

3次元熱・流体数値解析コード: VEGA-3の開発

安藤安則*1 河合理文*2 増子章*3
藤森俊郎*2 藤秀実*4 宮前茂広*5

Development of Three-Dimensional Numerical Analysis Code (VEGA-3)
for Turbulent Flow Field with Heat/Mass Transfer Phenomena

Yasunori Ando, Masafumi Kawai, Akira Masuko
Toshiro Fujimori, Hidemi Toh, Shigehiro Miyamae

With the advent of super computers with very large memory and high computation speed, the computational fluid dynamics (CFD) is now playing an important role in many engineering fields. To obtain an effective tool for efficient research and development of practical engineering systems related to the three-dimensional turbulent flow fields with heat/mass transfer phenomena of interest, the authors have developed a CFD code (VEGA-3: Viscous flow Elliptic solver with Grid generation Algorithm three-dimensional version) based on the time-averaged Navier-Stokes equations in the general curvilinear coordinate system. In this paper the capabilities of the present code have been demonstrated by extensive comparisons with the experimental data for pressure, velocity and turbulence characteristics for the turbulent flows around and through the three-dimensional complex configurations concerned with a number of practical products of IHI.

1. 緒言

スーパーコンピュータの登場や記憶容量の大規模化などの電算機の高性能化と数値計算のアルゴリズムの進歩とにともない、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)の基本設計ツールとしての可能性は飛躍的に向上してきた。CFDの利用による流体機械の開発コスト削減とその開発期間短縮可能などの特長が、航空産業を始めとして多くの分野における応用を促進する主たる要因である。さらに、従来の解析的手法による取扱いが非常に困難であったり、また実験による試行錯誤では費用も期間も膨大なものになるような複雑な現象に対して、CFDは現象把握の有力な武器になり得ることが近年注目されている。

デカルト座標系を用いた差分法^{(1),(2),(3)}では、実機の複雑な物体形状に適合した境界条件を与えることは困難であった。しかし、Navier-Stokes方程式が保存形を保ったまま一般座標系に変換されることと、電算機により数値的に計算格子の生成を行なえるようになったことにより、任意の物体表面に沿った座標系で差分化できるようになり、境界条件における従来の困難さはなくなった。

筆者らは、差分法による2次元/3次元の熱流動数値解析コードを開発し、実験データと予測値との比較検討を通じて、熱・流体現象の数値解析手法の研究を行ってきた^{(4),(5),(6),(7)}。本報告では、一般曲線座標系を用いた3次元熱・流体数値解析コード: VEGA-3の数値解析手法とプログラム構成を述べ、VEGA-3の当社製の各種流体機械への応用例を紹介した。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

流れ場を3次元定常非圧縮粘性流れ場とし、標準の $k-\epsilon$ 乱流モデル⁽⁸⁾を用いれば、流れ場の支配方程式はつぎの標準方程式にまと

めて表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

上(1)式に使用した記号は、それぞれつぎのことを意味している。

- x, y, z : デカルト座標
- U, V, W : それぞれの方向の時間平均流速成分
- ρ : 密度
- p : 圧力
- k : 乱流運動エネルギー
- ϵ : k の散逸率
- f : 濃度
- h : 総エンタルピ
- m_{ju} : 燃料の質量分率
- R_x, R_y, R_z : 6-フラックスモデルで用いる x, y, z 方向の合成放射エネルギーフラックス
- ϕ : 解くべき変数
- Γ_{ϕ} : 各変数の有効拡散係数
- S_{ϕ} : 各変数に関する対流項と拡散項以外のソース項

なお、第1表に Γ_{ϕ} と S_{ϕ} のまとめを示す。

任意形状物体まわりの非圧縮粘性流れ場解析手法には、いくつかの方法^{(9),(10)}がある。本手法は、筆者らのデカルト座標に基づく3次元粘性流れ場解析手法^{(1),(2),(3)}に、2次元任意形状流れ場解析に用いた一般曲線座標系による解析手法⁽⁴⁾を取り入れて発展させたものである⁽⁷⁾。3次元任意形状物体まわりの流れ場計算領域の境界に適合する一般曲線座標系 (ξ, η, ζ) を導入する。標準支配方程式(1)を一般曲線座標系に変換すると、つぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho G_1 \phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho G_2 \phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho G_3 \phi) \right\} \\ & = \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_{\phi} \frac{A \partial \phi}{J \partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{B \partial \phi}{J \partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{C \partial \phi}{J \partial \zeta} \right) \right\} \end{aligned}$$

*1 技術本部技術研究所流熱部, 研究員, 工学博士

*2 技術本部技術研究所流熱部, 研究員

*3 技術本部技術研究所船舶海洋研究部, 研究員

*4 航空宇宙事業本部技術開発事業部研究開発部

*5 エネルギー・プラント事業本部ボイラ事業部開発部

第1表 Γ_ϕ と S_ϕ のまとめ
Table 1 Summary of Γ_ϕ and S_ϕ

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
U	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial x})$
V	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial y})$
W	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial z})$
k	μ_{eff}/σ_k	$Gk - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu_{eff}/\sigma_\epsilon$	$Gk C_1 \epsilon / k - C_2 \rho \epsilon^2 / k$
f	μ_{eff}/σ_f	0
h	μ_{eff}/σ_h	(1) 0 (放射を考慮しない場合) (2) $2a_r(R_x + R_y + R_z - 3E)$
m_{fu}	μ_{eff}/σ_{fu}	$R_{fu}^{(3,5)}$
R_x	$\frac{1}{a_r + S_r}$	$a_r(R_x - E) + S_r/3(2R_x - R_y - R_z)$
R_y	$\frac{1}{a_r + S_r}$	$a_r(R_y - E) + S_r/3(2R_y - R_x - R_z)$
R_z	$\frac{1}{a_r + S_r}$	$a_r(R_z - E) + S_r/3(2R_z - R_x - R_y)$

