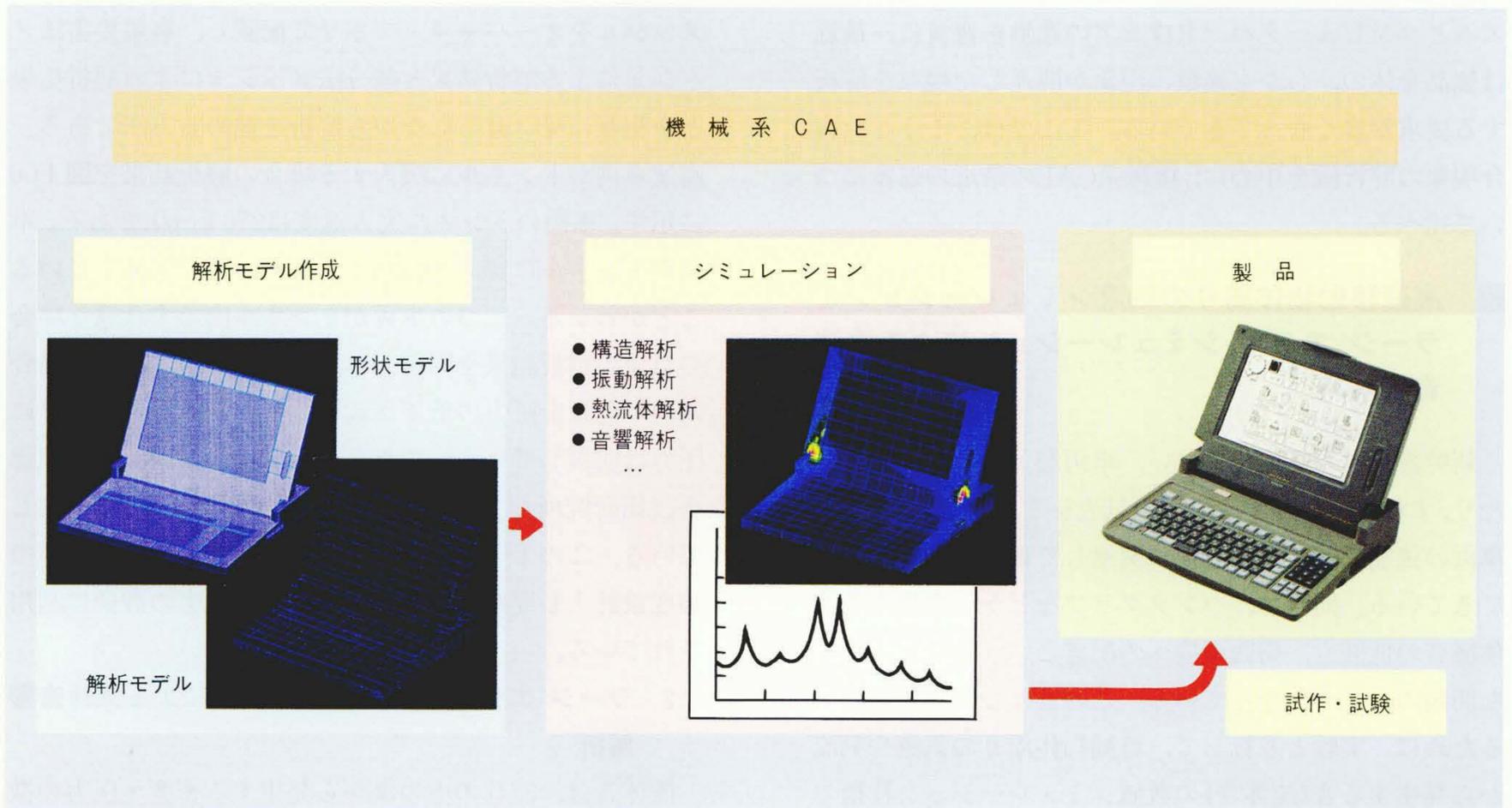


機械系CAEにおけるスーパーコンピューティング

Supercomputing in Mechanical Computer-Aided-Engineering

千葉 矩正* *Norimasa Chiba*
池川 昌弘* *Masahiro Ikegawa*
平澤 茂樹* *Shigeki Hirasawa*
江澤 良孝* *Yoshitaka Ezawa*
小久保 邦雄** *Kunio Kokubo*



注：略語説明 CAE (Computer Aided Engineering)

シミュレーションによる製品開発支援 機械工学のさまざまな分野での解析技術が機械系CAEとして再統合され、製品開発に役立てられている。

新製品開発での開発費用の削減と開発期間の短縮には、事前に技術的検討課題の摘出と対策を行い、試作・試験を可能なかぎり減らすことが有効である。機械系CAE (Computer Aided Engineering) は、こうした製品開発の効率化・設計の合理化に、さらに最適設計に用いられている。熱流体解析や構造振動解析など機械系の基盤解析技術がコンピュータシミュレーション技術として統合・再編成され、解析対象の幾何モデリング技術、およびコンピュータビ

