

港湾事業における波浪推算の活用

川口 浩二

独立行政法人 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究チーム

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

港湾構造物の設計や港内静穏度解析などの港湾事業において、波浪は最も基本的かつ重要な外力条件である。現在、日本沿岸では、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）によって、波浪観測データの蓄積がなされ、港湾事業などに役立っている。一方、近年、波浪推算の高度化が進み、波浪推算を実施すれば任意の海域や地点、任意の期間における波浪情報が比較的容易に得られる。この他にも波浪推算には波浪観測にない多くのメリットを有しており、港湾事業において有用であると考えられる。本論文では、港湾事業における波浪推算の活用について報告する。

キーワード 港湾事業, 波浪情報, 波浪観測, 波浪推算, 波浪データベース

1. はじめに

港湾構造物の設計や港内静穏度解析などの港湾事業において、波浪は最も基本的かつ重要な外力条件である。我が国では、1970年代から波浪の定常観測が始まり、現在、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）によって、波浪観測データの蓄積がなされ、それらのデータは港湾事業などに役立っている。しかしながら、波浪観測の実施・維持には多額の費用が必要である。さらに、ある海域の波浪特性を観測データのみで明らかにするには長期間の観測が必要である。一方、波浪推算では、時々刻々と変化する風場が与えられるという前提があるものの、任意の海域や地点、任意の期間における波浪情報が比較的容易に得られる。さらに、現在、日本を含めた世界各国の気象機関から過去に遡った長期間の気象に関する客観解析値（気象GPVと記す）が提供されており、それらのデータを用いれば、過去50年程度までに遡った波浪推算も可能となってきている。

このように、波浪推算には波浪観測にない多くのメリットを有しており、港湾事業において波浪推算を活用することは有用であると考えられる。

2. 波浪観測と波浪推算

港湾事業における諸課題に必要となる波浪情報の入手方法としては、観測による方法（波浪観測）と数値的な方

法（波浪推算）がある。前者については、1970年代に当時の運輸省（現国土交通省）港湾局を中心に、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス；図-1参照）によって、日本沿岸における波浪の定常観測が開始された。その後、次第に波浪観測地点数が増えたり、観測頻度が2時間に1回から連続になるなど、波浪観測網の高度化が進んだ。ナウファスでは単なる有義波諸元だけに留まらず、波浪のスペクトル情報、周期帯別波高なども提供されており²⁾、近年では、GPS波浪計による大水深海域での波浪・風観測も始まっている。GPS波浪計とは、GPSセンサーを搭載したGPSブイを海上に浮かべ、海面の変動と共に

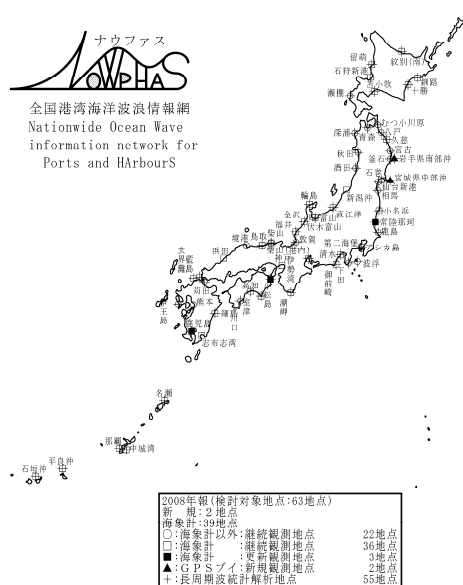


図-1 ナウファス波浪観測網

上下動するGPSブイの動きをGPS衛星によって計測するものであり、水深の影響が少ない沖合での気象・海象観測が可能となっている。現在、ナウファスによる波浪観測データは、ほぼリアルタイムでWebサイト¹⁾上でも公開されている。