(注) $\mu_{eff} = \mu_t + \mu_l$
 $\mu_t = \rho C_D k^2 / \epsilon$

$$Gk = \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

μ_t : 層流粘性係数

a_r : 吸収係数

S_r : 散乱係数

$C_1, C_2, C_D, \sigma_k, \sigma_\epsilon$: 乱流定数

$\sigma_f, \sigma_h, \sigma_{fu}$: プラントル/シュミット数

E: 黒体の放射能

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_\phi \frac{D\phi}{J\partial\xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_\phi \frac{D\phi}{J\partial\eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\Gamma_\phi \frac{E\phi}{J\partial\xi} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_\phi \frac{E\phi}{J\partial\zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\Gamma_\phi \frac{F\phi}{J\partial\eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_\phi \frac{F\phi}{J\partial\zeta} \right) \\ & + S_\phi^*(\xi, \eta, \zeta) \\ & = \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_\phi \frac{A\phi}{J\partial\xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_\phi \frac{B\phi}{J\partial\eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\Gamma_\phi \frac{C\phi}{J\partial\zeta} \right) \right\} \\ & + S_\phi(\xi, \eta, \zeta) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ただし、J はヤコビアンであり、 S_ϕ^* はソース項を座標変換したものである。 $S_\phi(\xi, \eta, \zeta)$ は波線部分の項をまとめたものである。 G_1, G_2, G_3 は反変速度に類したものであり、つぎのように定義する。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= a_1 U + a_2 V + a_3 W \\ G_2 &= b_1 U + b_2 V + b_3 W \\ G_3 &= c_1 U + c_2 V + c_3 W \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

上記式(2), (3)の A, ..., F や a_1, \dots, c_3 は座標変換にとりもなる係数である。

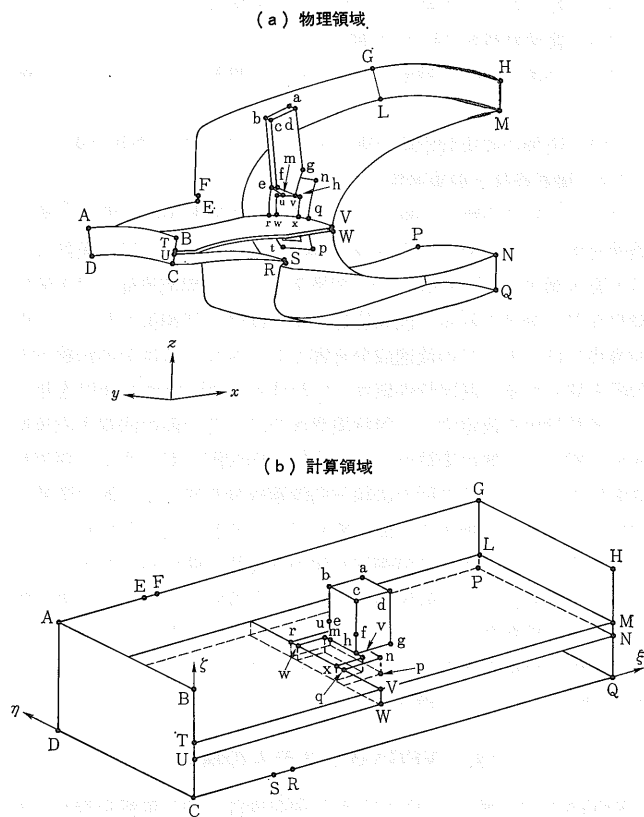
2.2 計算格子の生成

一般曲線座標系を用いた流れ解析においては、対象とする流れ場の中に、物体形状に適合する座標、すなわち計算格子を適切に生成することが基本的に重要である。本コードにおける計算格子生成は、楕円型偏微分方程式による方法⁽¹⁾と、代数的手法を組み合わせたものである。基礎となる楕円型偏微分方程式は、次式で表わされる。

$$\nabla^2 \vec{\xi} = \vec{P} \dots\dots\dots(4)$$

$$\vec{\xi} = (\xi, \eta, \zeta), \quad \vec{P} = (P, Q, R) \dots\dots\dots(5)$$

$\vec{\xi}$ は一般曲線座標系、 \vec{P} は格子の密度・直交性を制御する関数で、この関数を適宜与えることにより格子の制御を自由に行なうことができる。計算領域の中に物体、たとえば後述のダンプ・ディフュー



第1図 格子点の対応の例
Fig. 1 Example of correspondence of grid points

ザにおける燃料ノズルがある場合は、物理面のみならず計算面においても物体があるとみなして計算格子を生成する。この様子を第1図に示す。これらの手法により、後述する種々の複雑な形状の流れ場に対して、適切な計算格子を容易に生成することが可能となった。また、次章で説明する3次元カラーグラフィックシステムも、複雑な計算格子を生成するための有力な武器となっている。

2.3 差分方程式とその解法

支配方程式群を適当な境界条件のもとで数値解析するため、有限体積法を用いて差分方程式を導入する。差分格子としては、スタガード格子(流速成分用の格子をスカラー量の格子間に配置したもの)を採用した。計算格子まわりのコントロールボリューム内にて支配方程式を積分することにより、つぎの代数方程式が得られる。

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + A_T \phi_T + A_B \phi_B + S_\phi(\phi_E, \dots, \phi_N, \dots, \text{etc.}) \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 A_P, A_E, \dots, A_B は各差分格子点における差分係数であり、各係数に含まれる対流項と拡散項の寄与はハイブリッド・スキーム⁽¹²⁾により評価した。本報告に用いた差分方程式の解法は、Patankar-Spalding が放物型流れに適用した SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) アルゴリズム⁽¹²⁾を3次元一般曲線座標系に拡張したものである。代数方程式は、スーパーコンピュータ FACOM VP-50 に適した Checker-Board 法⁽⁷⁾に基づく反復法により解いた。全体の計算手法をまとめると、つぎのようになる。