ジュアライゼーション技術と合わせて、機械系のCAEシステムを構成している。

解析アルゴリズムとコンピュータハードウェアの急速な進歩により、シミュレーションの対象は部品単位の解析から製品全体の解析へ、また扱う現象も流体、熱、構造、音響などのそれぞれ独立した単一の現象から、これらの複数の現象が関連した現象を含む方向へと移りつつある。

* 日立製作所 機械研究所 工学博士 ** 工学院大学 機械工学科 工学博士

1 はじめに

熱流体解析、構造振動解析などの物理現象の解析を行う機械系CAE(Computer Aided Engineering)は、製品設計・試作の種々のフェーズで技術的検討のための不可欠のツールとなっている。従来、CAEでは部品単位の単一現象の解析を扱うのが一般的であった。解析アルゴリズムとコンピュータハードウェアの進歩を背景に、最近では製品全体の、しかも複数の現象が関連した現象を解析する要求が多くなってきている。ここでは、こうした複合現象の解析例を中心に、機械系CAEの最近の進歩について述べる。

2 高速移動物体周りの気流シミュレーションとラージエディシミュレーションによる流体音響解析

新幹線車両の高速化に伴い、車両がトンネルに突入したり、すれ違ったりする場合の気流シミュレーションが、車両の強度設計や乗り心地に関連して重要な課題となってきている。同時に、パンタグラフなどから発生する流体騒音の低減も、周囲環境への配慮という観点から重要な問題のひとつとなっている。このような問題を解析するために、実験と並行して、移動物体周りの気流や気流から発生する音(流体音)の数値シミュレーション技術の開発を行っている。

2.1 高速車両周りの気流シミュレーション

高速車両がトンネルに突入したり、すれ違ったりする

場合の気流解析では、解析領域の形状が時々刻々変化するために、従来の解析法ではそれに応じてメッシュを再分割する必要があり、解析がきわめて困難であった。そのために、形状の複雑な車両周りは有限要素法を用いて解析し、それ以外は計算速度の大きい差分法を用いて解析する複合解析技術を開発した¹⁾。これは、差分法によって分割された流路メッシュに、移動物体近傍の有限要素メッシュをオーバーラップさせて配置し、有限要素法メッシュによる解析結果と差分法メッシュによる解析結果とを相互に受け渡ししながら解析を進める方法である。高速車両がトンネルに突入する場合の解析結果を図1(a)に示す。車両のトンネル突入速度は270 km/hである。車両がトンネルに突入直後から急激に圧力が上昇していることがわかる。二つの車両がトンネル内ですれ違う場合の気流の解析結果を同図(b)に示す。車両がすれ違う場合は逆に急激な圧力の低下が起こっており、その後徐々に圧力は回復している。これらの結果は、財団法人鉄道総合技術研究所などで得られている実験データ²⁾に一致している。このような気流のシミュレーションは、車体の強度設計上必要な、車体に作用する空気力の評価に利用されている。

2.2 ラージエディシミュレーションによる流体音響解析

流体音は、流れの中の渦から発生する密度・圧力の微小な変動である。したがって、理論的には、圧縮性を考慮した非定常ナビエ・ストークス方程式を解いて流体音を求めることが可能である。しかし、一般にマッハ数の

