

(解説)

数値流体力学(CFD)が設計者に関く新しい世界

満田正彦(工博)*・細川佳之*・織田 剛*・小林利行*・赤松博史**・山田 斉***

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー・高砂機器工場 ***都市環境・エンジニアリングカンパニー・原子カプラント部

Computational Fluid Dynamics Open a New World for Designers

Dr. Masahiko Mitsuda・Yoshiyuki Hosokawa・Tsuyoshi Oda・Toshiyuki Kobayashi・Hiroshi Akamatsu・Hitoshi Yamada

As a result of recent improvements in computer performance, practical applications of computational fluid dynamics (CFD) are becoming increasingly common. No longer is the macroscopic flow field merely visualized. It has now become possible to closely investigate boundary issues such as the flow force, the heat transfer, the solid-gas-liquid interface motion. Detailed fluid phenomena is now available to designers and this promises great future developments for various processes. This paper discusses these exciting new developments.

まえがき = 物体周りの流れと熱を解析する数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics の頭文字をとって CFD と呼ばれる) は最近の計算機能力の向上に伴って、実用的な設計計算のツールとなり、さまざまな分野に普及している。例えば、10年前であれば100万点グリッドを用いた3次元計算はスーパーコンピュータでないと処理できなかったが、今ではパソコンを用いて1,2日で処理できるほどまでになった。そのため、マクロな流れを可視化することで精一杯であった CFD が、複雑な形状をした物体周りの境界層内の流体力や壁面熱伝達などのミクロな流れを評価できるまでになった。

1. 数値流体力学(CFD)の難しさ

CFD とは Navier-Stokes 方程式と言われる運動方程式やエネルギー保存式、質量保存式などを連成させて解くものであるが、物体まわりに形成された境界層内では粘性力が支配的なため、境界層を正確にとらえるグリッドが必要である。境界層の中の流れを正確に解けなければ、解析領域の流れそのものも正確に解くことができない。例えば、使用済燃料輸送容器(キャスク)は容器表面からの放熱により温度境界層が形成されるが、温度境界層の1mmの中で約2の温度勾配があり、厳密な境界条件を採用するとグリッドの大きさを1mm以下とする必要がある。対数則(壁関数)という半実験式を境界条件に採用することで、グリッドの大きさを10mm程度に大きくとることができるが、それでも解析領域が非常に大きい3次元問題(例えば、原子力キャスク貯蔵施設、図1)となると、数十万点から数百万点程度の膨大なグリッド数が必要な大規模計算となる。

CFD は境界問題をどこまで解明するかで要求される計算の精度が異なる。例えば、マクロな流れ、流体力、熱伝達、界面移動の順に解析が困難になると言われている。モデリングが適当でない場合やグリッドの直交性やグリッドサイズが不十分だと、計算がうまく収束せず、設計者がイメージしている流れと全く異なる結果しか得られないことが多い。正確な計算を得るためには、現象を支配している法則を見極めると同時に、モデリングや



図1 キャスク貯蔵施設
Fig. 1 Cask storage building

グリッド品質向上が重要である。

以下に、解析事例¹⁾⁻⁵⁾を紹介することによって、大規模計算の魅力や複合問題、界面移動問題の難しさを説明する。

2. 大規模計算の計算例

2.1 原子力キャスク貯蔵施設内の温度成層¹⁾

図1に示すキャスク貯蔵施設は、使用済燃料を格納したキャスクを長期間にわたり貯蔵するシステムである。除熱のコンセプトはキャスクにより加熱された周囲空気が排気ガスとなって煙突に流入し、そのドラフト力により建屋に大気を吸引し、キャスク貯蔵施設に冷却空気を循環させる、というものである。キャスク周りの温度場を解明した計算結果を説明する。この計算例では、キャスク直径が2.6m、キャスク高さが5.5m、天井高さが11m、大気温度が29.1℃、キャスク発熱量が120kW(6体)、排気温度が42.6℃である。図2に貯蔵施設内の温度分布を示すが床面付近は大気温度に近く、天井付近は排気温度に近く、床面から天井にかけて温度が高くなるという温度成層が形成されている。吸気口から流入した冷却空気は床面付近に強い水平流を形成し、キャスク周辺の上昇流とまざって複雑な流れ場を形成すること、水平流の効果によりキャスク表面熱伝達率は垂直平板の自然対流のものより大きいことも明らかとなった。

