〔農工研技報 206
249～265，2007〕

パイプラインの継手が流れに及ぼす影響

田中良和*・向井章恵*・樽屋啓之*

目　次

Ⅰ　緒　言

昨今の農業用水利施設では，管路タイプの水利システムが施工されて久しい。直線管路には約6m毎に継ぎ手があり，その継ぎ手は管種，管材メーカーおよび施工条件などによって異なる。直線管路の流速係数は，設計基準「パイプライン」の技術書より参照することができるが，近年導入されつつある性能照査指向の設計手法を鑑みれば，管路の継ぎ手が流れに及ぼす影響を考察することは意義のあることであると考えられる。よって，本報告では管の継ぎ手が管内の流れにどのような影響を与えているかを数値解析して考察した。

また，管内の流れは，管路延長方向への移流が卓越している現象である。流れの数値解析において，移流方程式の解法は，数値振動や数値拡散などの誤差が生じやすく解析の困難な現象の一つであり，数多くの高精度解法が提案されてきた。高精度解法の一つとして，CIP法が近年注目されつつある。CIP法は2点の値と微分値を用いたエルミート補間によって，2点間の値を求める手法である。そのため，原理がわかりやすく，計算格子がコンパクトになるので，大変使いやすい計算手法である。そのため，CIP法には多くの変形や拡張が存在している。しかし，これらの変形や拡張されたCIP法同士の精度の比較を網羅的に行った研究は少ないようである。そこで，数値解析における手法の選択における便益に資するために，複数のCIP法について精度の比較を行った。

*施設資源部水路工水理研究室

平成19年3月19日受理
キーワード：CIP，継ぎ手形状，パイプライン

Ⅱ　数値解析手法の検討

1　CIP法（Cubic-Interpolated Pseudo Particle Method / Constrained Interpolation Profile Method）

CIP法はNavier-Stokes方程式にも現れる保存型移流方程式を移流項と非移流項に分離して，次式の非保存型の移流方程式を高精度で数値解析する手法である（H.Takewaki, A.Nishiguchi, and T. Yabe,1985）。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u\frac{\partial f}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

ここで，tは時間，xは距離，fは流体力学的変量，uは流速を表す。

CIP法の精度は，流体力学的変量をべき級数による3次多項式によって曲線を表現するため，3次精度である。その解法は，計算時間Δtと流速の積から移流原点を辿り，移流原点を挟んで上流側の格子点と下流側の格子点における流体力学的変量の値とその微分値を用いて，3次多項式の各項の係数を求めると同時に，上流点～下流点間の距離と移流原点～下流点間の距離とを利用して移流源点における流体力学的変量の値とその微分値をエルミート補間法によって補間するものである。エルミート補間法は，コンピュータグラフィックス分野において曲線や曲面を表現する補間手法として，航空機や自動車の設計に利用されてきた実績のあるパラメトリック曲線にも活用されてきた。よって，CIP法は移動する曲線を補間する手法であると言える。

つまり，移流原点xを挟む上流点（x_{i-1}）と下流点（x_i）と間の補間を3次のべき級数を用いたパラメトリック曲線で表すと，次式になる。

$$F_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (2)$$

ここで，a_i，b_i，c_i，および d_iは補間曲線を特徴づけるパラメータである。

2点の値と微分値をそれぞれ，f_i，g_i，f_{i-1}，および g_{i-1}とすると，以下の条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned} &F_i(x_i) = f_i \\ &\frac{dF_i(x_i)}{dx} = g_i \\ &F_i(x_{i-1}) = f_{i-1} \\ &\frac{dF_i(x_{i-1})}{dx} = g_{i-1} \end{aligned} \quad (3)$$

これらの関係式をまとめ，上流点～下流点間の距離をΔxとすると，3次多項式の各係数が求まる。

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{g_i + g_{iup}}{\Delta x^2} + \frac{2(f_i - f_{iup})}{\Delta x^3} \\ b_i &= \frac{-3(f_i - f_{iup})}{\Delta x^2} - \frac{2g_i + g_{iup}}{\Delta x} \\ c_i &= g_i \\ d_i &= f_i \end{aligned} \quad (4)$$

ここで，下付文字iupは，補間する点iの移流原点xを挟む上流点のことである。流れの方向の正負によって，1次元座標において補間する点について点対称になる。式(4)を式(2)と式(2)の微分式に代入することによって，移流原点xの流体力学的変量の値と微分値が求まる。各格子点において，計算時間Δt前に移流原点にあった流体粒子がΔt後に移流してきたと考えることによって，計算時間Δt前の移流原点の流体力学的変量が移流方程式の解となる。次式の非移流項は差分法や有限要素法などのCIP法以外の近似解法にて計算する必要がある。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + f\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

従来のCIP法では，下流点を補間対象となる点としていたので，CFL条件は1以下であったが，前述のように下流点は移流原点の下流側にある格子点とすることによって大きいCFL条件においてもロバストに計算することが可能である。この手法はセミラグランジュCIP法と呼ばれている。

2　有限体積CIP法

CIP法は移流方程式を3次精度で解析することができるが，保存が保証されていないのに対して，Nakamuraら（2001）によって開発された有限体積CIP法は，CIP法では2点の流体力学的変量の値と微分値を用いて3次多項式を求めるというアナロジーを適用して，2点の流体力学的変量の値と積分値を用いて3次多項式を求めることにより，保存型の移流方程式を解析できる手法である。差分法は格子点上の値を，有限体積法はコントロールボリュームにおける区間積分平均を基本変数とするのに対し，有限体積CIP法は，格子点上の値とコントロールボリュームの区間積分平均の計測量を基本変数とするマルチモーメントな手法である。

保存型移流方程式は次式になる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial (uf)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

コントロールボリュームを$\left[x_{i-\frac{1}{2}},\ x_{i+\frac{1}{2}}\right]$として積分すると，次式になる。

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{\Delta x}\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} f(x,t)dt\right) = -\frac{1}{\Delta x}\left(\hat{f}_{x_{i+\frac{1}{2}}} - \hat{f}_{x_{i-\frac{1}{2}}}\right) \quad (7)$$

ただし，Δxは，$x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}$，$\hat{f}_{x_{i+\frac{1}{2}}}$，$\hat{f}_{x_{i-\frac{1}{2}}}$はコントロールボリュームへの数値流束であり，CIP法と同様にして，数値流束を補間する多項式の係数を決定するために，以下の手順を行う。

移流原点xを挟む上流点（$x_{i-1/2}$）と下流点（$x_{i+1/2}$）との間の補間を2次のべき級数のパラメトリック曲線で表すと，次式になる。

$$F_i(x) = b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (8)$$

ここで，b_i，c_i，および d_iは補間曲線を特徴づけるパラメータである。

コントロールボリュームの境界の値$f_{i-\frac{1}{2}}, f_{i+\frac{1}{2}}$と線積分平均値$\bar{f}_i$を用いて，以下の条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned} &F_i\left(x_{i-\frac{1}{2}}\right) = f_{i-\frac{1}{2}} \\ &F_i\left(x_{i+\frac{1}{2}}\right) = f_{i+\frac{1}{2}} \\ &\frac{1}{\Delta x_i}\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} F_i(x) = \bar{f}_i \end{aligned} \quad (9)$$

この手法は，数値流束の補間を2次の多項式を用いた保存型の移流スキームであるので，CIP-CSL2（Conservative Semi-Lagrangian 2 order）と呼ばれている。

3　有限体積有理関数CIP法

有限体積CIP法は，保存型移流方程式を3次精度で解析することができる手法であるが，本来CIP法が持つ固有の性質である滑らかな曲線を補間近似するという性質があるため,流体力学的変量の値が急激に変化する場合,オーバーシュートとアンダーシュートを起こすことが知

られている。Xiaoら（1996）は，コンピュータグラフィックス分野において滑らかな曲線と解析曲線の両方を補間することができるパラメトリック曲線であるNURBS（Non Uniform Rational Basic Spline）と類似した仕組みを利用して，パラメトリック曲線を２次のパラメトリック曲線で有理化することによって適切な滑らかさに調節し，オーバーシュートとアンダーシュートを抑制するCIP法を開発した。

次式のようにCIP-CSL2を有理化した補間式を利用する手法はCIP-CSLR0と呼ばれている。

$$F_i(x) = \frac{b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i}{[1 + b_i(x-x_i)]^2} \tag{10}$$

ここで，b_i，c_i，および d_iは補間曲線を特徴づけるパラメータである。

さらに，次式のように分子のべき数を３次とした補間式はCIP-CSLR1と呼ばれている。

$$F_i(x) = \frac{2b_i c_2 (x-x_i)^3 + (3c_2 + b_i c_i)(x-x_i)^2 + 2c_i(x-x_i) + d_i}{[1 + b_i(x-x_i)]^2} \tag{11}$$