一方、後者については、波浪推算モデルや波浪推算に必要な風データの高度化・高精度化、計算機の計算能力向上などに伴い、以前に比べて、手軽に波浪推算が実施できる環境が整ってきている。波浪推算で得られる波浪情報は、①データの欠測がない、②過去（追算）から未来（予測）に渡って任意の期間・時間間隔の波浪情報が短期間で得られる、③空間的に広範囲かつ高分解能な波浪情報が得られる、④コスト的に相当有利であるなどの長所がある。

3. 第3世代波浪推算モデル

現在、波浪の不規則性を直接的に表現したスペクトルの概念を導入したスペクトル法と呼ばれる波浪推算法が主に用いられ、特に波浪の非線形効果（非線形相互作用）を出来るだけ正確に取り入れて波浪推算を行う第3世代のスペクトル法へ移行している。第3世代モデルの代表にWAM³⁴⁾と呼ばれる波浪推算モデルがあり、港湾局ではWAMを標準的な波浪推算モデルとして採用されている。図-2は1998年1月の1ヶ月間の長崎県福江島における波浪観測値とWAMによる推算値の時系列比較図の一例である。図-3は福島県いわき沖で観測された観測値と推算値の方向スペクトル（波浪のエネルギー分布）を比較した一例である。これらの図に見られるように、WAMによる波浪推算は有義波高・有義波周期などのパラメータのみならず、方向スペクトルも精度良く推算できることが分かる。なお、WAMの詳細については、WAMDIグループ³⁴⁾、橋本ら⁵⁾などを参照されたい。

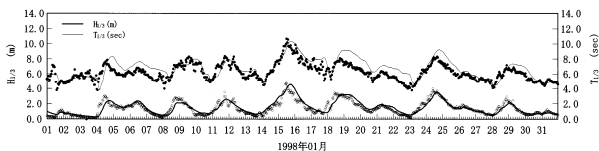


図-2 波浪観測値と推算値の比較(実線：推算値)

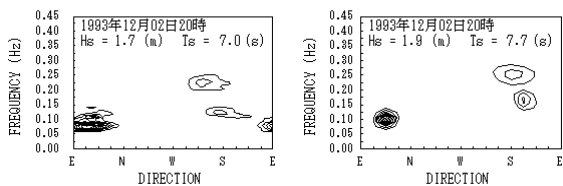


図-3 方向スペクトルの比較
(左図；観測値，右図；第3世代モデルWAM)

4. 港湾事業における波浪推算の活用

(1) 港湾事業における波浪推算の活用の現状

波浪は海難や災害を引き起こす要因の1つとなるため、海の利用や海での様々な人間活動（漁業、船舶航行、港湾荷役、海洋レクリエーション等）にとって必要かつ重要な情報である。前述のように日本周辺海域では、ナウファスによる波浪の定常観測が行われ、波浪データが日々蓄積されている。これらの波浪情報は、港湾・海岸・空港事業の計画・設計・施工など様々な沿岸域の開発・利用・防災に活用されているが、その観測点は沿岸域に集中しており、しかも、観測期間が一番長い地点でもせいぜい40年程度である。したがって、台風域内の波浪分布、広い海洋全域における波浪の性質、特定海域における波浪の極値あるいは設計波（設計沖波）などを明らかにするには、必ずしも観測データだけでは十分でない。そのため、波浪推算に基づく波浪情報も同時に用いて検討せざるを得ない。

現在、実務で用いられる波浪情報は観測によるものが中心であるが、波浪観測の実施・維持には多額の費用が必要であり、経済的な制約などから、今後、波浪観測を新規で開始したり、現在の波浪観測を継続し続けることが困難となる場合も想定しておかねばならない。一方、前述のように波浪推算には波浪観測に無い多くの長所を有しており、波浪推算で得られる波浪情報を実務で活用する意義は非常に大きい。しかしながら、実務における波浪推算は、主に高波を対象とした特定の気象擾乱に対して限定的に用いられるのみに留まっており、波浪推算の持つポテンシャルを活かし切れていないのが現状である。これらを踏まえると、今後、港湾事業において波浪推算をこれまで以上に有効活用するためには、波浪推算の更なる精度向上、波浪推算結果をいつでも活用できる体制を整えておくことが重要である。