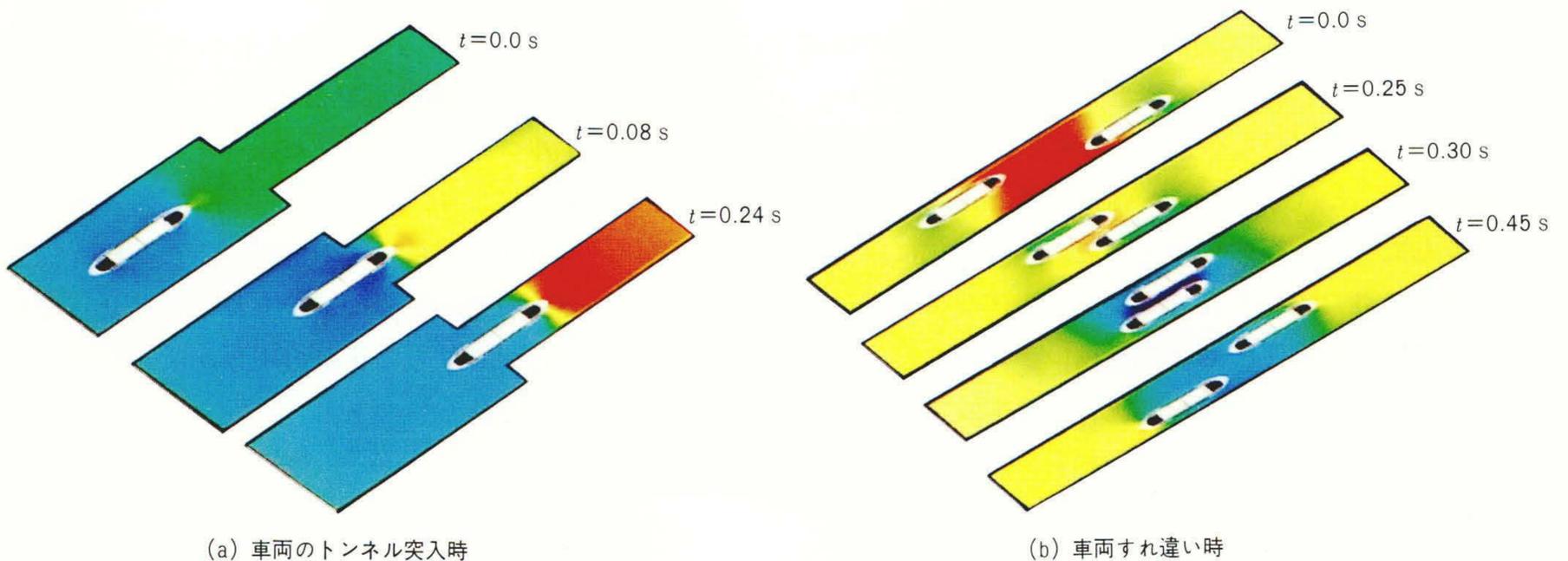
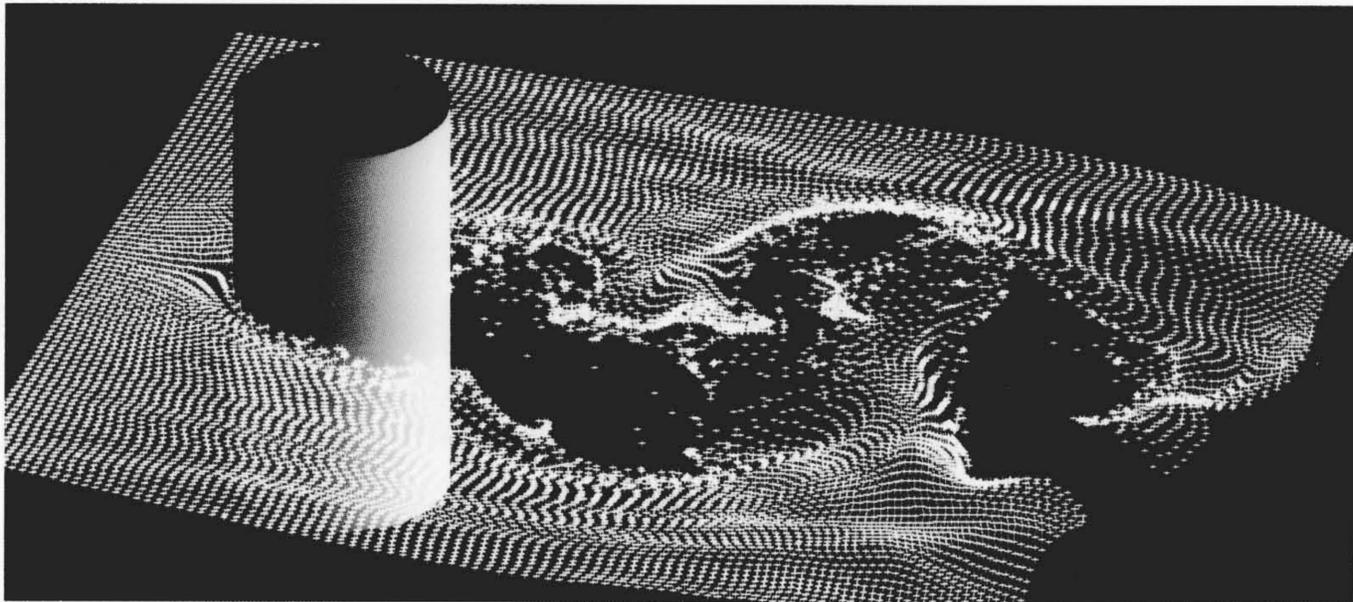


図1 複合メッシュを用いた高速車両周りの気流解析 色は圧力を表し、青色→緑色→黄色→赤色の順に高圧を表す。トンネル突入時には圧力が上昇し、逆にすれ違い時には急激な圧力低下が起こることがわかる。



