CAEを支えるプラットフォームはまだ機械系CAEほど構築されていないと言える。さらに、CAEの研究及びソフトウェア産業にとって、新しいCAE時代の課題と市場を意味しているではないか。

CAEによる技術課題解決の幾つかの事例を用いて、材料系CAEにおける現象記述、すなわちモデル化の重要性を強調する。現場においては、CAE技術者は不足し、真のCAE技術者が一握りだ。さらに、課題の解決には、このCAEの一連の手順をアレンジする感性も、粘り強く積極的に立ち向かう姿勢も重要だろう。これはもはやCAE範疇を超えた問題だろう。

講演内容

- 自己紹介
- コバレントマテリアルの概要
- CAEの実像
 - CAEとは
 - 材料系CAEの特徴
 - CAEの知識体系
 - 企業におけるCAE
- 解析事例紹介
- まとめ

コバレントマテリアルの概要



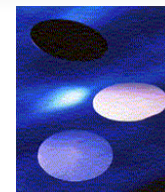
コバレントマテリアル株式会社
Covalent Materials Corporation

代表取締役 社長 香山 晋

MBO(マネジメントバイアウト)により2007年6月1日に東芝セラミックス株式会社から社名変更。

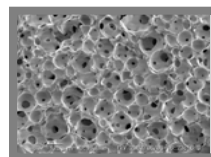
本社： 東京都品川区大崎
 創立： 1928年(昭和3年)9月
 資本金： 335億7,500万円
 売上： 960億円(2006年度)
 (連結)
 製品： 半導体産業向け石英ガラス製品、炭素製品、炭化珪素製品
 シリコンウエーハ
 ファインセラミックス
 工業用耐火物
 従業員： 約 1,300名
 (グループ全体: 約 2,600名)

“Silicon Wafers”



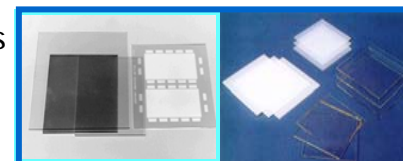
“Ceramics”

Semiconductor Process Materials



Opto-Materials

Bio-Ceramics



Advanced Ceramics

(Refractory and Other Products)

CAEの実像

材料開発

ガラスパイプから平板をつくれるか？

「管開き」という斬新な成形技術の開発に、**ガラス粘性変形の解析**が決定的な役割を果たした。

計算機シミュレーション

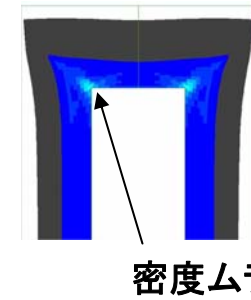
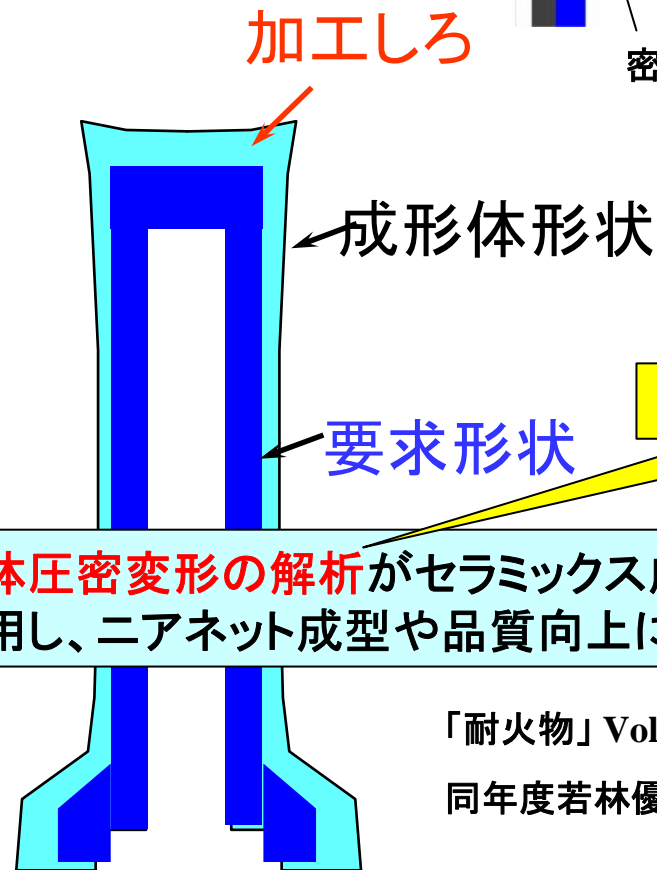
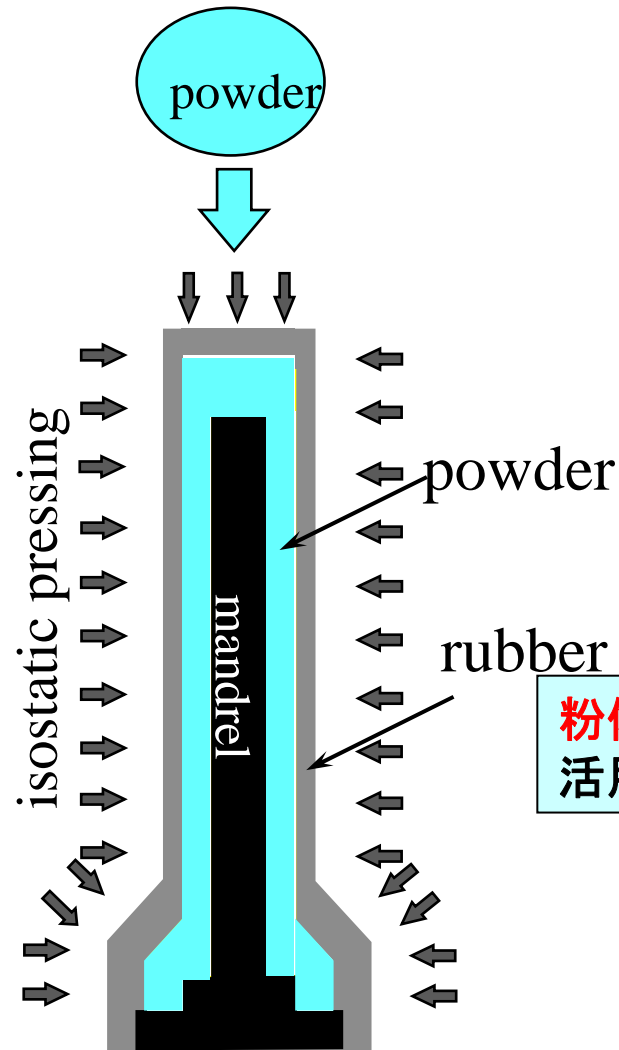
特許出願：特願2003-17991