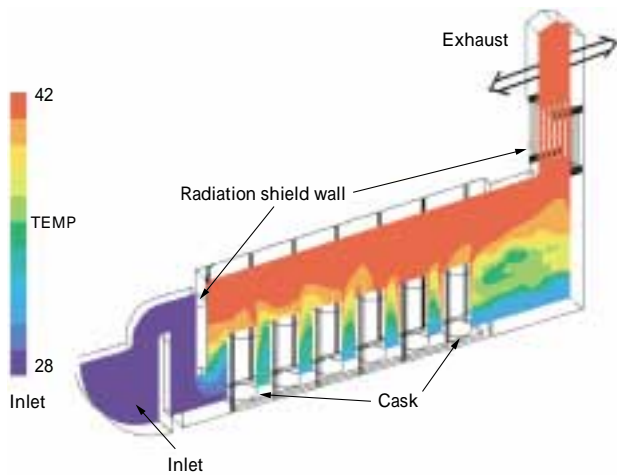


図2 キャスク貯蔵施設内の温度分布
Fig. 2 Temperature distribution in cask storage building

2.2 低レベル雑固体廃棄物溶融固化体の冷却チャンバ
原子力発電所で発生する低レベル雑固体廃棄物の減容化を目的に、高温プラズマ炉による溶解処理プロセスが近年注目されている。1600℃以上に加熱溶解された雑固体廃棄物は、500×800mmの溶融固化体として12固化体/バッチの頻度で溶融炉より払い出される。この高温溶融固化体は約24時間、汚染防止と冷却機能を兼ね備えた冷却チャンバに滞在し常温まで冷却された後排出される。この時、冷却チャンバ内部温度は、高温溶融固化体の滞在により上昇する。しかし、チャンバ内には搬送機器、ハンドリング装置、各種センサが付帯するため、熱損傷防止の観点から適切な量の外気を吸気し、内部を換気するチャンバ設計が必要となった。図3に冷却チャンバの内部の、CFDによる温度予測結果の一例を示す。チャンバ構造は複雑であるため、吸気孔位置、吸気流量の最適化にはCFDによる検討が必要であった。その結果、従来の設計計算では予測不可能であったチャンバ内の温度分布を詳細に調べることができ、構造設計・プロセス設計に有効に活用することができた。

2.3 建設機械エンジンルームの冷却システム

建設機械エンジンルームの冷却システムはエンジン冷却水と油圧系統作動油を冷却するものである。図4に示

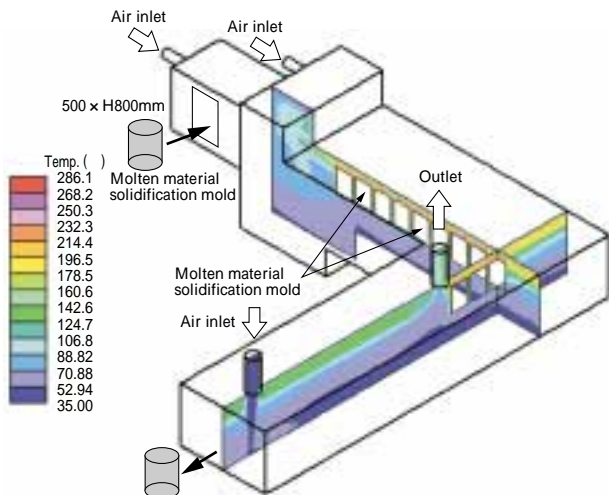


図3 冷却チャンバ内部温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of cooling house for molten material

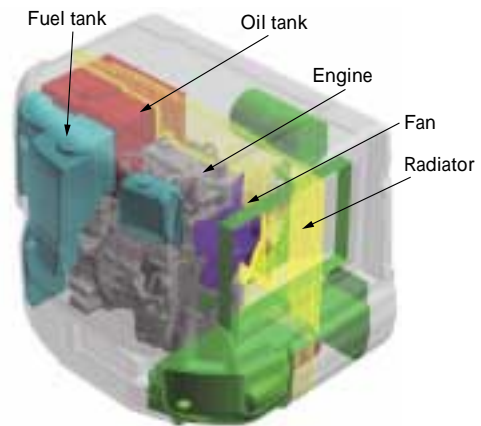


図4 建設機械エンジンルーム解析グリッド
Fig. 4 Analytical grids for engine room of construction machine

