

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

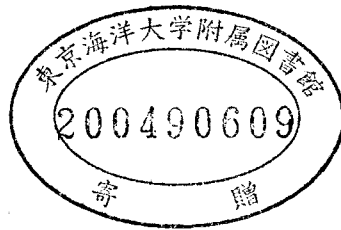
University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

小型漁船の安全操業を目的とした東京湾における波浪特性に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山口, 繁 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/761

小型漁船の安全操業を目的とした
東京湾における波浪特性に関する研究



平成 16 年度

(2004)

東京水産大学大学院

水産学研究科

海洋生産学専攻

山口 繁

目次

第一章	緒言	1
1-1	研究の背景	1
1-2	研究の目的	3
1-3	研究の概要	5
第二章	解析資料	7
2-1	緒言	7
2-2	計測装置	8
2-2-1	マイクロ波式波高計	8
2-2-2	動揺計測装置	10
2-3	計測方法	11
2-4	フィルター処理	14
2-5	吹送距離の定義	18
2-6	各代表値の算出法	18
第三章	波浪スペクトルの時間的変化	22
3-1	緒言	22
3-2	解析資料	22
3-3	波浪スペクトルの時間的変化	23
3-3-1	解析方法	23
3-3-1-1	パワースペクトルの算出	23
3-3-1-2	波浪スペクトルの時間的変化の捉え方	27
3-3-2	結果及び考察	27
3-4	サロゲートデータ法によるパワースペクトルの検証	32
3-4-1	解析方法	32

3-4-1-1	サロゲートデータ法	32
3-4-1-2	サロゲートデータを用いた検証法	38
3-4-2	結果及び考察	38
3-5	結言	51
第四章	波浪スペクトルタイプ	53
4-1	緒言	53
4-2	解析資料	54
4-3	解析方法	54
4-3-1	パワースペクトルの算出	54
4-3-2	パワースペクトルの評価	55
4-4	結果及び考察	58
4-4-1	パワースペクトルの高周波域における傾きの分布	58
4-4-2	パワースペクトルと P-M 型スペクトルとの比較	65
4-5	結言	72
第五章	有義波高の推定	73
5-1	緒言	73
5-2	解析資料	74
5-3	有義波高の推定	74
5-3-1	解析方法	74
5-3-1-1	従来法	74
5-3-1-2	簡易推定式 I	75
5-3-1-3	簡易推定式 II	77
5-3-1-4	簡易推定式 II'	81
5-3-2	推定式の比較	83
5-3-2-1	従来法	83

5-3-2-2	簡易推定式 I	88
5-3-2-3	簡易推定式 II	90
5-3-2-4	簡易推定式 II'	92
5-3-3	結果及び考察	96
5-3-3-1	従来法	96
5-3-3-2	簡易推定式 I	101
5-3-3-3	簡易推定式 II	102
5-3-3-4	簡易推定式 II'	104
5-4	船体横揺れ角振幅（両振幅）の推定	106
5-4-1	解析方法	106
5-4-2	結果及び考察	108
5-5	結言	111
第六章	総合考察	113
	謝辞	118
	参考文献	119

第一章 緒言

1-1 研究の背景

波浪には大きく分けて風波とうねりがあり¹⁾、前者は風により発生し風の作用を受けているものであり、後者は外洋にて発生した風波が、無風の海域に伝播してきたものである。波浪は、陸上から眺めている限りは美しい風景の一部とも言えるものであるかもしれないが、ひとたび洋上にて活動しようとするれば、外洋における大型船の遭難や沿岸域で多い漁船の転覆、また、防波堤や海岸堤防の破壊などを引き起こす大きな要因となる。このため、波浪には比較的昔から関心が払われていたが、現象が極めて複雑であるため、普通の水面波と比較すると研究が非常に遅れていた。

近代的な波浪の研究はH.U.SvedrupとW.H.Munk^{1,2)}により、1940年代後半から始まった。なお、それ以前ではHarold Jeffreys(1924)³⁾が風波の発生に関する優れた理論的研究を行っている。Svedrupらによる波浪推定研究が発端となり、戦後急速に波浪の研究が進行した。Svedrupらによる研究当時では基礎的研究の蓄積がほとんどなかったため、まだまだ波浪研究は未完の領域であった。また、用いている波浪データも目視観測によるものが多く、十分な精度ではなかった。しかし、その後は精度の高い観測値を用いてアメリカの海岸工学者Bredshneider(1958)⁴⁾やWilson(1965)⁵⁾らにより波浪推定式の改良が進み、次第に精度の高いものとなっていった。このようにして完成された波浪推定法はSvedrup, Munk, Bredshneiderの3人の頭文字をとって、SMB法と呼ばれている¹⁾。また、Wilsonの提案した推定式は精度が高く現在でもよく用いられている。

波浪推定法はその後もH.Günther,W.Rosenthal(1979)⁶⁾、L.Cavaleri,P.Malanotte-Rizolli(1981)⁷⁾、C.Graham(1982)⁸⁾などさまざまな波浪推定法が提案されてきた。さらに、第二世代波浪推定モデルとしてL.H.Holthuijsen,N. Booij,T.H.C.Herbers

により HISWA(HIndcast Shallow WAter Waves)⁹⁾が提案され、用いられてきた¹⁰⁾。

現在、第三世代波浪推定モデルとしてWAM(WAve prediction Model)がWAMDI Group(1988)¹¹⁾によって提案され、高い推定精度を示し広く普及し検証されている¹²⁾。日本においても橋本ら(1999)¹³⁾や川口ら^{14, 15)}, T.Kobayashiら(2004)¹⁶⁾によるWAMの検証などが報告されており、また、諸外国におけるさまざまな沿岸域においても用いられている^{17, 18, 19)}。さらにWAM同様、第三世代波浪推定モデルとして、SWAN (Simulating WAves Nearshore)がN.Buuijら(1999)^{20, 21)}により提案されており、沿岸域における波浪推定法として用いられている^{22, 24)}。またShan-Hweiら(2002)²³⁾により台湾における台風による風波のシミュレーションとして用いた報告もあり、第三世代波浪推定モデルであるWAM, SWAN等が幅広く用いられている。

一方、電気工学の分野などで急速に進んだ雑音理論の影響を受けて、イギリスのLonguet-Higginsら(1952,1956)^{25, 26)}により不規則な波浪を記述するための統計的理論が急速に整備された。また、Neumann(1953)²⁷⁾は波の観測結果をもとに初めて波浪のスペクトル型を提案した。同様にW.J Pierson,Jr.とL.Moskowitz(1964)²⁸⁾によりP-M型として波浪のスペクトル型が提案され、現在ではP-M型を基にしたITTC^{29, 30)}, ISSC³¹⁾, JONSWAP^{32, 33)}などのスペクトル型が用いられている。また、Y.Toba(1973)³⁴⁾により同様に鳥羽型として波浪のスペクトル型が提案されている。

その後も波浪スペクトルに関する研究は進められ、例えば合田(1987)³⁵⁾による数値シミュレーションを用いたスペクトルの研究や、風の変化に伴うスペクトルの応答(Toba,Y., et al., 1988)³⁶⁾, 離散スペクトルを用いた波浪の伝播に関する研究(Booij, N., Holthuijsen, L.H., 1987)³⁷⁾などもある。さらにはS.Takedaら(2003)³⁸⁾による台風の通過時といった特殊な条件下における波浪スペクトルの適合性の評価なども報告されている。

しかしながら、上記に記すように今日まで波浪に関する研究が多様に行われてきているものの、波浪の現象が極めて複雑であり、波浪の発生・発達の要因もさまざまであるため、完全な説明はなされておらず、現在も波浪研究は盛んに行われている¹⁾。

1-2 研究の目的

海に囲まれた島国である日本にとって、漁船漁業は非常に重要な産業である。日本における漁船は、その大半が20トン未満の小型漁船である。日本の漁船のうち、約98%が20トン未満の小型漁船であり、さらに約79%を7トン未満の小型漁船が占めている³⁹⁾。このような小型漁船にとって、大型船などでは大きな影響とはならないような1m前後の波高でさえ大角度動揺を生じる可能性があり、甲板上での作業が困難となるばかりでなく、危険を伴う場合が十分に考えられる。昭和63年から平成9年までの10年間で発生した日本における海難事故のうち、約39%が漁船である⁴⁰⁾。また、プレジャーボートも含めた小型漁船の海難事故は多発しているのが現状である⁴¹⁾。

しかしながら、このような比較的低い波高を対象としているような研究は少なく、また、小型漁船の安全性の確保を目的としているような研究報告^{42, 43)}はさらに少ない。特に海域を東京湾に限定すると、ほとんど見られない。

東京湾は非常に船舶の輻輳した海域である。平成12年10月30日～31日の48時間で観測された隻数は8,525隻で、総隻数の8割(84%)以上が昼間の航行船であり、船型別では5総トン未満が3,928隻(うち漁船が3,353隻)で、昼間総隻数の半分近く(46%)を占めており⁴⁴⁾、小型漁船の隻数が非常に多い。さらに48時間中に観測された操業中の漁船は極めて多く、のべ7988隻にも及んでいる⁴⁵⁾。

Fig.1.1に有義波高と東京海洋大学実習艇「ひよどり」(19GT)の最大横揺れ角振幅との応答関係を示す。この応答関係は「ひよどり」を用いて東京湾にて実計測した資料を基に解析したものであり、有義波高は船体動揺と同時に計測した海面変位より求めた値である。図に示すように有義波高が1m付近で、最大で40deg近い揺れを計測しており、1m前後の波浪が大動揺を生じさせていると考えられる。この応答関係はあくまでも「ひよどり」のものであるが、5トン未満の漁船を考慮すれば、さらなる大動揺を生じさせることが十分に考えられ、操業に支障を来すだけでなく、危険を伴う可能性は非常に大きくなると考えられる。

このような日本における小型漁船の割合や、東京湾における小型漁船の現状、さらには波浪が小型漁船の船体動揺へ与える影響を踏まえると、小型漁船の安全操業に支障をきたすような波浪に対する解析は必要であると考えられる。そこで、小型漁船に大きな影響を与えるような1m前後の波浪を研究対象とし、その波浪特性を捉え、実際の現場において誰しもが容易に波浪推定を行えるような方法の提案を行い、小型漁船の安全操業への一助とすることを目的とした。

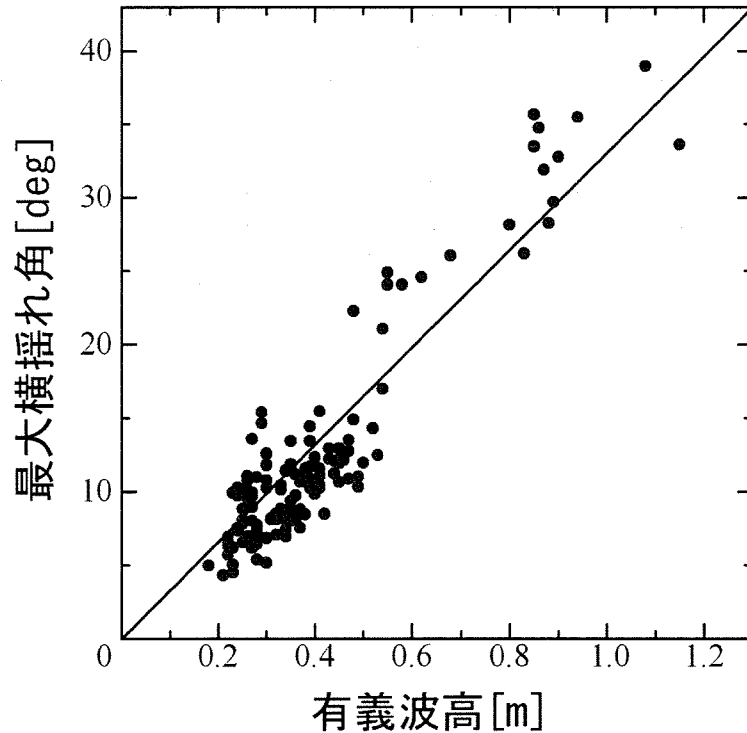


Fig.1.1 Relationship between significant wave height and maximum of double amplitude ship roll angle

1-3 研究の概要

本論文は6章からなる。本章である緒言に続き第二章以降の概要を以下に記す。

第二章「解析資料の計測」では、本研究で用いている波浪の解析資料の計測方法等について述べる。本研究で用いている解析資料は全て東京湾において東京海洋大学実習艇「ひよどり」を用いて計測したものであり、計測方法や、各計測機器の解説等について詳しく述べる。また、計測された海面変位資料等の解析前に行う統計的処理等について述べ、さらに本研究で用いる吹送距離の定義についても詳しく述べる。

第三章「波浪スペクトルの時間的变化」では、実海面で計測された海面変位資料をもとにパワースペクトルの時間的变化を捉え、パワースペクトルのピーク周波数帯の変化から、小型漁船の安全性をふまえた考察を行う。具

体的には海面変位資料を短時間で区切り、各時間分割における変化と、原パワースペクトルとの相違点をとらえ小型漁船の船体横揺れ固有周期との関係をふまえた考察を行う。また、従来から用いられているスペクトル法における問題点等について考察する。波浪の時間的な定常性の維持をパワースペクトルの変化と共に考察し、また、非定常性有する可能性について、サロゲートデータ法⁴⁶⁾を用いて検討する。

第四章「波浪スペクトルタイプ」では、波浪スペクトルタイプの検討を行い、東京湾における波浪スペクトルタイプへの適用の可否について述べる。ここでは、実計測資料を基にして求めたパワースペクトルの両軸に対数を取り、高周波域におけるパワースペクトルの特性を求めることにより、東京湾におけるスペクトルタイプの分布を捉え、さらに一般的に用いられるスペクトルタイプとの適合について考察を行う。

第五章「有義波高の推定」では、実計測された海面変位、吹送距離および風速を基に東京湾における簡易推定式を提案し、その有効性について検討する。実計測された資料を基にして提案式中の各係数の推定を行い、入力吹送距離および風速のみの簡易推定式を提案するものである。また、従来から広く普及しているWilson⁵⁾の推定式との比較を行い、その有効性について考察する。さらに波浪と船体動揺との応答間関係を基に、推定した有義波高を用いて船体動揺の推定までを行い、小型漁船への安全性を考察する。

第六章では、本論文の成果をまとめ、小型漁船の安全性確保への有用性、および今後の課題等について述べる。

第二章 解析資料

2-1 緒言

波浪の研究において波浪計測は必須であり、海面状態を知る上で非常に重要である。これまでさまざまな計測方法が提案されており、実用化されている。マイクロ波ビームを海面に向かって発射し、海面で反射し、戻ってくるまでの時間を測定する方法や、海面付近に不動点を設け、これを基準とした浮体の変動により測定を行うブイ型波浪計などがある。さらに、衛星に設置したマイクロ波高度計を用いる方法などもある¹⁾。

波浪情報を提供している機関もあり、例えば(独)港湾空港技術研究所による全国港湾海洋波浪観測年報などがあり、また近年ではインターネット等の急速な普及に伴い、ホームページ上において波浪情報の提供を行っている(独)港湾空港技術研究所のナウファス (<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>) などがある。これにより誰しもが容易に波浪情報を入手することが可能である。

ただし、このような提供されている波浪情報から、短時間における波浪の時系列資料を得ることは非常に困難である。波浪は風速等の変動に対応し、緩やかに変動しているため、長時間の波浪において定常な確率過程と見なすことは困難である。しかしながら、10分ないし20分程度の短い時間における波浪の統計的性質の変化は極めて緩やかであるため、十分な近似で定常な確率過程と見なすことができる。

そこで本研究ではこのような波浪の定常性を考慮し、短時間における波浪の時系列資料を解析の対象とした。波浪計測に用いた計測装置は、東京海洋大学実習艇「ひよどり(19GT)」の船首先端に設置したマイクロ波式波高計(株式会社鶴見精機 WM-2型)である。また同時に動揺慣性測定装置(株式会社トキメック TMOS-1500型)を用いて、「ひよどり」の船体動揺の計測

を行った。計測装置の原理について以下に概説する。

2-2 計測装置

2-2-1 マイクロ波式波高計

マイクロ波式波高計とはマイクロ電磁波を利用し、マイクロドップラー効果を用いて船舶上の固定位置より海面の上下変位量を測定して海面の変位を計測するものである。ドップラーセンサのマイクロ波発信器からのマイクロ波をホーンアンテナにより海面に向けて発射すると、海面からの反射波がセンサ部に受信され、センサ部の2組の検波ダイオードにより海面の上下動による発生ドップラ周波数がその上下動の極性も含めて検出される。ドップラ周波数を可逆性カウンタにより積算することにより海面の変位量が測定できる。

船舶に搭載した場合この方式で測定した海面変位は船体自身の上下動揺量も含んでいるため、ドップラーセンサの取り付け位置付近に上下加速度センサを設置し、積分回路により船体上下量を求め、先の海面変位量の値から差し引き演算を行い、いわゆる絶対海面変位量を算出する。また、加速度センサは適当なダンピング特性を持ったジンバル装置に搭載し、船体の横揺れ・縦揺れによる影響を取り除いている。本装置の主な仕様ならびに回路構成は以下の通りである。

本装置の波高精度：測定値の±10%以内（周期15s以下に対し）

表示：有義波高，及び平均出合い周期（デジタル3桁）

出力：実波高 $\pm 5[\text{v}] / \pm 10[\text{m}]$

平均出合い周期 $5[\text{v}] / 20[\text{s}]$

レーダー波高（相対波高） $1[\text{v}] / 10[\text{m}]$

船位（上下変位） $1[\text{v}] / 10[\text{m}]$

回路構成：

- 1) ドップラーセンサ信号から海面の変動を演算する回路
- 2) 加速度計の信号から船位の変動を演算する回路
- 3) 1) と2) の出力の差から実波高を演算する回路
- 4) 3) の出力から有義波を演算する回路
- 5) 3) の出力から平均周期を演算する回路

本計測では、船体上下量出力端子と実波高出力端子からの出力を記録した。それぞれの出力は、船位上下量が $\pm 1[\text{v}] / \pm 10[\text{m}]$ 、実波高出力は $\pm 5[\text{v}] / \pm 10[\text{m}]$ となっている。Fig.2.1に波高計測装置の構成図を示す。