- (1) 初期値または前回の繰返計算で得られた圧力場を基に、流速成分 (U_j) についての運動量方程式を解く。
- (2) つぎに反変速度に類した G_1, G_2, G_3 を計算する。
- (3) (2) で得られた G_1, G_2, G_3 を用いた圧力補正方程式を解き、圧力場と G_1, G_2, G_3 を補正する。

- (4) 得られた圧力補正項を用いて、流速成分を計算する。
- (5) 乱流特性値 (k, ϵ) を解く。
- (6) 必要ならば、濃度、エンタルピ、燃料などのスカラ量を解く。
- (7) 所期の収束判定値を満たすまで、(1)~(6)を繰り返す。

2.4 境界条件と収束判定

(6)式の差分方程式を解くのに、解くべき変数 (ϕ) に関する境界条件をすべての境界にて与える必要がある。普通、境界条件は、(1) 流入境界、(2) 壁面、(3) 対称面、(4) 周期境界面、(5) 流出境界などに分けられる。流入境界では、既知の初期値を与える。壁面境界では、すべての流速成分を零とし、スカラ量はその法線方向勾配を零とする。乱流特性値は、いわゆる Wall Function⁽⁸⁾を用いて、各特性値を決定する。対称境界面では、その面の法線方向流速成分を零とし、他の変数は、その法線方向勾配を零とする。周期境界面においては、その面の法線方向流速成分を零とし、他の変数は、周期境界条件を付加する。流出境界では、流れ方向の各変数の勾配を零にするか、または計算領域全体の各変数に関する総フラックスが保存されるように、流出面における値を設定する。なお、本計算における収束条件は、すべての変数 (ϕ) について各コントロールボリューム内での保存方程式の残差の総和がそれぞれの流入フラックスの0.1%以下になった場合とした。

3. VEGA-3 システムの構成

VEGA-3 は、格子生成を行なう前処理部、流れ解析を行なう本体、解析結果をグラフィックスに表示する後処理部から成る総合流れ解析システムである。その構成を第2図に示す。

1. 計算格子生成 (前処理)

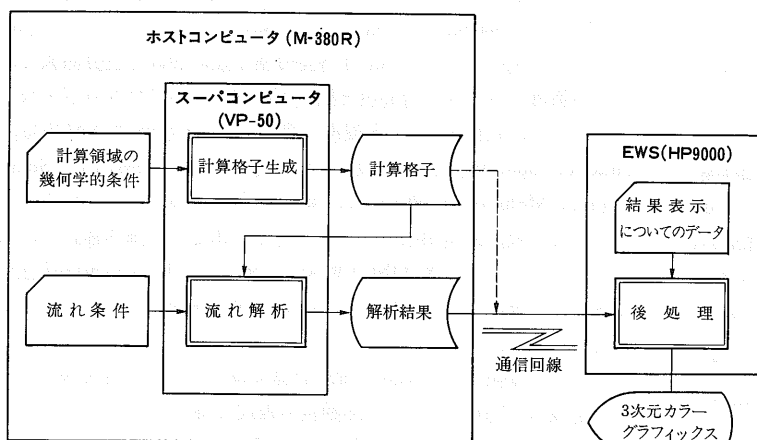
流れ計算を行なうための計算格子を2.2で述べた手法により生成する。出力ファイルの中には、格子点座標値と流れ計算に必要な各微係数が入る。

2. 流れ解析 (本体)

前処理で得られた計算格子を用いて流れ解析を行なう部分である。VEGA-3 では、層流・乱流流れ解析から燃焼、放射、伝熱などを考慮した流れ場の解析まで行なうことができる。ここで得られた全格子点に対する各種物理量 (流速、圧力、乱流特性値、温度、濃度など) は、一つのファイルに出力される。

3. 出力、表示 (後処理)

膨大な出力結果のうち、必要な情報を EWS (エンジニアリングワークステーション) 3次元カラーグラフィックスに表示させる。



第2図 VEGA-3 システムの構成
Fig. 2 VEGA-3 system diagram

複雑な3次元の流れに対して、3次元カラー表示により自由に回転拡大することは、流れ状態を把握する強力な手段である。作画の種類は、流速ベクトル表示、各種スカラ分布 (圧力、温度、濃度など) に対する等高線表示、流跡線表示などがある。

流れ解析、計算格子生成プログラムは、スーパーコンピュータに適したコーディング (ベクトル化) により、計算の十分な高速化を達成している (ベクトル化率98%以上)。本報告掲載結果は、前処理を VP-50 と M-380R、流れ解析を VP-50、後処理を HP 9000 で行なったものである。

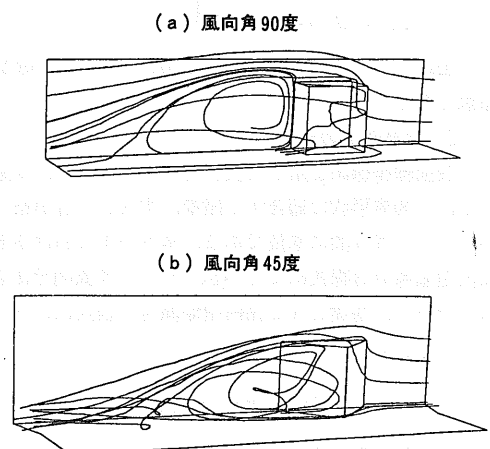
4. VEGA-3 コードの応用と考察

4.1 立方体まわりの流れ⁽⁵⁾

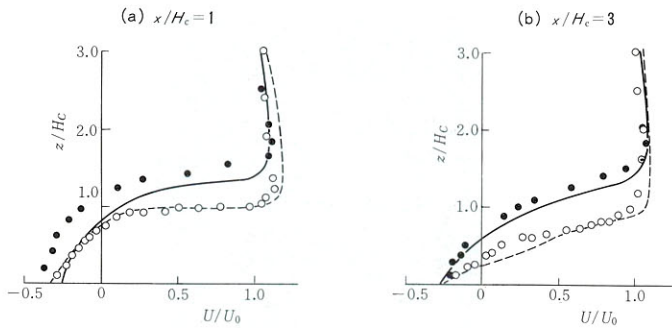
本解析手法の計算精度および設計ツールとしての有用性を確認するため、実際の流体機械への応用に先立ち、実験結果のそろっている基礎的な流れ場に対する解析を行ない、計算結果と実験結果の比較を行なった。対象としたのは、平板上に置かれた立方体 (風向角: 90度, 45度) である。

