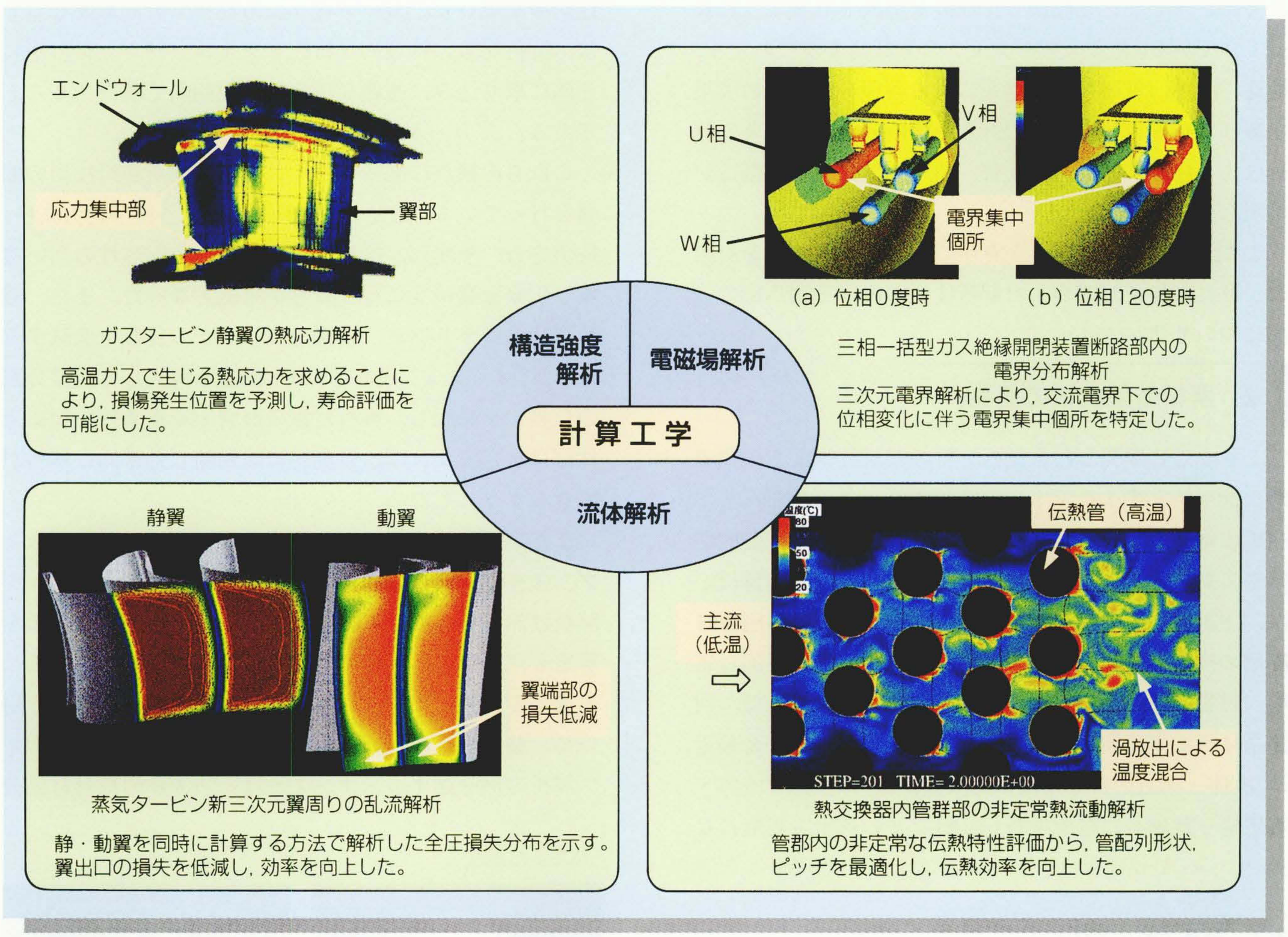
新製品開発をリードする計算工学

Computational Mechanics Technology for Developing New Products

梅垣菊男* Kikuo Umegaki　小泉 真* Makoto Koizumi
江沢良孝** Yoshitaka Ezawa　福本英士*** Hideshi Fukumoto