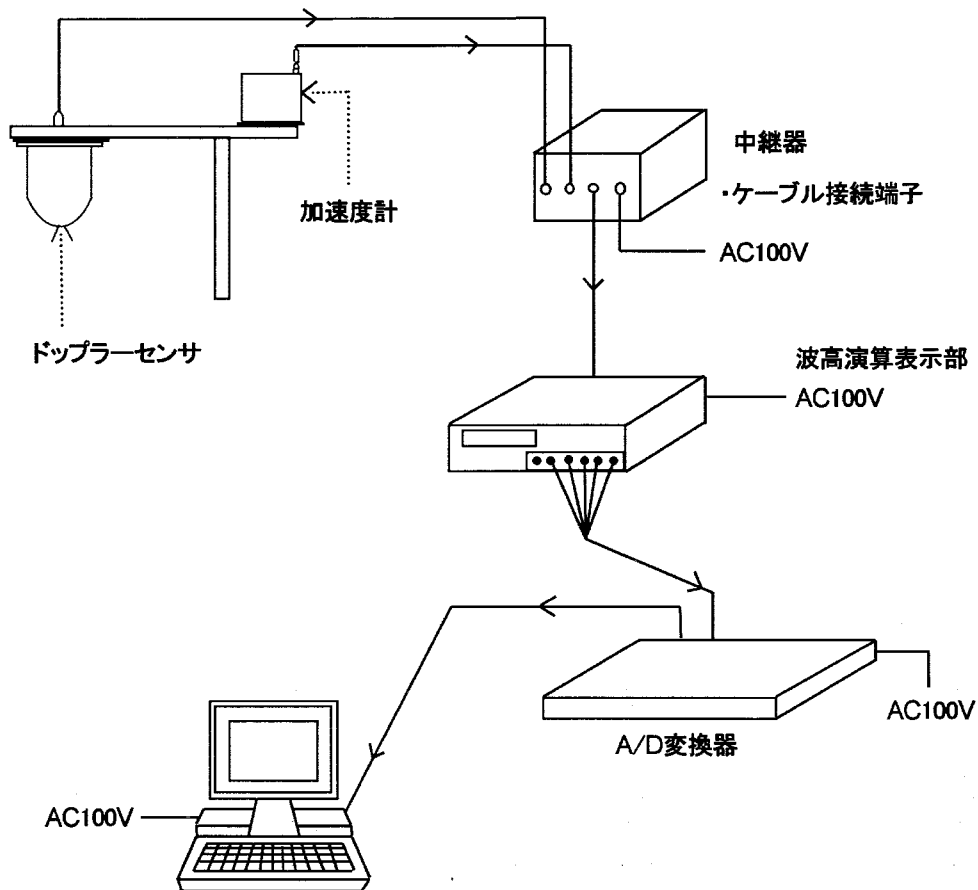


Fig.2.1 System block diagram of the wave height measuring device

2-2-2 動揺測定装置

動揺測定装置TMOS-1500型は3次元空間を航行する航走移動体の方位角，姿勢角，角速度，及び加速度を計測して連続出力するシステムである。計測方式は振動ジャイロ（TFG-160）と加速時計（TA-25）をそれぞれ3個ずつ，磁気方位センサ（MAS-20G／MAS-20）1個を移動体に設置したストラップダウン方式である。

当該装置は7個のセンサ出力から，移動体固定座標系より地球座標系に変換する座標変換行列を求め，計算機内部に仮想の指北，水平プラットフォームを作り，地球座標に対する移動体の方位角，姿勢角，ロール角などを出力する。

装置の構造は4つの部分に分けられている。

(1) センサユニット：振動ジャイロ（TFG-160）及びサーボ加速度計（TA-25）がそれぞれ3個ずつ内装され，機体の三軸角速度及び加速度を検出するユニットである。

(2) 磁気方位センサ：地磁気より方位を検出するセンサである。磁気方位センサは，2種類あり下記の使用条件より，MAS-20G（ジンバル付き）またはMAS-20（ジンバル無し）のいずれを使い分ける。

MAS-20G（ジンバル付き） 船舶等の姿勢計測

MAS-20（ジンバル無し） 自動車等の加速度が大きいものに使用する。

(3) 演算ユニット：(1)と(2)の入力信号を基にマイクロコンピュータが演算処理し，方位角，姿勢角，三軸角速度及び三軸加速度のアナログ信号を外部へ出力するユニットである。

(4) 電源ユニット：各ユニットに必要な電源（+5，±15[v]）を供給するものである。

本装置が観測するロールの分解能, 周波数特性と測定精度はそれぞれ0.025deg, 15Hz (1次ローパスフィルタ) と±0.25°以下である。Fig.2.2に動揺測定装置システム構成図を示す。

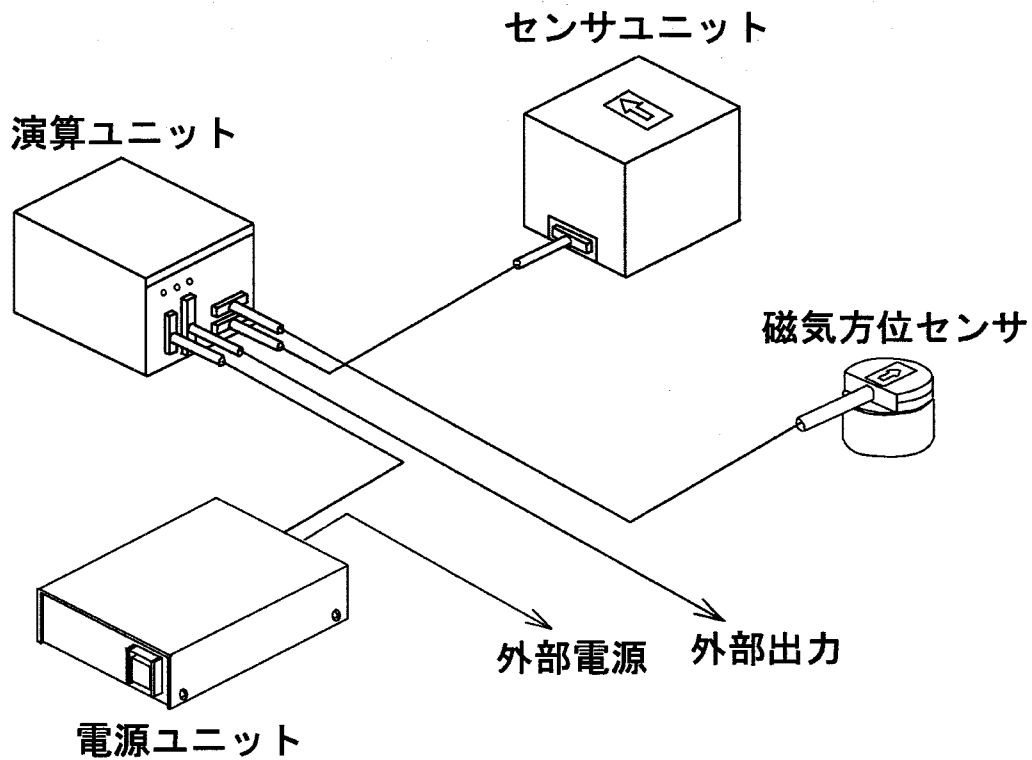


Fig.2.2 System block diagram of the TMOS-1500

2-3 計測方法

本研究では, 東京海洋大学実習艇「ひよどり」を用いて海面変位および船体動揺の計測を行った。実習艇「ひよどり」の主要目をTable.2.1に, 線図および写真をそれぞれFig.2.3, Fig.2.4に示す。

Table.2.1

総トン数[GT]	L_{OA} m	L_{PPM}	B_m	D_m
19.00	19.70	16.55	4.50	1.55

マイクロ波式波高計は船首先端に立てた支柱に設置し, 加速度計をその後方に設置した。動揺測定装置は船舶のほぼ重心近くの位置(研究室)に設

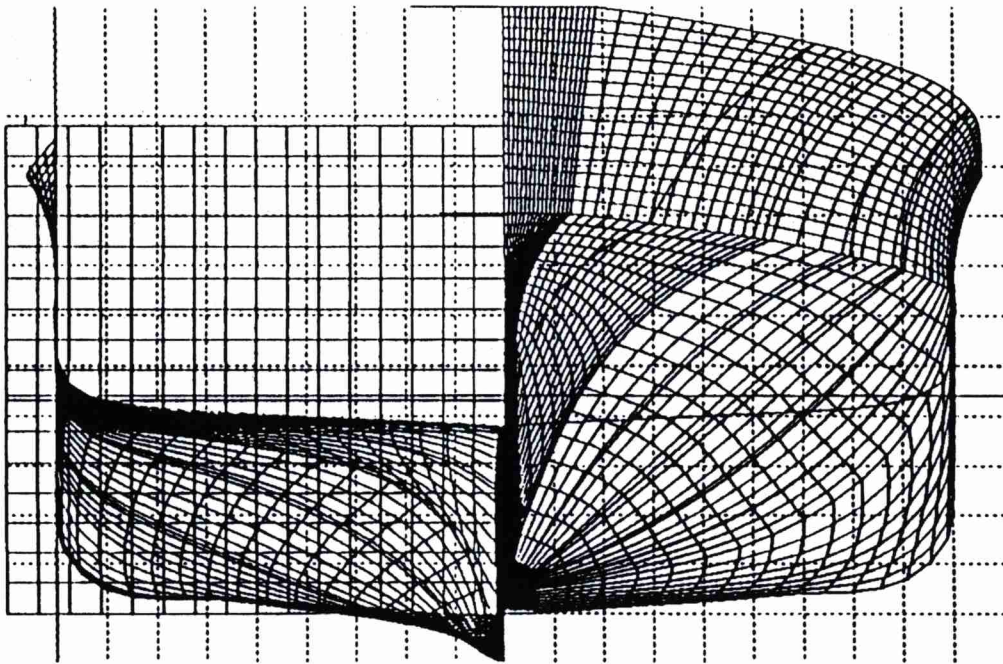


Fig.2.3 Lines (body plan) of The research vessel,"Hiyodori", of Tokyo University of Marine Science and Technology



Fig.2.4 The research vessel,"Hiyodori", of Tokyo University of Marine Science and Technology

置した。サンプリング時間間隔は0.1sで、1回の計測時間を819.2sで海面変位および船体動揺を同時に計測した。また、本研究で用いた解析資料は1997年度から2003年度までに計測された167計測分の資料で、漂泊状態時に計測したものである。

計測海域は東京湾内であり、その計測海域図をFig.2.5に示す。丸印で示した海域が主たる計測海域であり、計測日の風向等により吹送距離を長くとれる条件と、一日の計測で往復が可能な範囲等を考慮したものである。

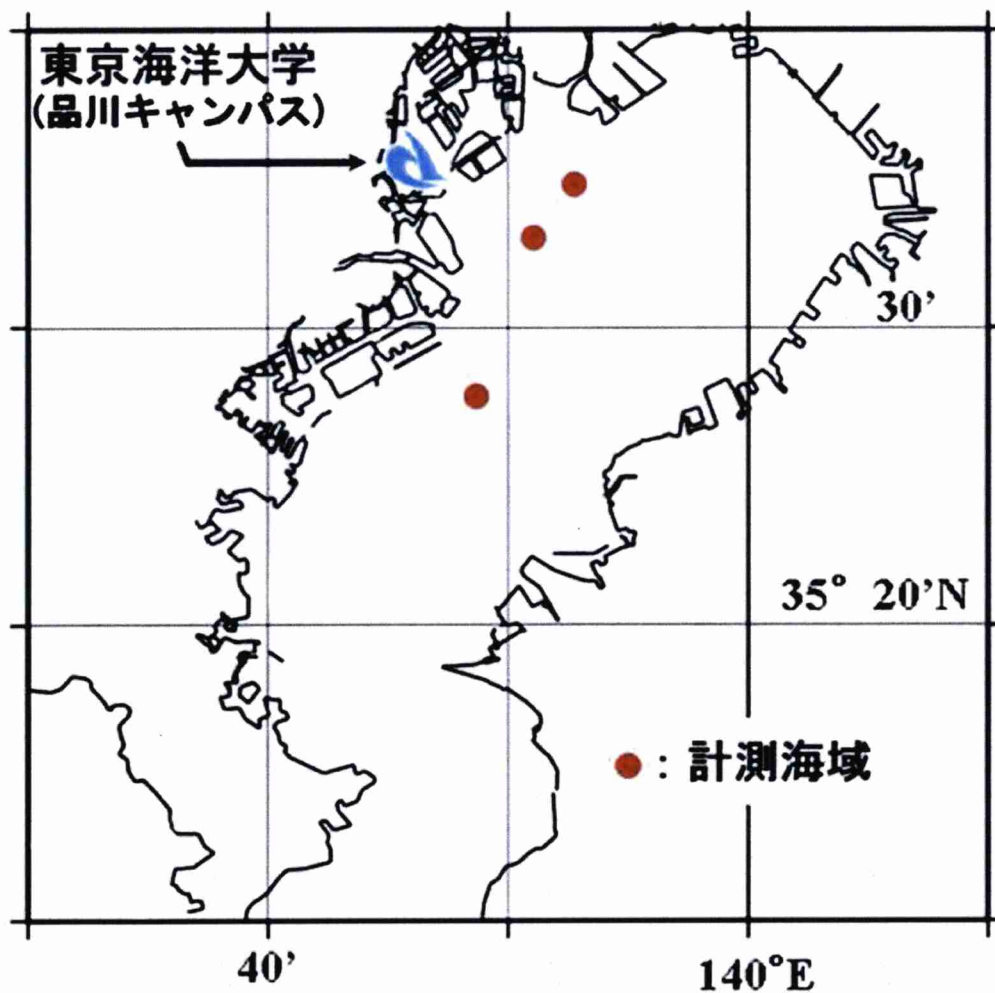


Fig.2.5 The observation points in Tokyo Bay

2-4 フィルター処理

海面変位の計測時において、船首先端に波高計を固定しているため、船体の縦揺れや上下揺れ等の影響により、波高計自体の変動があり、その変動量を海面変位と同時に記録してしまう。また、うねりのような長周期波も同時に計測される。そのため、波高計の後部に設置した加速度計により、船体動揺の影響による波高計自体の変動分等を差し引いて計測を行っている。

しかしながら、実際には加速度計のみでは波高計自体の変動分等の成分波を取り除くことは困難であり、実質、計測された海面変位のままから船体動揺に影響を及ぼしているような波浪を取り扱うことは困難である。実際に計測された海面変位の時系列資料をFig.2.6に示す。また、Fig.2.6に用いた解析資料のパワースペクトルをFig.2.7に示す。なお、パワースペクトルに関する算出方法等においては、第3章および第4章に示す。

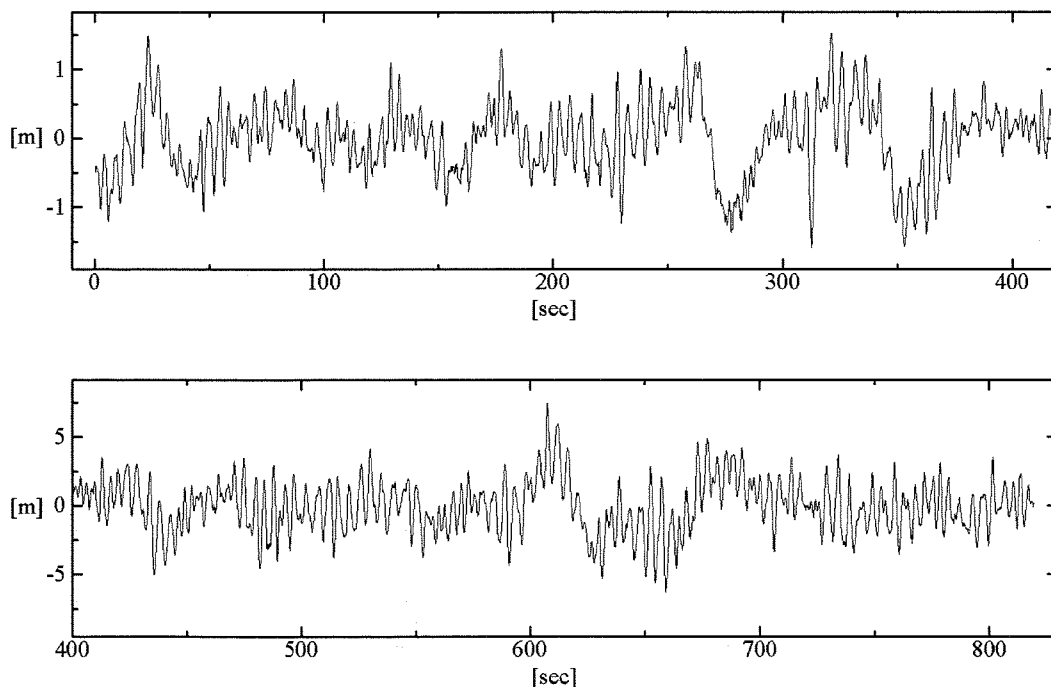


Fig.2.6 Time series of the wave data

Fig.2.6に示すように長周期波の成分に短周期波の成分が乗るように計測されており、また、Fig.2.7に示すパワースペクトルに表されるように、0.0Hz～

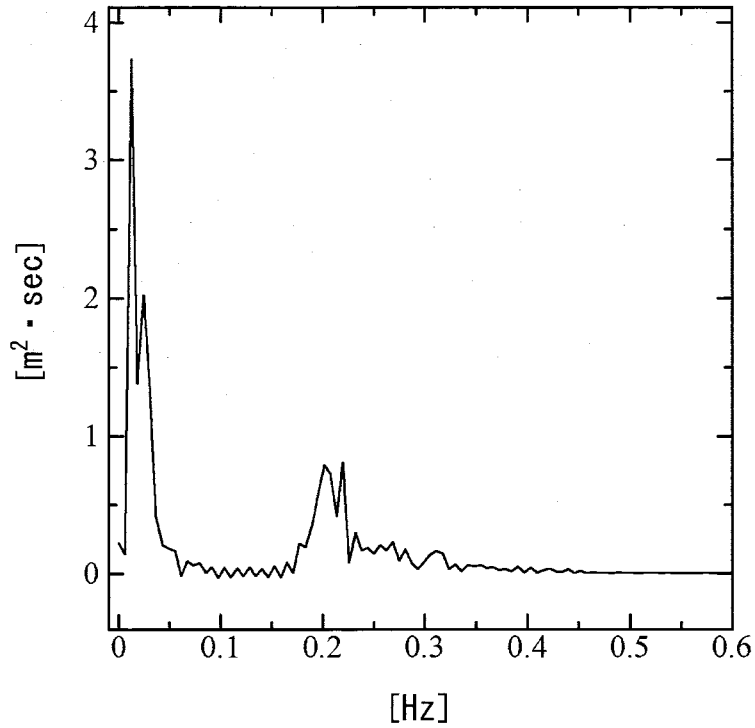


Fig.2.7 Wave spectrum of the wave data

0.1Hz付近において大きなピークが見られる。つまり、長周期波の成分と短周期波の成分とが同時に記録されており、直接船上作業に支障を来すような短周期波を扱う上で、この長周期波を取り除く作業を行わなければならない。

そこで、本研究では長周期波を取り除くため、フーリエ級数を用いたフィルター処理を行った^{47, 48, 49)}。

(2.1)式にフーリエ級数を示す。ただし、 a_0 , a_n , b_n はフーリエ係数を表す。

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x) \quad (2.1)$$

さらに、フーリエ係数 a_0 , a_n , b_n は次のように求める。ここで、 T は周期を

表す。

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) dx \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos n\omega x dx \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin n\omega x dx \quad (2.4)$$

これによりフーリエ係数が求められ、さまざまな周期の成分波に分けることができる。しかし、実際に使用する海面変位の時系列資料は連続しておらず、離散であるため、次の(2.5)、(2.6)式を用いてフーリエ係数を算出し、各成分波に分解した。ただし、 $m = n/2$ である。

$$a_l = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} f_i \cos \frac{\pi l i}{m} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (2.5)$$

$$b_l = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} f_i \sin \frac{\pi l i}{m} \quad (l = 1, 2, \dots, n) \quad (2.6)$$

これより解析資料を各成分波に分解し、長周期成分波と短周期成分波とに分け、(2.1)式を用いて各成分波の再合成を行い、直接船上作業に支障を来すような短周期波を取り出した。実際にFig.2.6に示す時系列資料を長周期波と短周期波に分けた図をFig.2.8に示す。Fig.2.8の上図は長周期波を表し、下図は短周期波を表す。

