

非構造格子を用いた3次元複雑形状流路の流れと熱伝達の数値解析

大北洋治、児玉秀和、山脇栄道 (IHI)

吉田豊明、野崎理、山根敬 (航技研)

谷口伸行 (東大)

Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in 3D Complicated Geometries Using Unstructured Grids

by

Yoji Ohkita, Hidekazu Kodama, Shigemichi Yamawaki (IHI)

Toyoaki, Yoshida, Osamu Nozaki, Takashi Yamane (NAL)

Nobuyuki Taniguchi (Tokyo Univ.)

Abstract

A 3-D Navier-Stokes CFD code using unstructured grid has been developed for the purpose of design tool. Accuracy, robustness, efficiency, applicability to wide range of flow speeds and convenient grid generation have been emphasized. Two test cases are presented: a square-sectioned U-bends and a serpentine passage. It is demonstrated that the present code satisfactorily predicts the flow and heat transfer in the bend with moderate curvature. It is also indicated that the current code shows poor agreement with experiments in the bend with strong curvature because the model for the boundary layer is too simple.

1 まえかき

航空エンジンにおける数値流体解析には、実機の複雑形状を効率よく解析すること、また遅い流れと高速流が混在するような流れ場においても安定して収束するような計算手法が望まれる。また、精度はもとより、安定性、計算の高速性も要求される。

複雑形状の流体解析では非構造格子法が、伝統的な構造格子法よりも有利である場合がある。それは複雑形状において、より格子生成が効率的に行えること、局所的に格子密度を上げて精度を向上できること等の特徴を非構造格子法が有するからである。非構造格子の潜在能力を完全に理解するためにはまだ多くの研究が必要ではあるが、これまでも多くの外部流の計算及び、いくつかの内部流の計算について適用され発展してきた。^{1, 2, 5}

非構造格子を複雑形状内流路へ適用した研究の多く(例えば、Dawes⁴のタービン内流冷却通路の流れと熱伝達解析)が、圧縮性の影響が卓越する高速流の解析用に開発された密度基礎法を用いている。しかし、この方法はマッハ数が0に近い領域では非常に計算効率が悪くなるので、特殊な前処理法などを必要とする。これに対して、圧力基礎法はこうした速度域による制約を受けないメリットがある。¹¹

本研究で開発した数値解析手法は、複雑流路の解析を行うために非構造格子を用いていること、遅い流れから衝撃波を伴うような高速流まで統一的に扱うことのできる圧力基礎法を適用しているところに最大の特徴がある。空間離散化には、安定性を損なうことなく高精度を維持する風上スキームが用いられている。本コードをU字管、サーペンタイン管の流れに適用し、速度、熱伝達率を計測値及び他解析結果と比較し、検証した。

2 記号

| | |
|----|-----------------|
| a | 管路幅 (サーペンタイン管) |
| b | 管路高さ (サーペンタイン管) |
| D | 管路幅 (U字管) |
| de | 水力直径 |
| L | 管路長 (サーペンタイン管) |
| Nu | ヌセルト数 |
| Rc | 平均曲がり半径 (U字管) |
| ri | 曲がり内径 (U字管) |
| ro | 曲がり外径 (U字管) |
| W | 流れ方向速度成分 (U字管) |

| | |
|-----------|-------------------|
| W_B | 流れ方向平均速度 (U字管) |
| X, Y | U字管局所座標系 (図3) |
| Z | 流れ方向座標 (サーペンタイン管) |
| x, y, z | U字管座標系 (図2) |
| θ | 曲がり角度 (U字管) |

3 数値解析手法

基礎式は定常3次元レイノルズ平均ナビエーストークス方程式であり、これを圧力修正法により解く。圧力修正法を用いる際には格子配置として、スタガード格子と集中格子の2種類が考えられる。本コードにおいては、非構造格子系での計算容量を抑えるために、同じ格子点において全ての物理量が定義される後者の方法を採用した。集中格子を用いる際に生じる圧力振動の問題に対しては、Rhie等の推奨する手法¹⁰を非構造格子用に拡張した。

