

2014年度（第50回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-B-2

日本沿岸における波浪の常時観測
～全国港湾海洋波浪情報網・ナウファスを例に～

港湾空港技術研究所 チームリーダー

川口浩二

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2014年8月

日本沿岸における波浪の常時観測

～全国港湾海洋波浪情報網・ナウファスを例に～

Introduction of Wave Observation by NOWPHAS

川口 浩二
Koji KAWAGUCHI

1. はじめに

海岸・港湾における調査・研究を実施する際、波浪は最も重要かつ基礎的な情報である。近年の数値シミュレーションの高度化等により、数値計算によって波浪情報を得ることも可能となってきた。しかしながら、その計算精度の問題もあって、実際に来襲する波浪の実態を明らかにするには、波浪の観測が最も有効である。

国土交通省（2000年12月以前は運輸省）港湾局・各地方整備局・北海道開発局・沖縄総合事務局（以下では「国交省港湾局」と記す）、国土交通省国土技術総合政策研究所（以下では「国総研」と記す）および独立行政法人港湾空港技術研究所（以下では「港空研」と記す）では、関係機関と相互協力の下、1970年以来、波浪の定常観測を開始し、現在、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS, 以下では「ナウファス」と記す）を構築し、日本沿岸における波浪の常時観測、観測データの集中処理・解析を行っている。ナウファスでは、国交省港湾局の出先機関である各港湾事務所が観測の実施および観測機器の維持管理を、国総研が全国の港湾事務所で観測されたデータのリアルタイム収集・解析およびwebサイト等による情報公開を、さらに港空研が国総研で収集した観測データの品質チェックおよび各種統計解析を担当している。

本稿では、日本沿岸における波浪の常時観測の現状として、国交省港湾局の波浪観測であるナウファスを例に、波浪観測の実施や目的、ナウファスで用いられている波浪観測機器、ナウファスのデータ収集システムや観測データ処理などを紹介する。

2. 波浪観測の実施

2.1 波浪観測の目的

国交省港湾局では防波堤の港湾施設の整備など港湾事業を実施しているが、波浪はそれらを実施する上で、最も重要かつ基礎的な情報である。

国交省港湾局が実施している波浪観測の目的としては、大きく以下があげられる。

(1) 海洋・沿岸開発計画の策定：

港湾内の静穏度を高め、必要な港湾荷役の可能な割合（荷役稼働率）を達成するため、防波堤などの外郭施設の適切な配置を計画するなど。沖合における常時波浪の波高・周期・波向の出現頻度が必要となる。

(2) 海洋・沿岸の施設（構造物）の設計：

防波堤など港湾・海岸構造物の設計に用いる設計波（波高・周期・波向）を設定するなど。長期間における高波浪時の波浪データが必要となる。

(3) 施工計画（稼働率算定）：

防波堤などの建設、埋没した航路の浚渫などの海上工事を、どの季節にどのくらいの確率で実施できるか（稼働率）を事前に把握し、施工法や施工計画を検討するなど。長期間の常時波浪情報が必要となる。

(4)海上工事や荷役の安全管理（可否判断）：

波浪の実況やそれに基づく予測によって海上工事を続けるか止めるか、港湾荷役が可能か否かなどを判断し、安全で効率的な海上工事や荷役を実施するなど。波浪の実況値や予測値などが必要となる。

(5)災害対策・被災原因の究明：

構造物が被災した際の波浪条件（被災原因）を特定するなど。

(6)その他：

波浪の長期的な出現特性（波候統計）の解明、波浪の予報精度の向上、船舶の航路計画・設計外力の設定など。

また、上記の目的を達成するため、対象海域の何処で観測するかが重要となるが、その際に考慮すべき点としては以下があげられる。

- (1)対象海域の波浪状況を適切に代表する地点であること（特に対象としている港湾や港湾施設にとって最も危険となる主波向の波浪を観測できること）。
- (2)防波堤など波浪に影響を及ぼす既設構造物が観測地点の近傍にないこと。
- (3)碎波帯よりも沖側であること。
- (4)設置場所の海底地形が複雑でないこと（海底地形が平坦もしくは緩やかで流れの影響をあまり受けないこと）。
- (5)航行船舶や漁船の影響を受けたり、航行の邪魔にならないこと（ケーブル切断事故などを避けられること）。
- (6)各種関係者（海上保安庁、港湾・海岸管理者、漁協組合など）との調整や合意が可能なこと。 など。

このように波浪観測の実施にあたっては観測したい波浪を明確にした上で、可能な限り適切な場所を選定することが重要である。

2. 2 波浪観測機器

波浪の観測方法は、機器を用いない目視観測に始まり、現在では様々な形式の観測機器によって、波浪の観測が行われている。ここではナウファスで採用されている（いた）波浪観測機器を中心に紹介する。

波浪観測では、観測機器を用いて、海面（水位）変動や、海底における水圧変動、水粒子速度などを時系列的に計測している。通常 20 分間を 1 観測の区切りとし、20 分間の観測記録から波別解析法（ゼロアップクロス法など）によって個々波を定義した後、波浪諸元（有義波、最高波、平均波）を算出している。なお、これらの算出方法については、参考文献¹⁾などを参照されたい。

(1) 水圧式波高計（PW：Pressure Wave gauge）

海底に設置した機器に備わった水圧センサーによって、海面の上下動に伴う海底での水圧変動を計測し、得られた水圧変動から伝達関数を用いて間接的に海面変動を推定する。水圧式波高計では海底での水圧変動を計測するため、海底まで波の影響が伝わらない深海波（波長が水深の 2 倍以下の波）は計測できない。また、構造が単純で安価という長所があるが、周期の短い波に対する感度が悪い（観測精度が周期に依存する）という欠点もあった。しかしながら、港湾技術研究所で開発した水圧から表面波への換算手法²⁾などにより、実用化されるようになった。

現在、波浪観測において水圧式波高計を単独で用いることは少ないが、後述する超音波式波高計や海象計などにその機能を実装することで、超音波による海面計測が出来なかった場合の補完的な役割を担っている。

観測項目：海底での水圧変動

特 性：・構造が単純で安価である。

- ・碎波などで海中に気泡が混じっても測定可能だが、水圧変動が海底に伝わらない深海波は計測できない。
- ・ダイバーによる機器の設置やメンテナンス上の制約から、設置水深は概ね 50m 以浅。

(2) (海底設置型) 超音波式波高計 (USW : Ultra-Sonic type Wave gauge)

海底に設置した機器に備わった超音波の送受波器から海面に向かって鉛直上方に超音波パルスを発射、海面から反射される超音波パルスを再び送受波器で受信し、超音波パルスの送信から受信までの伝搬時間を測定することで、送受波器から海面までの高さ(水位変動)を求める。このような超音波パルスによる計測を短い時間間隔(通常 0.5s 間隔)で行うことで、連続的に海面変動を計測する。さらに、海底における水圧変動も同時計測する。

超音波パルスによる計測は比較的深い水深でも、直接的に海面を計測する事が可能だが、高波浪時に砕波などによって海面付近に気泡が混入し、海面と大気(空気)の境界面が乱れると観測精度が低下する(場合によっては計測できない)。そのため、超音波による観測が欠測した場合は、同時計測している水圧変動から海面変動を推定(「水圧補足」と記す)する。詳細については参考文献³⁴⁾を参照されたい。

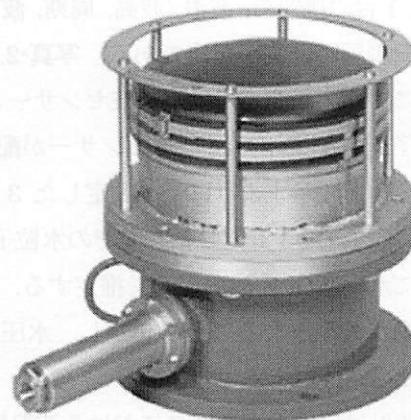


写真-2.1 超音波式波高計(USW)

観測項目：超音波による海面変動、海底での水圧変動

特性：・超音波によって海面を直接計測するとともに、海底での水圧変動も同時計測。

- ・超音波による海面変動の観測が欠測の場合、同時計測している水圧変動からの補足が可能。
- ・機械的な可動部が存在しないため、測定精度が長期間にわたって比較的安定している。
- ・ダイバーによる機器の設置やメンテナンス上の制約から、設置水深は概ね 50m 以浅。
- ・砕波などによって海面と大気(空気)の境界面が乱れると観測精度が低下もしくは欠測となる場合がある。

(3) 超音波式流速計型波向計 (CWD : Current-type Wave Direction gauge)

海底に設置した機器に備わった水圧計と超音波の送受波器によって、海底での波に伴う水平 2 方向成分の水粒子速度と水圧変動を計測し、流速および波向を測定する。写真のように相対する 2 対の送受波器間で超音波パルスを送信し、送信から受信までの伝播時間を計測する。もし流れが存在すると、流れの向きと大きさに応じて、流れが無い場合の伝播時間に比べて変化するため、それらを元に共分散法³⁵⁾により波の来襲方向(波向)を計測する。

通常は、超音波式波高計とセットで用いられ、波高・周期・波向(方向スペクトル)の観測を行う。

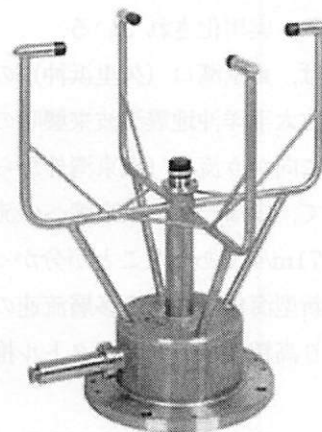


写真-2.2 超音波式流速計型波向計 (CWD)

観測項目：海底における直交水平 2 成分流速、海底での水圧変動

特性：・従来のプロペラ式等と比較して機械的な可動部が

存在しないため、測定精度が長期間にわたって比較的安定している。

- ・超音波式波高計との同期運転が可能で、波高・周期・波向の観測が可能。
- ・ダイバーによる機器の設置やメンテナンス上の制約から、設置水深は概ね 50m 以浅。
- ・突起物があるため、漁網等による被害を受ける可能性がある。