(2) 日本沿岸波浪推算処理解析システム

波浪推算で得られる波浪情報を実務で利用する際、その都度、波浪推算を実施しては効率が悪い。そのため、観測データを日々蓄積するように、波浪推算結果もデータベースとして蓄積して整備しておけば、検討を行う際にデータベースから必要な情報を取り出して活用できる。このような考えから波浪推算データベースを構築した。さらに、実際に実務担当者が波浪推算データベースを活用する際、適切なGUI(Graphical User Interface)があれば波浪推算や波浪に関する各種統計解析に関して経験の浅い技術者にとっても非常に便利である。このような波浪推算結果の実務の利用を踏まえ、日本沿岸波浪推算処理解析システム（以下では、本解析システムと記す）を開発した。本解析システムは、最先端の波浪推算技術を波浪推算の専門知識を持たない実務担当者にも操作し易いように、GUIを通じて利用できるように開発したシ

システムであり、以下に示す3つのシステムで構成される(図4参照)。

a) 海上風推算システム

波浪推算を行う際に必要な海上風の推算を行うシステムの総称である。傾度風モデル、台風モデル、ハイブリッドモデルおよび局地気象モデルなどによる風推算が可能である。波浪推算の精度は波浪推算に用いる海上風の精度に大きく依存することから、外洋(沿岸域)の波浪推算では、気象庁、ECMWFやNECPなどから提供される海上風を直接与えて実施することも可能であるが、陸上地形の影響を大きく受ける内湾域を対象に波浪推算を実施するには精度が十分ではない。そのため、本システムによって、精度の高い海上風の推算を行う。

b) 高精度波浪推算システム

気象庁等から提供されている海上風や上記a)で得られた海上風等を用いて、波浪推算を実施するシステムである。本システムの基本は第3世代モデルWAMであるが、各種の改良を施している。特に、内湾域を対象とした波浪推算では、波浪スペクトルの周波数範囲を高周波数側に拡張するなどの改良を行っている。その結果、深海域から内湾域において高波浪時はもちろん低波浪も含めた常時波浪に関して精度の高い推算が可能となった。

c) 波浪推算データベース解析表示システム

上記b)で得られた波浪推算結果を波浪推算データベースとして蓄積・整備し、これを基に各種統計処理や表示機能を持たせたシステムである。後述のように、現システムでは対象海域全域における各種波浪パラメータの空間分布の時系列変化、対象海域の特定地点における波浪推算値および方向スペクトル(ただし、波浪推算実施時に方向スペクトルデータを保存した地点に限定)の時系列、各種波浪統計処理機能及び統計表の表示機能を有している。通常の実務では、上記機能を利用すれば実用上はほぼ問題ないと考えられるが、今後、ユーザからの要望等があれば機能拡張を図り、より便利なシステムに改良していくことは可能である。なお、本システムは、波浪推算結果を便利なGUIを通じて利用するためのシステムであるが、将来的には、推算結果を利用するのみならず、海上風の推算や波浪推算そのものも共通のGUI上で実行できればより便利であると考えられる。

(3) 日本沿岸波浪推算処理解析システムの表示例

波浪推算データベースを基に本解析システムの処理・解析の出力結果の一例を示す。本解析システムを実行する際には、メイン画面(図5参照)で対象海域を指定し、①対象地点、②対象期間(出力時間間隔)、③処理内容をユーザが指定する必要がある。本解析システムでは、解析結果を画面表示・印刷するだけでなく、同時に処理結果を別途ファイルにも保存される。

