研究成果報告書 科学研究費助成事業

平成 30 年



機関番号: 1 7 2 0 1
研究種目: 基盤研究(C)(一般)
研究期間: 2015~2017
課題番号: 15K06621
研究課題名(和文)粒子法・渦法による洋上風力発電設備および海洋浮体構造物の流体ー弾塑性構造連成解析
研究課題名(央文)Fluid and Structure analysis of offshore wind power plant and floating structure using particle and vortex method
研究代表者
萩原 世也(HAGIHARA, SEIYA)
佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
「「「「「「」」」」 「」」 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●
交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文): 海洋浮体構造物は,安定性などの浮体挙動の把握が必要であり,さらに非日常的な 波浪等による構造物の安全性を確保する必要がある.これらをシミュレーションにより予め把握することは,こ れらの構造物を設計・設置するうえで非常に重要である. 本研究では,粒子法の一つであるSPH法により弾塑性解析を行い検証を行った.また,SPHysicsを -SPH法に 拡張することにより,流体解析の圧力の安定性の検証を行った.さらにSPH法および渦法により係留された浮体 構造物を想定して,挙動の解析を -SPH法で行い,流体力相当の入力を行うため,コードの整備を行った.共同 研究者は,連節浮体構造物の挙動の評価も行った.

研究成果の概要(英文): The floating/fixed ocean structures such as wind power plants and other structures on offshore have to be taken account of safety in rough sea and tsunami. It is necessary to predict behaviors for both structures and fluid.

The smoothed particle hydrodynamics (SPH) method which is one of the particle methods is applied to some problems of fluid dynamics and solid mechanics. The SPH methods are mainly utilized to a number of problems for the fluid dynamics. If the structures in the ocean will be subjected to the large deformation from the waves, the stress may exceed the yield stress in the structures. The elastic-plastic effects have to be taken into account for the behavior of the structures. The stability terms are included for the open source software SPHysics for fluid analysis. Analyses of the mooring and floating structures are carried out by the SPH method and The vortex method.

研究分野: 船舶海洋工学

キーワード: 粒子法 海洋浮体構造物 弾塑性解析 流体構造連成解析 渦法 安全性

1. 研究開始当初の背景

自然エネルギー利用が注目される中、洋上 風力発電設備をはじめとする海洋浮体構造物 は、自然エネルギーを変換する設備として設 置されることが多くなると考えられる.しか し、これらは、洋上に設置されるため、効率を 考慮するため波浪等による構造物の安定性と 大きな波浪に対する安全性を確保する必要が ある. これらをシミュレーションにより予め 把握することは、これらの構造物を設計・設 置するうえで非常に重要である.また、強風 や台風等による、非日常的な波浪が風力発電 構造物等へ与える影響もシミュレーション技 術を確立することによって予測が可能となる. 一方、これらのシミュレーションを行うた めには、近年注目されている粒子法で、波浪 と海洋浮体構造物の連成解析を行うことによ り、洋上風力発電設備のような比較的大きな 海洋浮体構造物が波浪等により受ける影響を 解析することができる. 粒子法は流体・構造

を同一の手法により取り扱うことができ、そ の他の分野への適用も可能である. 粒子法はメッシュ分割を必要とせず、連続 体の運動を離散粒子群の運動によって近似す る手法である.近年、日本では東日本大震災 の際に発生した津波で受けた甚大な被害を教 訓として、津波が発生したときの浸水域や被 害の予測のために、流れの解析や流体-構造連

成解析を大規模に行うことができる手法とし て, 粒子法は広く注目を集めている.また, 海 洋浮体構造物では, 流体としての海水の流れ による挙動や海洋の波浪の挙動について精度 良くシミュレーションを行い, 流体からの影 響力を構造物に伝えなければならない.しが たって, 流体および構造の SPH 法プログラ ムを作成していくことが重要である.

