

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03501

研究課題名(和文) HPCMを用いた大規模非線形数値造波水槽の研究開発

研究課題名(英文) Development of large scale numerical wave tank by the harmonic polynomial cell method

研究代表者

谷澤 克治 (Tanizawa, Katsuji)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70373420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：節点数が数万を超える大規模計算へ適用可能なHPCM(Harmonic Polynomial cell method)による境界値問題ソルバーを開発し、このソルバーを用いた二次元非線形数値造波水槽を試作して長時間の造波計算を実施したところ、安定した計算が可能であり、計算精度も確保出来ていることが確認できた。三次元数値造波水槽の開発にも挑んだが、効率の良い節点番号と要素番号の振り方、大振幅のRollやYaw等の回転運動を伴う自由浮体に柔軟に対応できる流体ボリュームの要素再分割法の開発に手間取り完成には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発したHPCMによる数値造波水槽はまだ二次元ではあるが時間領域で非線形な自由表面波動を平滑化することなく安定して計算することができた。本コードを三次元化することで実際の試験水槽を丸ごと数値シミュレーションすることが可能となり、船舶の造波抵抗や、波浪中抵抗増加をこれまで以上に高精度で計算することが出来るようになることを期待できる。また、自由表面波の非線形相互作用の研究ツールとしての活用も可能であり、フリーク波の発生メカニズムの解明等にも応用可能であろう。

研究成果の概要(英文)：We have developed a boundary value problem solver using HPCM (Harmonic Polynomial cell method) that can be applied to large-scale calculations with more than tens of thousands of nodes. As a result of long time fully nonlinear free surface wave simulation, it was confirmed that stable calculation was possible and the calculation accuracy was secured. We also tried to develop a three-dimensional numerical wave tank, but it took time to complete. Development of efficient reassignment of the node numbers and element numbers, and flexible subdivision of the fluid volume element to treat a free floating body with large-amplitude Roll and Yaw rotational motion are future subject.

研究分野：船舶工学

キーワード：HPCM 数値造波水槽

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ポテンシャル理論に基づく新しい数値計算法として Harmonic Polynomial Cell Method (HPCM)が提案され注目されている。HPCM は問題を境界積分方程式として解く境界要素法 (BEM)とは異なり、ラプラスやポアソンの方程式を満たす内挿関数を用いて境界値問題を解く手法であり、特異点の処理は不要であり、行列は疎で大規模計算に向いていると言われている。しかし、ソルバー部分はシンプルでも、境界形状に柔軟に対応できるセル分割技術等が難しく、大振幅動揺を伴う浮体運動等の解法として使うには、課題が多い。

2. 研究の目的

本研究は HPCM (Harmonic Polynomial Cell Method) を用い、非線形波の大規模計算が可能な数値造波水槽を開発することを目的とした。本研究では、HPCM を活用し、大型造波水槽の形状・寸法、造波機の形状・寸法・台数、造波および波吸収動作等をシミュレートすることで、実際の水槽に発生させた波浪場を計算機上に忠実に再現できる数値造波水槽の開発を目指した。

3. 研究の方法

HPCM による境界値問題の汎用ソルバーを開発するため、まずはソルバーを試作して、境界値問題が精度良く解ける事を確認するところから開始した。開発の大凡の流れは、①HPCM による2次元境界値問題のソルバーの試作、②構築した線形代数方程式を効率良く解くための最適な行列解法の選定、③並列化等による高速化の検討、④HPCM ソルバーを用いた数値造波水槽の試作と試計算、⑤大規模計算への適用とパフォーマンスの確認、である。

4. 研究成果

(1)HPCM による2次元境界値問題のソルバーの試作

Table 1 二次元 HP の係数整理表

	$\phi$	$\phi_x$	$\phi_y$	$\phi_{xx}$	$\phi_{yy}$
$b_1$	1	0	0	0	0
$b_2$	x	1	0	0	0
$b_3$	y	0	1	0	0
$b_4$	$x^2-y^2$	2x	-2y	2	-2
$b_5$	xy	y	x	0	0
$b_6$	$x^3-3xy^2$	$3(x^2-y^2)$	-6xy	6x	-6x
$b_7$	$3x^2y-y^3$	6xy	$3(x^2-y^2)$	6y	-6y
$b_8$	$x^4-6x^2y^2+y^4$	$4(x^2-3xy^2)$	$-4(3x^2y-y^3)$	$12(x^2-y^2)$	$-12(x^2-y^2)$