4　STAA-CSL法（Surface Tracking by Artificial Anti-diffusion with Conservative Semi-Lagrangian scheme）

有限体積有理関数CIP法は，オーバーシュートとアンダーシュートを抑制して，保存型移流方程式を３次精度で解析することができる手法であると言えるが，曲線が単調になり，数値拡散が大きくなることが知られている。矢部（2003）は，有限体積有理関数CIP法にtan関数を掛けてtangent変換することによって，数値拡散と逆の方向に人工的に拡散を起こして，数値拡散を防ぐ手法を開発した。この手法はSTAA-CSL法と呼ばれる。本報告では，tangent変換をする前の補間式が，CIP-CSL2，CIP-CSLR0，およびCIP-CSLR1の場合，それぞれ，STAA-CSL2，STAA-CSLR0，STAA-CSLR1と呼ぶことにする。

5　多次元化

CIP法は移動する曲線を補間する方法であるので，原理的には１次元解析手法である。CIP法を多次元化する方法はA型，B型，C型，M型と４パターンが提案されている（T.Aoki，1995）。大別するとA型とB型はCIP法による多項式の係数の決定方法の考え方を，多次元多項式に適用した直接的な方法であるのに対して，C型とM型は多次元を分離して各座標軸方向にそれぞれ１次元のCIP法を適用する多段的な方法である。さらに詳細に説明すると，A型は以下の多次元多項式を補間関数としているため，f_{xy}については補間していないので，（i+1，j+1）における微分値の連続性が満たしていない。

$$\begin{aligned} F(x,y) = {} & C_{3,0}X^3 + C_{2,0}X^2 + f_{x\ i,j}X + f_{i,j} \\ & + C_{0,3}Y^3 + C_{0,2}Y^2 + f_{y\ i,j}Y \\ & + C_{2,1}X^2Y + C_{1,1}XY + C_{1,2}XY^2 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} F_x(x,y) = {} & 3C_{3,0}X^2 + 2C_{2,0}X + f_{x\ i,j} \\ & + 2C_{2,1}XY + C_{1,1}Y + C_{1,2}Y^2 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} F_y(x,y) = {} & 3C_{0,3}Y^2 + 2C_{0,2}Y + f_{y\ i,j} \\ & + C_{2,1}X^2 + C_{1,1}X + 2C_{1,2}XY \end{aligned} \tag{14}$$

ここで，$X = x-x_i$，$Y = y-y_j$である。また，多項式の係数Cとｆは，曲面を特徴づけるパラメータであり，関数Fの値とその微分値の連続条件から導かれる。詳細は，Aoki（1995）を参照されたい。

一方，B型は f_{xy}の項を含んだ次式の多次元多項式を補間関数としているため，微分値の連続性を満たしている。

$$\begin{aligned} F(x,y) = {} & C_{3,0}X^3 + C_{2,0}X^2 + f_{x\ i,j}X + f_{i,j} \\ & + C_{0,3}Y^3 + C_{0,2}Y^2 + f_{y\ i,j}Y \\ & + C_{3,1}X^3Y + C_{2,1}X^2Y + C_{1,1}XY \\ & + C_{1,2}XY^2 + C_{1,3}XY^3 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} F_x(x,y) = {} & 3C_{3,0}X^2 + 2C_{2,0}X + f_{x\ i,j} \\ & + 3C_{3,1}X^2Y + 2C_{2,1}XY + C_{1,1}Y \\ & + C_{1,2}Y^2 + C_{1,3}Y^3 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} F_y(x,y) = {} & 3C_{0,3}Y^2 + 2C_{0,2}Y + f_{y\ i,j} \\ & + C_{3,1}X^3 + C_{2,1}X^2 + C_{1,1}X \\ & + 2C_{1,2}XY + 3C_{1,3}XY^2 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} F(x,y) = {} & 3C_{3,1}X^2 + 2C_{2,1}X + C_{1,1} \\ & + 2C_{1,2}Y + 3C_{1,3}Y^2 \end{aligned} \tag{18}$$

ここでも，X，Y，C，およびｆの説明は，A型と同じである。Cとｆの値の詳細は，Aoki（1995）を参照されたい。

他方，C型とM型は，上記の多次元多項式を使用せずに，f_{xy}の補間は，ｘ軸方向には，値 f_yとその微分値 f_{xy}を補間し，ｙ軸方向には，値 f_xとその微分値 f_{xy}を補間するようにして，多段的に補間する手法であるが，ここで，C型が１次元CIP法を適用するのに対して，M型は線形補間を適用する。

有限体積CIP法における多次元化は，２パターンが提案されている。一つは，Xiao（1996）が提案したTEC（Time-Evolution Converting）による方法であり，もう一つはNakamura（2001）らが提案した１次元方向にCIP法を２回繰り返す方法である。以下，それぞれTEC法と

2Step_CIP法と呼ぶことにする。

TEC法は，コントロールボリュームの体積分平均の時間変化と，コントロールボリュームの境界の面積分平均の時間変化とを，相互に求める方法である。一般的に次式の簡単な線形補間式を使用する。

積分平均値$f_{\mathrm{i+1\,jk}}, f_{\mathrm{ijk}}$から境界値$f_{\mathrm{i+\frac{1}{2}jk}}$への変換式

$$\delta_{\mathrm{t}}\bar{f}_{\mathrm{i+\frac{1}{2}jk}} = \frac{1}{2}\left(\delta\bar{f}_{\mathrm{i+1\,jk}} + \delta\bar{f}_{\mathrm{ijk}}\right) \tag{19}$$

境界値$f_{\mathrm{i+\frac{1}{2}jk}}, f_{\mathrm{i-\frac{1}{2}jk}}$から積分平均値$f_{\mathrm{ijk}}$への変換式

$$\delta_{\mathrm{t}}\bar{f}_{\mathrm{ijk}} = \frac{1}{2}\left(\delta\bar{f}_{\mathrm{i+\frac{1}{2}jk}} + \delta\bar{f}_{\mathrm{i-\frac{1}{2}jk}}\right) \tag{20}$$

これに対して，2Step_CIP法は，Fig.1に示すように，各座標軸方向に１次元CIP法を２回適用する方法である。よって，2Step_Cip法は，コントロールボリュームの体積分平均，その境界の面積分平均，および格子点上の値を必要とする。

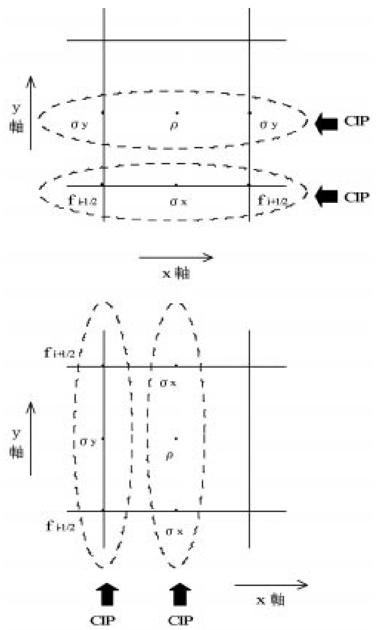


Fig.1　2Step_CIP法におけるCIP法の適用箇所
Applicable points of CIP method for 2Step_CIP method

多次元化する方法においてそれぞれ精度や計算資源の使用量に特徴があり，用途に応じて適用される。

Ⅲ　精度確認

１　１次元移流問題

初期値としてHeviside関数を与え，これが一定の流速場を移流する問題を解析した。移流速度を1，Δx=0.005，Δt=0.02および格子数1,000として，t=3.0になるときの誤差を評価した。

初期値としてHeviside関数は次式の通りである。

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & (x < 1.0) \\ 0.0 & (x \geq 1.0) \end{cases} \tag{21}$$

誤差は次式によって評価した。

$$\varepsilon \equiv \frac{\sqrt{\sum_{\mathrm{i}}^{\mathrm{NX}}\left(f_{\mathrm{Num}} - f_{\mathrm{exact}}\right)^2}}{\sum_{\mathrm{i}}^{\mathrm{NX}} f_{\mathrm{exact}}} \tag{22}$$

ここで，f_{Num}は数値解析による結果，f_{exact}は厳密解である。

Fig.2に，厳密解は黒線で表し，適用した各計算手法は青線で表した。風上１次差分法は数値拡散が大きく，Lax-Wendrof法は数値振動が大きいことが分かる。他方，CIP法は，数値拡散と数値振動が生じていなかった。しかし，若干のアンダーシュートとオーバーシュートが生じていた。CIP-CSL2においても，CIP法と同じ特徴があった。しかし，有理関数を使用したCIP-CSLR0とCIP-CSLR1においては，アンダーシュートとオーバーシュートが消滅した。さらに，tangent変換を施したCIP-STAA-CSLの３手法がアンダーシュートとオーバーシュートを抑制しつつ最も精度高いことが示された。

２　２次元移流問題

ベンチマーク試験として利用されているZalesak問題を行った。Zalesak問題とは，Fig.3にように，Heviside関数によって２次元平面に円形のコの字形状を与え，これを移流によって円運動させ，一周した時の初期値からのずれの大きさを確認するベンチマーク試験である。誤差評価は，１次元移流問題と同様に式(21)を使用した。格子は幅1.0の正方形であり，使用した数は101×101である。円運動の中心（x_c,y_c），半径Rおよび速度（u,v）は次式の通りである。