CAEの実像

材料製造

CIP (Cold Isotropic Pressing)成形の圧密状態



粉体圧密変形の解析がセラミックス成型のゴム型設計に活用し、ニアネット成型や品質向上に寄与した。

「耐火物」Vol.53, No.11, 818-623(2001)掲載
同年度若林優秀論文賞受賞

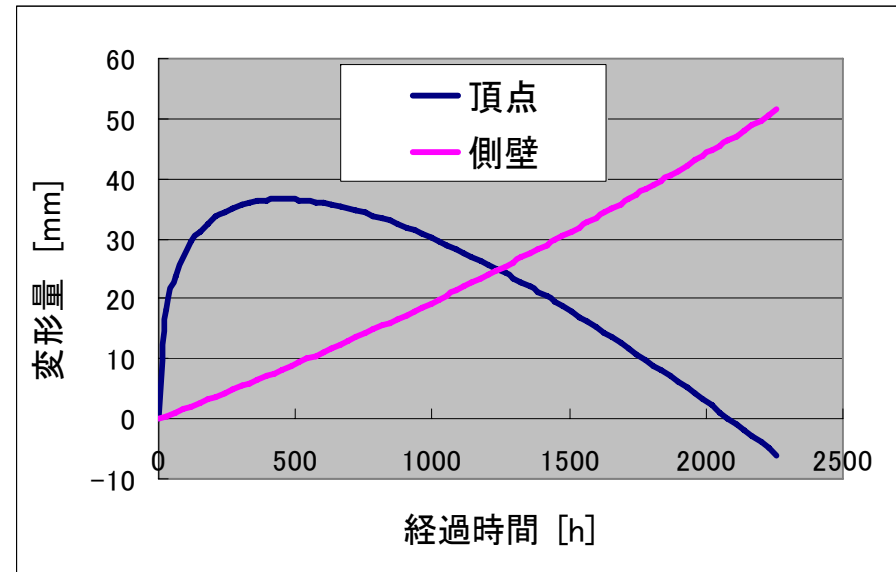
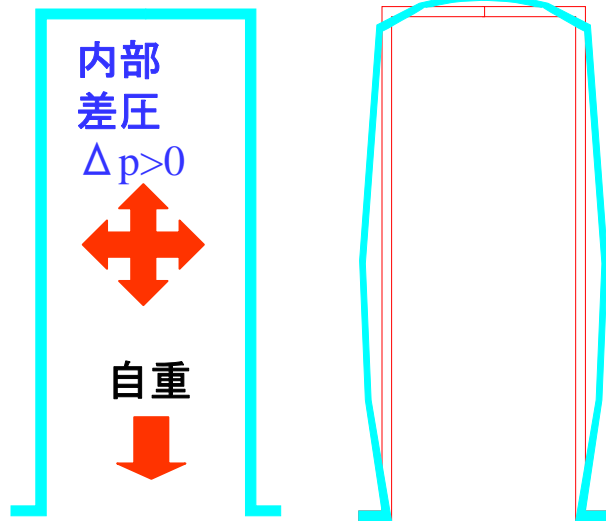
CAEの実像

