スーパーコンピュータによる対話形熱流解析* (ガスタービン燃焼器への適応)

横野 泰之*¹, 福山 佳孝*¹
岡 明男*², 諸田 勝義*³

Interactive Steering of Supercomputing Simulation on Thermo-Fluid Dynamics (Application to Gas Turbine Combustor)

Yasuyuki YOKONO, Yoshitaka FUKUYAMA,
Akio OKA and Katsuyoshi MOROTA

This paper describes extensive numerical studies on a gas diffusion flame gasturbine combustor based on an interactive steering supercomputing simulation system. The system formed by CRAY Y-MP, IRIS4D and Ultra-Net could visualize the analysis process and alter the numerical condition during computation. The result of computation showed a complicated unsteady 3D flow caused by wall jet and temperature increase as a result of combustion reaction. The present study leads to the conclusion that the interactive steering simulation system could be applied to the complicated thermo-fluid analysis, such as of a gasturbine combustor.

Key Words: Numerical Simulation, Supercomputing, Steering, Computer Network, Thermo-Fluid Dynamics, Vizualization, Gasturbine, Combustion

1. はじめに

数値解析は、半導体製品からエネルギー機器まで広範囲な製品の開発設計支援、CAE化への寄与が期待されており、解析対象の拡大や解析精度の向上を図るため、解析が大規模化してきている。また、計算された膨大な数値データを理解するため、計算結果の画像化が必須となっており、この科学技術計算における結果の画像化は、サイエンティフィックビジュアライゼーションと呼ばれ、その適用が広がりつつある^{(1)~(3)}。

熱流解析もその計算規模の膨大さから、結果の可視化システムへの期待が最も大きい分野の一つで、これまでに数多くのシステムが開発されてきている。これらの多くは、バッチ処理によりスーパーコンピュータで解析を行い、その結果をグラフィックワークステーション（以下GWS）やフレームバッファなどに転送し、画像表示するものである。このような解析が終了してからのポストプロセッシングに対し、トラッキング、

ステアリングといった技術が注目されてきている^{(4)~(7)}。これらは、解析者が解析途中での計算プロセスの把握、早期のエラー発見、対処を目的としたもので、トラッキングは解析中に解析経過を画像化して理解し、意図どおりに進んでいない場合にはその場で計算を終了することができ、経過の把握により無駄な計算を防止するもの、ステアリングはトラッキングをさらに進めて、意図どおりに進んでいない場合、対話的に解析条件などを変更して、エラーなどに対処し、解析をコントロールするシステムである。

熱流現象のように非線形性が強く、解析条件の設定が非常に難しく、試行錯誤的に、解析結果を見て解析条件の設定を繰返し行っていることが多い問題では、解析プロセスを画像として把握し、解析条件を対話的に変えるステアリングシステムへの期待は非常に大きいものである。

また、非定常解析などの結果のアニメーション化を考えた場合、ポストプロセッシングのシステムでは、時刻歴すべての解析結果を保存する必要がある。解析が大規模化するにしたがい、1タイムステップごとの解析結果が増大し、すべての時刻における解析結果を保存することが困難な状態になる。トラッキングが可能なシステムであれば、各タイムステップごとに

* 原稿受付 平成4年5月19日。

*¹ 正員、(株)東芝総合研究所機械研究所 (〒210 川崎市川崎区浮島町4-1)。

*² (株)東芝総合情報システム部 (〒210 川崎市幸区堀川町580-1)。

*³ 東芝CAEシステムズ(株) (〒210 川崎市幸区堀川町66-2)。

VTRへこまどりをすることなどにより、時刻歴すべての解析結果を保存することなく、非定常解析結果のアニメーション化ができる。非常に大規模な非定常問題を解析するにはなくてはならないシステムとも言える。

ここでは、熱流解析の計算途中結果をリアルタイムに把握できる、スーパーコンピュータと高機能グラフィックワークステーションを高速データ通信回線で結んだ対話形シミュレーションシステムを作成した。これは、解析結果をリアルタイムに画像化し、解析結果の判断ができる。さらに、この可視化結果を見ながら、対話形式で解析条件の変更を行うことができるステアリングシステムである。