中心

$$\left(x_{\mathrm{c}}, y_{\mathrm{c}}\right) = (50,50) \tag{23}$$

半径

$$R = \sqrt{(x-26)^2 + (y-51)^2} \tag{24}$$

速度

$$\begin{aligned} u &= -2\pi\left(y - y_{\mathrm{c}}\right)/800 \\ v &= 2\pi\left(x - x_{\mathrm{c}}\right)/800 \end{aligned} \tag{25}$$

Heviside関数は不連続関数であるため，気相と液相の界面を表す指標として用いるのに適しているが，流体力学壁変量としては不自然なプロファイルであるとも考えられる。よって，Fig.4のようにHeviside関数の代わりにCosine関数を使用するベンチマーク試験も同時に行った。

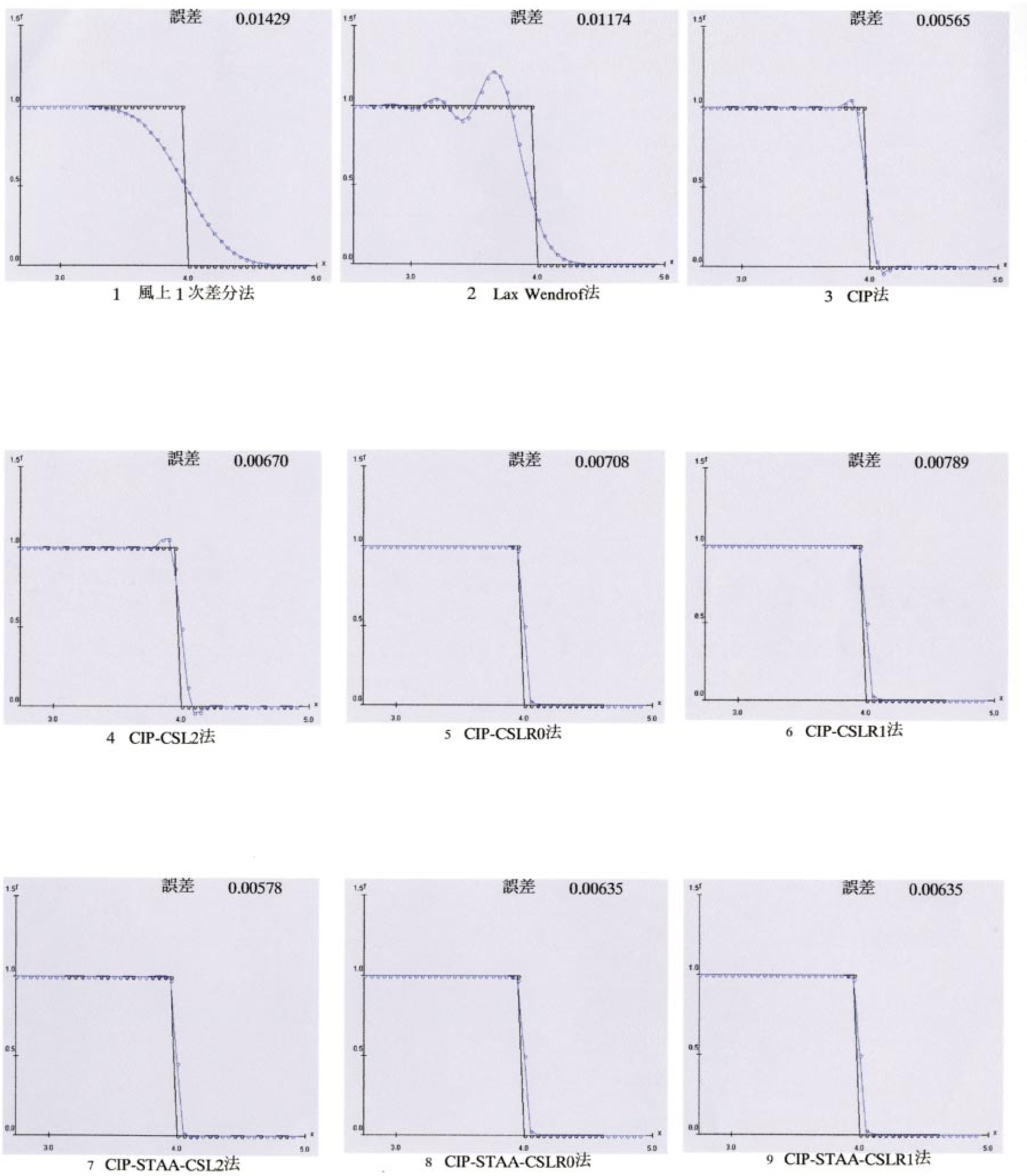


Fig.2　１次元移流問題の数値解析結果

Numerical analysis results of the unidimensional advection problem

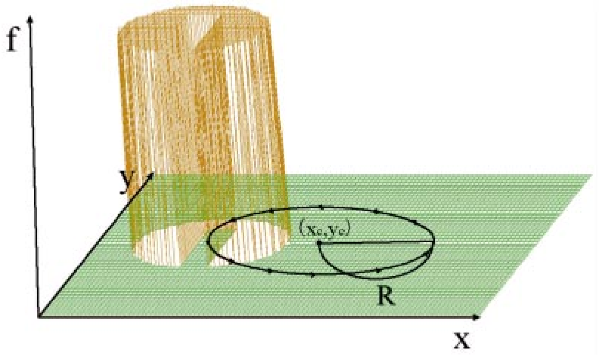


Fig.3　Heviside関数を用いたZalesak問題の初期値
Intial value of Zalesak problem as Heviside function is used

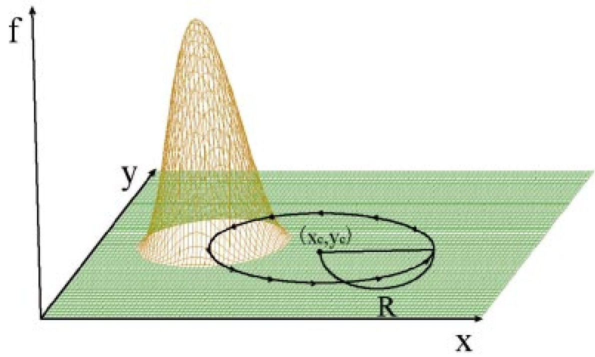


Fig.4　Cosine関数を用いたZalesak問題の初期値
Intial value of Zalesak problem as Cosinee function is used

CIP法の多次元化手法であるA型，B型，C型およびM型の解析結果をFig.5に示す。図の配色において，橙色は正の値，緑色はゼロ，および青色は負の値である。すべてのCIP法において，移流による一周の移動においても，初期値のプロファイルが精度良く保存されていた。しかし，アンダーシュートとオーバーシュートが生じていた。

有限体積CIP法の多次元化手法であるTEC法を使用したZalesak問題の結果を，Fig.6に示す。CIP-CSL2とCIP-STAA-CSL2では，数値振動が生じたが，有理関数を使用した場合は，数値振動はあまり生じず，アンダーシュートとオーバーシュートも生じなかった。同じ手法で初期値としてCosine関数を使用した場合の結果をFig.7に示す。CIP-CSL2は，初期値をHeviside関数とした場合では，数値振動が激しかったのに対し，初期値がCosine関数である場合は，アンダーシュートがあるものの振動はある程度抑制された。一方，初期値をHeviside関数とした場合に精度が非常に良かったCIP-STAA-CSL の3手法は，Cosine関数の形状に歪みが生じた。

これに対して有限体積CIP法の多次元化手法である2Step_CIP法を使用し，初期値をHeviside関数とした場合の結果を，Fig.8に示す。全体的に2Step_CIP法による解析結果は，TEC法による解析結果よりも良いことが確認された。CIP-CSL2とCIP-STAA-CSL2はアンダーシュートとオーバーシュートが大きいもののTEC法のように振動が生じることはなかった。同様の手法で，初期値をCosine関数とした場合の解析結果をFig.9に示す。CIP-CSL2とCIP-STAA-CSL2においてアンダーシュートが見られるものの数値振動は生じなかった。また，TEC法の場合と同様に，CIP-STAA-CSLの３手法においては，Cosine関数の形状に歪みが生じた。

Ⅳ　解析条件

管内の３次元流れの解析手法は，移流方程式の解法にCIP-CSLR1法を採用し，多次元化手法としてTEC法を適用した。これらの解析手法を選択した理由は，３次元解析に必要な計算負荷を考えると2Step_CIP法ではCIP法のアルゴリズムを８倍多く繰り返す必要があるのに対して，TEC法は計算負荷が小さいことと，CIP-CSLR1との組み合わせにおいて，アンダーシュート，オーバーシュート，および数値振動をある程度抑制できることがCosine関数を初期値としたZalesak問題の結果において示唆されたためである。

管の継ぎ手の形状は，フランジ継ぎ手，押し込み継ぎ手，溶接継ぎ手の３種類として，Fig.10のように簡略化し，Fig.11に示す寸法で直交格子を生成した。ここで，管の内壁に沿って格子を生成する境界適合格子は使用しなかった。格子の幅は0.05，数は62×58×58とした。スタガード格子を使用した。