材料使用

経時変形の原因

使用前

使用后



計算機シミュレーション

ガラス粘性変形の解析結果では、内圧により、天井の高さは膨らむが、自重により背が下がるという変形特徴を観察した。

CAEとは

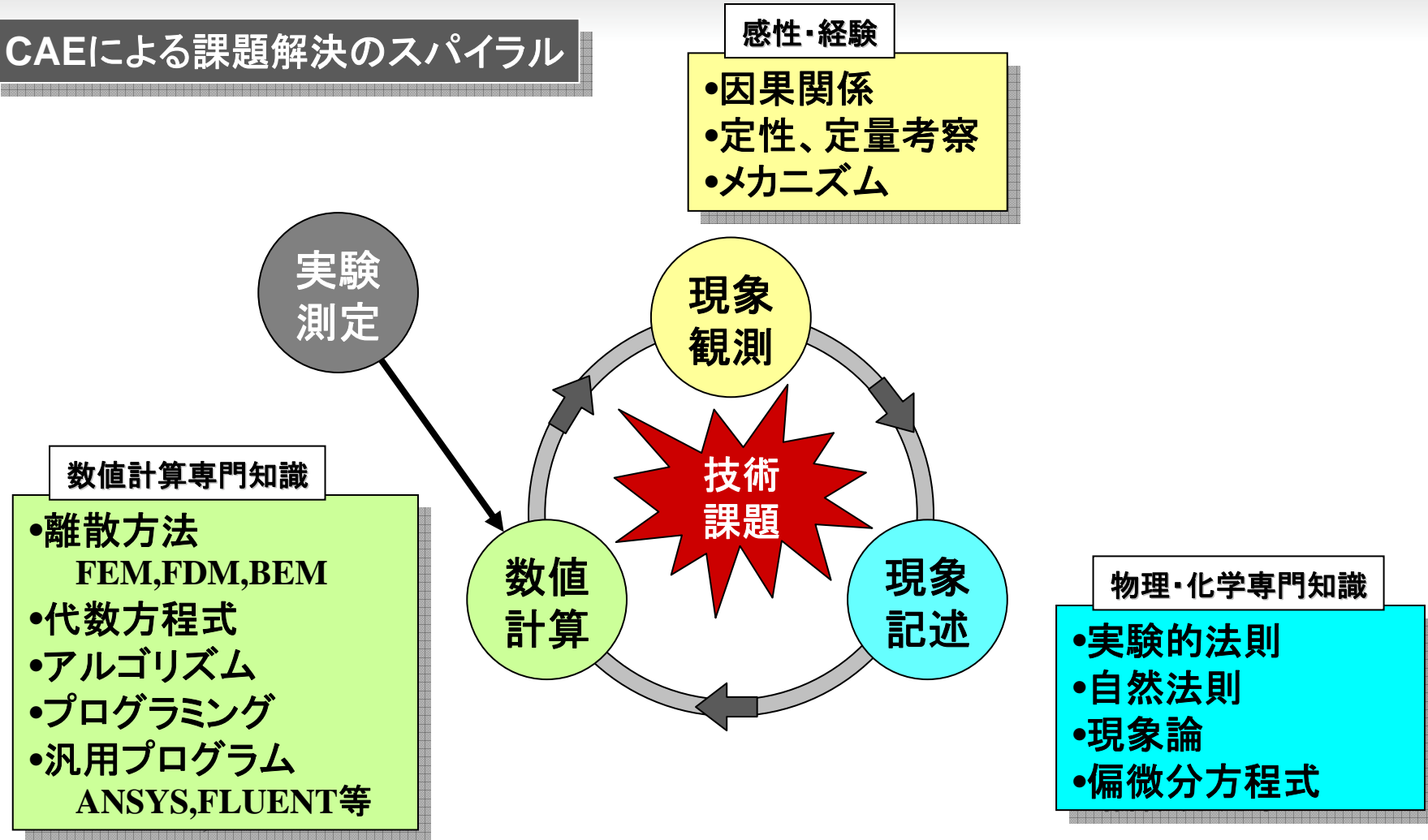
CAE: Computer Aided Engineering

- 狭い意味では、
「シミュレーション」、「解析」、「数値計算」
- 広い意味では、
課題解決の方法論
計算機シミュレーションの使用(実験の一部または全部代替)
物理現象の数学モデル化(計算機シミュレーションを可能にする)

この広い意味でCAEを確認しないと、CAE人材に必要な基礎・素質、CAE人材の育成方法を議論できないであろう。

CAEとは

CAEによる課題解決のスパイラル

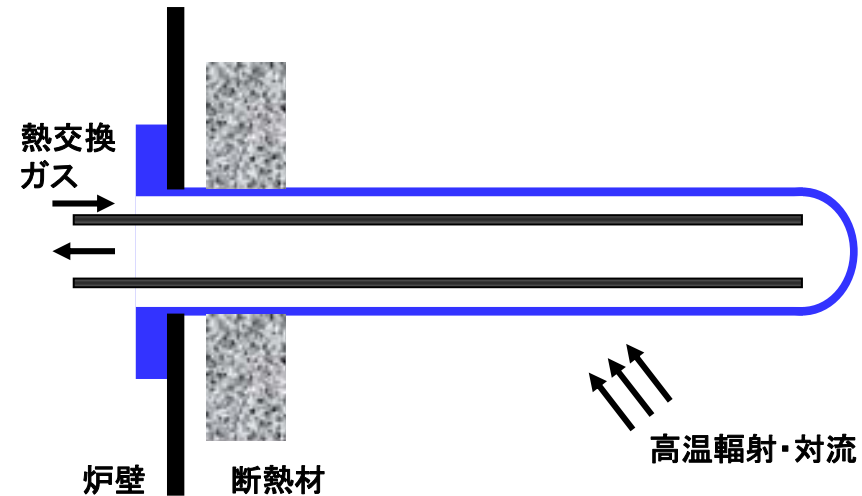
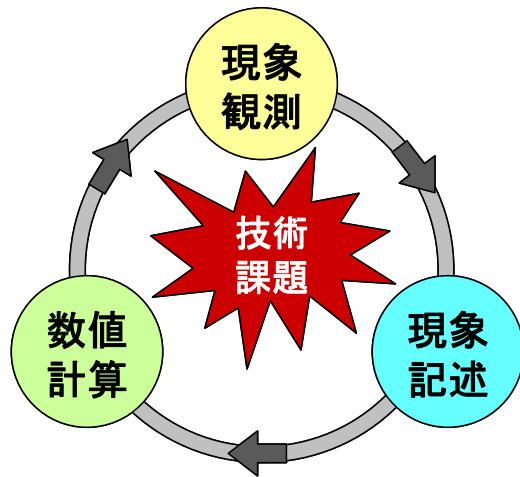


総合的・高度専門的な学問をベースにした課題解決の方法

CAEとは

CAEによる課題解決の事例

セラミック管が使用時に割れた！ 強度約400MPa



Spiral	現象観測	現象記述	数値計算
1	自重を支える問題	梁の曲げ応力	手計算: 01MPa
2	受熱端と固定端の温度差による熱応力	2D軸対称の伝熱モデル	温度差 $\Delta T=800^{\circ}\text{C}$ 熱応力 $\sigma=40\text{MPa}$
3	受熱部の周方向温度分布による熱応力	3D伝熱モデル	温度差 $\Delta T=350^{\circ}\text{C}$ 熱応力 $\sigma=300\text{MPa}$
4	フランジ部の剛性拘束	2D軸対称熱応力+拘束境界条件	フランジ根本部破壊