乱流モデルには2方程式 $k-\epsilon$ モデルを用いた。乱流境界層を粘性底層、遷移層、乱流層の全領域にわたって正確に解像するためには多数の格子点が必要である。しかし、こうした緻密な格子は計算時間を増大させる。そこで本コードではLaunder等の壁関数¹⁵を適用した。また壁付近の温度境界層についてはKays等の推奨する壁関数⁹を用いた。壁関数は主に構造格子を対象として開発されたものだが、非構造格子への拡張性は既に実証されている。⁶

本コードでは全領域で四面体要素を用いる非構造格子法を採用した。これにより、任意の形状に対して非常に柔軟かつ効率的に格子生成を行うことができる。図1に非構造格子系における空間離散化の方法を簡単のため2次元的に示す。実線で示されるのが要素境界であり、要素の各頂点(格子点)において全ての物理量が定義、計算される。各要素の重心点と要素辺の中点とを順々に結ぶことにより破線で示されるような検査体積を各格子点の周りに生成する。基礎式はこの検査体積において、有限体積法により離散化される。検査体積の各検査面においては対流拡散流束を評価する必要があるが、このうち対流頂の離散化には精度と安定性が同時に要求される。本コードではLinear Profile Skew(LPS)スキームとPhysical Advection Correction(PAC)項¹²とを組み合わせて用い、非構造格子において2次精度と安定性を実現させた。LPSスキームは風上点を定義する上で局所的な速度ベクトルを用いるため、非構造格子のように格子線と流れ方向が合っていない場合にも数値粘性の影響を最小限に抑えることができる。一方2次精度を得るためにPAC項により流れ方向の物理量勾配が評価される。この項の特徴は安定性が高く、かつ数値粘性の

影響が小さいことである。さらに、解析者があらかじめ付加的パラメータを定義する必要がなく、どのような流れ場に対しても普遍的に適用できる利点もある。他の拡散項、生成項は2次中心差分的に評価した。

4 結果と考察

4.1 U字管

本コードを図2に示すような正方形断面のU字管の流れと熱伝達の実験結果⁸と比較し、検証する。図3には断面内局所座標系を示す。平均曲がり半径と水力直径との比は3.357である。実験は、断面水力直径と管路入口平均流速によるレイノルズ数56000の条件で行われた。曲がり開始位置までの助走直線距離は72de（そのうち最初の15deは断熱、後の57deは加熱）である。壁面加熱条件は、等熱流束加熱である。

解析に用いた計算格子を図4に示す。全格子点数は11590である。壁からの第1格子点位置が y^+ が20以上50以下になるよう配置された。本ケースは基本的に非圧縮性流であるため、境界条件も非圧縮的に設定した。入口境界は曲がり開始位置（ $\theta=0^\circ$ ）の2de上流とした。入口境界で速度分布、温度分布、乱流量を与えた。これら諸量の分布は正方形断面の直管における発達乱流の解析結果から得た。出口境界は、曲がり終了位置（ $\theta=180^\circ$ ）から3de下流とし、速度、温度、乱流量の流れ方向の勾配0とした。壁では実験と同様に等熱流束加熱条件とした。また、計算容量を節約するため、計算はU字管の半分の形状だけを対象とし、中心面において対称条件を課した。

図5に曲がりの各位置における対称面上の流れ方向速度成分の流路横断方向分布を計測値と比較して示す。代数応力モデル(ASM)を用いた他解析結果⁸も比較のために図中に示している。

まず実験結果から得られる流れの特徴をいくつか説明する。曲がり開始位置においては最大速度位置が内周側へずれているが、これは曲がりの影響により外周で減速し内周で加速することによる。しかし $\theta=90^\circ$ から 180° の範囲で断面内に生じる支配的二次流れの影響により、最大速度位置が外周側へ移動する。また $\theta=90^\circ$ においては、 $Y=0.6$ 付近に局所的な速度欠損が生じている。