(4) 海象計 (DTDM : Doppler Type wave Directional Meter)

超音波式波高計と多層式のドップラー流速計の機能を合わせ持ち、1台の機器で、波浪(波高、周期、波向(方向スペクトル))と流況の同時計測が可能である。写真-2.3に示すように、機器上部に海面変動測定用の超音波センサーとその周りに3箇所の水粒子速度測定用の超音波センサーが配置されている。図-2.1内の三角形で示すように予め設定した3層において、鉛直軸から30度傾いた3方向の軸方向での水粒子速度を計測し、それらを元に水平直交2成分流速を推定する。また、超音波による海面変動が欠測となることも想定し、水圧変動も同時に計測し水圧補足も可能である。

海象計は、現ナウファスにおける波浪観測の主力機器である。後述するナウファスの処理においては超音波による海面変動から波高および周期を計測するとともに、最上層における水粒子速度を基に、拡張最尤法 EMLM[®]によって方向スペクトルを求め、波向を算出している。

なお、図に示すように、海象計では測定水深における3方向のビーム方向の水粒子速度を計測しているため、これら3つの計測地点は空間的に離れている。そのため、この空間的に離れた距離内に1波以上入るような周期(波長)の短い波に対しては、妥当な方向スペクトルを計測できないことに注意が必要である。参考までに、表-2.1に海象計による方向スペクトル解析が実行可能な波浪の限界周期と設置水深の関係を示す。

また近年、これまでの海象計の機能を継承しつつ、水圧センサーの感度をあげて水圧補足の精度を向上させたり、より多層での水粒子速度の計測を可能にするなど、性能を向上させた新型海象計⁷⁾が開発され、既に一部のナウファス観測地点で導入、実用化されている。

図-2.2は、東京湾口(久里浜沖)のアシカ島周辺海域に設置された新型海象計で観測された2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波来襲時の10層の流速データの時系列を示したものである。図の中心軸から上向きの矢印が北に向かう流れ(東京湾外から湾内へ流入する流れ)を示しているが、津波が来襲する15時半過ぎから全層において、ほぼ一様に東京湾への流入、東京湾からの流出を繰り返しており、その最大値は3月11日16時53分頃に0.71m/sであったことが分かった。

これは新型海象計による多層流速の一例であるが、このような観測データは全水深における流速場の把握だけでなく、より高精度な方向スペクトル推定などへの活用が期待される。

観測項目：超音波による海面変動、超音波による設定3層における3方向の水粒子速度、海底での水圧変動。

特性：・単一の機器により波浪諸元(波高、周期、波向(方向スペクトル))・流速を計測可能。

・機械的な可動部が存在しないため、測定精度が長期間にわたって比較的安定している。

・超音波による海面変動が欠測となる場合、同時計測している水圧変動による補足が可能。

・突起物が存在しないため、漁網等による被害が皆無である。

・ダイバーによる機器の設置やメンテナンス上の制約から、設置水深は概ね50m以浅。



写真-2.3 海象計

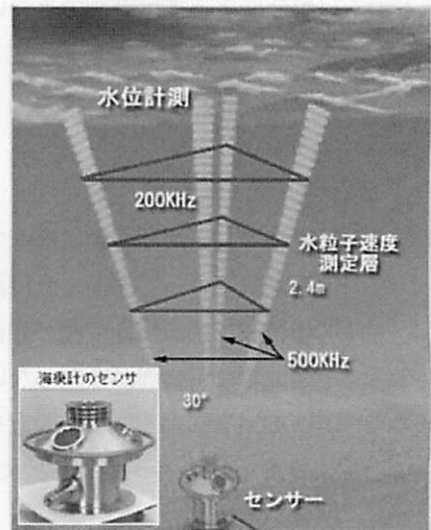
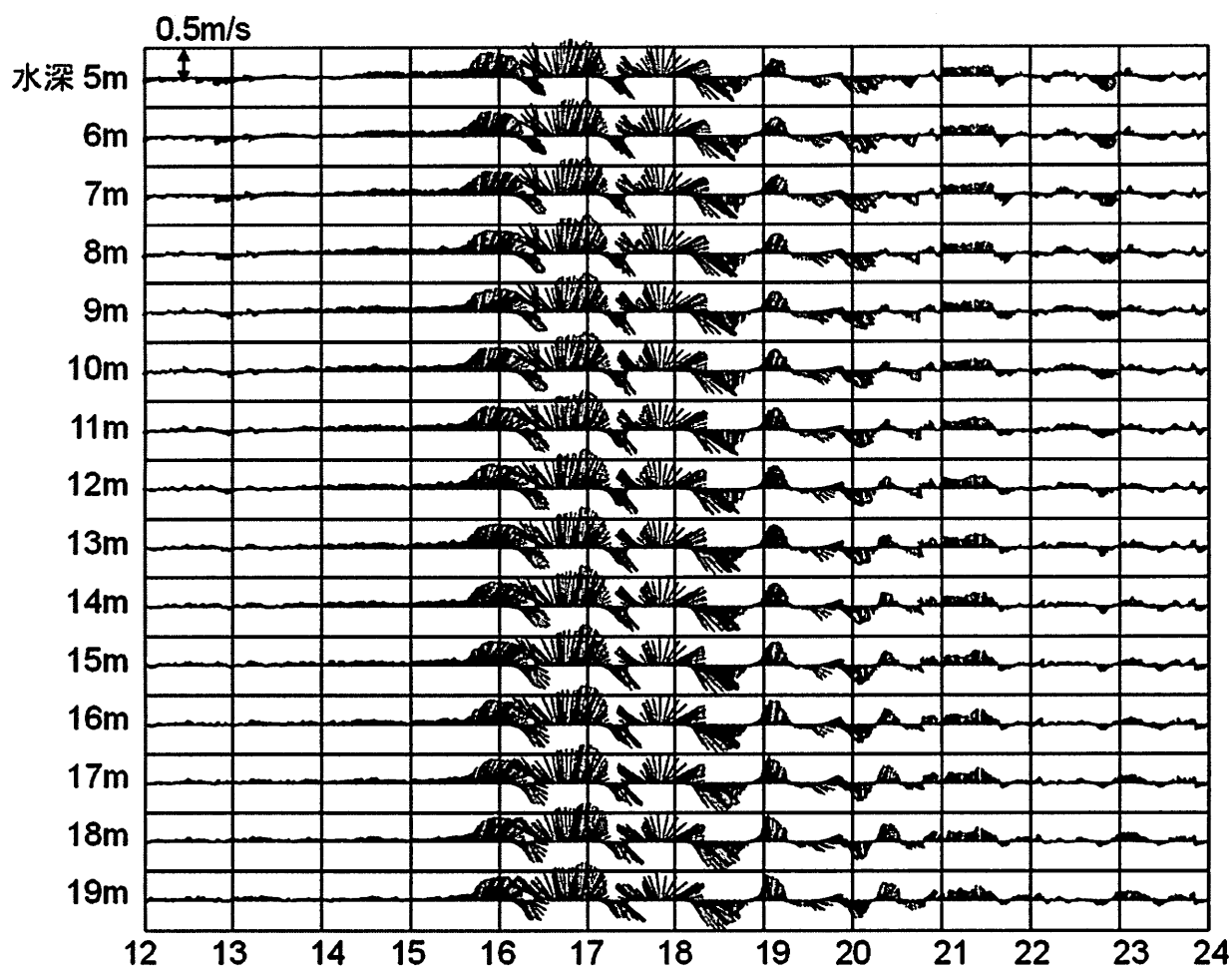


図-2.1 超音波による観測イメージ

表-2.1 海象計による方向スペクトル解析を実行可能な波浪の限界周期と設置水深の関係

設置センサー水深(m)	50	45	40	35	30	25	20
限界周期(s)	5.9	5.5	5.1	4.7	4.2	3.6	3.0



2011年3月11日

図-2.2 東北地方太平洋沖地震津波来襲時における多層での流速観測データの時系列（アシカ島）

(5) GPS 波浪計

地球上空を周回する GPS 衛星からの GPS 信号を受信可能な GPS レシーバーを搭載した浮体式ブイで海面変動を計測するものである。一般的に、この方式によるブイは「GPS 海洋ブイ」と称されることが多いが、ナウファスとして設置されている GPS 海洋ブイを、特に「GPS 波浪計」と呼んでいる。

図-2.3 に示すように、GPS 波浪計⁸⁾による観測システムは GPS 波浪計本体・陸上局・観測局で構成され、陸上局は GPS 波浪計を見渡せる沿岸近くの小高い場所に設置される。GPS 波浪計で正確な海面変動を計測するには、GPS 波浪計本体が海面変動に追従して動揺する必要がある。図-2.4 は、宮城中部沖 GPS 波浪計について、各周期に対する波浪計本体の応答性を示したものである。波浪計本体には固有周期が存在するが、本ブイの場合、4.3s の固有周期を有しており、図から概ね周期 6 秒程度以上であれば上下揺応答値が 1、すなわち海面とブイが追従することから正確な観測が可能となる。

GPS 波浪計では、波浪計上部に設置された GPS レシーバーで複数の GPS 衛星からの GPS 信号を受信し、GPS レシーバーの 3 次元的位置を、時々刻々、測位（確定）する。その際、波浪計に搭載された機器によってブイ本体の傾斜角を計測し、波浪計本体が傾斜することによる高度補正も行っている。

GPS レシーバーの 3 次元的位置を測位するアルゴリズムとしては RTK 測位（Real Time Kinematic method）⁹⁾を採用している。RTK 測位とは、3 次元的位置が既知な陸上局との相対的な位置を測定するものであり、陸上局からは GPS 測位に必要な補正情報を GPS 波浪計に伝送し、その情報を元に GPS 波浪計本体上で位置を測位する。GPS 測位の誤差要因としては、衛星による誤差や電波が衛星から地上の観測局に到達するまでに通過する電離層や対流圏による誤差などがある。RTK 測位では GPS 波浪計とその近傍に設置した陸上局におけるそれらの誤差が同等とみなして補正しているが、GPS 波浪計との距離（離岸距離）が大きくなるほど両者の誤差の乖離が生まれ、測位精度と安定性が低下する欠点がある。そのため測位精度を数 cm 以下にするためには、陸上局と GPS 波浪計との離岸距離は概ね 20km 程度が限界とされている。

