

分置

流動解析コードSPLASH-ALE
の液面追跡手法の改良

1996年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

流動解析コード SPLASH-ALE の液面追跡手法の改良

要旨

飯田 将雄*

SPLASH-ALE は、計算格子を任意の速度で移動可能とする ALE (任意ラグランジアン・オイリアン) 法を用いた、有限要素法による 3次元流動解析コードである。

FBR 炉容器のように流入・流出口と自由液面を持つ容器内流れの解析を SPLASH-ALE で行う場合には、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法の使用が、格子変形の増大による計算の破綻を回避する上で有効である。この格子点移動法において、格子点座標が固定される水平方向についても Lagrangian 的に液面移動を考慮し、その液面移動に基づいて液面上の格子点位置を再設定して、液面移動を追跡するように改良を行った。

改良の効果を評価するため、FBR 炉容器内の液面付近の流れを単純化した体系について解析を行った。それにより、水平方向の流れに伴って液面変形が進行する状況について液面形状の模擬性が向上したこと、および多価液面が生じないという限りにおいて液面での流量誤差の発生が防止できるようになったことを確認した。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 熱流体技術開発室

Improvement of Free Surface Tracing for Fluid Dynamic Analysis Code : SPLASH-ALE

IIDA Masao *

Abstract

SPLASH-ALE is a three dimensional finite element hydrodynamic code employing Arbitrary-Lagrangian-Eulerian method which enables computational nodes to move in arbitrary velocity.

To avoid an abnormal termination of calculation caused by extreme deformation of element, a node mobility scheme, horizontally Eulerian and vertically uniformed, is available for calculating flow in a tank, which have inlet, outlet and free surface, such as a FBR reactor vessel. Author improved the evaluation method for the free surface tracing to consider free surface movement in horizontal direction in which node coordinate is fixed for this node mobility scheme.

To evaluate the improvement, a surface swell formation caused by an upward plane jet impinging on free surface was calculated. Thus it was confirmed that free surface representation was enhanced and that error of flow rate at free surface was significantly reduced.

* Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. 緒言	1
2. 既存の SPLASH-ALE の問題点	2
2.1 SPLASH-ALE の計算過程	2
2.2 液面に上向き噴流が衝突する体系の解析	2
2.2.1 FBR 炉容器内の流れと単純化実験	2
2.2.1 解析条件	3
2.2.2 解析結果	3
2.3 液面追跡手法の問題点	3
3. 改良と評価解析	13
3.1 液面追跡手法の改良	13
3.2 解析結果	13
4. 考察	17
4.1 実験との比較	17
4.2 流量誤差の改善評価	17
4.3 今後の課題	18
5. 結論	22
謝辞	23
参考文献	24

図表リスト

- 図 1 : SPLASH-ALE の計算過程
- 図 2 : 水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割による格子点の移動
- 図 3 : FBR 炉容器内と単純化体系実験
- 図 4 : 解析条件
- 図 5 : 改良前の時系列流速分布
- 図 6 : 液面の追跡
- 図 7 : 液面追跡手法の不備による流量誤差
- 図 8 : 液面追跡手法の改良
- 図 9 : 改良後の時系列流速分布
- 図 10 : 流況可視化画像
- 図 11 : 流量誤差改善評価の検査体積
- 図 12 : 多価液面を扱えないことによる流量誤差

表 1 : 検査体積への流入と流出

1. 緒言

高速炉は、その炉容器の内部に冷却材である液体ナトリウムの自由液面を有している。現在、高速炉の実用化に向けて経済性向上のためのプラントのコンパクト化が検討されているが、出力増加に対する相対的な機器の小型化は、機器内部を流れる冷却材流速の増加を招く。自由液面の下に流れがあるとき、液面と流れの相互作用によって、液面の自励的な揺動や流れの振動、旋回渦や碎波によるガス巻き込み等が発生する可能性がある。液面の揺動は、ナトリウムが大きな熱伝導率を持つため、液面に接する構造材に繰返し熱負荷を与え構造材の熱疲労を引き起こす。また、巻き込まれたカバーガスは、炉心のボイド反応度係数の程度によっては意図しない出力変動をもたらす可能性がある。このように、液面と流れの相互作用による液面揺動やガス巻き込み等の現象はプラントの安全性に悪影響を及ぼすことが考えられ、冷却材流速の増加によってこのような現象が顕在化することが懸念されている。このため、プラントの設計段階でこのような現象の発生を防止するための考慮がなされなければならない。

原子炉容器内の流れをその設計段階で把握するために、これまで縮小模型による流動実験が行われてきた。しかし、実験は時間とコストがかかる上に、縮小模型から実機規模へと外挿することの妥当性の問題や、体系条件を広範囲に変更することの難しさ、実験結果をフィードバックさせた設計の再評価の困難さ等、多くの難点を抱えていた。そこで実験に代わり、解析コードによって設計の評価・検証を行うことが、時間とコストの節約や設計評価の柔軟性の点から望ましい。解析コードによる設計の評価・検証を行うためには、液面の挙動を正しく評価できる解析コードが不可欠である。

SPLASH-ALE は、上記のような目的に対処するため開発を行っている 3 次元流動解析コードであり、

- ・ ガラーキン有限要素法によって空間離散化を行う。
- ・ ALE 座標系の採用により、液面や柔構造物などの変形する境界の追跡が可能。

といった特徴を持つ。ALE (任意ラグランジアン-オイリアン) 法とは、計算格子の移動速度を任意に指定できる手法である。ALE 版を含めて SPLASH ではこれまでに、2 次元でのカルマン渦やスロッシング、3 次元円筒容器でのスロッシング等に対する解析が行なわれ、実験と良く一致する結果が得られてきた^{[1][2]}。

本報告では先ず、FBR 炉容器内の液面において存在が予想されているが、これまで SPLASH-ALE では解析を行なったことのない、液面に上向きの流れが衝突する体系の解析を SPLASH-ALE で行う。その結果から、SPLASH-ALE は水平方向の液面流速に伴う液面変形の進行がうまく模擬できないこと、およびこのとき液面において大きな流量誤差が生じることを示し、これらの不具合が液面形状を追跡する手法に起因していることを指摘する。続いて、SPLASH-ALE の液面追跡手法を改良し、改良前と同条件の解析を行い、液面形状の模擬と流量保存における不具合が改善されることを確認する。

2. 既存の SPLASH-ALE の問題点

2.1 SPLASH-ALE の計算過程

SPLASH-ALE は、各時刻において以下の 3 段階の計算を行っている (図 1)。

(1) Lagrangian 計算

前時刻 (n) に位置 x_i^n の格子点上にあり速度 v_i^n であった流体粒子 i の、現時刻 ($n+1$) で移動先 x_i^L とそこでの速度 v_i^L を求める。移動先は未知なので反復計算によって v_i^L は求められ、 $x_i^L = x_i^n + \frac{\Delta t}{2}(v_i^L + v_i^n)$ として x_i^L が定まる。

(2) 計算格子位置の再設定

任意の速度 w_i で格子点 i を移動し、現時刻 ($n+1$) における新しい格子点位置 $x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t w_i$ を定める。このとき、 $w_i = \frac{1}{2}(v_i^L + v_i^n)$ とすれば $x_i^{n+1} = x_i^L$ であり Lagrangian 法に、 $w_i = 0$ ならば Eulerian 法に相当する。

(3) Eulerian 計算

新たな格子点位置 x_i^{n+1} で、流速・圧力を計算する。

ALE 法では格子点の移動速度 w_i は任意なため、上記 (2) での格子位置再設定においては、純粋な Lagrangian 法や Eulerian 法以外にも、特定の方向について格子点座標を固定する、あるいは格子点を均等間隔に再配置するなど、様々な格子点の移動方法が考えられる。このなかで、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という移動法では、以下のようにして格子点位置を再設定する (図 2)。