次式のように非圧縮性Navier-Stokes方程式を無次元化した。

質量保存の式

$$\nabla\cdot V=0 \tag{26}$$

運動量保存の式

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\left(V\cdot\nabla\right)V=-\nabla p+\frac{1}{Re}\Delta V \tag{27}$$

ここで，Vは流速の無次元量，ｐは圧力の無次元量，ｔは時間，およびReはレイノルズ数である。
レイノルズ数は次式で表される。

$$Re\ =\frac{\rho UL}{\mu} \tag{28}$$

ここで，ρは流体の密度，Uは代表的な速度，Lは代表的な長さ，およびμは流体の粘性係数である。Re数は10,000とした。

流速V，圧力p，および密度ρの初期値はそれぞれ1.0，0.0，1.0とし，流入面と流出面の境界条件は周期境界とした。壁面近傍の流速は，滑り無し条件とした。

計算の時間ステップΔtは0.005(s)とし，2.0(s)後の結果を求めた。

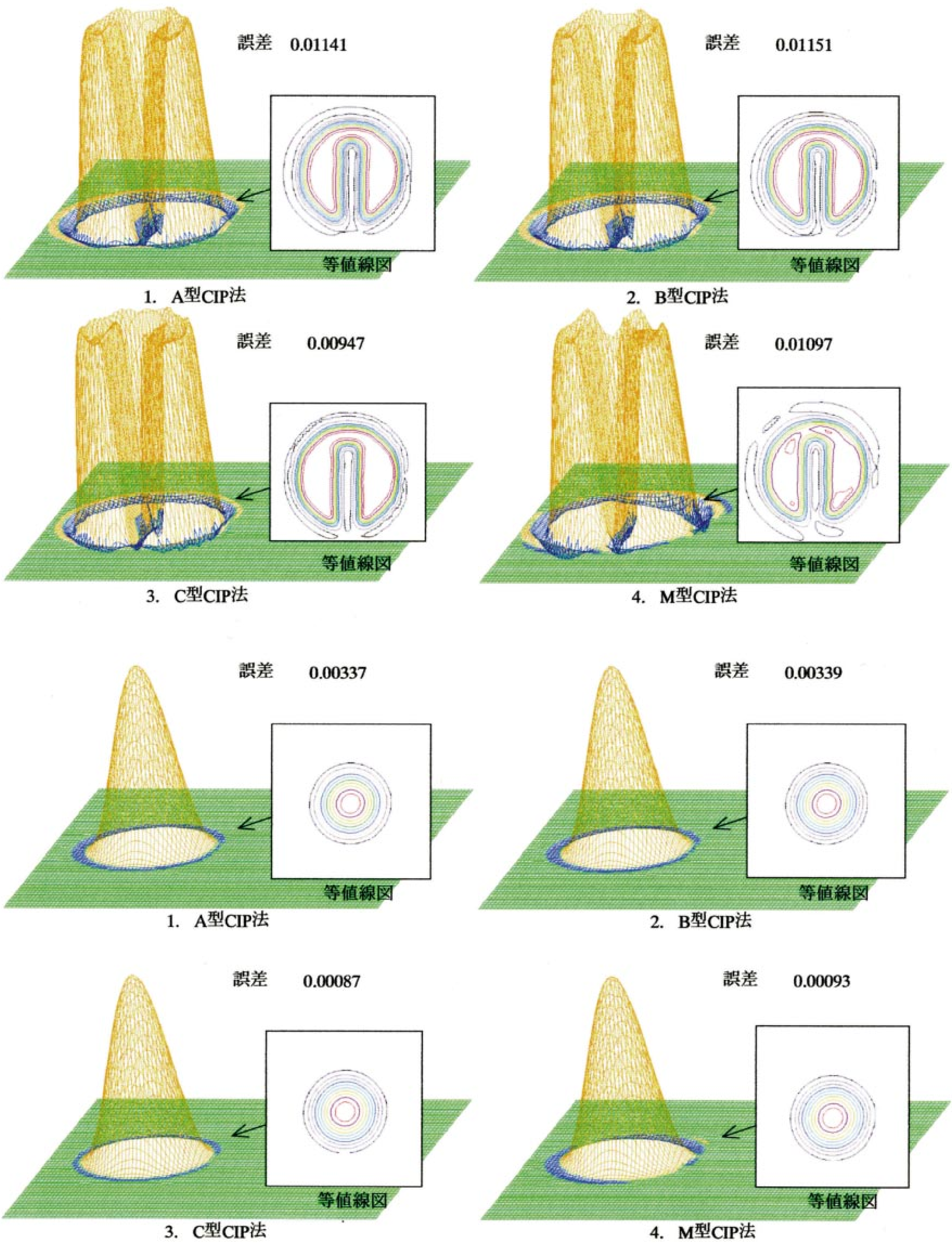


Fig.5　CIP法の多次元化手法による数値解析結果
Numerical analysis results by the multidimensionalization of the CIP method

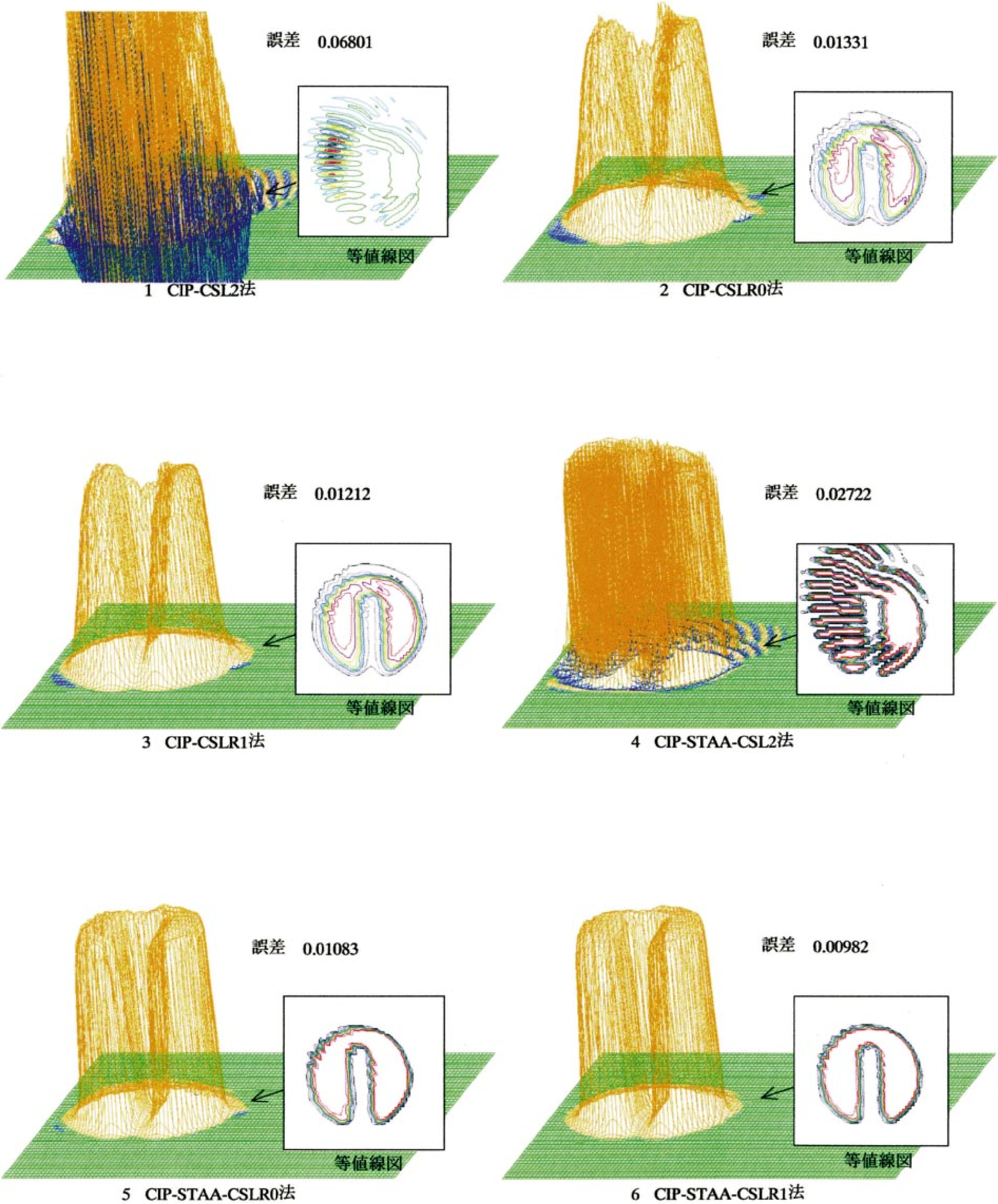


Fig.6　初期値がHeviside関数の場合のTEC法によるZalesak問題の結果
Results of Zalesak problem bye TEC method as initial value is Heviside function