各種の技術分野にまたがる計算工学の技術とその適用例

電力分野の製品開発では，計算工学の活用によって新たな概念を構築して大幅な性能向上を実現したり，模型試験などの回数を低減して開発期間を短縮することができる。計算工学は，今や，製品開発を支える最も重要な基盤技術になりつつある。

近年の計算機ハードウェアの飛躍的な発展により，高度な数値解析技術を駆使すれば，理論的解析や測定が困難な現象をシミュレーションによって解明，予測できるようになってきた。このため，計算工学は科学技術の発展に大きな役割を担うことになった。企業でも計算工学を駆使することにより，新製品概念の創造，試作代替による開発期間の短縮を実現しつつある。

日立製作所は，早くから計算工学の重要性を認識し，種々の技術分野で独自の解析技術を開発して製品開発に役立ててきた。これらは，構造強度，流体，および電磁場解析技術に大別される。タービンや水車などの流体機器では，流体解析が性能向上を実現する鍵になっており，送変電機器では電磁場解析がその役割を担っている。また，製品の信頼性を向上するために，流体・構造を連成した流動振動の解析や，流体・電磁場を連成した絶縁破壊の解析も新たに実用化している。

新製品開発をリードする基盤技術として，計算工学の役割は今後ますます増大していくものと考える。

*日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士　**日立製作所 機械研究所 工学博士　***日立製作所 日立研究所

1. はじめに

現在，原子力，火力，水力などの発電プラントでは，効率向上，信頼性向上，コンパクト化，コスト低減を目指すため，従来の経験的，実験的な設計に加えて，数値シミュレーションを駆使した設計が実施されるようになってきている。シミュレーションの分野は多岐にわたり，構造，流体，電磁場，回路系に至る各種分野でその成果をあげている。特に近年の計算機性能の向上により，解析による現象解明，試作代替，新しい製品概念の創造が実現しつつある。

ここでは，発電プラントを中心とした電力機器を対象に，日立製作所が開発した解析技術の内容と適用例の一部について述べる。

2. 解析基盤技術の概要

これまでに開発した各技術分野の解析技術とその代表的な適用例を**表1**に示す。構造強度解析は，ほとんどすべての電力製品に適用されている。現在は特に，動的問題やアダプティブな解法に力を入れている。流体解析では，圧縮性，非圧縮性，多相，反応系など種々の現象に専用の技術を開発している。電磁場解析では，静的な電場，磁場の問題，動的な渦電流の問題から，電磁波，回路系に至る広範囲な解析技術を開発している。また最近は，流体・構造解析を連成した流動振動の問題や，流体・電磁場を連成した電流遮断(絶縁)などの解析も可能になってきている。

表1　計算工学の各技術分野と開発した技術

これまでに開発済みまたは開発中の解析技術を分野別に示した。これらの技術は種々の製品の性能予測に幅広く用いられている。

技術分野	解析技術	適用製品
構造強度解析	静的(応力，変形，座屈)破壊 動的(振動，衝撃)破壊	発電プラント 機器全般
流体解析	圧縮性 非圧縮性 熱輸送 多相，多成分 反応，燃焼 騒音(流体音)	ガス，蒸気タービン，燃焼器，原子炉機器，水車，ポンプ，熱交換器，配管系
電磁場解析	静電磁場 渦電流 電磁波 回路	核融合機器，変圧器，遮断器，回転機，電力変換器
連成解析	流体・構造(振動) 流体・電場(絶縁)	熱交換器，送変電機器

3. 構造強度解析

構造強度解析は，原子炉，タービン，発電機などの電力機器の信頼性確保，設計合理化の面で，ますます重要性が増している。解析を行うにあたって最も重要なことは，解析対象の物理的な特性をシミュレーションの中に正確に取り込み，複雑な構造物を短期間で解析することである。