これらの構造解析部分では、大変形や破壊 を伴う解析が必要となる場合が多い、大変形 や破壊現象を伴う解析を行う場合には、材料 の弾塑性の性質を考慮に入れて解析を行わな ければならない.

構造物に関しては、SPH 法のような陽解法 に適した塑性剛性行列を用いた Dp マトリッ クス法と降伏曲面拡大に関して Marcal の方 法を,材料特性についてマルチリニア近似に 改良して独自の手法を用いて実装を行い,弾 塑性解析の構造解析と上記で示したような, 渦を考慮した SPH 法および渦法による流体 解析プログラムと連携した,海洋浮体構造物 の流体—弾塑性構造連成解析手法を確立する ための研究を行う.

2. 研究の目的

本研究では、粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics 法(SPH法) に適し た弾塑性解析を行う方法を提案し、さらに、 人工粘性を考慮した SPH 法コードおよび渦 法によるコードを開発し、また弾塑性構造解 析を行うことができる粒子法コードを開発し、 それらの将来の流体-構造連成解析を目標と して,洋上風力発電施設を主として海洋浮体 構造物周辺の流れと非常時の構造安全性につ いて解析を行う.

静的陽解法弾塑性解析手法を SPH 法に適 用して,弾塑性問題において収束計算を伴わ ないで解析を精度良く行うことができる手法 とプログラムの開発と流体解析オープンソー スウェアの改変と渦法により,洋上浮体構造 物の挙動解析を行うことにより,洋上風力発 電設備周辺の流れと設備の安全性の解析の基 礎的検討を行うことを目的とする.

3. 研究の方法

①SPH 法プログラム関連

(1) Dp マトリックス法と Marcal の方法を組み込んだ SPH 法のプログラムの精度検証を行う.

(2) 精度検証後,材料特性をマルチリニア近 似対応に改良し,複雑な材料挙動への対応を 行う.

(3) さらに降伏曲面のひずみ速度依存等への 対応を行い,最終的な精度の検証を多方面か ら行う.

(4) また,現有の SPH 法プログラムでは,境 界付近の精度が落ちる傾向にあるため,新た な手法の導入により境界付近の精度向上を試 みる.

②渦法プログラム関連

(1) 渦法プログラムの検証を実施する.

(2) 粒子法との流体構造連成解析への流体力 の伝達方法の検討を行う.

③SPH 法および渦法プログラム関連

(1) SPH プログラムは, 圧力の安定化に改良 の余地があることが報告されている. これら の安定化の検討を行い, 改良を行う.

(2) 静水問題で圧力,ダムブレイク問題の自由表面問題で流体解析の安定化に対する精度の検証を行う.

(3) SPH 法と渦法のプログラムの検証を行う.
 (4) SPH 法および渦法プログラムについて,
 SPH法弾塑性構造解析プログラムとの連成プログラムの検討を行う.

(5) ディスプレイ表示のためのグラフィック スプログラムを組み込む.

4. 研究成果

(1) 単軸引張解析

SPH 法では,任意の位置xの物理量f(x)を表 す際に,平滑化関数W(x - x', h)によって以下 のように平滑化され物理量で表す.影響半径 の概念を図1に示す.

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int_{\mathbf{x}' \in V} f(\mathbf{x}_j) W(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|, h) dV$$

なお, h は平滑化距離, x, x はそれぞれ評価 中心粒子, 任意粒子の座標値である. SPH 法 では粒子を基本単位とする. 上式は粒子によ る離散化された形式で以下のように表すこと ができる.

$$\langle \nabla f(\mathbf{x}) \rangle = -\sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$



図1 影響半径内の粒子の模式図

平滑化関数には以下のスプライン関数を用 いる.

W(q,h)

$$= \frac{1}{4\pi h^3} \begin{cases} (2-q)^2 - 4(1-q)^3 if(0 \le q \le 1) \\ (2-q)^3 & if(2 \le q \le 2) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

 $x_i, q = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|/h \tau \sigma \delta.$

離散化された支配方程式(質量,運動量)は次の通りである.

