

流体分野における複合現象解析

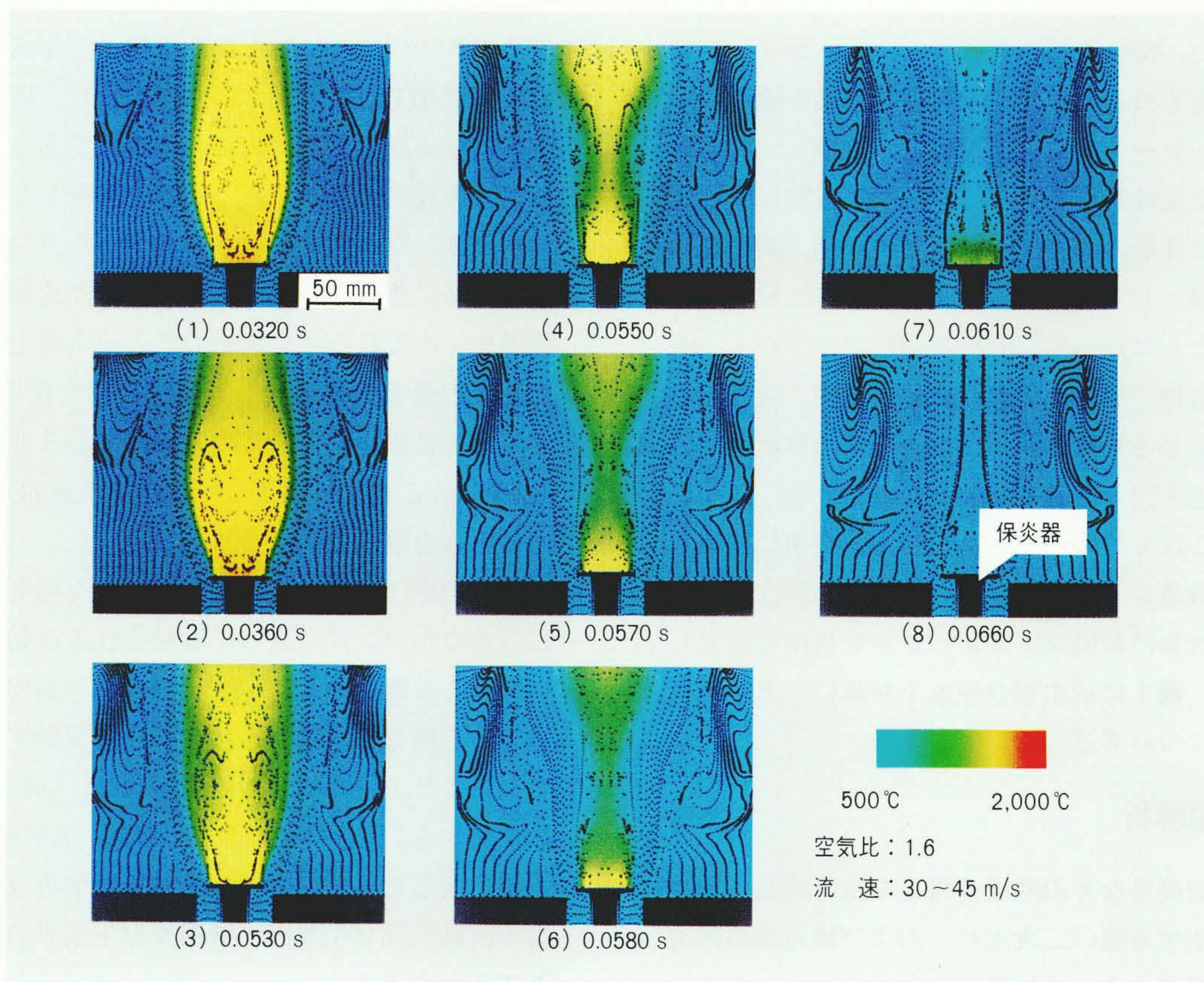
Complex Phenomena Analysis in Fields of Fluid Dynamics

山川正剛* Masanori Yamakawa

河崎照文** Terufumi Kawasaki

梅垣菊男* Kikuo Umegaki

大塚雅哉** Masaya Ôtsuka



乱流予混合燃焼の火炎吹き飛びの解析結果 燃焼器に流入するメタン・空気予混合気の流速を増加させたときの各時刻での燃焼状態を非定常解析した。火炎温度の低下に伴って、保炎器の後流に形成される循環流の領域が減少し、やがて火炎が吹き飛ばされている。

近年、スーパーコンピュータの飛躍的な性能向上と数値解析技術の高度化により、従来不可能とされていたような複雑な現象の解析が実現しつつある。構造物の変形挙動や熱伝導、液体や気体の流れ、物質拡散など、個々の物理現象の解析だけでなく、これらの現象が絡み合い、相互に作用するような複合現象の解析をも可能となってきた。

日立製作所は、(1) 流れによって引き起こされる構造物の振動、(2) 発熱している構造物の流れによる冷

却、(3) 液体と気体が相互に作用する二相流動、(4) 流れの中で酸化反応が生じる燃焼、という四つの複合現象の解析技術を開発した。

スーパーコンピュータを利用したこれらの解析は、実験では計測が困難な詳細な情報を提供するとともに、複雑な現象のメカニズムを解明する有力な手がかりとなる。今後、製品の設計最適化や新製品を創(つく)り出す有力な手段として、その活用が期待できる。

* 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所 エネルギー研究所

1 はじめに

最近のスーパーコンピュータの性能の飛躍的な向上と数値解析技術の高度化に伴い、従来不可能と思われていたような複雑な物理現象が解析できるようになり、数値シミュレーションに基づく新しい物理現象の発見・予測や、従来の常識に縛られない革新的な新製品の開発が可能になってきた。特に流れの数値シミュレーションの分野では、乱流現象のモデル化や大規模で複雑な構造に対する数値シミュレーション技術が著しく進歩し、火力、原子力などの重電機器から電子機器、家電機器に至る広い範囲で、製品性能の向上、開発期間の短縮、開発費低減のための手段として普及しつつある。一方、製品が複雑かつ高度になるに従って、流れの問題だけでなく、流れによって構造物の振動が生じる流動振動や、流れの中で化学反応が生じる燃焼といった複合現象の解析が、製品設計の最適化を図る上で不可欠となってきた。