これらの観点に立って，主に非線形構造解析技術の開発を行っている。開発した技術により，各種の応力集中，残留応力，熱変形，振動，座屈など，非線形性の高い複雑な現象を高精度に行うことが可能となった。また，複雑形状のモデリング，要素分割にかかる負担を低減するため，「メッシュフリー」という概念を導入して要素分割の自動化を徹底し，解析対象の形状と荷重条件・拘束条件だけを定義すれば，自動的に短期間で効率的に解析ができるようにした。

また，解析精度を向上させる手段として，アダプティブ，ズーミング自動解析の開発も行った。アダプティブ解析は，解析結果からシミュレーションの離散化誤差を算定し，所要の解析精度を得る最適要素分割を自動的に生成する。ズーミング解析は，全体構造の解析結果を用いて，強度上重要な部分の詳細解析を行う。アダプティブ解析の例を**図1**に示す。これは，ノズルの取付け部分

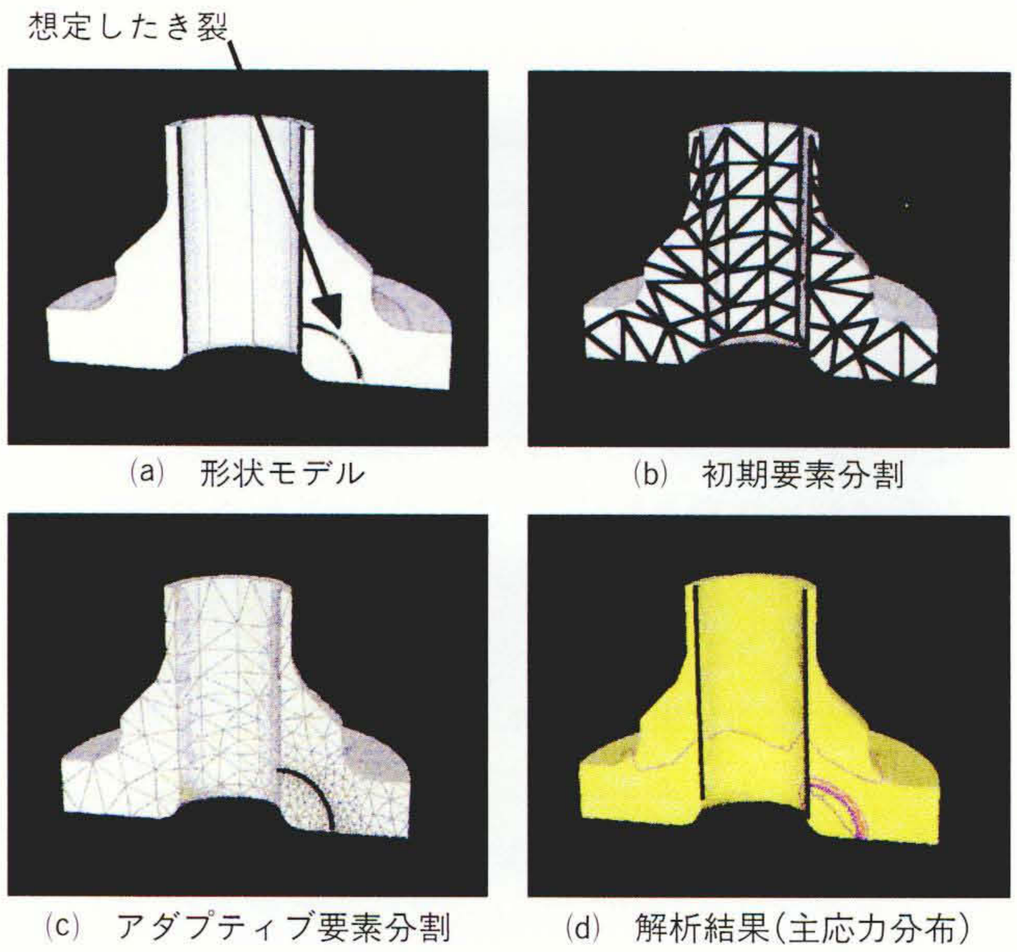


図1　アダプティブ解析を用いた応力分布の解析