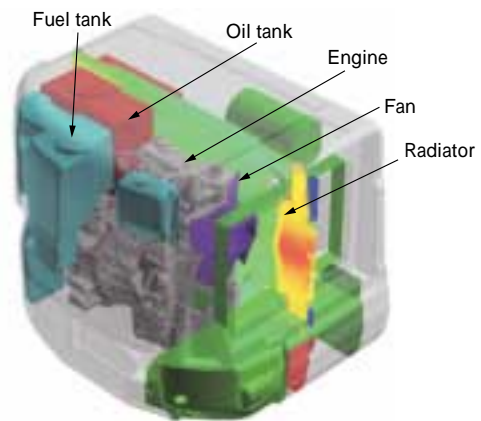


図5 建設機械エンジンルーム内温度分布
Fig. 5 Temperature contour in engine room of construction machine

すようにエンジン、冷却ファン、作動油タンク、燃料タンク、ラジエータ、マフラ、エアクリーナなどがエンジンルーム内に配置されている。冷却ファンにより吸引された大気がエンジン、作動油タンクを冷却したあと、ラジエータを冷却するブッシュファンのレイアウトが採用されている。エンジンルーム内が非常にコンパクトなうえ、オイルクーラを装備していないため、冷却設計が非常に難しい。この計算では、3D-CADデータを使って形状を正確に表現し、回転しているファン周りも詳細に解くことで、エンジンルーム内の複雑な流れや温度分布を明らかにすることができた。図5にエンジンルーム内温度分布を示すが、オイルタンク周辺にホットスポットがあり、オイルタンクからの放熱に悪影響を与えていること、ラジエータコア中央部でホットスポットが発生し、ラジエータの放熱性能が低下していることが示されている。このシミュレーションによりエンジンルーム内のレイアウトや冷却器仕様の見直しを行い、冷却性能を改善することができた。

2.4 ボール弁の流体トルク²⁾

図6と図7は、ボア径150mmのボール弁の開度が38度の場合に配管流速16.7m/sの空気を流した場合の流速分布と圧力分布を示したものである。円筒エッジ部で流れがはくりし、大きなはくり領域が形成されているが、はくり領域内では圧力が低くなっている。このことから

円筒に作用する圧力はボール弁を閉じる方向に作用することが判明した。流体トルクと圧力降下はそれぞれ1.1Nmと6600Paであり、実験値と0.2%と3.3%の精度で一致した。このシミュレーション技術はボール弁開閉に必要なトルクアクチュエータの仕様検討に活用できることが期待される。

3. 複合問題の計算例

3.1 UBMS 成膜装置の電子・イオンの挙動³⁾

UBMS(アンバランスマグネトロンスパッタリング)は低圧力気体中に磁場を印加した状態で放電させることで、カソードターゲット直上で電子を旋回運動によりイオン化を促進し、それによって生じるイオンによりスパッタされた粒子を基板に堆積させるとともに、基板方向へ磁力線がのびていることにより基板表面へのプラズマ照射エネルギーを大きくし堆積膜特性を改善する技術である。磁石、ターゲット、基板などの配置やガス圧力、印加電圧などのプロセス条件からターゲット消耗分布や基板への成膜速度分布、プラズマ密度分布などを予測する技術は装置開発の上で大変有効である。低圧力ガス雰囲気中で磁場が印加されているため電子エネルギーは非平衡状態にあり、連続体ではなく粒子としてモデル化する必要がある。モンテカルロ法により電子/ガス分子衝突を考慮し、図8のようにモデル化された電場とFEMで計算された磁場中でのサンプル電子の運動を計算する粒子

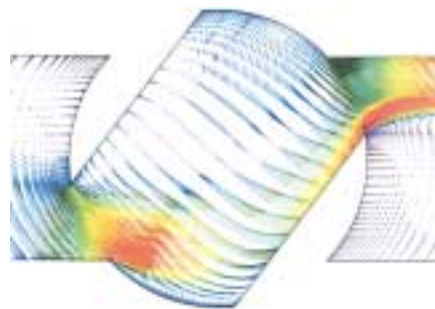


図6 ボール弁内部の流速ベクトル
Fig. 6 Velocity vector in ball valve



図7 ボール弁内部の圧力分布
Fig. 7 Pressure contour in ball valve

モデルを採用することで、電子密度分布や電子エネルギー分布、ターゲット消耗分布を予測することができる。ターゲット下中央にフェライト、外周にサマリウムコバルト磁石を配置し、Arガス10mTorrで放電した場合の電子分