(a) 流れの構造

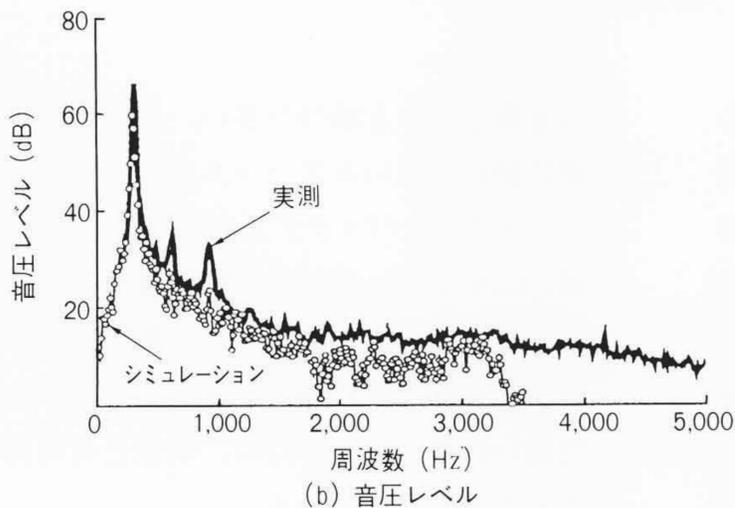


図2 円柱から発生する流体音の解析
(a) カルマン渦と呼ばれる大規模渦に、微小な乱流渦が重ね合わさった複雑な乱流渦の構造が認められる。(b) 低周波数域の鋭いピークは、(a)のカルマン渦によるものである。

小さい流れ場では、音の波長スケールが渦の長さスケールよりもはるかに大きくなるため、流体音を圧縮性ナビエ・ストークス方程式から直接計算するためには非常に多くの空間メッシュが必要となる。そこでまず、音源領域での渦の挙動をラージ エディ シミュレーションによって求め、次いで流体音の伝搬を計算するというアプローチをとる³⁾。

このようなアプローチによって、流れの中に置かれた円柱から発生する流体音を解析した結果を図2に示す。円柱近傍の乱流渦の構造を計算したものを同図(a)に示す。カルマン渦と呼ばれる大規模な乱流渦とともに微小な乱流渦が見られる。音圧スペクトルの計算値を実験値と比較した結果を同図(b)に示す。低周波数域に見られる鋭いピークは、前述のカルマン渦によるものである。解析結果は、3,000 Hz以下の周波数域では5 dB以内の差で実験値と一致している。

3 伝熱・流れ・変形の複合解析

伝熱の形態として、熱伝導・対流・輻(ふく)射、さら

に固体の溶融、液体の沸騰などの相変化がある。多くの伝熱問題では、それらのいくつかを組み合わさり、さらに流れや熱変形、化学反応などが同時に関連している。したがって、伝熱現象の解析には、これらの複合現象をシミュレーションする必要がある。有限要素法の熱流体計算プログラムをベースにして、モンテカルロ法による輻射計算など他の計算プログラムとの入出力データファイルを共通化し複合解析を行った。

エアコンディショナによる空気暖房と電気カーペットによる輻射暖房を併用した居室環境で、人間が感じる温度をシミュレーションしたものを図3に示す。体感温度は、デンマーク工科大学から提案されている計算式⁴⁾を用い、空気流速、空気温度、輻射温度、着衣量、代謝量などの関数として計算する。同図で黄色の部分に快適と感じる温度を示し、エアコンディショナと窓の近くを除いて室内全域がほぼ快適な温度であることがわかる。快適性のよい空調システムの開発に利用している。