- ・ 水平方向の格子点座標：固定 (水平方向 Eulerian)。
- ・ 垂直方向の格子点座標：容器底面から特定の高さまで (=Eulerian 領域) では固定。特定高さから液面まで (=ALE 領域) では、垂直方向で格子点が等間隔になるように再設定する (垂直方向均等分割)。

これにより、液面が Eulerian 領域上端よりも上にある限り、液面変形によって格子がつぶれる等の問題は生じない。また、流入・流出口が Eulerian 領域内に含まれるように領域の上端高さを設定することで、流入・流出口位置の格子点が流体の出入りや液面変形によって移動してしまうこともない。この方法は、FBR 炉容器のように液面と流入・流出口を持つ容器内流れを解析する場合に有効であると考えられる。現在までに、流入・流出口を持つ容器内の自励スロッシングの解析に対してこの格子点移動法が適用され、上記の特徴が確認されている。

2.2 液面に上向き噴流が衝突する体系の解析

2.2.1 FBR 炉容器内の流れと単純化実験

FBR 炉容器内部では、炉心から流出した冷却材の大半は容器内壁に沿って上昇し、液面に衝突して液面の隆起を形成する。この状態を取出し単純化した体系で、液面と流れの相互作用を調べる実験が行われた (図 3)^[1]。この実験では、容器底面の流入口から噴流が垂直上向きに容器内に流入し、流入口真上の液面に衝突して液面の隆起を形成する。このような条件を SPLASH-ALE が解析できることを確認するため、以下の条件で解析を行った。

2.2.1 解析条件

解析は2次元で行う。解析体系の寸法と境界条件を図4に示す。容器幅は300 mmとし、容器の底面中央に幅10 mmの流入口を、左右両側面に底面から高さ50 mmの流出口を設ける。容器内の初期水深は120 mmとする。流入口の幅に渡る平均流入流速は、時刻0 secで0 m/s、0 secから16 secまで毎秒0.05 m/sずつ増加し、16 sec以降は0.8 m/sで一定とする（ただし、流入口の両端の節点は滑りなし条件で流速0となるので、流入口位置にある他の3節点には基本境界条件として流入流速の4/3の値を与える）。実験では、容器内の水位は流出口外側に接続された堰で一定に保たれる。この堰を模擬するため、流出口は初期水深に相当する静圧を与える圧力規定条件とする。液面は圧力0 Paの圧力規定条件、壁面は滑りなし条件とする。

格子点の移動については、水平方向の座標は全て固定、垂直方向は、容器底から70 mmまでをEulerian領域として座標固定、70 mmから液面までをALE領域として均等分割とする。

水平方向の要素分割幅は、噴流中心軸から±50 mmの間は2.5 mm、±50 mmから左右の壁面までは5.0 mmである。垂直方向の分割幅は、容器底から70 mmまでは5.0 mm、70 mmから液面までは2.5 mmである。ただし、高さ70 mmから液面までの間は、液面の变形により均等分割されるため、計算の進行に伴って格子分割幅は変化する。この解析体系の総節点数は2835、要素数は2720となる。計算時間刻み幅は、流速最大値0.8 m/s、格子分割幅2.5 mmとすると、クーラン条件より3.125 msec以下となるが、ALE法による格子変形があるので約1桁の余裕をみて、0.5 msecとする。

重力加速度は 9.8 m/s^2 とする。粘性係数には、層流コードであるSPLASH-ALEで乱流粘性分布の影響を模擬するために、各要素ごとに異なる値を要素物性値として与える。それには、液面変形が無いとした同体系の解析を流動解析コードAQUAで行って乱流粘性の分布を求め、さらに発散防止のため噴流位置と流出口部分の粘性を増加させた粘性分布（図4b）を用いる。この粘性分布は、噴流の流入口に接する要素での最小値 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ から、左右の流出口に接する要素での $3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲にわたっている。

2.2.2 解析結果

SPLASH-ALEによる解析結果を示す（図5）。

容器底面から流入した噴流は真上の液面に衝突し、液面を垂直に持ち上げて隆起を形成する。液面に衝突した後の流れは左右に広がり、隆起した液面上に水平方向の流速が現れる。しかし、時間が経過しても隆起は噴流の衝突点近傍のみで突出した形状のままであり、水平方向に拡大してゆかない。液面上の節点が液面と平行でない流速を持っている場合、本来ならばその流速の方向へ液面は移動してゆくはずであるが、22 sec後においても液面上の流速は液面と平行になっていない。また、噴流による容器への流入があるにもかかわらず、流出口においては外向きの流れがほとんど見られない。むしろ、噴流への連行によって、流出口から容器内への流入が生じている。なお、24 sec頃から数値誤差により対称性が崩れて噴流の蛇行が始まり、25.5 sec後に左側流出口からの異常流入で計算は破綻する。

噴流の衝突による液面隆起において液面が流速の方向に移動してゆかないこと、および、流出口で容器からの流出が生じないことから、液面隆起において液面の移動量に相当する流体が誤差として消失していることが考えられる。

2.3 液面追跡手法の問題点

前節の解析から、SPLASH-ALEは液面の变形を正しく模擬できない場合がある事が判った。これは、以下の理由による。

水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法において SPLASH-ALE では、液面上の流体粒子は常に液面と共に移動するとの仮定に基づく Lagrangian 的な液面追跡を行っている。このとき、水平方向 Eulerian という格子点座標の拘束に従って、液面上の格子点を Lagrangian 計算から得られた流体粒子移動速度 $w_i = \frac{1}{2}(v_i^L + v_i^n)$ の垂直方向成分のみで移動させ、そこを新たな格子点位置として計算を進めていた (図 6)。SPLASH-ALE での有液面体系の解析は、これまで主にスロッシングについて行われてきたが、スロッシングは液面での流速がほとんど垂直方向のみであり、水平方向の液面流速成分を無視するこの手法で特に問題は生じなかった。

しかし、液面上の流速が主に水平方向の成分からなり、その流れに伴って液面変形が水平方向に広がってゆく条件では、水平方向の液面流速を無視することが液面位置追跡の不正を生じさせ、それによって液面で流量誤差が発生する。すなわち、

- (1) Lagrange 的な液面追跡では、現時刻 ($n+1$) の液面位置は液面上の流体粒子の移動先 x_i^L を結んだ線 S^L (図 7a) となるはずである。
- (2) しかし、液面上格子点を移動する際に液面流速の水平方向成分を無視するため、 S^L よりも上流側に現時刻の液面上格子点 x_i^{n+1} は設定されてしまう (図 7b)。
- (3) 本来の液面位置 S^L と計算上の液面位置 S^{n+1} との差 (図 7c) が、流量誤差となる。

上記の過程により、液面上の流れが水平方向の成分を持ちその流れに伴って液面変形が進行する状況が生じる場合、例えば前節の解析のように、流れが液面に衝突して隆起を形成する場合等では、SPLASH-ALE は液面の移動を正しく追跡できず、液面で大きな流量誤差を生じてしまい、妥当な解析結果を得ることができない。