右下のノズル取付け部にき裂がある場合の解析例を示す。自動的にき裂近くの応力集中部分に要素を集中し，解析精度を向上している。

にき裂が入った場合を想定した解析の例である。き裂近傍では応力集中が生じるため，要素分割を細かくする必要があるが，それが自動的に行われる。このような構造解析技術をあらゆる電力製品の設計に活用し，静的な応力集中の問題や動的な振動，座屈の問題の評価に役立てている。

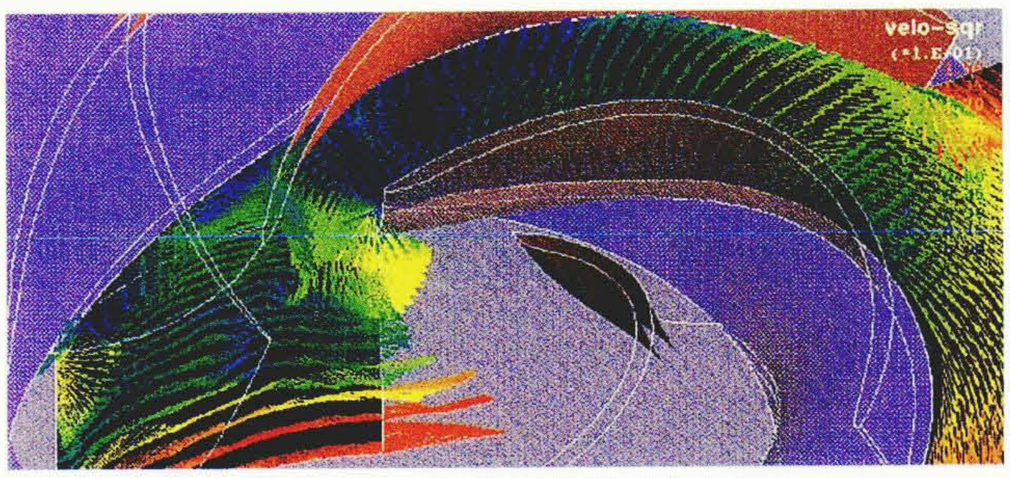
4．流体解析

スーパーコンピュータの普及により，三次元，非定常という，現象に忠実な計算に流れ解析の質が変化しつつある。乱流解析でも，乱流の非定常な挙動がそのままとらえられるLES(Large Eddy Simulation)や直接シミュレーションを，徐々に実用的な解析に応用している。高Re数の流れの解析手法にはまだ困難が伴うが，現在は，これらの種々の解析手法を，目的や精度に応じて使い分けながら実機の開発に役立てている。

