

マルチスケール海洋環境シミュレータの開発と実用化

九州大学 ○経塚 雄策

Development and practical application of a multi-scale simulator for
the ocean environmental predictions
Yusaku Kyojuka, Kyushu University

Abstract:

We have developed a numerical simulator called as the MEC model, which is utilized for the ocean environmental analysis of small-scale flow and diffusions around an artificial marine device to the meso-scale ocean phenomena near coastal seas. The source programs developed in this project are open to the public through the internet. Flow analysis around an artificial device is conducted by the three-dimensional approach in a small computational domain, while the hydrostatic approximation is used in the meso-scale domain as usual. Both approaches are nested to take the interactions between two domains. There are three kinds of the models in meso-scale analysis, the variable mesh model, the nested mesh model and the body fitted coordinate model. They are selected according to the geometry of the coastal sea. At the same time, we have developed preprocess applications to generate computational meshes for the MEC model and the post-process applications for the visualization of the numerical results. All these applications are also opened through internet. Moreover, we provide the MEC online, a homepage which enable general users to use and experience the MEC model from the mesh generation to the visualization of final results.

1. はじめに

人間活動の増大とともに自然環境の悪化はますます深刻となっている。地球温暖化の影響によって海水面の上昇が進行しつつあり、モルジブやキリバスなどの諸島では国土の大幅な減少によって国家の存亡が懸念されている。また、水温の上昇によって表層における温度成層が強くなると海水の鉛直混合が弱まり、それにより大気と海洋間の物質循環が阻害されて、生態系への影響が地球規模で大きくなる恐れがある。

一方、我が国の沿岸域の環境については、陸域における人間活動の結果として、長年にわたって水質汚染負荷が増大しており、多くの内湾において富栄養・過栄養状態となって水質汚染が恒常的となっている。富栄養化した海域では、植物プランクトンの異常増殖の結果、赤潮が頻発し、魚類に大打撃を与えるとともに、最終的には赤潮プランクトンの死骸の分解に水中の溶存酸素が消費されて貧酸素水塊を生成し、貝類などの底生生態系に重大な影響を与えることになる。

この対策として、夏場における海面表層での密度成層の解消を目的とした海洋環境改善装置がいくつか考案され、実海域実験も実施されているが、小さな内湾といっても空間的には数キロ以上の大きさがあり、それらの効果を定量的に評価するためには、装置の大きさに対応した数メートル以下の流れと拡散を純3次元問題として厳密に解くモデルと、広い海域に対応した数キロメートル以上の空間スケールの問題を静水圧近似によって効率的に解析できるモデルの両方が必要であり、それらを連立して一貫した新しいモデルが望まれている。また、水質や生態系を含む海洋環境問題は、一般に複雑で、かつ時間スケールも大きいので、流れと水温・塩分分布に関する物理モデルと生物・化学的な影響を考慮した物質循環モデルを結

合した数値環境モデルによって、長期の数値シミュレーションを行うことが望ましい。

本研究開発では、これらの背景から小スケールの流動・拡散現象から大きなスケールまでの解析および生態系を考慮した水質予測・評価を一貫して行うための数値シミュレータを開発するとともに、観測データとの比較によって信頼性を高め、実用化のために実施した研究成果について報告する。

2. 研究開発項目とその成果概要

図1は、本研究開発における「マルチスケール海洋環境シミュレータ」の全体計画概略である。メインの数値モデルは、小領域におけるフル3次元モデルと広域における3種類の静水圧近似モデルである。広域における3種類のモデルとは、メッシュのズーミング手法が異なっており、計算対象の地形に合わせて最適なものを選択するようになっている。また、それらのモデルを動かすためのプリ処理（メッシュ発生プログラム群）およびシミュレーション結果の可視化のためのポスト処理プログラム群から成っている。

以下、研究開発項目ごとにその成果の概要を記述する。

2.1 3次元モデルと静水圧近似モデルの結合によるハイブリッド計算法の実用化

五ヶ所湾および有明海において、夏季に密度流拡散装置を設置した場合のシミュレーションを行った。用いたモデルは、広域ではバリエブルメッシュモデルを用い、その中の1メッシュを3次元モデルによって計算する。密度流拡散装置は3次元モデルにおいて、表層と底層での吸い込みと密度躍層付近における吹き出しによって表現される。密度流拡散装置の流量を変化させて密度流の拡散状況および密度構造の変化などについて調査した。この結果を、既存の観測値および地球の自転効果を考慮するために水槽を回転させて実施した模型実験結果などと比較した。その結果、本数値シミュレーションは、観測および実験と多くの点で一致しており、流れおよび拡散に関して基本的に妥当な結果を示すことが判明した。密度流拡散装置の流量と期待される効果については、信頼性の高い結果を示すことが可能である。