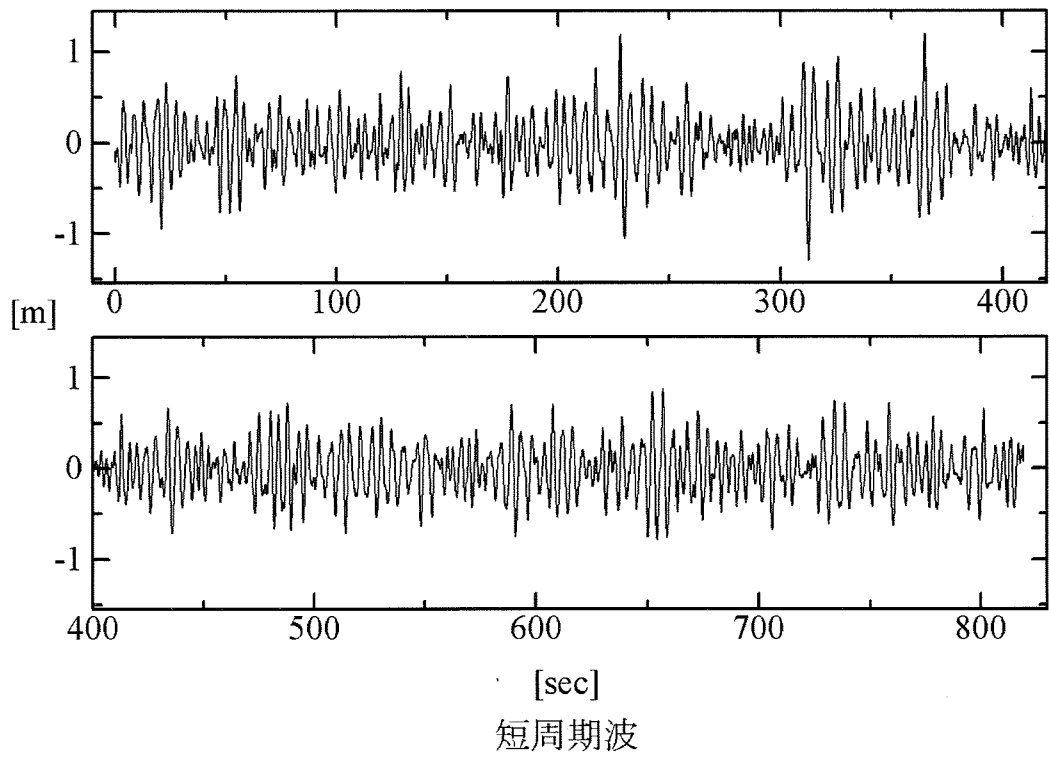
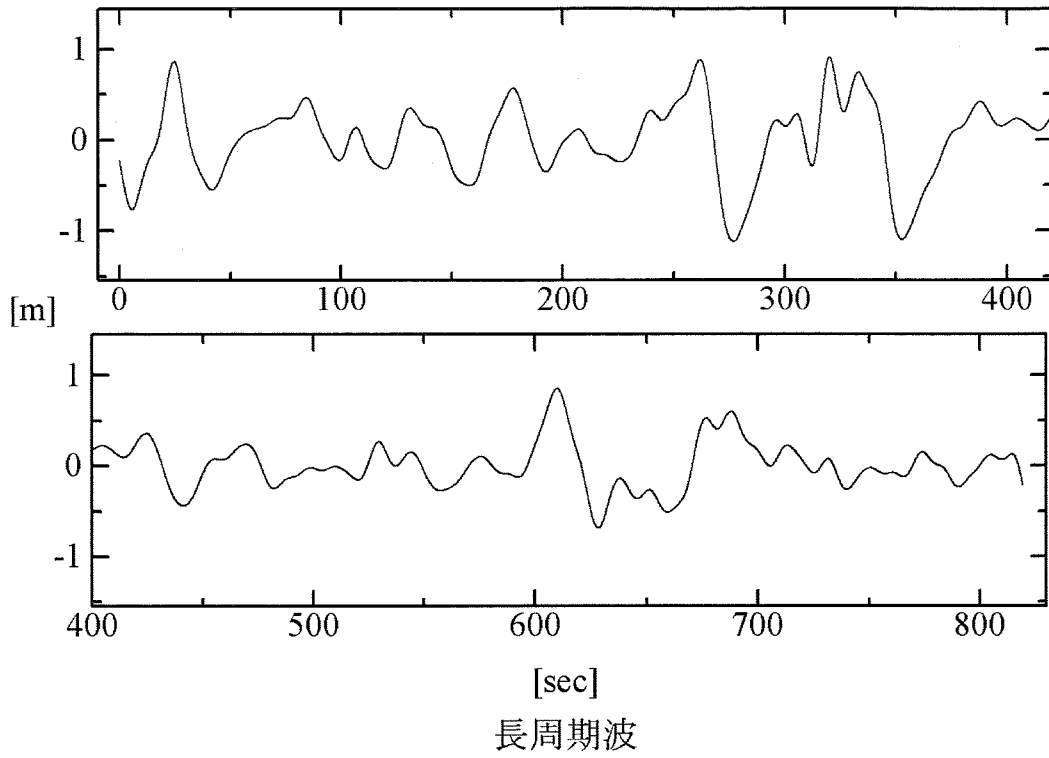


Fig.2.8 Long time series and short time series of the wave data

2-5 吹送距離の定義

海面変位および船体動揺の計測時に、船体に備え付けられている風向・風力計の値、ならびに船の位置を同時に記録した。

本研究ではFig.2.9に示すように、記録した風向を基に一定の風力で吹いているものと仮定し、陸地の端から計測を行っている船までの距離を吹送距離とした。なお、吹送距離は海図上で求めた。さらに、本研究で用いた吹送距離の資料は最短で1280[m]であり、最長で49800[m]であった。

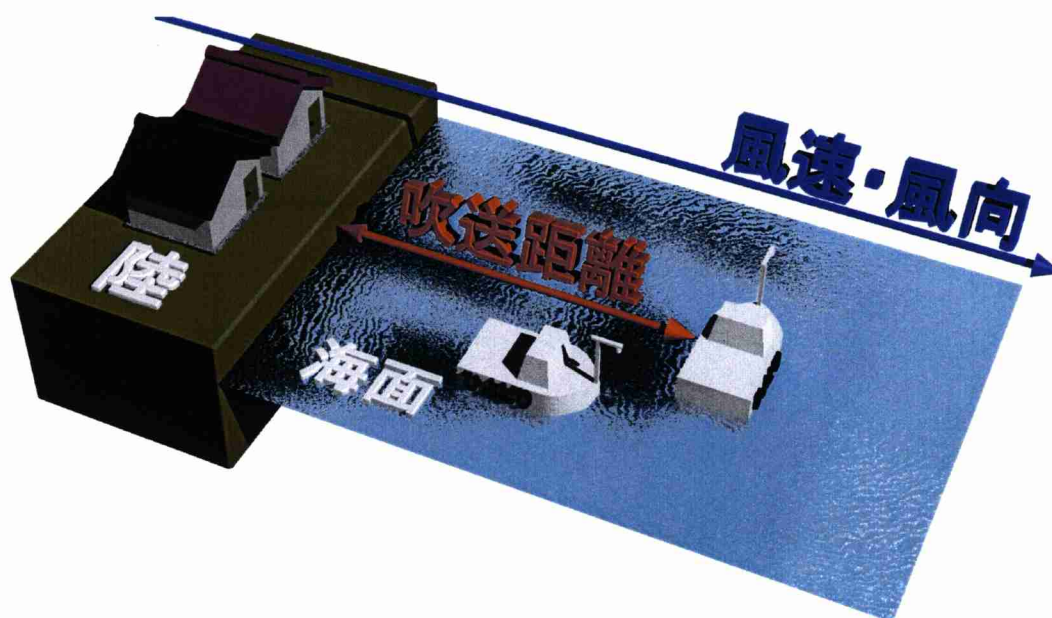


Fig.2.9 Definition of fetch in this paper

2-6 各代表値の算出法

Fig.2.10に実際に計測した資料の一例を示す。上に海面変位を、下に横揺れ角変位を表す。なお、この海面変位と横揺れ角変位は同時に記録されたものであり、海面変位に対する船体の横揺れの応答を示している。

これらの得られた時系列資料は、0.1s毎の離散値であり、これだけでは平均値、有義値、最大値等の値は得られない。そこでFig.2.11に示すような、ゼロアップクロス (zero-up crossing method) およびゼロダウンクロス法 (zero-down

crossing method) を用いて諸統計値を求めた⁵⁰⁾。前者はFig.2.11の上図で示すように水位が上昇しながら平均水面と交差する時刻で区切って波高と周期を決定する方法である。極浅海域での砕波現象等の把握に相当であると考えられているのが、後者のゼロダウncロス方であり、Fig.2.11の下図で示すように水位が下降しながら平均水面と交差する時刻で区切って波高と周期を決める方法である。なお、日本では従来からゼロアップクロス法がよく用いられてきている。

これにより、波形の一波一波の値を読み取り、それぞれ一計測毎の平均値、有義値、最大値の算出を行った。Fig.2.10に示した計測資料の一例の各値（ゼロアップクロス法）は、海面変位では平均波高、有義波高、最大波高が、それぞれ0.76m, 1.18m, 2.24mであり、横揺れ角変位では平均横揺れ角、有義(1/3最大)横揺れ角、最大横揺れ角が、それぞれ14.6deg, 23.0deg, 33.4degであった。ただし、横揺れ角の場合、ゼロアップクロス法およびゼロダウncロス法が山から谷、もしくは谷から山までの値であるので、両振幅ということとなる。

本研究で用いた全解析資料の内、有義波高は最小で0.18m、最大で1.18mであり、さらに最大波高では2.24mを示す資料を得た。また、船体横揺れ角（両振幅）では、最大で40.5degを示す資料を得ている。

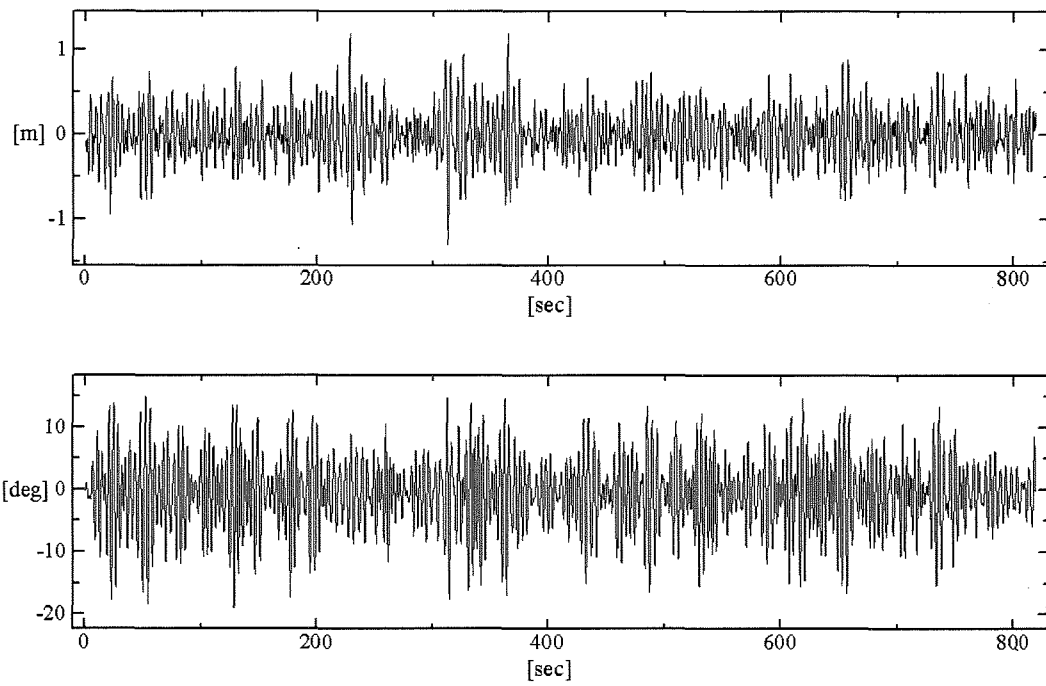
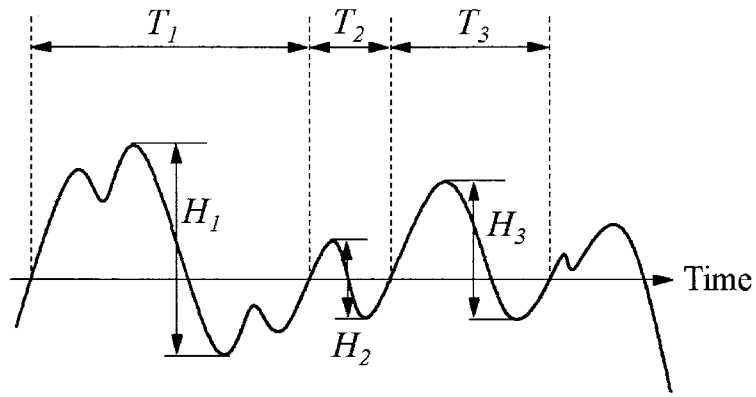
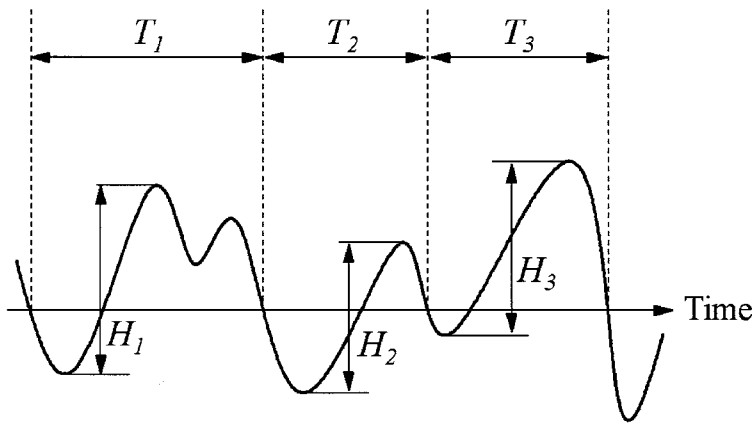


Fig.2.10 Time series of a wave data and roll data



zero-up crossing method



zero-down crossing method

Fig.2.11 Zero-up crossing and zero-down crossing method

第三章 波浪スペクトルの時間的变化

3-1 緒言

波浪の発生・発達に関わる要因はさまざまであり、波浪を構成する成分も多種多様である。第二章においても記したように、長時間の波浪において定常な確率過程と見なすことは困難であるが、10分ないし20分程度の短い時間における波浪の統計的性質の変化は極めて緩やかであるため、十分な近似で定常な確率過程と見なすことができる¹⁾。

しかしながら、甫喜本らによる北海道渡島半島内浦湾（噴火湾）における波浪の定常性・非定常性に関する研究報告⁵¹⁾では、噴火湾における波浪パワースペクトルの短時間における変動を捉えることにより非定常性を有すると結論付けており、非定常パワースペクトルの予測が行われている。

そこで本章では、東京湾における海面変位の計測資料を基に、小型漁船の安全操業という観点から考慮した波浪スペクトルの時間的变化の検証を行った。また、波浪スペクトルの時間的变化を捉える際の問題を浮き彫りにし、スペクトル解析を行う上での注意点等の提言を行うことを目的とした。

3-2 解析資料

本章で用いた解析資料は、第二章で記したとおり、東京海洋大学実習艇「ひよどり」の船首先端に設置したマイクロ波式波高計により漂泊状態で計測した海面変位である。1回の計測時間は819.2sであり、サンプリング時間間隔は0.1sである。

使用した解析資料は167計測分の解析資料であり、有義波高で0.18m～1.18mであり、平均周期は1.76s～3.66sであった。

3-3 波浪スペクトルの時間的变化

3-3-1 解析方法

3-3-1-1 パワースペクトルの算出

本章では東京湾における波浪周波数特性を捉えるために、167計測分全てにおいてパワースペクトルの算出を行った。パワースペクトルの算出には直接フーリエ変換を行い算出するピリオドグラム (preiodogram) 法を用いた^{47, 52)}。ピリオドグラム法とは、フーリエ振幅の二乗でスペクトルを表現するものである。

ピリオドグラム法を用いたパワースペクトルの算出方法は以下の通りである。

まず、下記の(3.1)式を用いて海面変位の時系列資料 y_n に対しフーリエ変換を行う。ここで、 $k=0, \dots, N$ である。

$$Y_k = \Delta t \sum_{n=1}^N y_n \exp(-i2\pi kn/N) \quad (3.1)$$

これより、下記の(3.2)式を用いてパワースペクトル($S(f)$)の算出を行った。

$$S(f) = \frac{1}{N\Delta t} |Y_k|^2 \quad (3.2)$$

なお、自己相関関数よりフーリエ変換を行い算出するBlackman-Tukey法⁵²⁾は計算速度は速いものの、分解能が低いため短時間におけるパワースペクトルの形状を捉えにくいため、用いていない。

Fig.3.1にピリオドグラム法及びBlackman-Tukey法を用いて求めたパワースペクトルの一例を示す。上図がピリオドグラム法を用いた場合であり、下図がBlackman-Tukey法を用いた結果である。なお、両手法を用いる際に使用した資料は同一のものである。また、Blackman-Tukey法の計算方法は下記の通りである。

まず次の(3.3)式により海面変位の時系列資料(y_n)の自己相関関数 $C(\tau)$ を求める。ここで、 $\tau(=0, \dots, m : m = N/10)$ はTime Lagを表す。

$$C(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \cdot y_{n+\tau} \quad (3.3)$$

これにより得られた自己相関関数を次の(3.4)式に示すフーリエ変換を用いてパワースペクトル($S(f)$)の算出を行った。なお、 Δt はサンプリング周期(0.1s)を示す。

$$S(f) = \left[C_0 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} C_i \cos \left(\frac{i\tau\pi}{m} \right) + C_m \cos \tau\pi \right] \Delta t \quad (3.4)$$

Blackman-Tukey法は古くからある方法ではあるが、計算の原理が明確でプログラム上もとくに困難な点がない上、分解能がやや低くなりがちではあるが安定したスペクトル推定が可能であるため、現在もなお利用されている方法である。

また、パワースペクトルの時間的変化を捉える指標として、次の(3.5)式で表されるパワースペクトルの帯域幅を示す帯域幅パラメータ ε を用いた。ここで、 m_n はパワースペクトルの原点まわりの n 次モーメントであり、(3.6)式により表される。また、パワースペクトルの時間的変化の検証において、Blackman-Tukey法では時系列を細かく区切るに連れ、分解能も大きく落ちるために帯域幅パラメータ ε の値が大きく変化し、バラつきが激しくなる現象をピリオドグラム法を用いた計算結果を使用することにより、回避した。

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (3.5)$$

$$m_n = \int_0^\infty S(\omega) \omega^n d\omega \quad (3.6)$$

Fig.3.1に示すのは解析資料が200.0s間の海面変位における結果を示すが、上図に示すようにBlackman-Tukey法を用いた結果では分解能不足のために

波形が崩れてしまい、細かい周波数帯での表示が不可能となっている。これは、Blackman-Tukey法の計算過程において自己相関関数を用いているため、Time Lagを一解析資料におけるデータ数の十分の一としていることが原因である。計算速度が速いのもこのためであるが、使用する解析資料の時間間隔を短くすればするほどTime Lagの数が減るため分解能が低下してしまう。また、Time Lagを多く取ればそれだけ分解能も向上するが、自己相関関数自体の精度が低下するため、それに伴い自己相関関数を基に算出されるパワースペクトルの精度も低下してしまう。