数値解析結果では、全体的な速度分布および最大速度位置の移動の様子は計測値と良く一致している。またASMモデルによる他解析結果は $\theta=90^\circ$ における速度欠損を捉えているのに対し、本コードは予測できていない。この速度欠損は、支配的二次流れ場さらに付加的ないくつかの渦が形成されたことにより、流れ方向速度場が擾乱を受けて現れたものと考えられる。Choi等³が指摘するように、壁関数の代わりに境界層をより高精度に解像する手法を用いることにより、こうした複雑な流れ場に対する予測精度が向上すると考えられる。

図6に曲がりの各位置における内周、底面、外周壁のヌセルト数分布の計算結果を計測結果と比較して示す。応力方程式モデル(DSM)を用いた他解析結果⁷も比較のために図中に示している。計測結果を観察すると、 $\theta=90^\circ$ より下流側において曲がりの影響が顕著に現れている。即ち、内周壁では曲がり開始位置に比べて熱伝達率が低下し、逆に外周壁では増加している。

本コードはこれらの傾向およびヌセルト数の定量的レベルともに良く予測している。また、高精度な乱流モデル(DSM)を用いた他解析と比較しても遜色の無い精度が得られていることが分かる。これは、支配的二次流れが熱伝達に及ぼす影響に比べ、付加的な渦の影響が小さいことによるものと考えられる。

4.2 サーペントライン管

2つめの検証は図7に示すようなサーペントライン管内の流れと熱伝達¹³の実験との比較である。管路断面は縦横比1:2の矩形である。また、曲がり開始位置までの助走直線距離は48.5de（そのうち最初の38.5deは断熱、10deは加熱）である。対向する一対の側壁は管入口において流れ方向に向かった観測者の視点に基づきright壁、left壁とそれぞれ呼ぶ。もう1対の壁はtop壁、bottom壁と呼ぶ。実験は、断面水力直径と管路入口平均流速によるレイノルズ数20000の条件で行われた。壁面は助走部を含む全領域で、等熱流束加熱条件により加熱された。図8に壁温計測位置を

示す。

図9に計算格子を示す。全格子点数は15717である。壁からの第1格子点位置が y^+ が20以上50以下になるよう配置された。本ケースも前のケースと同様に非圧縮的な境界条件設定がなされた。入口境界は加熱開始位置（第1曲がり開始位置の10de上流）とした。入口において速度、温度ともに一様を与えた（2次速度成分は0）。また入口乱流量は、乱れエネルギーを主流運動エネルギーの4%、乱れの長さスケールを管路断面水力直径の1%として定義した。この条件により計算を行ったところ、曲がり部の入口までに流れがほぼ十分に発達し、実験と同条件とみなせることを確認した。出口境界は第2曲がり終了位置の10de下流とし、速度、温度、乱流量の流れ方向の勾配0とした。壁では等熱流束加熱条件とした。計算は管の半分の形状だけを対象とし、中心面において対称条件を課した。

図10にtop壁、left壁、right壁の流れ方向ヌセルト数分布の計算結果を計測値および他解析結果と比較して示す。この他解析は非構造格子法を用いており、その他の数値解析手法（圧力修正法、壁関数、 $k-\epsilon$ モデル）は本コードと同じである¹⁴。両解析において格子点数、格子点配置は等価である。

まず実験結果から得られる流れの特徴をいくつか説明する。第1直線部においてはヌセルト数レベルは管断面においてどの壁位置でもほぼ同じである。第1、第2曲がり部においては全ての壁位置においてヌセルト数が上昇する。特に外周壁（第1曲がり部のleft壁、第2曲がり部のright壁）での上昇が顕著である。第2、第3直線部の流れは上流の曲がり部で形成された二次流れの影響を受けてそれぞれの入口付近では壁の位置によってヌセルト数レベルに違いがある（第2直線部入口ではleft壁で高く、第3直線部入口ではright壁で高い）が、下流では一致する。