そのため、これまでスーパーコンピュータ用に開発してきた流れの数値シミュレーション技術を基に、上述したような複合現象の数値シミュレーション技術を開発した。ここでは、表1に示す複合現象を対象に、その解析技術と適用例について述べる。

2 流動振動解析

配管系や熱交換器などの熱流体機器では、流路の曲がり、分岐で発生する強い二次流れ、および構造物の後流に生じるはく離渦によって機器が振動する場合がある。このため、機器内の非定常な流動現象とともに、これに

起因した構造物の振動現象を定量的に解析できる技術が切望されている。しかし、このような乱流に起因した振動現象は、流体を渦なし流れとして近似する従来の解析技術では評価できないため、大規模な乱流解析と構造物の変形・振動応答解析を結合した流動振動解析技術を新たに開発した¹⁾。

この技術では、変動あるいは変形する構造物の形状に沿って各時刻ごとに新たな計算格子を作成し、流路形状の時間変化を正確に取り入れた。また、構造物の振動が流れに与える効果を、流れの基礎式であるナビエ・ストークス方程式に取り込み、乱流を解析した。ここでは、通常問題となる数ヘルツから数十ヘルツの構造物の振動周波数帯に焦点を合わせ、乱れ構造が比較的大きなはく離渦や二次流れなどを解析できる三次風上差分法を用いた乱流の直接シミュレーション技術を採用した²⁾。この乱流解析結果を基に構造物表面に加わる非定常な流体力を算出し、これを外力として構造物の運動方程式を解き、振動応答を求めた。

流れの中に円柱状の単管を配置した場合に、管後流で生じるカルマン渦によって励起される振動(渦励起振動)を解析した例を図1に示す。カルマン渦列によって単管に加わる揚力は同図(b)に示すように変動する。この揚力変動により、管は流れと垂直方向に、同図(c)に示すように振動する。解析による振動周期は、実験結果³⁾と8%の差で一致した。このような流動振動解析技術は、流体機器の流動振動発生要因の解明や発生限界の予測に応用することができる。

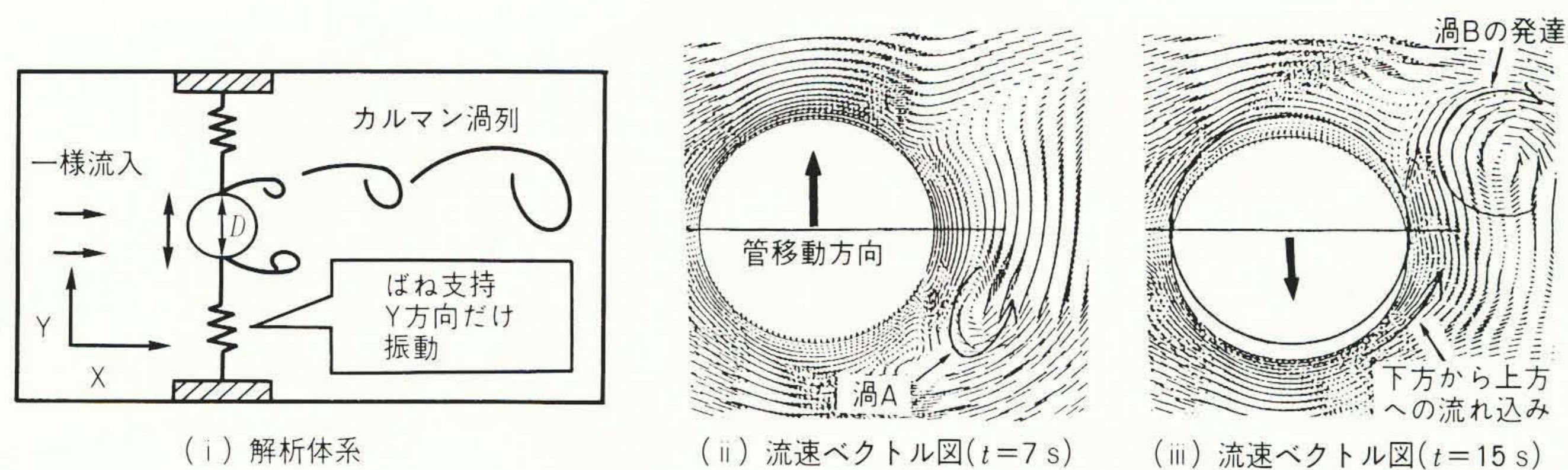
3 対流・伝導複合伝熱解析

火力・原子力機器の熱衝撃や電子機器の放熱など、構造物が流体によって加熱あるいは冷却される現象では、流体と構造物の温度が、構造物表面での熱伝達を介して相互に影響する。また、自然対流のように流速が遅い場合には、構造物内の温度分布や熱伝達特性が流速分布にも影響を与える。このような対流と熱伝導が共存する複合伝熱の解析では、流体の運動方程式、エネルギー式だけでなく、構造物のエネルギー式を連立して解く必要があるため、計算時間、記憶容量共に大規模になる場合が多い。