CAEとは

CAEによる課題解決の事例

セラミック管が使用時に割れた！ 強度約400MPa

Spiral	現象観測	現象記述	数値計算
1	自重を支える問題	梁の曲げ応力	手計算:01MPa
2	受熱端と固定端の温度差による熱応力	2D軸対称の伝熱モデル	温度差 $\Delta T=800^{\circ}\text{C}$ 熱応力 $\sigma=40\text{MPa}$
3	受熱部の周方向温度分布による熱応力	3D伝熱モデル	温度差 $\Delta T=350^{\circ}\text{C}$ 熱応力 $\sigma=300\text{MPa}$
4	フランジ部の剛性拘束	2D軸対称熱応力+拘束境界条件	フランジ根本部破壊

改善の指針

周方向温度勾配の低減

- 均一な受熱環境
- 不均一な放熱構造

● 利用した専門知識

「材料力学」, 「伝熱工学」, 「FEM」, 汎用ツール(ANSYS)使用

● 利用したテクニック

- Supercomposition: 応力起因毎に解析→単純化、要因明確
- 手計算(曲げ応力): 早い。数値(FEM)計算の検証になる
- 熱輻射、熱流体問題との分離: Spiralプロセス、単純化、経験
- フランジ拘束の経験: Spiral4での解析結果に単純に取られなかった

● 得られた知識

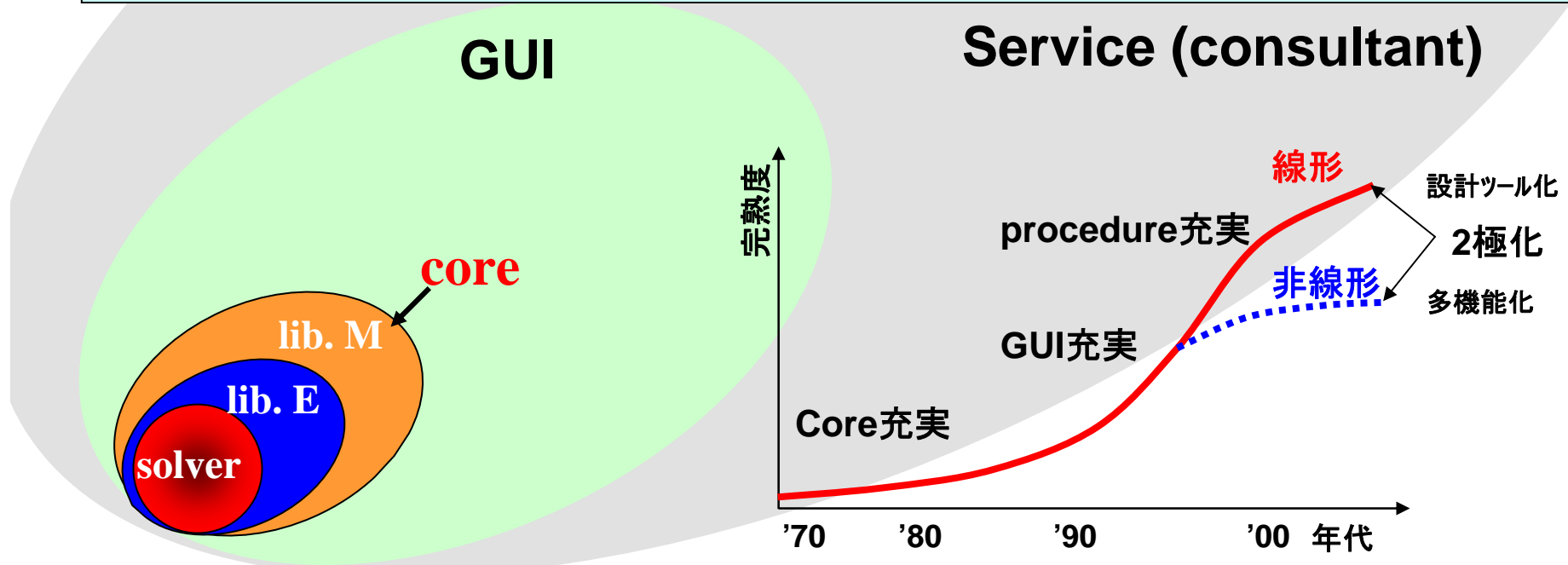
- 管は軸方向温度勾配に強く、周方向温度勾配に弱い構造体だ！
- 管は径方向の剛性が高い構造体だ！(だからフランジの剛性拘束が難しい)
- 改善の対策(……省略)

CAEとは

CAEツール

汎用FEM,FDM(FVM)プログラム、いわゆるCAEツールは段々完熟してきて、CAE普及にプラットフォームを提供した。

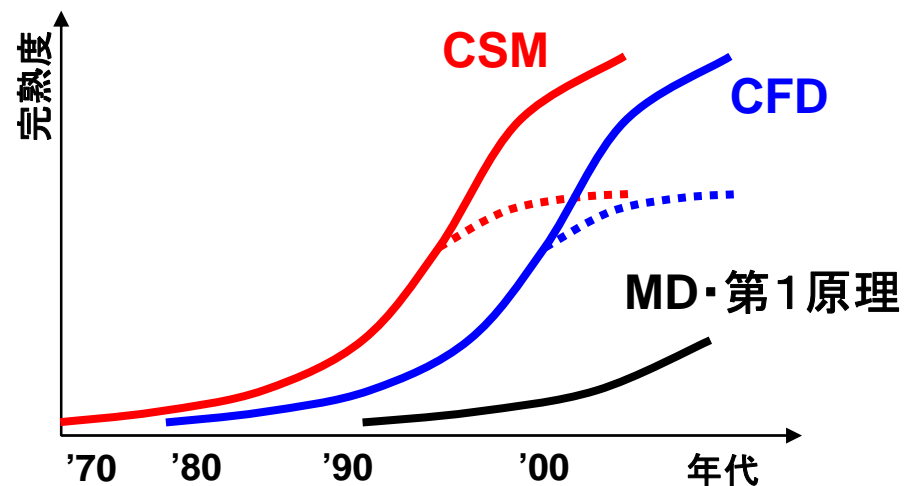
- ・1970年代から汎用FEMプログラム続々登場
ANSYS, MARC, MSC.Nastran, LS-Dyna, ABAQUS, FLUENT, CFX, STAR-CD等々
- ・1980年にSDRC社J. LemonによりCAE提唱
- ・1990年代後半から設計ツールと提唱:
DesignSpace, Workbench、I-Sight等々