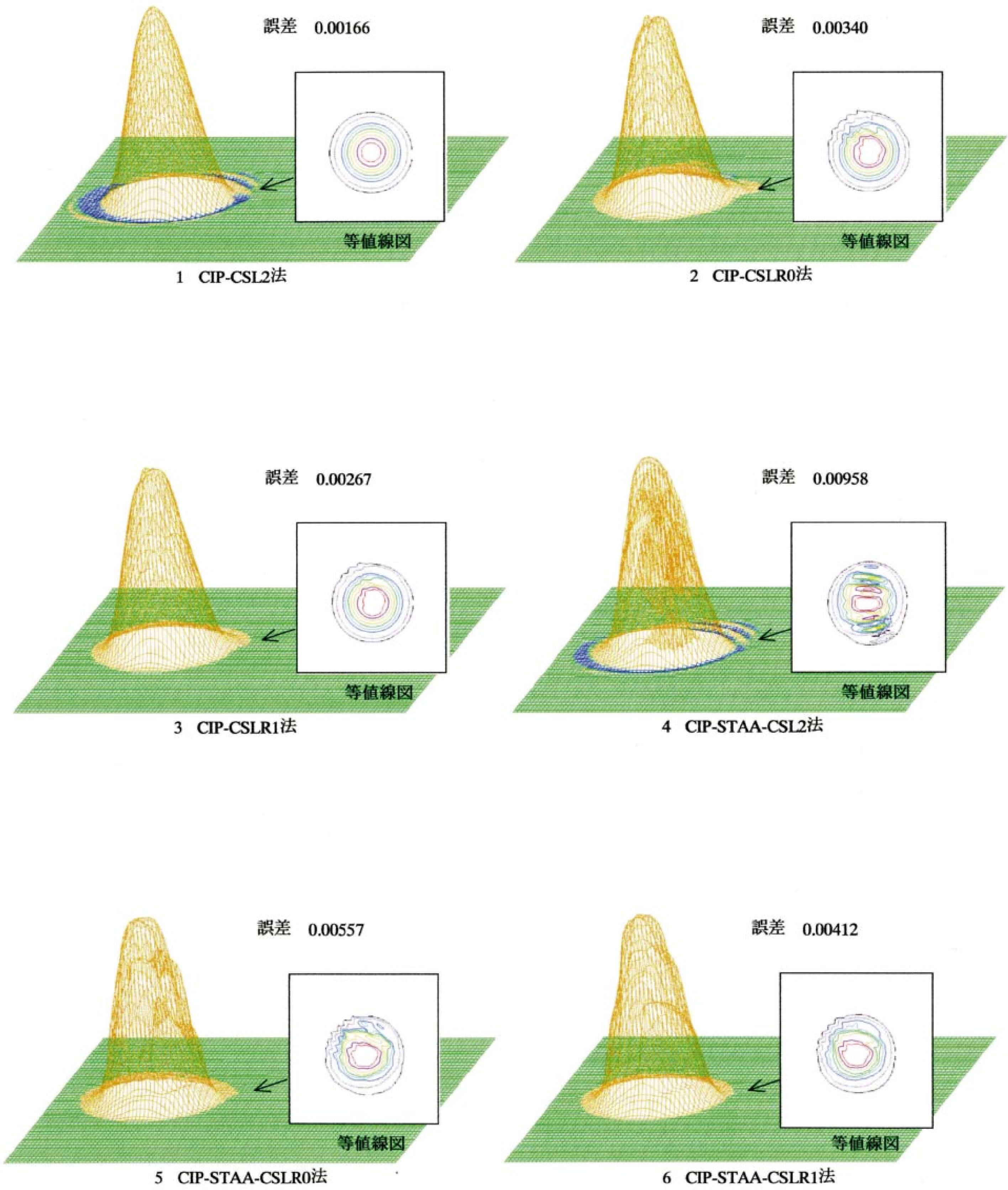


Fig.7 初期値がCosin関数の場合のTEC法によるZalesak問題の結果
Results of Zalesak problem by TEC method as initial value is Cosine function

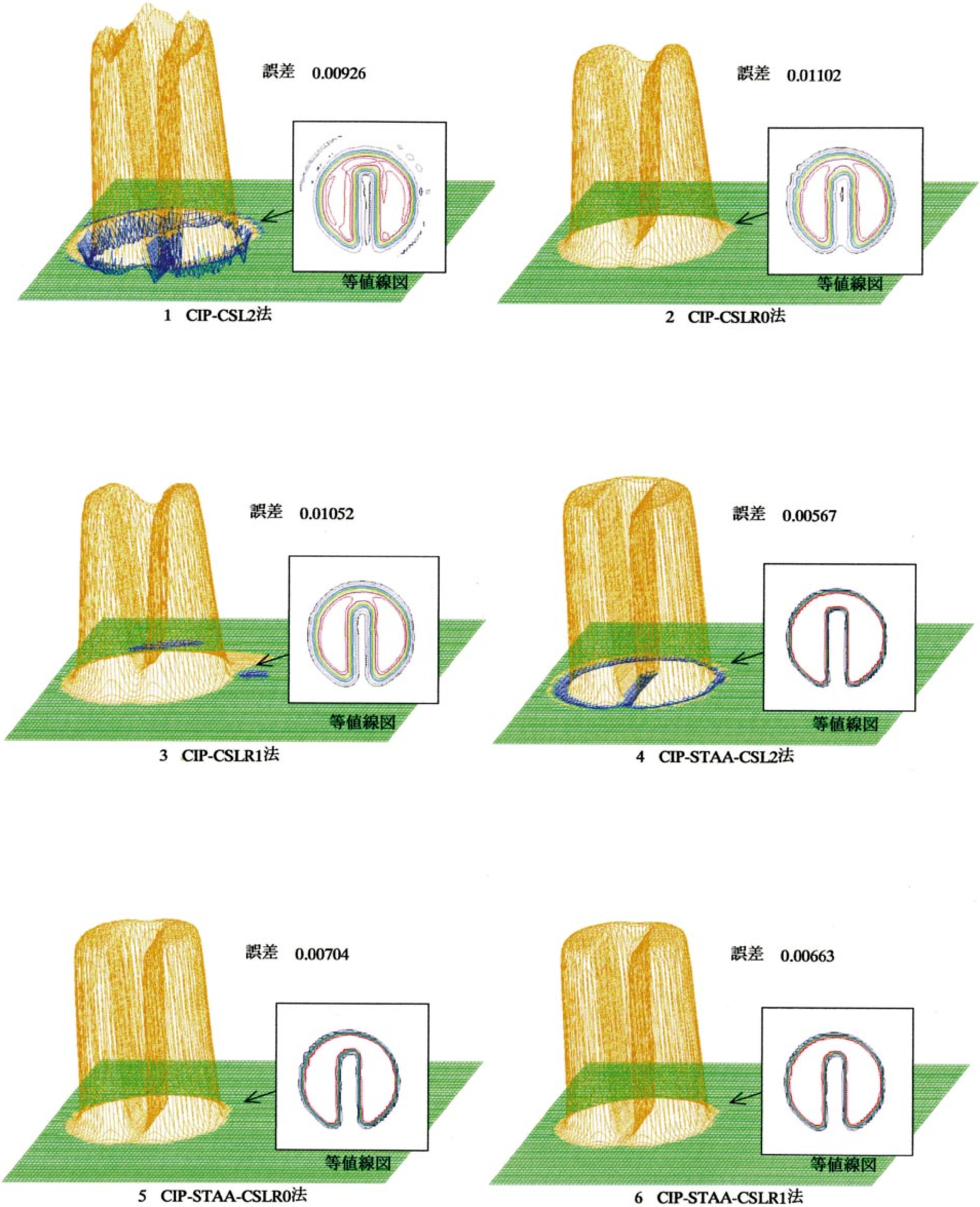


Fig.8 初期値がCosin関数の場合の2Step_CIP法によるZalesak問題の結果

Results of Zalesak problem by 2Step_CIP method as initial value is Heviside function