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{dt}} = \rho_i \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} \left(u_i^{\beta} - u_j^{\beta} \right) W_{ij,\beta}$$
$$\frac{\mathrm{d}u_i^{\alpha}}{\mathrm{dt}} = -\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) W_{ij,\beta}$$

uは速度, σは応力である.

ここで, Πは人工粘性項と呼ばれ, 非物理的 振動を抑えるための項である.

本研究での構成方程式には、ひずみ速度非依 存型であるDp マトリックス法を使用する. 弾性応力—ひずみマトリックス[D_e]と塑性応 力-ひずみマトリックス $[D_p]$ を, Marcal の方 法により記述すると、以下の式となる.

 $\hat{\sigma}^{\alpha\beta} = \left(D_{\rm e}^{\alpha\beta\xi\eta} + m D_{\rm p}^{\alpha\beta\xi\eta} \right) \dot{\varepsilon}^{\xi\eta}$

ここで、添字表記はアインシュタインの総和 規約に基づいている.

応力-ひずみ関係における降伏点近辺の計 算には,Marcalの方法を使用している.この 方法は,弾塑性関係に,以下のように弾性状態, 塑性状態,弾性状態から塑性状態に変わる領 域を遷移状態として,状態により変化する変 数 mを導入することにより,弾塑性構成方程 式を表す方法である.

	(0	… elastic region
m =	} 1	… plastic region
	(0 < m < 1)	··· transition region

ここで mは,弾性状態から降伏応力を超えて 塑性状態になる際に相当応力と降伏応力の差 の比で表される変数である.

また、大変形を伴う解析を行う場合、大きなひずみが生じるため、剛体回転の影響を考 慮する必要がある.そのため、以下の Jaumann Rate を導入する

 $\dot{\sigma}^{\alpha\beta} = \hat{\sigma}^{\alpha\beta} + \dot{R}^{\beta\gamma}\sigma^{\gamma\alpha} + \dot{R}^{\alpha\gamma}\sigma^{\gamma\beta}$ ここで, $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ は変形速度, $\dot{R}^{\alpha\beta}$ はスピンであり, 以下の式で表される.

$$\dot{\varepsilon}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j}^{N} \frac{m_{j}}{\rho_{j}} \left[\left(u_{j}^{\alpha} - u_{i}^{\alpha} \right) W_{ij,\beta} + \left(u_{j}^{\beta} - u_{i}^{\beta} \right) W_{ij,\alpha} \right]$$
$$\dot{R}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j}^{N} \frac{m_{j}}{\rho_{j}} \left[\left(u_{j}^{\alpha} - u_{i}^{\alpha} \right) W_{ij,\beta} - \left(u_{j}^{\beta} - u_{i}^{\beta} \right) W_{ij,\alpha} \right]$$

支配方程式は時間依存であるため、それぞれ の式を時間積分する必要がある.本解析では 以下の式を用いた.

$$\rho^{t+\delta t} = \rho^{t} + \delta t \times \dot{\rho}$$
$$u_{\alpha}^{t+\delta t} = u_{\alpha}^{t} + \delta t \times \dot{u}_{\alpha}$$
$$\sigma_{\alpha}^{t+\delta t} = \sigma_{\alpha}^{t} + \delta t \times \dot{\sigma}_{\alpha\beta}$$
$$x_{\alpha}^{t+\delta t} = x_{\alpha}^{t} + \delta t \times \dot{x}_{\alpha}$$

図2のように単軸の引張解析を行った.弾 性状態から降伏応力を超えて塑性状態になる ように変形させ,また塑性状態において一度 除荷を行い,再負荷を行うことにより弾性状 態,塑性状態の遷移が適切に行われているか の確認を行った.その際,Marcalの方法を適 用し,塑性状態における応力-ひずみ関係の 多直線近似を行った.ひずみ硬化率が変化す るところでは,Marcalの方法を適用し多直線 での近似を行った.解析条件として端面を固 定し,他方の面に負荷速度を与えた.解析結 果を図3に示す.



