

日本海沿岸における冬期波浪の協同観測*

波浪観測グループ代表 土 屋 義 人**

1. 緒 言

最近、沿岸海域の高度利用や海洋開発に伴って、沿岸海洋における波浪特性をはじめとする海象の究明が重要視されていることは、いまさら強調すべきことではないかもしれない。しかし、従来の波浪観測が主としてたかだか水深十数米程度の海域において実施されてきたが、この観測水深によって波浪特性が大きく変化することもわかり、運輸省では秋田海岸沖の水深40mの海域でブイ観測を始めている。

一方、近年波浪の発生・発達理論の進歩とエネルギー平衡方程式に基づく波浪の数値予知法の確立に対して、各種の研究が実施されてきたが、なかでも1968年より1969年にかけて各国の国際協力のもとに実施された北海における JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) という大規模な波浪観測¹⁾は、この方面の研究の進展に大きく寄与するものである。

幸い防災研究所では、大潟波浪観測所において、水深約20～30m付近までの波浪観測が実施できるので、これまで波浪とそれに伴う沿岸流、漂砂など各種の観測が進められてきた。標記の協同観測は、このような現状をふまえて、沿岸海洋における波浪観測を1地点の連続観測でなく、沖方向および沿岸方向における数地点の同時観測として実施し、深海から海岸に至る波浪の発達・変形特性とその平面分布およびそれに伴う諸現象を解明する立場から、舞鶴海洋気象台および防災研究所の大潟波浪観測所、海岸災害部門、災害気候部門などとの協同観測として、冬期季節風時の波浪観測を実施したものである。

いうまでもなく、この計画は前述した JONSWAP に比べると、小規模な波浪観測ではあるが、わが国で実施されたこの種の観測としては、比較的広域的な観測であると思われるので、いまだ観測資料の整理とその理論的解析が十分でなく研究成果はほとんど得られていないが、この観測の経過と若干の成果について述べるとともに、今後の研究の方向について考察することにする。

なお、この観測によって得られた海上風および波浪に関する基本的な観測結果²⁾は、本研究所年報第16号Bに公表してあるので、関連する観測結果の検討や今後の研究の推進に役立てていただければ幸である。

2. 海域および観測システム

2.1 海 域

この観測において対象とする海域は、Fig. 1 に示すように、日本海中部から大潟海岸を中心とする新潟海岸とその沖合である。

2.2 観測システム

この観測においては、Fig. 1 に示したように、大潟波浪観測所を中心として、気象庁の観測船啓風丸(約3,000 t)と舞鶴海洋気象台の観測船清風丸(約300 t)を基点とする日本海中部に向う外洋観測システムと新潟海岸に設置されている大潟波浪観測所、運輸省および新潟県の波高計群による沿岸観測システムから構成された。

* 昭和47年度防災研究所研究発表会特別講演(1973年2月6日)