CAEとは

解析対象問題で分類するCAE

- **CSM** (Computational Solid Mechanics)
応力・変形、伝熱、拡散、振動、電磁界、機構など
- **CFD** (Computational Fluid Dynamics)
流体、化学反応、燃焼など
- その他 (ex. 第1原理計算, Molecular Dynamics)
材料物性、物質構造など



材料系CAEの特徴

適用分野で分類するCAE

● 機械系CAE

- ・ 運動量やエネルギー輸送などの現象自体が比較的分かっているが、数学的に表現困難な部分がある(ex. CFDモデル)
- ・ 設計指向: CADとの統合環境、最適設計
- ・ メッシュ分割: 構造のまま、複雑な形状(モジュラー重要)

↓

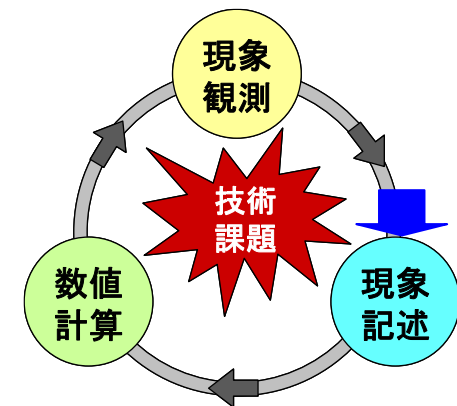
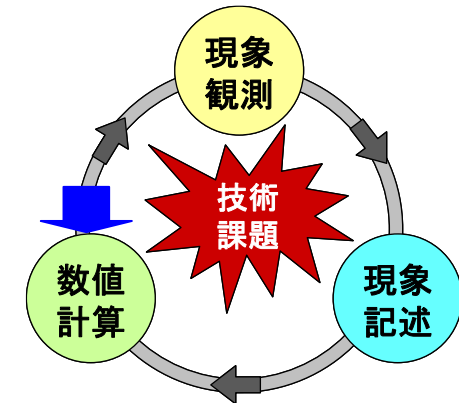
数値計算

● 材料系CAE

- ・ 質量輸送や化学反応などの現象自体が数学的に記述困難な部分がある(ex. 界面反応、非線形)
- ・ 解析指向: モデル自身の検証、物性値の推定・測定
- ・ 数学的なアナロジーが重要(既成のプログラムを利用)

