沖縄海域における 流況シミュレーションシステムの開発

白木 喜章¹・片山 理恵²・柴木 秀之³・
普天間 朝好⁴・桑江 隆⁴・崎枝 正輝⁴

¹ (株) エコー技術本部防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
E-mail: shiraki@ecoh.co.jp

² (株) エコー技術本部防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
E-mail: katayama@ecoh.co.jp

³ フェロー会員 (株) エコー技術本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
E-mail: shibaki@ecoh.co.jp

⁴ 沖縄県環境部環境政策課 (〒900-8570 沖縄県那覇市泉崎 1-2-2)

沖縄県では、2012年から2014年の3カ年にわたる流況モデルの開発プロジェクトにより、外洋域からサンゴ礁海域までを一体的に計算できる流況シミュレーションモデルを開発した。さらに、この流況モデルにおける外力条件の設定から計算実行、計算結果の描画までの一連の動作を、パーソナルコンピュータによる簡易なマウス操作で実行できるようにシステム化を行い汎用化を目指している。

本報告では、このシステムの機能や計算結果を紹介するとともに、システムによる現地観測結果を対象にした再現計算結果について示す。

Key Words : numerical simulation, simulation system, flow model, coral reef area, Okinawa

1. はじめに

沿岸海域における流動や水質、生態系といった環境要素の再現・予測或いは人為的な開発事業による影響評価を実施する上で、数値シミュレーションは欠かせない手法の一つになっている。とくに、近年の海域保全意識の向上やシミュレーション技術の向上、計算機の発達に伴い、様々なシミュレーションモデルが開発されている。

本報告で対象とする沖縄県もその例外ではなく、2012年から2014年の3カ年にわたり、沖縄海域に適用可能な流況シミュレーションモデルの開発プロジェクトが実施された¹⁾。開発された流況シミュレーションモデルは、潮汐、気象、河川水流入、波浪、海流といったあらゆる外力を考慮でき、開放的な外洋域からサンゴ礁で形成される沿岸域までを一体的に計算できる特徴を持つ²⁾。さらに、プロジェクトでは、プログラム言語の専門知識を有せずとも、その流況シミュレーションをパーソナルコンピュータにおける簡易なマウス操作により実行可能なシミュレーションシステムを構築し、開発した流況モデルの汎用化を目指している。

本報告は、このシステムが有する機能や実海域に適用した場合の計算結果および再現結果について紹介するものである。

2. 流況シミュレーションシステム

(1) システムの全体構成

流況シミュレーションシステムの全体構成を図-1に示す。システムは、風・気圧、波浪、流況の3つのサブシステムで構成されており、サブシステム間において、風・気圧データや波浪応力を受け渡す。それぞれのサブシステムに描画機能を組み込んでおり、作成するデータや計算結果を、随時、描画して視覚的に確認することができる。

図-2にシステムの起動画面を示す。起動画面には、沖縄本島から先島諸島までの地図が表示され、その地図上に、システムとして登録されている海域がプロットされている。画面右に3つのサブシステムの選択欄があり、ユーザーは、シミュレーションの対象海域を選択し、そ

図-2 システムの起動画面
(海域とサブシステムの選択)

それぞれのサブシステムを実行する。本システムでは、デフォルトとして、那覇港、浦添海岸、白保海岸の3海域が登録されている。これらの海域は、開発プロジェクトにおけるモデル海域であり、流況モデルの開発と同時に現地観測が実施されている（金城ほか³⁾）。なお、他の海域についても新たにシステムに追加することができ、格子データおよび水深データを所定の書式で作成して登録することで、実行することが可能である。

(2) サブシステムの特徴

a) 風・気圧システム

風・気圧システムにおいて、シミュレーションを実行する期間を設定し、波浪システム或いは流況システムに入力するための風・気圧データを作成する。データの作成に際しては、気象庁 GPV (Grid Point Value) データを用いる設定とユーザーによる任意の風向・風速設定のいずれかを選択できる (図-3)。