(1)式は HPCM で用いるラプラスの式  $\nabla^2 \phi = 0$  を満足する多項式 (Harmonic Polynomial) である。

$$\phi(x,y) = b_1 + b_2x + b_3y + b_4(x^2-y^2) + b_5xy + b_6(x^3-3xy^2) + b_7(3x^2y-y^3) + b_8(x^4-6x^2y^2+y^4) \quad (1)$$

この多項式、その一階微分、二階微分の係数毎の項を整理して Table 1 に示す。この表の右側二列の和はお互いに打ち消して 0 になっていることから、

この多項式がラプラスの式を満足していることが分かるであろう。HPCM は計算領域をセル分割し、各セルの内挿多項式の係数  $b_i$  を計算領域の境界条件を満たすように決定することで境界値問題を解く手法である。係数を解くための線形代数方程式はフルマトリックスにはならず、むしろ非常に疎で、計算時間と記憶容量を節約することが可能であり、大規模計算に適した計算法と言われている。3次元計算の場合でもラプラスの式を満たす3次元の内挿多項式が知られており、これを用いることができる。(1)式と、その一次微分を行列形式で記述すると(2)式が得られ、これを用いて境界での Neuman 型境界条件に対応する法線方向微分を表す(3)式が得られる。ここで、 $n_x, n_y$  は法線方向ベクトルである。

$$\begin{pmatrix} \phi \\ \phi_x \\ \phi_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2-y^2 & xy & x^3-3xy^2 & 3x^2y-y^3 & x^4-6x^2y^2+y^4 \\ 0 & 1 & 0 & 2x & y & 3(x^2-y^2) & 6xy & 4(x^2-3xy^2) \\ 0 & 0 & 1 & -2y & x & -6xy & 3(x^2-y^2) & -4(3x^2y-y^3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \phi_n = \phi_x n_x + \phi_y n_y \\ = [0 \ n_x \ n_y \ 2(xn_x-yn_y) \ yn_x+xn_y \ 3((x^2-y^2)n_x-2xy n_y) \\ \quad 3(2xy n_x+(x^2-y^2)n_y) \ 4(x(x^2-3y^2)n_x-y(3x^2-y^2)n_y)] \end{cases} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{pmatrix} \quad (3)$$

さて、ここで、Fig. 1 に示す一つのセルに着目して HPCM の適用方法について説明する。(1)式

から分かるように、この多項式の 8 つの係数  $b_1 \sim b_8$  を決定すれば、セル内の任意で点でのポテンシャル値とフラックスを計算することができる。係数は Fig.1 の周囲に配したローカルな節点 1 から 8 までの値を与えれば、それを境界条件として決定することができる。具体的には、節点座標を (1) 式に代入して 8 つの条件式から (4) 式の線形代数方程式を構築して解けば良い。

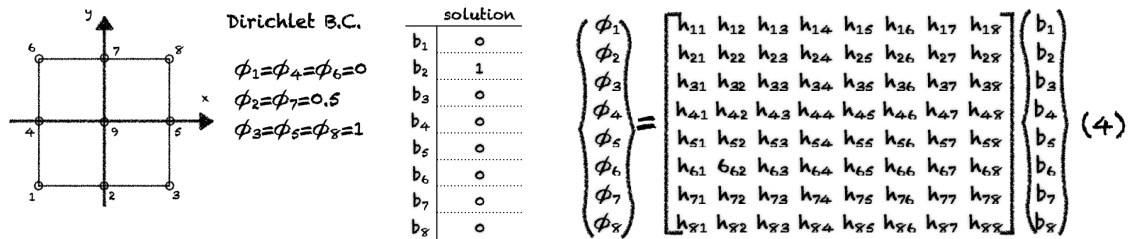


Fig.1 Example of the single cell solution with Dirichlet type boundary condition  
 Fig.1 に示した例では全ての節点においてポテンシャル値を与えて、x 軸方向の一様な勾配を持つ場を境界条件として解いた。結果は、係数  $b_2=1$ 、外は全て 0 となり  $\phi=x$  が解として得られた。