** 協同研究者：中島暢太郎、白井 亨、中村重久、田中正昭、山口正隆、芝野照夫、河田恵昭
川鍋安次、原見敬二

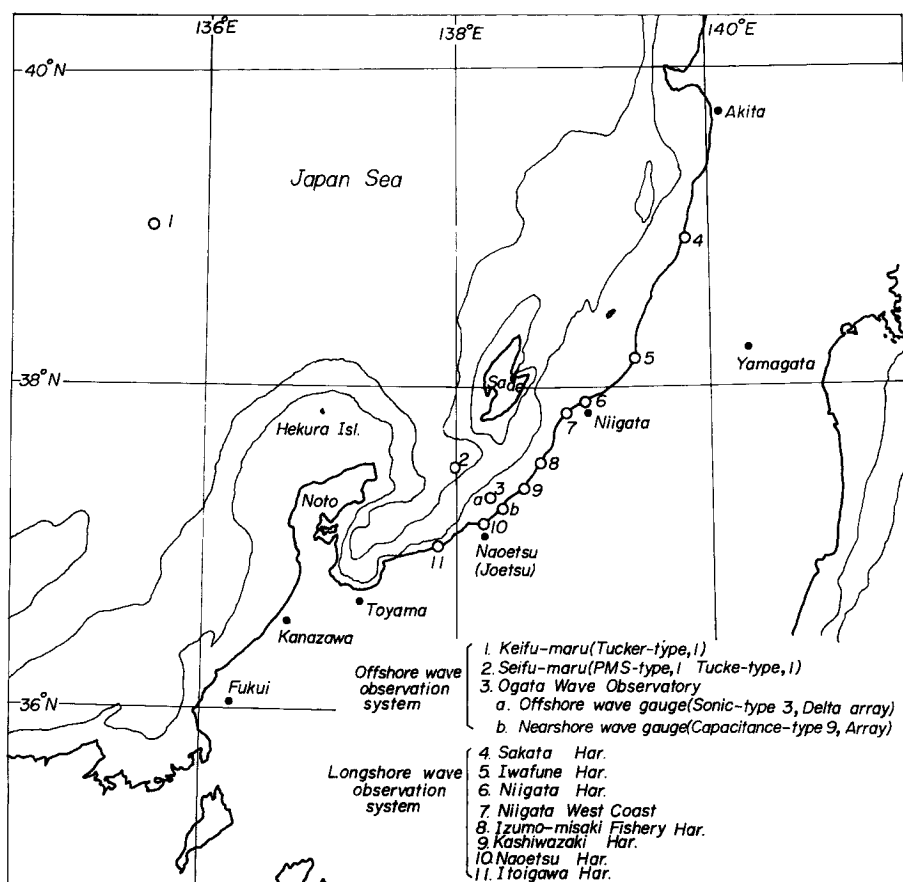


Fig. 1 Observational area and observation systems

3. 観測研究の計画の概要

3.1 観測期間

1972年1月16日12時より20日12時まで。

3.2 観測方法

前述した各観測システムについて、大体つぎのような要領で実施した。

a. 外洋観測システム 清風丸においては、一般海上気象観測（1日8回観測、風向風速は毎時、その他は自記装置により連続観測）、波浪観測（啓風丸は圧力式波高計、清風丸はPMS式波高計によって、原則的に偶数時0～10分以上の観測とするが、できるだけ連続観測とする）およびレーダー観測（清風丸においてシークラッターを1日8回、状況により毎時撮影して、波向の観測に資する）を実施した。また、啓風丸における一般気象観測および波浪観測資料を清風丸とほぼ同様な時間間隔に対して提供していただき、日本海中部の観測とする。

一方、大潟波浪観測所では、Fig. 2 (a) に示すように、第3人工島（水深約27m）に設置されている超音波式波高計3台でデルタアレイを構成させた波向波高測定装置によって、偶数時0～20分の観測を行なうとともに、Fig. 2 (b) に示すように、第1人工島に容量型波高計による棧橋先端のデルタアレイと棧橋に沿って配置した合計9台の波高計群によって、原則的に連続観測を実施した。また、第1および第3人工島に

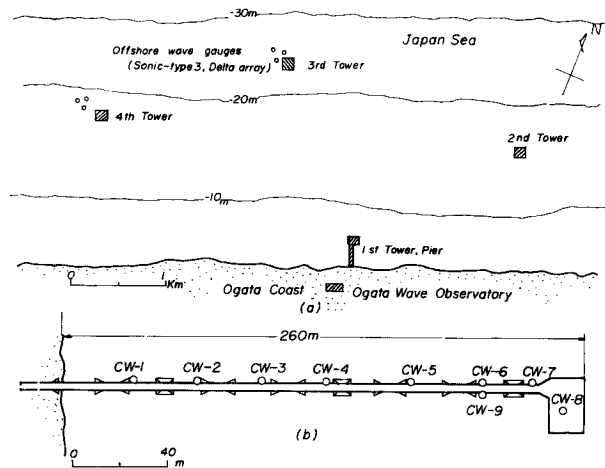


Fig. 2 Wave probe arrays of Ogata Wave Observatory

においては海上風の連続観測を行なった。

b. 沿岸観測システム これは、つぎの2つに分けられる。第1は Fig. 1 に示したように、大潟波浪観測所を中心として、新潟海岸における波浪観測を実施するもので、このためにこれらの海岸に設置されている波高計の観測記録を担当官庁より提供していただいた。また、シークラッターと波浪との関係を新潟気象台弥彦山レーダーによって、偶数時に観測撮影した。同様に、これら沿岸地域における風の観測資料を関係官庁より提供していただき、分布特性の資料とした。

第2は、大潟波浪観測所における観測であって、漂砂（竹桿式捕砂器により棧橋に沿って6～8点、原則として12時間ごとに観測）、海底地形変動（棧橋に沿って27点の測深および採泥を原則的に6～8時間ごとに実施）、汀線砂れきの採集（大潟海岸を中心とする隣接海岸約50 kmの範囲について1 km 間隔に2回実施）、砕波および波のそ上（16 mm 撮影機によって、昼間偶数時ごとに実施）および沿岸流（棧橋から投入する10個以上のブイをモータードライブカメラで追跡撮影するもので、原則的に昼間偶数時に投入する）などの観測を実施した。

3.3 研究計画

以上の観測方法によって得られた観測資料を解析して、つぎのような研究を実施することにした。

a. 外洋より沿岸に至る波浪の発達・減衰および変形 啓風丸、清風丸、第1および第3人工島に設置した波高計群の波浪記録を解析して、深海から浅海に至る波浪の発達・減衰および変形特性の究明と、これに伴う季節風時の波浪の推算精度の検討および波浪のエネルギー平衡方程式にもとづく数値計算を試み、実測値と比較検討する。

b. 新潟海岸における波浪の平面分布と方向スペクトルによる海域の波浪分布の解析 Fig. 1 に示した各波浪観測所の観測記録を解析して、沿岸における波浪特性の分布と佐渡島のしゃへい効果を究明する。さらに、第1および第3人工島のデルタアレイの波高計群を用いて、方向スペクトルを求める一方、清風丸のレーダーおよび弥彦山レーダーのシークラッターの映像を解析して、対象海域での波浪分布を解明する。

c. 新潟海岸における風の分布 前述した観測記録のほか新潟沿岸地帯の風の観測結果を用いて、海上風の特性と沿岸地域における風の分布特性を究明する。

d. 大潟海岸における海岸波浪の変形とこれに伴う沿岸流・漂砂・海浜変形 主としてつぎの3つに分けて、できるだけ系統的にかつ同時観測を実施することにした。

(i) 海岸波浪の変形：第1人工島の容量型波高計デルタアレイと第3人工島の超音波式波高計デルタアレイによる観測記録を用いて、風波の屈折とくに、成分波の分散特性を明らかにし、同時に第1人工島にお

