

機関番号：17102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20760561

研究課題名 (和文)

水波と浮体の複雑な相互干渉問題を取り扱う高速計算法の開発

研究課題名 (英文)

Development of a numerical method for complicated interaction between waves and floating bodies.

研究代表者

末吉 誠 (SUEYOSHI MAKOTO)

九州大学応用力学研究所助教

研究者番号：80380533

研究成果の概要 (和文)：

本研究は水波と浮体の複雑な相互干渉、特に船舶や海洋構造物の厳しい波浪環境下での浮体挙動やそれに加わる荷重などを数値シミュレーションする手法を開発することを目的とした。そのために粒子法とそれを境界要素法と組み合わせたハイブリッド法のアルゴリズムを開発するとともに、MPIを用いて並列計算が可能な高速計算プログラムの開発を行った。これに伴って粒子法の境界表現について新たにより柔軟性と汎用性を持つアルゴリズムが開発された。

研究成果の概要 (英文)：

For numerical simulation of ships and marine structures under heavy sea condition, new method, which combines a particle method and boundary element method, is developed. The numerical program is parallelized for PC cluster systems with MPI and has a capability of high speed parallel computation. In the process, a new evolved algorithm for treatment of solid boundaries was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

|      | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|------|-----------|---------|-----------|
| 20年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 21年度 | 400,000   | 120,000 | 520,000   |
| 22年度 | 500,000   | 150,000 | 650,000   |
| 総計   | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：数値流体力学、粒子法、MPS法、ハイブリッド法、並列計算、波浪中船体運動

## 1. 研究開始当初の背景

船舶や海洋構造物の荒天下における耐久性を検討する上で、各種の数値計算法による試みが行われていた。特に波浪条件が厳しい大波高領域においては船体運動や波浪の問題について使用されてきた速度ポテンシャル論に基づく計算方法では対応ができなかった。そこで、90年代より数値流体力学的手法を用いて碎波や大振幅の船体運動を取り扱う試みが行われてきたが、計算速度の制約

と数値計算アルゴリズム上の複雑さから多種多様な手法による取り組みがあった。代表的なものは格子を使用した一般的な流体の数値計算手法を用いたもので、これには大きく分けて2系統の手法が存在し、波面(自由表面)の変形に格子自体の変形を追従させて計算を行う手法である。液体領域の境界が明瞭となる大きな利点を持つ一方でこの手法は碎波などの極端な大変形に際し、追従が数値的な安定とアルゴリズム自体の限界によ

り困難を伴う面があり、主流とはなりえなかった。もうひとつの格子を使用した手法では計算格子自体は変形を行わず、配置された密度関数と呼ばれる液体や境界面の存在を表す指標となる数値を時々刻々流動に伴って計算することで、波面を持つ流動を計算する手法で、界面捕獲と呼ばれるこの種の方法は成功を収めていた。この手法は安定的に飛沫が発生するような極端な大変形状態に対応できるため現在においても広く使用されている。ただしこの手法において高精度な計算を行うためには、境界面近くに細かい格子を配置したうえで、CIP 法やレベルセット法、THINC 法などの手法を用いて、高精度な界面捕獲を行うとともに、数値拡散に伴う界面の不明瞭化防止や質量保存性に十分な配慮を行う必要があった。格子を使用した一般的な流体の数値計算手法は多くの市販されている商用数値流体計算ソフトウェアが用いているが、界面捕獲などの先進的なアルゴリズムは計算アルゴリズムの中心的な部分にかかわる要素であり、まだ十分には組み込まれておらず船舶海洋工学で要求されていた