これに対し、Fig.3.1の下図に示すピリオドグラム法を用いた結果では十分な分解能を持ち合わせ、さらに直接フーリエ変換を行っているため、精度も保障される。ただし、一解析資料分のデータ全てに対してフーリエ変換を行うため、計算に時間を要する欠点がある。

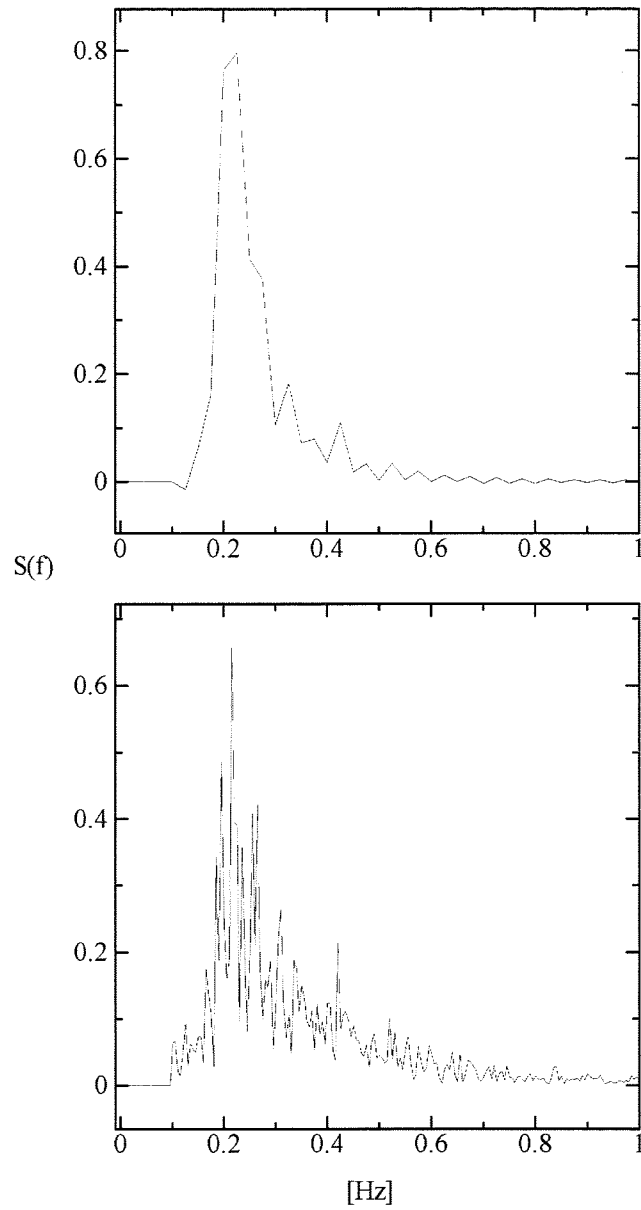


Fig.3.1 Wave spectrums with the Blackman-Tukey method and Periodogram method

3-3-1-2 波浪スペクトルの時間的変化の捉え方

本研究で用いた海面変位の解析資料167計測分のパワースペクトルを上記のピリオドグラム法を用いて算出し、さらに、解析資料を400.0sを境に区切り、それぞれのパワースペクトルを同様にピリオドグラム法により求めた。また、解析資料を200.0s毎に区切り、上記のようにパワースペクトルの算出を行った。

これにより、解析資料の基のパワースペクトル、400.0s毎のパワースペクトル及び200.0s毎のパワースペクトルを比較することにより、波浪のパワースペクトルの時間的変化を捉え、小型漁船の安全操業に支障を来すような波浪の周波数特性の解析を行った。

3-3-2 結果及び考察

パワースペクトルの短時間における変化を捉えるために400.0sおよび200.0s毎に時系列を区切り、それぞれのパワースペクトルを算出し、検証を行った。その結果の一例($H_{1/3} = 1.18\text{m}$)をFig.3.2, Fig.3.3, Fig.3.4に示す。Fig.3.2は一計測分(819.2s)のパワースペクトルである。Fig.3.3はFig.3.2で用いた時系列資料を400.0sで区切り、それぞれのパワースペクトルを算出した結果である。また、同様にFig.3.4はFig.3.2で用いた時系列資料を200.0sで区切り、それぞれのパワースペクトルを算出した結果である。

Fig.3.2に示すパワースペクトルの帯域幅パラメータ ε の値は0.42であった。それに対し、Fig.3.3, Fig.3.4で示すそれぞれ400.0s, 200.0s毎におけるパワースペクトルの ε の値も0.41~0.44と、ほとんど変化が見られなかった。この傾向は他の資料においても同様で、 ε の値に時間的な変化がほとんど認められない結果となった。すなわち、パワースペクトルの帯域性に関しては、短時間ではほとんど変化しないこととなる。

Fig.3.3に示す400.0s毎に区切った結果では、Fig.3.2に示す元のパワースペクトルに比べ、ピークの周波数帯に若干の変化が認められ、0.00~400.0sと401.0~819.2sとではその周波数帯が若干異なる結果となった。さらに、Fig.3.4で示す200.0s毎に区切った結果では、それぞれのパワースペクトルの形状に大きな変化が見られた。Fig.3.3の結果と同様に各ピークの周波数帯、ならびに各ピークのパワーの値にも差が認められた。小型漁船における安全操業を考慮すると、パワースペクトルのピークの周波数帯が変化することは、船体横揺れ固有周波数帯と波浪のピーク周波数帯とが近づくことが考えられ、より大きな船体動揺を生じる可能性が考えられる。

[m² · sec]

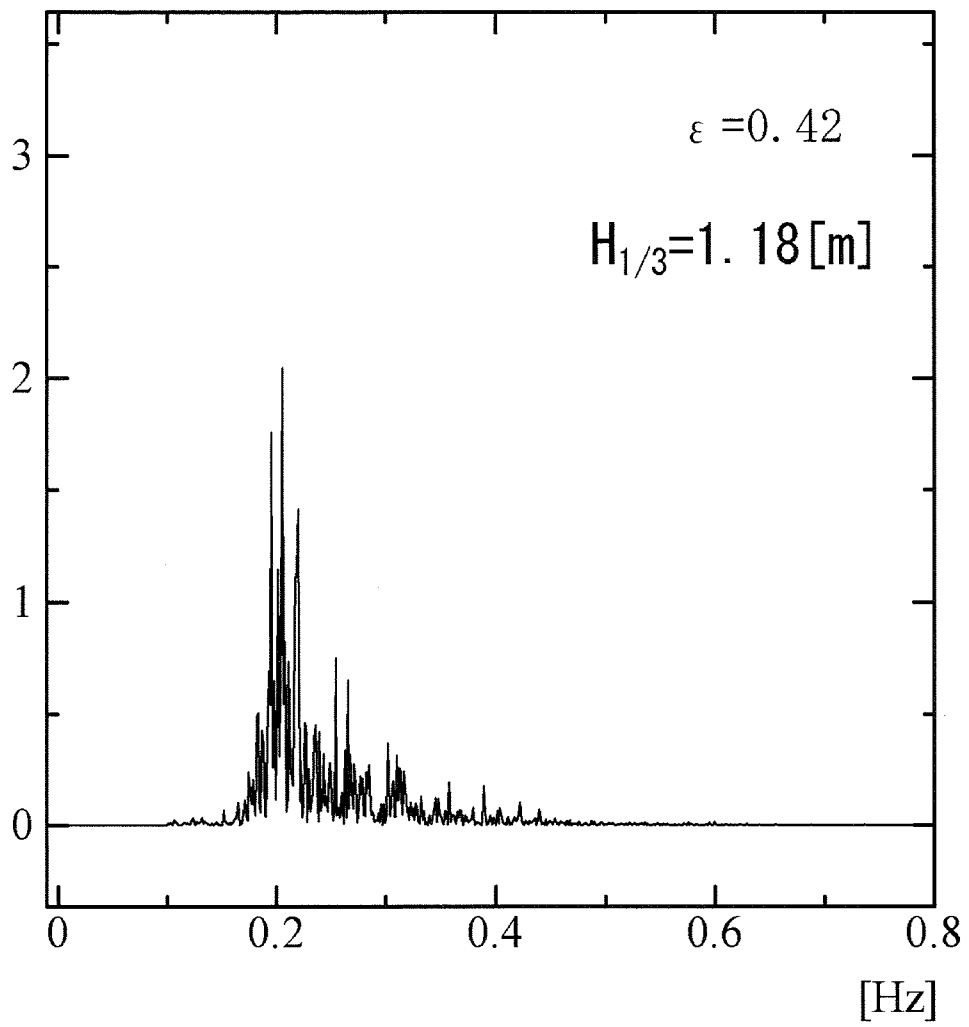


Fig.3.2 A wave spectrum for 819.2s

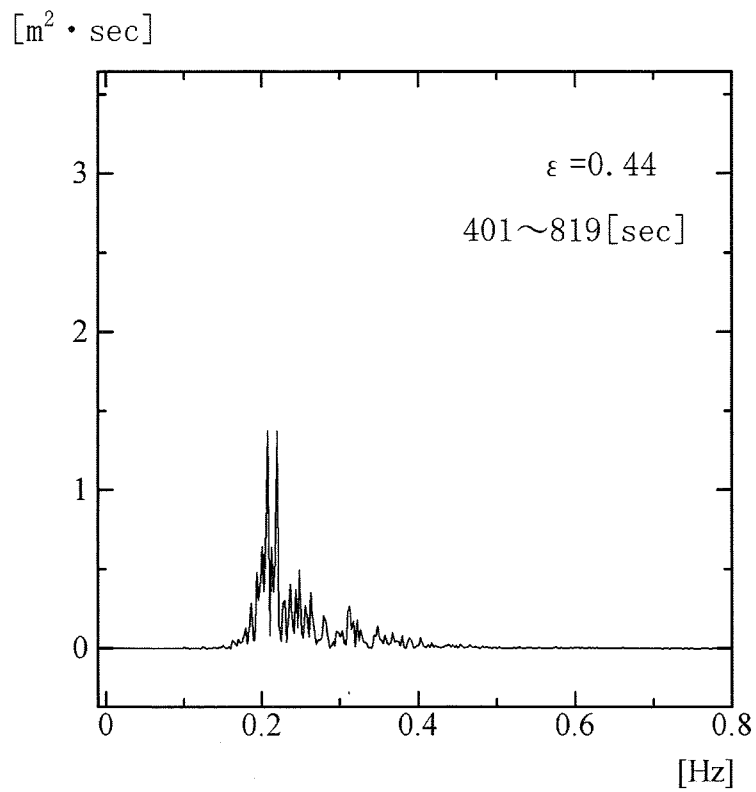
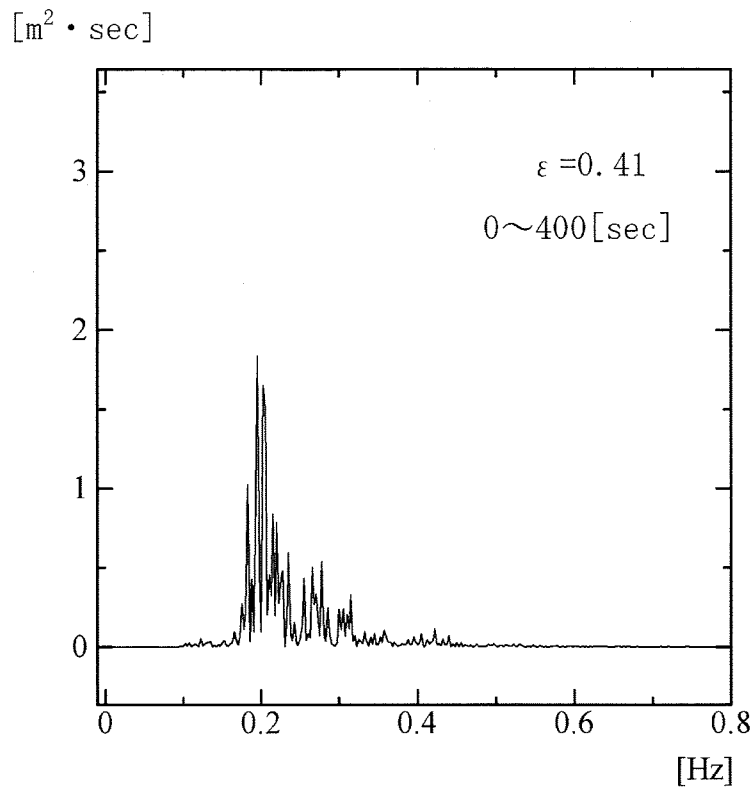


Fig.3.3 Changes in the wave spectrum over 400.0s

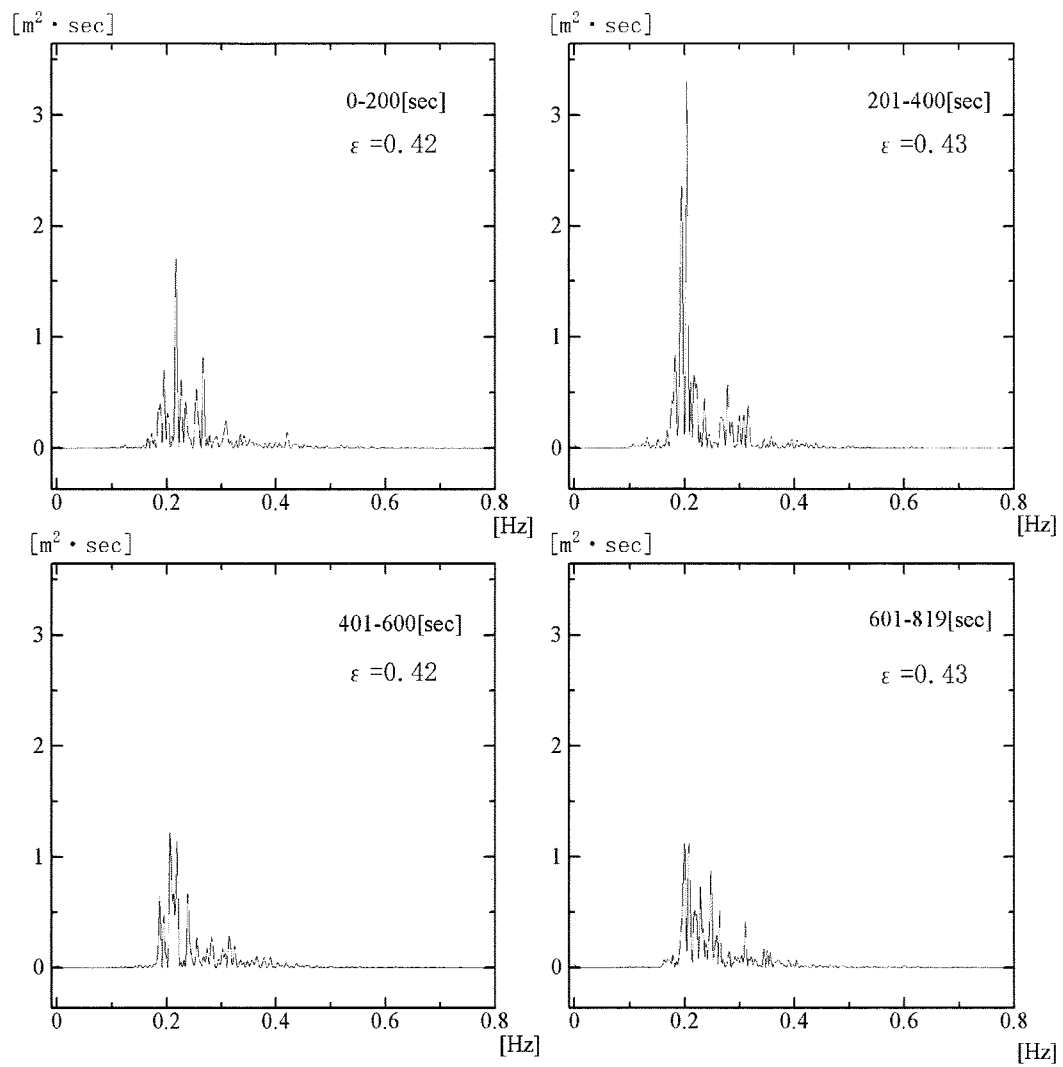


Fig.3.4 Changes in the wave spectrum over 200.0s

3-4 サロゲートデータ法によるパワースペクトルの検証

3-4-1 解析方法

3-4-1-1 サロゲートデータ法

カオス時系列解析に対する否定的な見解として、解析対象データは決定論的カオスではなく、確率的過程から生み出されたデータが何らかのアーチファクト等により、決定論的データが示す性質に類似の結果を示したのではないかとするものがある。このような主張に対するための解析方法として、統計的解析におけるブーストラップ法に類似した概念を持つ、サロゲートデータ法 (the method of surrogate data) と呼ばれるアルゴリズムが、J.Theilerらにより提案されており^{53, 54, 55)}、実データの解析には有効である⁴⁶⁾。

非線形性を示すと考えられる時系列信号に対しては、種々の帰無仮説を考えることができるが、線形確率論過程の存在を基盤とした帰無仮説を用いるのが自然である。

実際に提示される仮説は、以下に示すものが典型的である。

- 1) 時間的にまったく無相関なデータであった
- 2) 時間的には線形相関を持つようなデータであった
- 3) 時間的には線形相関があるようなデータを、ある種のスタティックで単調な非線形変換により観測することにより得られたデータであった

サロゲートデータ法では、上記の帰無仮説に従うようなサロゲートデータを多数作り出し、これらの統計的性質がオリジナルデータのそれと異なることを検定する。

これらの帰無仮説に基づいて作成された時系列信号をサロゲートデータと呼ぶ。これらのサロゲートデータを作り出す基本アルゴリズムは次の通りである。

- (1) ランダム・シャッフル (random shuffle : RS)
- (2) フーリエ・トランスフォーム (Fourier transform : FT)
- (3) アンプリチュード・アジャステッド・フーリエ・トランスフォーム (amplitude adjusted Fourier transform : AAFT)

本章では、波浪の定常性・非定常性及びパワースペクトルの時間的変化を捉える上での問題点を検証するためにサロゲートデータの作成に、上記のFTサロゲートデータを用いた。

上で記した、時間的に線形相関を持つようなデータであるという帰無仮説を考える。この帰無仮説に従えば、海面変位の時系列資料は相関関数によってのみ特徴付けられる。ウイナー・ヒンチンの定理より、相関関数とパワースペクトル密度は等価である。つまり、パワースペクトルが、オリジナルデータと全く同じ時系列資料を作り出せばよいこととなる。FTサロゲートデータの作成手順は以下の通りである。

- ① 使用する海面変位の時系列資料をフーリエ級数に展開する
- ② 各成分波に対し、 $0 \sim 2\pi$ の範囲における乱数を発生させ、位相を与える
- ③ 位相を変化させた各成分波を再び合成し、サロゲートデータを作成する