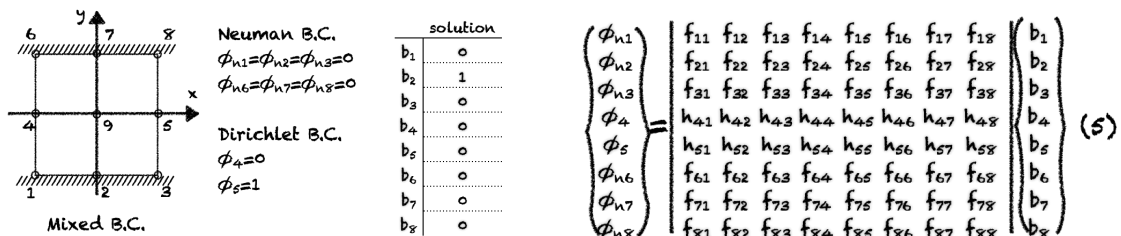


Fig.2 Example of the single cell solution with Mixed type boundary condition  
 続いて Fig.2 に節点 1,2,3,6,7,8 でフラックス値を、節点 4,5 にポテンシャル値を与える混合境界値型の例を示す。この場合も正解は  $\phi=x$  である。(2)式、(3)式を用いて(5)式の線形代数方程式が得られ、これを解いて係数  $b_2 = 1$ 、外は全て 0 の解が得られた。

以上はセル 1 つの最も簡単な例であるので、解けて当たり前である。そこで、次に複数のセルから構成される問題へと拡張する方法について説明する。Fig.3 に二つのセルで構成される問題を示す。この場合の未知数は 16 あり、条件数は節点 1,2,3,4,5,6,10,11,12,13,14,15 の 12 点の境界値と、節点 3,8,13 での連続の条件 3 つの合計 15 であり、1 条件不足するため解けないことが分かる。そこで、次に二つの重なりを持つセルで構成された問題について同様の考察を行うと、同じく未知数 16 に対し、節点 1,2,3,4,5,8,9,10,11,12 の 10 節点で与えられる境界値と 2,3,6,7,10,11 の 6 節点での連続の条件から 16 の条件式が得られ、解けることが分かる。さらに多くのセルから構成される問題についても同様に、HPC 法では重なりを持つセルで領域を分割する。

そこで次に、もう少し大きな領域への HPC 法の適用法について示す。Fig.4 に示す長方形領域の

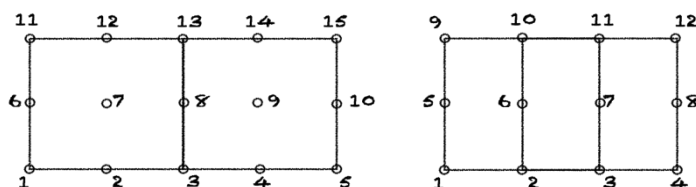


Fig.3 二つのセルで構成された境界

セル分割を例に説明すると、まず領域を  $(n-1) \times (m-1)$  の格子に分割し領域全体に  $nm$  個の節点を配置する。横方向のインデックス  $i$  と、縦方向のインデックス  $j$  を用いて領域全体の節点の通し番号  $ip$  と節点座標  $x(ip), y(ip)$  を割り振り、境界の法線方向ベクトルや境界条件等も  $ip$  をインデックスに用いて規定する。Table 2 (1) に示す節点情報がその一例である。

次にこの節点情報を用いてセルを定義する。Fig.4 に示すセルの通し番号を  $ic$  とし、それと縦

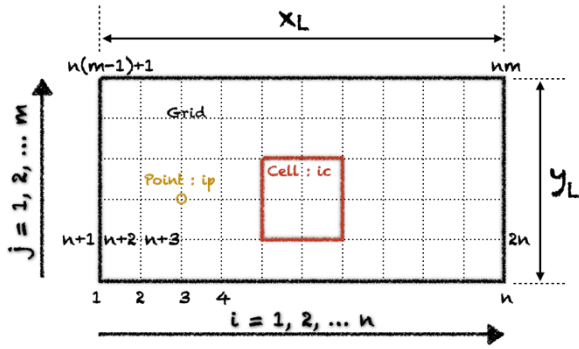


Fig.4 長方形領域のセル分割

横のインデックス  $i, j$  等との関係を Table 2(2) に示す。表中に図示すセル  $ic$  はローカルな節  
点横のインデックス  $i, j$  等との関係を Table 2(2)  
に示す。表中に図示すセル  $ic$  はローカルな節  
点番号  $k = 1 \sim 9$  を持ち、それと領域全体の節  
点の通し番号  $ip$  との紐付けを行う配列  $ctop(k, ic)$   
( $ic$ ) を作成することで、セル番号  $ic$  からセルを  
構成する節点  $ip$  への参照を容易に行えるよう  
にした。

Table 2 節点情報とセル情報

(1) Point information

Total number of points	$np = nm$
Serial number of a point	$ip = (j-1)n + i$
Coordinate of the point $ip$ (Origin is upper left corner)	$x(ip) = x_L(i-1)/(n-1)$ $y(ip) = y_L(j-1)/(m-1)$
Normal direction at the boundary point $ip$	$xn(ip), yn(ip)$
Boundary condition at the point $ip$	$bc(ip) = 0$ : Internal points $bc(ip) = 1$ : Dirichlet condition $bc(ip) = 2$ : Neuman condition