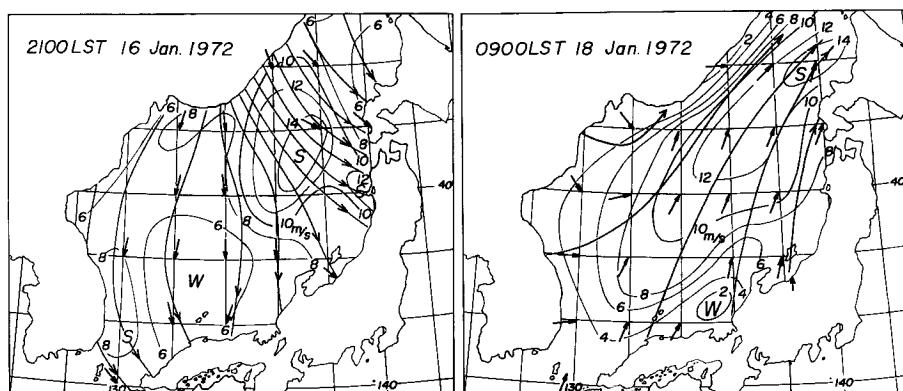


Fig. 3 Synoptic patterns of gradient wind

けるこのほかの6台の波高計群の記録をも用いて、浅海における波浪の変形特性とくにスペクトルの変化、海底摩擦などを究明するとともに、波のそ上、砕波および wave set-up (down) などの解明につとめる。

(ii) 沿岸流：第1人工島棧橋を利用した多点のトレーサー法による沿岸流の観測結果から、沿岸流と海岸波浪との関係を見出し、理論と比較検討する。

(iii) 漂砂・海浜変形：竹桿式捕砂器、水中ポンプ式漂砂濃度計を用いて、浮遊漂砂の沖方向の分布と時間的变化を測定して、砕波特性など波の特性との関連を究明する。同時に、棧橋に沿う海底地形と底質特性の変化および隣接海岸の汀線砂れきの特性などから、波浪と漂砂との関係およびそれにもとづく海浜変形を明らかにする。

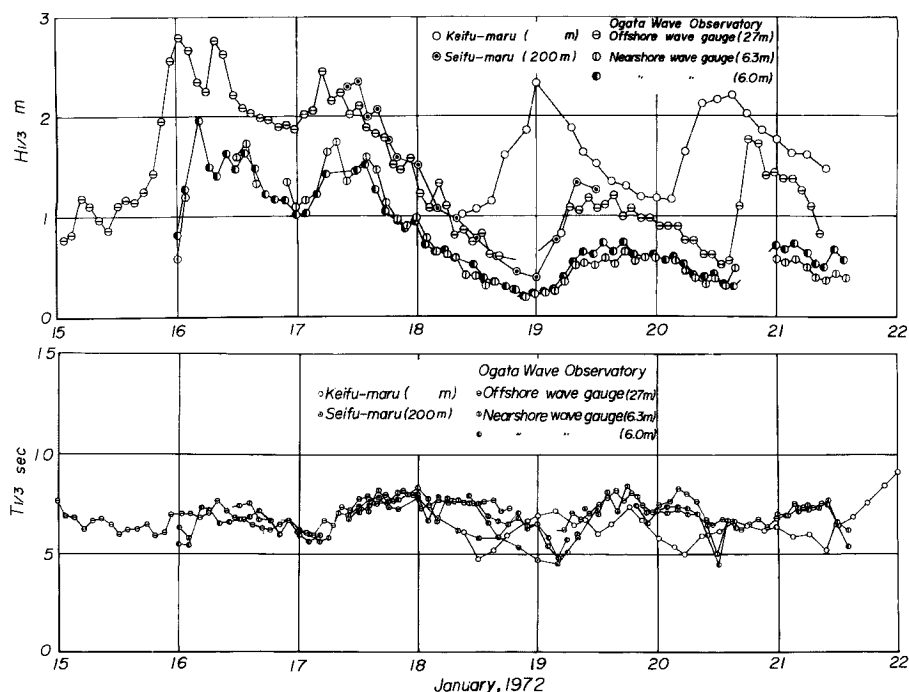


Fig. 4 Time variation of characteristics of significant waves

4. 観測研究の成果と若干の考察

前述したように、この観測によって得られた成果のうち、海上風および波浪の特性に関するものは観測資料集としてとりまとめたが、ここではこれらのなかから今後の研究上興味あると考えられる現象について若干考察してみたい。