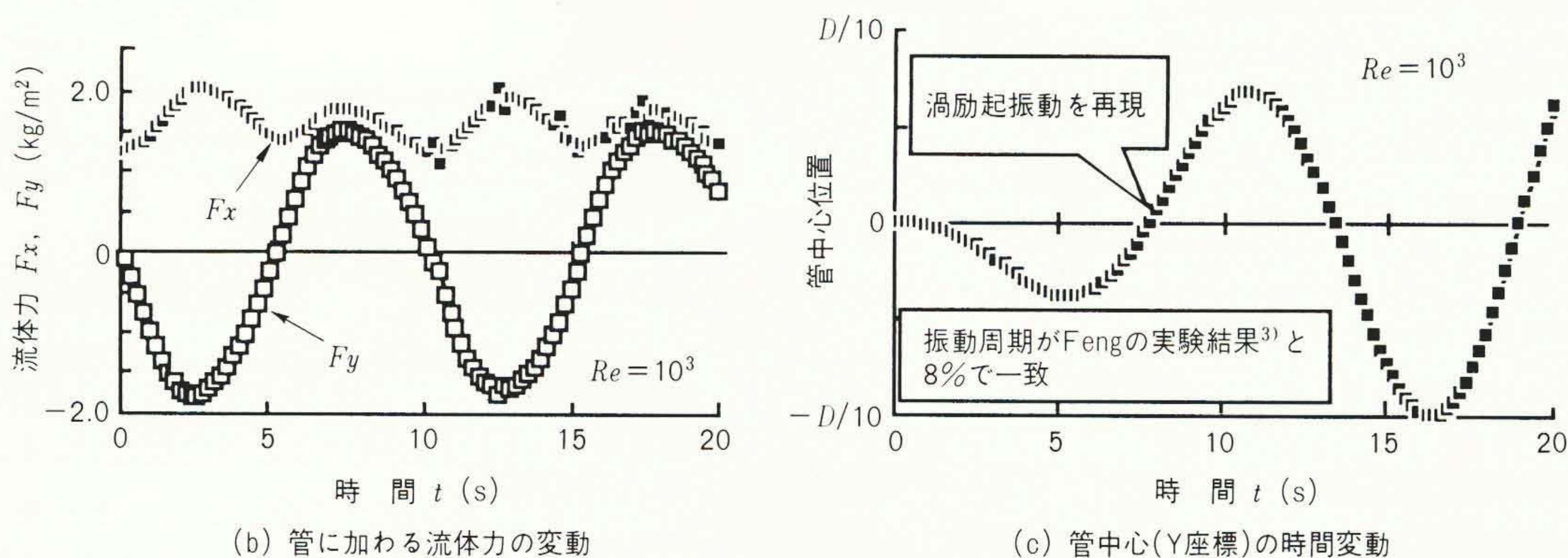
開発した対流・伝導複合伝熱解析技術では、流体と構造物のエネルギー式を計算するための計算格子間隔、およびタイムステップ幅をそれぞれ独立に設定できるようにくふうし、複雑な三次元形状での計算格子数の増大を

表1 数値シミュレーション技術の概要 スーパーコンピュータ向きに開発した流れを伴う複合現象解析技術の代表例を示す。

物理現象	解 析 技 術	適 用 例
流 動 振 動	●乱流直接シミュレーションに基づく流体・構造連成振動解析	●単管の渦励起振動解析
複 合 伝 熱	●低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルに基づく対流・伝導解析	●フィン付き熱交換器の伝熱解析
気液二相流	●噴霧流解析 ●気泡流解析	●自動車エンジン吸気管系の燃料挙動解析 ●発電プラント用給水加熱器の伝熱解析
燃 焼	●レイノルズ応力モデルに基づく乱流燃焼解析	●旋回乱流を伴う拡散燃焼解析 ●予混合燃焼の火炎吹き飛び解析



(a) 流動振動解析体系と計算結果


 図1 単管の渦励起振動の解析結果 流路形状が変化する流れ場の座標格子を時間依存で自動的に生成し、流体と構造の運動を同時に解析した。(b)に示した周期的な流体力 F_y が管に加わり、管をY方向に振動させる。

抑制するとともに、流体に比べ熱の拡散速度が遅い構造物のエネルギー式の計算を加速できるようにした。さらに、流速の大小によって構造物表面近傍での乱れの減衰特性が変化することを考慮することにより、低レイノルズ数から高レイノルズ数まで広範囲に対流伝熱を解析できるようにした⁴⁾。

フィン付き熱交換器の伝熱解析にこの技術を適用した

結果を図2に示す。高温で流入した空気は、放熱フィンとの熱交換により、流出口に進むに従って冷却される。冷却管背面でははく離の影響でよどみ領域が発生し、熱交換が進まない。フィンの温度分布も気流の対流伝熱の影響を受けている様子がわかる。このような複合伝熱解析技術は、伝熱管の配置やフィンの形状の最適化による熱交換器の高性能化に応用することができる。