記 号

- a : 温度伝導率
 - C_p : 定圧比熱
 - D : 拡散係数
 - G_t : 乱流エネルギーの生成項
 - R : 反応速度
 - S_t : 質量基準化学量論比
 - S : ソース項
 - T : 温度
 - k : 乱流エネルギー
 - m : 質量分率
 - u : 流速ベクトル
 - u : 流速の x 方向成分
 - v : 流速の y 方向成分
 - w : 流速の z 方向成分
 - h : エンタルピー
 - p : 圧力
 - ΔH : 燃焼熱
 - Γ : 交換係数
 - ε : 乱流散逸
 - ν : 動粘度
 - ρ : 密度
- 添 字
- e : 乱流散逸
 - F : 燃料
 - k : 乱流エネルギー
 - L : 層流
 - O : 酸化剤
 - P : 燃焼生成物
 - u : 流速の x 方向成分
 - v : 流速の y 方向成分
 - w : 流速の z 方向成分

h : エンタルピー

m : 質量分率

2. システム構成

スーパーコンピュータの演算性能と GWS のユーザインタフェースのよさを生かすため、スーパーコンピュータ上では、流体解析のみ行う。解析結果を GWS に転送し、可視化に関する作業はすべて GWS 上で行うシステムとした。本システムのハードウェアおよびソフトウェア構成を図 1 に示す。スーパーコンピュータには OS として UNIX ベースの UNICOS を採用する CRAY Y-MP 8/4128, GWS には IRIS 4 D/210 GTX を使用し、これらをデータ転送速度 1 Gbps の Ultra Net により接続している。また、GWS には VTR とこまどり装置を接続し、画像の保存、アニメーション化ができるようになっている。CRAY Y-MP 上には流体解析ソルバと GWS との通信モジュールがあり、GWS 上には GL を使用して記述した画像処理、ユーザインタフェースプログラムと CRAY Y-MP との通信モジュールが存在する。通信は UNIX のプロセス間通信機能によっている。プロセス間通信では、ソケットをもちいてデータをリードライトすることができる。二つのプロセスはそれぞれソケットをオープンしデータ送受信のための口を用意する。ソケットの結合はそれぞれのプロセスがサーバ（能動側）とクライアント（受動側）の役割を果たすことにより行われる。本システムでは、サーバを IRIS, クライアントを CRAY とし、TCP/IP プロトコルのネットワークで接続して同期通信を行っている。それぞれの通信プログラムは CRAY Y-MP 上の流体解析プログラム、GWS 上のユーザインタフェースプログラムにサブルーチンとして組み込まれ、解析結果の転送、解析

図 1 解析システム

条件の変更の通信などを行う。

3. ガスタービン燃焼器の

解析モデルと解析手法

エネルギーの有効利用や経済性の観点からガスタービン燃焼器には発電プラントの主要構成要素として安定した燃焼、クリーン燃焼が要求されている。この要求に対応して、さまざまな燃焼方式、燃焼器構造が開発されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。内部の燃焼状況、流動状態が複雑化しているにもかかわらず、燃焼器の形状、運転条件は従来からの経験によって決定されているのが現状である。近年、燃焼器内部や火炎内部の現象をも、数値解析的に解明しようとする試みがなされるようになってきており、詳細な乱流モデル、燃焼モデルも報告されてきている^{(10)~(13)}。しかし、実用燃焼器への応用については比較的報告が少ない。これは、燃焼のシミュレーション自体が、複雑な化学反応、大きな発熱による密度変化がある場での乱流輸送過程的確な数学的取扱といった困難さを持っているうえ、実用燃焼器形状が複雑で、その結果を確認することすら困難であることなどによると思われる。このような複雑な現象に対しては、解析途中での計算プロセスの把握、早期のエラー発見、対処が可能となることにより、解析効率の大きな向上が期待できる。

3・1 解析モデル 燃焼器の概略を図2に示す。これは、気体燃料拡散燃焼方式のキャン形燃焼器で、燃焼器中心軸に燃料および空気用のスワラが設けられ、燃焼器側壁には、燃焼空気孔が45°間隔で3列、燃焼器下流部に希釈空気孔が90°間隔にあげられている。

燃料はLNGで、燃焼器中心軸近傍のスワラから空気とともに噴出する。燃焼器側壁の燃焼空気孔(A1, A2, A3)、希釈空気孔(D1)からもそれぞれ空気が流入し、燃焼用空気、燃焼器壁冷却空気となる。キャップルーバ(CL)部、燃焼器側壁(MT)からの空気流入は微細孔からの噴出しである。燃焼器内圧力は約106 Pa、流入空気温度は約300°Cである。流量配分を以下に示す。

3・2 解析手法 燃焼現象を支配する方程式は、

連続の式、運動方程式、エネルギーおよび各化学種の保存式となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\rho \nu \text{grad } u) + \frac{\partial p}{\partial x} + S_u$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\rho \nu \text{grad } v) + \frac{\partial p}{\partial y} + S_v$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\rho \nu \text{grad } w) + \frac{\partial p}{\partial z} + S_w$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho h \mathbf{u}) = \text{div}(\rho a \text{grad } h) + S_h$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \text{div}(\rho m_i \mathbf{u}) = \text{div}(\rho D \text{grad } m_i) + S_{m_i}$$