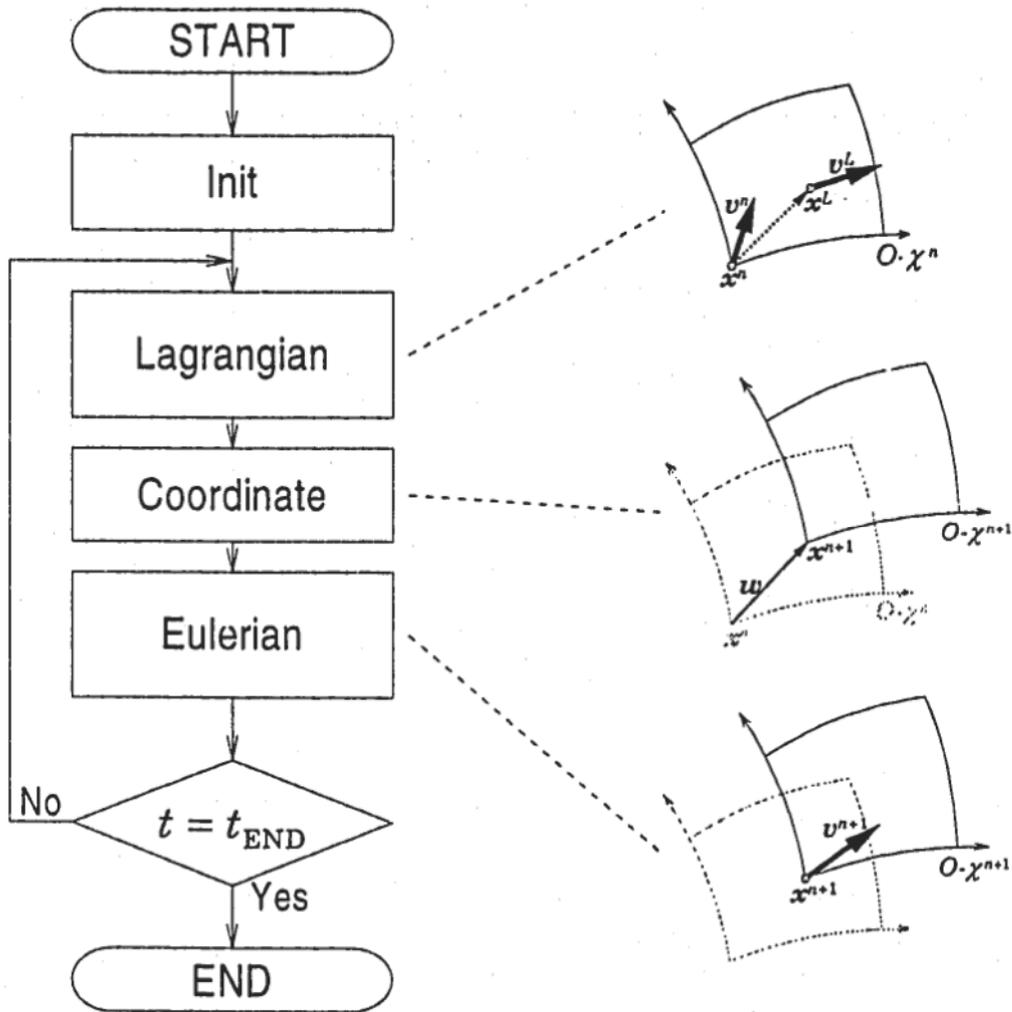


図1：SPLASH-ALEの計算過程

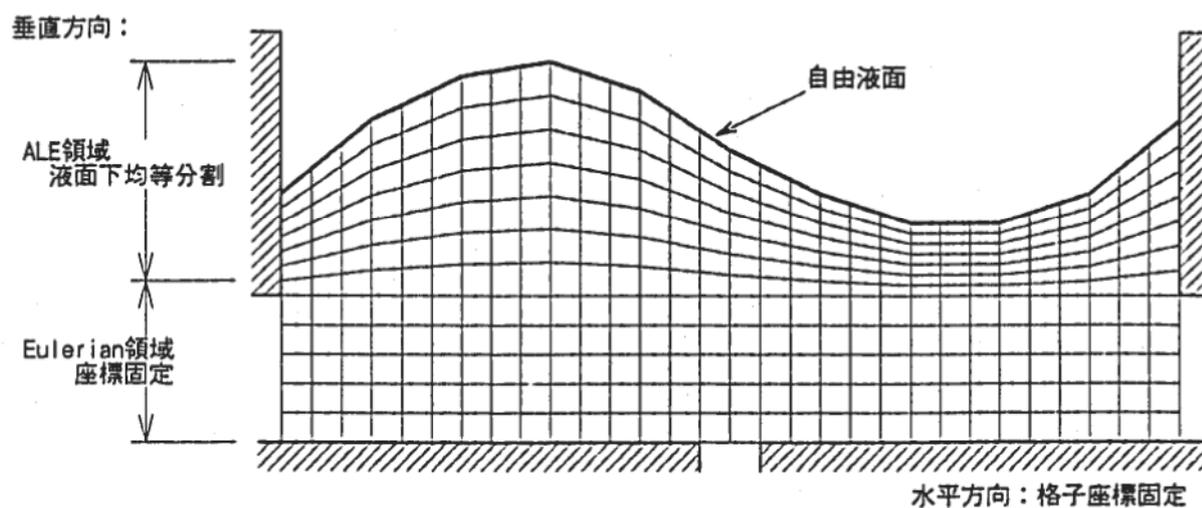


図2：水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割による格子点の移動

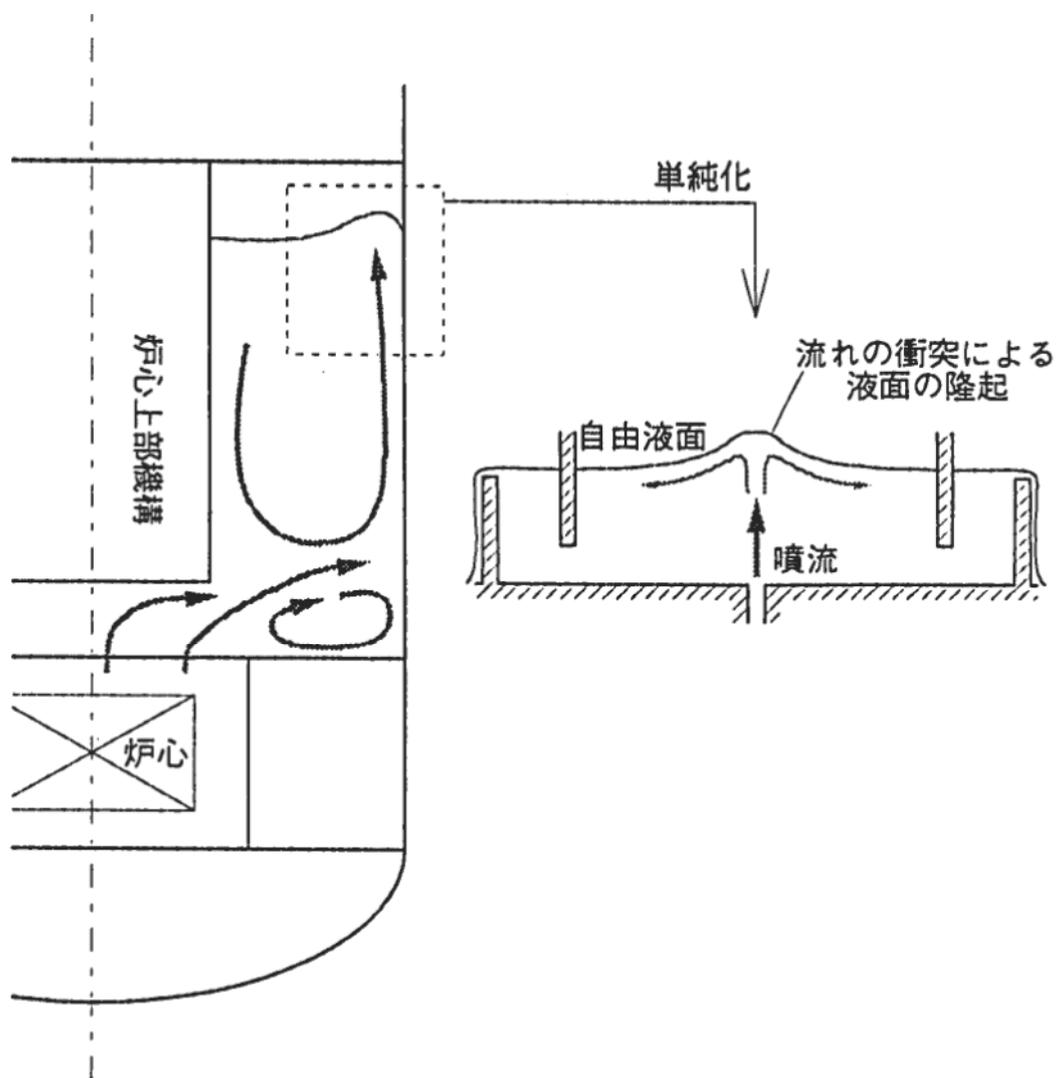
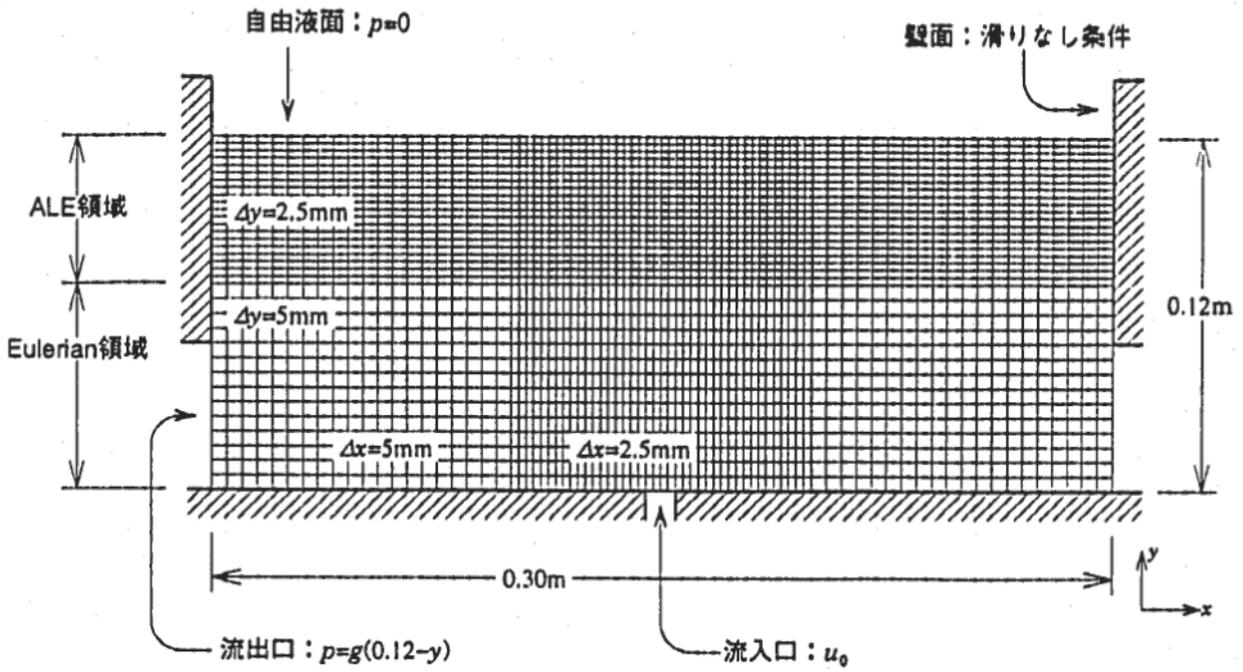