a) 有義波諸元の平面分布および時系列変化

本解析システム上で対象海域・対象地点および対象期

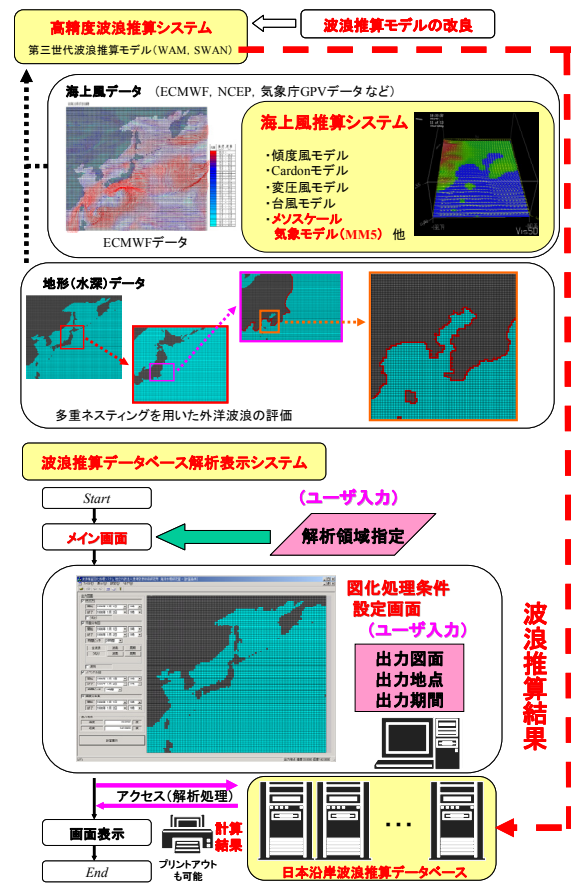


図4 日本沿岸波浪推算処理解析システムの構成

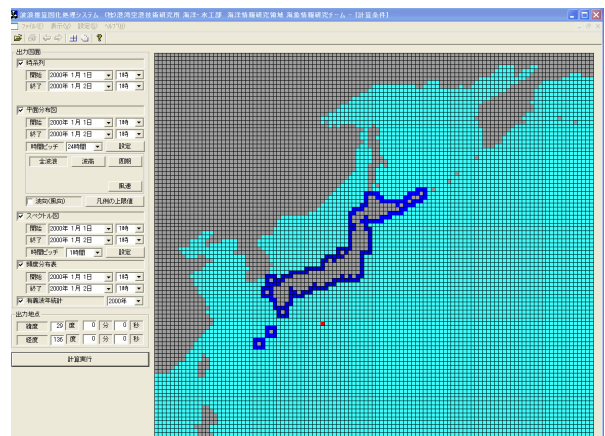


図5 メイン画面

間・出力時間間隔をユーザ指定することで、対象海域全域や対象地点での有義波諸元(有義波高、有義波周期および平均波向)の表示が可能(図6および7)。また、WAMにより風波とうねりを分離した計算を実施すれば風波とうねりについても同様の表示が可能。

b) 方向スペクトルの時系列変化

本解析システム上で対象地点および対象期間(出力時間間隔)をユーザ指定することにより、対象地点における方向スペクトルの時系列変化の表示が可能(図8)。ただし、本表示を行う場合、予め方向スペクトルの結果

を表示させたい地点を指定して波浪推算を実施し、出力ファイル（波浪推算データベース）に結果を保存しておく必要がある。

c) 有義波年統計&各種出現頻度表

本解析システム上で対象地点および対象期間をユーザが指定することにより、対象地点における有義波年統計（最大および平均有義波諸元と発生日時等）、各種出現頻度表の処理・解析および表示が可能な処理・解析および表示が可能（図-9）。