4.1 海上風の特性

波浪の発達特性の究明には、海上風の正確な推定が必要であることはいうまでもないが、ここでは清風丸の観測結果を参照し、傾度風速からの補正係数を離岸距離の関数として評価して、海上風速を推定することにした。Fig. 3 はそれらの結果の1例であるが、この図には流線図をも重ねて示してある。この場合、波浪の発達特性との関係から、舩倉島の風と大潟海岸付近の波浪のおくれが約9時間あることに着目して、海上風の特性を示すことにした。これから、15日から17日までは、この海域ではNW またはNNW 方向の10 m/sec 以上の海上風で、18日にはSSW またはSW 方向の風が変わって風速も減じ、それに伴って流線図から考えられる風域も大きく変化したことがわかる。すなわち、前者では対岸がソ連に及ぶが、後者では富山湾・能登半島に限られる沿岸方向となっている。

一方、2つの観測船と第3人工島において観測された風速の時間的変化も比較検討されたが、それらは資料集に示すとおりである。

4.2 波浪の発達と波向・風向の特性

Fig. 4 は観測期間中の有義波の特性の時間的変化を示したものである。観測の都合によって同時観測結果が得られている部分は十分ではないが、清風丸、第3および第1人工島の順に波高が一般にかなり減少していることがわかる。ただし啓風丸の結果は、タッカー式波高計に若干問題があって、かなり大きく現われており、この点はさらに検討すべきである。一方、周期については、波高の比較的大きい範囲では、啓風丸の結果を除いて、それぞれよく一致しているが、波高が小さくなると清風丸の結果が若干小さくなっているのは、波高計の特性と思われる。

前述した風速および流線図からも明らかなように、15～17日にはNW またはNNW の約10 m/sec 以上の海上風のため波浪はよく発達し、その減衰期に入っていたが、18日から19にかけては、SW またはSSW の風が変わったため、19日の波浪ではあまり有義波高は増大せず、周期も減少している。

Fig. 5 は清風丸で目視観測されたうねりおよび風波の波向と風向との比較であるが、これから風波に対

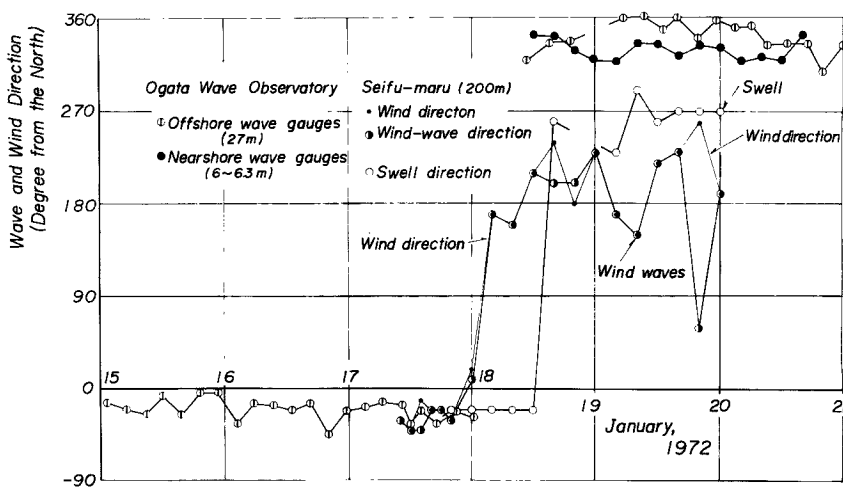


Fig. 5 Variation of wind direction and wave direction

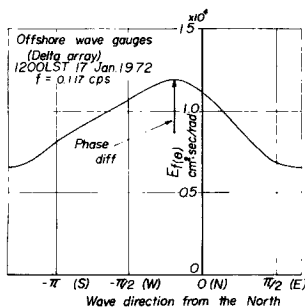


Fig. 6 Directional spectra

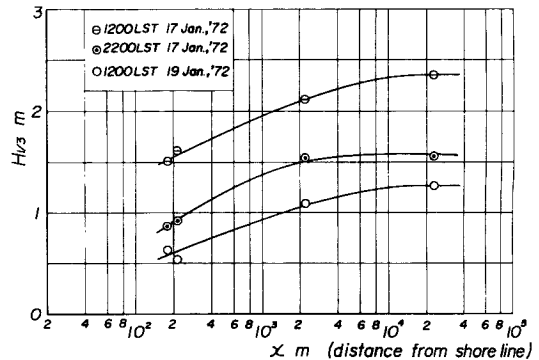


Fig. 7 Offshore change of significant wave height

しては両者がきわめてよく一致していることがわかる。18日以降の弱いうねりは前の storm によるうねりであって、その波向もWとなっている。一方、図中には第3人工島のデルタアレイによる波浪記録の位相差から算出した波向も示してある。これから17日ごろの NNW 方向の風波に対しては、目視観測の結果とよく一致しており、また波向が15日より17日ころまではほとんど変化しなかったことがわかるが、これは Fig. 3 の流線図の特性からもよく理解される。これに対して、18日以降の波向については、位相差によって算出したものは若干 N 方向にかたよっており、うねりと風波と重なっている場合には、その推定が困難であることがわかる。