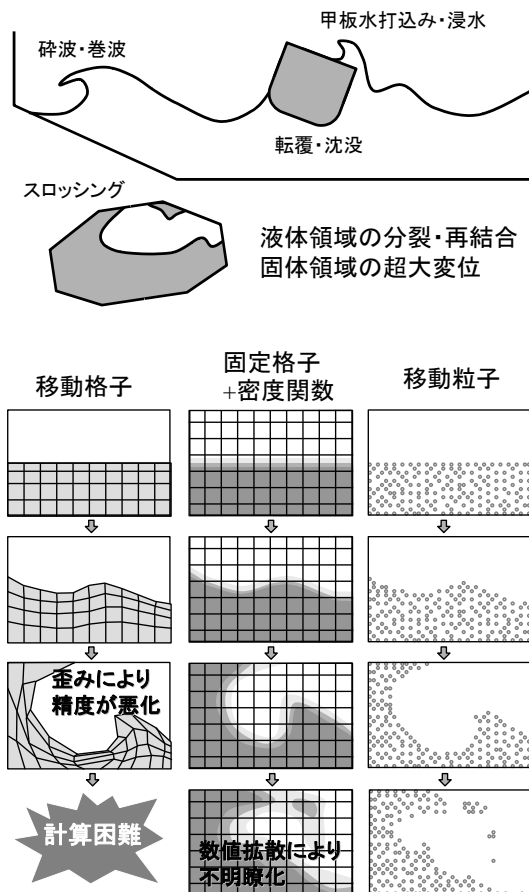


図 1：船舶海洋工学に関連した流体領域が大変形する移動境界問題の取り扱いにおける課題と従来型の格子を使用した計算手法と移動粒子を使用する粒子法の特徴

水準を満たしていなかった。

複雑化したこれらの格子を使用した手法の発展に対し、単純な方式を用いて解決を図る手法として 90 年代半ばより粒子法が新たに提案されていた。粒子法では流体の離散的な計算に対して格子によらない粒子を用い、流動に合わせて移動させる計算手法である。計算上の粒子を用いることで比較的単純な計算アルゴリズムを用いながら、極端な液体の変形・分裂などを伴う流動条件下でも計算の安定性や柔軟性を確保することがこの手法は可能であり、有望視され国内においても商用ソフトウェア化などが開始されていた。この粒子法を船舶海洋工学分野に応用するにあたって大きな問題は計算時間が格子を使用した方法よりかかりがちなことであり、浮体と波浪の相互干渉のような大きな外部流体領域を必要とする問題に対しては深刻な制約となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は船舶・海洋構造物が転覆や沈没に至るような荒天下の極限状態について、数値流体力学的手法を用いて数値シミュレーションを行う方法を開発することが目標である。そして開発された計算手法や知見をその安全設計に役立てることが最終的・将来的な目標である。そのために浮体と水波の相互干渉問題のような大きな計算領域を必要とするものを念頭に、アルゴリズムの開発を行うことを目指した。当初予定されていた主要な開発要素は次の二点である。

### (1) 境界要素法と粒子法のハイブリッド化

粒子法で浮体外部すべての領域を計算するのは将来的な計算機能力の発達を勘案しても現実的な計算量とならないため、粒子法の大変形に対する柔軟性などの能力が必要ない領域については高速な他の手法を用いることを組み合わせて計算を行う。

### (2) 並列計算プログラムの洗練・高速化

粒子法による数値計算プログラム自体を最新の電子計算機の発展方向に合わせて洗練化することが大規模計算には不可欠であるため、上述のハイブリッド化と並行して高速計算のための検討や改良を行う。

## 3. 研究の方法

研究はすでに開発が継続的に行われてきた MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いた計算プログラムを基本として、新たに考案・開発したアルゴリズムを逐次組み込み発展させることで行われた。基本とした計算プログラムの大きな特徴は、浮体の剛体運動については表面粒子の圧力を配置された

法線ベクトルと併せて直接的に積分することで流体力を計算する点と固体境界内側に通常配置するダミー粒子を用いることなく、仮想的にその影響を計算する手法を用いる点である。この基本とした原型のプログラムでは2次元問題に関して実験との比較を通して、砕波が発生するような厳しい状態に対しても対応可能なことが確認されたものである。