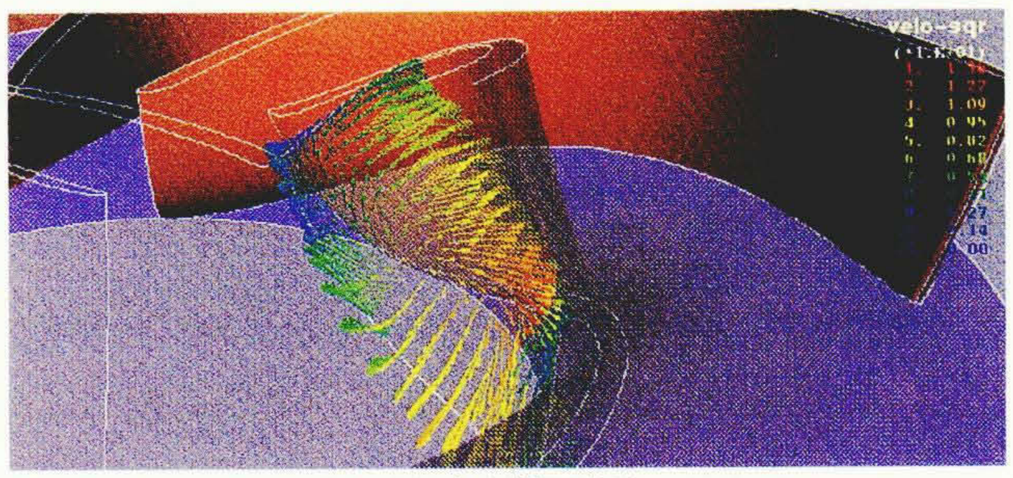
解析例としてポンプ水車ランナをあげる。ポンプ水車は，逆転させてポンプ作用が得られるようにした兼用水車であり，揚水発電に用いられる。ポンプ運転時に流量が減少するとランナ内で逆流が発生し，効率が低下する場合がある。高精度な非定常計算を行うことにより，この逆流発生の原因を明らかにし，翼形状を最適化して運転可能領域を広げるとともに，効率を向上することができる。流路の解析領域，およびポンプ運転時の入口の逆流をとらえた例を**図2**，**3**にそれぞれ示す。

このほか流体解析技術は発電プラントの主要機器の特性評価に広く適用され，性能向上に威力を発揮している。

配管系や熱交換器の管群で問題となる渦励振や流力弾性振動の評価には，新たな解析手法が必要である。そこで乱流解析と構造解析を時間依存で結合した連成解析手法を開発した。典型的な管群を対象に流力弾性振動を解析した結果を**図4**，**5**にそれぞれ示す。解析では流速をパラメータとして振動振幅の変化を調べ，流力弾性振動の発生自体を解析で初めてとらえた。**図5**の軌跡から，後列の管が大きく振動しているのがわかる。この振動はほかの管に伝搬し，最終的に全管が大きく振動する。このような解析が実現したことにより，熱交換器の流動振動信頼性についての設計基準を解析によって作り出すこ