このように GPS 波浪計では観測されたブイの上下

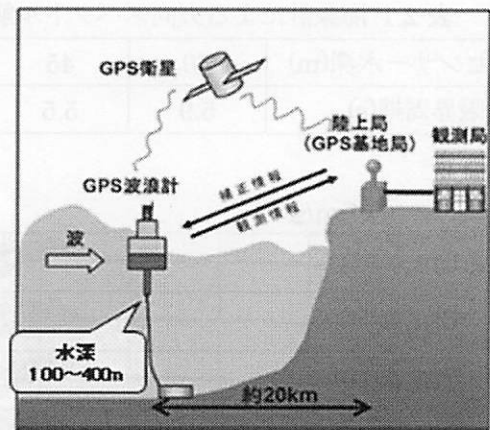


図-2.3 GPS 波浪計による観測システム

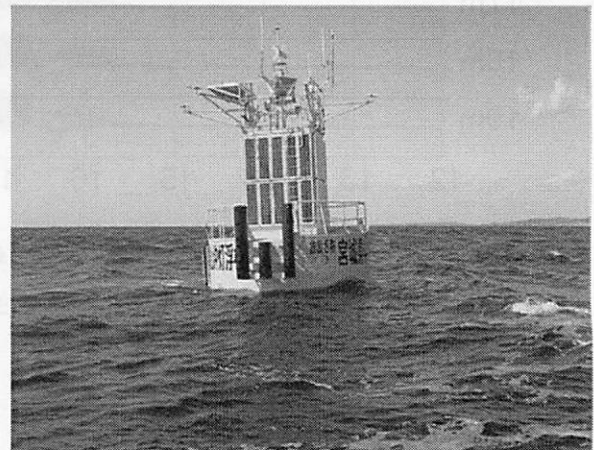
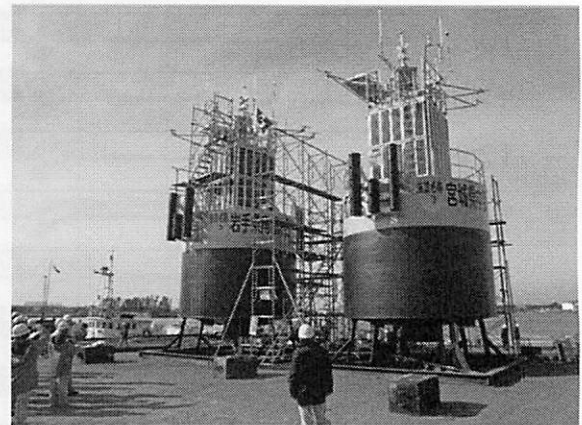


写真-2.4 GPS 波浪計

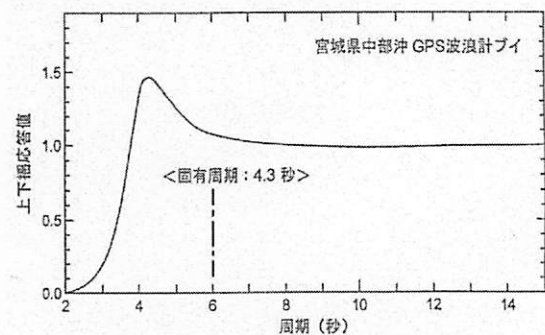


図-2.4 GPS 波浪計の応答性

動（水位変動）から波別解析法によって波高と周期を計測するとともに、ブイの水平方向の軌跡から共分散法¹⁰⁾¹¹⁾によって主波向を計測している。

観測項目：海面変動（GPS レシーバーの 3 次元位置を基に間接計測）、ブイ本体の運動（水平 2 方向位置、加速度、傾斜角）、GPS 測位情報（GPS 衛星数、PDOP 値、GPS 測位信頼度など）、気象場（外気温、外気圧、風向・風速など）、ブイ本体の稼働状況（内部電圧、ブイ内部湿度等）など。

特 性：・GPS 衛星からの GPS 信号を受信して海面変動を計測する。

・ブイ上に計測機器を搭載することで、洋上風などの観測も可能。

・陸地の影響を受けない大水深域での波浪観測が可能。

・（RTK 測位では離岸距離が概ね 20km 以内という制約があるが）設置水深としての制約はない。（GPS 波浪計の実績としては、設置水深は約 100～400m である）

・ブイの応答性から周期の短い（概ね 6 秒以下）の波浪の観測は困難である。

・海上（ブイ上）での作業となるため、機器のメンテナンス等が困難である。

・船舶の衝突等によって、波浪計本体や搭載されている各種機器が破損する可能性がある。

現在、RTK 測位の欠点である GPS 波浪計までの離岸距離の制約や GPS 測位に伴う各種誤差要因を除去する新たな GPS 測位法の技術開発が行われており、その 1 つが PPP-AR (Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution) 測位¹²⁾¹³⁾である。PPP-AR 測位は RTK 測位とは異なり、地上の場所によらない衛星軌道と衛星時計誤差などを推定して測位解析に用いることで、GPS 基準点網（電子基準点）から約 1000km 離れた場所でも RTK 測位と同等の測位精度の実現を目指すものであり、陸上局を必要としないのも特徴である。

(6) その他の波浪計

その他の波浪計としては、「空中設置型超音波式波高計」、「(加速度計測型)ブイ式波高計」、「アレー式による波浪計」「ステップ式波高計」、「海洋レーダーによる波高計」などがある。

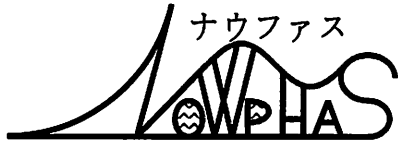
3. ナウファスの概要と歴史

3.1 概要

1970 年以来、国交省港湾局では、関係機関との相互協力の下、ナウファスを構築し、波浪の観測・集中処理・解析を実施している。観測結果は、後述するリアルタイムナウファス web¹⁴⁾上で一般に公開され、荷役や海上工事の安全性の確保、台風接近時の防災体制に役立っている。また、事後解析において吟味された波浪諸元は、各港の港湾計画の策定（例えば荷役稼働率の算定）、静穏な時期を選んだ安全かつ効率的な海上工事の施工計画の作成、港湾施設の設計波浪の算定、災害をもたらした波浪現象の究明において、不可欠な情報となっている。さらに近年では、気候変動に伴う波浪の長期トレンドの解析という観点からも期待を集めるようになってきている。

図-3.1 は、ナウファス波浪観測地点の位置図を示している。2014 年 6 月末現在、ナウファス波浪観測地点は全 77 地点であり、うち海象計に代表される沿岸波浪計が 60 地点、GPS 波浪計地点が 17 地点となっている。

図-3.2 は、ナウファス観測地点の総数と観測機器の内訳の経年変化を示している。観測開始の 1970 年から観測地点総数が年々増加し、観測開始当初は超音波式波高計が増加している。しかし、海象計の実用化がなされた 1995 年以降、海象計の地点数が増加する一方で、超音波式波高計は減少傾向になることが分かる。その後、2008 年の GPS 波浪計の実用化以降、GPS 波浪計が増加していることが分かる。なお、これらの地点数はナウファス波浪観測年報を元に集計したが、通年欠測の地点が観測地点として掲載されていない場合があったり、期間限定で試験的に処理していた観測点が含まれていたりなど、必ずしもナウファスの定常的な波浪観測地点とは一致していないことに注意されたい。



全国港湾海洋波浪情報網
 Nationwide Ocean Wave
 information network for
 Ports and HARBOURS

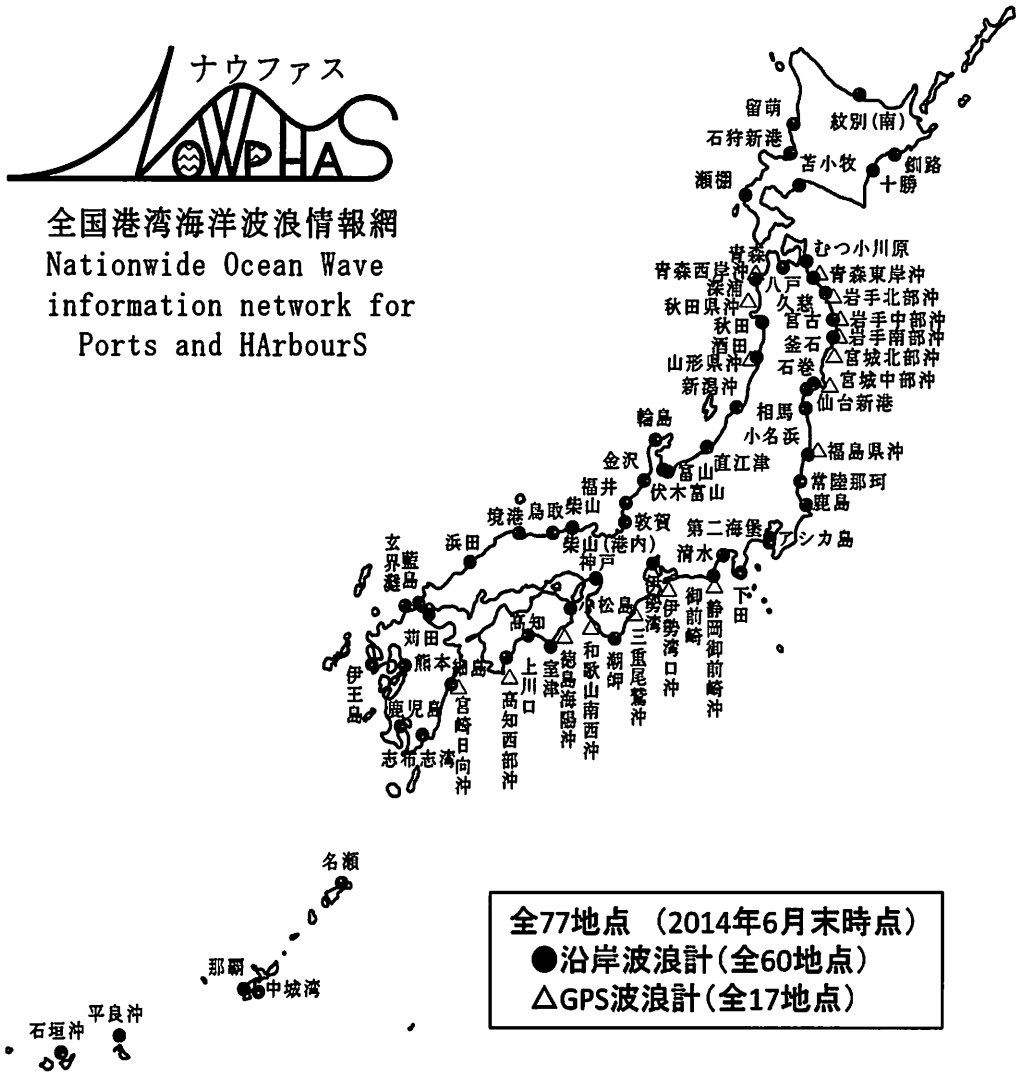


図-3.1 ナウファス波浪観測地点図 (2014年6月末現在)