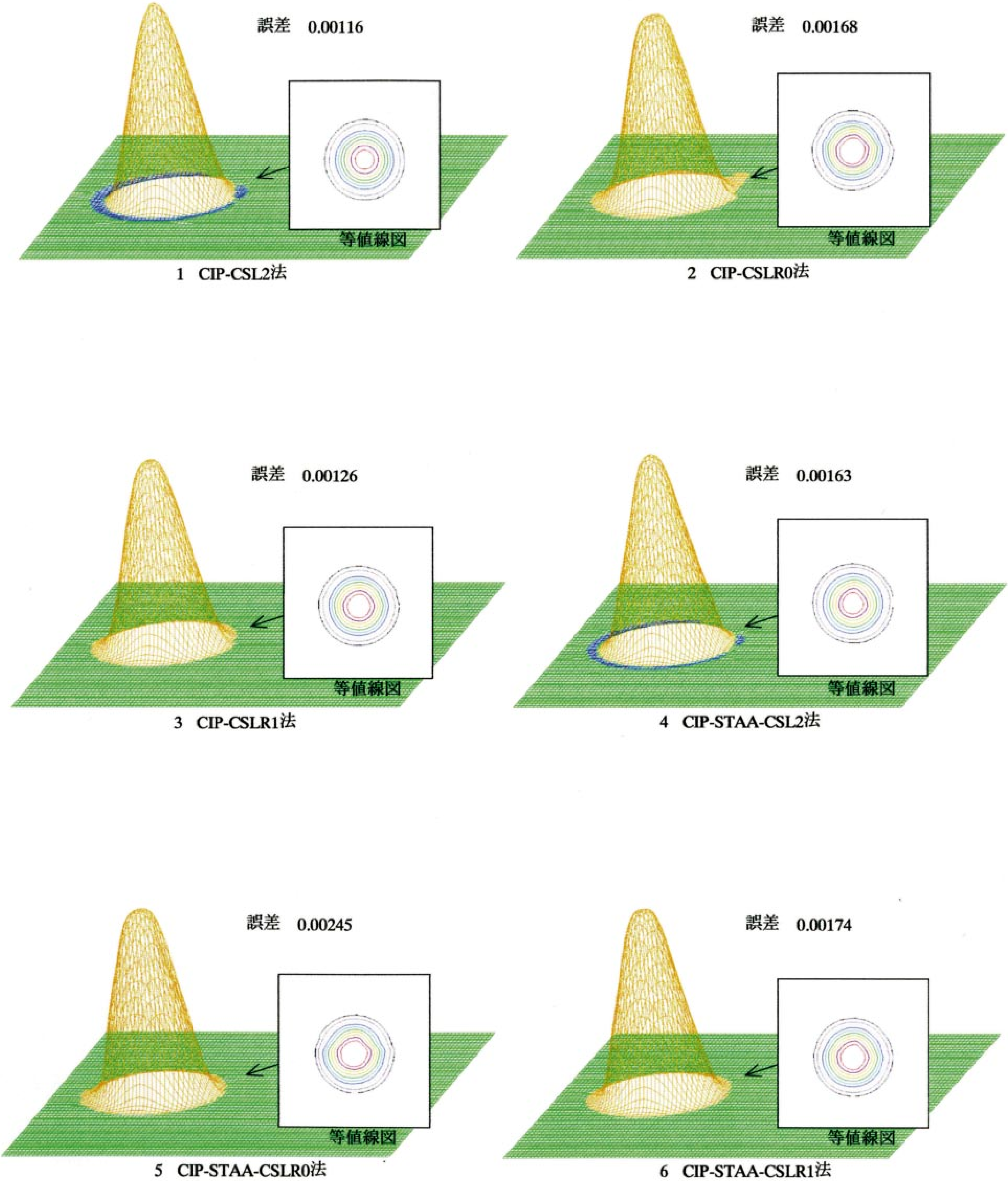


Fig.9 初期値がCosin関数の場合の2Step_CIP法によるZalesak問題の結果
Results of Zalesak problem by 2Step_CIP method as initial value is Cosine function

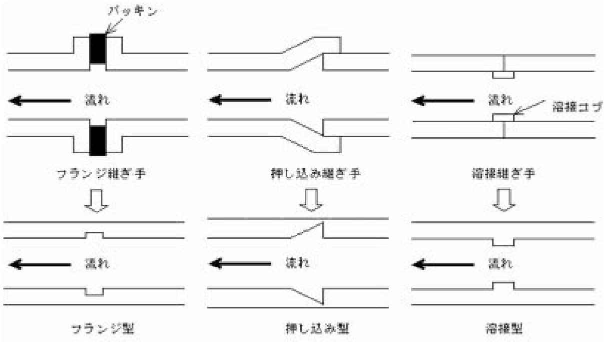


Fig.10　継ぎ手形状の簡略化
Simplified configuration of joints

Ⅴ　解析結果

Fig.12に管内の流速分布を示す。フランジ継ぎ手では，継ぎ手の通過前後における流速の変化は目視では確認できなかった。押し込み継ぎ手では，継ぎ手の通過後に通過した領域全体において流速が低下した。溶接継ぎ手では，継ぎ手を通過する直前に流速が低下し，通過した後に流速が回復した。通過後の管壁付近では流速が増大した。

次に，Fig.13に管内の圧力の等値面を示す。フランジ継ぎ手では，継ぎ手の上流側の領域全体において圧力の上昇があった。継ぎ手の通過時に若干の圧力上昇があった。押し込み継ぎ手では，継ぎ手の通過後に継ぎ手の下流側の領域全体において圧力の上昇があったが，特に通過直後の圧力上昇が大きかった。溶接継ぎ手では，継ぎ手の上流側の領域全体において圧力の上昇があり，継ぎ手の下流側の領域全体において圧力の降下があった。特に継ぎ手の通過時の圧力変化は大きかった。なお，圧力の表示がない透明な部分は，圧力が０の等値面である。

最後に，Fig.14に管内の流線と渦度を示す。フランジ継ぎ手では，継ぎ手部分とその下流側において，流体の剥離が見られなかったが，継ぎ手通過時に渦度が微少であるが変化した。押し込み継ぎ手では，継ぎ手部分において流体の剥離があったが，継ぎ手の下流側においても微少であるが流体の剥離があった。また，継ぎ手の通過時に渦度の変化があった。溶接継ぎ手では，継ぎ手通過部分とその下流側において流体の剥離が大きかった。継ぎ手の通過後に渦度が急激に大きくなった。

Ⅵ　考　察

数値解析において，溶接継ぎ手のように管内の流体に対して凸型の形状をした継ぎ手は，凸型の形状によって管壁近傍の流体の剥離が見られ，継ぎ手の直上流で圧力が上昇し，直下流で圧力が低下した。他方，凹型の形状であるフランジ継ぎ手と押し込み継ぎ手は，このような流体の剥離は顕著に見られず，圧力の上昇は継ぎ手通過時に微少に見られるのみであった。

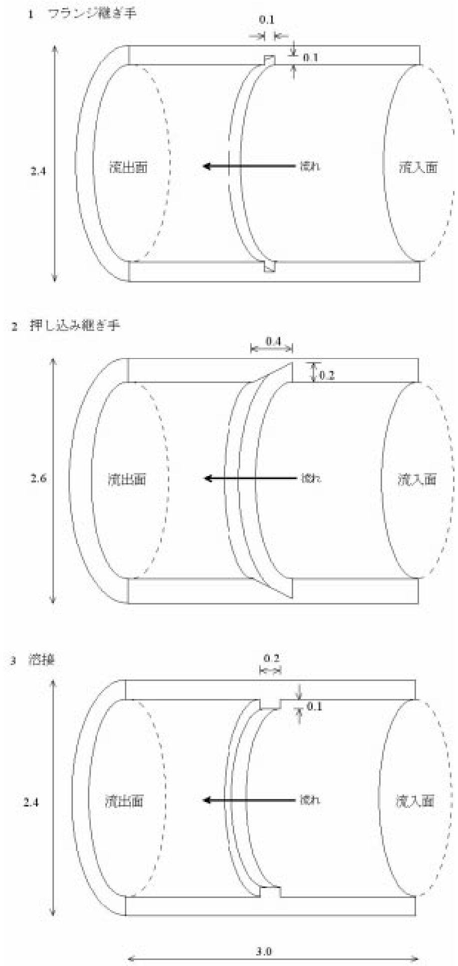


Fig.11　継ぎ手の３次元形状
3 dimensional configuration of joints

Ⅶ　結　言

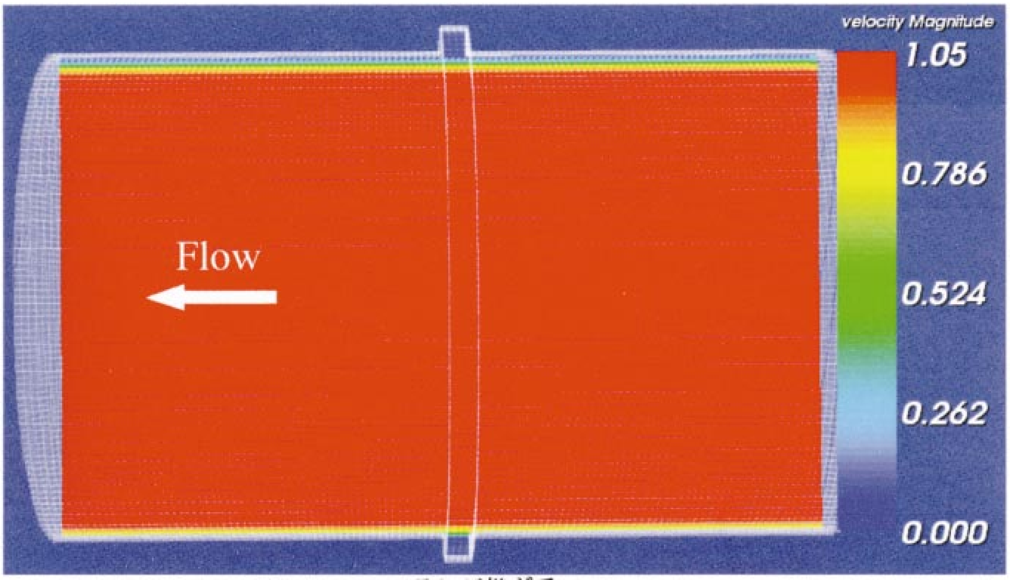
１　管内の移流問題を精度良く解析するために，CIP法の精度の確認を行った。比較を行った手法はCIP法，有限体積CIP法，有限体積有理関数CIP法，およびCIP-STAA-CSL法とそれに対する多次元化手法であった。