(4) 波浪推算結果の活用可能性

本解析システムは、最先端の波浪推算技術を波浪推算の専門知識を持たない実務担当者にも操作し易いように、GUIを通じて利用できるようにしたシステムである。本解析システムは、波浪観測データが不十分な海域でも精度の良い波浪情報が提供でき、海岸・港湾の整備計画の立案、施工の管理など、今後の海岸・港湾事業における有用な波浪情報の収集手段になると考えられ、各種事業の省力化、効率化に大きく寄与するものと期待される。その適用範囲は数多く考えられるが、現在用いられている高波を対象とした事例（港湾構造物の設計波算定、波浪災害の原因究明など）以外で、今後の活用が期待される分野を幾つか述べる。

a) 静穏度調査

港湾域の稼働率を算定する場合には、高波浪のみならず低波浪も含む連続的な波浪データを統計処理する必要がある。大きな港湾域周辺では波浪観測データは比較的良好に整備・蓄積されているが、小さな港湾や漁港などでは必ずしも十分な観測データが整備・蓄積されているとは限らない。このような場合、港湾工事に携わる担当者や港湾の利用に関する調査に携わる担当者が、本解析システムを利用することで、当該海域の波浪の出現特性を調査することが可能となる。また、防波堤の計画・設計において防波堤の法線を決定する場合、既往の波浪観測資料に基づいて波浪条件を設定し、その設定された波浪条件で港内静穏度計算等を行い、適切な防波堤の法線方向や配置を決定するが、波浪観測資料が十分でない場合、どのような波浪条件を設定するのが妥当であるか不明であることが多い。このような場合にも、担当者は本解析システムを利用して、対象海域の港内静穏度計算のための適切な波浪条件を設定することが出来る。

実際、波浪観測データが全くない南大東島において岸壁整備の方策を検討する際、本解析システム（波浪推算データベース）が用いられた。具体的には、南大東島付近の常時波浪推算結果を基に波浪出現頻度表を作成、岸壁整備前後における荷役稼働率の算定を行い、岸壁整備に伴って想定される便益と建設コストのB/Cの算定（費用便益分析）に用いられた（内閣府沖縄総合事務局開発建設部⁶⁾）。