### (1) ハイブリッド計算法

ハイブリッド計算法は前述のように高速な他手法を粒子法に組み合わせたものである。今回対象として想定する波浪中での浮体運動において、波面の大変形（分裂を含む）が発生や流動に急激な変動が生じる箇所は水面近傍の領域のみであり、大半の水中部分は緩やかな流動しか発生していない。この特性を考慮した場合、計算領域の大部分は粒子法で多量の計算負荷をかけて計算する必要がないと判断される。そのため水面と浮体近傍のみを粒子法で計算しその他の領域、水底から水面近傍にいたる領域は実績豊富で高速な計算法である境界要素法を組み合わせた。この際問題となるのが境界要素法による水底側の領域と粒子法による水面近傍の領域間での流速や圧力情報の交換方法である。この点について本研究では試行錯誤を行い、高速なアルゴリズムを開発した。この手法について概要を以下に述べる。

まず計算領域全体を粒子法側（水面近傍側）と境界要素法側（水底側）に分割を行う。この2つの領域の境界面を接合境界と称する。この接合境界を介して境界要素法側は粒子法側に境界上の速度情報を供給し、粒子法側は圧力情報を供給する。境界要素法では接

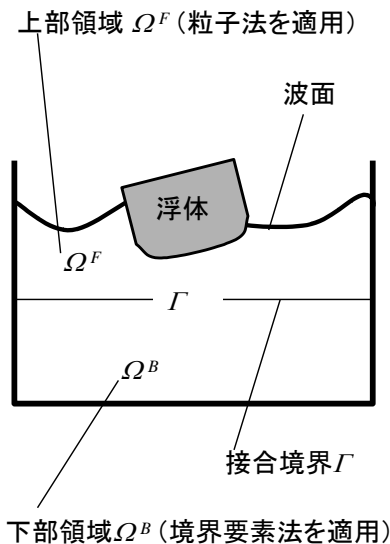


図2：粒子法と境界要素法が担当する計算領域の分割と境界の配置

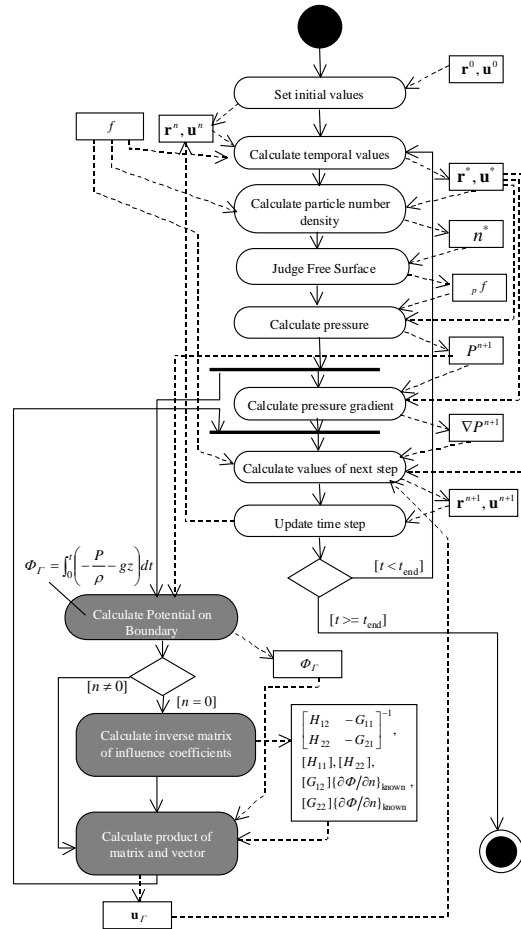


図3：ハイブリッド法のアルゴリズム

合境界を固定境界とみなし、時間領域で取り扱い、速度ポテンシャルに基づく線形計算を行う。境界要素法側では粒子法の時間発展の各時間ステップ毎に粒子法側から供給された圧力値から計算された速度ポテンシャル値を境界条件として毎回線形ソルバによる計算を行い、法線方向速度を計算する。この法線方向速度は次の時間ステップにおいて粒子法側の接合境界における速度として取り扱う。粒子法側では接合境界は固定境界ではなく、速度場に応じて変形する移動境界として取り扱う。