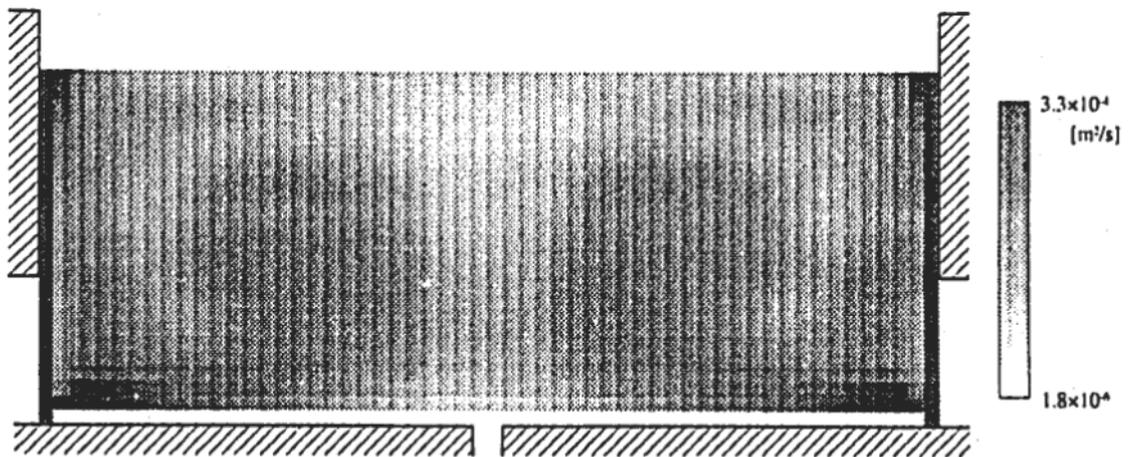


図3：FBR 炉容器内と単純化体系実験



$$u_0(t) = \begin{cases} 0.05t & (0 < t < 16) \\ 0.8 & (16 \leq t) \end{cases}$$

(a) 解析体系のサイズ・要素分割



(b) 動粘性係数の設定

図4: 解析条件

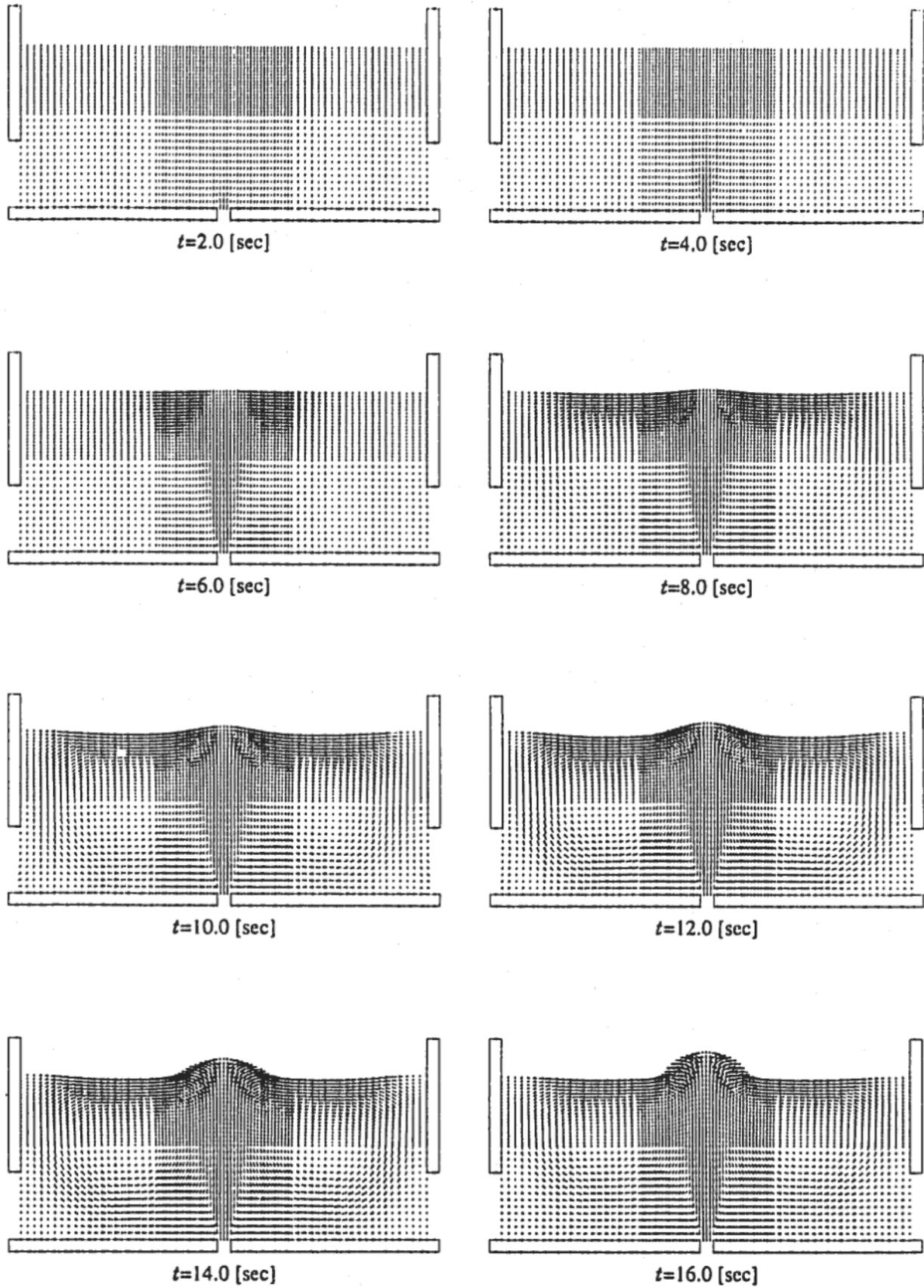


図5：改良前の時系列流速分布
(1/2)