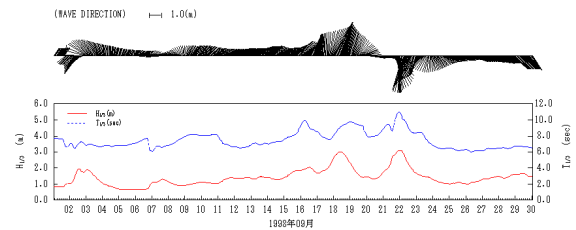


図-6 有義波の時系列

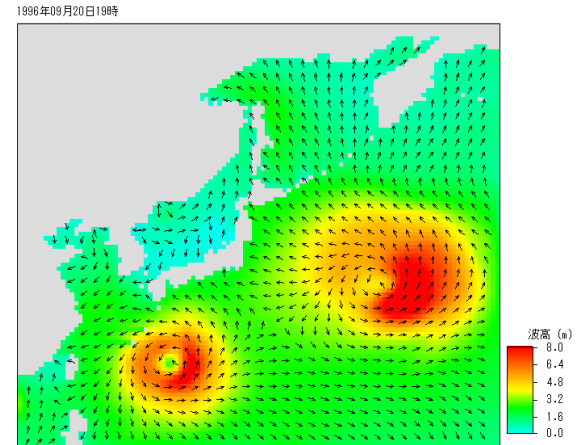


図-7 有義波高および平均波向の平面分布

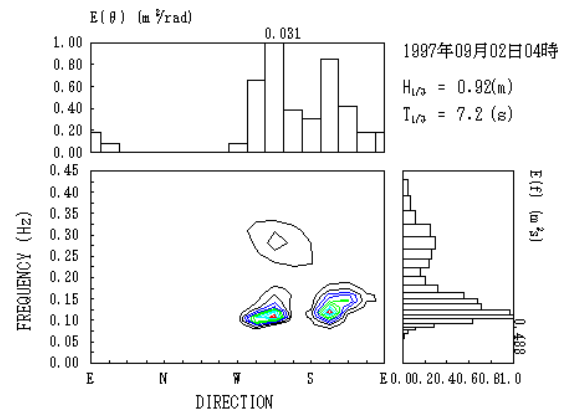


図-8 波浪スペクトル（方向スペクトル）

統計期間：1999年01月01日01時～1999年12月31日01時

Hm0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	合計
0.0	288	288	76	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	674
0.5	74	202	209	489	37	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	431
1.0	0	381	816	441	288	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1584
1.5	0	0	8	398	159	121	97	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	798
2.0	0	0	0	122	191	49	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	356
2.5	0	0	0	6	75	36	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125
3.0	0	0	0	0	20	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	342	2885	3481	1288	623	252	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8719

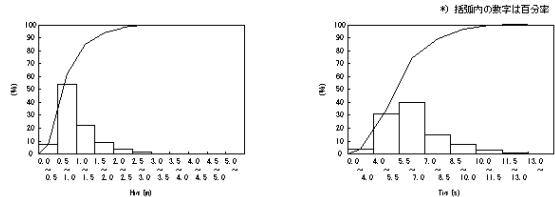


図-9 波高と周期の結合頻度表

b) 漂砂調査

新海岸法の下で作成された海岸保全基本方針によって、全国約70の広域海岸毎に海岸保全基本計画を作成することが求められることになった。海岸保全基本計画の作成にあたっては、広域の土砂移動特性を出来るだけ定量的に把握しておくことが望ましく、そのためには数十～百数十kmの延長をもった領域の土砂移動特性を定量的に示す広域土砂収支図の作成が望まれている。このような土砂移動の主要な原因は、言うまでもなく沿岸波浪である。したがって、調査対象域の土砂移動の原因や特性を検討するためには、長期間にわたる連続的かつ広域の波浪情報が必要不可欠である。しかし、このような調査に利用できる十分な波浪観測データが整備・蓄積されている沿岸海域は殆ど無い。このような当該海域に対しての波浪の出現特性を調査し、広域土砂移動や汀線変化などの調査研究に利用できる。

c) 環境要素と波浪条件の関連調査

海域環境を支配する要因の一つに波浪条件がある。しかし、多くの場合、波浪観測データが十分ではなく、波浪と種々の環境要素との因果関係は十分に検討されているとは言い難い。例えば、クラゲの異常発生と波浪条件との関係、アマモ場分布と波浪との関係、あるいは干潟の安定と波浪条件、海底の底質と波浪条件などである。このように環境要素と波浪条件に関する調査研究においても本解析システムの利用が可能である。

以上は、本解析システムの活用のほんの一例である。この他にも、例えば、造船関係では、船舶設計の基礎資料として外洋波浪のスペクトルの性質を把握しなければならないが観測値は殆ど存在しない。そのため、本解析システムによる波浪推算結果を利用することも可能である。また、日本周辺海域の波浪特性は外洋を航行する船舶にとっては有益な情報である。さらに、近年、港内波浪変形計算や構造物の破壊シミュレーションなど、高度な数値シミュレーションによって様々な現象を再現することが試みられているが、これらを実施する際の初期条件や境界条件としての活用も期待できる。

多くの数値シミュレーションシステムは、所与の条件下で対象とする現象を再現するものであり、本解析システム（波浪推算）も所与の条件として気象情報に基づいて波浪現象を再現するという意味では同様である。しかしながら、本解析システムで推算される結果は、仮想的な条件下の結果ではなく、実際の波浪現象を再現するものであり、この意味では波浪観測に替わる波浪情報を提供する点に特徴がある。すなわち、種々の実務において、波浪観測情報を必要とするあらゆる場面での利用が可能ならずである。これまで、このようなシステムや波浪情報が無かったために、現時点では本解析システムの利用も限られた範囲に留まっているが、今後は多くの場面で、本解析システムの利用が図られると期待しつつ、その普及に努める予定である。なお、気象庁においても波浪予