これにより、オリジナルデータと全く同じパワースペクトルを、つまり、全く同じ相関関数を持つ時系列資料を作成することができる。

具体的な計算方法は以下の通りである。

使用する海面変位の時系列資料 $Y(t)$ を次の(3.5)に示すフーリエ級数で表

現できるものとする。

$$Y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3.7)$$

(3.7)式に示す各フーリエ係数 a_n , b_n の計算式を次の(3.8), (3.9)式に示す。ここで, $m = N/2$ である。

$$a_n = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} Y_i \cos \frac{\pi n i}{m} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (3.8)$$

$$b_n = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{2m-1} Y_i \sin \frac{\pi n i}{m} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (3.9)$$

(3.8), (3.9)式を用いてフーリエ係数を求め, 各成分波に分解する。次に乱数を発生させ, それにより得られた位相を各成分波に与える。この作業はCOMPAC社製Visual Fortranを用いて行った。具体的な乱数発生命令には"RAN(N)"を使用した。ただし"RAN"は0~1の範囲で乱数を発生させるため, 実際は"RAN"で発生させた乱数に 2π を乗算し, 0~ 2π の範囲でランダムな位相の作成を行った。

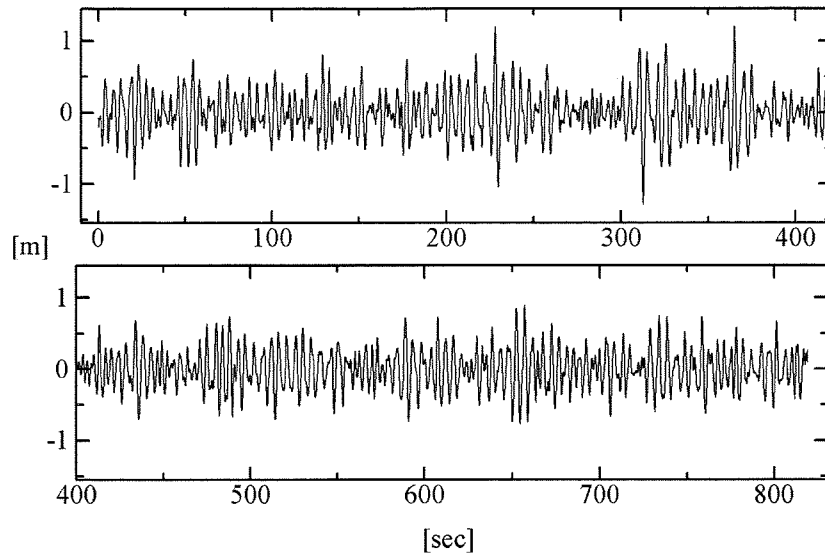
これによりランダム化された位相を各成分波に与え, 再び合成することによりサロゲートデータを作成した。

その一例をFig.3.5に示す。上図の時系列資料は実際の東京湾の海面変位を表しており, 下図は上図の資料を基に作成したFTサロゲートデータである。また, Fig.3.5に示すオリジナルデータとサロゲートデータの各代表値はTable.3.1に示す通りである。Table.3.1にも示すようにオリジナルデータとサロゲートデータにおける各代表値は最大波高に差があるものの, ほとんど同じである。最大波高の差は最大波高自体が突発的に発生するものであり, また, 平均値および有義値と異なり, 一解析資料中において一つの値であり, 統計的処理が施されないためにこのような差が表れたものと考えられる。

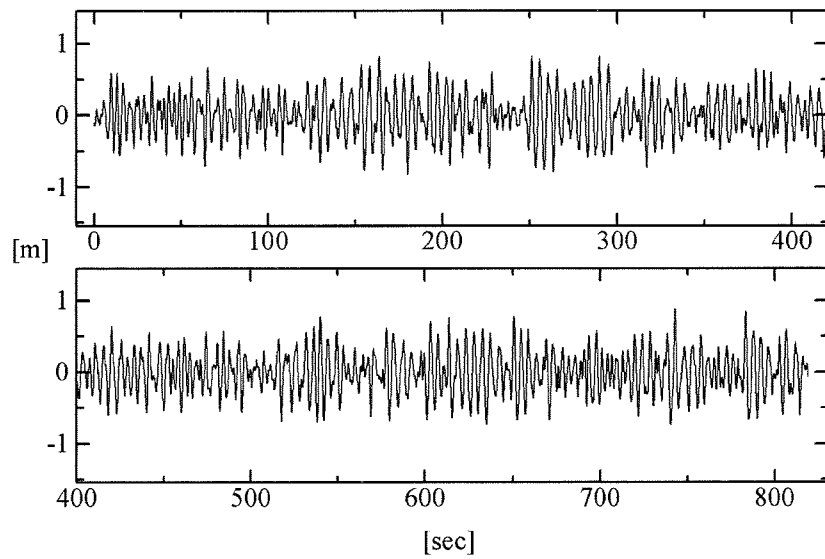
Table.3.1 Central values of the original and surrogate data

	オリジナルデータ	サロゲートデータ
平均波高 [m]	0.76	0.77
有義波高 [m]	1.18	1.16
最大波高 [m]	2.24	1.59
平均周期 [s]	3.91	3.90

また, Fig.3.6にオリジナルデータとサロゲートデータのパワースペクトルを示す。Fig.3.5と同様に上図がオリジナルデータ, 下図がサロゲートデータのパワースペクトルである。Fig.3.6に示すとおり, オリジナルデータとサロゲートデータのパワースペクトルは全く同様であり, 同じ相関関数を持つ時系列資料であることがわかる。



オリジナルデータ



サロゲートデータ

Fig.3.5 Time series of the original and surrogate data

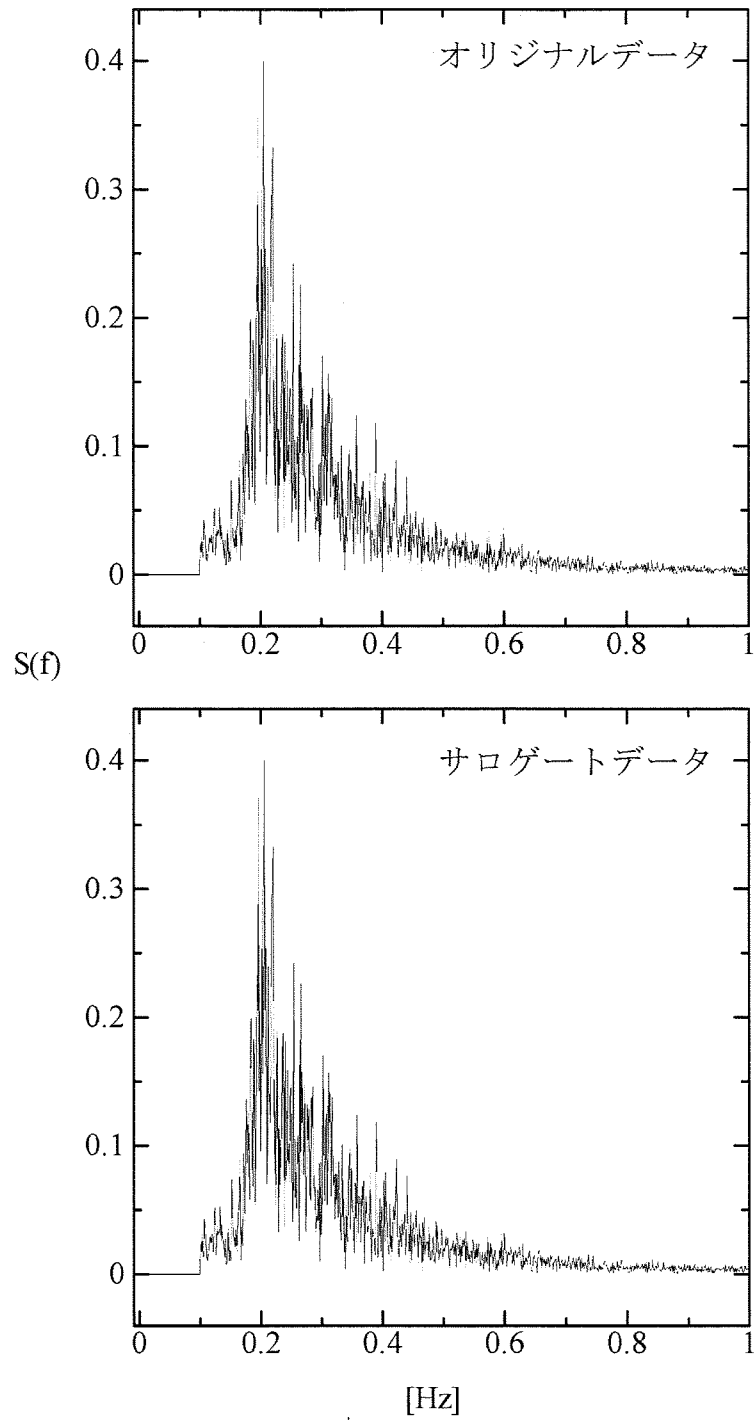


Fig.3.6 Power spectrums of the original and surrogate data

3-4-1-2 サロゲートデータを用いた検証法

上記において説明したように，FTサロゲートデータの作成過程よりフーリエ級数を用いており，理論上は正弦波および余弦波足し合わせであるため，サロゲートデータを短時間で区切り，それぞれのパワースペクトルを算出しても全て同じとなるはずである。つまり，完全な定常であるといえる。

そこで，本章で用いた167計測分の解析資料全てに対し，それぞれ100パターンずつ乱数を与えサロゲートデータを用意した。さらに，時間的なパワースペクトルの変動を検証するために各サロゲートデータを400.0s, 200.0sに区切りそれぞれのパワースペクトルを求め，時間的変動を検証した。

3-4-2 結果及び考察

本章では167計測分の解析資料全てに対して，それぞれ100パターンのサロゲートデータを作成したが，全て掲載するとなると $167 \times 100 = 16700$ となり膨大な量となるため，その内の二例を示す。

まず最初の例について，オリジナルデータとサロゲートデータの時系列をFig.3.7に，各代表値をTable.3.2に，パワースペクトルをFig.3.8に示す。なお，パワースペクトルはオリジナルデータ，サロゲートデータ共に全く同じであるので一つで表記している。

Table.3.2 Central values of the original and surrogate data

	オリジナルデータ	サロゲートデータ
平均波高 [m]	0.40	0.40
有義波高 [m]	0.62	0.63
最大波高 [m]	1.08	1.14
平均周期 [s]	2.77	2.73

Fig.3.7に示すオリジナルデータとサロゲートデータとの時系列グラフからは両者にはっきりとした違いが認められるが，実際は同じ成分波で構成さ

れており、そのためFig.3.8に示すパワースペクトルも全く同じ形となる。さらに、Table.3.2に示すように各代表値もほとんど同じである。これは100パターン作成したサロゲートデータ全てにおいて同様であった。ランダムな位相を与えることにより、時系列データのみがオリジナルデータと異なることとなる。

次に、非定常性の有無を検証するために、上記で使ったサロゲートデータを、まず400.0s毎で区切り、それぞれについてパワースペクトルを算出した。Fig.3.9にその結果を示す。Fig.3.9の上図が0.0~400.0sまでのパワースペクトルであり、下図がその後の401.0~819.2sまでのパワースペクトルを示している。

Fig.3.9に示すように上図、下図とも同じような波形をしているものの、パワースペクトルのピークの周波数帯の近辺で多少波形が変化していることがわかる。また、全体的にも、細かい部分で変化がみられた。

FTサロゲートデータは上記でも記したように、同じ成分波で一つの時系列資料が構成されており、どこを抽出しても成分波は変わらないため、理論上は時間的にパワースペクトルが変化することはない。しかしながら、400.0s毎にサロゲートデータを区切ってそれぞれのパワースペクトルを求めると多少の変化がみられる結果となった。

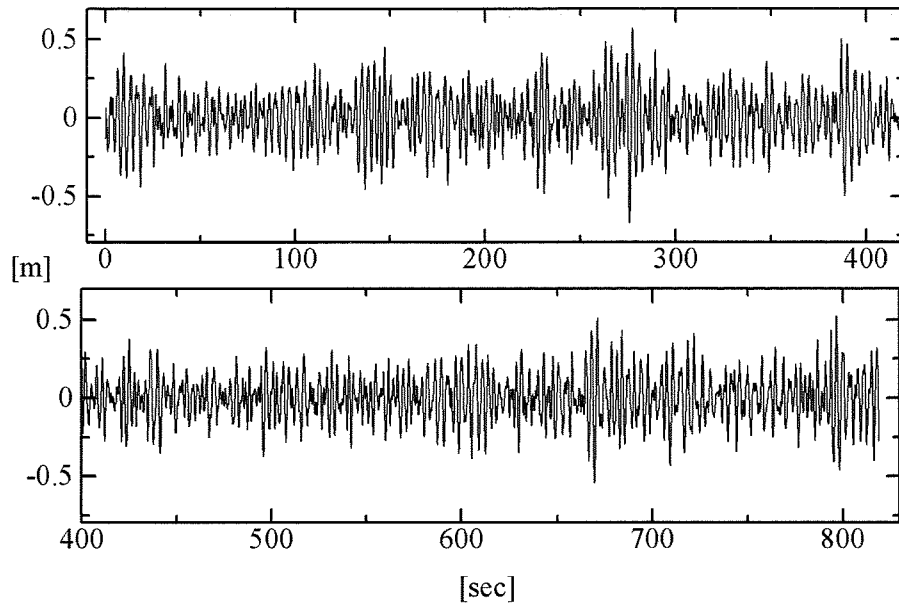
そこで、次にさらに200.0s毎にサロゲートデータを区切り、それぞれのパワースペクトルを算出した結果をFig.3.10に示す。Fig.3.10の上図の左図、右図がそれぞれ0.0~200.0s, 201.0~400.0sで区切ったサロゲートデータのパワースペクトルであり、同様に下図の右図、左図がそれぞれ401.0~600.0s, 601.0~819.2sで区切った場合のパワースペクトルである。

図より400.0s毎に区切った場合と比較すると、200.0s毎に区切った場合のほうが明らかにパワースペクトルが変化していることが認められる。FTサロ

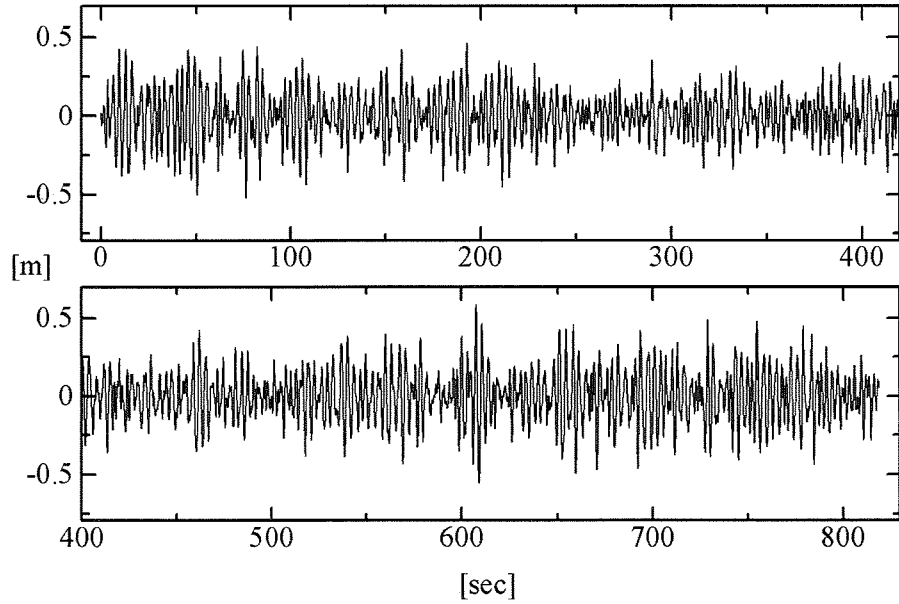
ゲートデータを用いているため、本来パワースペクトルが時間的変化を示すようなことは考えられないが、実際にはFig.3.10のように変化がみられる。パワースペクトルのピークも単峰的であったり、双峰的であったり、と変化している。

つまり、甫喜本らの報告にあるように、波浪のパワースペクトルが短時間において変化がみられたからといって、非定常性の有無を判断することはできないのではないかと考える。事実、Fig.3.10のようにサロゲートデータにおいてもパワースペクトルに変化がみられており、他の原因があるものと考ええる。