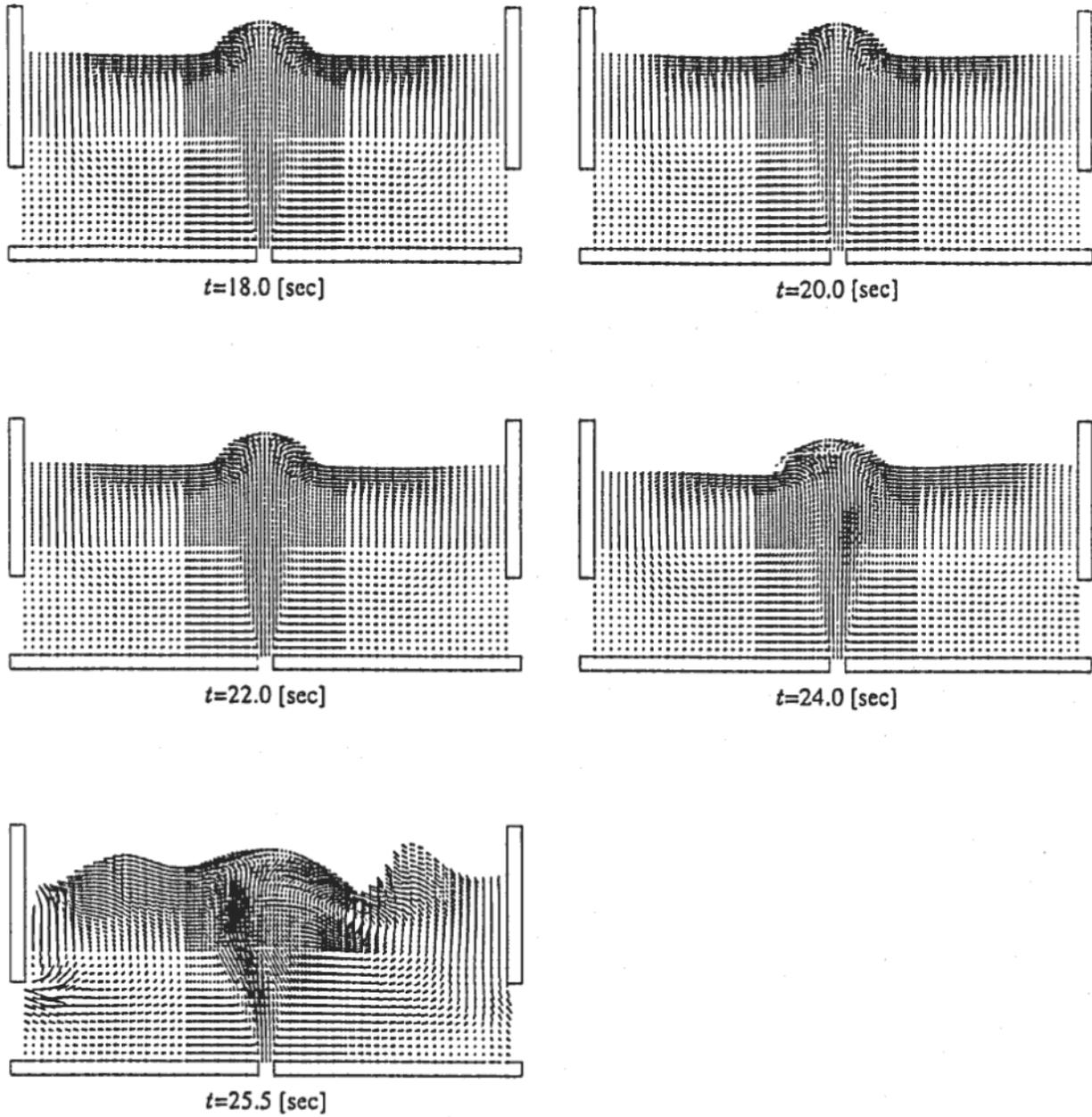


図 5：改良前の時系列流速分布
(2/2)

1.0 [m/s]
node velocity

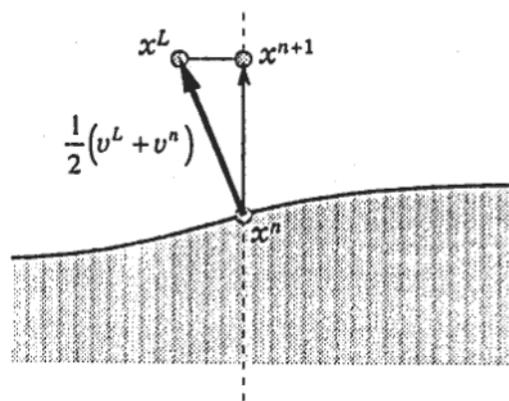
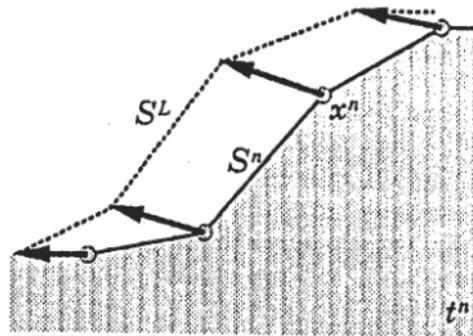
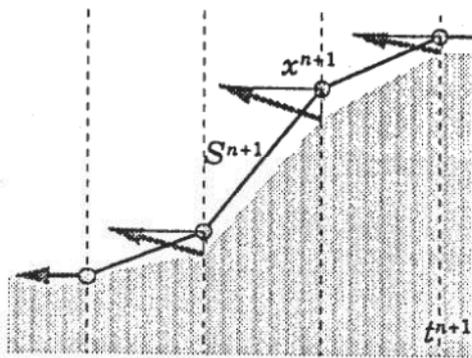


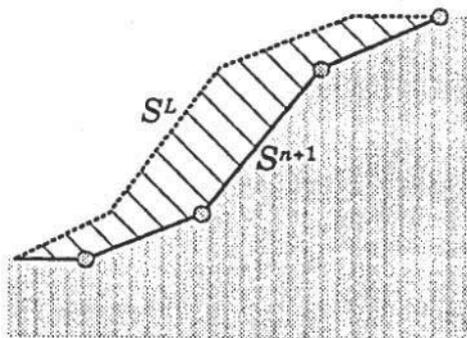
図6：液面の追跡



(a) 本来あるべき液面の位置 S^L



(b) 計算上の液面 S^{n+1}



(c) 流量誤差

図7：液面追跡手法の不備による流量誤差

3. 改良と評価解析

3.1 液面追跡手法の改良

水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法において、正しい液面変動の追跡を可能とするため、液面上の格子位置再設定手法を以下のように改良した。

- (1) 前時刻 (n) の液面上格子点 i の移動速度として、流体粒子の移動速度 $\frac{1}{2}(v_i^L + v_i^R)$ を与えた移動先、すなわち Lagrangian 計算での粒子の移動先 x_i^L を直線補間して、現時刻 ($n+1$) での仮の液面形状 S^L とみなす (図 8a)。
- (2) 上記の液面 S^L と、各格子点が固定される水平方向座標値の交点を、現時刻 ($n+1$) の液面上格子点の位置 x_i^{n+1} とする (図 8b)。
- (3) x_i^{n+1} から現時刻 ($n+1$) での液面位置 S^{n+1} が得られる (図 8c)。 x_i^{n+1} を用いて液面下の格子点を垂直方向に均等再配置し、その時刻の流体内部の格子点が定まる。