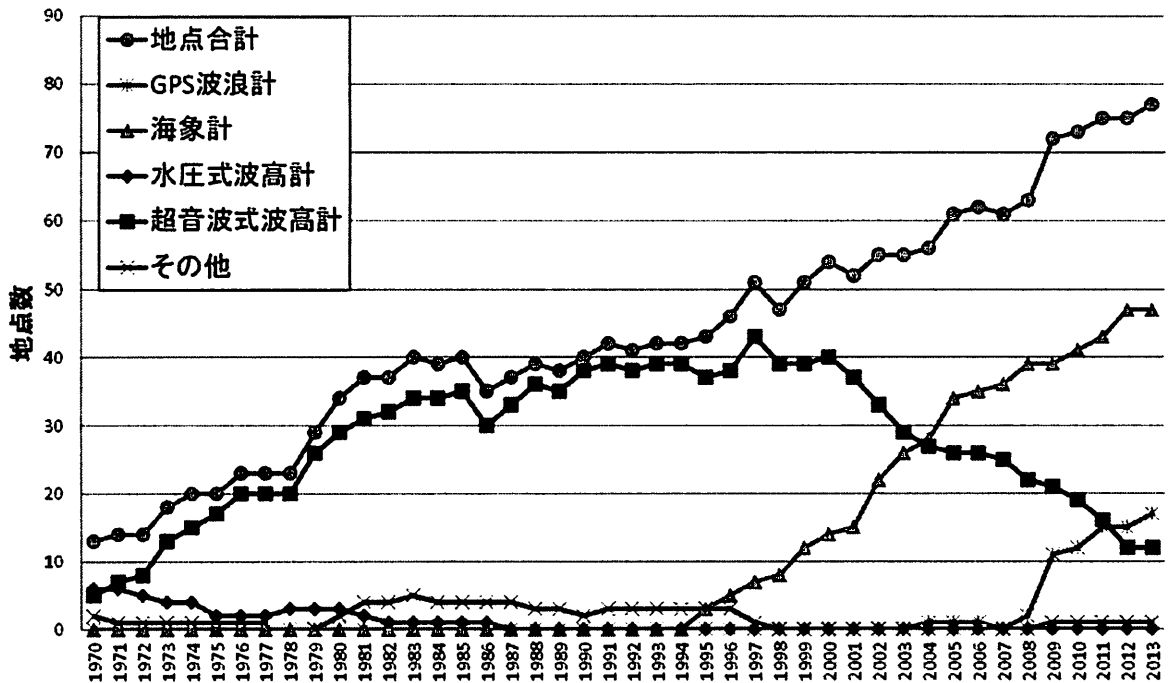


図-3.2 ナウファスにおける観測地点の総数と観測機器の内訳の経年変化 (1970~2013年)

3. 2 ナウファスの歴史

国交省港湾局による波浪観測は1970年代に始まり、現在のような観測体制となるまでには、観測に関する技術開発だけでなく、波浪観測を取り巻く周辺環境の変化も大きかった。ここでは、年代毎にナウファスの歴史を振り返る。

- ・1950年代：水圧式波高計の開発・改良。
- ・1960年代：超音波式波高計（USW）の開発・改良。
- ・1970年：運輸省（後の国土交通省）が波浪の拠点観測（波浪観測データの集中解析）を開始。
- ・1970年代：超音波式流速計型波向計（CWD）の開発・改良。
- ・1990年頃：電話回線によるリアルタイムデータ収集システムの開発。
- ・1991年：ナウファスと命名される。
- ・1995年：海象計の開発・実用化。
- ・1996年：気象庁へのリアルタイム波浪情報の配信を開始。
- ・2004年：インターネット常時接続によるデータ収集システムシステムの運用開始。
(2時間毎の毎偶正時観測から連続観測へ、波浪に加え、潮位・風データも収集を開始)
リアルタイム波浪情報サービス～リアルタイムナウファス webへの運用開始。
室戸沖 GPS ブイ稼働開始（日立造船・東大地震研・港空研による共同研究）。
- ・2007年：GPS 波浪計の設置（宮城中部沖（金華山沖）、岩手南部沖（釜石沖））。
- ・2008年：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS2008）にGPS 波浪計が初掲載。
(その後、GPS 波浪計の設置がなされ、東北～中部～四国の太平洋側で10基体制となる)
- ・2011年：東日本大震災の発生、東北地方太平洋沖地震津波の来襲。
(観測調整中の2基を除く)8基のGPS 波浪計によって、沖合での津波を観測。
- ・2013年：ナウファスシステム大規模改良（機器更新、商用衛星回線によるデータ伝送の2重化など）
- ・2014年：GPS 波浪計（伊勢湾口沖、宮崎日向沖）の設置。
- ・現在：GPS 波浪計17基を含む全77地点で波浪の定常観測を実施。

4. ナウファス観測システムとデータ処理

4. 1 ナウファス観測システム

図-4.1は、現地の観測機器から観測データの収集・解析・公開までのナウファス観測システムを模式的に示したものである。ナウファス観測システムでは、図に示すように、沖から陸に向かって「GPS 波浪計、沿岸波浪計、潮位計（検潮所）」と設置され、GPS 波浪計と沿岸波浪計では波浪を、GPS 波浪計と潮位計で潮位を観測している。観測されたデータは、近隣の港湾事務所に設置されているデータ収集装置に保存され、ナウファス用のデータフォーマットに変換された後、地上回線（インターネット回線）を介して観測センターに集約される。その後、観測センターで後述するリアルタイム処理を行い、リアルタイム波浪情報として、リアルタイムナウファス web で一般に公開するとともに、気象庁他にリアルタイムでデータ配信がなされる。また、収集された観測データは港空研内にも配信され、港空研内のデータサーバに保存される。なお、GPS 波浪計の観測データについては、地上回線に加えて、陸上局から観測センターへ商用衛星回線によるデータの常時伝送も行われている。

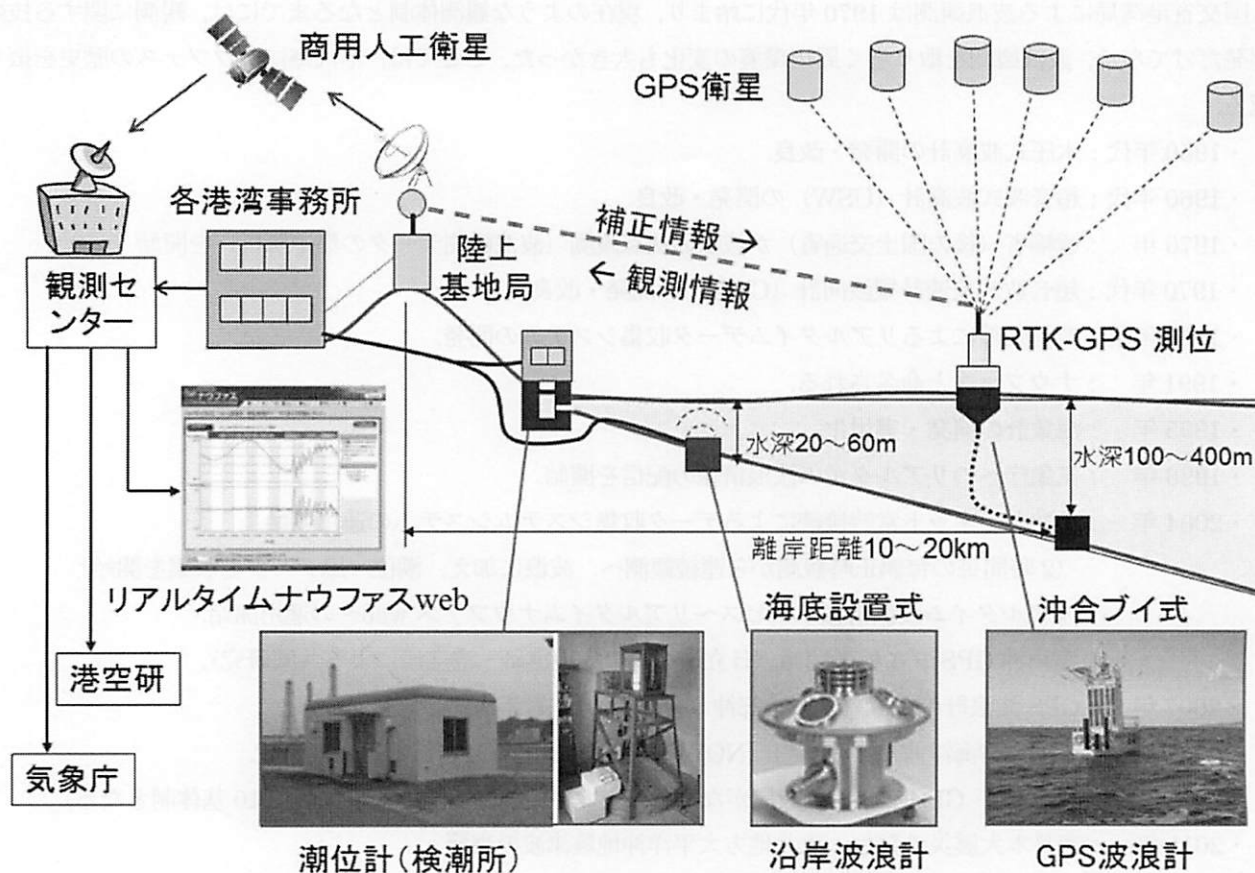


図-4.1 ナウファス観測システム

4. 2 ナウファスにおけるデータ処理

図-4.2 は、ナウファス観測データの処理の流れを示したものである。データ処理は大きく「リアルタイム処理」と「事後解析」に分けられ、さらに後者は「速報処理、確定処理、統計解析処理」に分けられる。ここでは各処理について紹介する。