図2 単軸引張試験のモデル

これより、塑性状態において、多直線での近 似が行われていることが確認できる.また、 塑性状態においての、弾性状態から塑性状態 への遷移、塑性状態から弾性状態への除荷過 程も適切に得られていることが確認できる.



図 3 アルミニウム合金の応力-ひずみ線図の 結果

(2) 押しジグ圧縮解析

押しジグにより平板が圧縮を受ける解析を 行った.解析モデルは図4に示すように、平 板がアルミニウム合金で、押しジグが鉄鋼材 料である.各材料物性値及び粒子数を表1に 示す.アルミニウム合金について、表2に示 すひずみ硬化率を用いる.



図4押しジグ圧縮解析におけるモデル図 ま1 #料 完教

衣 I 忉秤定奴				
Material	Al-Alloy	Steel		
Density [kg/m ³]	2.71×10^{3}	$7.89 \text{x} 10^3$		
Young's Modulus [GPa]	68.0	206		
Shear Modulus [GPa]	26.2	79.2		
Yield Stress [MPa]	49	490		
Rate of strain hardening[GPa]	0.68	2.06		
Number of particles	9251	275		

表2 ひずみ硬化率

Stress [MPa]	Rate of strain hardening [GPa]
49-70	50.0
70-90	20.0
90-110	5.0
110-	0.68

解析条件として、平板は底部を固定された 状態とし、押しジグに負荷速度 1.0m/s を与え、 粒子間距離 5mm と 2mm で解析を行った. 時 間増分Δt を 1.0×10 -8sec, ステップ数を 40000 ステップとした. 解析結果の例として 経過時間 t=10.0×10⁻⁵ における中央断面の塑 性域の分布状況について, 粒子間距離 5mm と 2mmの結果を. それぞれ図6と図7に示す. 赤い領域は降伏点以上の応力状態となって おり、実質的に塑性域に入っている. 粒子間 距離が同じとき、ひずみ硬化率による違いも 解析を行ったが, 与えたひずみ硬化率の違い が小さく、ひずみ硬化率の違いによる変化は あまり大きく見られなかった.また、粒子間 距離が 5mm のときより 2mm のときの方が, 塑性域の広がりがわずかに速くなっているこ





図6相当応力の分布図(粒子間距離5mm)



図7 相当応力の分布図(粒子間距離: 2mm)

(3) SPH 法による海洋浮体構造物の挙動解析 SPH 法プログラムのベースには、オープンソー スソフトウェアの SPHysics を用い、以下の変更を 行い、δ-SPH 法プログラムを作成し、解析を進 めた。

離散化された運動量と質量の支配方程式は それぞれ次の通りである.

$$\rho_i \frac{D\boldsymbol{u}_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^N (p_i + p_j) \nabla_i W_{ij} dV_j + \rho_i \boldsymbol{f}_i$$
$$+ \alpha h c_0 \rho_0 \sum_{j=1}^N \pi_{ij} \nabla_i W_{ij} dV_j$$

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_i}{\rho_j} (\boldsymbol{u}_j - \boldsymbol{u}_i) \cdot \nabla_i W_{ij} + \delta h c_0 D_i$$

uは速度である. 上々式の右辺第3項は修正 人工粘性項であり、 α はパラメータである. また、 上式の右辺第2項は高周波数/イズの存在を 防ぐために加えられた、人工密度拡散 (Diffusive term)と呼ばれる項であり、 δ はパラ メータである. ここで、 π_{ii} を以下に示す.

$$\pi_{ij} = \frac{(\boldsymbol{u}_j - \boldsymbol{u}_i) \cdot \boldsymbol{r}_{ij}}{|\boldsymbol{r}_{ij}|^2}$$

 $W(\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_i, h)$

平 滑 化 関 数 に は , ここで は 以 下 の Renormalized Gaussian Kernel 関数を用いる.

$$=\begin{cases} \frac{e^{-(r/h)^2} - C_0}{2\pi C_1} & \text{if } r \le \varepsilon_h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
(3)

なお, $r = \|\mathbf{r}_{i} - \mathbf{r}_{i}\|$ は粒子間の距離であり, サ ポート半径 ε_{h} は 3hに設定されている.