双方の解析とも、top壁位置においては計測値の傾向をとらえているが、曲がり部でのヌセルト数レベルは低めに予測されている。これは、曲がり部における強い渦による壁面付近の剪断を正確に捉えられていないことによると考えられる。外周壁においても同様の理由によりヌセルト数は低めに予測されている。一方内周壁（第1曲がり部のright壁、第2曲がり部のleft壁）においては計測値で前述した渦の効果によりヌセルト数が増加しているのに対して、解析では大きな影響が生じることにより著しくそのレベルが減少している。双方の解析とも同様の傾向を示していることから、こうした特徴は非構造格子を用いたことに起因するものではない。恐らく、強い剪断流場では不適切とされる壁関数を双方のコードとも用いていることによると考えられる。

4 結論

非構造格子を用いた数値解析法を開発した。非構造格子は構造格子に比べて、複雑形状において格子を効率的に作成する上でより有利である。また、本コードは圧力修正法を用いており圧縮性流への拡張が容易である。本コードをU字管、サーペントライン管に適用し、流れと熱伝達を計測値及び他解析結果と比較し、検証した。

U字管の解析では、速度分布の全体的傾向、定量値計測値と良く一致したが、付加的な渦による局所的な速度欠損を捉えることができなかった。これは、壁近傍のモデリングが壁関数により単純化されていることに起因すると考えられる。しかし、熱伝達率分布は他の高精度な乱流モデルを用いた解析結果と比べて遜色ない程度まで正確に予測されることから、U字管のような比較的緩やかな曲率を有する曲がり管では、現在の手法でも熱伝達率の予測精度は良いことが明らかになった。

サーペントライン管の解析では、急激な曲がり部における強い渦、およびそれによる壁面付近の剪断を正確にとらえることができないために、計測値との一致は良くなかった。従ってこうした流れ場では、壁関数に代わって境界層をより高精度に解像するような手法の導入が必要であるとの知見を得た。

5 参考文献

[1] Barth, T.J., 1991, "Numerical Aspects of Computing Viscous High Reynolds Number Flows on Unstructured Meshes", AIAA Paper 91-0721

- [2] Braaten, M.E. and Connell, S.D., 1996, "Three-Dimensional Unstructured Adaptive Multigrid Scheme for the Navier-Stokes Equations", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 2, pp.281-290
- [3] Choi, Y.D. et al., 1989, "Numerical Computation of Turbulent Flow in a Square-Sectioned 180 Deg Bend", *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.111, pp.59-68
- [4] Dawes, W.N., 1992, "The Solution-Adaptive Numerical Simulation of the 3D Viscous Flow in the Serpentine Coolant Passage of a Radial Inflow Turbine Blade", *ASME Paper 92-GT-193*
- [5] Dawes, W.N., 1996, "The Generation of 3D, Stretched, Viscous Unstructured Meshes For Arbitrary Domains", *ASME Paper 96-GT-55*
- [6] Holmes, D.G. and Connell, S.D., 1989, "Solution of the 2D Navier-Stokes Equations on Unstructured Adaptive Grids", *AIAA Paper 89-1932-CP*
- [7] Iacovides, H., 1995, "Internal Convection Heat Transfer and Cooling, A Computational Approach", *vonKarman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series*, 1995-05
- [8] Johnson, R.W., and Launder, B.E., 1985, "Local Heat Transfer Behavior in Turbulent Flow Around a 180 deg Bend of Square Cross Section", *ASME Paper 85-GT-68*
- [9] Kays, W.M., and Crawford, M.E., 1980, "Convective Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, New York
- [10] Rhie, C.M., and Chow, W.L., 1983, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", *AIAA Journal*, Vol.21, No.11, pp.1525-1532
- [11] Rhie, C.M., 1986, "A Pressure Based Navier-Stokes Solver Using the Multigrid Method", *AIAA Paper 86-0207*
- [12] Thomas, M.E. et al., 1989, "The Development of an Efficient Turbomachinery CFD Analysis Procedure", *AIAA Paper 89-2394*
- [13] Takamura, J., 1991, "Heat Transfer in Serpentine Cooling Passages of Gas Turbine Rotating Blades", Bachelor thesis, Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
- [14] Suzuki, T. et al., 1996, "Flow Behavior around stayvanes and guidevanes of a francis turbine", *Journal of Fluid Engineering*, Vol.118, No.1, pp.110-115
- [15] Prakash, C. and Patankar, S.V., 1985, "A Control Volume -Based Finite-Element Method for Solving the Navier-Stokes Equations Using Equal-Order Velocity-Pressure Interpolation", *Numerical Heat Transfer*, vol.8, pp.259-280
- [16] Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, pp.269-289