サロゲートデータにおいてパワースペクトルに時間的変化がみられたことより、従来から用いられてきているスペクトル法自体にも原因があるのではないかと考える⁵⁶⁾。



オリジナルデータ



サロゲートデータ

Fig.3.7 Time series of the original and surrogate data

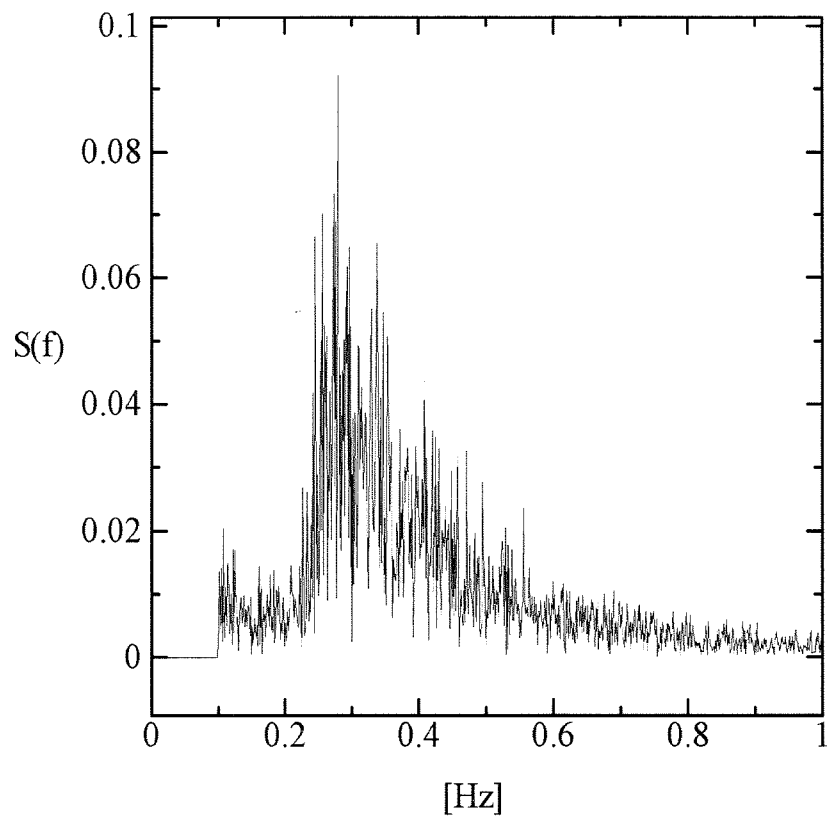


Fig.3.8 Power spectrums of the original and surrogate data

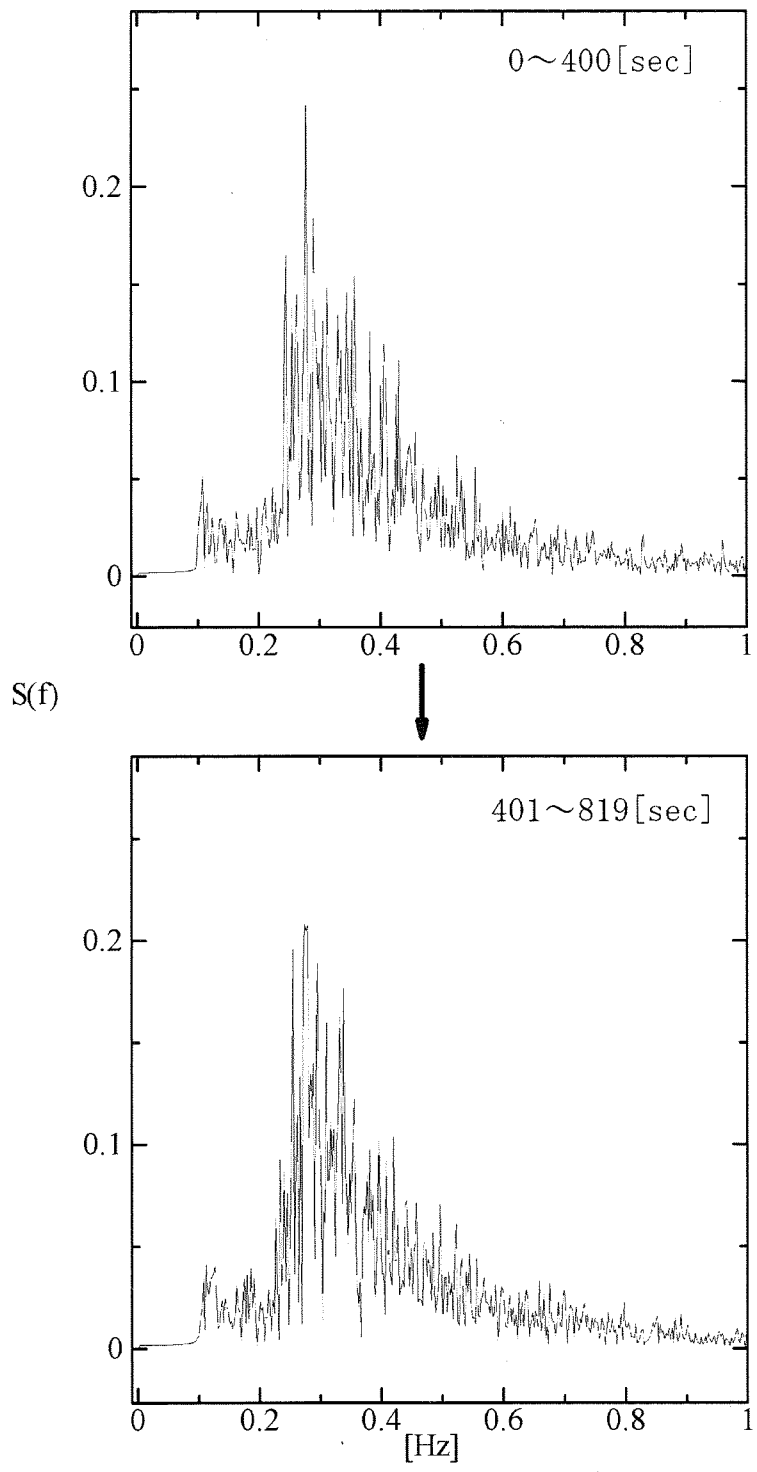


Fig.3.9 Changes in the power spectrum over 400.0s

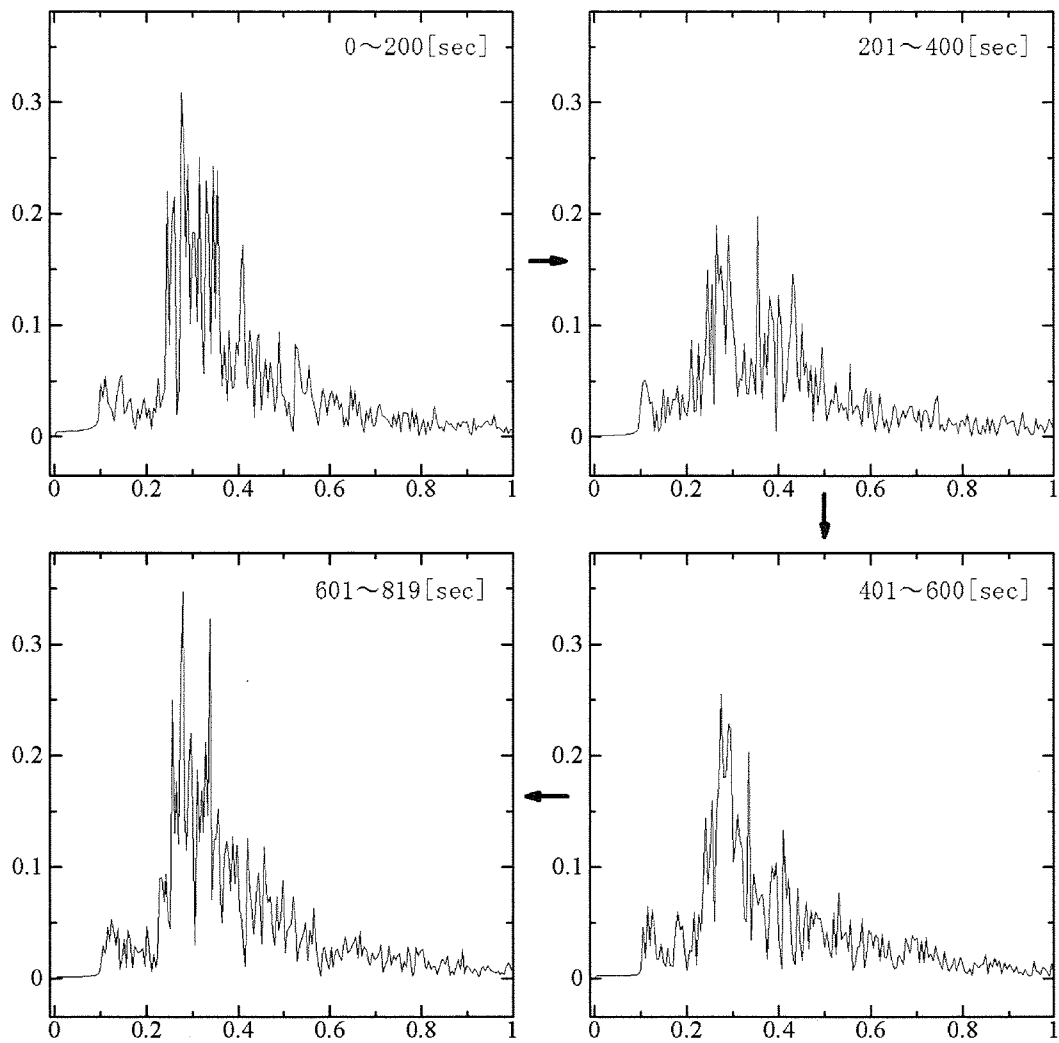


Fig.3.10 Changes in the power spectrum over 200.0s

二つ目の例は、前記の例で用いた海面変位資料の有義波高よりも倍に近い有義波高を示した海面変位資料を用いたものである。前記の例と比較すると、オリジナルデータの平均周期も有義波高が大きくなった分長くなっており、前記の例では有義波高、平均周期がそれぞれ0.62m, 2.77sであったのに対し、二例目では有義波高、平均周期がそれぞれ1.08m, 3.80sとなっている。つまり、平均周期が約1.0s長いことになる。これはパワースペクトルにも顕著に表れており、パワースペクトルを示すFig.3.8とFig.3.12を比較すると、ピークの周波数帯が二つ目の例のほうが低周波側となっている。

Fig.3.11にオリジナルデータとサロゲートデータの時系列を示し、Table.3.3にオリジナルデータとサロゲートデータの各代表値を示す。

前記の例と同様に、Fig.3.11に示すオリジナルデータとサロゲートデータとの時系列グラフからは両者にはっきりとした違いが認められるが、実際は同じ成分波で構成されており、そのためFig.3.12に示すパワースペクトルも全く同じ形となる。また、各代表値も前記の例と同様にほとんど差のない結果となった。やはり、オリジナルデータと比較して、位相のみがランダムに変化しただけであるので、このような結果が当然となるものと考える。

Table.3.3 Central values of the original and surrogate data

	オリジナルデータ	サロゲートデータ
平均波高 [m]	0.69	0.69
有義波高 [m]	1.08	1.06
最大波高 [m]	2.05	1.66
平均周期 [s]	3.80	3.77

次に、このサロゲートデータを前記の例と同様に400.0sで区切り、それぞれのパワースペクトルを算出した。Fig.3.13に400.0s毎のパワースペクトルを示す。Fig.3.13の上図が0.0~400.0sまでのパワースペクトルであり、下図がその後の401.0~819.2sまでのパワースペクトルを示している。パワースペクトル

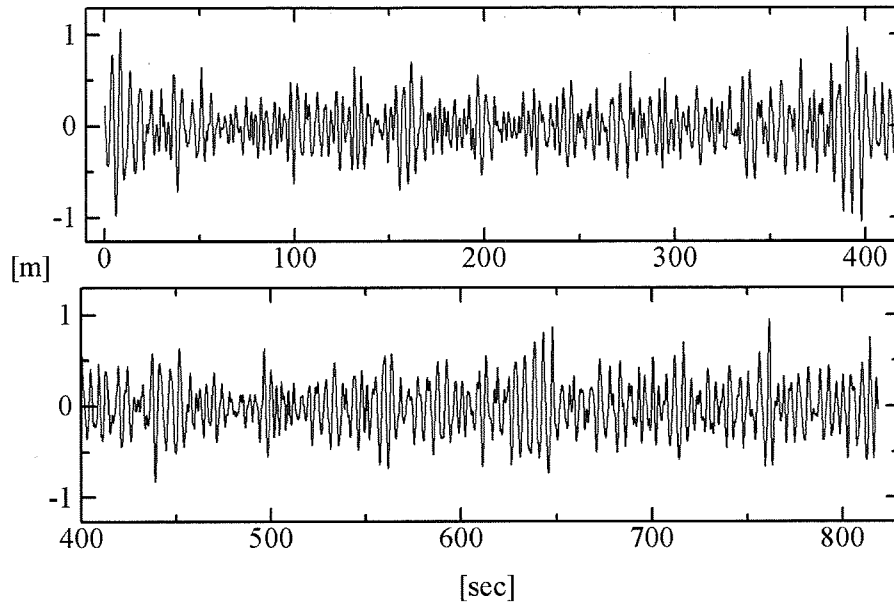
ルの波形に大きな変化はあまり認められないが、やはり多少の変化が生じており、理論上と矛盾する結果となった。

さらに、Fig.3.14に200.0s毎にサロゲートデータを区切り、それぞれのパワースペクトルを算出した結果を示す。Fig.3.14も前記の例と同様で、上図の左図、右図がそれぞれ0.0~200.0s, 201.0~400.0sで区切ったサロゲートデータのパワースペクトルであり、同様に下図の右図、左図がそれぞれ401.0~600.0s, 601.0~819.2sで区切った場合のパワースペクトルを示している。

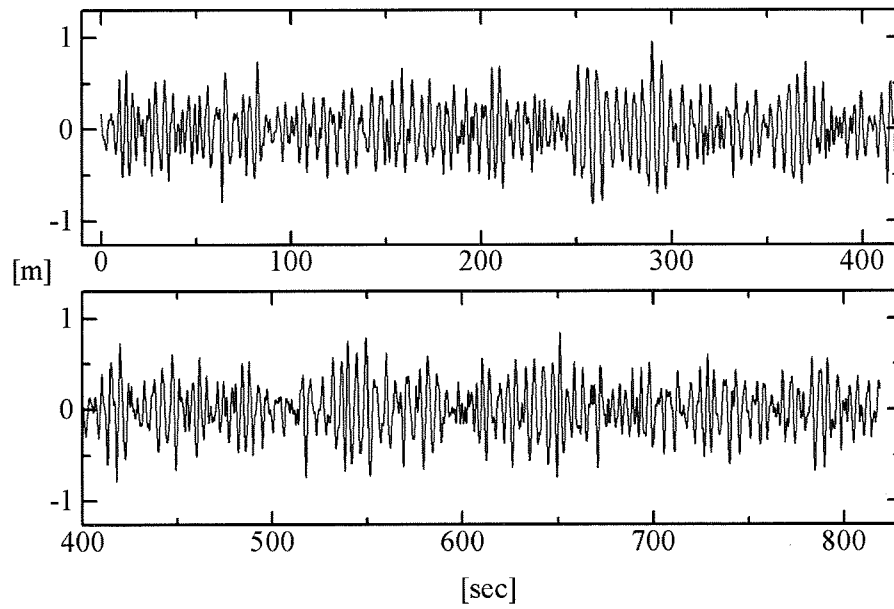
サロゲートデータを400.0sで区切った場合と比較すると、さらにパワースペクトルの形状の変化が確認できる結果となった。パワースペクトルのピークが単峰型となる場合や、双峰型となる場合が見られ、さらに、そのピークの周波数帯にもそれぞれで多少の相違が認められた。

この結果からもわかるように、本来、定常であるFTサロゲートデータのパワースペクトルに時間的変化が生じており、やはり、甫喜本らの報告にあるような波浪パワースペクトルの時間的変化のみから非定常性の有無を判断することができない結果となった。