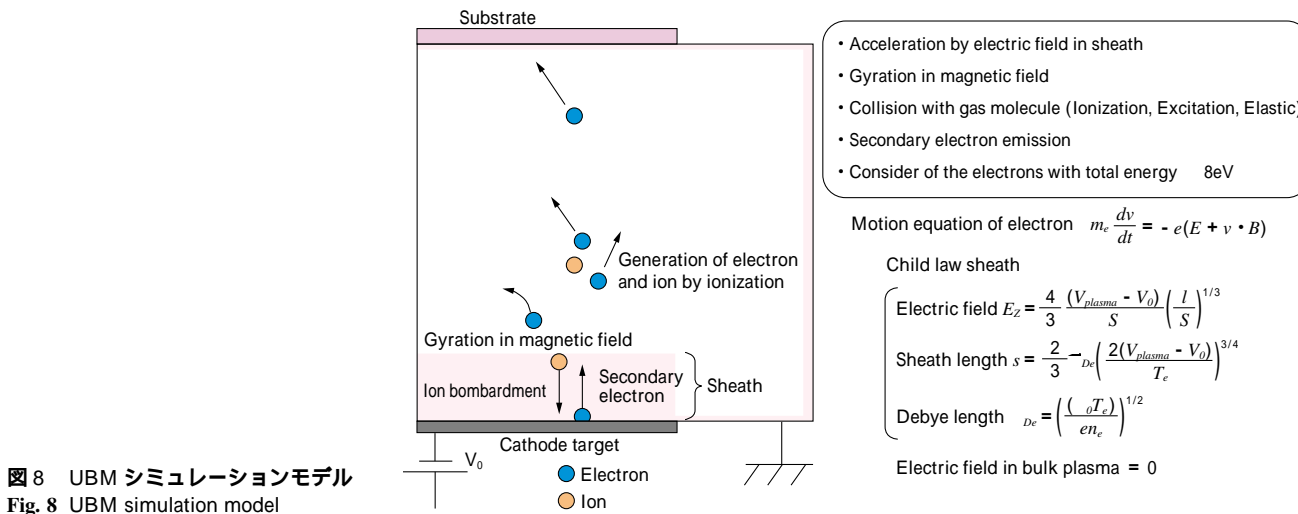


図8 UBM シミュレーションモデル
Fig. 8 UBM simulation model

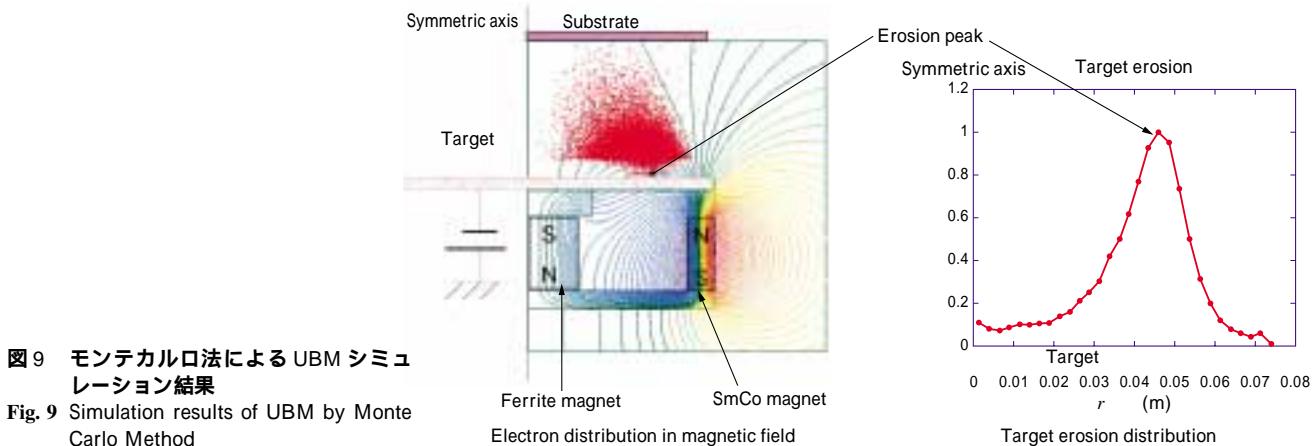


図9 モンテカルロ法によるUBM シミュレーション結果
Fig. 9 Simulation results of UBM by Monte Carlo Method