この改良により、Lagrangian 的液面追跡での本来あるべき液面位置、すなわち S^L と、水平方向 Eulerian という制限下での液面位置 S^{n+1} の相違は小さく抑えられる。

この改良は 2 次元の解析に対してのみ行ったが、(1) の 2 点直線補間を、4 点曲面補間に置き換えることにより、3 次元解析に対しても容易に拡張可能である。

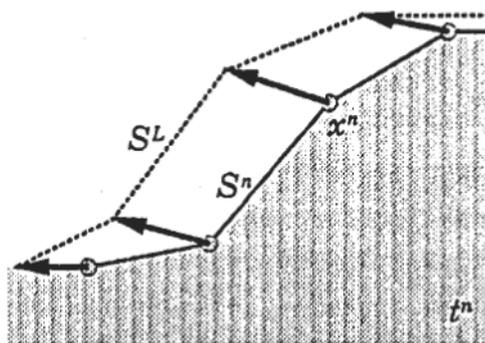
3.2 解析結果

改良後の SPLASH-ALE による解析結果を示す (図 9)。

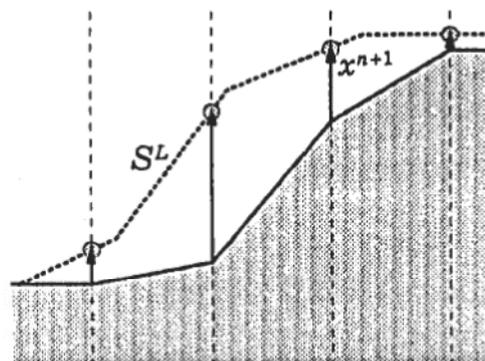
改良前の解析結果と比較して液面隆起は水平方向に広がり、液面上の流速は液面とほぼ平行になる。また、流出口からは容器外への流出が生じている。

14 sec からは、液面隆起とその周囲の液面との境界に液面の段差が生じている。この段差の下部では、液面隆起で左右に分岐した流れが流体の内部に潜り込んでいる。段差の上部では、潜り込む流れと逆に液面隆起の方向の流速が現れている。

20 sec 以降は、数値誤差によって計算体系の対称性が崩れて噴流が蛇行し始める。その後、噴流が左右に振動する状態で計算は進行する。



(a) 本来あるべき液面の位置 S^L



(b) 液面上格子点位置 x^{n+1} の設定



(c) 計算上の液面位置 S^{n+1}

図8：液面追跡手法の改良

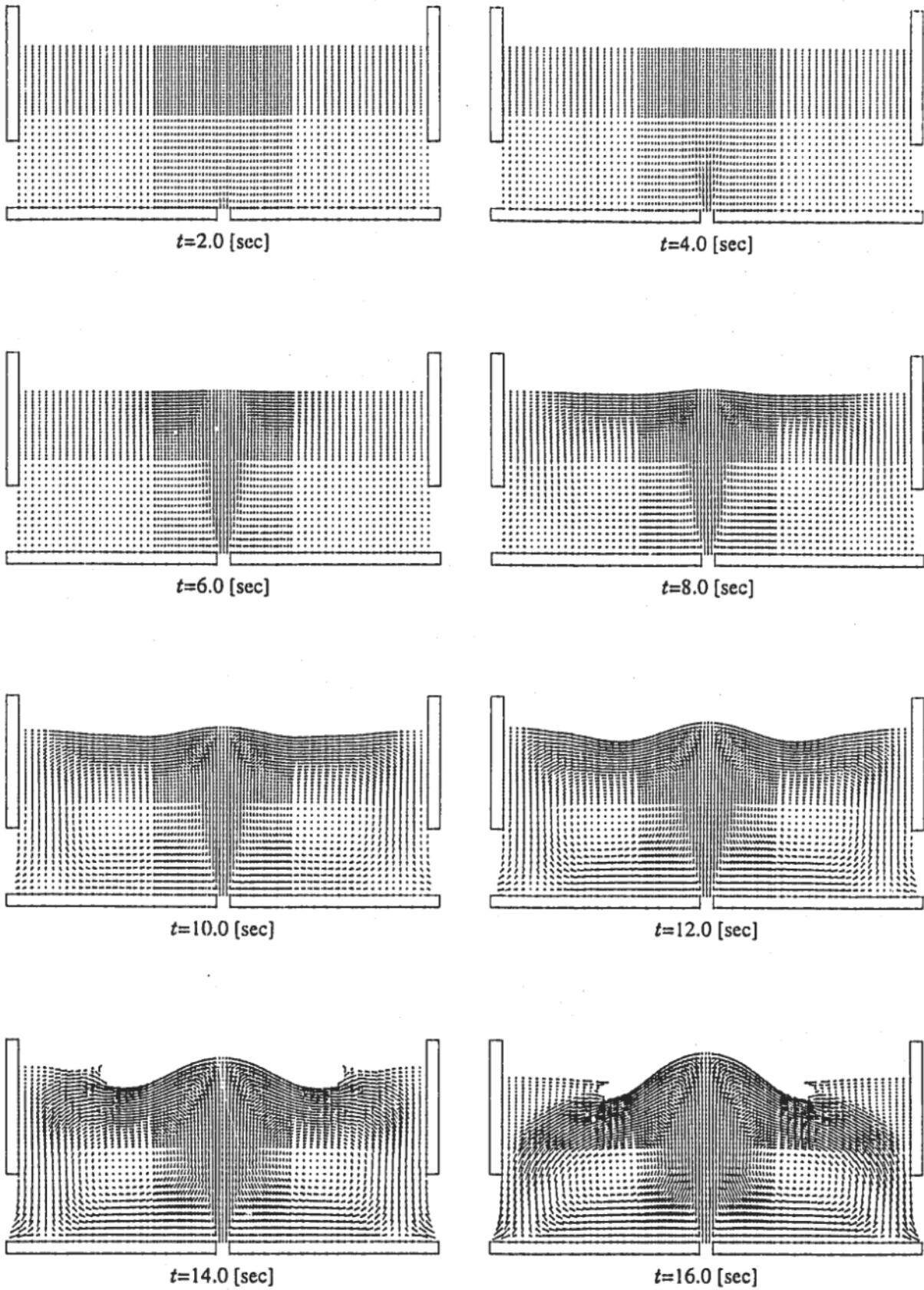


図9：改良後の時系列流速分布
(1/2)