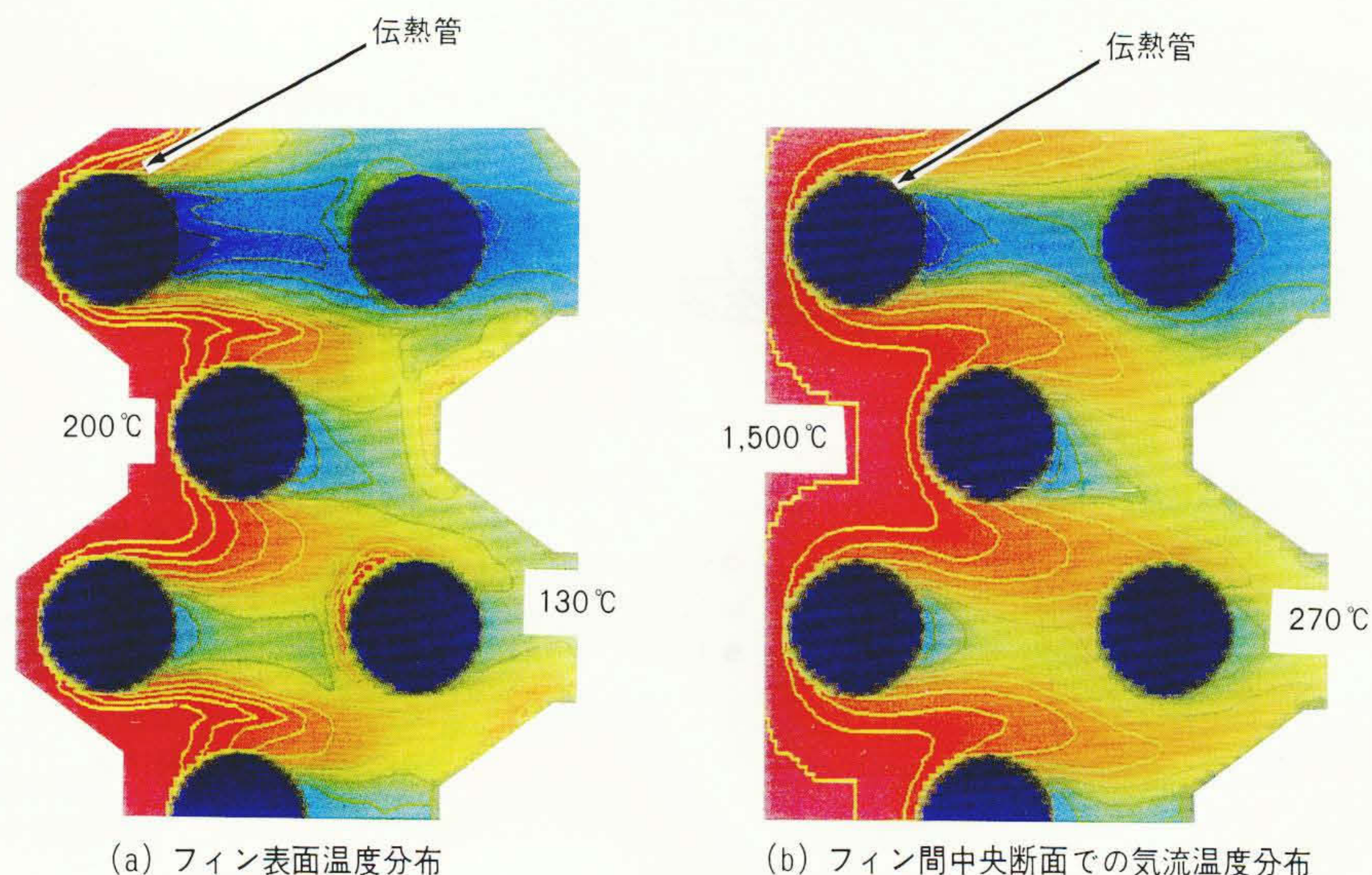


図2 フィン付き熱交換器の伝熱解析結果 伝熱管群を通り抜ける高温の乱流と、フィンおよび伝熱管の熱伝導を同時に解析した。解析によって伝熱管配置およびフィン形状の最適化が可能になった。

4 気液二相流解析

4.1 噴霧流解析

気体と液体との相互作用を伴う気液二相流では、気体と液体の混合割合や流路の形状によって流れの様子が複雑に変化する。気流とともに液滴群が移動する噴霧流では、液滴の直径および速度の違いによって気流の抗力が異なるため、個々の液滴は空間的に異なった挙動を示す。さらに、液滴が加熱された場合や揮発性の高い液滴では、液滴表面からの蒸発に伴って直径が減少する。1個の液滴の挙動が時間的に変化する様子を図3に示す。このように、空間的・時間的に変化する噴霧流の熱流動特性を実験で詳細に評価することは困難なため、噴霧流の三次元解析技術が必要とされている。そこで、気流解析と液滴群の運動解析を連成させ、噴霧流の非定常・三次元流れを解析する技術を開発した^{5),6)}。

この技術では、気体の連続の式、運動量保存式、エネルギー式と液滴のニュートン方程式、およびエネルギー式を基礎式とした。気液相互作用は、気体と液滴との速度差から求まる抗力と、それぞれの温度差から求まる蒸発量を運動方程式とエネルギー式の外力項として取り扱った。また、多面体の計算格子を用いて計算領域を設定することにより、複雑な三次元形状を精密に取り扱えるようにした。