ユーザーによる任意の風向・風速設定では、さらに期間中一様・一定の風向・風速とする手動設定、或いは、過去の風向・風速データの統計解析結果に基づく設定のいずれかを選択する。統計解析には近隣の気象台における過去5カ年の実測値を用いており、対象期間における

図-3 風・気圧データの設定画面
(赤枠は台風処理に関する設定箇所)

図-4 白保海岸を対象とした台風来襲時の風向・風速分布
(上段:「処理なし」、下段:「位置合わせ内挿」)

統計的な毎時の風向変動を抽出する。風速については平均値と標準偏差から、「強い」、「普通」、「弱い」の3つを算出する。なお、ユーザーによる任意の風向・風速設定を用いる場合、気圧は一様・一定の設定とし、流況シミュレーションにおける気圧の効果は実質考慮されない。

気象庁 GPV データ (3 時間或いは6 時間間隔) を用いる設定では、広範囲の気象データセットから、本システムによる対象計算範囲の切り取りと、対象期間の毎時デ

ータへの時間補間が内部で自動的に処理される。これにより、現実に近い風・気圧の空間分布とその変動が波浪システム或いは流況システムに入力される。

また、台風来襲時の計算を行う場合、図-3 赤枠に示すように複数の処理を選択する機能を組み込んでいる。「処理なし」は、毎時のデータを単純補間により算出するもので、通常はこの方法により処理される。ただし、台風のように時間変動が大きい風・気圧場を対象にすると、単純補間により台風が平滑化されてしまう問題がある。その問題を解決するのが「位置合わせ内挿データによるデータ入替」である。この処理は、該当する台風のベストトラックデータを基に、補間する前後の台風の位置を重ねて補間する方法である（金城ほか⁴⁾）。図-4 に、「処理なし」および「位置合わせ内挿」による風向・風速分布を示す。位置合わせ内挿を用いることで、台風の平滑化を防ぐことができる。

「台風モデルの計算結果によるデータ入替」は、台風番号から台風の気圧勾配と半径を抽出し、傾度風計算による風向・風速を挿入する方法である。簡易的な計算であり、実際の台風よりも風速が強くなる傾向がある。台風の影響をより強調したい場合にはこの処理を選択する。

b) 波浪システム

風・気圧システムで作成する風向・風速データを外力として波浪を計算する。波浪モデルには、オランダの Deltares 研究所によって開発・公開されている SWAN (Simulating Waves Nearshore) を採用している。SWAN は浅海から極浅海域での波浪の様々な特性を考慮した第三代波浪推算モデルであり、各計算格子点上で波浪の方向スペクトルを計算するスペクトル法を用いている。また、砕波によるエネルギー消散として、白波砕波と地形性砕波が組み込まれている。白波砕波のエネルギー消散には Hasselmann⁵⁾の白波理論に基づきさらに改良されたものが、地形性砕波によるエネルギー消散項には Battjes and Janssen⁶⁾が採用されている。システムでは、図-5 に示す画面により、対象とする波浪の周波数、方向分割数、砕波係数等を自由に設定できる。

サンゴ礁域では、潮汐に伴う礁縁部の露出度によって波の伝播や砕波の程度が変化する。波浪システムでは、ユーザーが指定する海域の代表地点における調和定数を用いて、対象期間の潮汐を内部で推算し、波浪計算に入力する。これにより、時々刻々変化する礁縁部の露出度とそれによる波の伝播や砕波の変化を計算する。代表地点における調和定数は、Matsumoto et al.⁷⁾による値を用いている。以上により浅海波浪推算および波浪変形計算を行い、波高・周期・波向・波浪応力を出力する（図-6）。

c) 流況システム

流況システムには、白木ほか²⁾による流況モデルを組み込んでおり、風・気圧システムおよび波浪システムに

図-5 波浪システムの条件設定画面

図-6 那覇港を対象とした波高・波向分布

よる風向・風速、気圧、波向、波浪応力を外力として入力し、吹送流や海浜流を計算する。その他の外力である、潮汐、海面熱収支、河川水流入、外洋条件（海流等）については、流況システム内で設定する。