計算領域は流れ場の対称性を考慮して、対象領域の半分としている。代表的な例では、計算格子を x, y, z 方向にそれぞれ 49, 23, 24 点、合計 27 048 点とり、約 6.2 メガバイトの記憶容量を必要とした。境界条件は、流入境界、対称面、流出面および壁面 (立方体表面および地表面) に対してそれぞれ第2章で述べた条件を与えた。計算 Reynolds 数は、約 2×10^5 であった。計算時間はスーパーコンピュータ VP-50 を用いて、15~20 min であった。

第3図に、計算によって得られた2種類の立方体まわりの流れ場の様子を、流跡線 (計算による流れの可視化) により示す。流跡線は、得られた流れ場の中の任意の位置に質量のないマーカー粒子を置き、これが流速分布にしたがって流れていく軌跡をプロットすることにより得たものである。風向角90度の場合、流れは立方体上面においてはく離し、物体中心 ($x=0, y=0$) より下流約 $2.8H_c$ (H_c : 立方体の高さ) あたりで再付着している。これに対し、風向角45度の場合、流れのはく離は対称面ではなく、傾斜した立方体前縁の途中で起っている。また最長の再付着点も対称面 ($y=0$) ではなく、 $(x, y) = (3.1 H_c, 1/\sqrt{2} H_c)$ 付近にある。計算により得られたこれらの風向角の違いによるフローパターンの特徴は、対応する実験結果⁽¹³⁾ とよい一致を示している。定量的な計算精度確認の例として、立方体まわりの流速分布に関する計算結果と実験結果⁽¹³⁾ の比較を第4図に示す。図中、 U, U_0 は各点の流速および一様流速を示す。



第3図 立方体まわりの計算によるフローパターン
Fig. 3 Calculated flow pattern around the cube



	実験値 ⁽¹³⁾	計算値
風向角90度	●	—
風向角45度	○	- - -

第4図 立方体まわりの流速分布についての計算結果と実験結果との比較
Fig. 4 Velocity distribution around the cube

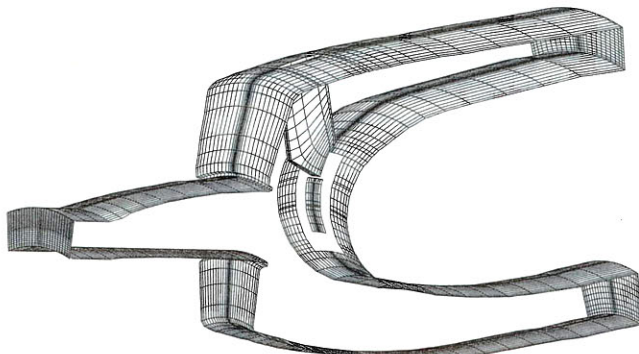
また、 z は高さを示す。両者は、ほぼよい一致を示している。

以上のように、本手法が定性的にも定量的にも応用上十分な精度を持っていることが確認された。以下の節では、当社製の種々の流体機械の流れに関して、本手法を応用した例を示す。

4.2 ダンプ・ディフューザ内の流れ解析⁽⁷⁾

ガスタービン燃焼器内のダンプ・ディフューザ流れ解析に用いる計算格子には、前述の数値生成法を用いた。第5図に、格子の鳥瞰図を示す。計算格子点数は、39150点 ($x \times y \times z = 45 \times 29 \times 30$) である。流速分布についての計算領域流入面の境界条件は、実験結果を用いた。すなわち、アウト側に偏流している流入流速分布を用いた。流出面では、圧力の流れ方向の変化を零にし、流速に関しては、アウト側/インナ側の流量比が実験値と同じになるように与えた。計算領域の両側面では周期境界条件を付加した。乱流運動エネルギーとその散逸率の壁面近傍における値としては、標準の壁関数⁽¹¹⁾を採用した。

第6図に、燃料ノズルと燃焼器内筒を含む面内の流速ベクトル分布を示す。燃料ノズルが存在するため、アウト側の定常渦の大きさはインナ側のそれより小さくなっている。また、燃料ノズルの下流には、局所的な再循環領域が発生している。燃料ノズルを含まない面においては、面内の流れに対して、燃料ノズルの影響があまり見られず、強い再循環流れ領域が現れるなど、ほぼ2次元流れに類似したものが出現している⁽⁷⁾。これらの結果から、本解析手法はダンプ・ディフューザ内の流れ場の特徴を再現しているものと考えられる。第7図に、燃料ノズルを含む面内の圧力分布を示す。燃料ノズルと燃焼器内筒との接合部に流れのよどみによる正圧、アウト側の



第5図 ダンプ・ディフューザの計算格子

Fig. 5 Computational grid for three-dimensional dump diffuser

プレ・ディフューザ出口部に、流れが鋭角な角を迂回することによる負圧が発生している。計算領域の流出面における流速分布に関して、計算値と実験値との比較を行なった⁽⁷⁾。一般的には、定性的、定量的にも良い一致がみられたが、燃料ノズルを含む面内で計算値の方が実験値より大きくなっている。これらは、複雑な3次元の乱流流れ場に対して、等方性の仮定に基づく $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いているためと考えられる。