(1)リアルタイム処理 (図-4.3)

各港湾事務所から伝送された超音波による観測データを対象に、予め決められた計算アルゴリズムによって、データの品質チェックを行い、正常と判断された観測データに対して波浪諸元を算出する。その際、品質チェックで異常と判定された場合もしくは超音波による観測データが存在しない場合は、同時に観測している海底での水圧変動から水圧補足によって、波浪諸元を算出する。なお、水圧補足をする際には、設定すべきパラメータが複数あり、事象に応じて適切な値を取るが、リアルタイム処理の段階では、事象によらず固定された値を設定している。そのため、設定された値が適切でない場合、水圧補足による波浪諸元が前後の超音波で得られた波浪諸元の傾向と異なる値を取る場合があることに注意が必要である。

このようにリアルタイムで処理された波浪データはリアルタ

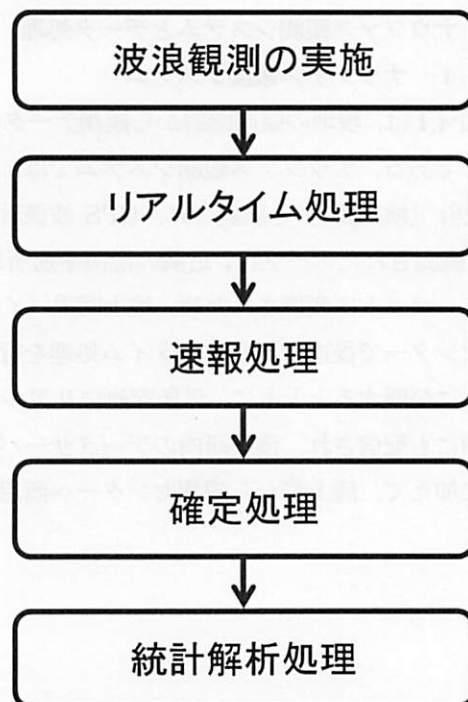


図-4.2 ナウファスデータ処理の流れ

イム波浪情報として、リアルタイムナウファス web 上で一般公開されるとともに、生データと一緒に、気象庁など関連機関へリアルタイム配信され、港空研内のデータサーバにも配信・保存されている。

図-4.4 はリアルタイムナウファス web の表示例を示したものである。同 web サイトでは各観測地点での波浪諸元、潮位観測地点では潮位観測データの時系列が過去 1 週間に遡って閲覧することが可能である。このリアルタイム波浪情報は波浪の実況を示すものであり、日常では海上工事や港湾荷役の可否判断・安全性の確保、台風接近時などには防災体制に役立つ情報である。また、同サイトの過去データ¹⁵⁾というページでは、後述する速報および確定処理で得られた波浪データを無償でダウンロードすることも可能である。また、2013 年 5 月からは携帯（携帯電話、スマートフォン）に対応した携帯版のナウファス¹⁶⁾の運用も開始している。

昨年 2013 年 1 年間の本サイト web (PC 版・携帯版) の日平均閲覧数は約 7.5 万回（最多は台風 1326 号来襲時の約 22 万回/日）であり、そのうち、約 1/4 が携帯端末からのアクセスである。また、過去データページへのログイン数は年間約 4,000 件であった。

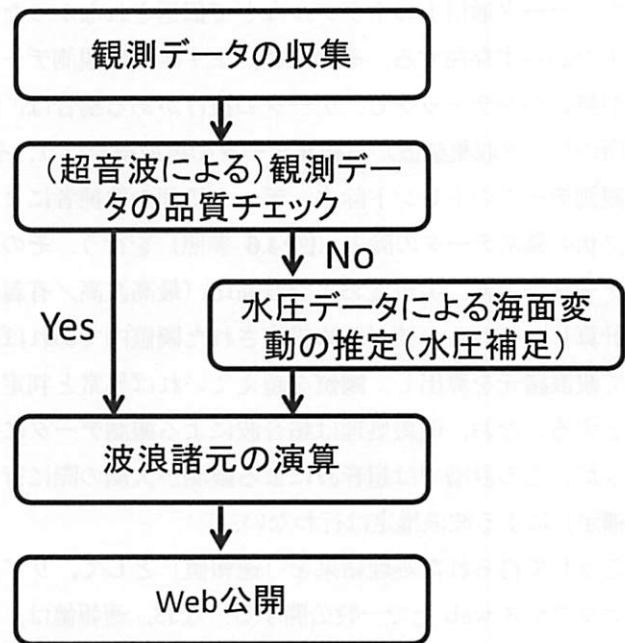


図-4.3 ナウファスリアルタイム処理

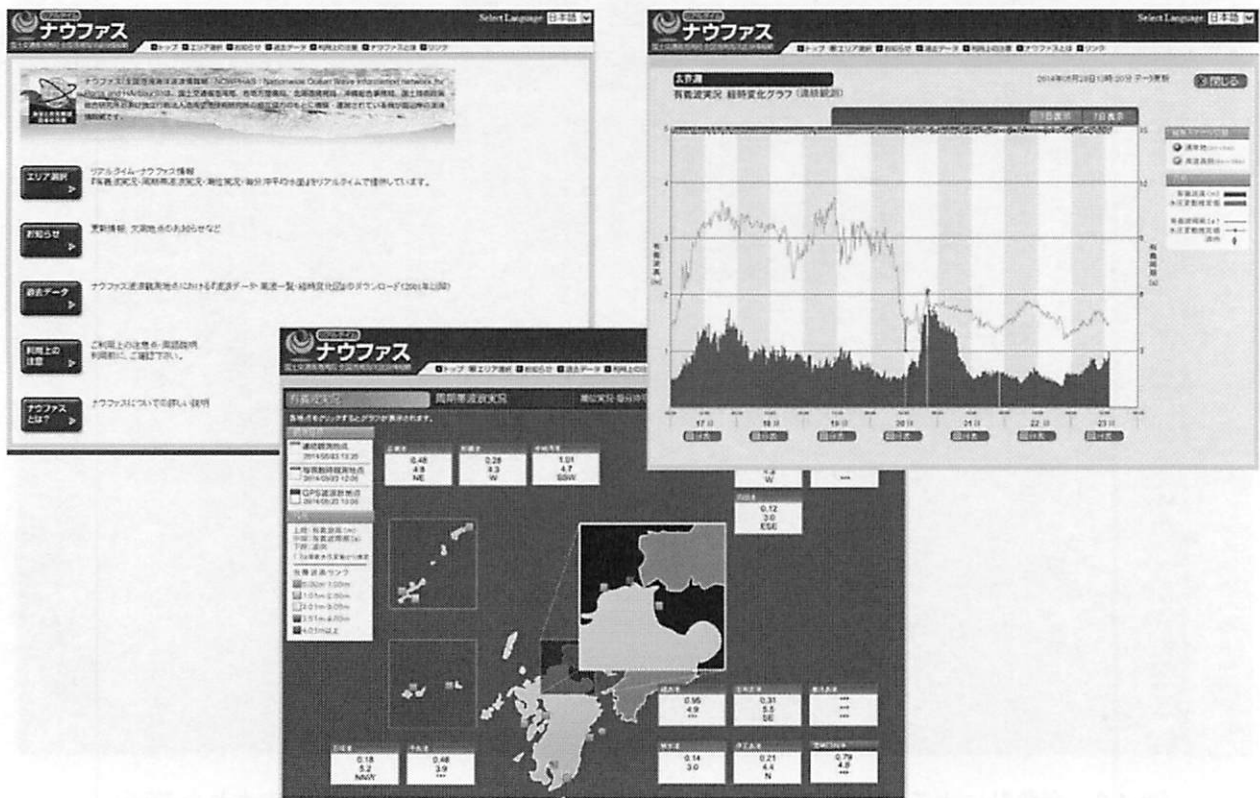


図-4.4 リアルタイムナウファス web の表示例

(左から Top ページ, 有義波実況 (九州・沖縄エリア), 観測地点での有義波諸元の時系列)

(2) 速報処理 (図-4.5)

観測月の翌々月を目処に行う処理である。リアルタイム処理時に港空研のデータサーバに保存された観測データに対して行うが、データ通信上のトラブルなどで伝送されなかったデータが少なからず存在する。そのため、まず始めに観測データに抜けが無いかをチェックし、データの抜けがある場合は、港湾事務所のデータ収集装置から観測データの再取得を行う。その後、各観測データのトレンド除去、データ処理の熟練者によるスパイク状の異常データの除去 (図-4.6 参照) を行う。その後、観測データの歪度、尖鋭度および波高比 (最高波高/有義波高) を計算し、それらの値が予め設定された閾値内であれば正常として波浪諸元を算出し、閾値を超えていれば異常と判定して欠測とする。なお、速報処理は超音波による観測データに対して行うが、この段階では超音波による観測が欠測の際に行う「水圧補足」による波浪推定は行わない。

こうして得られた処理結果を「速報値」として、リアルタイムナウファス web 上で一般公開する。なお、速報値は、翌年に実施される確定処理前の暫定的な値であり、確定処理後は値が変わる可能性があることに注意が必要である。