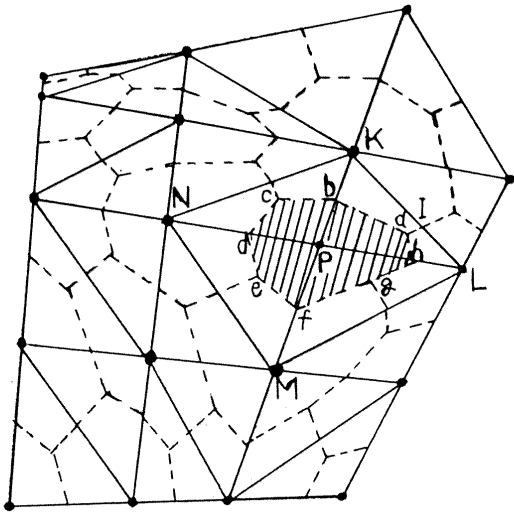


図1 非構造格子系における離散化
(Prakash and Patankar¹⁵⁾)

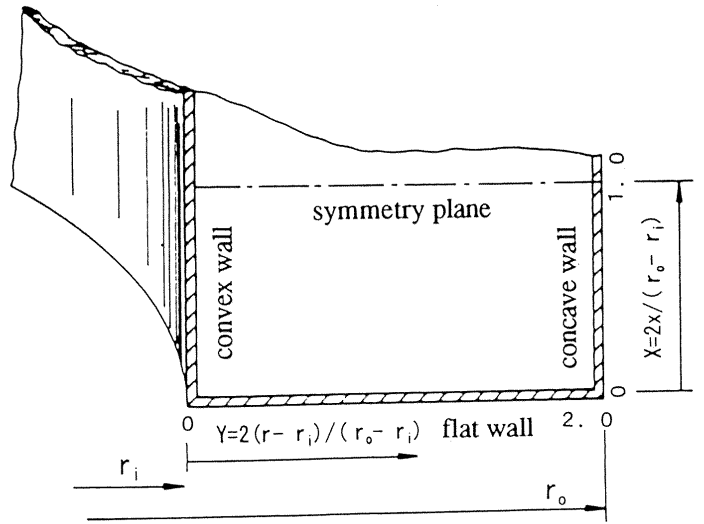


図3 U字管断面
(Johnson and Launder⁸⁾)

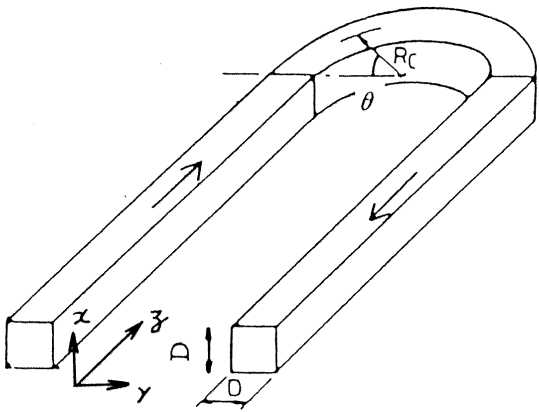


図2 U字管
(Choi 等³⁾)