光ディスク(相変化記録型)の内部の熱変形をシミュレーションした結果を図4に示す⁵⁾。光ディスクはコンピ

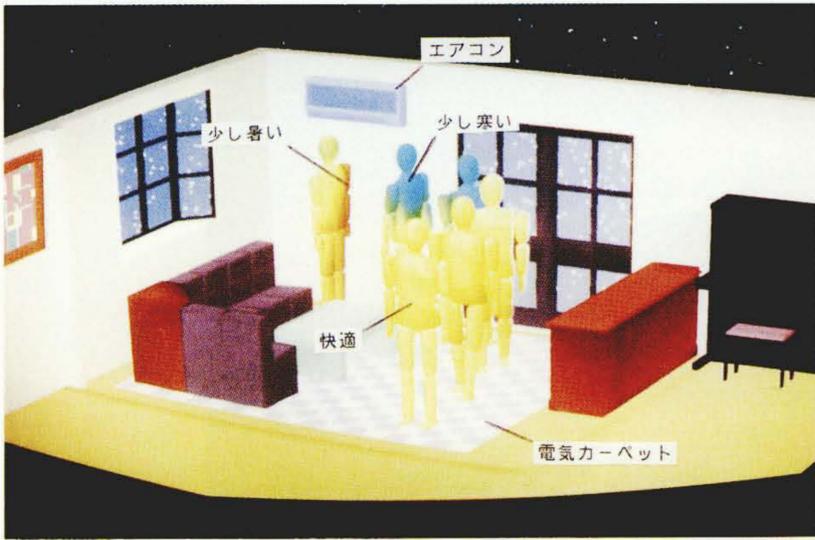


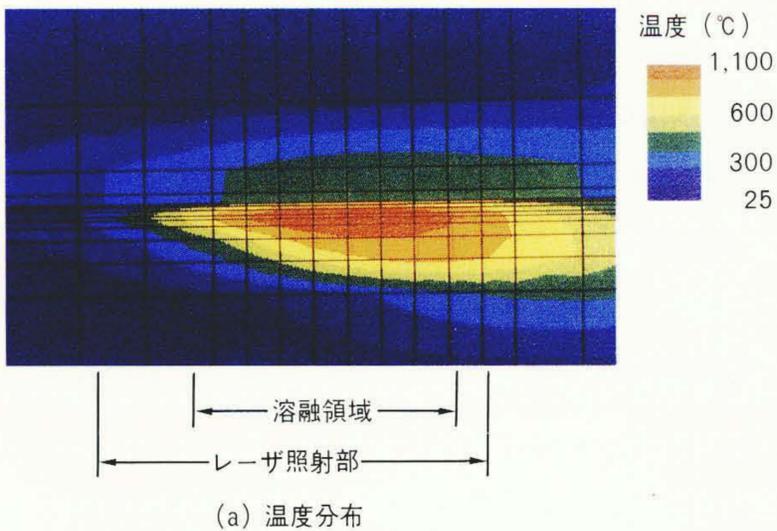
図3 居室環境の快適性評価 エアコンディショナによる空気暖房と電気カーペットによる輻(ふく)射暖房を併用した場合の体感温度を計算した。

ュータ出力などの膨大な情報を記憶する装置として使われている。記録原理は、回転するディスクの記録膜に強いパワーのレーザー照射によって記録膜を溶融させると非晶質化し、一方、弱いパワーのレーザー照射によって融点以下に加熱すると結晶化することを利用するものである。ディスクの同じ位置に書き換えを繰り返すと、記録膜がわずかずつ流動し変形するので、書き換え可能な回数が制約されるという性質がある。同図は長さ1 μm の微小な領域に、レーザーを 10^{-7} 秒瞬間照射した場合のシミュレーション結果であり、分子オーダの変形量を評価し、光ディスクの信頼性を向上させるのに用いている。

4 接触変形解析

4.1 境界要素法による接触応力解析

機械部品では、接触部、摺(しゅう)動部の特性が製品



(a) 温度分布

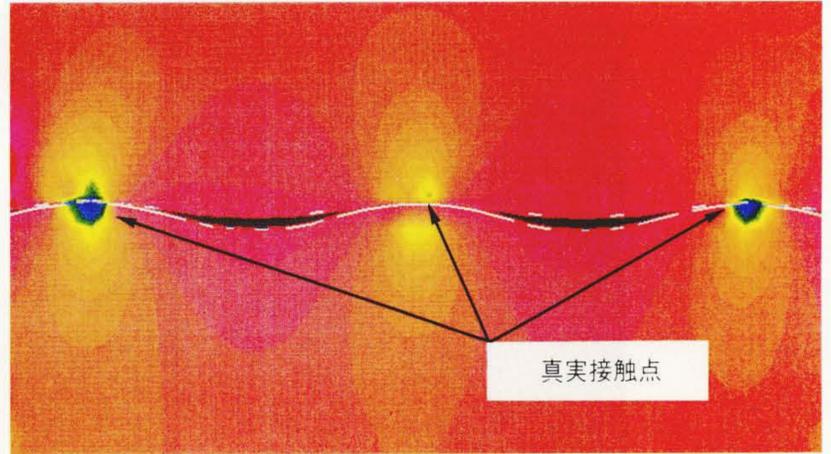
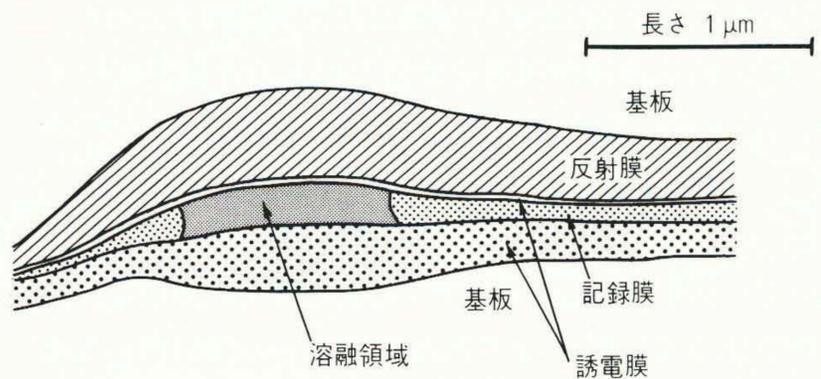