図8 係留水中浮体のモデル 解析モデルに示すように,水中浮体構造物

の底部両端を初期角度 45°の係留バネに繋 げた.この角度は、水中浮体構造物の動きに 合わせて変化する.初期状態でワイヤに張力 が作用しない状態から、水中浮体を解放する. このときの解析の物性値等を表3に示す.また、 水中浮体構造物の拘束を解いた後の時間経 過 t=0.1s 後の水中浮体構造物の挙動と流体 の圧力分布の解析結果を図 9(α =0.00, δ =0.0)、図10(α =0.02, δ =0.01)に示す.分 布は圧力分布値[Pa]である.

表3 解析の物性値等		
Density of fluid[kg/m ³]	1000	
Density of structure [kg/m ³]	100	
Particle distance[m]	0.01	
number of particle	28075	
Spring constant[N/m]	10000	
Analysis time[s]	7.0	
Time step[s]	0.01	



図 9 水中浮体構造物の挙動と流体の圧力分 布の解析 (α=0.00, δ=0.0)



図 10 水中浮体構造物の挙動と流体の圧力 分布の解析 (α =0.02, δ =0.01)

図9の水の圧力分布が示すように、人工粘性 を付加しない SPH 法では、水中浮体構造物 を静水中において拘束を解放すると、解放し た直後から、圧力分布が非常に乱れているの が分かる.一方、図 10 のようにδ-SPH 法では、 圧力分布が解放直後は安定して推移して行き、 安定的に計算が進んでいく. (4) 渦法による海洋構造物の解析

渦法は,粘性流体を対象とした解析法で,流 場の連続的な渦度分布を多数の微小渦要素 によって離散的に表し,渦度方程式を数値的 に解いて,流れに乗った渦要素の移動と拡散 を追跡することにより,流場の時間的変化を計 算するものである.ここでは,単一の渦層で表 す方法(渦層モデル)を用いる.この方法は, より簡便で,複雑な形状の物体にも適用しや すい手法である.

渦法プログラムにより,自由表面下で鉛直方 向に強制振動する図 11 に示す 2 次元平板問 題に本計算法を適用し,平板に作用する流体 力について実験結果と計算結果を比較するこ とで,流体力の計算精度を検証する.ここでは, 渦法および角部からの渦度の導入モデル (Vorticity shedding モデル)の有効性につい て検討するため,以下の 3 ケースの内, Case2 および Case3 の計算結果のみを示す.

Case1:非粘性流体による計算(渦度の導入なし)

Case2: 渦法計算;

渦度の導入=平面部(渦層モデル)のみ Case3:渦法計算

渦度の導入=平面部(渦層モデル)

+角部(Vorticity shedding モデル)



図 11 自由表面下で鉛直方向に強制振動す る 2 次元平板

Case2,3の無次元時間 T*=6.5 における平 板周りの渦度分布を Fig.9 に示す.図中の正 の渦度は反時計回りの回転を,負の渦度は時 計回りの回転を表す.Case2,3 で平板両端 に生じている渦度強さの差は明らかである. Case3 では角部から強い渦度が発生してお り,流体力の計算精度に大きく影響している と考えられる.本問題のような角部を有する 物体に対しては,平面部からの渦度の導入モ デルに加えて,角部からの渦度の導入を考慮 するモデルを併用することが必要である.