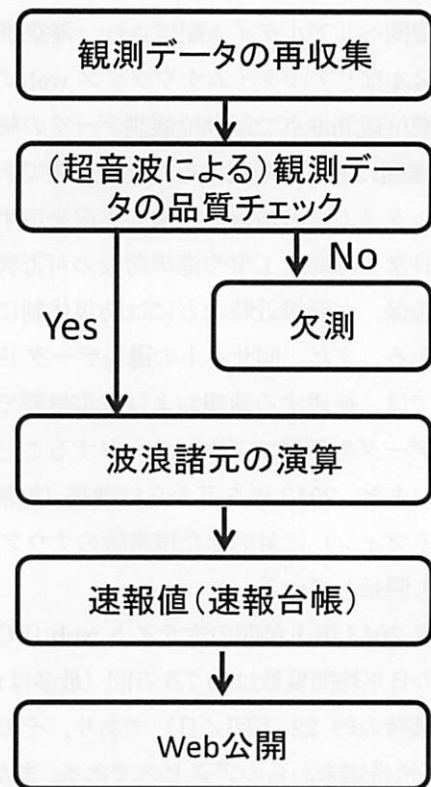


図-4.5 ナウファス速報処理

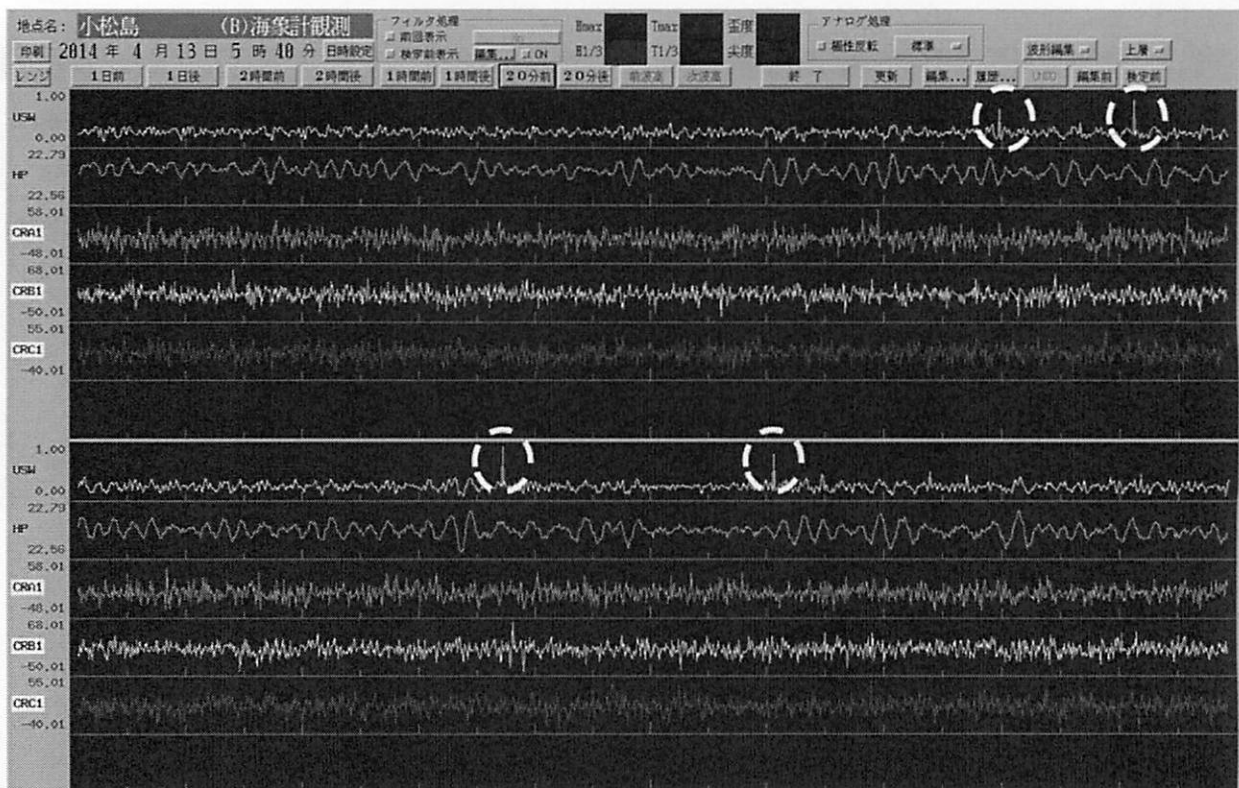


図-4.6 海象計による観測波形における異常値の一例 (丸内が異常値と判定された箇所)

※20 分間の観測データ。10 分間毎に上から超音波による海面変動, 水圧変動, 上層での 3 方向の水粒子速度を示している。

(3) 確定処理 (図-4.7)

観測年の翌年に行う処理である。速報処理で異常と判定された観測データについて、データ処理の熟練者の手によって、再度、波形レベルで正常か異常かの判定を行い、正常と判定された観測データについては波浪諸元を計算する。この熟練者による再確認を速報処理で欠測と判定された全観測データに対して行うのは膨大な作業量となるため、観測地点毎に定められた高波抽出基準を超える観測データに対してのみ実施している。

さらに、各観測地点の高波抽出基準を超え、超音波による水位観測データが異常または欠測かつ、正常な水圧データが存在する場合は水圧補足によって波浪諸元を推定する。水圧補足の際に必要な複数のパラメータの値については、各地点・各擾乱に対して複数の値を設定し、欠測の前後において超音波で観測された波浪諸元と時系列的に比較することで、最適と思われる値を選定している。

また、各港湾事務所では定期的に波浪観測機器のメンテナンス・点検を実施しており、その際、観測機器の設置状況をチェックしている。点検の結果、観測機器の設置方位がある一定値以上ずれていた場合には、この段階で波向の補正も行う。

こうして得られた処理結果を「確定値」として、リアルタイムナウファス web 上で一般公開する。この確定値がナウファス波浪観測の最終確定値である。

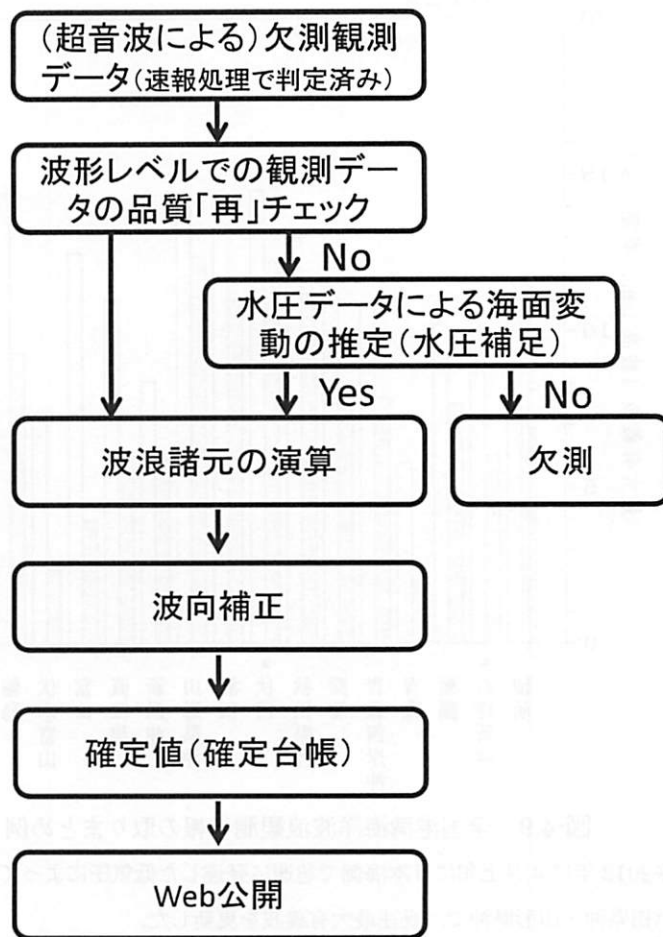


図-4.7 ナウファス確定処理の流れ

(4) 統計解析処理

確定処理で得られた「確定値」を元に行う処理であり、港湾毎に、以下の波浪統計量を取りまとめている。

- ①既往最大有義波 (の更新)
- ②年最大有義波 (図-4.9) および対応最高波
- ③月別平均および最大有義波
- ④波高・周期別出現頻度統計
- ⑤高波一覧表
- ⑥波高・波向別出現頻度統計
- ⑦周期帯別波高