布とターゲット消耗分布のシミュレーション結果を図9に示す。磁力線がターゲット表面に平行な領域に電子が局在し多くのイオンが発生することから、その領域直下でターゲット消耗量が大きくなっていることがわかる。このターゲット消耗分布から予測できる成膜速度分布の予測による膜厚均一化、また基板へ入射する電子やイオンエネルギー分布の予測による堆積膜特性の均質化や改善に寄与することも期待されている。

3.2 軸流ファンの流れと騒音の関係⁴⁾

建設機械エンジンルームの軸流ファンの騒音に対する解析事例を紹介する。335mm軸流ファン(回転数2800rpm)のかぶり率1/2(ファンの半分がシュラウドの中にある)の条件の非定常計算から圧力変動を求め、流体騒音の予測を行った。図10にシュラウド内部表面とファン表面の流体騒音の発生量を示す。同様に、図11にはシュラウド外部表面の流体騒音の発生量を示している。ファンチップ先端における流体騒音の発生量は極めて大きく、その分布は局所的である。また、シュラウド壁面については、その内面よりも上流側外面の方がファンチップより流出する旋回流による影響が大きく、またその値も大きい。シュラウド上流側外面における流体騒音の予測値と騒音計測値には95%以上の相関係数が得られたほか、冷却空気流量についての解析値と実験値が非常に良い一致が得られた。このシミュレーションは今後低騒音ファンの開発に活用されるものと期待されている。

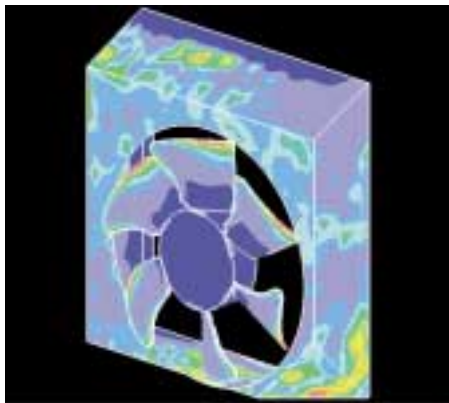


図10 軸流ファンとシュラウド内表面の流体騒音分布
Fig.10 Contour of pressure perturbation on axial fan and shroud inside surface

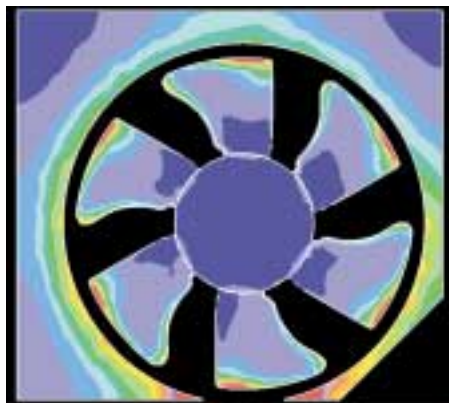


図11 軸流ファン表面とシュラウド外面の流体騒音分布
Fig.11 Contour of pressure perturbation on axial fan and shroud outside surface

4. 界面移動問題の計算例

4.1 フレア護岸の波の反射

図12に示すフレア護岸は、護岸前面が円弧形状で上部が沖側に張り出した形状により、従来の消波ブロック被覆護岸に比べると高波時において越波が極端に少ないという特徴を持つ。フレア護岸への波の入射と反射を2相流のCFDで解析することができる。水面の界面の移動を表現するためにレベルセット法を採用した。フレア護岸高さが5m、水深が0.65m、波高が3.9mの条件の計算結果を図13に示す。波が護岸に衝突して沖側へと反射される瞬間の水面の状態が示されている。CFDにより護岸に作用する波圧や、入射波と反射波の関係を予測することができるほか、水槽実験と比較して理想的な波形を作り出すことができることや、水深や波高などにおいて設備上の制約を受けることがないという利点があるので、実験では現実できない条件なども解析でき設計に反映することができた。