この手法の大きな特徴は境界要素法側と粒子法側で境界の取り扱いが異なることである。境界要素法側で固定境界とすることは、その線形ソルバにおいて影響係数からなる行列を毎回計算しなおす必要がなくなることを意味するとともに、逆行列を最初に一度求めておけば各時間ステップでは基本的に行列とベクトルの積を計算するだけとなり、連立方程式の求解をしなくてすむ点である。境界要素法における連立方程式の求解はその係数行列が密な行列になっていることもありその係数行列の生成を含めて、特に3次

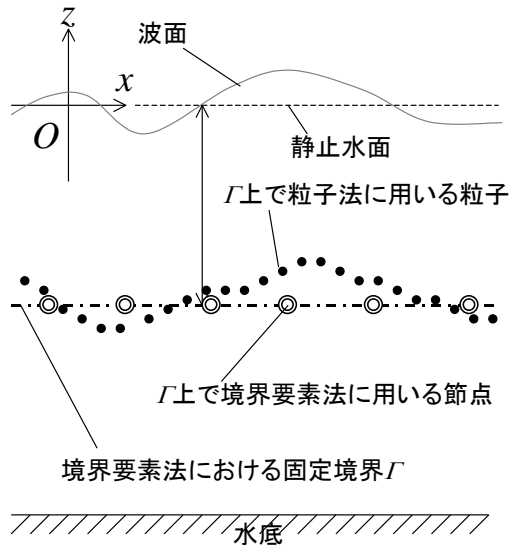


図4：開発したハイブリッド法の境界上での粒子・節点配置の概念図

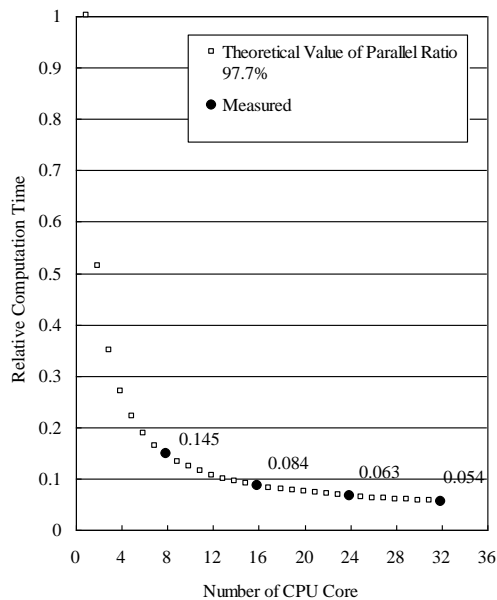


図5：開発したMPSソルバの並列化効率

元計算の場合たいへん負荷が大きな計算となる場合が多い。そのため本研究で開発した手法は大規模な計算になればなるほど効率向上への寄与が大きい。本研究ではこのハイブリッド化に伴う接合境界の設定に伴うアルゴリズム上の問題点の確認、ならびに各種境界の取り扱いについて改良・検討を行った。

(2) 並列計算プログラムの洗練・高速化

粒子法は格子を使用した手法と比較して、一般的には計算量の大きな手法である。これは粒子間の位置関係が変化していく特性上、時間ステップ毎にその距離などの計算が必

要なためである。そのため計算機システムの発展動向に合わせて並列計算などの手法を取り入れていくことが現実的な工学応用に関しては重要である。計算機の発展動向として、単体のCPUのマルチコア化が進んでいるとともに、高速ネットワークの低価格化により並列計算の一般化が進んでいる。従来はネットワークの通信速度の制約により多数の計算機をネットワークを用いて計算を行う分散記憶型の並列計算はプログラムの最適化に多くの労力を要したが、CPUのマルチコア化によりひとつの計算機内に多くのCPUコアを搭載できるようになったことと、高速ネットワークを一般的に使用可能になったことで粒子法のように計算点間の隣接関係の変動を伴う問題に対し領域分割による計算が容易となった。本研究では並列計算をMPIを用いて分散メモリ型の計算機向けに構築しその計算効率を確認した。