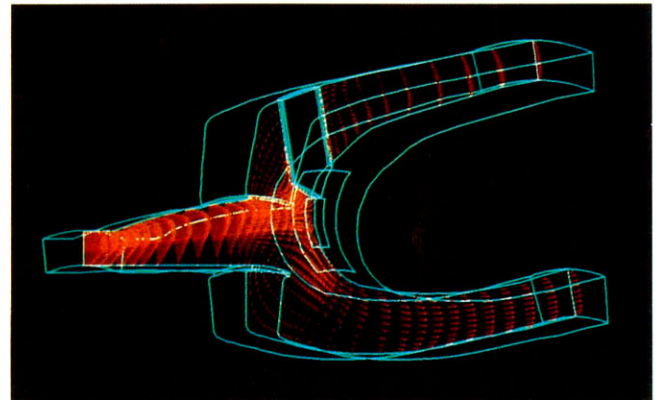
4.3 ブラフボディまわりの流れ解析⁽¹⁴⁾

ターボラムジェットやスクラムジェットの燃焼器内の高速流れ場では、保炎するのに、ガッタ（ブラフボディ）を置き、その後流にできる低速の循環領域を利用することがよく行なわれる。そこで、ディフューザ付きのダクト中にガッタを置いた流れ場について数値解析を行ない、その特徴を調べた。第8図に、解析に用いた計算格子と、ガッタの詳細を示す。計算格子は、約25万点である。第9図に、計算結果を示す。環状ガッタまわりのフローパターンを示すが、ガッタ後流の複雑な循環領域の特徴を表している。

4.4 ボイラ火炉内の流動および燃焼

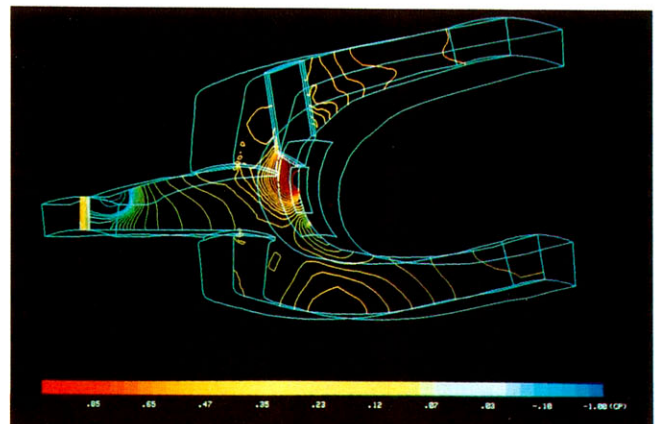
発電用大形ボイラの火炉は、高温であり、サイズが大きいため、ボイラの運転を停止することが容易でない点などの理由で、実機の計測により中の流れの様子を把握することが困難である。ここでは、本コードを実機ボイラ火炉内の流れ・温度解析に適用した例と、さらに燃焼を考慮した解析を行なった例を示す。

現在運転中のボイラ実炉内の流れと温度解析を行なった結果を、第10図に示す。第10図-(a)は流速ベクトル分布、第10図-(b)は温



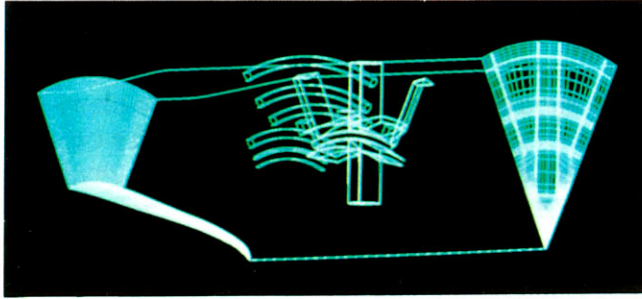
第6図 燃料ノズルを含む面内における流速分布

Fig. 6 Flow pattern in the plane including the fuel nozzle



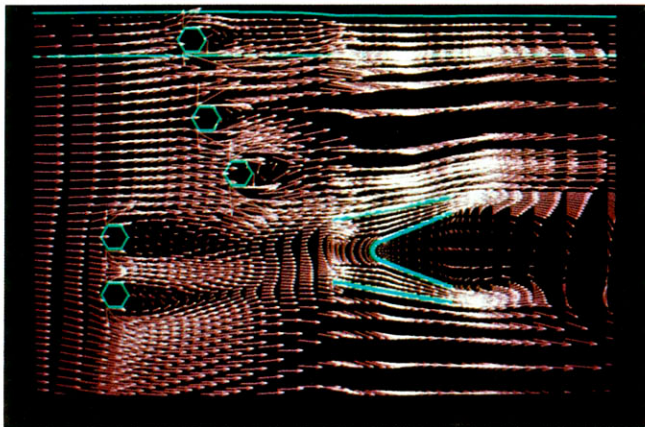
第7図 燃料ノズルを含む面内における圧力分布

Fig. 7 Pressure contour in the plane including the fuel nozzle



第8図 3次元ブラフボディ流れ計算格子

Fig. 8 Computational grid for three-dimensional bluff body



第9図 3次元ブラフボディまわりのフローパターン

Fig. 9 Calculated flow pattern over a 3-dimensional bluff body

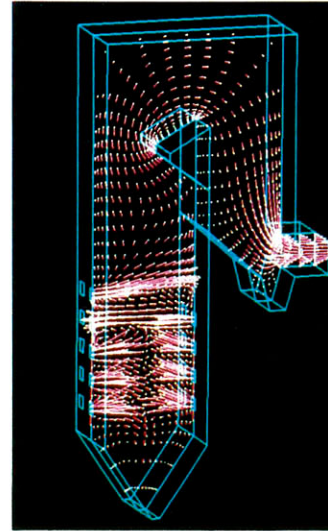
度分布で、いずれもパーナ吹出し口を通る断面で表示したものである。同図の左右側壁面の5段(右側は4段)の流入口のうち、下から3段目までがパーナ、残りは余剰空気口である。この解析の特徴は、パーナからの流入空気のスワール(旋回)を考慮したことで、流速ベクトル、温度分布とも、スワールにともなって流れが周方向に広がっている様子が現れている。温度分布については、パーナからの高温の空気と、余剰空気口からの低温の空気とが、火炉内で混合していく様子を解析している。解析結果を見ると、余剰空気口からのスワールのない流入空気が、強い貫通力でほぼ反対の壁面まで達していることや、火炉下部での対向するスワールによる複雑な流れ場の形成などが把握できる。これらの結果は、実缶で知られている現象と定性的に一致し、本手法が流れ場・温度場の予測に有効であることが確認された。現在は、実機の基本設計や既設ボイラの改良法の検討において、本数値解析コードが積極的に利用されている。