２　管内の流れを３次元解析した結果，継ぎ手形状によって，流体力学的変量のプロファイルにそれぞれ特徴があった。圧力等値面の結果から，溶接継ぎ手の前後において急激な圧力変化があることが示された。

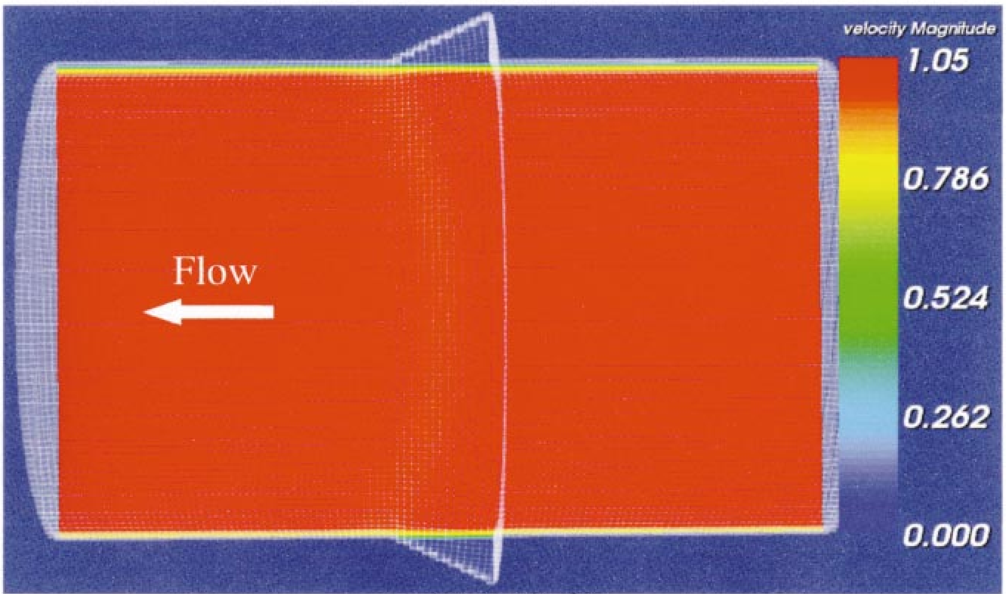
参考文献

1）H.Takewaki, A.Nishiguchi, and T. Yabe(1985): Cubic Interpolated Pseudo-particle Method (CIP) for Solving Hyperbolic-Type Equations, Journal of Computational Physics,Vol.61, No.2, 261-268

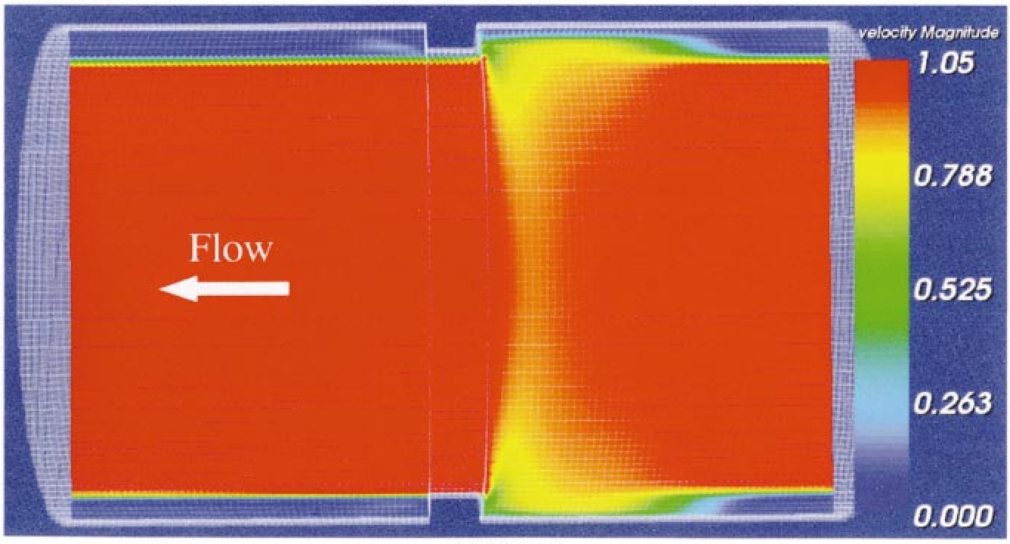
2）農林水産省構造改善局（1998）：土地改良事業計画設計基準　設計「パイプライン」基準書・技術書，