↓

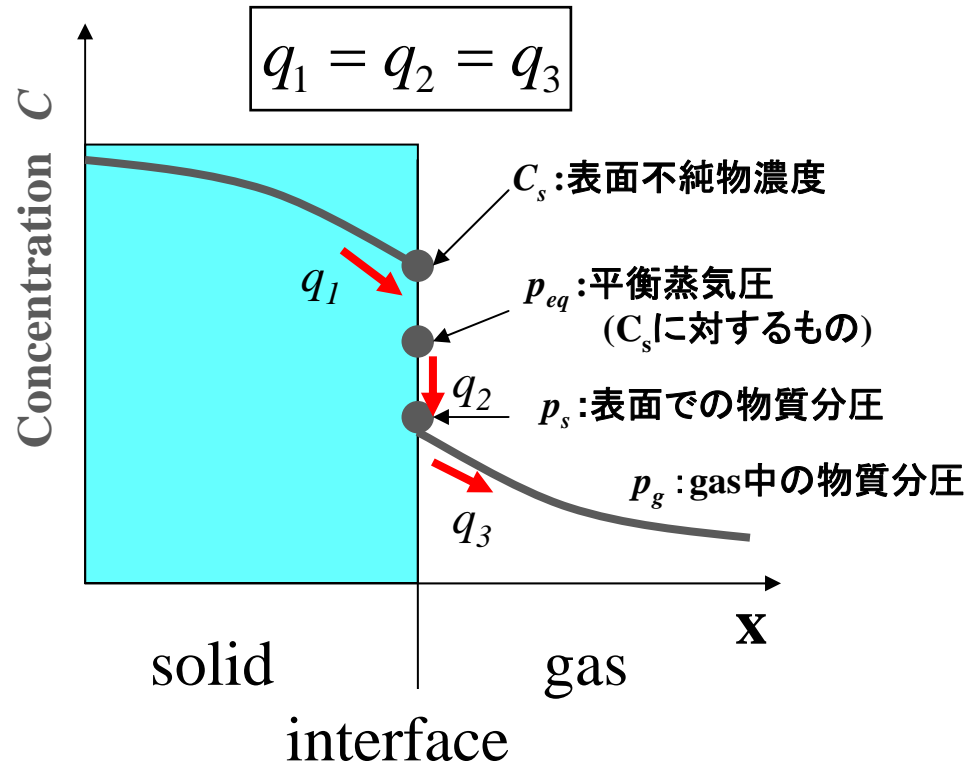
現象記述



材料系CAEの特徴

材料系CAEの例

界面反応モデル



solid側の拡散 $q_1 = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=h/2}$

D : solid内拡散係数

表面反応速度 $q_2 = k(P_{ep} - P_s)$

$P_{eq} = AC_s$

k : 反応速度係数

A : 活量係数

gas側の物質伝達 $q_3 = h_m (P_s - P_g)$

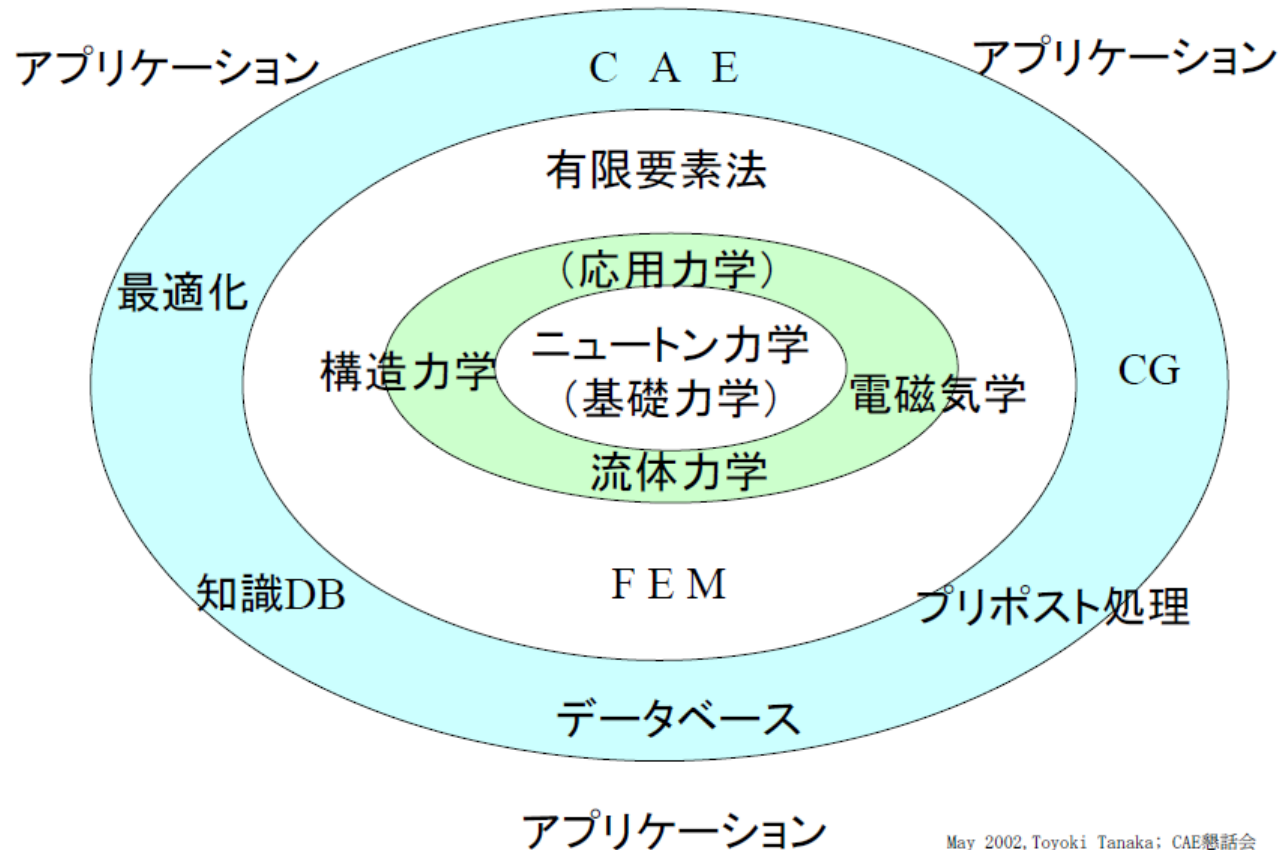
$h_m = f(Sh)$

h_m : 物質伝達係数

Sh : Sherwood Number

物質の輸送現象は熱伝導と相似(アナロジ)しているので、CAEツールの熱伝導の計算機能で数値計算できる。他の物理現象も同様なアナロジを持っている場合が多い。

CAEの知識体系



May 2002, Toyoki Tanaka: CAE懇話会

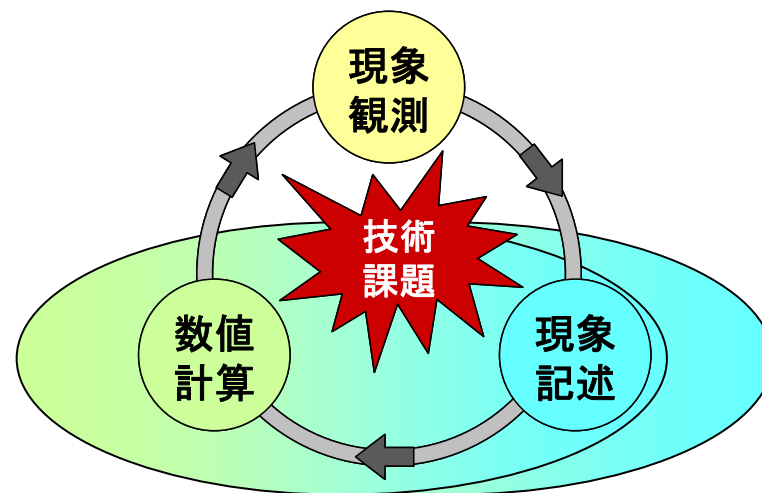
CAE人材は、人間の感性・経験以外にCAEの知識体系を通じて育てられる。しかし、4, 年間の学部授業でこの体系を教えるのは無理で、且つ、過度なCAEへの期待は適切ではないであろう。機械系の大学院生でもこの体系をマスターするのは希なケースであろう。

CAEの知識体系

大学のCAE環境構築

大学の研究においては、数値計算手法の研究者はより物づくりの物理現象を解明し、工学専門の研究者はより数値計算ツールを活用するためには、CAEツールが必要であろうか。