4.2 液体ヘリウムの蒸発反跳力⁵⁾

過熱液体ヘリウム中のヘリウム気泡成長問題の計算結果を説明する。この計算では気液界面の成長を正確に解くためにレベルセット法を採用し、さらに相変化に伴う密度変化を考慮できるように改良した。界面の成長速度は界面における気相側と液相側のそれぞれの熱流束の差から求まる。その熱流束は、界面近傍の温度分布から高次精度補間を用いて温度勾配を計算することにより求められている。

初期条件として加熱度0.5K(温度4.7K)の液体ヘリウム中に飽和状態の4.2Kのヘリウムガスがあり、気泡径が20 μ mとする。グリッド大きさは初期気泡径の1/20の1 μ mである。0.5ms後と3.0ms後の温度分布と流速分布を図14と図15に示すが、気泡が球状に成長しながら、液体ヘリウムを押しつけている。液体ヘリウムの流速は



図12 フレア護岸
Fig.12 Flaring shaped seawall



図13 フレア護岸で反射される波
Fig.13 Reflected wave at flaring shaped seawall

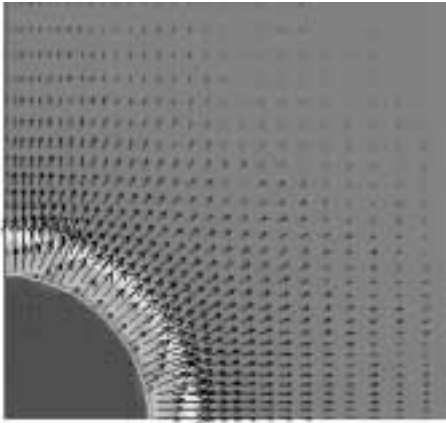


図14 液体ヘリウム蒸発時の気泡まわりの温度分布と流速ベクトル (0.5 ms 後)

Fig.14 Temperature contour and velocity vector around bubble of liquid helium vaporization (after 0.5 ms)

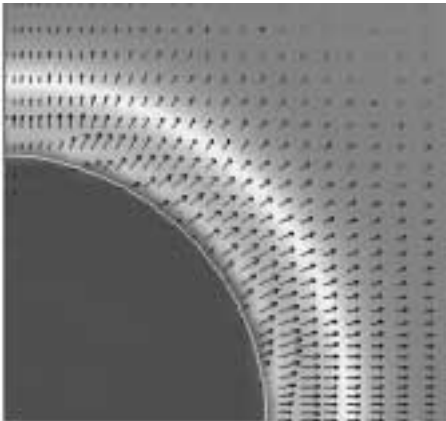


図15 液体ヘリウム蒸発時の気泡まわりの温度分布と流速ベクトル (3.0 ms 後)

Fig.15 Temperature contour and velocity vector around bubble of liquid helium vaporization (after 3.0 ms)

0.5ms 後では約 6mm/s, 3.0ms 後では約 3mm/s であるが, ガス領域の流速はほとんどない。気液界面で温度が加熱温度から飽和温度まで変化するが, ヘリウムガス側の温度勾配が大きく, 液体ヘリウム側の温度勾配が小さい。この相変化を伴う気液二相流の計算は固気液流れにも適用でき, 今後幅広い機器設計に貢献できると期待されている。

むすび = CFD の普及により設計者が複雑な流体现象を手にとるように理解することができるようになり, 今までの設計計算を見直し, より合理的な設計, 性能向上, コスト低減, 納期短縮が可能となりつつある。例えば, 原子力関連機器ではしゃへい解析と CFD の連成による最適化解析の研究に取り組みつつあるが, 他の分野へも早急に展開されると期待されている。

参 考 文 献

- 1) 伊地知博ほか: 8th International Conference on Nuclear Engineering (2000)
- 2) 満田正彦ほか: 流体力学講演会講演集 (2001)
- 3) 細川住之ほか: 第 48 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 No.1 (2001), p.146.
- 4) 小林利行ほか: 流体力学講演会講演集 (2001)
- 5) 織田 剛ほか: 日本機械学会論文集 B, Vol.67, No.662 (2001) P.2487.