(2) Cell information

Total number of cells	$nc = (n-2)(m-2)$
Serial number of a cell	$ic = (j-1)(n-2) + i$
	$k : ctop(k, ic)$ 1: $ip = (j-1)n + i$ 2: $(j-1)n + i + 1$ 3: $(j-1)n + i + 2$ 4: $jn + i$ 5: $jn + i + 1$ 6: $(j+1)n + i$ 7: $(j+1)n + i + 1$ 8: $(j+1)n + i + 2$ 9: $jn + i + 2$

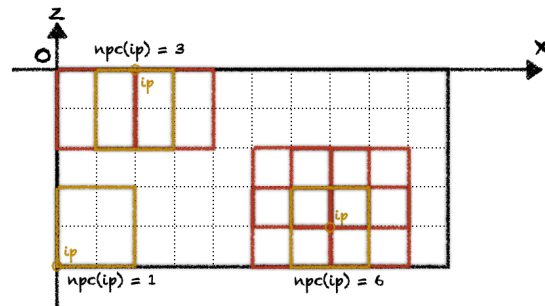
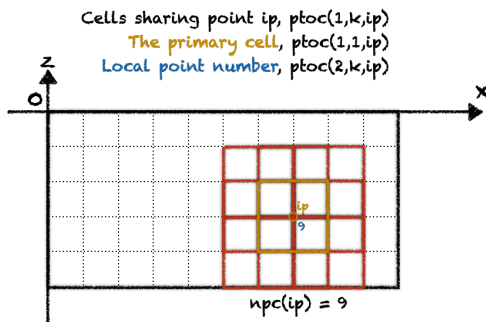
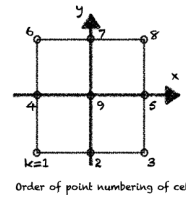


Fig.5 節点  $ip$  からそれを含むセルへの紐付け

一方、節点  $ip$  からその節点を含むセル  $ic$  への参照もプログラム中で頻繁に発生するため、節点からセルを紐点ける配列  $ptoc(1,k,ip)$  も作成する必要がある。Fig.5 に節点からセルへの参照について図示する。図中の  $npc(ip)$  は  $ip$  を含むセル数を格納する配列である。左の図は節点が境界から 2 格子以上領域内部にある場合で、 $ip$  を共有するセルは 9 つあるので、この場合は  $npc(ip)=9$  となる。これらのセルの内、中心に  $ip$  を持つセルをプライマリーセルと呼び、配列の先頭  $ptoc(1,1,ip)=ic$  として参照できるようにしている。節点  $ip$  からセル  $ic$  への紐付けでは、もう一つ頻繁に発生する参照事象がある。それは  $ip$  がセル  $ic$  のローカルな節点番号のどれに対応するのかの参照で、これについても同じ配列名で  $ptoc(2,k,ip)$  に情報を格納する仕様とした。Fig.5 の

右の図に、 $ip$  が境界から一格子内側にある場合についても示す。この場合は、 $npc(ip)=6$  である。 $ip$  が境界上にある場合や、境界の角にある場合は、 $npc(ip)=3, npc(ip)=1$  である。

続いてセル  $ic$  と重なりを持つ近隣セルへの紐付けについて Fig.6 に示す。図ではセル中心が境界から 2 格子以上内部にある場合を示している。この場合は重なりを持つセルの数は 8 であり、その数は配列  $nac(ic)$  に

Adjacent cells of cell  $ic$

Number of adjacent cells of cell $ic$	$nac(ic) = npc(ctop(9, ic)) - 1$
Serial number of adjacent cell	$ac(1, k, ic) = ptoc(1, k+1, ctop(9, ic))$
Local number of center point of cell $ic$	$ac(2, k, ic) = ptoc(2, k+1, ctop(9, ic))$

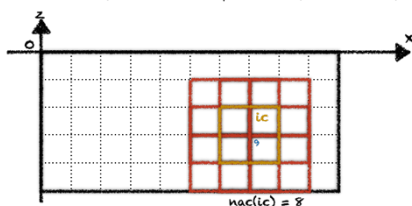


Fig.6 セル  $ic$  と重なりあう近隣セルへの紐付け

格納している。紐付けは配列  $ac(1,k,ic)$  を作成して行っているが、先に作成した配列  $ptoc$  と  $ctop$  を用いると、 $ac(1,k,ic)=ptoc(1,k+1,ctop(9,ic))$  の関係があり簡単に作成することができる。また、配列  $nac(ic)$  についても  $nac(ic)=npc(ctop(9,ic))-1$  の関係があり容易に作成できる。Fig.5 の右図のようにセル中心が境界から 1 格子内側にある場合、境界上にある場合、境界角にある場合についても同様に扱うことができるので、これ以上の説明は省略する。