- ・CAEツールベンダーの潜在利用者拡大
- ・大学研究への支援
- ・CAEツール機能充実の基礎研究



ミシガン大学工学部のネットワーク・システム(CAEN: Computer Aided Engineering Network)には, ABAQUS, ANSYS, MSC.Nastran/Patran, HyperMesh, ADAMS, DADS, LS-DYNA, FLUENT, Moldflow, C-MOLD, I-DEAS, Pro-E, Unigraphics,などの, 構造や流体に関する,CAE,および,CAD,ソフトウェアが十分に整っていて, 工学部の学生であればいつでもどこからでも,24時間アクセスして使うことができるようになっている。

関口美奈子:土木学会誌=vol.88 no.8

企業におけるCAE

現状

- 製品開発には欠かせない存在
- CAEを活用できる技術者とできない技術者に二分化。
そのばらつきは非常に大きい
 - CAEの結果を自分で評価できるか否か
 - 真のCAE技術者は一握り
- CAE自体の使い勝手は向上し、使うことに対しての抵抗感がない。その反面、現象から物事を考えない傾向 (CAEの逆効果)

(株)東芝 大富浩一、「CAE工学教育シンポジウム」2005.2.25

CAE運用力

- **レベル1 (単独):**

技術者自身は直面している課題にCAE技術を適用する

- **レベル2 (共同):**

課題を解決するチームまたはPjにCAE担当技術者を配置する

- **レベル3 (依存):**

課題解決者からCAE専門者へのCAE依頼方式

CAE運用上の注意点⁽¹⁾

CAE技術を過度に神化したり軽蔑したりする傾向を避けよう！

神化した結果、軽蔑する道に導く。これはCAEのみではない話である。CAE解析には、物事を構成する法則（構成則）、取り扱う対象の部分を全体から切り出す境界条件の処理が必要である。**構成則（物性そのもの）や境界条件**を正しく設定しない限り、正しい解析結果が期待できない。CAEを行うために、物性を測定したり、境界条件を決めたり、解析結果を検証したりする実験は必要である。

これらの実験と上手くかみ合って、正しいCAEができる。どの程度で構成則や境界条件を正しく記述できるかによってCAEの解析確度がどの程度で得られるかを認識すべきである。

CAE運用上の注意点⁽²⁾

CAE解析結果を正確に理解、解釈しよう！

レベル1のCAE解析に対しては、研究者自身がモデルを構築、解析するため、結果に対する理解にはほぼ問題がないが、レベル2, 3のCAE解析に対しては、CAE技術者から課題解決者へ解析結果が受け渡され、正確に認識されずに適用されがちである。解析条件によって解析結果は大きく変わる。解析結果は確度で議論する。無闇に解析結果を実際の現象に当てはまったりしてはいけない。

また、商用CAEコードが利便性を提供する反面、解析の本質に対する認識不足は企業のCAEによくある。CAEツールをまわせば何とかの結果は出るし、それにCGで見栄えの良い絵も出る。あたかも本物のように信じ込んでしまいがちである。CAE技術者は**データ**よりも、**情報**を提供する工夫が必要である。