Fig. 6 は波浪の方向スペクトルを計算した結果の1例であり、比較のために波浪記録の位相差から算出した波向を示してあるが、それは主方向とよく一致している。

以上のように、海上風の特性がかなりの精度で推定でき、また沖方向に数点の波浪記録が得られているので、今後海上風のみならず他の観測結果の検討とあいまって、波浪の数値予知法の研究の推進に寄与することができると思われる。

4.3 波浪の沖方向特性

前述した波浪特性の時間的変化の結果から、群速度でずらして同一波群をできるだけ対応させ、波高の沖方向への変化を求めたものが Fig. 7 である。これから明らかなように、17日の正午ころで海上風がかなりあるときには、水深 200 m の沖より海岸に至るにつれてかなり波高が減少しているが、一方 22時ころで海上風が弱まり波高が小さくなると、水深 200 m から 27 m ぐらいいまでは波高はほとんど変わらず、それ以後海底摩擦などによって減少することがわかる。一方、19日12時には、SSW 方向の海上風であって、波向も SSW 方向のほか W 方向のうねりが重なっている事実も加わって、波高は水深 200 m 以浅より減少している。

これらの現象を説明するために、Fig. 8 には水深 200 m 以浅における波浪のエネルギースペクトルの変化を示す。まず、海上風が NW または NNW 方向でかなり強い場合の水深 200 m と 27 m との2地点におけるエネルギースペクトルの特性では、その高周波部分は平衡領域のてい減特性をよくあらわしているが、ピーク付近に集中したオーバーシュティングの現象がみられ、またピーク周波数付近の波の減衰とその高周波側への移行が見出される。19日の12時の結果では、前述したように、うねりと風波が重なっているために、エネルギースペクトルは2つのピークをもつ。このうち、高周波側のピークをあらわしている風波の波向は SSW 方向であるために、沖方向に向うにしたがってむしろ発達し、これに対して低周波側のピークをあらわす波はW方向よりのうねりをあらわすので、かなり急速に減少していることがわかる。このように、波向との関係において、その減衰特性もかなり変わってくるものということができよう。

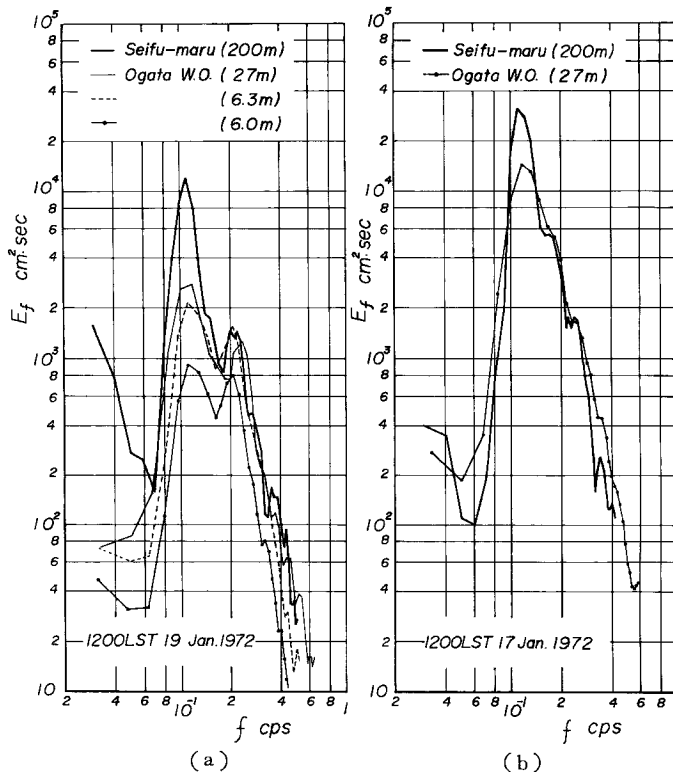


Fig. 8 Changes of power spectra in offshore direction

Fig. 9 は最大波高の水深による変化を示したものであり、図中の曲線は合田³⁾が新潟海岸の波浪観測資料から、最大波高と有義波高との比に及ぼす観測水深の影響を検討したものである。波高があまり大きくないこの観測結果は必ずしもこのような曲線ではあられせないが、選択碎波の現象によって、最大波に近い波が碎波する傾向にあることは、前述した波高の沖方向分布の原因の1つといえる。また、Fig. 10 は水深 27 m 以深と以浅の場合とに分けて、最大波高と有義波高との関係を示したものであり、これから水深の大きい場合には、Longuet-Higgins の関係に近いが、浅くなると両者の比が減少することになり、Fig. 9 の結果に対応する。

以上のように、沿岸海洋における波浪の特性は、その方向スペクトル特性やいわゆる選択碎波などの現象を付加して、海底摩擦などによる変形機構を検討する必要があるし、またさらには合田³⁾も指摘しているように、少なくとも数十米程度の海域での波浪観測を実施して、従来の波浪予知法を再検討する必要があると思われる。