(a) シュラウド面上流速ベクトル



(b) 翼先端部直交断面流速ベクトル

図3　ポンプ水車逆流の解析結果

流量を下げていくと入口部分で逆流が発生し始める。この逆流発生を抑えた翼設計を行うことで，運転範囲を拡大することができる。

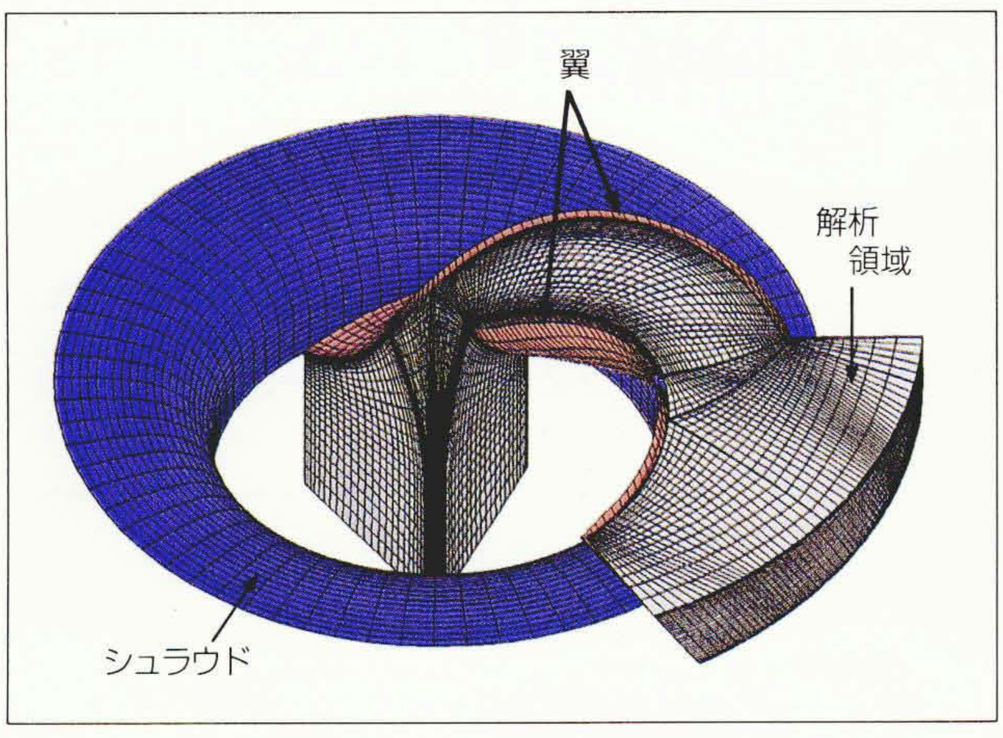


図2　ポンプ水車の解析領域

ポンプ水車の一つの翼間を取り出し，解析領域に三次元格子を生成した。粗密制御などの格子生成技術が乱流解析の精度を大きく左右する。

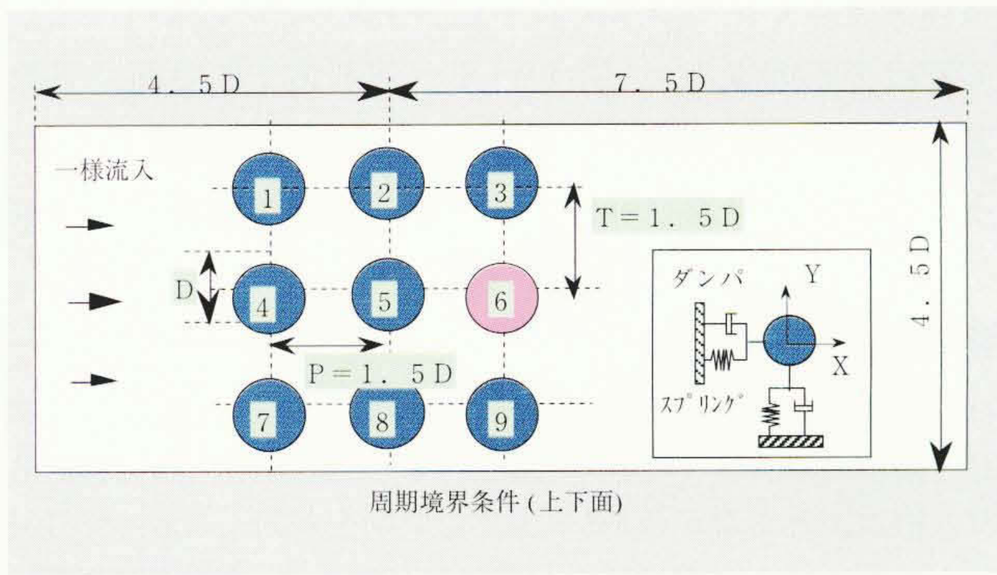


図4　管群流動振動の解析体系

熱交換器を想定した単位管群の解析体系を示す。管には二次元の変位の自由度を持たせ，流れとの連成による共振の発生が解析できるようにした。

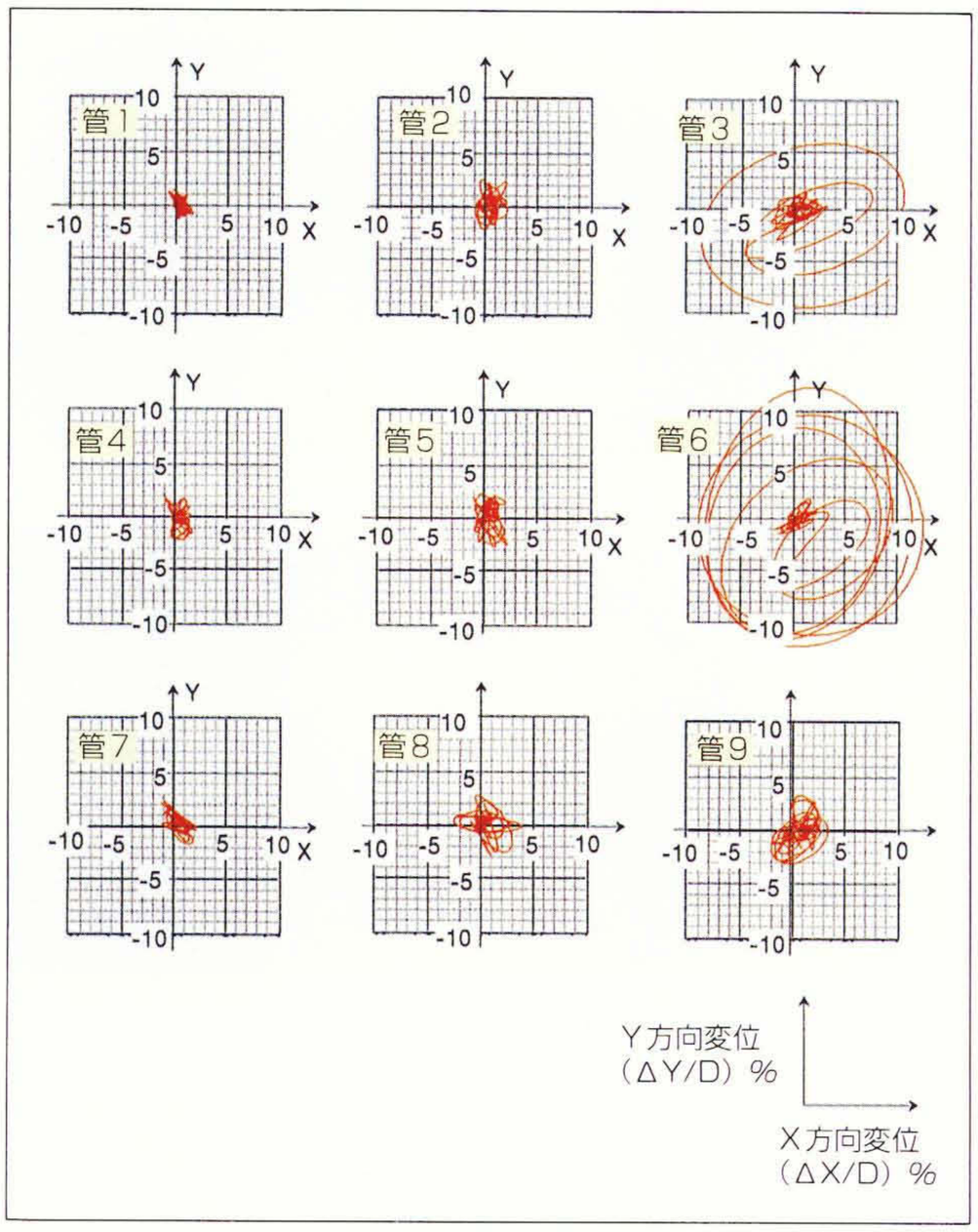


図5　流力弾性振動発生時の各管中心位置の軌跡
流速を増加していくと，ある限界流速で管群が共振する流力弾性振動が発生する。この例では，最後列で発生している。従来は，実験で限界流速を求めていたが，解析で評価することが可能になりつつある。

とも可能になりつつある。

5. 電磁場解析

送変電機器の設計では近年，三次元の電界解析，渦電流解析，電界中の金属異物挙動解析技術を開発，実用化し，機器形状の最適化，絶縁信頼性向上に役立てている。

電力変換器では，一つの半導体素子だけでは大電流を制御することができないため，多数の素子を並列に配して電流を制御する。したがって，並列素子間の回路定数アンバランスは電流分担を崩し，動作不良の原因となる。そこで，この現象を解析するため，電磁場解析と回路解析を連成した新たな解析技術を開発し，回路に寄生する浮遊インダクタンス，キャパシタンスを考慮した解析を可能にした。