HPC 法の開発では、ソルバーの開発には然程労力を要しないが、以上に述べた節点番号とセル番号の相互参照を行うデータ構造を構築するプログラム開発に多大な労力を要する。特に境界形状が複雑な場合、例えば波が巻いて自由表面形状を多価関数として扱う必要が生じたような場合、HPC 法の適用は原理的には可能であっても、セル分割と相互参照データ構造の構築には技術的な困難が伴う。また、浮体運動が大振幅横揺れする問題でも同様の事態が生じ、実用的な計算を長時間安定的に行うためには、計算中にセルの再分割が不可欠となり、その都度相互参照データ構造が破綻しないよう柔軟に再構築するアルゴリズムが必要となる。本研究では、結局このような相互参照データ構造の構築に多くの日時を割くこととなり、計画通りの成果を上げることが出来なかった。三次元問題の場合は更に複雑となるため、本科研費の 3 年間では実用的なプログラムを完成させることは出来なかったが、線形代数方程式を効率良く解くための最適な行列解法の選定や並列化による高速化など、ソルバー部分の開発は終わることが出来たので、次に HPC 法ソルバーを用いた計算例を示す。

## (2) HPC ソルバーを用いた数値造波水槽の作成と試算

開発した HPCM による 2 次元境界値問題のソルバーを用いて、水深 4.5m、長さ 80m の水槽内での造波シミュレーションを実施した。計算領域の寸法は、海上技術安全研究所の実海域再現水槽の長辺に合わせたもので、本水槽内での 2 次元造波のシミュレーションに対応している。領域は長さ方向に 320 分割、深さ方向に 18 分割し、節点総数 6099、総セル数 5423 の規模の計算である。水槽底と右側壁面では、 $\phi_n = 0$  の壁面境界条件、左側  $z$  軸上の検査面では進行波の解析を境界条件とし、自由表面上は非線形境界条件を与えて、混合オイラー・ラグランジュ法で自由表面の上下動の時間発展を追跡した。自由表面の追跡には 4th order Runge-Kutta 法を用い、時間刻みは波周期の 1/20 とした。自由表面の右端 5m の区間には自由表面条件に仮想的な減衰項を追加した減衰領域を設けて波の反射を防止した。Fig.7 に規則波の計算結果の一例を示す。左側の波高波長比 1/100 の線形波の造波では、極めて良好な造波と波の伝播、波のフロントでの挙動等がシミュレート出来ていることが確認できた。自由表面の計算は極めて安定で、平滑化等の安定化処理は一切不要であった。右側の波高 40cm の計算例では波形にはかなりの歪みが見られる。この原因は、入射波境界で線形波の解析解で境界条件を与えているため、そこでの境界条件のマッチングの誤差により高調波成分が混入しているためと考えられる。実海域再現水槽では波高 40cm の規則波の造波は出来ないが、HPC 法ではこの波高でも安定した数値計算が出来ており、

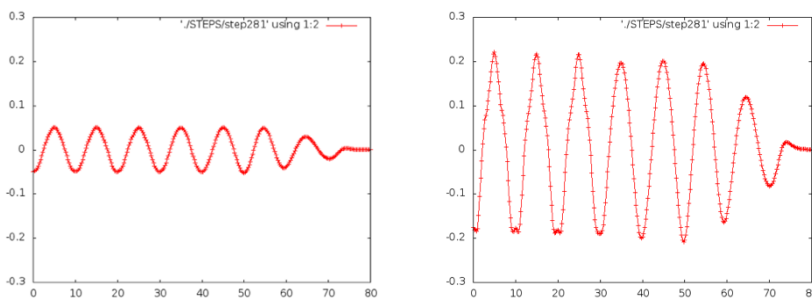


Fig.7 二次元数値造波水槽による造波シミュレーションの一例  
( $\lambda=10m$ , 左 :  $H_w=10cm$ , 右 :  $H_w=40cm$ )

計算法自体の精度や安定性は良好であることが示せた。HPC 法は計算法としての素性は良く、セルと節点との相互参照データ構造を再構築する柔軟なアルゴリズムなどの計算技術の開発が課題である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	黒田 貴子  (Kuroda Takako)  (00415811)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員   (82627)	
研究分担者	宝谷 英貴  (Houtani Hidetaka)  (30636808)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教   (12601)	