2.2 バリエブル格子モデルによるマルチスケールシミュレータの実用化

現在、社会的にも大きな関心を呼んでいる有明海の環境変化の問題に本モデルを適用した。この数年間、海洋学会において一致した結論が得られていなかった近年の有明海の潮汐変化について明確な結論を出した。有明海の潮汐振幅の減少については、同湾内外の検潮所における近年の観測値から指摘されているが、その原因については、東シナ海全体の潮汐減少、平均水位の上昇、諫早湾干拓などの湾内地形変化による

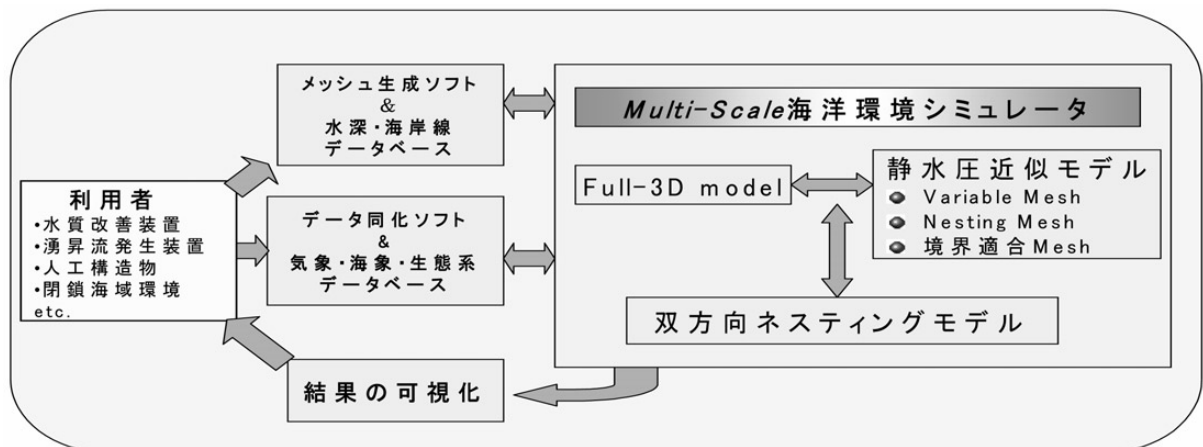


図1 マルチスケール海洋環境シミュレータの全体計画

影響が重なっており単純な問題ではないことがここ数年の複数の研究者による議論から明らかとなっていた。ある研究者は観測値のデータ解析から、別の研究者は数値シミュレーションによって、諫早湾干拓による大浦での潮汐減少量を求めたが、その数字は相当にかけ離れたものであった。本モデルにおいては、特に早崎瀬戸における潮汐波の伝播・反射が湾奥における潮汐振幅に大きな影響を与えることを観測値との比較によって指摘し、最終的に早崎瀬戸における最小メッシュサイズ150mの細かなメッシュシステムを用いたところ、観測値と良く一致した結果を得た。この結果によれば、諫早湾干拓による有明海全域での潮汐振幅変化は場所によって異なっており、大浦では減少、三角では変化なし、口之津では増大となって現れること、東シナ海の潮汐振幅の減少は湾内において同一減少率で影響するなどが明らかとなった。

2.3 ネスティングメッシュによるマルチスケールシミュレータの開発と実用化

本モデルのメッシュシステムは、計算領域を多段階の階層（ランク）構造とし、詳細な解析が必要な海域において最小メッシュを決めている。最小メッシュの海域から離れるほどメッシュサイズを大きくしていくが、本モデルでは、ランクが上がるたびにメッシュサイズは1/3あるいは1/5など奇数分の1で小さくするようにしている。バリエーションメッシュとの違いは、メッシュのアスペクト比を常に1程度に保つことができるので計算精度が良いこと、ズームインが必要な部分だけを任意に設定できるので計算効率が良いことなどが上げられる。このモデルの適用例としては、原子力発電所からの温排水の問題や、東京湾中央部における海水密度構造の再現数値実験などがあり、観測値との比較からその妥当性が検証されている。