潮汐は、Matsumoto et al.⁷⁾による調和定数から推算する対象期間の潮位変動を開境界に与える。同時に、海流等の影響を取り込むために、(独) 海洋研究開発機構が開発・公開されている JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) データ⁸⁾による水位、流速、水温、塩分を開境界において 1-way ネスティングにより入力する。システムでは、上記の開境界における条件を、開境界の座標と対象期間の指定のみで設定できる。

図-7 に、海面熱収支や河川水流入に関する設定画面を示す。海面熱収支の設定は、全天日射量や気温等の毎時

図-7 海面熱収支、河川流量等の設定画面

データを直接入力する方法、或いは、「晴天」、「曇り」、「選択なし(平均)」といった大まかな天候で設定する方法のいずれかを選択する。天候による設定は、近隣の気象台における過去5ヵ年の熱収支に関する実測値を用いた統計解析により平均値と標準偏差から算出しており、対象期間の統計的な熱収支が設定される。

河川水流入についても、毎時の流量データを入力する方法、或いは、「出水時」、「平均値」、「平常時」の統計的な流量を設定する方法を選択する。さらに、ユーザーによる一様・一定流量の設定も可能である。なお、河川を考慮しない場合、この設定は不要となる。

その他、気圧効果や波浪応力の入力の有無を選択する機能がある。とくに、波浪の影響が小さい海域では、波浪応力を入力しない設定にすることで、波浪システムの実行をせずに流況システムを実行できるため、計算時間の短縮を図ることができる。

流況モデルの鉛直座標には、シグマ座標系とZ座標系を組合せたハイブリッド座標系(図-8)を採用している。対象海域に河川が隣接しており、密度流や低塩分水の広がり、或いは、塩分成層を再現する場合、浅海域でも多層化できるシグマ座標系が有利となる。一方、リーフ斜面等の水深勾配が極端に大きい箇所はシグマ座標系では計算が不安定になりやすいため、サンゴ礁外側から外洋にかけてはZ座標系が適している。ただし、Z座標系は

図-8 流況システムの鉛直座標系

図-9 流況システムによる那覇港の流速ベクトル分布

浅海域では鉛直層数が減るため、密度流や成層を再現するのが困難となる。よって、図-8のように上部にシグマ座標系、下部にZ座標系を組み合わせる。これにより両者の欠点を互いに補うことができ、サンゴ礁域から外洋域までを一体的に計算することが可能になる。なお、上部のシグマ座標系には、移動境界の機能を持たせており、潮汐変動に伴う礁嶺周辺等の浅海域における冠水・干出を表現できるようにしている。流況システムでは、層分割数や層厚ならびにシグマ座標系を用いる深度を自由に設定できる。水平格子については、正方格子による2-way

図-10 流況システムによる浦添海岸の流速ベクトル分布

ネスティング法を採用しており、4 領域までの接続計算が可能である。

図-9に那覇港を対象にした流況システムによる流速ベクトル分布を示す。外洋域の黒潮および港内の潮流を表現している。図-10は浦添海岸における流速ベクトル分布である。礁縁部における砕波による波の打込みにより礁内で流れが生じる。このように、沖縄海域の流れを再現するには、外洋域の海流から、沿岸域の潮流や波浪等の外力を考慮し、それらを一体的に扱う比較的难度の高い流況シミュレーションが必要である。本システムは、そのような流況シミュレーションをマウス操作により実行可能にするものである。

3. システムの再現性について

流況モデルの再現検証は、白木ほか²⁾により実施されており、サンゴ礁内外の水位変動や潮流および海浜流、ならびに外洋における海流の再現性について示されている。ここでは、金城ほか³⁾による沖縄海域における現地観測結果を対象に、新たに本システムにより計算した結果について示す。

(1) 白保海岸礁内における流れの季節変動

金城ほか³⁾は、白保海岸礁内における流れの季節変動を明らかにしており、夏季は南方からの波の打込みにより、礁内において東西に分岐する流れが生じる。一方、冬季は西方からの波の打込みにより、礁内では西向きの流れが生じる。図-11に本システムによる夏季と冬季の白保海岸を対象にした計算結果を示す。現地観測による礁内での流れの傾向がシステムによって再現されていることがわかる。