開発した技術を、自動車エンジンの燃料インジェクタ

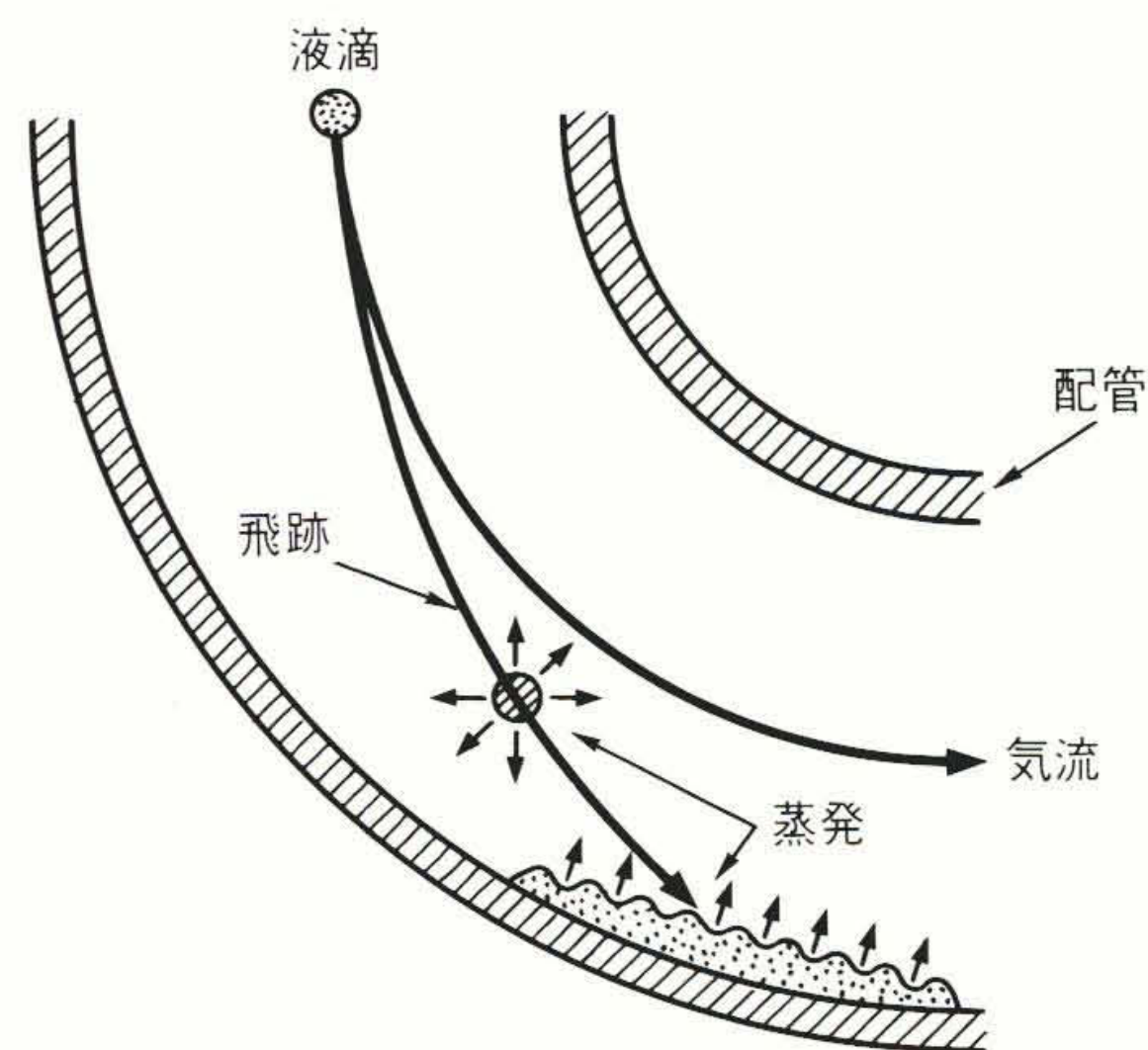
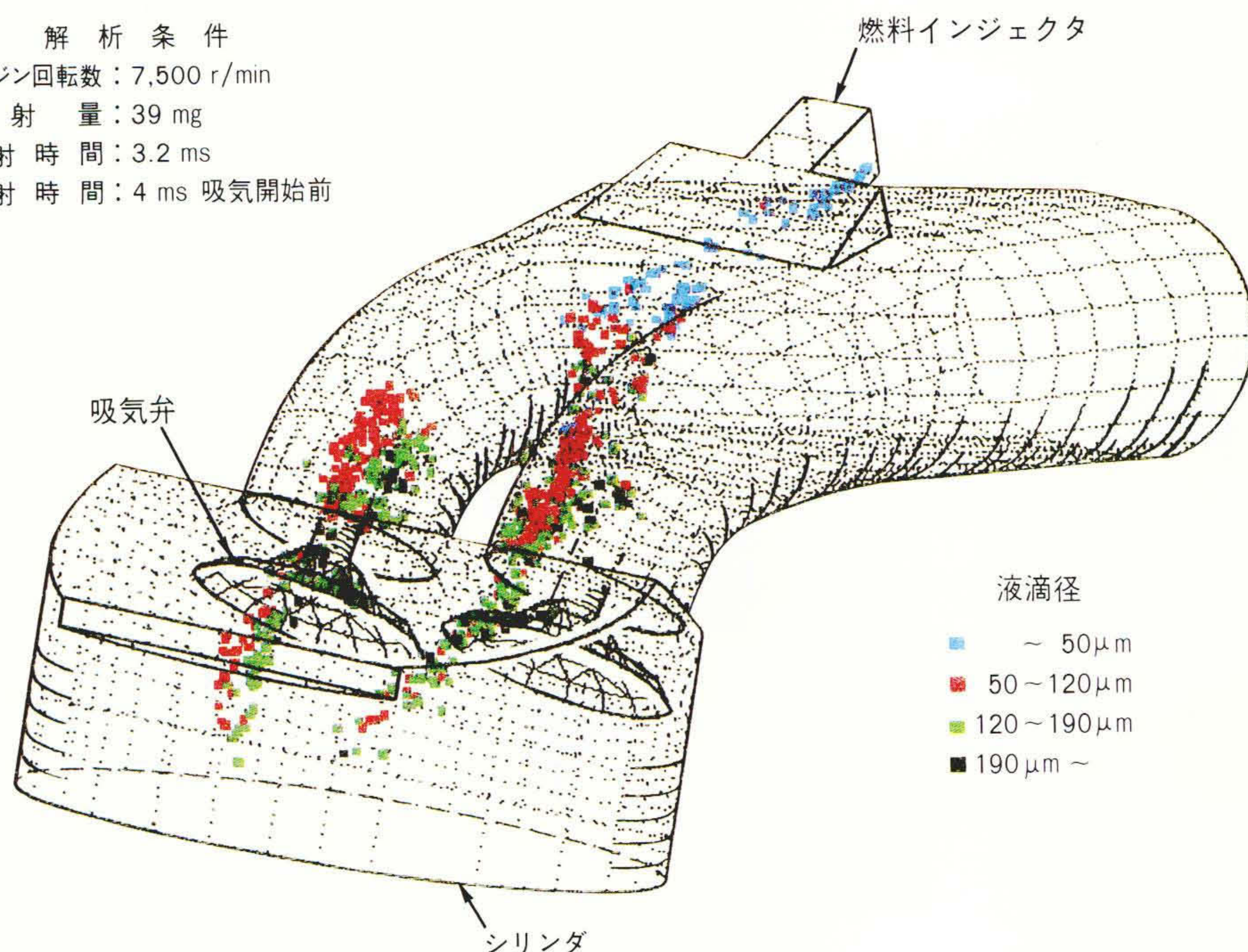


図3 配管内の液滴挙動の概要 配管内の気流中の液滴が気流の抗力を受け、飛跡がカーブする現象および壁面に付着し液膜を形成する様子を模式的に示す。

から噴射されたガソリンの液滴群が吸気管の中を移動する燃料噴霧流の解析に適用した例を図4に示す。燃料は、吸気弁が開く前(空気がよどんだ状態)にインジェクタから吸気弁方向に向かって噴射され、その後、弁が開いて空気がシリンダに吸い込まれる。同図に吸気弁全開時の燃料液滴の位置を示す。青色で示した直径 $50\mu\text{m}$ 以下の小さい液滴は、弁が開く前の静止空気の抵抗の影響が大きいためインジェクタと吸気弁の中間の壁にとどまり、黒色で示した直径 $190\mu\text{m}$ 以上の液滴は慣性力が大きいいため吸気弁まで到達している。一方、直径が $50\sim 190\mu\text{m}$ の中間の大きさの液滴では、気流とともにシリンダの中