図5 ミクロコンタクト接触解析例 ミクロな表面粗さを考慮した解析であり、真実接触点近傍(ミクロな視点で見たときの接触部)で応力が高くなっている様子がわかる。

の寿命を決める場合が多い。コンピュータの外部記憶装置に使われているスパッタディスクは、その代表的な例と言える。スパッタディスクは、アルミ基板にNi-P下地層、Cr中間層、磁性層、保護層などが積層されている。これらの多層薄膜の厚さは、数十ミクロンから数ナノメートルのオーダであり、基板の厚さ1.9 mmに比べてけた違いに薄い。このため、基板を有限要素法でモデル化することは困難である。

これに対し境界要素法(Boundary Element Method)は、解析対象の境界部だけを要素分割すればよく、このような解析に向いている⁶⁾。

解析例を図5に示す。垂直方向の応力を表示している。接触面は表面粗さを想定した凹凸を付けた。ミクロな接触部を真実接触点と言い、その部分で応力が高くなっている様子がわかる。



(b) 熱変形量分布(変形量を300倍に拡大して示す。)

図4 光ディスクの情報記録時の熱変形評価 レーザを短時間(10^{-7} 秒)照射したときに、溶融を伴いながら生じる温度分布(a)と熱変形量分布(b)を計算した。

有限要素法で接触点近傍の値を正確に計算するには、接触点近傍での要素分割を領域内部までかなり細かくする必要があり、そのための作業量が多くなるが、境界要素法では接触点近傍での表面だけを細く要素分割すれば精度のよい解が得られる。

表面の膜と基板を同時に解析するときは、境界要素法と有限要素法を同時に用いるハイブリッド型の解法が有効である⁷⁾。すなわち、基板に境界要素法を用い、多層膜に有限要素法を適用すればよい。

摺動時に内部にき裂が生じ、それからはく離が起こる

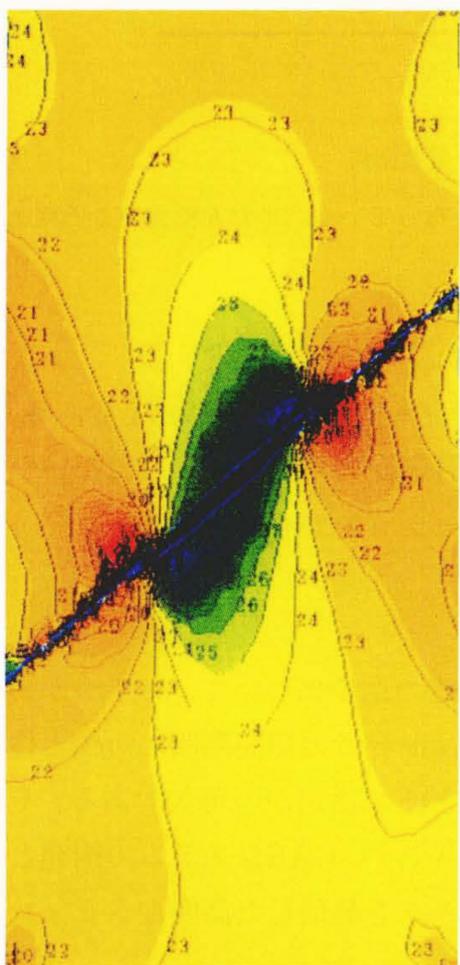


図6 斜めき裂応力分布
斜めに引張荷重がかかったときのき裂周りの応力分布を示す。

ことがあるが、このようなき裂の解析にも境界要素法は有効である⁸⁾。斜めき裂に引張荷重を加えたときの最大主応力の分布を図6に示す。き裂先端にはき裂の特性を表す特殊な境界要素を用いており、破壊が進行するかどうか、簡単に判断することができる。