図-11 流況システムによる夏季（上段）および冬季（下段）の白保海岸の流速ベクトル分布

図-12 那覇港沖における夏季の水温変動

（上段：観測結果，下段：計算結果）

(2) 那覇港沖における夏季の水温変動

金城ほか³⁾による水温計係留観測により、夏季の那覇港沖では、潮汐に伴い中層から下層にかけて周期的な水温変動が捉えられた。この水温変動は数時間で最大およそ 4°C であり、観測期間中において常に観測された。周波数解析により、半日周期の第1モードの内部潮汐に伴う水温変動であることが明らかにされている。図-12に、現地観測および本システムによる那覇港沖の夏季の水温時系列を示す。観測にみられる中層、下層における水温の短周期変動をシステムで再現できていることがみ

そのため、沖縄県を中心に講習会等を企画し、段階的な普及を目指している。

謝辞：流況モデルおよびシステムの開発にあたり、津嘉山正光琉球大学名誉教授、灘岡和夫東京工業大学教授、仲座栄三琉球大学教授、磯辺篤彦九州大学教授に多大なご助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) サンゴ地形に適した潮流シミュレーションモデル構築事業 報告書 (平成 24～26 年度, 沖縄県)
- 2) 白木喜章, 鈴山勝之, 井手喜彦, 柴木秀之, 金城賢, 新城光雄, 古川哲己: 沖縄海域に適用可能な流動シミュレーションモデルの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.I_397-I_402, 2015.
- 3) 金城賢, 古川哲己, 白木喜章, 柴木秀之: 沖縄海域の現地観測にみられる流動特性について, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 70, No.2, pp.I_175-I_180, 2014.
- 4) 金城賢, 古川哲己, 柴木秀之, 鈴山勝之: 沖縄諸島及び先島諸島における高精度波浪推定手法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 70, No.2, pp.I_181-I_186, 2014.
- 5) Hasselmann, K.: On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, *Bound.-Layer Meteor.*, Vol.126, pp.107-127, 1974.
- 6) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc.16th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 569-587, 1978.
- 7) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model : A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Vol.56, pp.567-581, 2000.
- 8) Miyazawa, Y. and T. Yamagata: The JCOPE ocean forecast system, First ARGO Science Workshop, November 12-14, 2003, Tokyo, Japan.
<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jcope/htdocs/topics/>

(2017.2.2 受付)

図-13 流況システムによる那覇港周辺の夏季中層の水温分布
(図中黒丸は水温観測点)

てとれる。図-13 はシステムによる夏季の那覇港周辺の中層水温分布である。那覇港沖において水温が低下している箇所があり、観測にみられた水温変動の空間分布を確認することができる。

4. おわりに

沖縄海域の流況モデルの汎用化を目指し、気象・波浪・流況の計算機能をパーソナルコンピュータによる簡易なマウス操作で実行できるシミュレーションシステムを開発した。これにより、プログラム言語の専門知識を有しない事業者も、自らシミュレーションを実行し、港湾整備等による環境影響評価を行うことが可能になる。

本システムは無料で配布されており、沖縄県のホームページ (http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/seisaku/hyok_a/ryuukyoku/top.html) において所定の手続きを踏むことで入手できる。また、システムの運用にあたり、条件設定や計算される結果の信頼性確保には経験が必要である。

DEVELOPMENT OF FLOW SIMULATION MODEL APPLICABLE TO THE SEA AROUND OKINAWA

Yoshiaki SHIRAKI, Rie KATAYAMA, Hidenori SHIBAKI, Tomoyoshi FUTENMA,
Takashi KUWAE and Masaki SAKIEDA

A numerical flow model applicable to the Okinawa sea was developed on the Okinawa project 2012 to 2014. This numerical model simulates the flow fields at offshore to coral coastal areas. In addition, this model is systemized to run easily by mouse operation on the personal computer.

This report shows some functions and performances of the system and shows the validation by observational data.