つぎに、いわゆるトンネルボイラ内の燃焼流動解析結果について説明する。計算条件は、円筒状の燃焼器内に、底面より燃料(天然ガス)と2次空気を円環状のノズルから供給し、側面より2次空気を60度ごとに供給した場合を対象とした。ただし、1次空気にはスワールを付け、計算領域として、円周方向に60度のセクタモデルを用いた。燃焼モデルはEddy Break Up⁽¹⁵⁾モデルを用い、また、Multi-Flux放射モデル⁽¹⁶⁾を採用した。計算結果を第11図に示す。フローパターン(第11図(a))は、2次空気の影響を受け、1次空気とともに偏流しており、底面近くには、循環領域も形成されている。燃料と希釈空気との混合が激しいところでは、最大温度は2100Kであった(第11図(b))。上記の事実から、このような燃焼はフローパターンの影響を強く受けることがわかる。

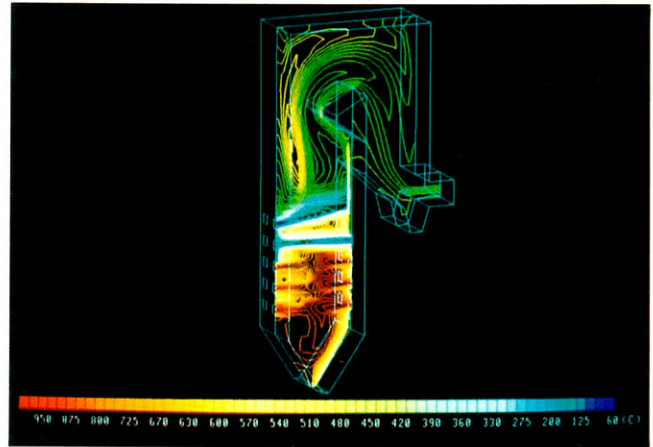
4.5 船体まわりの流れ^{(6),(17)}

船体まわり、とくに船尾には、水の粘性に起因するはく離や船尾

(a) 流速ベクトル分布



(b) 温度分布



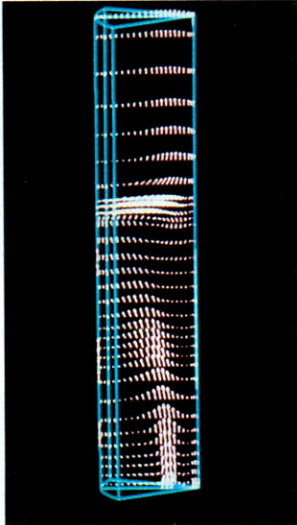
第10図 ボイラ火炉内流れ場・温度場解析結果

Fig. 10 Calculated velocity and temperature field in the boiler furnace

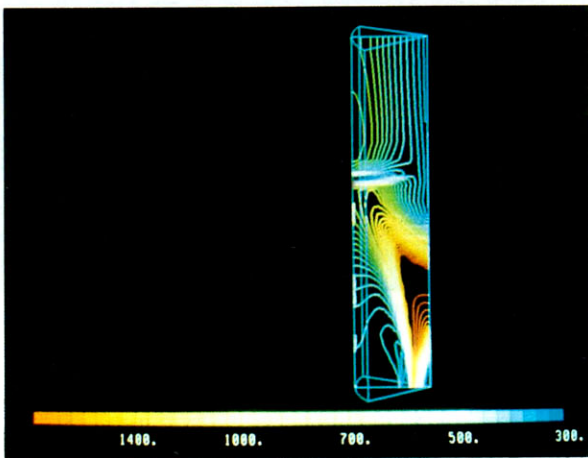
縦渦などの複雑な流れが存在する。しかも船尾にはプロペラ、舵など船の推進性能に重要な役割を演ずる機器があるので、船尾粘性流の推定は、船型設計上欠かせないものである。VEGA-3の船舶への応用は、従来の水槽試験による性能推定を補完するとともに、実験では得られない実船まわりの流れデータを得ることができる方法として期待される。第12図は、船体まわりの流れ計算に使用した計算格子である。模型船まわりの流れを計算するために約5万点の格子を切っている。第13図は、数式船型(船体形状を数式で表した船型)模型船の船尾端断面における流れであり、図中のuは局所流速である。矢印は断面内流速ベクトル、実線は長さ方向流速の等高線で、右側が実測、左側が計算である。船尾端に見られる渦状の流れは、船尾縦渦とよばれ、従来の理論計算法では推定困難であった。VEGA-3の計算結果は実測にくらべ渦の強さがやや弱いものの、位置などが合っており、この渦をよくとらえていることがわかる。第14図は同じ模型船の船体表面圧力を等高線で示したもので、船体後半部を斜め下から見たものである。赤い色が高压部、青い色が低压部を示し、船底と船側の境目の角のところに著しい低压部が発生している。圧力および摩擦力の計算結果を船体表面で積分して船の抵抗を算出すると、無次元表示で 11.7×10^{-3} となり、実測値の 12.3×10^{-3} にかなりよく合った。