乱流モデルとしては k - ϵ 2方程式モデル⁽¹²⁾を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho k \mathbf{u}) = \text{div}(\rho \Gamma_k \text{grad } k) + G_k - \rho$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{u}) = \text{div}(\rho \Gamma_\epsilon \text{grad } \epsilon)$$

$$+ C_1 G_k \epsilon / k - C_2 \rho \epsilon^2 / k$$

$$\nu = \nu_t + C_D k^2 / \epsilon$$

ただし、上式の経験定数は、 $C_D=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.95$ とした⁽¹⁴⁾。

これらの式の離散化にはコントロールボリューム法、解法アルゴリズムはSIMPLE法⁽¹⁵⁾を用いている。対流項には三次精度の上流差分を用いている。

反応モデルとして最も簡単な一段反応を考え、混合質量分布率 f と燃料濃度 m_F の保存式を解くことにより、酸化剤質量分布 m_O 、生成物質量分率 m_P を算出した。

$$m_P = (1 - m_F)(1 + S_t)$$

$$m_O = 1 - m_F - m_P$$

反応速度は渦消散モデル⁽¹⁶⁾を用い、未燃ガスの消費率 R_F を以下のように与える。

$$R_F = A_F \rho (\epsilon / k) m_F m_P$$

温度の算出は ΔH を燃料の潜熱(燃焼熱)とすると以下のようになる。

$$T = T_0 + R_F \Delta H / C_p$$

密度変化は、混合気が理想気体と考え、以下の気体の状態方程式から算出する。

表1 流量配分

	SW	CL	A1	A2	A3	D1	MT
FUEL	0.49						[Kg/s]
AIR	1.47	2.00	1.94	4.33	2.40	4.56	8.30

図2 ガスタービン燃焼器

$$P = \rho RT$$

解析は幾何学的対称性により燃焼器の1/4モデルとし、周方向には周期境界条件を用いている。解析には、周方向20、半径方向40、軸方向50の合計40000メッシュを用いている。解析メッシュを図3に示す。境界条件としては、燃料、空気それぞれの流入口からの流量、流速を設定した。

流入口での乱れエネルギー k には流入速度の10%の乱れ強さを与え、乱れエネルギーの消散率 ε は k の生成と消散が釣り合う条件としている。壁面での流速、 k 、 ε の境界条件には、対数則壁関数を用いている。出口は自由流出とし、温度、濃度の初期値は入口空気温度の値とした。燃料流速を流量と噴出し口径から算出すると、設定値より高くなるが、メッシュの分解能の関係から流量を一致させている。ライナ希釈空気は細孔からの噴出であるが、解析では、流量を一致させ、壁一様の湧出しとし、壁面に垂直方向の流入を与える。解析時間刻みは燃焼器長さと同平均流入流速に基づく無次元時間 τ で0.005とした。ここでは、放射伝熱は考慮していない。

4. 解析結果

図4に代表的な途中経過を示す。図4右手には解析条件を表している。図4中上方では、残差のグラフ表示を行っている。このパラメータは、データ量が少なく転送時間は問題とならないため、内部反復計算ごとに転送している。一方、図4中央に描かれている解析結果は、データ量も多く、転送にも時間を要するため、タイムステップごとの転送とあまり頻繁には転送していない。今回の例では、CRAY Y-MPでの計算時間は内部の反復計算あたり、cpu timeで3s、実経過時間で6sかかり、1タイムステップ計算するのに50回程度要した。解析結果のデータ量は1タイムステップあたり、12 Mbytesで、データ転送時間は、Ultra Netを使用して16sであった。したがって、1タイムステップの演算を行いグラフ表示するには約5min要し、結果の転送間隔にもよるが、転送ネックにはならず、スーパーコンピュータの演算能力が律速段階となっている。ポスト処理機能としては、移動、拡大、縮小に加え、

図3 ガスタービン燃焼器の解析モデル

異なる四つのスカラの同時表示や、グラフ表示最大値、最小値の変更などができる。

図5に、解析条件の変更パネルの一例を示した。これがステアリング機能を実現するパネルで、ステアリングを行いたいときにだけ表示する。ここで、あらかじめプログラム中で指定しておいた時間刻み、収束判定などの解析条件を必要ならば変更して（当然不必要ならば変更せずに）解析を継続できる。今回の例では、収束判定条件とした残差の数値をグラフ表示を見ながら設定した。このステアリング操作により従来のバッチ処理での解析に比べ解析条件を決めるなどを含めたトータルの解析時間が短縮され解析の効率が大幅に向上した。