4. 研究成果

[平成20年度]

開発上の技術的な問題点を明らかにし、各種要素技術を取得するためにプログラムの試作・試計算を行った。粒子法と境界要素法のハイブリッド化で問題の一つとなるのは2つの分割された領域間での情報のやり取りにおける各種数値的な取扱いであり、細かな技術的問題点について検討を行った。具体的には以下のような作業が行われた。

- ・境界面での圧力のやり取りに導入していた平滑化処理による減衰を避けるため、粒子法側での数値振動の少ない圧力計算法について導入を図り、性能の向上が図られた。
- ・粒子法ソルバの固体境界面で、粒子数の低下とその分布の偏りに起因する精度低下が起きていたため、非物理的な流動が計算されるケースがあった。これについても圧力勾配の取り扱いについて検討を行い、その除去を図った。

また、上述のようなアルゴリズム上の問題

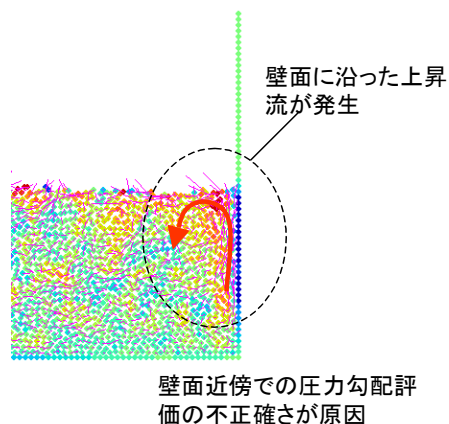


図6：壁面近傍での精度低下に起因する不自然な流動の例

の改善と共に、現在の電子計算機の開発動向で推し進められたマルチコア化に対応して、粒子法ソルバの並列化効率改善を図った。現時点では高速なネットワークを有する計算機上であれば粒子法単体での並列化率は 97 パーセント以上が確認され、CPU コア数にある程度準じた計算速度を期待できることを確認した。

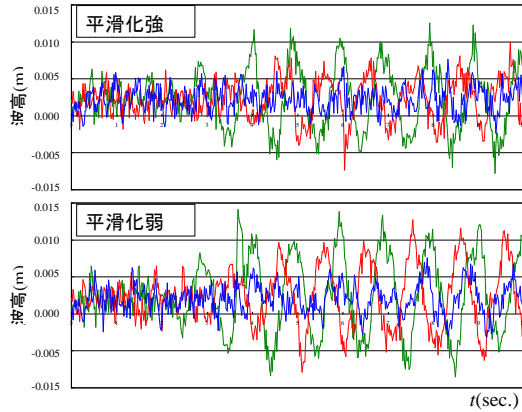


図 7：平滑化強度による波の減衰の例

[平成 21 年度]

粒子法ソルバのさらなる計算速度の向上を目指した。粒子法ソルバの高効率化に関しては計算速度の向上とともに、3 次元計算での計算安定性や汎用性の面で大きく改善が行われた。一方でそれと組み合わせる境界要素法ソルバに関しては、昨年度に実装を行った 2 次元版のプログラムにおける波の減衰問題を始めた諸問題の解決に加え、粒子法との情報の相互交換アルゴリズムやその際に省略され失われる情報について十分な検討が完了しなかったため実際のプログラムの実装には至らなかった。特に波の減衰については粒子法プログラムの流場計算アルゴリズム自体の改善もかかわる問題のため、非圧縮性流体の計算におけるエネルギーの保存性などを十分に考慮して、慎重な取り扱いが必要であることが判明した。