船体へVEGA-3を応用した計算法では、プロペラの影響を圧力

(a) 流速ベクトル分布

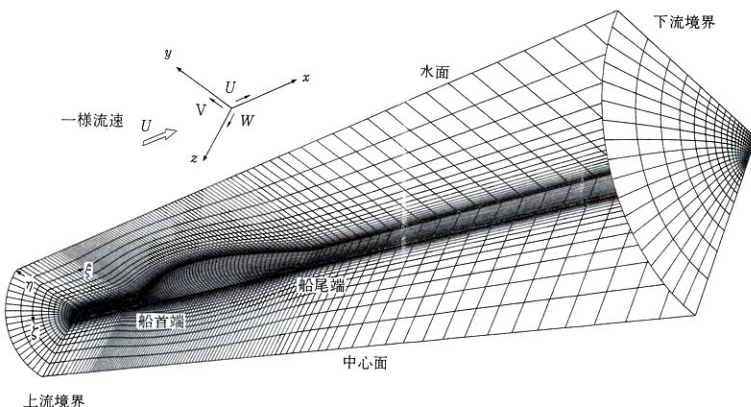


(b) 温度分布

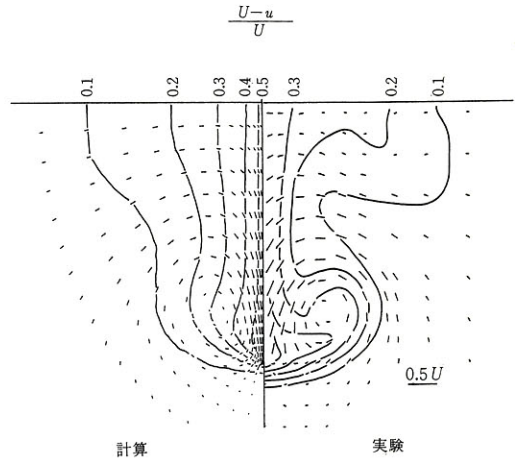


第11図 トンネルボイラ内の燃焼流動解析結果
Fig. 11 Calculated flow field in the boiler furnace

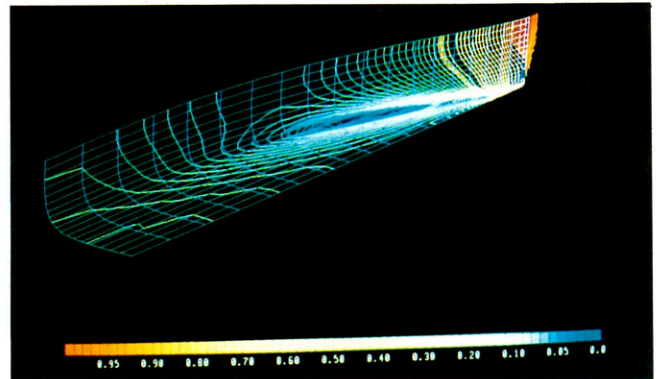
のジャンプとして近似的にとりいられるようになっている。第15図は船尾端断面における流速ベクトルであるが、上がプロペラなしの状態、下がプロペラ作動状態である。右側の実測に見られるように、渦状の流れはプロペラ影響により斜め下方に移動するが、この様子は左側の計算でもとらえられている。プロペラが作動すると、プロペラの吸引力により船尾の圧力が下がり、船の抵抗は増加する。プロペラなしのときの抵抗の、プロペラ作動時の抵抗に対する割合



第12図 船体まわりの計算格子
Fig. 12 Computational grid around ship hull



第13図 数式模型船まわりの流速分布（船尾端断面）
Fig. 13 Velocity distribution around the mathematical ship model (aft end section)



第14図 数式模型船表面の圧力分布（船体後半部）
Fig. 14 Pressure distribution on the surface of the mathematical ship model

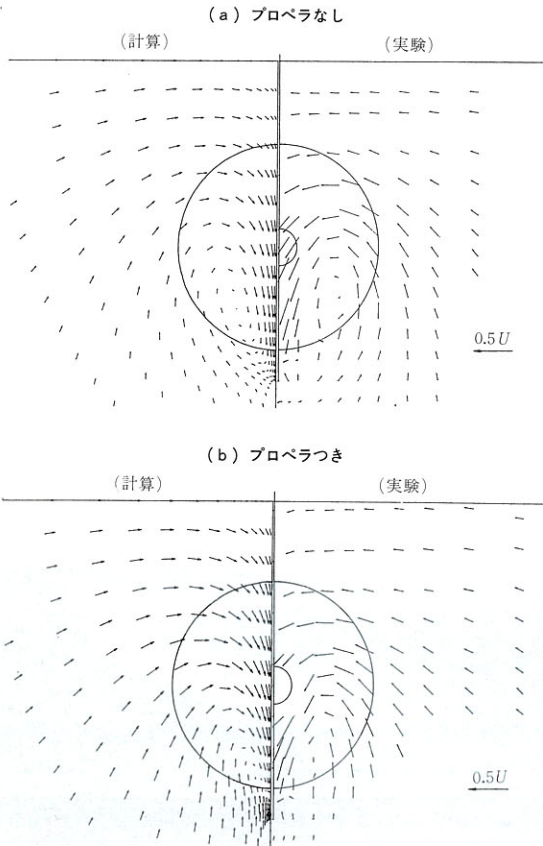
を計算結果から求めると0.893となり、実測値0.882によく合った。現在、この計算法を実用船型にも適用できるように検討をすすめている。VEGA-3はまた、船体付加物まわりの流れの検討や、アメリカズカップ用ヨットの流れ検討にも適用されている。第16図は計算に用いたヨットの形状、第17図はヨットのキールまわりの流れを計算したもので、艇が8ノット（約4 m/s）で右方向に直進しているときの流速ベクトルを示している。