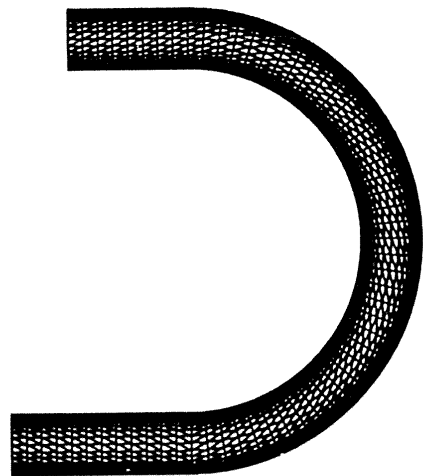


図4 U字管計算格子

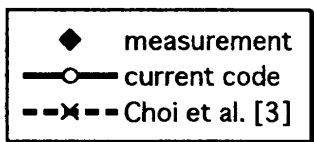
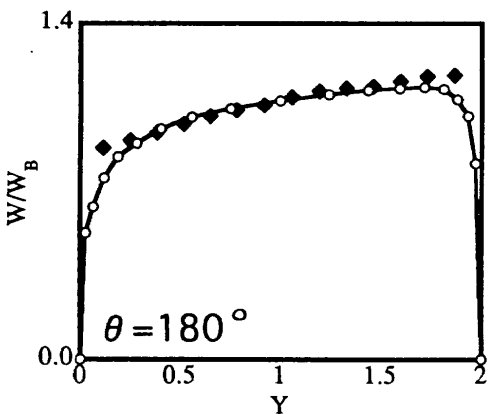
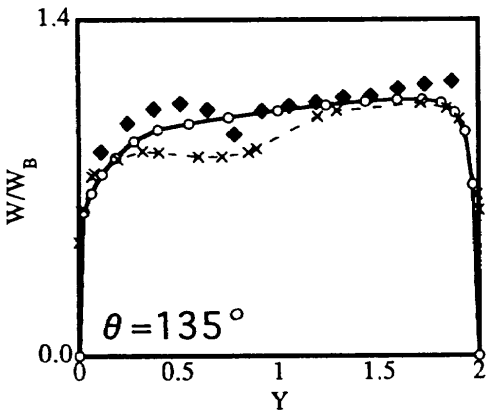
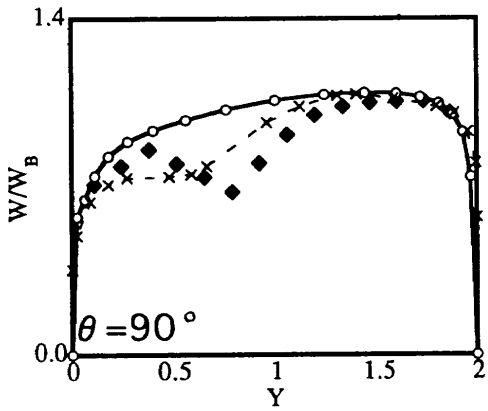
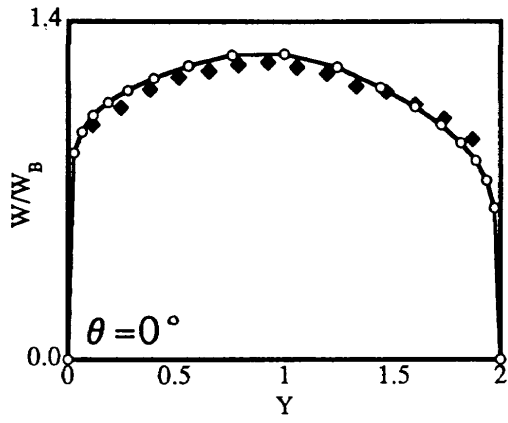