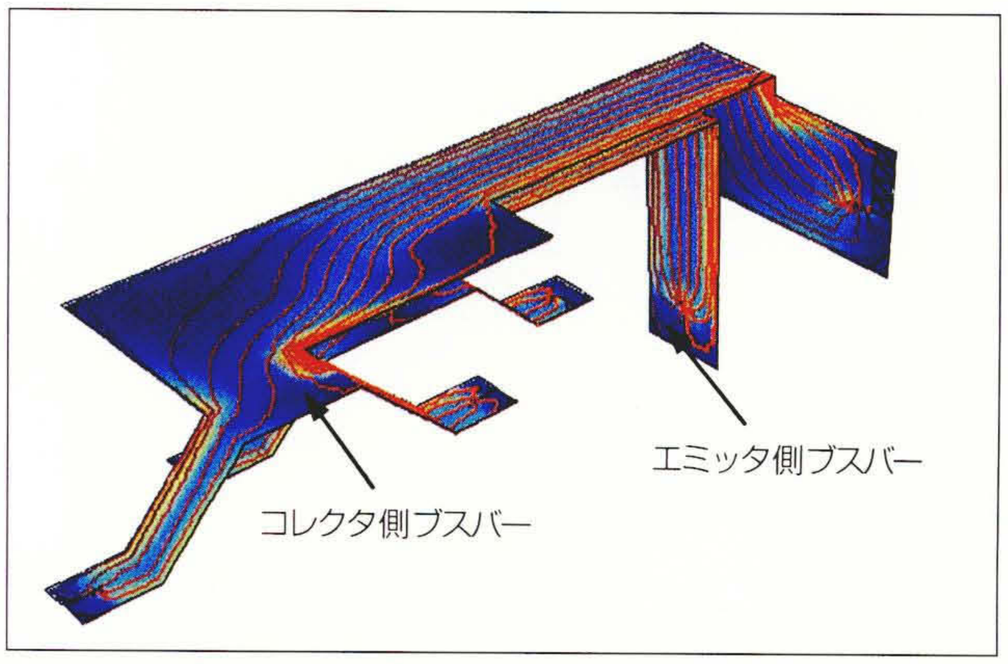


図6　インバータ用ブスバー上の電流分布
ブスバー上の電流分布が，それを接続した回路の浮遊インダクタンスを決める。薄板近似で分布を求めた。流線を実線で，面電流密度を色でそれぞれ表示した。

トランジスタインバータでのトランジスタ間ブスバー(銅板配線)の電磁場解析によって得られた電流分布解析結果を**図6**に示す。この結果から，エミッタ側のブスバーとコレクタ側のブスバー間の回路インダクタンスを定量的に求めることが可能となり，ブスバーの形状の最適化が実現した。

6. おわりに

ここでは，電力分野での計算工学の開発と活用例の一部について述べた。

計算工学を真に製品開発に役立てるためには，その製品に特有な現象を的確に把握し，適切なモデル，解法を選定する必要がある。また，その解析手法の適用限界，精度を十分に知ったうえで製品開発を行わなければならない。

日立製作所は，計算工学を重要な基盤技術と位置づけ，製品開発を通じて実用に値する解析技術を今後も育成していく考えである。

参考文献

1) 小久保，外：日本機械学会誌，Vol. 532，A編，pp.193～198(1990-12)
2) 松田：ガスタービン学会誌，Vol. 23，No. 89(1995-6)
3) 梅垣，外：ながれ(日本流体力学学会誌)15，pp.98～102(1996)
4) 定岡，外：日本機械学会論文集B編，62-593，35(1996)
5) 小泉，外：境界要素法研究会，境界要素法論文集第10巻，pp.77～82(1993)
6) 福本：電気学会研究会資料 SA-94-8(1994)