5. 結 言

一般曲線座標系に基づく3次元熱・流体解析コードVEGA-3を開発し、計算精度検証のため、実験結果との比較検討を行なった。さらに、ガスタービン燃焼器の各種要素、ボイラ、船体などの当社の主要製品に関連する応用を行ない、解析手法のknow-howの蓄積を行ない、本コードの有用性を確認した。VEGA-3コードは、当社において基本設計の有力な武器の一つとして、使用されている。今後、計算格子の効率的な生成方法、燃焼モデル、乱流モデルの高精度化に傾注して行く予定である。また、現在平行して開発している遷音速/超音速熱流動解析コードも、別の機会に紹介したい。

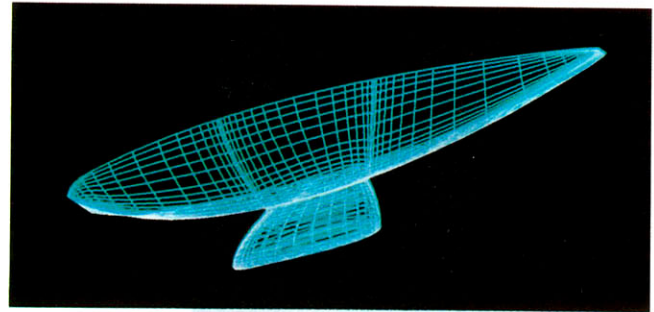
参 考 文 献

- (1) 安藤安則, 河合理文, 藤本達見, 水本伸子, 根岸 稔, 草刈和彦: 3次元粘性流れ場予測プログラムの開発 石川島播磨技報 第24巻第3号



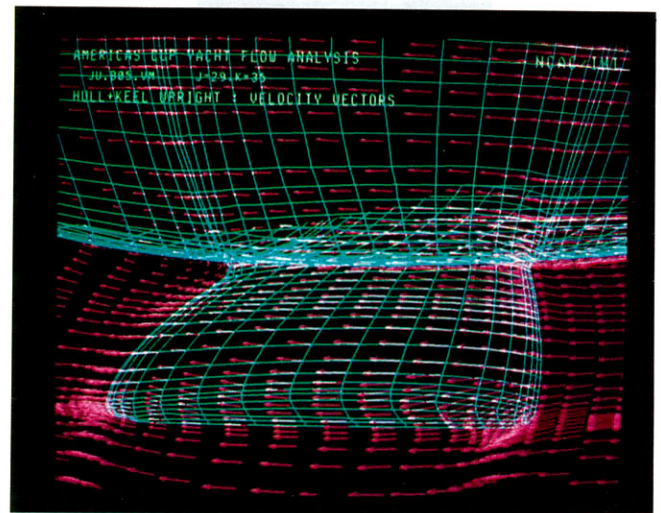
第15図 船尾端の流れに対するプロペラの影響

Fig. 15 The effect of propeller on the flow at the aft end section



第16図 ヨット表面の計算格子

Fig. 16 Computational grid on the surface of the yacht



第17図 ヨットのキールまわりの流速分布

Fig. 17 Velocity distribution around the keel of yacht

1984年5月 pp. 171-176

- (2) 安藤安則, 河合理文, 藤本達見, 水本伸子: 三次元物体まわりの乱流拡散の数値解析 (第1報, 混合距離モデル) 日本機械学会論文集 (B編) 第51巻第463号 1985年3月 pp. 954-958
- (3) Y. Ando, M. Kawai, T. Fujimoto and N. Mizumoto: Numerical Prediction of Turbulent Flow over a Surface-Mounted Cube Numerical Mathematics and Applications, Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland) (1986) pp. 407-413
- (4) Y. Ando, M. Kawai, Y. Sato and H. Toh: Numerical Calculations of Turbulent Flows in a Dump Diffuser AIAA Paper No. 86-1656 (1986)
- (5) 安藤安則, 河合理文: 三次元物体まわりの乱流拡散の数値解析 (第2報, 一般曲線座標系に基づく流れ場解析) 日本機械学会論文集 (B編) 第53巻第494号 1987年10月 pp. 2951-2956
- (6) 増子 章, 白勢 康, 安藤安則, 河合理文: 数式模型船シリーズの粘性流数値シミュレーション 日本造船学会論文集 第162号 1987年 pp. 1-10
- (7) Y. Ando, M. Kawai, Y. Sato and H. Toh: Prediction of Three-Dimensional Turbulent Flows in a Dump Diffuser AIAA Paper No. 88-0185 (1988)
- (8) B. E. Launder and D. B. Spalding: The Numerical Computation of Turbulent Flows Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 3 (1974) pp. 269-289
- (9) C. M. Rhie and W. L. Chow: Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation AIAA Journal Vol. 21 (1983) pp. 1525-1532

- (10) W. Shyy: A Further Assessment of Numerical Annular Dump Diffuser Flow Calculations AIAA Paper No. 85-1440 (1985)
- (11) J. F. Thompson, F. C. Thames and C. W. Mastin: Automatic Numerical Generation of Body-Fitted Curvilinear Coordinate System for Field Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies Journal of Computational Physics Vol. 15 (1974) pp. 299-319
- (12) S. V. Patankar and D. B. Spalding: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 15 (1972) pp. 1787-1806
- (13) I. P. Castro and A. G. Robins: The Flow around a Surface Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams Journal of Fluid Mechanics Vol. 79 Part 2 (1977) pp. 307-335
- (14) 佐藤幸徳, 藤 秀実, 鳥居とも子, 安藤安則, 河合理文: プラフボディを有する高速流れ場の数値解析 第6回航空機計算空気力学シンポジウム論文集 1988年 (発行予定)
- (15) D. B. Spalding: Mathematical Model of Turbulent Flames: A Review Combustion Science and Technology Vol. 13 (1976) pp. 3-25
- (16) S. V. Patankar and D. B. Spalding: A Computer Model for Three-Dimensional Flow in Furnaces Proceedings of the 14th International Symposium on Combustion (1973) pp. 605-614
- (17) A. Masuko, Y. Shirose and S. Ishida: Numerical Simulations of the Viscous Flow around Ships Including Bilge Vortices Proceedings of the 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, The Hague (1988) (to appear)