4.2 塑性加工シミュレーション

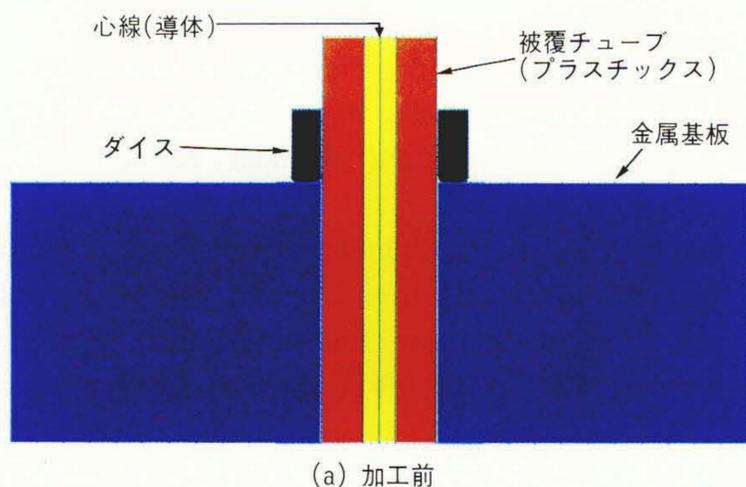
有限要素法による接触大変形解析技術の進歩により、生産技術、特に塑性加工過程のシミュレーションが実用化しつつある。加工法として長い伝統と経験がある塑性加工法を、応力解析の観点から、あるいは加工寸法の最適化の観点から見直すのに有効である。

ハーメチックシールで、プラスチック被覆導体の締め付け加工過程をシミュレートしたものを図7に示す。ダイスの押し付けにより、金属基板が塑性流動を起こし、被覆チューブが大きくへこんでいる様子がわかる。同時に、塑性流動が生じた金属基板に、半径方向の負の残留応力の生じていることもわかる。このようなシミュレーションは被加工材の強度評価に、さらに加工量の最適化の指針を得るのに利用されている。

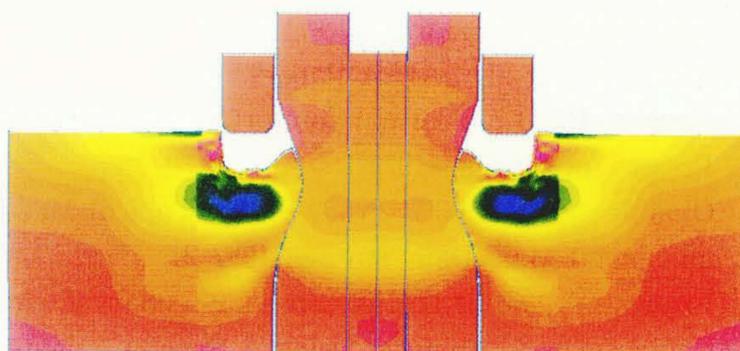
5 円筒容器の座屈解析

大型液体容器は大きな地震のもとで座屈変形を生じる可能性があるため、容器と内部液体との連成振動を考慮した解析が必要である。静的なせん断荷重に対する短い円筒容器の座屈挙動のシミュレーション結果⁹⁾を図8に示す。

円筒下部に鏡板がない場合とある場合との座屈モードについての比較を同図(a)に示す。この解析では、塑性および大変形双方の非線形効果が考慮されている。同じ計算結果の荷重-変位関係を同図(b)に示す。せん断荷重 P



(a) 加工前



(b) 加工後の応力分布

図7 ハーメチックシール加工のシミュレーション (a)は加工前の形状を示す。(b)は加工後の形状であり、色は半径応力を示す(赤色：引張り、青色：圧縮)。ダイスの押し付けによって大きく塑性変形した部分に、圧縮の残留応力が生じている。