また粒子法ソルバの改良の際に副次的に得られた成果ではあるが、壁面境界などの取り扱いに関する効率的な取り扱い手法を開発し、プログラムへの実装も含めて試計算によりその有効性の確認が行われた。

[平成 22 年度]

新開発、もしくは改良を行った各要素を用いて実際の大規模計算を目的とした 3 次元計算プログラムの構築を行った。プログラムの実装にあたっては前年度の検討内容を生かし、また昨年度同様プログラム部品のモジュール化を考慮し、再利用性、可読性を向上させ、以降の応用研究に有効活用が容易になるよ

う配慮を行った。3 次元計算において使用可能なフリースリップ、ノンスリップ境界などを粒子配置の不均一な任意の曲面配置状態でも可能にしたものの、当初の予定 3 次元境界要素法ソルバ部、ハイブリッド計算インターフェース部などは完成には及ばず、確認にはいたらなかった。この際境界表現については大きな進歩が得られ、粒子の貫通防止、境界条件などが鏡面粒子の動的な生成・配置を行うことで人工的な安定化処理を省く形で実現できたと考える。具体的に MPS 法における各段階での境界近傍での仮想粒子を用いた取り扱いを以下に記す。

粒子数密度：

単純に仮想粒子も含めて粒子数密度を計算すればよい、鏡面粒子の番号を  $k(j)$  とすると

$$n = w(r_{ik(i)}) + \sum_{j \neq i} (w(r_{ij}) + w(r_{ik(j)}))$$

圧力勾配：

鏡面粒子にそれぞれの実体粒子に対応する圧力を与え計算する

$$\nabla P_i = \frac{d}{w(r_{ik(i)}) + \sum_{j \neq i} (w(r_{ij}) + w(r_{ik(j)}))} \left\{ \sum_j w(r_{ik(j)}) \frac{P_{k(j)} - P_i}{r_{ik(j)}} \frac{\mathbf{r}_{k(j)} - \mathbf{r}_i}{r_{ik(j)}} + \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) \frac{P_j - P_i}{r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{r_{ij}} \right\}$$

粘性項：

鏡面粒子にそれぞれの実体粒子に対応する速度をノンスリップ・フリースリップ相当になるように与えて計算する

$$\nu \nabla^2 \mathbf{u}_i = \nu \frac{2d}{\lambda} \left\{ \sum_j w(r_{ik(j)}) (\mathbf{u}_{k(j)} - \mathbf{u}_i) + \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \right\}$$

圧力のポアソン方程式：

鏡面粒子の寄与分はポアソン方程式を書き下した離散化式に反映させる。鏡面粒子に関しては  $P_j = P_{k(j)}$  なので

$$\sum_{j \neq i} (w(r_{ij}) + w(r_{ik(j)})) P_j^{n+1} - \left\{ w(r_{ik(i)}) + \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) + w(r_{ik(j)}) \right\} P_i^{n+1} = - \frac{\rho \lambda}{\Delta t^2 2d} \frac{(n_i^* - n_{const})}{n_{const}}$$

となり、未知数の数は増加しないが、係数マトリクスの対称性が崩れる可能性があるので注意が必要である。

またこの手法では壁面境界上に配置した粒子は単なるマーカーとして取り扱われるため、形状の表現精度のみにかかわる組み込み法となっており、粒子の粗密による計算の不具合回避や階段状の配置に起因する問題の回避、ポリゴンメッシュなどから計算用粒子を自動配置する際に大きな利点があるものと考えられる。