2.4 物体適合座標（BFC）モデルによるマルチスケールシミュレータの開発と実用化

本モデルのメッシュシステムは、計算対象海域の複雑な地形を境界適合座標系によって単純な計算空間に写像し、精度の良い計算を可能とするものである。また、このモデルでは、支配方程式の離散化は、有限体積法によっているので流量および運動量の保存性が良いことも特徴となっており、計算例として取り上げた外洋と細い水路で結ばれた内湾（大村湾など）の潮流計算では精度の高い結果が得られた。また、計算領域を分割したり、追加したりすることが比較的簡単にできるので、パラレル計算への適用が容易であり、今後予想される計算機環境への適用性が高いものと思われる。

2.5 生態系モデルとの結合による水質シミュレーションの開発

沿岸域の環境を考える場合には、栄養塩濃度、赤潮、貧酸素水塊など水質関連の諸量の推定が重要である。東京湾、大阪湾、瀬戸内海などでは、観測データもかなりそろっており、浮遊生態系モデルに必要な各種パラメータの整備が進んでいる。本研究では、それらを踏まえながら、特に近年その海洋環境が問題となっている有明海における生態系モデルの構築を行った。有明海の海洋環境の特徴として上げられる最大5mを超える大きな潮位差と湾奥に広がる干潟上での移動境界を考慮した流動計算を行うとともに、近年研究が進んでいる干潟における水質浄化作用などを考慮した浮遊-底生生態系モデルを構築した。その上で、季節ごとの定常解について推定する定常水質シミュレーションと非定常なイベントに対応したリアルタイムシミュレーションの両方のアプローチで観測データとの比較を行い、おおむね良好な結果を得た。

2.6 水深データの自動作成プログラムの作成と整備（プリ処理）

実際の海域において数値シミュレーションを行うためには、海域の水深情報が必要である。最近では、インターネットや電子媒体によっても数値水深データが入手できるようになってきたが、本研究では、海図をスキャナーで読み取り、その等高線の情報から任意地点の水深を推定するプログラムを開発し、一部を

公開した。つぎに、計算対象の数値水深データがある場合にも、メッシュの数と大きさを変えて精度良くかつ高速で計算できるように、3次元モデル、バリエーション格子、ネスティング格子および曲線格子モデルに対する計算格子の自動作成プログラムを作成・整備した。それぞれのメッシュ系に対して、グリッド作成プログラム、地形データ補間プログラム、計算フラグ作成プログラムの3種類のプログラム群を開発・整備し、インターネット上で公開している。

2.7 シミュレーション結果のポスト処理の整備

海洋環境シミュレーターでは、物理、化学、生物に関する多変数についてそれらの時間発展を求めることが多いので、計算結果の出力量は一般に膨大なものとなる。ただし、全ての結果が必要かといえばそうではないので、実際にはとびとびの時間において出力し、正常に計算されているかをモニターしている。また、シミュレーション結果が観測データに照らして妥当なものであるかどうかについても、適当な時間間隔でチェックする必要があるため、これらの作業のために、シミュレーション結果の可視化処理は必須である。本研究では、ポスト処理用のソフトとしてTECPLOTとAVSを用いている。

また、外部からの一般ユーザーに対するサービスとして、インターネット上でMECモデルを体験的に使用してもらう目的で<http://www.tsumuji2.ga.eng.osaka-u.ac.jp/>に、簡略化した地形に対するメッシュの作り方や、潮流解析の実行および計算結果の可視化処理をオンラインで行うホームページを立ち上げた。

3. ネットワークの活用について

本研究開発では、各研究開発チーム間の打合せおよび各種コミュニケーションでは、インターネットなどを最大限に活用して相互の作業効率を高める努力を行った。

また、外部の一般ユーザーに対するサービスについては、図2のようなオンラインシステムを立ち上げて、MECモデルのメッシュ生成から、潮流計算の実行、結果の可視化までが体験的にできるように整備した。

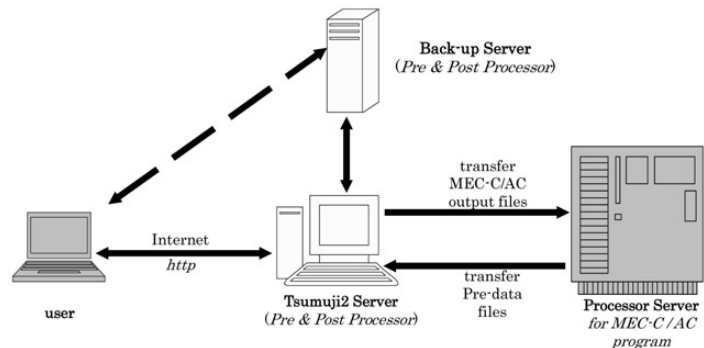


図2 MECオンラインシステム概略

4. まとめ

本研究では、小スケールの流動・拡散現象から大きなスケールまでの解析および生態系を考慮した水質予測・評価を一貫して行うための数値シミュレータを開発するためにMECモデルを拡張・発展させるとともにいくつかの応用例によってその有効性を示した。得られた成果を手短かにまとめると以下の様である。