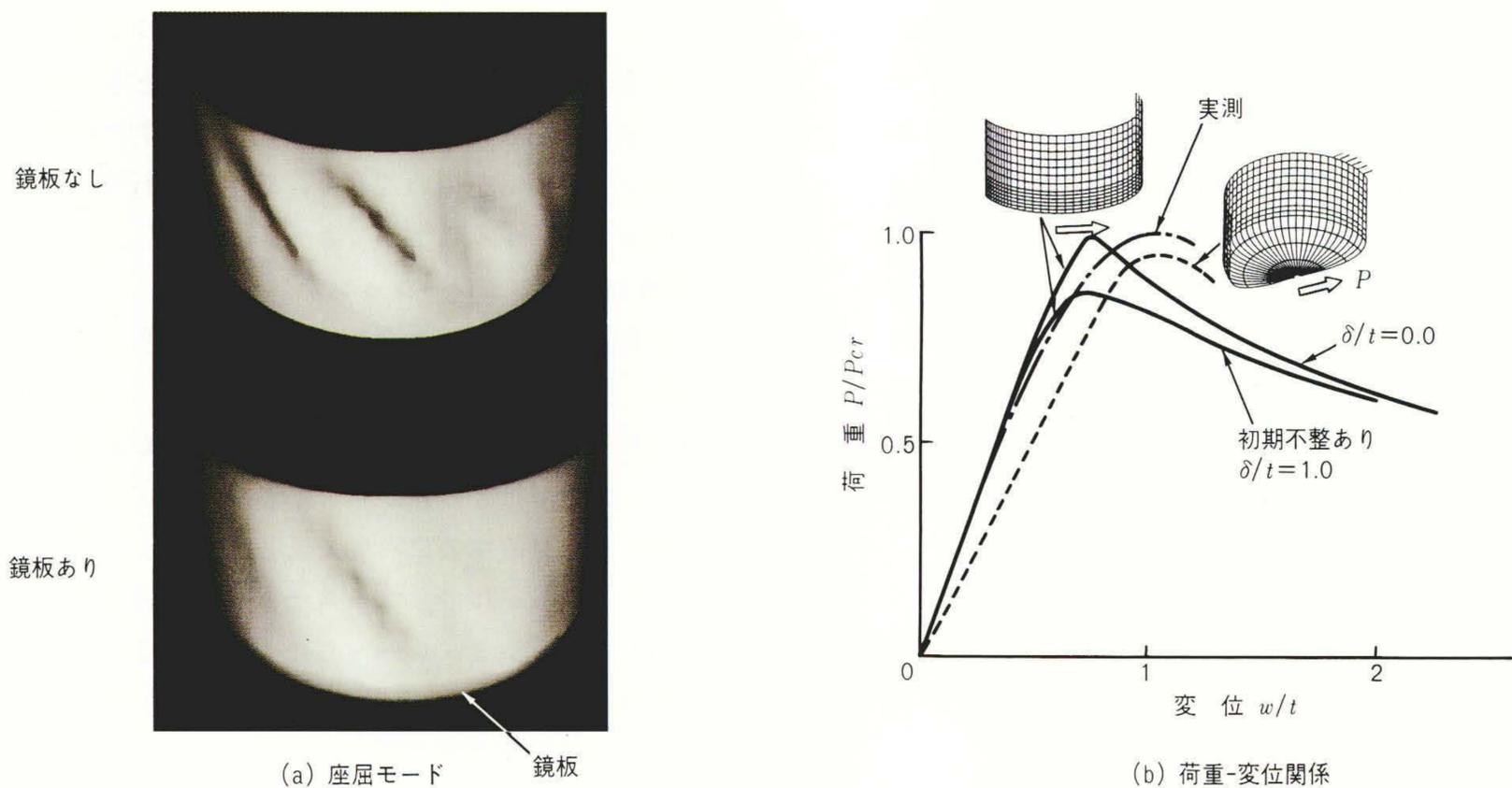


図8 せん断荷重を受ける円筒の座屈シミュレーション (a) 鏡板があるために座屈のしわが小さくなっている。(b) せん断荷重と円筒上端での変位との関係を示す。

は初期不整がない場合の理論座屈荷重 P_{cr} により、また変位は円筒上端の変位 w を板厚 t で正規化して示してある。同図(b)には、円筒の初期不整(ただし、不整量 δ は円筒の板厚 t によって正規化してある。)の影響の解析結果も示してある。また、同一の荷重モードに対する実測結果もあわせて示してある。同図(b)から、このような荷重モードでは、初期不整や鏡板の有無によって座屈荷重は大きな影響を受けないことがわかる。

一般に円筒構造の座屈には、境界条件、初期不整、荷重モードなど各種の要因が影響することが知られている。これら各種の影響因子を実験あるいは解析によって

解明するには、多くのパラメータサーベイが必要である。実験では影響因子の分離評価が必ずしも容易ではないため、このようなシミュレーションが有効である。

6 おわりに

以上、機械系CAEの最近の進歩について、いくつかの例を中心に述べた。新製品開発での開発期間の短縮と性能・信頼性の向上には、CAEの活用が不可欠である。そのために、より高度で使いやすいCAEシステムの開発と同時に、最新のコンピュータを駆使した高度なシミュレーション技術の開発を進めている。

参考文献

- 1) Ikegawa, M., et al. : ASME W.A.M.1992
- 2) 山本 : 鉄道技術研究所報告, 871(1973)
- 3) Kato, C., et al. : AIAA Paper93-0145
- 4) Fanger, P. O., Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen(1970)
- 5) Okamine, S., et al. : Proc. SPIE, Topical Meeting on Optical Mass Data Storage(1992-2)
- 6) Ezawa, Y., et al. : High-Speed Boundary Element Contact Stress Analysis Using a Super Computer, Boundary Element Techniques, Computational Mechanics Publications(1989)
- 7) Ezawa, Y., et al. : Development of Contact Stress Analysis Program Using the Hybrid Method of FEM and BEM, 13th Int. Conf. Boundary Element Method in Engineering(1991)
- 8) Ezawa, Y., et al. : Singularity Modeling in Two-and Three-Dimensional Stress Intensity Factor Computation Using the Boundary Element Method, Boundary Elements VII, Springer-Verlag(1985)
- 9) 小久保, 外 : 円筒かくのせん断座屈の解析(第2報, 組合せ荷重の影響), 日本機械学会論文集(A編), 58, 547, 436(1992-3)