企業におけるCAE

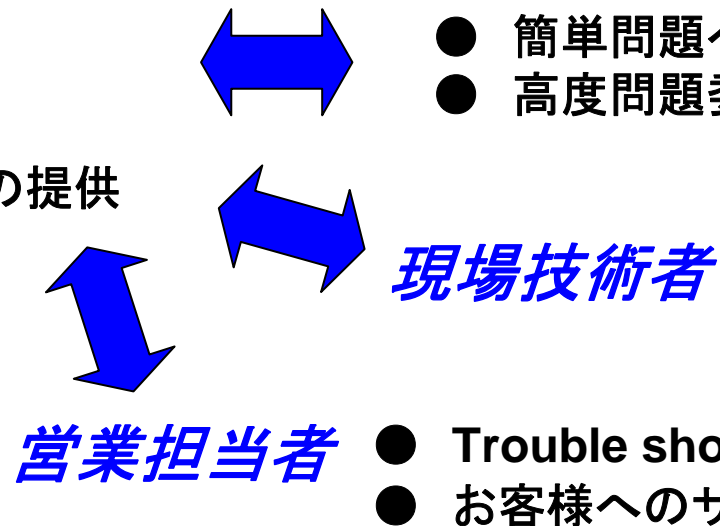
センター&サテライトの組織

センター

- 解析技術の開発、サテライトへの移管
- 依頼解析業務
- 検証テスト、物性値測定
- 技術者教育
- 解析ソフトウェア利用環境の提供

サテライト

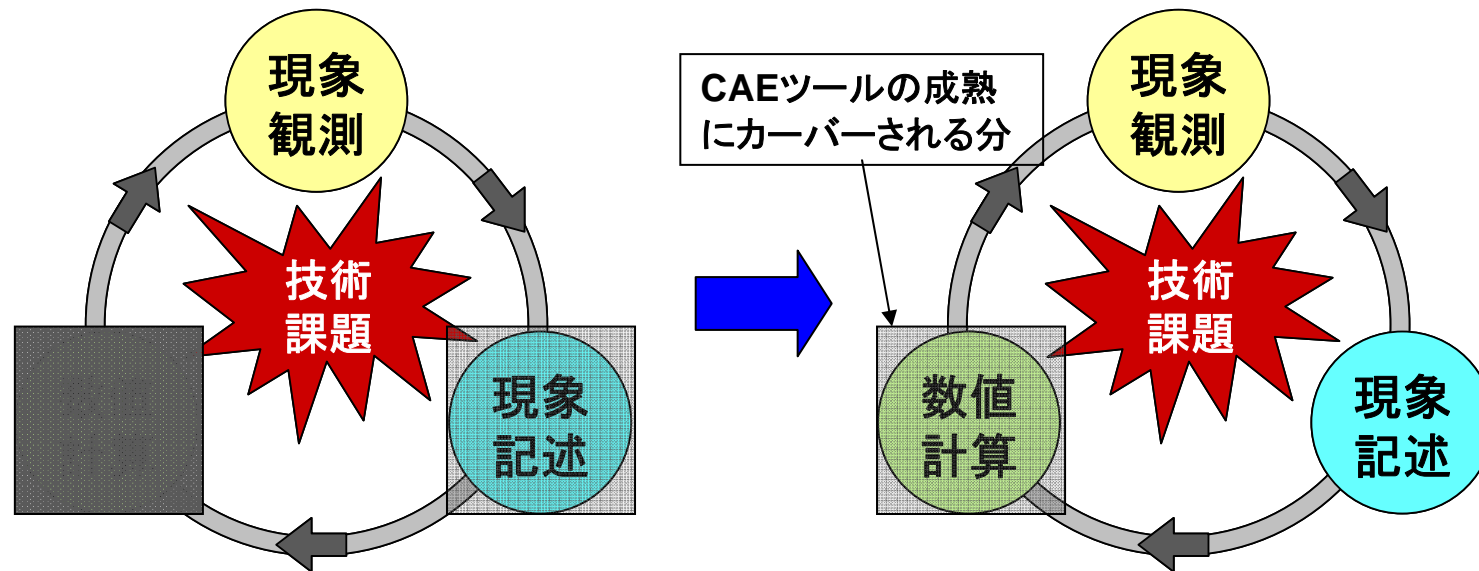
- 簡単問題への応用
- 高度問題委託の窓口



一握りの真のCAE技術者は牽引車になり、汎用CAEツールの利用を拡大していく。

企業におけるCAE人材育成

材料系CAEの人材育成 キーパーソンを獲得し、CAE利用拡大の推進役を果たしてもらう



人選

- ある程度のBG基礎
- 感性(結果予測)
- 動機・積極性

育成

- CAE応用の一流意識
- 支配方程式で物事を理解
- 汎用ツールの活用
- 結果精度の評価

企業におけるCAE

CAE人材育成の手順

入門

- CAEツールの使用
ベンダーの初級教育
- 簡単問題にOJT(On Job Training)
- 先輩のやり方習得

理論強化

- 現象記述力の向上
「材料力学」「伝熱工学」「流体力学」「輸送現象」、FEM
- 教科書の配布、輪講制度の推進
- 専門解析技術セミナーへの参加(非成形、ゴムなど)
- 解析事例における理論勉強の開催
無駄な計算がないか？解析精度がどのように見るか
- 社外発表への支援

新解析手法の開発

- CAE procedureの把握
「FEM」「FDM(FVM)」(一部汎用ツールにカバーされる)
- 汎用ツールUser subroutine & 専用ツールプログラミング
- 大学・研究機関・ベンダーとの共同開発、委託開発

企業におけるCAE

CAEへの認識向上&CAE技術の底上げ

コバレントマテリアル
シミュレーション技術基礎力アップ活動

コバレントマテリアル(株)では、2006年8月からシミュレーション技術基礎力アップ活動をスタートさせた。

この活動とは、社内プロジェクトで検討されてきた新“制度”。技術要素を単位とした全社横串のチームによる技術活動を指す。活動の理念として、「進化しつづける技術体系を構築するために、自由闊達かつ、部門をまたがる活動を通じ、基盤技術の競争力強化を図る。」を掲げている。

具体的活動内容は、技術情報交換会や見学会の開催、各部門の課題解決に知恵を出し合う、先端技術の調査などからなり、順次、高次元の活動にステップアップして行く。中心となって活動を遂行する“活動メンバー”は、10人程度で構成される。

解析事例紹介

1. 「石英ガラス粘性変形の解析」

- ・ 理論: 高粘性流体流動現象の剛塑性FEM解析
- ・ 発表: ① "Rigid-plastic finite element analysis for viscous bodies with high viscosity"
Int Sym Young Scholars on Mech. & Mat Eng for Sci & Exp(ISM2E-YS) 2001,
Changsha / Zhangjiajie, Hunan, P. R. China
② "高粘性流体の剛塑性FEM変形解析" MSCソリューションフォーラム2000(東京赤坂プリンスホテル)

2. 「粉体圧密成形における変形挙動の解析」

- ・ 理論: 圧縮性塑性変形の解析 / 成形特性の測定方法
- ・ 発表: ① "円筒単軸圧縮試験による粉体成形特性の評価方法" 「耐火物」, 53[11], 618(2001)
2001年度耐火物技術協会若林論文賞受賞
② "Method for Evaluation of Powder Compaction and Analysis of Compaction Processes
for Refractories", Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, 23[6], 2003

3. 「水素アニールにおけるSi-Wafer表層欠陥の消長挙動」

- ・ 理論: 固溶酸素の拡散と析出
- ・ 発表: ① "Simulation of Growth and Dissolution of Oxide Precipitates"
TOSHIBA CERAMICS' Seminar at SEMICON/west'93(San Francisco), 1993.7.22.
② "Numerical Modeling of Oxygen Precipitation Behaviors in Semiconductor Silicon Wafer"
Journal of Iron and Steel Research, Int.
Special Issue: Int Forum on Adv Mat & Sci(Anshan, China, June 2002)

まとめ

1. CAEは現象観測、現象記述、現象の数値解析のスパイラルによる技術課題の解決プロセスである。
2. 材料系CAEは現象記述によるモデル構築がより重要である。
3. 汎用CAEツールの新しい市場は材料系CAEで創出できろう。
4. 企業にはCAEが不可欠な技術だ。が、人材の不足！キーパーソンを確保し、中堅の育成に注力し、さらにCAEの認知度を向上させる。
5. CAEも課題解決のツール・方法の一つになりつつある。それ以上に課題に感性を磨き、積極的に立ち向かうことが重要。