図5 速度分布

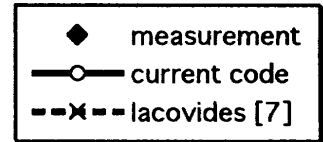
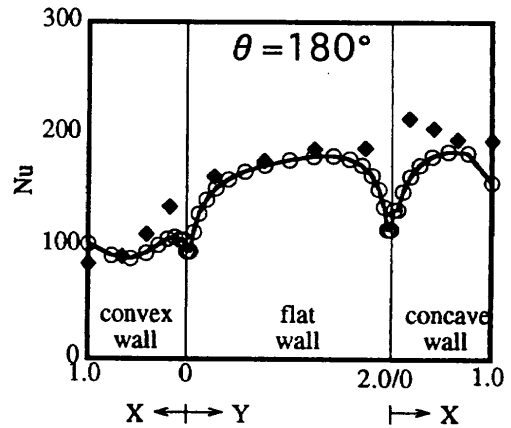
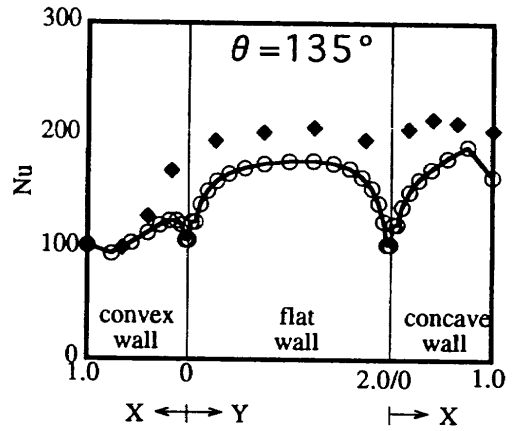
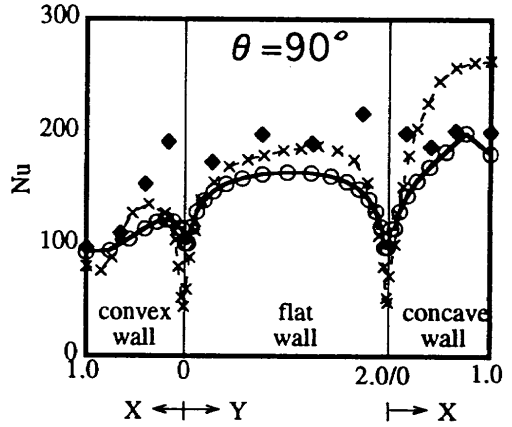
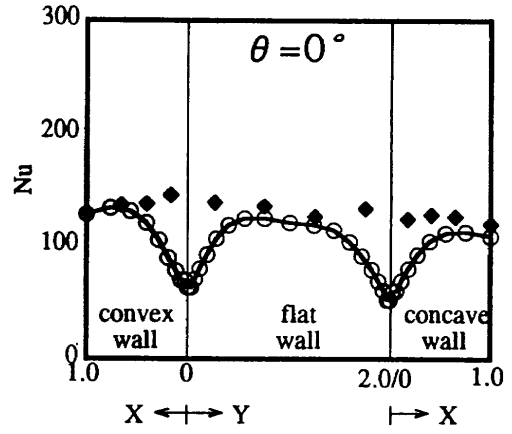


図6 ヌセルト数分布

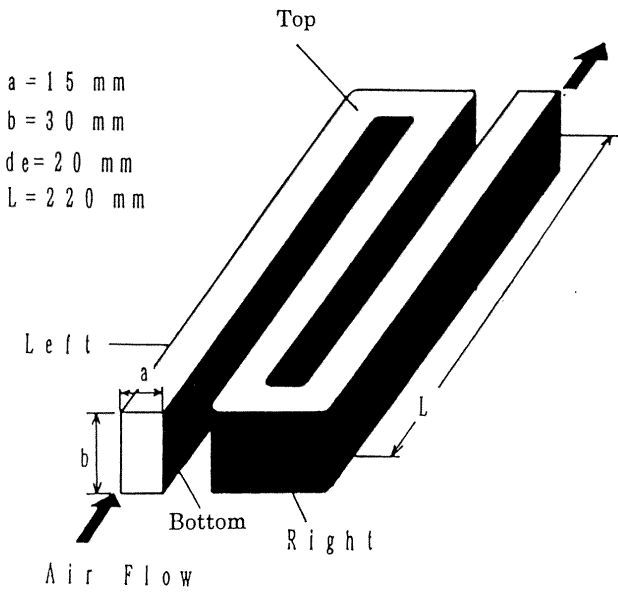


図7 サーペントイン管 (Takamura 等¹³)