- ・密度流拡散装置による夏場の海面表層の密度成層を解消と鉛直循環流の促進の試みについて、シミュレーションを実施し、その効果を確認するとともに、流量と効果について明確な指針を与えうること示した。
- ・近年の有明海的环境変化に関して未解決であった潮汐振幅変化の問題に決着をつけた。東シナ海全域における潮汐振幅の減少と有明海内部の地形変化による影響が重なりあっており、諫早湾干拓工事による影響は場所によって異なる。
- ・ネスティングメッシュモデル、BFCメッシュモデル、スペクトルメッシュモデル、有限要素法モデルな

- どいくつかのモデルを開発した。それらは、計算海域の地形に合わせて最適なものに選択可能である。
- ・インターネット上に「MECオンライン」ホームページを立ち上げ、MECモデルおよび周辺プログラムを公開するとともに、一般ユーザーがメッシュ発生から結果の可視化まで一連の作業を体験できるようにした。
 - ・メッシュ発生に関するプリ処理および計算結果の可視化に関するポスト処理について、プログラム群を整備しそれらを公開した。
 - ・毎年、MECモデルワークショップを開催するとともに、MECモデルの使用法に関する講習会も行った。

5. 研究開発実施体制

代表研究者 九州大学 大学院総合理工学研究院 経塚 雄策

研究分担

研究開発題目：バリエブル格子モデルの高精度化、生態系モデルの開発

研究項目：バリエブル格子モデルの高精度化

研究項目：有明海における生態系モデルの高精度化

| | |
|-----------------|------------------------|
| 九州大学大学院総合理工学研究院 | 経塚 雄策 |
| 九州大学大学院総合理工学研究院 | 濱田 孝治 |
| 科学技術振興機構 研究員 | 山口 創一 (現在、九州大学大学院博士課程) |

研究開発項目：有限要素法による高精度の流動・拡散計算法の開発

研究項目：スペクトル要素を使った3D-FEMモデルの開発

| | |
|--------------|------|
| 科学技術振興機構 研究員 | 余 志興 |
|--------------|------|

研究開発題目：マルチスケール解析における3Dモデルの開発と渦輸送、乱流モデルの検討

研究開発項目：3Dモデルによる海洋乱流再現法の検討

研究開発項目：乱流モデルの検討

研究開発項目：陰解法化による3Dモデルの高速化

| | |
|--------------|--------------------------|
| 東京大学大学院工学研究科 | 佐藤 徹 (現在、東京大学新領域創成科学研究科) |
| 科学技術振興機構 研究員 | 鄭 魯澤 (現在、韓国船舶海洋工学研究所) |

研究開発題目：ネスティングによるFull-3D領域と静水圧領域の接合手法の開発

研究開発項目：物質移動に関する高精度化

研究開発項目：観測データとの連携に関する検討

| | |
|-------------------|-------|
| 東京大学大学院新領域創成科学研究科 | 木下 嗣基 |
| 東京大学大学院新領域創成科学研究科 | 多部田 茂 |

研究開発題目：水深データの自動作成プログラムの開発および海洋環境シミュレータの応用

研究開発項目：海洋環境シミュレータの大阪湾への応用

研究開発項目：海底地形、海岸地形等の観測データの解析と入力データへの変換

| | |
|----------------|-------|
| 大阪府立大学大学院工学研究科 | 馬場 信弘 |
|----------------|-------|

研究開発題目：曲線格子モデルの適用及びネットワークを用いた可視化手法

研究開発項目：曲線ブロック格子モデルの開発

研究開発項目：ネットワークを用いた可視化技術の構築

大阪大学大学院工学研究科

戸田 保幸

科学技術振興機構 研究員

Erwandi

研究開発題目：ネットワークシステムの構築および周辺支援ソフトの開発

研究開発項目：海図からのメッシュ発生システムの開発

研究開発項目：公開環境情報活用データベース整備

(株)三井造船昭島研究所 事業統括部

中川 寛之

(株)三井造船昭島研究所 事業統括部

大森 英行