図12 プレート周り渦度の分布

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4件)

 <u>永田修一</u>,大窪慈生,今井康貴,村上天元,岡本豊,渦法による浮体構造物の非線形波浪中挙動解析法の開発-第3報浮体式振動水柱型波力発電装置の一次変換性能解析,日本船舶海洋工学会論文集,査読有, 25,2017,21-31,10.2534/jjasnaoe.25.21

⁽²⁾ Da-Wei Chen, <u>Shuichi Nagata</u>, Shiaw-Yih Tzang, Yasutaka Imai, Chih-Min Hsieh, Jiahn-Horng Chen, A Time-Domain Numerical Tool for Wave Energy Attenuator eith the SPH Method, Journal of Marine Science and Technology, 25, 2017, 752-760, 10.6119/JMST-017-1226-16

Shogo Sannomaru, Satoyuki Tanaka, (3) Ken-ichiro Yoshida, Tinh Quoc Bui, Shigenobu Okazawa, Seiva Hagihara, Treatment of Dirichlet-type boundary conditions in the spline-based wavelet Galerkin method employing multiple point constraints, Applied Mathematical Modelling, 43, (2017), 592–610

10.1016/j.apm.2016.11.018

 ① 大窪慈生,<u>永田修一</u>,今井康貴,新里英幸 渦法による浮体構造物の非線形波浪中挙動解 析法の開発,船舶海洋学会論文,査読有 22,2015,55-65

〔学会発表〕(計8件)

⑤ 竹中大輝,甲斐千尋,萩原世也,武富紳也, 只野裕一,田中智行,弾塑性多直線近似構成 則を用いた SPH 法による変形解析,日本機械 学会第 30 回計算力学講演会, No.17-4, 262, (2017) 2017/9,大阪
<li⑥ <u>Seiya Hagihar</u>a, Chihiro Kai, Shinya

Taketomi, Yuichi Tadano, Satoyuki Tanaka

Smoothed particle hydrodynamics method for fluid-structure interaction analysis

- Fluid analysis and elastic-plastic structural analysis-

V International Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2017) 2017 年 9 月

⑦ 萩原世也,甲斐千尋,武富紳也,只野裕一,田中智行,弾塑性 SPH 法による塑性域挙動の解析,日本計算工学会計算工学講演会論文集,22,A-07-1,(2017),2017/5,埼玉

⑧ 甲斐千尋, <u>萩原世也</u>, 武富紳也, 只野裕一, 田中智行, 多直線近似構成則を用いた
 SPH 法による弾塑性解析, 日本機械学会第 29
 回計算力学講員会, No. 16-4, 045

2016/9 名古屋

(9)Seiva Hagihara, Tomohiro Shirahama, Shinya Taketomi, Yuichi Tadano and Satoyuki Tanaka, Smoothed particle hydrodynamics method for elastic-plastic analysis -Application of multi-linear constitutive equation-, The 7th International Conference on Computational Methods (ICCM2016), ID9172, (2016), 8 月

 10 萩原世也,白濱智大,甲斐千尋,武富紳 也,只野裕一,田中智行,SPH 法への多直線 近似弾塑性構成則の適用,日本計算工学会計 算工学講演会論文集,21,A-2-2,(2016), 2016/5,新潟

白濱智大, <u>萩原世也</u>, 武富紳也, 只野裕一, 田中智行, SPH 法による弾塑性解析
 日本機械学会第28回計算力学講演会, No. 15-

19,186,2015/11 横浜
① 萩原世也,白濱智大,武富紳也,只野裕一,田中智行,SPH 法による弾塑性構成則の検討,日本計算工学会計算工学講演会論文集,20,B-2-2,(2015)
2015/6 筑波

○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
 萩原 世也(HAGIHARA, Seiya)
 佐賀大学・工学系研究科・教授
 研究者番号:80198647

(2)研究分担者

永田 修一 (NAGATA, Shuichi)
 佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・
 教授
 研究者番号:30404205