また、波高、周期等に関係なくサロゲートデータのパワースペクトルに時間的変化が表れ、これは全ての事例で同じようにパワースペクトルが変化する結果となった。



オリジナルデータ



サロゲートデータ

Fig.3.11 Time series of the original and surrogate data

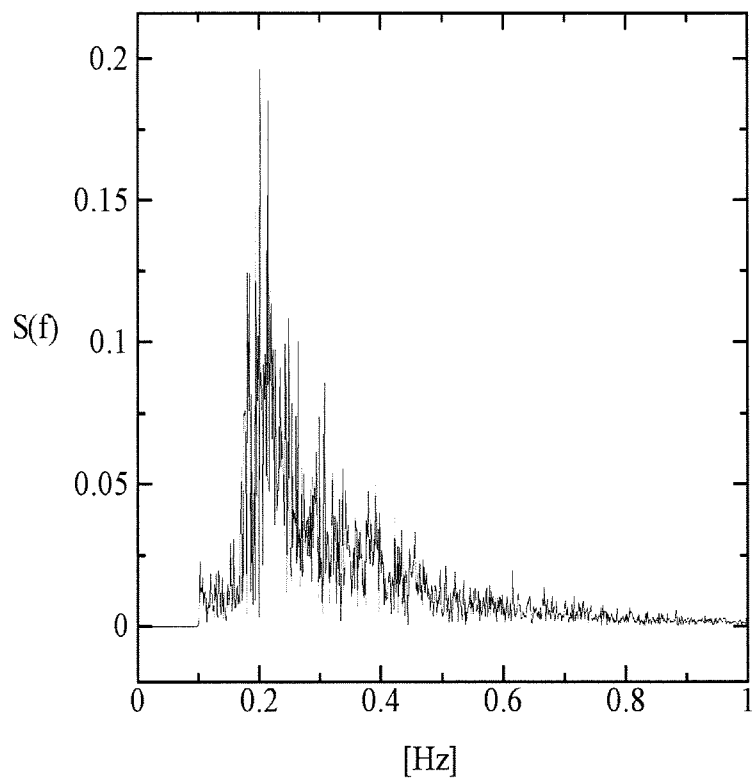


Fig.3.12 Power spectrums of the original and surrogate data

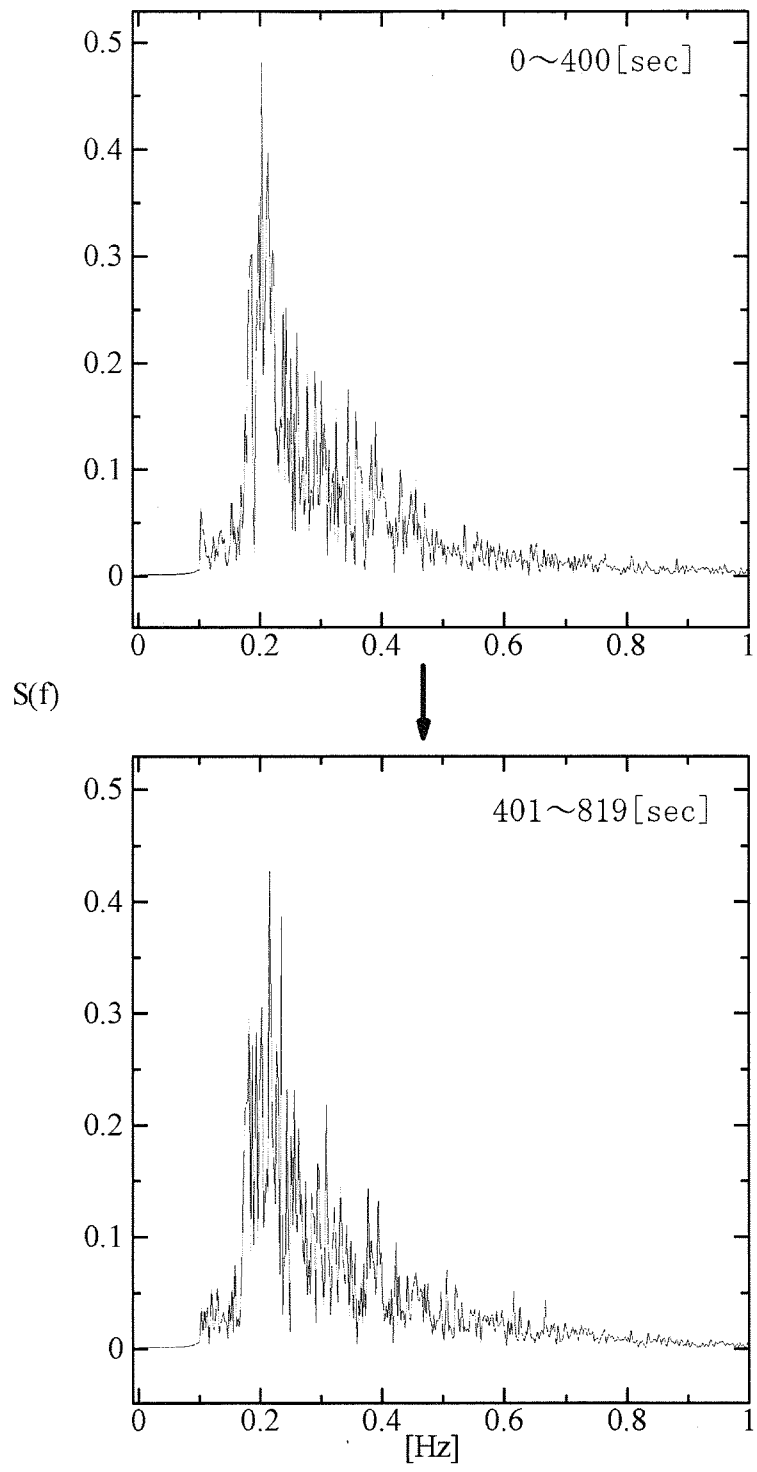


Fig.3.13 Changes in the power spectrum over 400.0s

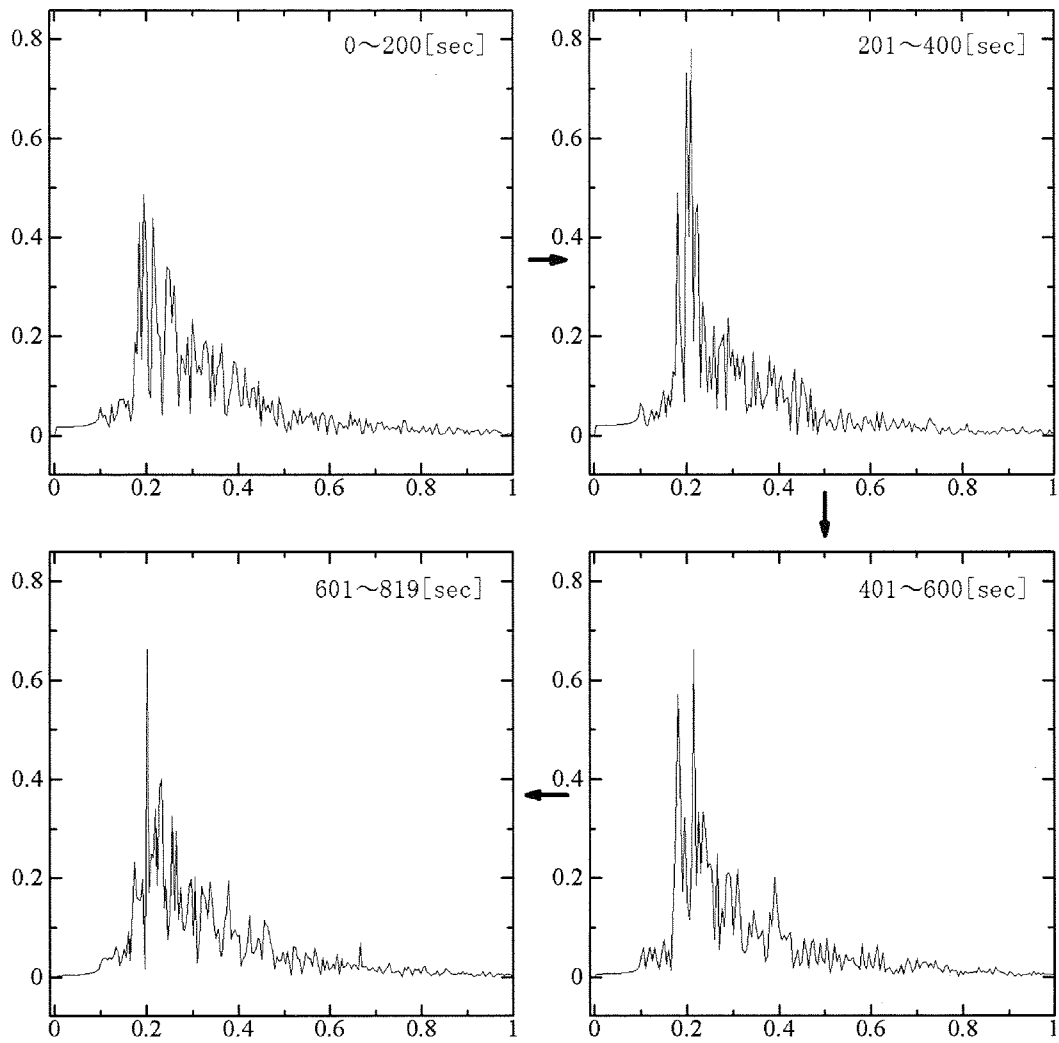


Fig.3.14 Changes in the power spectrum over 200.0s

3-5 結言

短時間で区切った時系列のパワースペクトルでは、パワースペクトルの帯域幅を示す帯域幅パラメータ ε の値に短時間ごとの大きな変化は無かった。すなわちパワースペクトルの帯域性がほとんど変化しない結果となった。しかし、パワースペクトルのパワーのピーク周波数帯が短時間ごとに変化する結果となった。819.2s(約14分)の間にもパワースペクトルのピークの周波数帯が変化していることから、小型漁船の横揺れ固有周波数帯と波浪スペクトルのピークの周波数帯とが近づく場合には同調横揺れが生起され、より大きな船体動揺を生じる可能性がある。つまり小型漁船における安全操業を考えた場合、短時間における卓越周波数の時間的変化を捉えることも必要であると考えられる。

さらに、FTサロゲートデータを用いて非定常性を有する可能性への言及を試みた。この結果、本来パワースペクトルが時間的変化を示さないFTサロゲートデータにおいてもその変化が確認され、従来のスペクトル法のみから、定常性・非定常性を考慮することが困難である結果となった。これは、実際にパワースペクトルを算出する段階にも問題があると考えられる。次の(3.10)式にフーリエ変換を示す。

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.10)$$

しかしながら実際フーリエ変換を行う際、扱う資料が有限であるため、(3.10)式に示すフーリエ変換のように積分範囲を $-\infty \sim \infty$ で取り扱うことは不可能である。また、解析資料は連続したものではなく離散データであるため、(3.10)式を使用することは不可能となる。

そこで本章では(3.1)式を用いたが、積分範囲が有限であり、理論通りのフーリエ変換を行うことは不可能である。このようなこともパワースペクトルに変化が見られた原因の一つであると考えられる。

ただし、サロゲートデータが理論的には正弦関数と余弦関数の級数であるのに対し、実際の海面変位においては完全な定常性を有するとは言い難く、そのため実海面の波浪パワースペクトルにも時間的变化が見られるものと考えられる。

本章の結果によりスペクトル法の問題点が浮き彫りとなったが、現在も波浪のパワースペクトルを用いた解析法は十分有効であり、非常に重要なものである。ただし、パワースペクトルに時間的变化が表れたとしても、その結果のみから定常性の有無を判断することは困難であり、注意が必要である。また、パワースペクトルの計算方法によっては低分解能の問題が発生するなど、細かい周波数帯の変化等をを得ることができない可能性もあり、十分な注意が必要となる。

第四章 波浪スペクトルタイプ

4-1 緒言

日本における漁船の9割以上が20トン未満の小型漁船であり、さらにその約7割を5トン未満の小型漁船が占めている現状をふまえれば、大型船などには影響が小さいような1m前後の有義波高でさえ、小型漁船にとっては大きな影響を及ぼす可能性が十分あり、安全操業に支障を来すことが考えられる。

Fig.4.1に東京湾において、東京海洋大学実習艇「ひよどり (19GT)」を用いて実施した計測実験より得られた最大横揺れ角（両振幅）と有義波高との応答関係を示す。

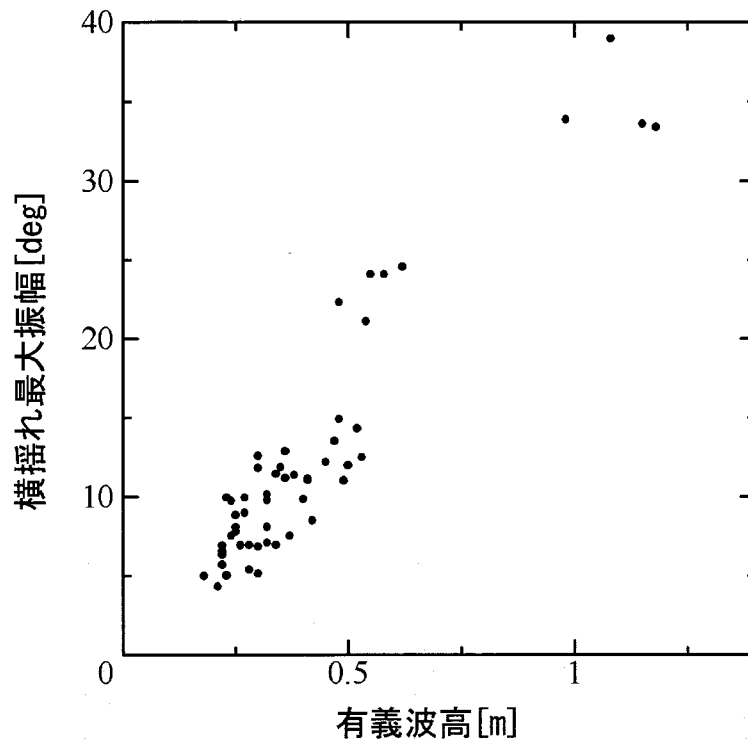


Fig.4.1 Relationship between significant wave height and maximum roll angle

船体動揺を引き起こす主要因の一つは波浪であるが、Fig.4.1で示すように、有義波高が1 m程度の海面状態でさえ30deg以上の横揺れを生じており、

最大では40deg近い横揺れを生じている。したがって船体動揺を引き起こす主要因である波浪の特性を捕らえることが安全操業の観点からも非常に重要となる。船体動揺を引き起こす主要因として、波浪の大きさとともに波浪の周期も非常に重要となる。一般に、船体の横揺れ固有周期と波浪の周期とが同調するときには大動揺が起こりやすく、比較的低い波高でも大動揺を引き起こす可能性が十分考えられる。しかしながら、このような比較的小さな有義波高に関する研究は報告が少ないのが現状である。緒言でも述べたように、東京湾における船舶では5トン未満の小型漁船が占める割合が非常に多く、安全操業を考慮すれば、東京湾の波浪特性を捉えることが必然と重要となる。

そこで本章では1m前後の波浪を対象に、東京湾における実計測資料より、小型漁船の安全操業を目的として、スペクトル特性の解析^{47, 57, 58)}を行い、東京湾の波浪スペクトルタイプの特定を試みた。

4-2 解析資料

本章で用いた解析資料は、第二章で記したとおり、東京海洋大学実習艇「ひよどり」の船首先端に設置したマイクロ波式波高計により漂泊状態で計測した海面変位である。1回の計測時間は819.2sであり、サンプリング時間間隔は0.1sである。

使用した解析資料は167計測分の解析資料であり、有義波高で0.18m~1.18mであり、平均周期は1.76s~3.66sであった。

4-3 解析方法

4-3-1 パワースペクトルの算出

本章では東京湾における波浪周波数特性を捉えるために、167計測分全て

においてパワースペクトルの算出を行った。なお、パワースペクトルの算出には自己相関関数よりフーリエ変換を行い算出するBlackman-Tukey法⁵²⁾を用いた。

Blackman-Tukey法によるパワースペクトルの計算手順を次に示す。

まず次の(4.1)式により海面変位の時系列資料(y_i)の自己相関関数 $C(\tau)$ を求める。ここで、 $\tau(=0, \dots, m : m = N/10)$ はTime Lagを表す。

$$C(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cdot y_{i+\tau} \quad (4.1)$$

これにより得られた自己相関関数を次の(4.2)式に示すフーリエ変換を用いてパワースペクトル($S(f)$)の算出を行った。なお、 Δt はサンプリング周期(0.1s)を示す。

$$S(f) = \left[C_0 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} C_i \cos \left(\frac{i\tau\pi}{m} \right) + C_m \cos \tau\pi \right] \Delta t \quad (4.2)$$

Blackman-Tukey法は古くからある方法ではあるが、計算の原理が明確でプログラム上もとくに困難な点がない上、分解能がやや低くなりがちではあるが安定したスペクトル推定が可能であるため、現在なお利用されている方法である。

4-3-2 パワースペクトルの評価

まずBlackman-Tukey法を用いて算出したパワースペクトルの両軸に対数をとって、高周波域におけるパワースペクトルの傾きとそれに対応する有義波高との関係を調べた。なお、ここでBlackman-Tukey法を用いたのは、前章で述べたピリオドグラム法では分解能が高すぎるため、高周波域におけるパワースペクトルの傾きを捉えることが困難となるためである。Fig.4.2にパワースペクトルの一例を示す。

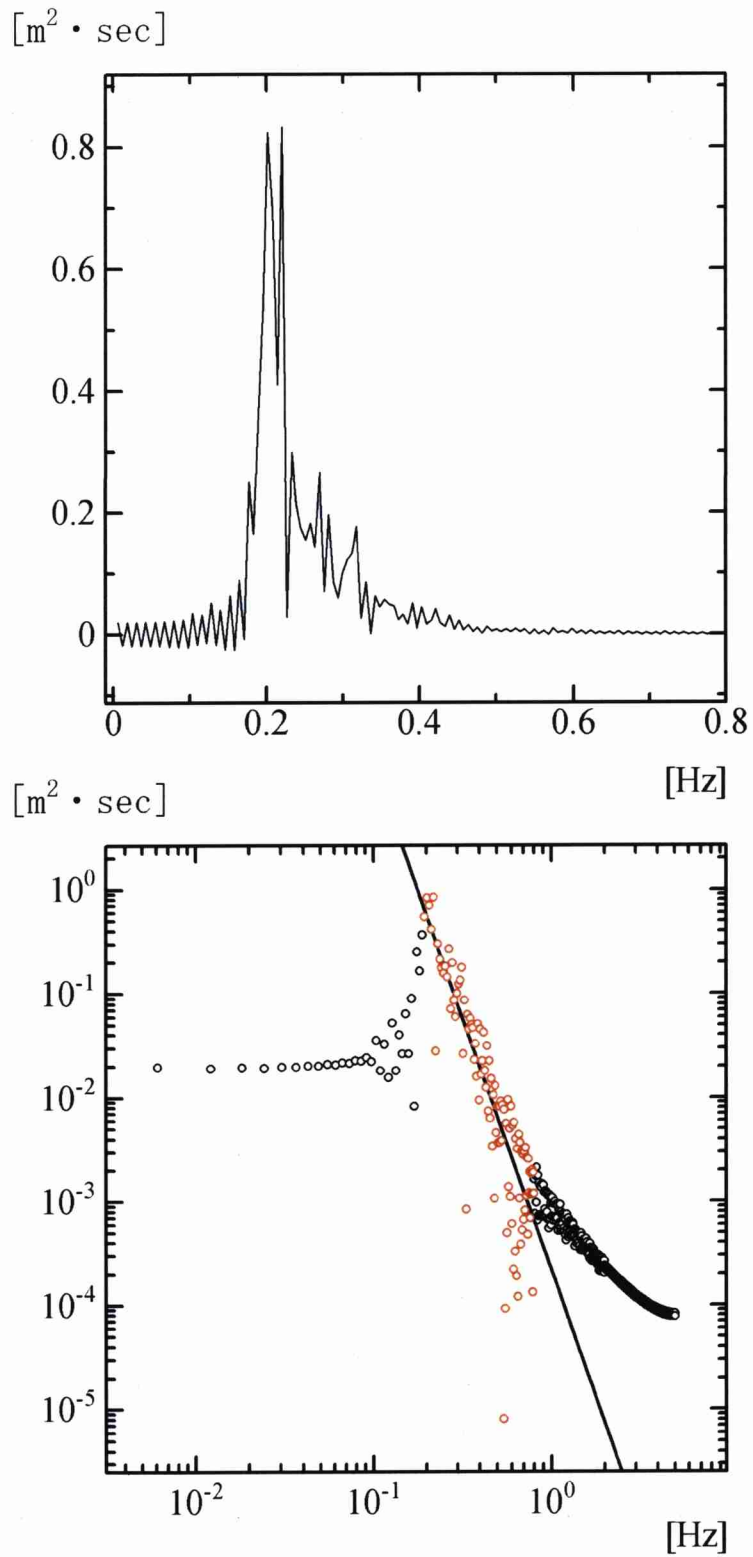


Fig.4.2 A wave spectrum and high-frequency characteristic of the observed data

上図が有義波高が1.18mであったときの海面変位のパワースペクトルであり、下図は上図の両軸に対数をとったものである。

一般的に波浪のパワースペクトルは次の(4.5)式で表される。

$$S(\omega) = A\omega^{-a} \exp(-B\omega^{-b}) \quad (4.5)$$

(4.5)式における $A\omega^{-a}$ がパワースペクトルの高周波域を示しており、高周波域におけるパワースペクトルの傾きとは係数 $-a$ で表される。高周波域の傾きの算出方法は、パワースペクトルのピーク周波数から0.8Hzまでを本章では高周波域の傾きを算出する範囲として、その範囲内で(4.5)式に示す $A\omega^{-a}$ の項に対する回帰直線を求め、傾き $-a$ の値を求めた。その周波数の範囲をFig.4.2の下図の赤色でプロットしたポイントに示す。

また小型漁船の船体動揺への影響を考慮し、0.50m以上の有義波高を対象とし、高周波域における周波数が -5 乗(P-M型)を示した事例と、それぞれ次の(4.6)、(4.7)式で表されるP-M型を基としたITTC(国際試験水槽会議)スペクトル(吹送距離が有限の場合)およびISSC(国際船体構造会議)スペクトルとの比較・検証を行った。

ITTCスペクトル:

$$S(\omega) = 155 \frac{H_{1/3}^2}{T_{01}^4 \omega^5} \exp\left\{\frac{-944}{T_{01}^4 \omega^4}\right\} 3.3 \exp\left\{-\frac{0.191\omega T_{01}-1}{\sqrt{2}\sigma}\right\} \quad (4.6)$$

$$H_{1/3} : \text{有義波高}, \quad T_{01} = 2\pi m_0/m_1$$

$$\sigma = 0.07, \quad \omega < 5.24/T_{01}$$

$$\sigma = 0.09, \quad \omega > 5.24/T_{01}$$

ISSCスペクトル:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3} T_V \left(\frac{T_V}{2\pi} \omega\right)^{-5} \exp\left\{-0.44 \left(\frac{T_V}{2\pi} \omega\right)^{-4}\right\} \quad (4.7)$$

T_V は使用した海面変位の解析資料より求めた実際の平均波周期を表し、 T_{01} は次の(4.8)式で表すパワースペクトルの原点まわりの n 次モーメント m_n より(4.9)式を用いて算出した値である。

$$m_n = \int_0^{\infty} S(\omega)\omega^n d\omega \quad (4.8)$$

$$T_{01} = 2\pi \left(\frac{m_0}{m_1} \right) \quad (4.9)$$

4-4 結果及び考察

4-4-1 パワースペクトルの高周波域における傾きの分布

まず実際に算出したパワースペクトルの一例をそれぞれFig.4.3, Fig.4.4, Fig.4.5に示す。各図のそれぞれ下図に示したグラフは、上図のグラフを対数表示にしたものである。ここで、 f^{-6} 、 f^{-5} 、および f^{-4} となる資料をそれぞれNeumann型、P-M型、および鳥羽型とし、その一例を示した。

全解析資料対して高周波域における傾きを求めた。Fig.4.6は有義波高とパワースペクトルの高周波域における傾きとの関係を示したグラフである。Fig.4.7はFig.4.6の傾きの値を四捨五入し、整数表示したものである。また小型漁船の船体動揺への影響を考慮し、有義波高が0.50mに境界線を記している。この結果より、有義波高が0.00~0.50mまではパワースペクトルの高周波域における傾きがNeumann型、P-M型、鳥羽型で一様に分布がみられる結果となった。また-3乗および-7乗を示す資料も多少ではあるが見られた。-3乗となるのは有義波高が低いため、様々な成分波で構成されていることが要因であると考えられる。-7乗となるのは、傾きの値が小さくなるにつれ正弦波的成分の影響が大きく影響することを考慮すると、うねりのような成分が影響したものと考えられる。全167資料中の割合では、Neumann型が26%、P-M型が53%、鳥羽型が13%で、-3乗と-7乗がそれぞれ2%、6

%であった。これより全体では半数以上がP-M型となる結果となった。一方、0.50m以上ではP-M型の占める割合が多くなり、さらに0.75m以上ではほとんどがP-M型であった。0.50m以上ではNeumannが17%、P-M型が80%、鳥羽型が3%を占める結果となった。以上のように、0.50m以上においてはP-M型を示す資料が突出して多く見られた。