4.4 碎波後の波の変形

昭和41年以来、大潟海岸では浅海における波浪の変形を観測し、海底摩擦係数の推定など大きな成果をあげてきたが、その結果通常理論的に考えられる値に比べて、非常に大きい値を示すことがわかり、摩擦係数と波の Reynolds 数との関係が求められている。これには、海浜における波の反射が大きな問題として提起されてきたが、

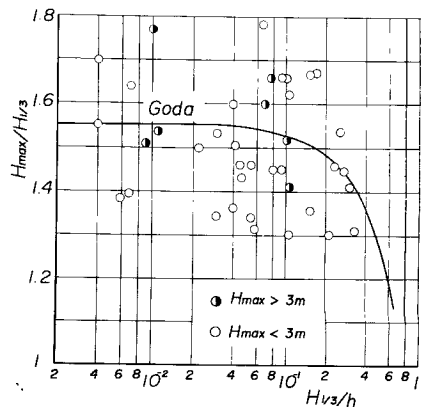


Fig. 9 Changes of maximum wave height with water depth

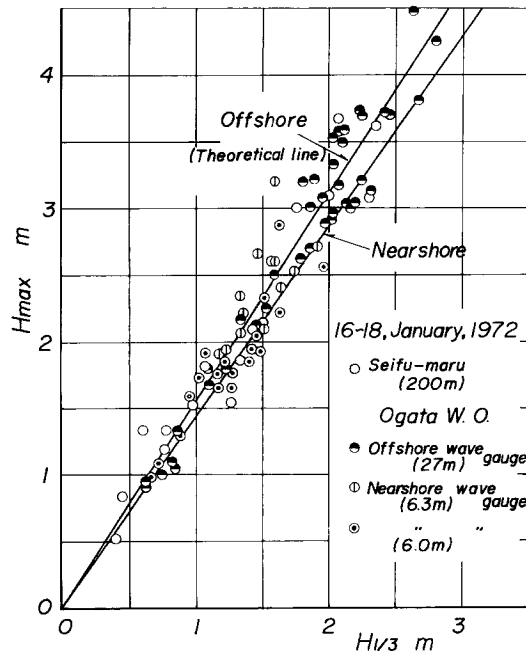


Fig. 10 Relation between maximum wave height and significant wave height

一方前述した選択砕波などはげしいエネルギーの消散が原因しているものと考えられる。とくに、砕波後の波の変形については、なお観察すべき点がきわめて多いといわなければならない。この観点から、**Fig. 11** には水深約 7 m 以浅の第 1 人工島の棧橋に沿って、合計 9 台（うち 3～4 台は波向計測用）の波高計で、波の変形特性を観測した結果の 1 例を示す。図中上部のものは、ごくわずかに砕波（くずれ波型）しつつある波の波高変化を示したものであるが、最初波高は漸減し、水深 5 m 付近で波高は増大して大きく砕波し、急激に波高が減少することがわかる。下部のものは、水深 7 m 付近から、すでに砕波している場合であって、

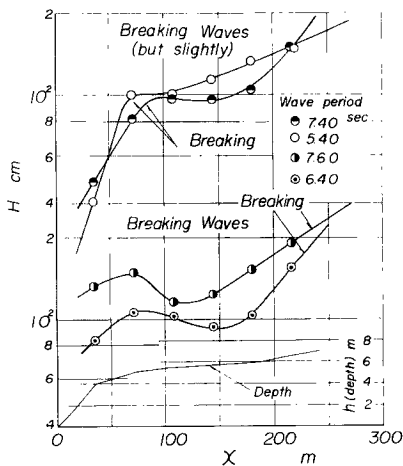


Fig. 11 Changes of height of breaking waves with distance

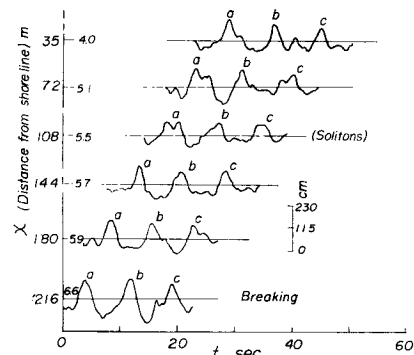


Fig. 12 Changes of wave form after breaking

波高は急激に減少するが、水深 5 m 付近で急増して大きく再砕波して、波高は減少する。ここに示した結果は、うねりの観測結果であるが、**Fig. 12** にはこの過程における波形変化を示す。この結果から、砕波前後の波が複数個の波に分れつし、その分れつした波が重じゅうされ、波高がその場所で急増し、再び砕波する傾向にあるようにみうけられる。その分れつまたは重じゅうの過程では、ソリトン (soliton) 的な特性を示しているようであるが、いうまでもなく詳細な検討が必要であろう。たとえば、砕波前後における波の分れつまたは重じゅうの過程について、各成分波の位相速度が水深および周期または波高のいずれかに依存するかどうかを調べて、ソリトンとしての特性の有無を検討すべきであろう。