報を行っているが、気象庁の波浪予報は、1週間先程度の短期的な予報が中心である。我々のような港湾技術者が対象としている港湾・海岸構造物の設計や静穏度計算あるいは汀線変化などの検討では、そのような短期的な予報ではなく、数年～数十年先までの予測が必要である。しかし、このような超長期の予測は現時点では不可能であることから、過去数十年間に起こった現象を調べ、今後数十年間に起こる可能性がある現象の予測を行う。本解析システムは、こうした既往の波浪データを利用して種々の調査に利用できるものと期待される。

5. 波浪推算の精度向上に対する最近の試み

最後に波浪推算の精度向上に関する最近の試みを紹介したい。

波浪の推算精度は波浪推算モデル自体の精度に加え、波浪推算で用いる気象場（海上風）の推算精度に大きく依存するため、海上風の精度向上も引き続き取り組むべき課題である。とりわけ、我が国において高波をもたらす気象擾乱は台風であり、台風時の海上風の推算精度を向上させることが重要である。これまで実務における風場は経験的な2次元台風モデルによって推算を行ってきた。しかしながら、近年、気象の客観解析値を与条件とし、気象学的視点から3次元的な気象場そのものを数值的に解く局地気象モデル（図-10）が工学分野にも応用されるようになってきた。このように、波浪推算の外力である風場が陸地の影響を受けるような内湾域では、局地気象モデルによって、それらの影響を考慮した風場推算が行われている。

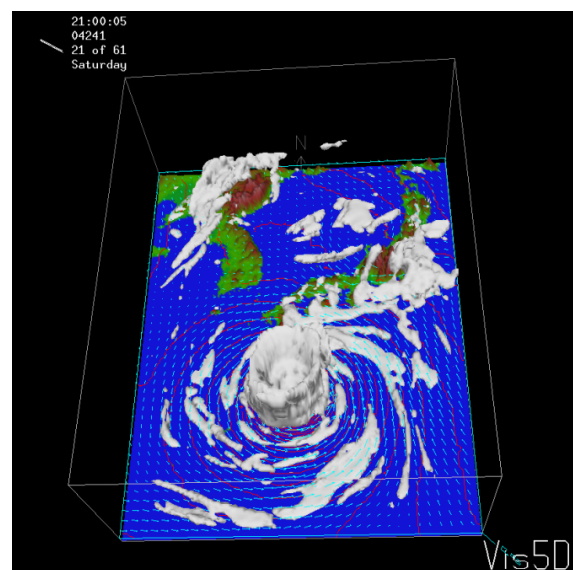


図-10 局地気象モデルによる気象場の計算例
(台風0416号)

6. おわりに

港湾事業における波浪推算の活用に関して紹介したが、本稿で紹介した日本沿岸波浪推算処理解析システムは、既に信頼性の高い実用的システムの域に達している。今後は、本解析システムが防災・環境などの種々の分野で有効に活用されることを期待しつつ、引き続き波浪推算の精度向上および関連技術の普及に努めたいと考えている。

参考文献

1) リアルタイムナウファス : <http://www.mlit.go.jp/kowan/howphas/>

- 2) 例えば, 河合弘泰・佐藤真・川口浩二 (2010) : 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS2008), 港湾空港技術研究所資料 No.1209, p93.
- 3) The WAMDI Group (1988) : The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, J.Phys. Oceanogr., 18, pp.1378-1391.
- 4) Komen, G. J. and 5 authors (1994) : Dynamics and Modelling of Ocean, Cambridge University Press, 532p.
- 5) 橋本典明, 川口浩二, 真期俊行, 永井紀彦 (1999) : 第三世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第4号, 47p.
- 6) 内閣府沖縄総合事務局開発建設部 (2003) : 平成13年度台風及び冬季風浪時における船舶の避泊を中心とした航行の安全に関する調査報告書, 206p.