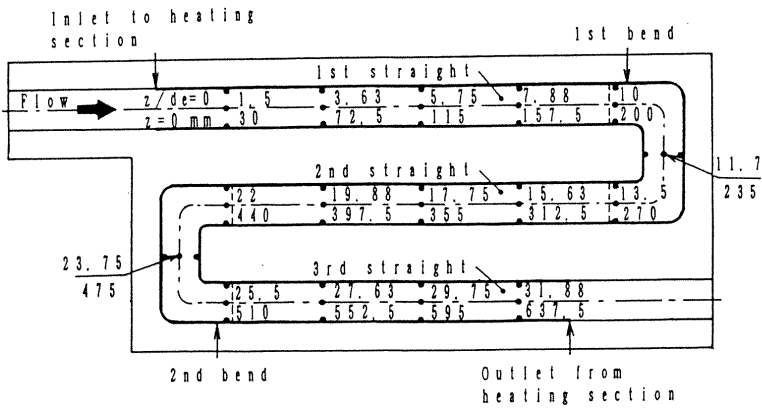


図8 温度計測位置 (Takamura 等¹³)

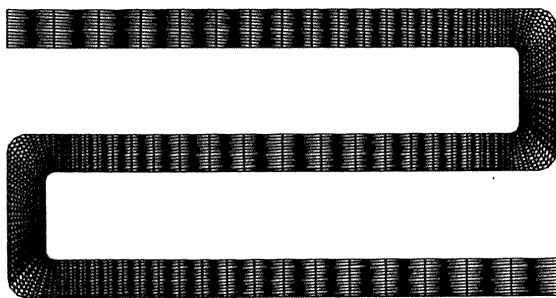


図9 サーペントイン管計算格子

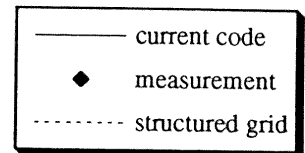
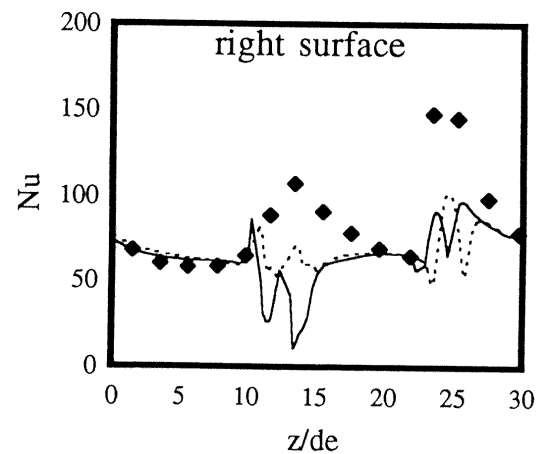
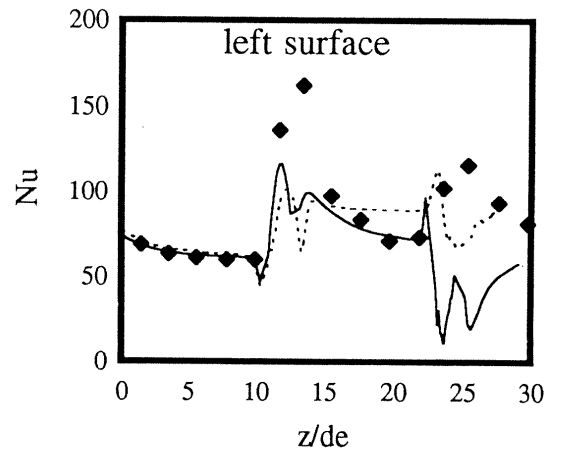
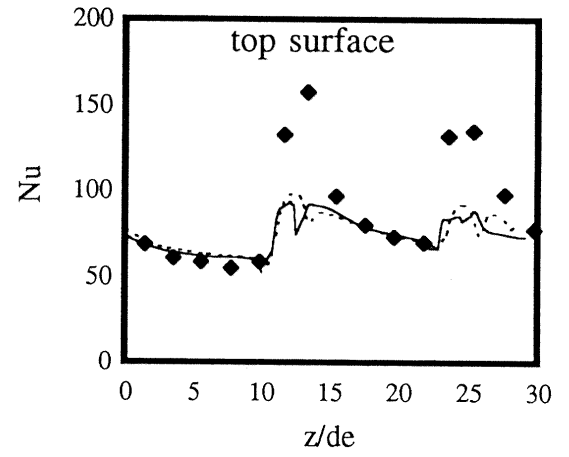


図10 ヌセルト数分布