解析は非定常解析として、タイムステップ数で300、無次元時間で1.5まで行った。解析結果の一例として、数断面での速度ベクトルが時間とともに変化する様子を図6に示す。これらは無次元時間0.25おきの解析結果であり、非常に複雑な三次元非定常流が観察され

図4 グラフィカルユーザインタフェース

図5 ステアリングインタフェース

図 6 速度分布の解析結果

図 7 温度分布の解析結果

る。アニメーション化して観察することにより、速度ベクトルの動きにより、スワール流がよく表されていること、スワール口と側壁からの空気噴流の干渉により複数の縦渦が発生していること、時間的にこれらの速度ベクトルが変動していることがわかる。

図 7 には、温度の等高面を示す。燃焼器全体のように把握するため、解析結果を三つ重ね、270°モデルとして内部と側壁の温度分布を表示した。温度分布についても、燃焼空気、冷却空気の吹込みにより、周方向、半径方向にも大きな分布があり、燃焼器出口付近でも均一な温度分布にはなっていない。また、この燃焼器内の温度分布も非定常な挙動を示し時間とともに変動している。

このような非常に複雑な三次元流れ、温度分布は、定性的にはガスタービン内部の流れ場、温度場として妥当な結果であると思われる。しかし、定量的な温度の値、排出ガス成分、側壁温度などを算出するにはさらに詳細なモデル化、解析が必要となり、実験などの比較を含め、今後の検討課題であると考え。

また、三次元非定常解析の場合、結果の把握だけでもかなり苦勞し、アニメーション化が必須で、表示の仕方についてもさらに工夫していく必要がある。

5. お わ り に

スーパーコンピュータを高速ネットワークにより、グラフィックワークステーションに接続し、解析途中結果のグラフ表示と、対話形式で解析条件の変更を可能とした熱流解析システムを作成した。

このシステムを利用して、ガスタービン燃焼器の解析を行った。この結果、スワール流、側壁からの噴流により複雑な三次元流れの算出、燃焼反応による温度分布の算出が可能となった。

このような実際の解析に応用し、ステアリング機能により解析効率が大幅に上することを確認した。

しかし、大規模な問題では、スーパーコンピュータの演算能力に不足を感じ、演算ネックとなり、さすがに画像がどんどん変化して解析が進むというわけにはいかない。また、解析結果の転送の問題が改めて表面化してくるなど、いくつかの課題も残している。このような課題は残しているものの、複雑な解析を進めるにつれ、解析パラメータを決定する解析者の試行錯誤の負担が増加することは疑う余地がない。スーパーコンピュータの高速演算機能、GWSの高画像処理機能、ユーザインタフェース性の高さを備えた本システムを利用していく。

文 献

- (1) Rosenbium, L. J., *IEEE Comput.*, **22**-8(1989), 68-70.
- (2) Gallagher, R. S. and Nagtegaal, J. C., *Computer-graphics*, 23, *Proc. SIGGRAPH'89 Conf.*, (1989), 185.
- (3) Haber, R. B., *Computer*, **22**-8(1989), 84.
- (4) 三好, 分散処理型 FEM システム, 第 1 回デザインエンジニアリングプラザセミナー教材, (1991), 38-43.
- (5) 矢島・ほか 4 名, 日立評論, **72**-3(1990), 83-89.
- (6) 吉田・谷川, *PIXEL*, No. 87(1990), 115.
- (7) 吉田・ほか 3 名, 電子情報通信学会, SDM 90-107, VLD 90-58(1990), 47-52.
- (8) 安井・前田, 火原協会講座資料 14, 燃料および燃焼, (1989), 火力原子力発電技術協会.
- (9) 前田・ほか 名, 予混合型燃焼器における NOX 低減技術 (その 2), ガスタービン学会誌, **16**-64(1989), 31-36.
- (10) 香月・水谷, ガスタービン学会誌, **17**-65(1989), 23-28.
- (11) 岡本・高城, 機論, **B**, 53-495(1987).
- (12) 加守田・ほか 2 名, 第 25 回燃焼シンポジウム講論集, (1987), 1-3.
- (13) 香月・ほか 2 名, 第 25 回燃焼シンポジウム講論集, (1987), 7-9.
- (14) 日本機械学会編, 流れの数値シミュレーション, (1988), 291, コロナ社.
- (15) バタンカー (水谷・香月訳), コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 130, 森北出版.
- (16) Magnussen, B. F., Hjertager, B. H., Olsen, J. G. and Bhaduri, D., *Proc. 17th Symp. Combust.*, (1383), 1979.