以上のように、砕波前後の非線型性のきわめて強い波浪の変形について、その波の分れつ性を考慮した変形機構を解明し、また前述した選択砕波の再現現象の究明とあいまって、波浪による海底摩擦係数の推定を再検討し、砕波によるエネルギーの消散と海底摩擦によるエネルギーの消散とを分離しなければならないと思われる。

4.5 沿岸方向における波浪特性

この海域には佐渡島があり、海岸波浪は多かれ少なかれその影響を受ける。1966年本間ら⁴⁾はこの佐渡島のしゃへい効果を波浪の方向分散の観点から検討し、佐渡北西部の入川での観測結果から、新潟の波浪特性をある程度推算できることを示した。このように、佐渡島のしゃへい効果とともに、沿岸海洋における波浪

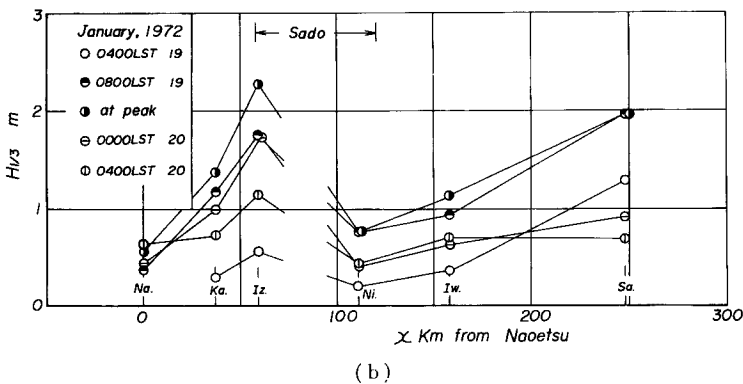
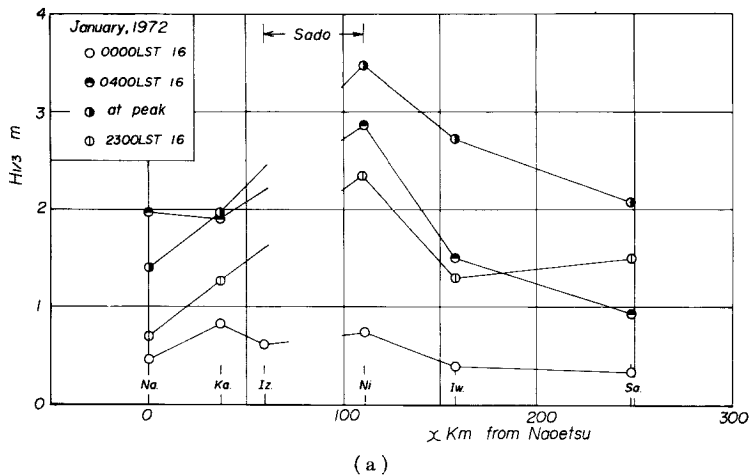


Fig. 13 Longshore distribution of significant wave height

特性の究明にあたっては、その平面分布を明らかにする必要があると思われる。

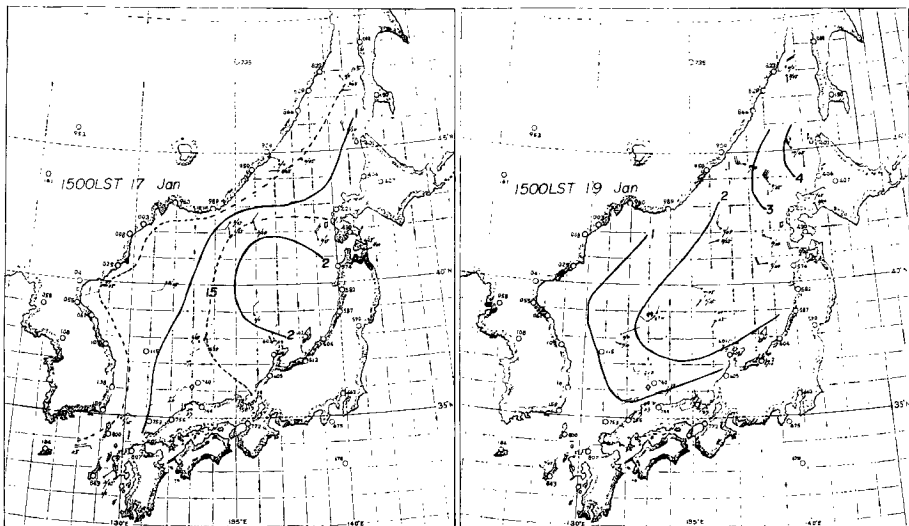
以上の観点から、ここではこの観測によって得られた波浪特性の沿岸方向分布について若干考察する。直江津港より酒田港に至る沿岸6地点の有義波高の変化を示した結果によれば、各地点においてかなり波高が相違し、それが15日より19日までと19日より20日に至る波浪ではその傾向がかなり顕著である。この場合前者では、海上風は NW または NNW で対岸距離も長く、佐渡島の効果が著しく現われる傾向にあり、また後者では SSW または SW 方向の風によるので、佐渡島の効果はほとんどなく、むしろ沿岸地形の特性に大きく支配されるものと考えられる。この傾向は有義波周期についてもほぼ同様である。