1 フランジ継ぎ手

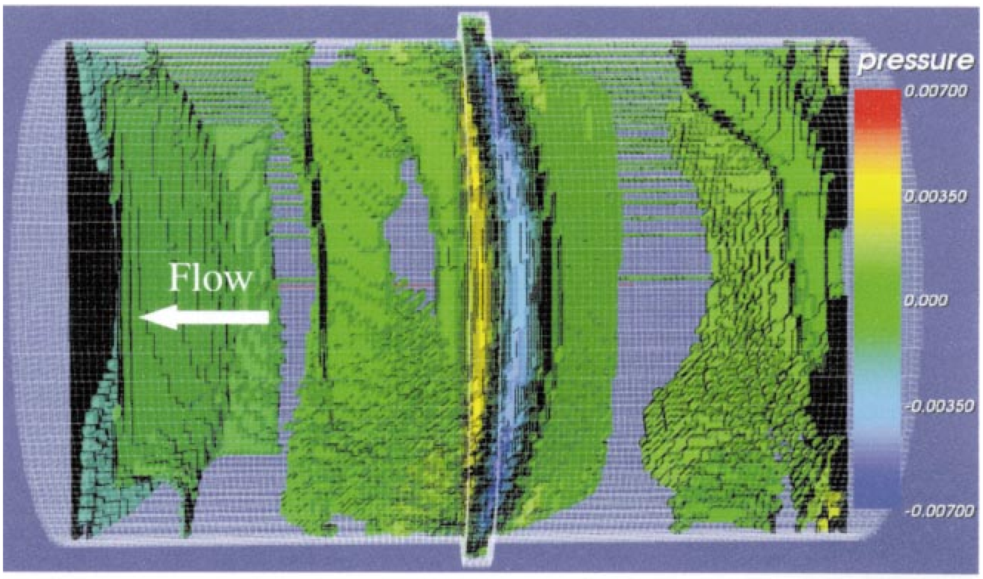


2 押し込み継ぎ手

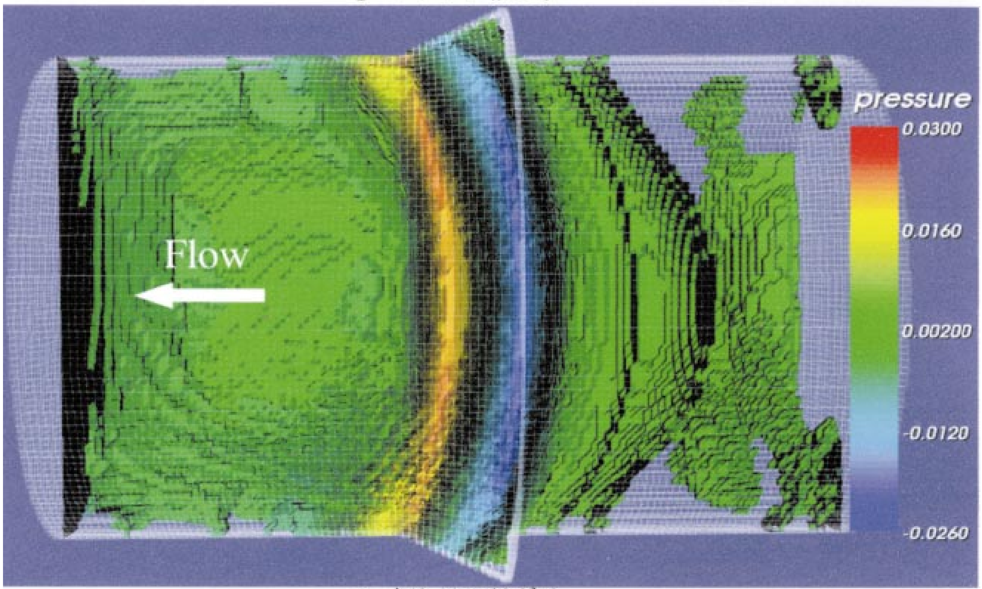


3 溶接継ぎ手

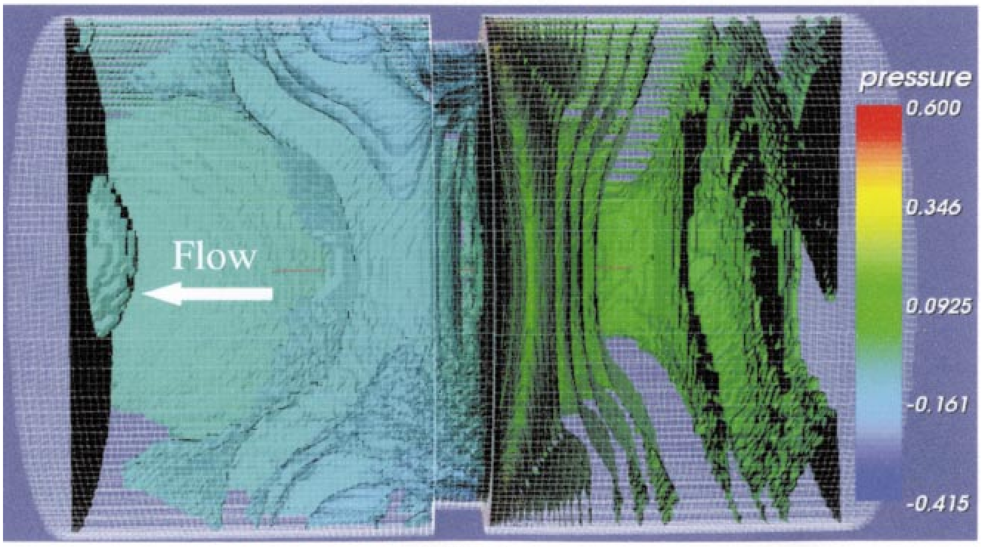
Fig.12 管内の流速分布
Flow distribution in pipe



1 フランジ継ぎ手



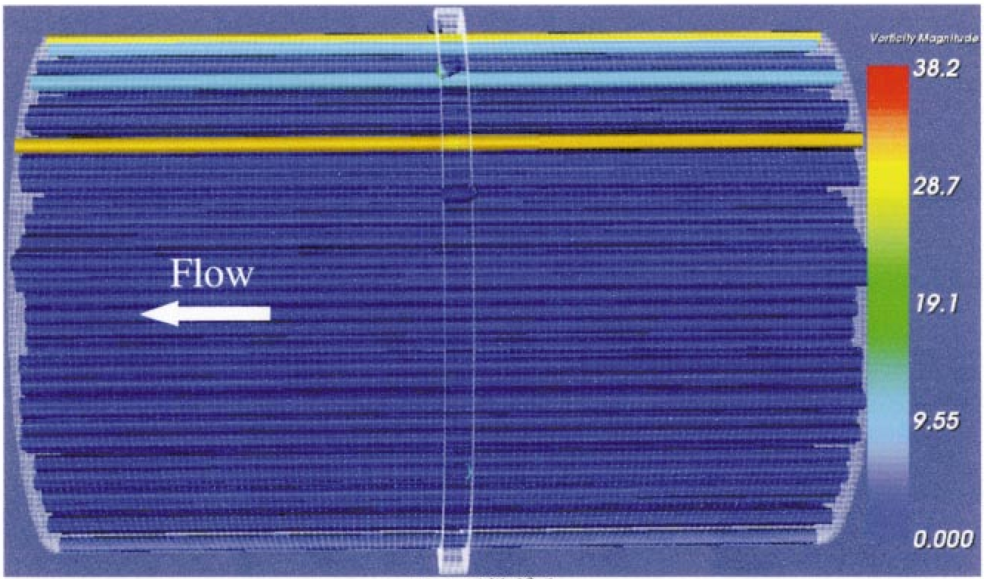
2 押し込み継ぎ手



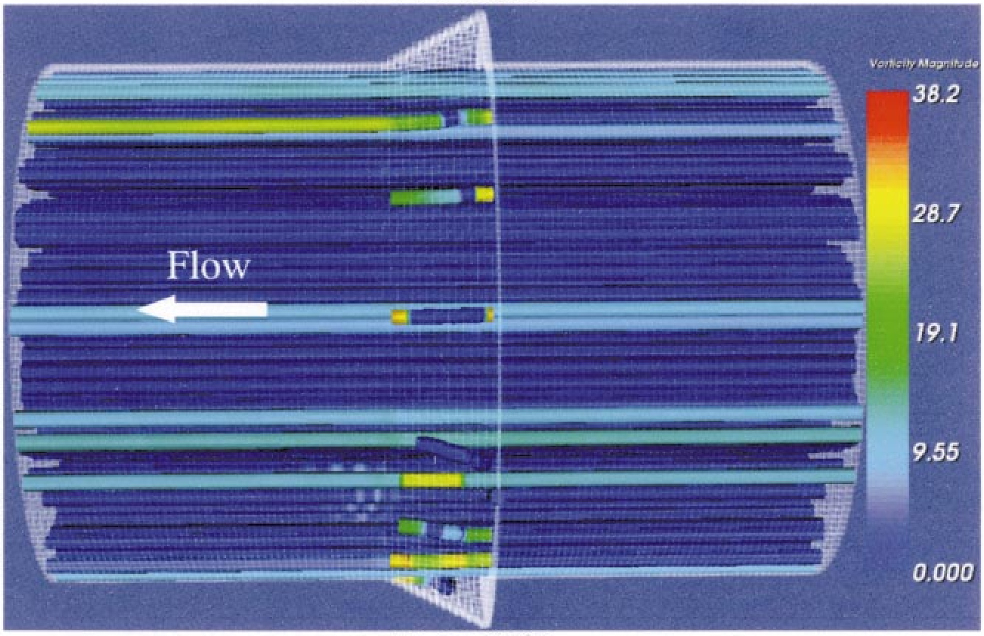
3 溶接継ぎ手

Fig.13 管内の圧力等値面

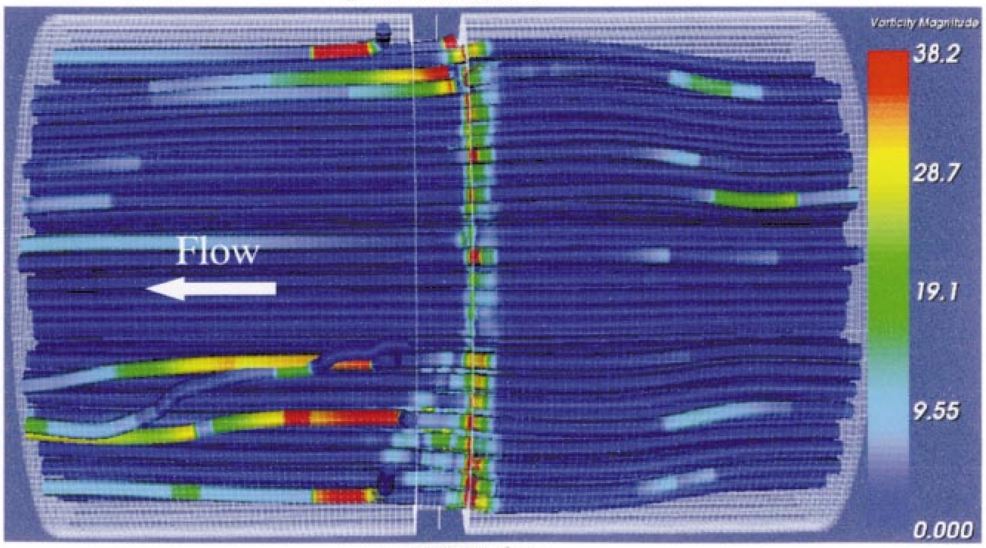
Pressure equivalence plane in pipe



1　フランジ継ぎ手



2　押し込み継ぎ手



3　溶接継ぎ手

Fig.14　管内の流線と渦度
Streamline and vorticity in pipe

170

3) Takashi Nakamura, Ryotaro Tanaka, Takashi Yabe, and Kenji Takizawa(2001):Exactly Conservative Semi-Lagrangian Scheme for Multi-dimensional Hyperbolic Equations with Directional Splitting Technique, Journal of Computational Physics, Vol.174, 171-207

4) T. Aoki(1995) : Multi-dimensinal Advection of CIP (Cubic-Interpolated Propagation) scheme, Comptational Fluid Dynamics Journal, Vol.4, No.3, 279-291

5) F.Xiao, T.Yabe, T.Ito (1996) : Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function, Computer Physics Communication, 93, 1-12

6) 矢部 孝・内海隆行・尾形陽一(2003):CIP法, 森北出版株式会社, 163

The Effect Caused to Flow by the Joint Shape of Pipe

TANAKA Yoshikazu, MUKAI Akie and TARUYA Hiroyuki

Summary

The effect of the shape of joint between pipes on flow was examined by carrying out numerical analysis. We selected CIP mehod and confirmed accuracy in order to analyze advection problem in pipe with high accuracy. Several techniques about CIP mehod (e.g. CIP, finite volume CIP, finite volume rational function CIP method, and CIP-STAA-CSL method) were compared accuracy. We analyzed three dimensional flow in pipe in the vicinity joint about three kinds of joints(e.g. fulange joint, welded joint, and push-fit joint). As a result of numerical method, It was possible to robustly calculate the CIP method even in the high Reynold’s number. although hydrodynamic variable was unique respectively, it was shown that there was a rapid pressure change in before and behind of welded joint.

Keywords : CIP, joint shape, pipeline