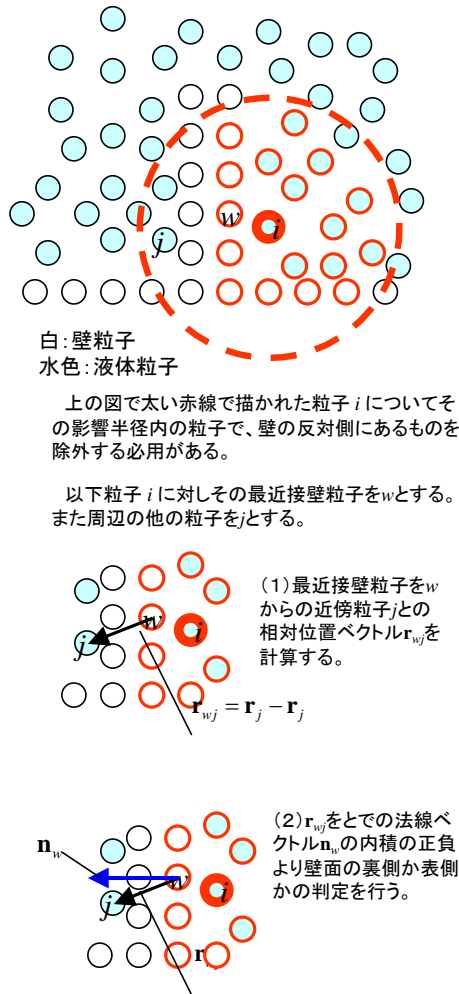


図8：薄板状の境界における位置関係の判定を壁面粒子のみの使用で実現する手法の概要

5. 主な発表論文等

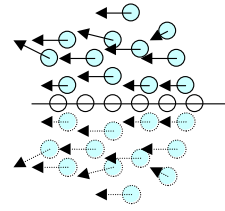
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計2件)
- ① 末吉誠, 粒子法によるLNGタンク内のスロッシング解析, 第23回数値流体力学シンポジウム後援論文集, 2009年12月, CDROM(査読なし)
  - ② Makoto SUEYOSHI, Numerical Simulation of Tank Sloshing with Thin Plate Structures by Using a Particle Method, The Proceedings of The 19th (2009) ISOPE CONFERENCE, Vol. III, pp. 303-307, 2009 June (査読有)

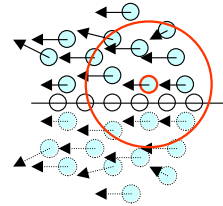
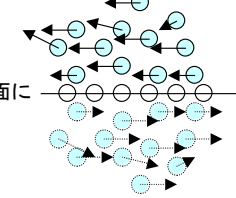
[学会発表] (計3件)

- ① 末吉誠, 粒子法によるLNGタンク内のス

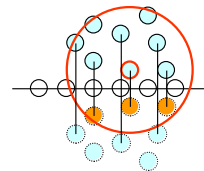
フリースリップの場合  
(線対称な仮想粒子配置、線対称な流速)



ノンスリップの場合  
(線対称な仮想粒子配置、線対称な流速、ただし壁面に沿う方向成分のみ逆流)



この処理は壁面近傍粒子のみに関して必要な処理であり、その局所的な情報だけから壁面裏側の仮想粒子の位置情報を生成する必要がある。流速ベクトルに関しては位置情報さえわかれば一意に定まる。



注意しなければならないのは壁面近傍粒子に対してではなく壁面に対して線対称な位置の粒子を決定することである。そしてその中から影響半径に収まっている粒子についてのみ考慮すればよい。

図9：ノンスリップ・フリースリップの鏡面境界を仮想粒子により実現する手法の概要

ロッシング解析, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009年12月18日, 仙台

- ② Makoto SUEYOSHI, Numerical Simulation of Tank Sloshing with Thin Plate Structures by Using a Particle Method, The Proceedings of The 19th (2009) ISOPE CONFERENCE, 2009 June 24, Osaka
- ③ Makoto Sueyoshi, Development of a Parallel Numerical Program to Simulate Sloshing in LNG Tank, WCCM/ APCOM2010, 2010 July 22, Sydney Australia

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末吉 誠 (SUEYOSHI MAKOTO)  
九州大学・応用力学研究所・助教  
研究者番号: 80380533