Fig. 13 (a) は有義波高の沿岸分布を示したものの1例であるが、これらの結果からつぎのことがわかる。まず、13日より18日までのように、海上風が NNW または NW である場合には、佐渡島の影響が現われ、出雲岬および新潟港ではかなり波高が増大し、その傾向は波向によって若干変わっている。これは本間らが指摘したような波浪の方向分散のほか波の回折や沿岸海域における屈折の効果の集積によるものと考えられるので、海上風の推定とあいまってこれらの定量的な評価も可能であり、またこのような研究を通じてこの海岸における波浪の方向スペクトル特性を検討できるとと思われる。なお、以上の考察においては、さらに観測水深などの局地的な影響も考えなければならないであろう。

つぎに、**Fig. 13 (b)** は、SSW または SW 方向の風による場合であるので、沿岸方向に直江津港より次第に波浪は発達し、海岸地形が突出している出雲岬付近をピークとして、そのかげに入る新潟港では波高は小さく、それから急増しているが、このような場合には、海岸波浪に及ぼす佐渡島の影響はまず存在しない。

なお、**Fig. 14** はいわゆる波浪総観図の1例を示すものであり、図中には波高(m)によって表示されているが、今後これらの結果と沖方向および沿岸方向の観測値と比較して、その大体の精度を評価していく必要がある。

以上のように、この海域における波浪の平面分布とくに沿岸方向分布は、来襲波浪の波向によって大きく相違するので、波浪の方向スペクトルの究明とともに、佐渡島の影響と海上風の特性との関係において研究すべきであると思われるし、また沿岸における波浪の統計的特性を調べて、波浪の地域的特性を明らかにして、海岸災害の危険個所の予測や海岸侵食の長期的予測などの研究を進める必要がある。



4.6 波浪特性とシークラッターとの関係

新潟地方気象台が弥彦山のレーダーによって、大潟海岸とその沖および新潟東港の海域におけるシークラッターを種々のふ角で測定した結果を用いて、波浪特性とシークラッターの出力との関係を調べた。Fig. 15 はその 1 例であって、ふ角 5° で測定した大潟海岸の結果は、そのほかのものに比べて有義波高との関係が比較的良好であり、波高の増大とともにシークラッターの出力が増大することがわかったが、周期の影響はこの観測の範囲では明確でなかった。今後、さらに観測結果を追加すれば、ある程度実用に供せられる可能性があるだろう。

5. 結 語

以上、日本海沿岸における波浪の協同観測の経過と若干の成果について述べたが、いまだ観測資料の解析が緒についたところであるので、今後関係諸兄のご教示をいただき、この貴重な資料の活用に努め、沿岸海洋における波浪特性とその地域的分布を究明して、海岸災害の防止に寄与したいと考えている次第である。なお、この観測において実施した沿岸流・漂砂・海浜変形など、本文において述べなかった成果については、適当な機会に公表していきたいと考えている。

また、こうした波浪観測の重要性を強調するとともに、この協同観測が JONSWAP のような大規模なわが国の波浪観測計画の基礎ともなれば、望外の喜びである。

本協同観測の実施にあたり、格別のご配慮をいただいた舞鶴海洋気象台長、運輸省第 1 港湾建設局新潟調査設計事務所長、新潟県土木部港湾課長、新潟地方気象台長、帝国石油株式会社頸城鉦場長および防災研究所長に深謝するとともに、この観測の実施にあたり熱心にご協力いただいた舞鶴海洋気象台中村船長はじめ関係諸官、気象庁啓風丸関係諸官、新潟地方気象台観測課・予報課関係諸官ならびに当研究所付属白浜海象観測所芹沢技官および大潟波浪観測所内山技官の労に謝意を表明する次第である。

参 考 文 献

- 1) たとえば, Barnett, T.P.: Wind waves and swell in the North Sea, EOS, T.A.G.U., Vol.51, No7, 1970, pp. 544-550.
- 2) 波浪観測グループ：日本海沿岸における冬期波浪に関する観測資料集, 京大防災研年報, 第16号 B, 昭48. 4.
- 3) 合田良実：大水深港湾構造物に関する諸問題, 波と構造物に関するシンポジウムテキスト, 土木学会海岸工学委員会, 昭47. 11, pp. 24-34.
- 4) 本間 仁, 堀川清司, 趙 栄耀：佐渡島の波に対するしやへい作用, 第13回海岸工学講演会講演集, 昭41. 12, pp. 42-49.

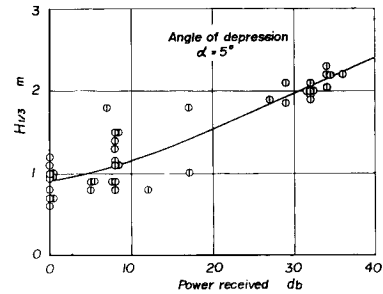


Fig. 15 Relation between significant wave height and received power of sea clutter off Ogata coast