解析条件
エンジン回転数: $7,500\text{ r/min}$
噴射量: 39 mg
噴射時間: 3.2 ms
噴射時間: 4 ms 吸気開始前



液滴径

- $\sim 50\mu\text{m}$
- $50\sim 120\mu\text{m}$
- $120\sim 190\mu\text{m}$
- $190\mu\text{m} \sim$

図4 自動車エンジン吸気管における燃料液滴挙動の解析結果 燃料は吸気弁が開く前に噴射され、その後弁が開いて空気がシリンダに吸い込まれる。図は弁全開時の燃料液滴の位置を示す。燃料液滴の運動と気流の同時解析により、燃料噴射タイミングを最適化した。

まで流入しているものがある。このように、直径の違いによる液滴挙動の変化を定量的に評価することにより、燃料噴射制御の最適化ができるようになった。

4.2 気泡流解析

気液二相流で液体の体積割合が大きいとき、大小さまざまな気泡が含まれる気泡流になる。個々の気泡の運動は互いに異なるため、多数の気泡の運動を一つ一つ詳しく計算するのは困難である。そこで、微小空間の気泡群と液体の運動をそれぞれ平均化して取り扱う二流体モデルを導入し、気泡流の非定常三次元解析技術を開発した。

二流体モデルの基礎式は、気体と液体それぞれの質量、運動量、エネルギー保存に関する10個の連立微分方程式で構成する。沸騰が開始する所では蒸気の体積割合が不連続に増加するので、従来法では微分係数が大きくなって計算が不安定になることがあるため、安定して計算できる手法が望まれていた。そのため、微分方程式を積分して用いるコントロールボリューム法を採用することによって微分係数の積分精度を高め、計算の安定化と高精度化を図った⁷⁾。

この解析技術を、発電プラントのタービン抽気蒸気や

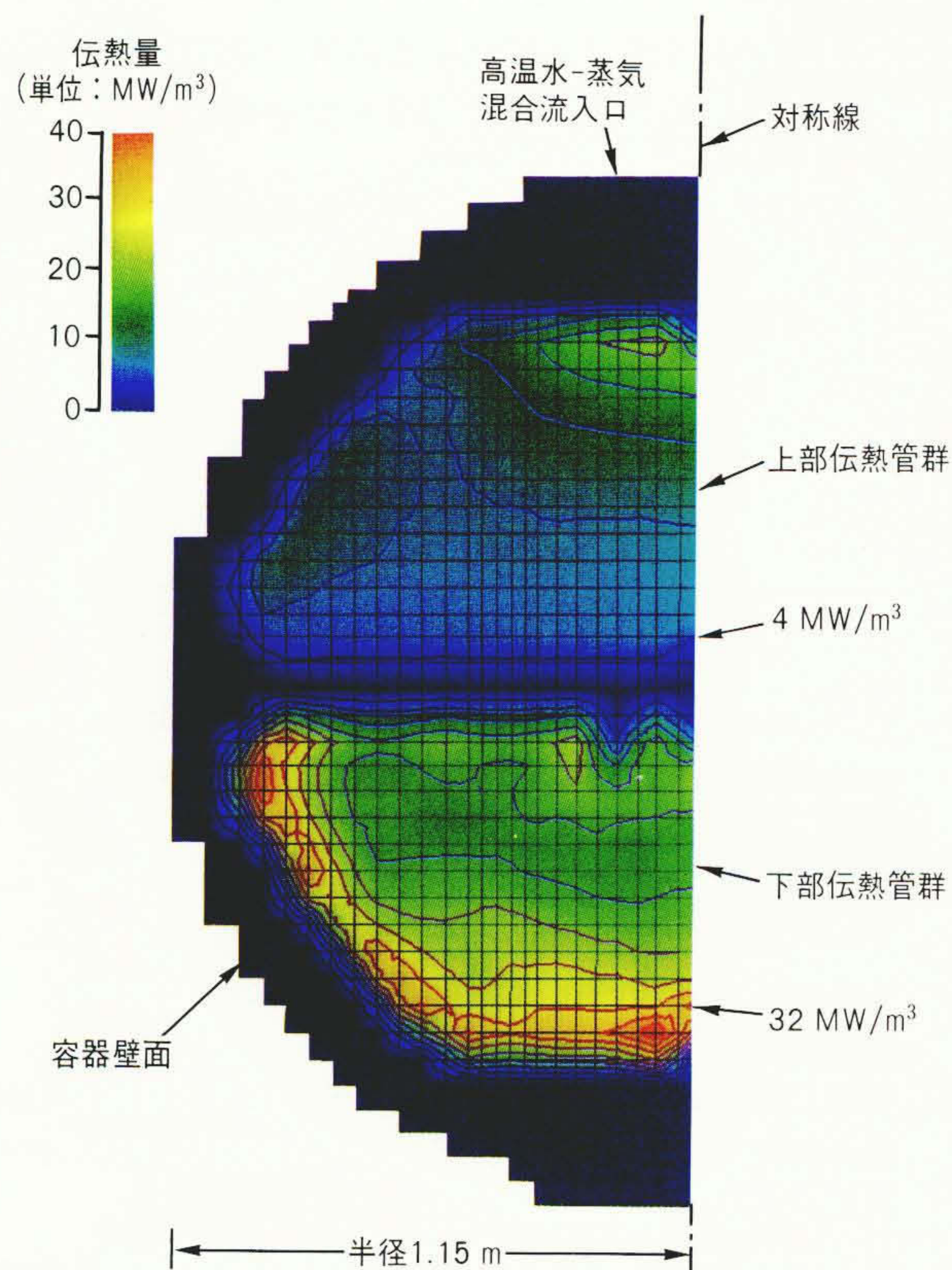


図5 発電プラント熱交換器内伝熱量分布の解析結果

熱交換器断面の左半分を示す。給水が低温である下部伝熱管群で伝熱量が大きく、特に高温二相流の供給が多い伝熱管群の周辺部で顕著である。

高温ドレン水によって給水を加熱する熱交換器の伝熱解析に適用した例を図5に示す。熱交換器内の気体と液体の流速分布計算結果を基に伝熱量を算出した。熱交換器断面の上下の伝熱管群では、給水が低温の下部で伝熱量が大きく、特に高温二相流の供給が多い伝熱管群の周辺部で顕著である。このような解析技術は、伝熱管群や整流板の配置の最適化による熱交換器の高性能化に応用することができる。