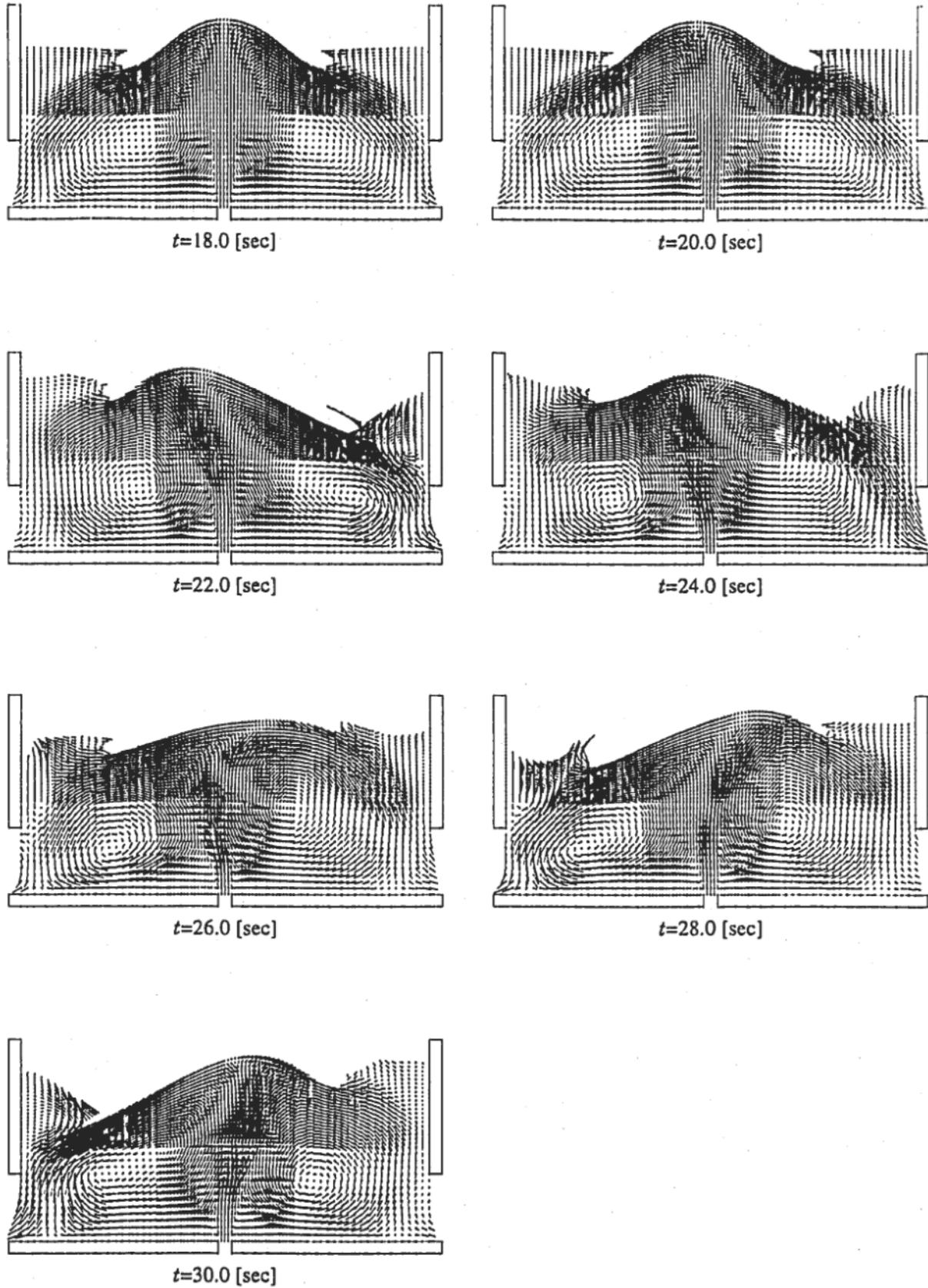


図9：改良後の時系列流速分布
(2/2)

1.0 [m/s]
node velocity

4. 考察

4.1 実験との比較

解析と同条件の実験における、矩形容器内の 0.1 sec 毎の流況可視化画像を図 10 に示す。この実験条件では、改良後の解析結果の 20 sec 以降と類似の噴流の横方向自動振動が生じる。

噴流の衝突によって形成される液面隆起の水平方向の広がり、改良前の解析結果では容器幅の約 1/5、改良後は約 1/2 である。それに対し、実験での液面隆起は容器幅の約 1/2 から 2/3 の広がりを持っている。このことから、SPLASH-ALE は、噴流衝突による液面隆起の形成、すなわち水平方向の流れに伴って進行する液面変形を模擬できるようになったといえる。

噴流振動の振動数を比較すると、実験値の 1.45 Hz に対して解析では 1.43 Hz であり、良く一致していると言える。ただ、今回の単一条件の解析からは、SPLASH-ALE がこの噴流の自動振動を正しく模擬しているか否かは断定できない。現象そのものの模擬能力を評価するには、水深や流入流速等を変化させた解析に基づいて、更に検討する必要がある。

4.2 流量誤差の改善評価

液面追跡手法の不備によって生じていた流量誤差の改善の程度を定量的に評価するため、解析体系の中心から $x = \pm 50$ mm までの領域に検査体積を設定し、検査体積に流入・流出する流量を求め、噴流が液面に衝突した後に流体の内部に戻ってくる比を計算した (図 11)。流入流速が一定となり、液面形状が安定した 18 sec での比較を次表 1 に示す。改良前は、噴流および連行流として検査体積に流入した流量の 65.5% が液面での流量誤差として失われていることになる。これに対し改良後の計算では、流量誤差が 0.15% と大幅に改善された。現在の SPLASH-ALE は単精度で計算を行っており、また Lagrangian 計算では反復計算の収束判定条件として相対誤差が 10^{-4} となることを用いたので、この値は数値誤差の範囲内と考えられ、改良によって液面への衝突前後で流量は保存されるようになったといえる。

表1：検査体積への流入と流出

	噴流流入量 q_j [m ² /s]	検査面流入量 q_e [m ² /s]	検査面流出量 q_o [m ² /s]	流量誤差 $1 - \frac{q_o}{q_j + q_e}$ [%]
改良前	0.0080	0.01137	0.00668	65.50
改良後	0.0080	0.02152	0.02957	-0.15

改良後の解析で生じた液面の段差では、段差下部で潜り込む流れに対して上部の流速は逆方向となっている。実際の現象では、段差上部にある流体が段差下部に覆い被さるように落下してくるはずである。しかし、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法を用いた場合の SPLASH-ALE は多価液面を扱えないため、液面を正しく移動させることができない。このような状況では、図 12 に示すようにあるべき液面と計算上の液面位置が大きく異なり、その差が流量誤差となる。

例えば、改良後の解析結果の 16.0 sec と 18.0 sec との間では、液面段差上部に容器中心方向でほぼ水平の流速があるにもかかわらず、液面段差の水平方向の位置は全く移動していない。この間、段差上部における流速の液面法線成分と液面長さとの積に相当する流量が、多価液面を追跡できないことによる誤差として失われていると考えられる。

4.3 今後の課題

今回の解析では、層流コードである SPLASH-ALE に対し、乱流粘性分布を要素物性として与えて解析を行った。この方式では、液面が大きく変形した場合には、変位・変形した要素に固定されて乱流粘性分布は変位・変形する。液面が大変形する場合や、流れの振動によって流況が時間的に変化する場合、実際の乱流粘性の分布も解析開始時点から変化しており、解析上の乱流粘性分布は実際と大きく異なるものになってしまう。乱流粘性の分布を正しく評価しつつ、実機規模の解析を現有計算機的能力範囲内で行うためには、乱流量をモデル化して取扱わなければならない。また、自由液面を含む体系を解析対象としているので、乱流に対する自由液面の影響を正しく評価するために、液面の微小変動をもモデル化して考慮する必要がある。

改良後の解析で顕在化したように、液面形状が多価性を持つ状況に対しては、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法は多価液面を扱えないため流量誤差を生じる。また、ALE の他の格子点移動法を用いても、多価液面では格子変形の増大により計算は破綻してしまう。このため、流れの潜り込みや碎波のような多価液面が生じた場合について、何らかの対処を行う必要がある。