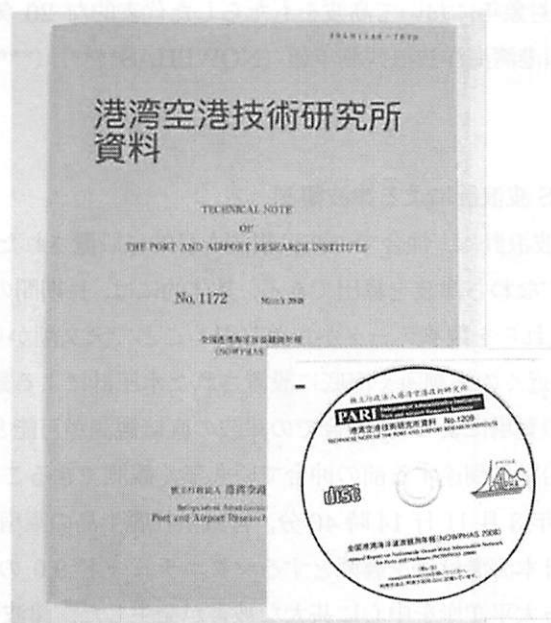


図-4.8 全国港湾海洋波浪観測年報と付属 CD

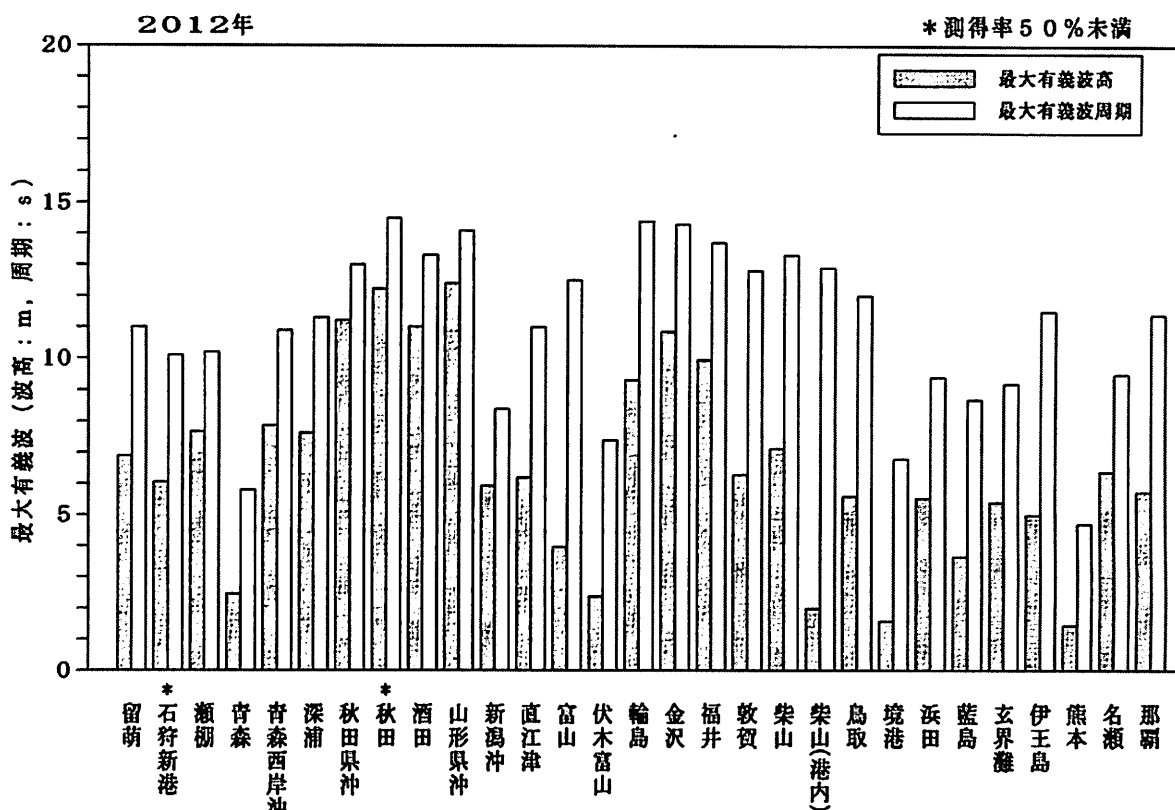


図-4.9 全国港湾海洋波浪観測年報の取りまとめ例 (2012年日本海側における年最大有義波)

※2012年は4月上旬に日本海側で急速に発達した低気圧によって、秋田・酒田・輪島・金沢・福井・敦賀・柴山・熊本・秋田県沖・山形県沖で、既往最大有義波を更新した。

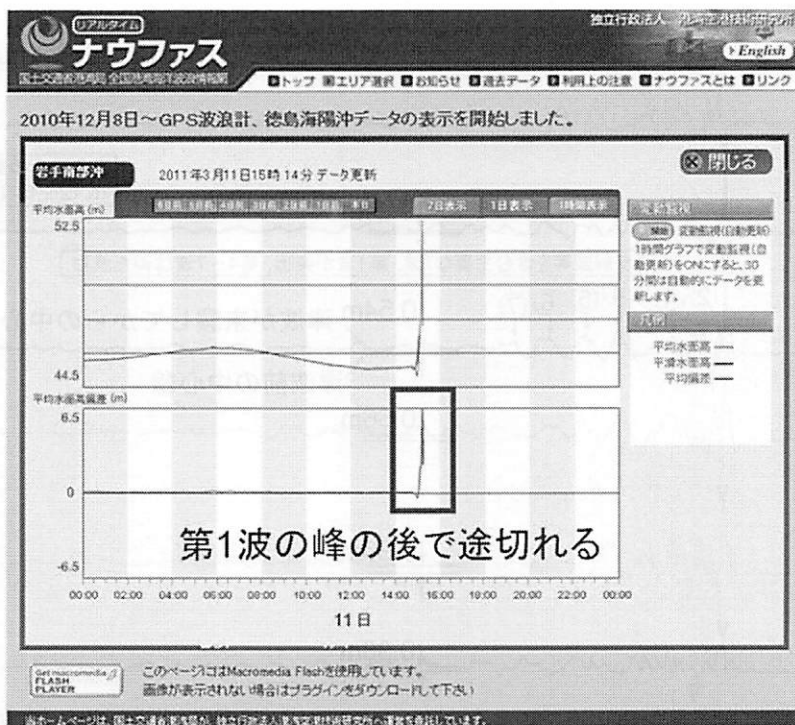
港空研では、上記の他、各観測地点の観測機器の設置条件（波高計の種類や設置位置・設置水深、観測開始時期など）、対象年において高波をもたらした代表的な20気象擾乱とその時の気象および海象の概況など取りまとめた「全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS****) (****は対象年)」を、1970年以降、毎年刊行¹⁷⁾している (図-4.8)。

5. GPS 波浪計による津波観測

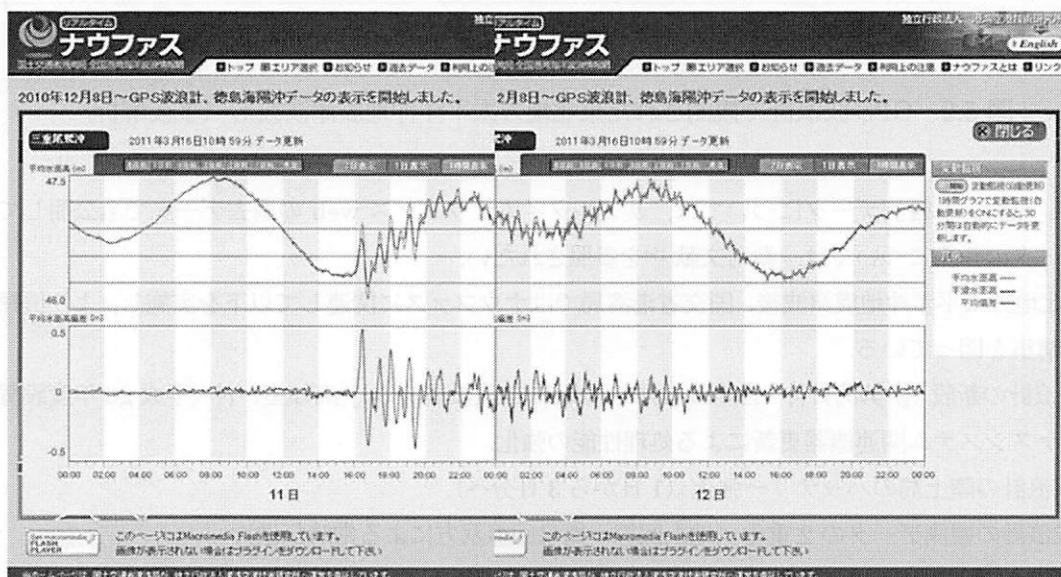
GPS 波浪計は、沖合での波浪観測を目的に設置されたものであるが、GPS 波浪計で観測される海面変動から潮位偏差すなわち津波を算出できる。具体的には、長期間の海面変動データを元に調和解析によって天文潮成分を計算し、それらを観測データから差し引くことで天文潮からの潮位偏差を推定することができる。これまで津波観測は、沿岸近くの検潮所や海底に設置された水圧計による観測データを元に行われていたが、沖合に設置された GPS 波浪計の登場によって、沖合での津波の直接観測が可能となった。GPS 波浪計による津波のリアルタイム観測は、津波が沿岸に到達する前の沖合でいち早く観測できることから、津波防災に大いに役立つと考えられる。

2011年3月11日14時46分、宮城県牡鹿半島の東南東120km、太平洋プレートと北アメリカプレートの境界である日本海溝付近を震源とするマグニチュード9.0の巨大地震が発生した¹⁸⁾。それに伴う巨大津波が来襲し、東北地方太平洋岸を中心に甚大な被害が発生した。津波発生当時、観測調整中だった2基を除く10基のGPS波浪計が太平洋側に設置され、通常運用されていた。

図-5.1は、津波発生当時のリアルタイムナウファスwebにおけるGPS波浪計の海面変動の一例を示したものである。震源から離れていた三重尾鷲沖 (図-5.1(b)) では、津波の第1波の到着から継続的にweb表示されていたことが分かる。一方、震源に近い岩手南部沖 (図-5.1(a)) では、第1波の峰を表示後、現地のデータ伝送回線 (地



(a)岩手南部沖（釜石沖）（2011年3月11日）



(b)三重尾鷲沖（2011年3月11～12日）

図-5.1 GPS 波浪計で観測された東北地方太平洋沖地震津波波形の一例
（上段が平均水面高，下段が平均水面高偏差）

上回線)が断線したため、観測データが観測センターまで届かず、リアルタイムでのデータ収集や web 表示が出来なかった。なお、図-5.1(a)および(b)の平均水面高偏差のスケールには注意されたい。

図-5.2 は、事後に解析した 10 基の GPS 波浪計の津波波形を示したものである。なお、岩手北部沖（久慈沖）～福島県沖（小名浜沖）では、図-5.1(a)の岩手南部沖（釜石沖）と同様にデータ回線の断線のためにリアルタイムでのデータ取得は出来なかった。しかし、GPS 波浪計本体と陸上局との間のデータ伝送は正常に機能しており、後日、陸上局のデータ収集装置に保存されていたデータを回収して解析した結果である。解析結果によれば、岩手沖では 6m 程度、宮城沖では 5m 前後、福島沖では 2m 程度、中部～四国沖では 0.5～0.3m 程度の正の最大偏差