5 燃焼解析

気体の燃焼では、燃料は酸化剤と混合し、火炎の内部で化学反応して熱を発生する。このため燃焼の解析では、乱れを伴う流れの中で燃料と空気がどのように混合し化学反応するかを解明し、これを数式で表すことが課題となっている。特に、燃料の混合に影響を与える流体中の乱れは、遠心力や浮力の影響を受けて乱れの大きさが方向によって異なるため、このような乱れの非等方性を考慮に入れた乱流モデルを導入すれば解析精度の向上が期待できる。また、乱れによって揺らぐ火炎の内部では、燃料は空気と混合しながら化学反応するため、燃料と空気の混合と、化学反応を同時に考慮できる化学反応モデルが必要である。

開発した燃焼解析技術は、乱れの非等方性を考慮するために乱流中の応力6成分の輸送方程式を取り扱う乱流モデルを導入し、火炎近傍の流れや旋回を伴う流れの解析精度を向上した⁸⁾。さらに、乱れが起因して生じる火炎のマクロな変形量と、火炎中の微小な渦が起因するミクロな反応を考慮した独自の燃焼モデル⁹⁾を開発し、火炎

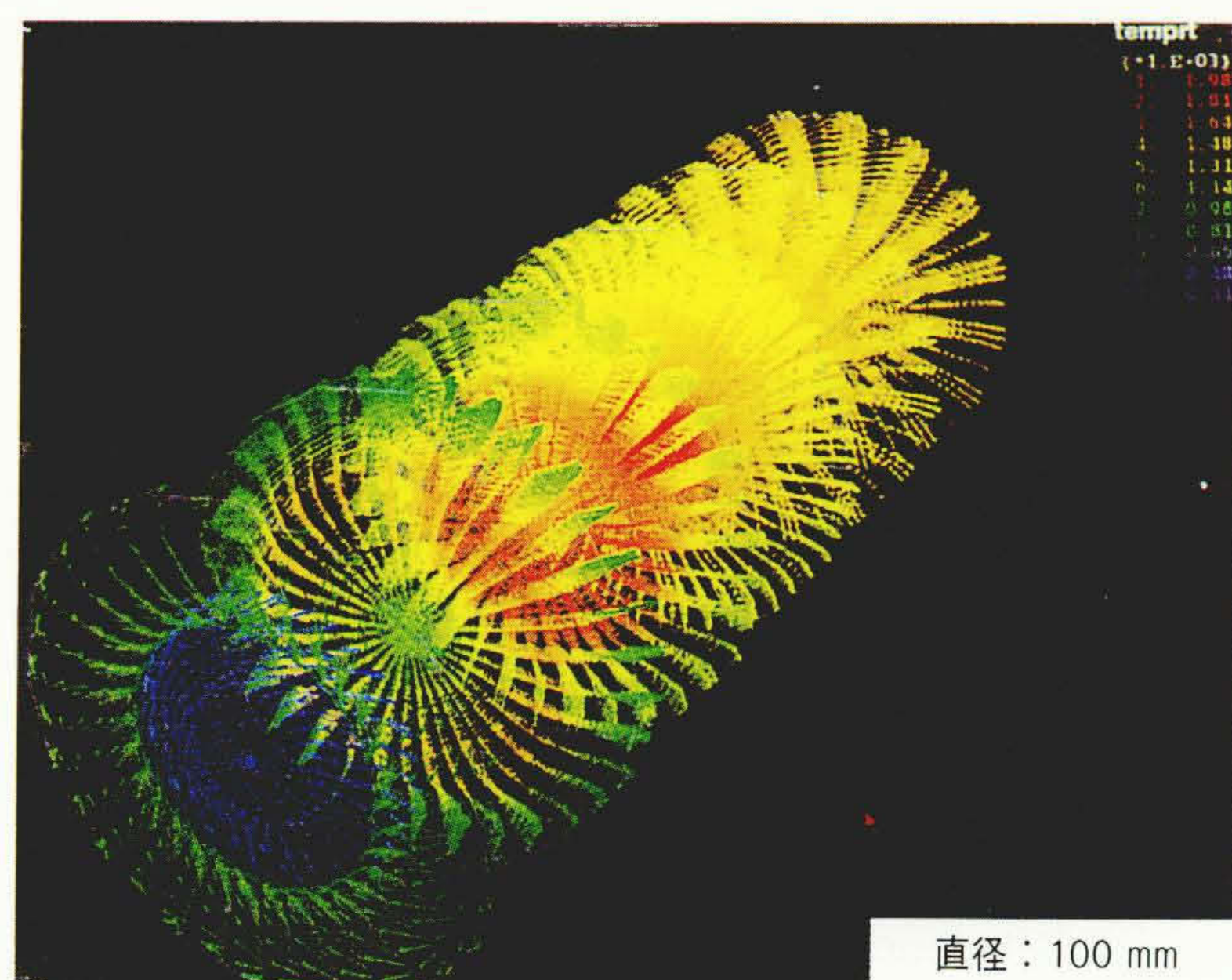


図6 旋回乱流燃焼の解析結果 円筒燃焼器内部の旋回流や、燃焼に伴う温度上昇を解析した。

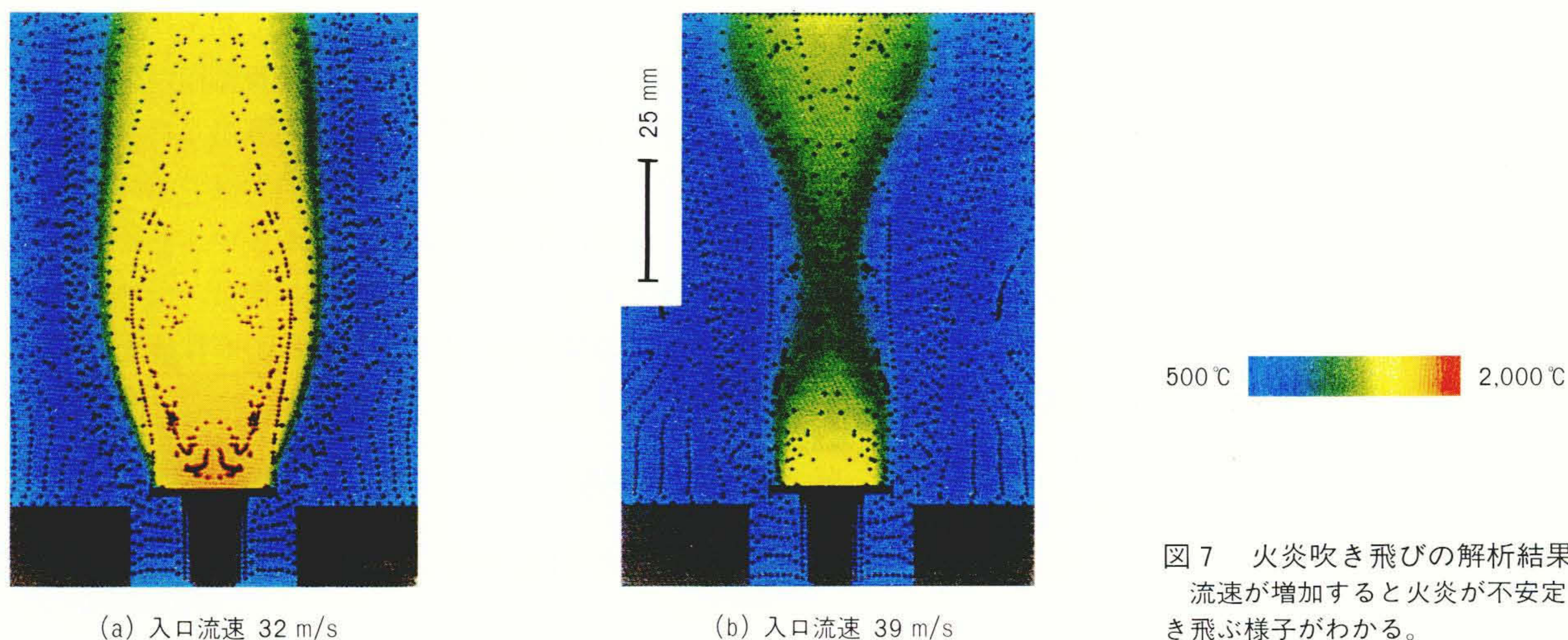


図7 火炎吹き飛びの解析結果
流速が増加すると火炎が不安定になり、吹き飛び様子がわかる。

の揺らぎや圧力、温度の影響を考慮した化学反応の解析を可能にした。

燃焼器内での旋回流燃焼の解析に適用した例を図6に示す。旋回流は、燃焼と酸化剤の混合や火炎の安定化に有効であり、燃焼器に広く用いられている。乱流の非等方性を考慮することにより、燃焼を伴う旋回流の流速や温度の解析精度が向上できることを確認した。

燃焼器の火炎安定性を解析した結果を図7に示す。入口流速が増加すると、周囲を流れる低温の流体の巻き込み量が増加し、火炎の温度が低下する。これに伴って火炎が細くなり、最後には中間に節ができて火炎が吹き飛び。解析で得られた吹き飛び限界の空気割合は実験結果とよく一致した。このような燃焼解析によって、これまで実験では詳細な計測が困難であった火炎の吹き飛びな

どの非定常な燃焼現象を理解することができるようになった。

6 おわりに