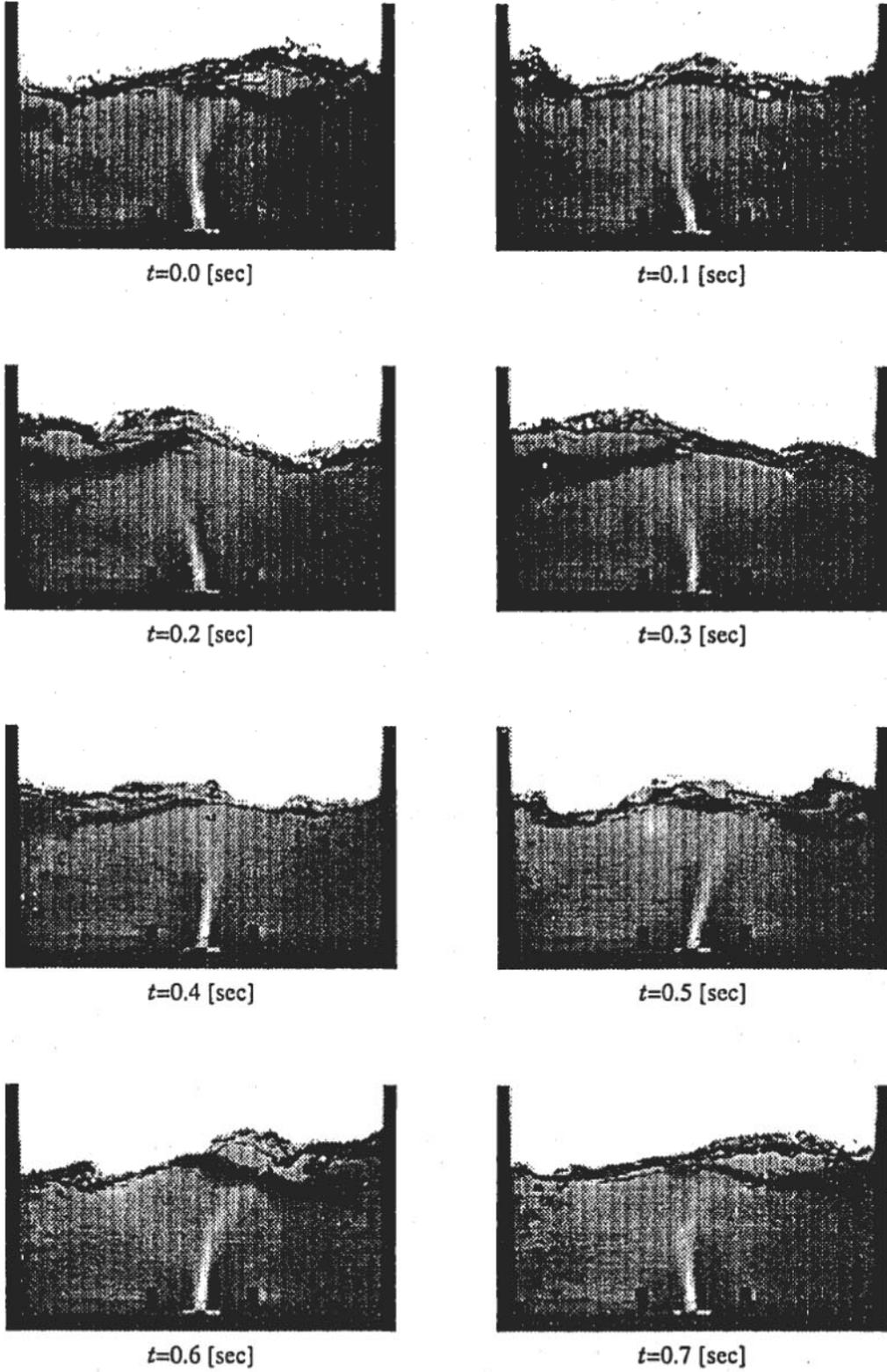


図10：流況可視化画像

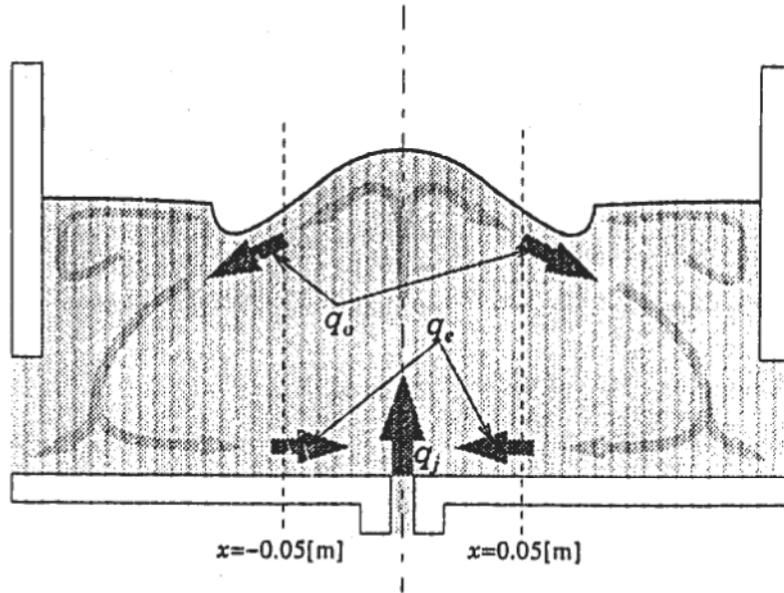
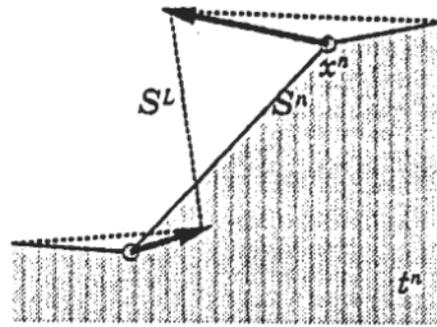
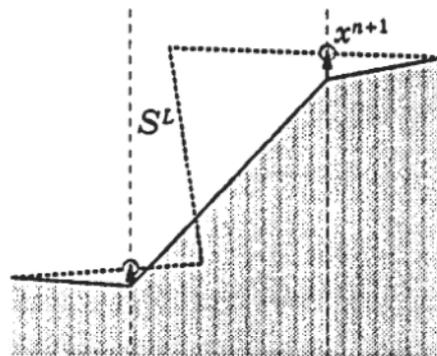


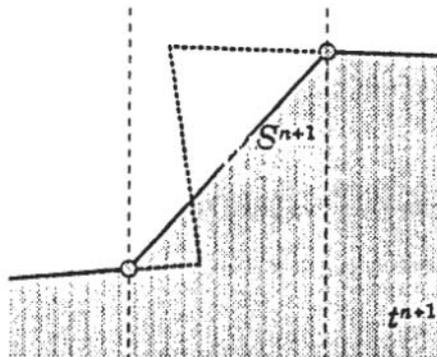
図11：流量誤差改善評価の検査体積



(a) 本来あるべき液面の位置 S^L



(b) 液面上格子点位置 x^{n+1} の設定



(c) 計算上の液面位置 S^{n+1}

図12：多価液面を扱えないことによる流量誤差

5. 結論

流動解析コード SPLASH-ALE に対し、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法において、格子点座標が固定される水平方向についても Lagrangian 的に液面移動を考慮し、その液面移動に基づいて液面上の格子点位置を再設定し、液面変動を正確に追跡するように改良を行った。そして、上向き噴流が液面に衝突して隆起を形成する体系を解析し、同条件での実験との比較、および液面衝突前後の流量保存比の算出によって、改良の効果を評価した。この改良により、水平方向 Eulerian・垂直方向均等分割という格子点移動法を用いた場合について、SPLASH-ALE が以下のように改善されたことを確認した。

- (1) 水平方向の流れに伴って液面変形が進行する状況に対し、液面形状を正しく模擬できるようになった。
- (2) (1) により、液面変動追跡の不正に起因する液面での流量誤差の発生が解消された（ただし、液面形状が一価である場合に限る）。評価解析では、噴流衝突による液面隆起を含む検査体積内について、改良前に 65.5% だった流量誤差が 0.15% に低減された。

謝辞

SPLASH の開発者である熱流体技術開発室の山口彰担当役，研究において指導・助言を頂いた村松寿晴主任研究員，解析作業に助力を頂いたカスタマシステム(株)の関義孝氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山口 彰, 有限要素法による自由液面を含む体系の流動解析コード SPLASH の開発,
PNC ZN9410 92-005(1992)
- [2] 山口 彰, ALE 有限要素法に基づく移動複雑境界のある体系の流動解析手法の開発 (1),
PNC ZN9410 93-211(1993)
- [3] 飯田 将雄, 液面に衝突する上向き噴流の自励振動, 東京大学 博士論文(1995)