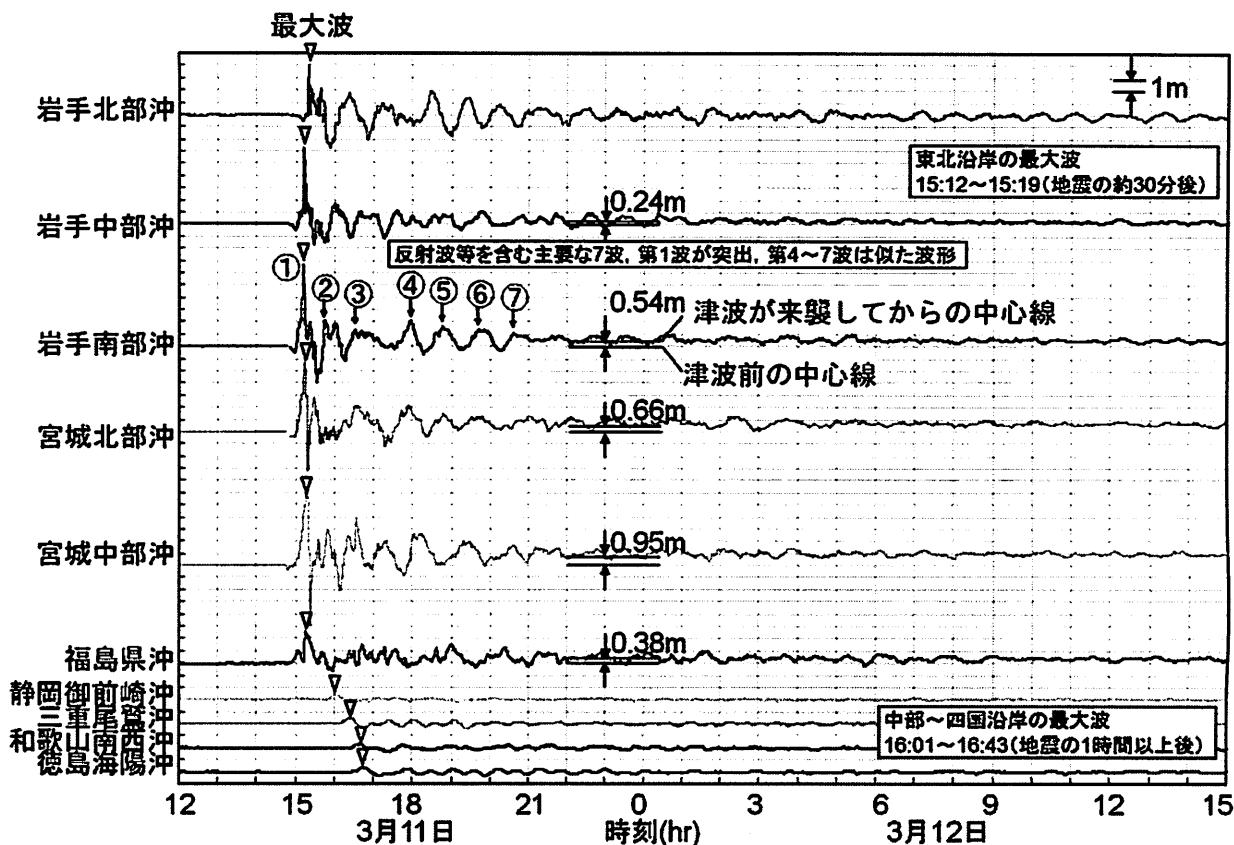


図-5.2 GPS 波浪計で観測された東北地方太平洋沖地震津波波形（事後解析）

を観測した。なお、本観測データについては、リアルタイムナウファス web の過去データでも公開している。また、観測データの詳細については、参考文献¹⁹⁾を参照されたい。

また、東北地方太平洋沖地震津波後、国交省港湾局ではナウファスに関連して以下を実施し、より信頼性の高いシステムの構築を図っている。

- ・GPS 波浪計の新設（伊勢湾口沖・宮崎日向沖（平成 25 年度設置済み）、高知室戸沖（平成 26 年度設置予定））。
- ・ナウファスシステム関連機器更新による処理性能の強化。
- ・GPS 波浪計の陸上局のバッテリー強化（1 日から 3 日分へ）。
- ・GPS 波浪計の観測データの 2 重化（地上回線・衛星回線双方による常時伝送）。

6. ナウファスにおける課題

ここまで、国交省港湾局が実施しているナウファスを例に、日本沿岸における波浪の常時観測の現状を紹介してきたが、ここではナウファスに関する技術的な課題について記す。

(1) 方向スペクトル観測データの活用

図-3.2 に示すように、国交省港湾局では、1970 年の波浪観測開始以降、日本沿岸における波浪観測地点を充実させ、その結果、日本沿岸における波浪観測データの蓄積も進んできた。

現地での波浪の本質を知るには方向スペクトルが重要であるが、国交省港湾局の港湾事業で利用される波浪情報は、NOWT-PARI に代表される波浪変形計算において、方向スペクトルを活用している例があるものの、その大半は波高・周期・波向である。今後、方向スペクトル観測データの活用が進めば、様々な課題において、より合理的な検討がなされると考えられる。

現在、ナウファス観測データにおけるルーチン的な方向スペクトルの演算手法としては EMLM 法や EMEP 法²⁰⁾を用いているが、より高精度な方向スペクトルを得るには、様々な観測条件や波浪条件に対して適用して、より多くの観測データによる解析を行ったり、方向スペクトルの演算に BDM 法²¹⁾²²⁾を用いた検討を行う必要がある。さらに、ルーチン的な処理としての適用可能性なども検討する必要がある。また、GPS 波浪計観測データに基づく方向スペクトル推定についても検討²³⁾²⁴⁾を進めているところである。

(2)波浪観測の効率的な実施

ナウファス観測データは国交省港湾局で実施する港湾事業以外にも、気象庁の波浪予報や津波監視業務や、地球温暖化に伴う波浪の出現特性の検討（波候統計）など、様々な調査研究に広く活用されている。これまで、国交省港湾局では港湾事業の実施を目的に波浪観測を実施してきたが、今後は、港湾事業という枠だけにとらわれず、例えば、オールジャパンによる広い視点から日本沿岸の波浪観測を実施していく必要があると考えられる。

さらに、近年、波浪モデルによる波浪計算（波浪推算）やその際に必要となる海上風データの高精度化によって、数値モデルによって精度の高い波浪情報を得ることも可能となってきた。そのため、波浪データの使用目的等々に応じて、波浪の観測と推算を効率的に組み合わせるなども重要になると考えられる。

7. おわりに

本稿では、国交省港湾局のナウファスを例に、日本沿岸における波浪の定常観測の現状を紹介した。実海域における波浪現象を把握するため、波浪観測は最も有効かつ確実な方法ではあるが、実施に際しては技術的な課題も残されている。本稿がナウファスの理解やナウファスデータの活用に際して役立てば幸いである。

最後に、ナウファスは、国土交通省港湾局、東北地方整備局、関東地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、近畿地方整備局、中国地方整備局、四国地方整備局、九州地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所、港湾空港研究所の相互協力のもとに運営されている日本沿岸の波浪観測網であり、ナウファスに関わってきた方々に尊敬の意、感謝を表したい。また、本稿の作成にあたって、画像の提供や記載内容に関して助言をいただいた株式会社エコー、株式会社ソニック、日立造船株式会社および一般財団法人日本気象協会にも感謝を表したい。

参考文献

- 1)合田良實(2008)：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版界，430p.
- 2)橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・朴 慶寿(1993)：波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について，港湾技術研究所報告，Vol.32，No.1-2，pp.27-51.
- 3)高橋智晴・佐々木弘・菅原一晃・鈴木喜実(1973)：超音波式波高計について，港湾技術研究所報告，Vol.12-2，pp.59-82.
- 4)高橋智晴・佐々木弘(1982)：超音波式波高計の改良とその効果について，港湾技術研究所報告，Vol.21-1，pp.3-29.
- 5)合田良実(1981)：共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討，港湾技術研究所報告，Vol.20-3，pp.53-92.
- 6)磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司(1984)：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp.173-177.
- 7)三井正雄・橋本典明・河合弘泰・横田雅紀・北村康司(2010)：高度化した海象計による海洋波の方向スペクトル推定精度向上に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.1446-1450.
- 8)永井紀彦・清水勝義・佐々木誠(2008)：太平洋北東岸 GPS 波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性，港湾空港技術研究所報告，Vol.47-2，pp.1-52.
- 9)M.Kanzaki, Y.Matsushita, H.Kakimoto, C. Rocken, T. Iwabuchi, L. Mervart, J. Johnson and Z. Lukes(2011)：GNSS Positioning of Ocean Buoys in Japan for Disaster Prevention, Proceedings of the ION GNSS 2011

- 10)清水勝義・永井紀彦・里見 茂・李 在炯・久高将信・藤田 孝(2006) : プイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.1406-1410.
- 11)清水勝義・橋本典明・岩崎峯夫・安立重昭・額田恭史(2008) : GPS プイ式波浪計を対象とした複合的な波向き計算手法の改良, 海洋開発論文集, Vol. 24, pp.843-848.
- 12)和田 晃・石川公美子・林 稔・山田浩章・杉本 淳(2012) : PPP-AR によるロバストな超長距離 GPS 連続観測システムの開発, 日本地球惑星科学連合, 2012 年大会.
- 13) Mervart, L., C. Rocken, T. Iwabuchi, Z. Lukes and M.Kanzaki (2013) : Precise Point Positioning with Fast Ambiguity Resolution - Prerequisites, Algorithms and Performance, Proceedings of the ION GNSS 2013
- 14)リアルタイムナウファス web (PC 用) : <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 15)リアルタイムナウファス web (携帯端末用) : <http://nowphas.mlit.go.jp>
- 16)リアルタイムナウファス web (PC 用) 過去データ : <http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>
- 17)川口浩二・猪股 勉・関 克己・藤木 峻(2014) : 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2014), 港湾空港技術研究所資料, No.1282, 125p. など, 毎年刊行.
- 18)気象庁(2011) : 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震について (第 15 報), 平成 23 年 3 月 13 日 12 時 55 分 報道発表資料, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/kaisetsu201103131255.pdf>
- 19)河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己(2011) : 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震津波の特性, 港湾空港技術研究所報告, Vol.50, No.4-1, pp.3-63.
- 20)橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃(1993) : 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張, 港湾技術研究所報告, Vol.32-1, pp.3-25.
- 21)橋本典明(1987) : ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, Vol.26-2, pp.97-125.
- 22)橋本典明・小舟浩治・亀山 豊(1987) : ベイズ型モデルを用いた方向スペクトル推定法および現地観測データへの適用, 港湾技術研究所報告, Vol.26-5, pp.57-100.
- 23)関 克己・河合弘泰・川口浩二・猪股 勉・橋本典明(2013) : GPS 波浪計による沖合の方向スペクトル推定手法の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, p. I_1144-I_1149.
- 24)関 克己・河合弘泰・川口浩二・猪股 勉・橋本典明(2013) : GPS 波浪計の観測に基づく波浪の方向スペクトル推定法に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, p. I_1431-I_1435.