スーパーコンピュータの飛躍的な発達と高度な数値解析技術は、実際の製品をモデル化した大規模解析という量的拡大とともに、流れの中の構造物の振動などの複合現象の解析という内容の質的向上を可能にしつつある。ここでは、流体分野での複合現象解析のために開発した数値シミュレーション技術の概要と適用例について述べた。スーパーコンピュータを用いたこのような数値シミュレーションは、自然科学での新しい物理現象の発見・予測や、産業界での革新的な新製品の創生などの手段として期待できる。

参考文献

- 1) 定岡, 外: 乱流場における流体・構造連成振動解析手法 (第1報: 定式化と強制振動の解析), 日本機械学会論文集, 投稿中
- 2) 梅垣, 外: 曲線座標変換法と部分構造分割法を用いた三次元非圧縮性流体解析手法, 日本機械学会論文集(B), 56-523, 733(1989)
- 3) R. D. Blevins, et al.: Flow-Induced Vibration, VAN NOSTRAND REINHOLD, 60, (1990)
- 4) 山川, 外: 統計理論に基づく $k-\epsilon$ 乱流モデルの開発とその応用, 日本機械学会論文集(B), 57-544, 4082(1991-12)
- 5) T. Kawasaki, et al.: Analysis of Injected Fuel Droplet Behavior in Intake Manifold of Spark Ignition Engine, Proceeding of 12th International Vienna Motor Symposium, 375, (1991-4)
- 6) T. Kanazawa, et al.: Analysis on Deposition Characteristics of Coolant Droplet in Fuel Assembly, J. Nucl. Sci. Technol., 29(2), 175, (1992)
- 7) A. Minato, et al.: Numerical Analysis Method for Two-Dimensional Two-Fluid Model Using Control Volume Formulation, J. Nucl. Sci. Technol., 25(12), 901, (1988)
- 8) 大塚, 外: レイノルズ応力輸送モデルによる旋回流燃焼の解析, 第29回燃焼シンポジウム前刷集, 670(1990-12)
- 9) 稲毛, 外: ブラフボディ周りの予混合燃焼の数値シミュレーション, 日本機械学会 第5回計算力学講演会講演論文集, 189(1991-11)