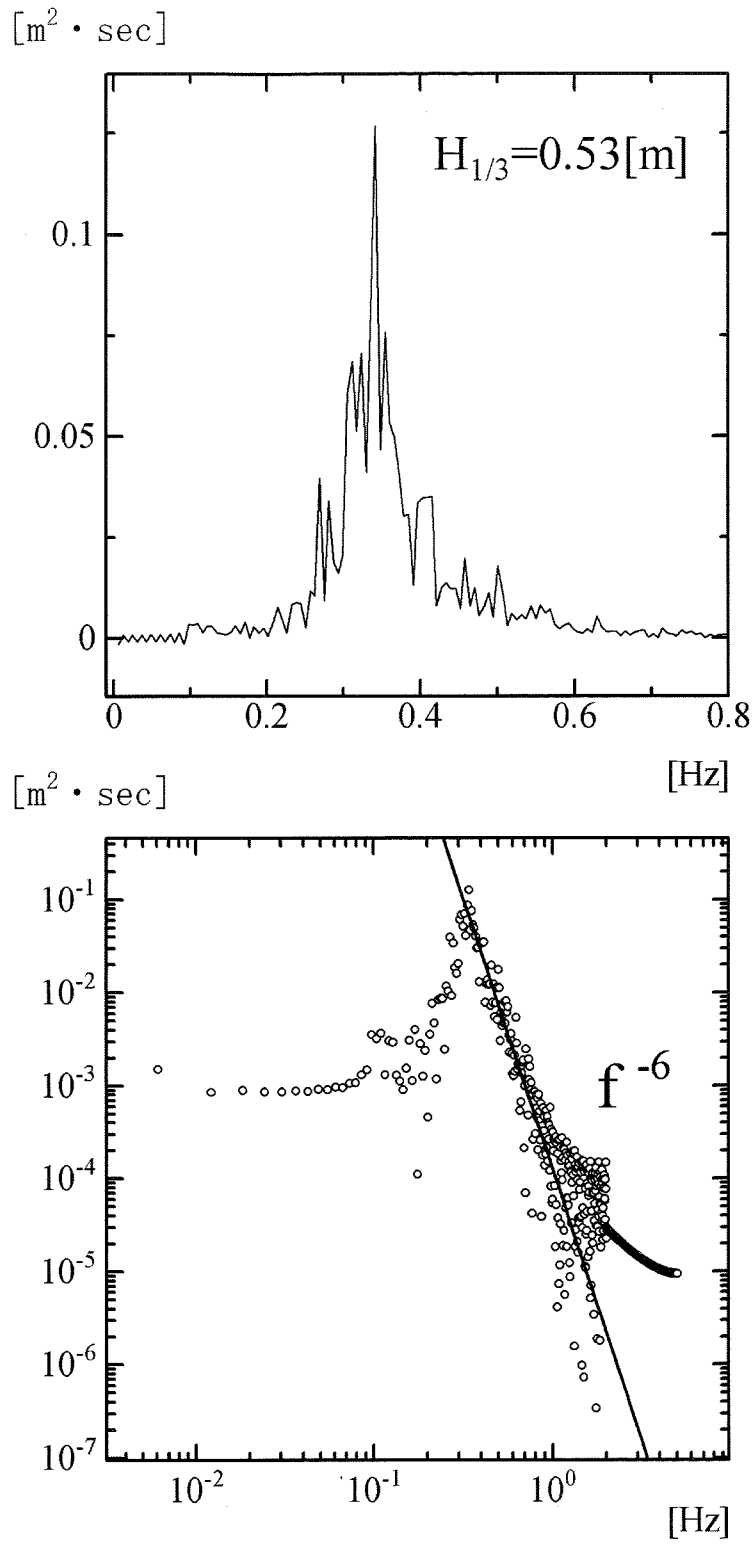


Fig.4.3 A Neumann wave spectrum and high-frequency characteristic

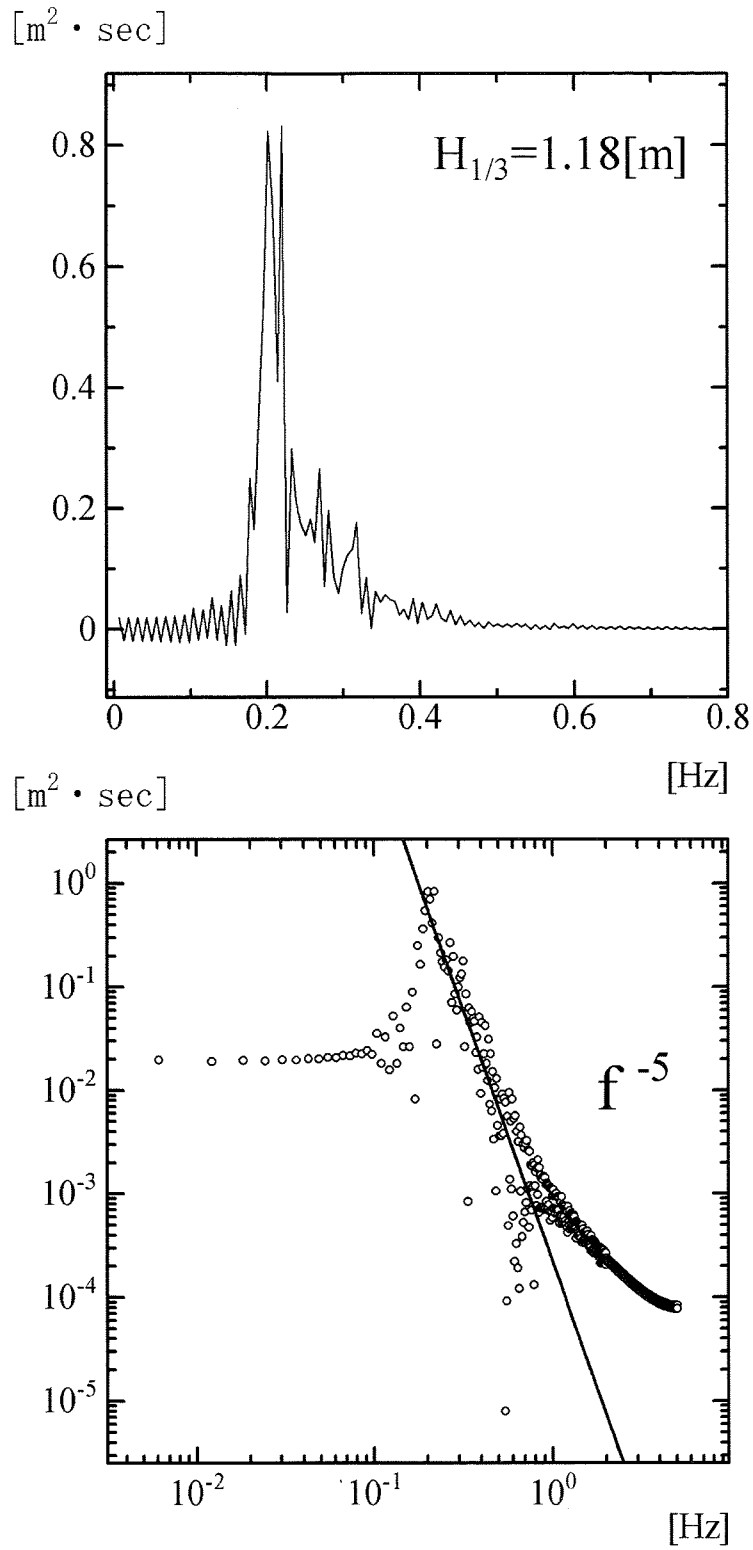


Fig.4.4 A P-M wave spectrum and high-frequency characteristic

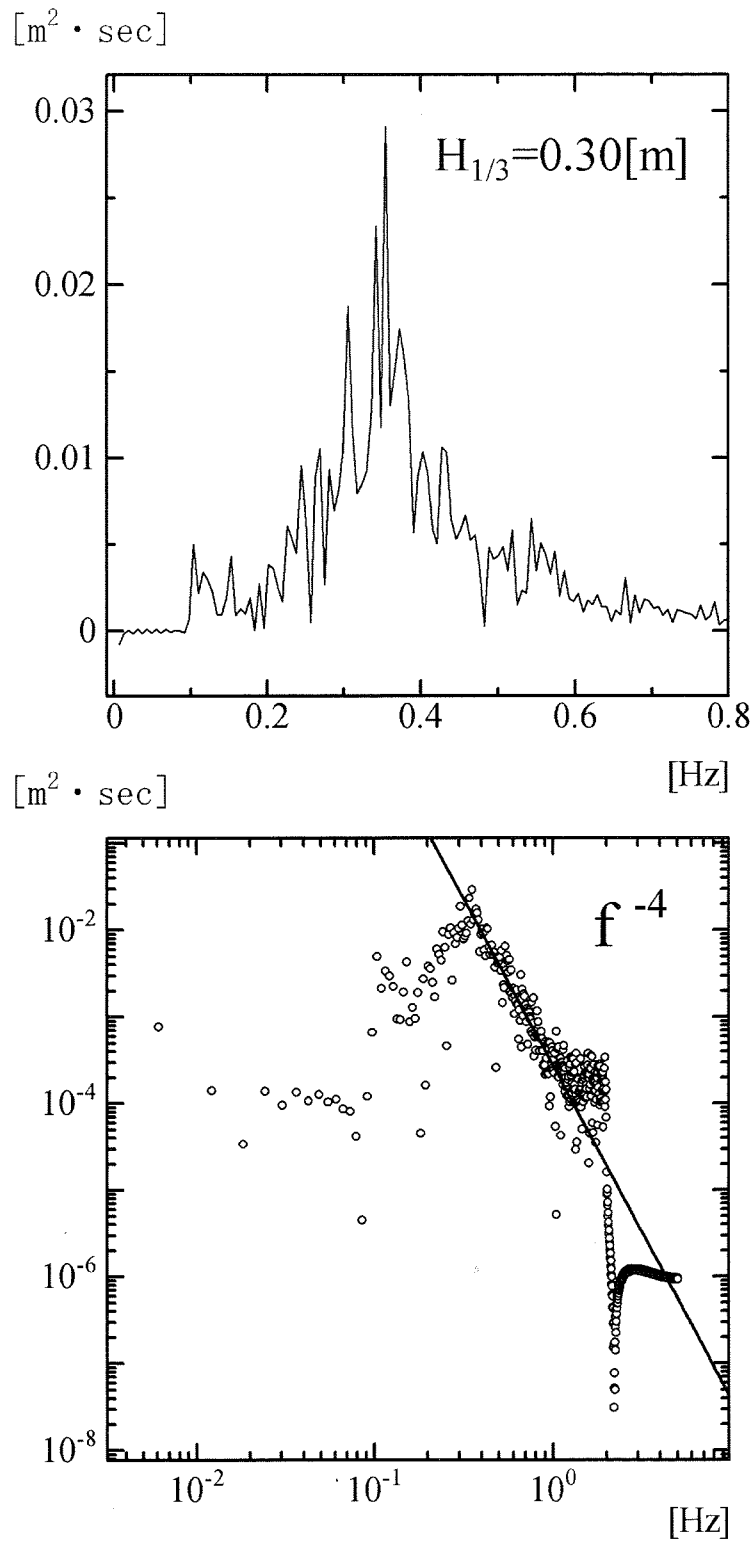


Fig.4.5 A Toba wave spectrum and high-frequency characteristic

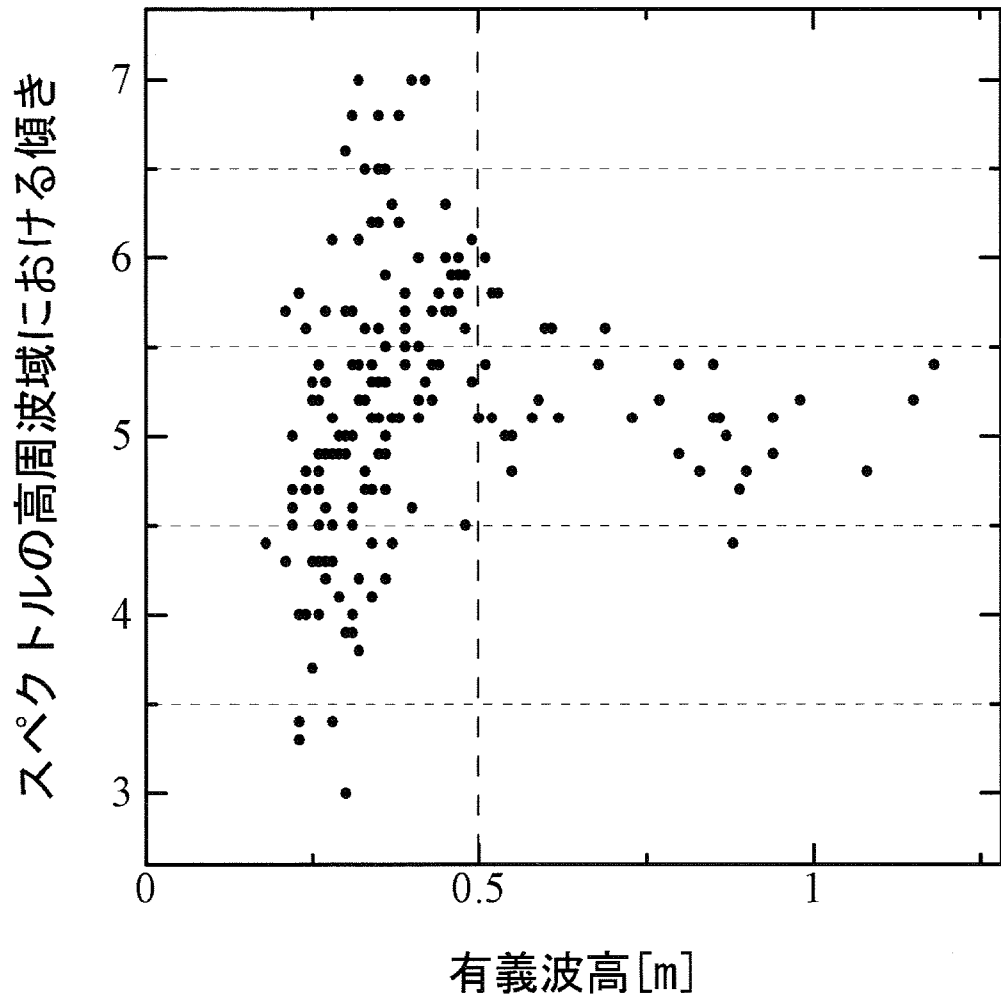


Fig.4.6 A distribution of the wave spectrum type in Tokyo Bay

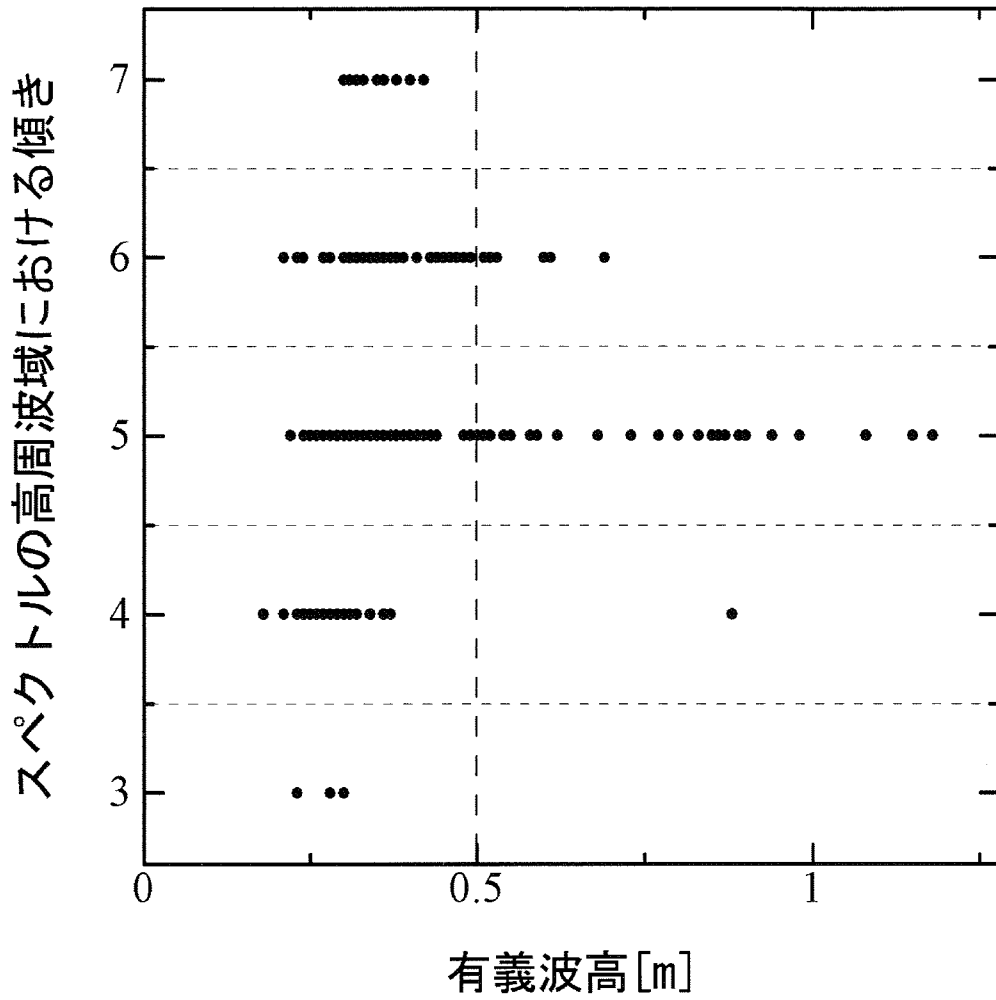


Fig.4.7 A distribution of the wave spectrum type rounded off the high-frequency gradient

4-4-2 パワースペクトルとP-M型スペクトルとの比較

上記の結果よりP-M型が全167資料中半数以上を占めており、有義波高が0.50m以上ではその大半がP-M型であった。そこでP-M型を基に提案されたITTCスペクトル((4.6)式)およびISSCスペクトル((4.7)式)と有義波高が0.50m以上で、P-M型を示した資料との比較・検証を行った。Fig.4.8, Fig.4.9, Fig.4.10, Fig.4.11, Fig.4.12, Fig.4.13に0.55~1.15mまでの結果の例を示す。各図とも下図に両軸に対数をとったパワースペクトルを示す。各結果とも高周波域における傾きに対し、ITTCスペクトルにより比較的近似できていることがわかる。しかし、各図からもわかるように、ほとんどの資料においてITTCスペクトルおよびISSCスペクトルのピークの周波数帯と、実際算出したパワースペクトルのピークの周波数帯とに差が出る結果となった。また、スペクトルの形状自体も全周波数域においてほとんど近似することが困難な結果となった。

本来P-M型も含めた(4.5)式で表すスペクトルは1つの滑らかなピークを持つことが前提として提案されている。しかし実際算出したパワースペクトルではそのような単峰型を示すものは無く、双峰型など、ピークを多数持つものがほとんどであったことが要因の1つと考えられる。また、P-M型が完全発達波を考慮しているのに対して、本研究で対象としている資料は東京湾という比較的狭く閉ざされた海であること等から、波浪が完全発達していない可能性も高く、これも要因の1つとなっているものと考えられる。

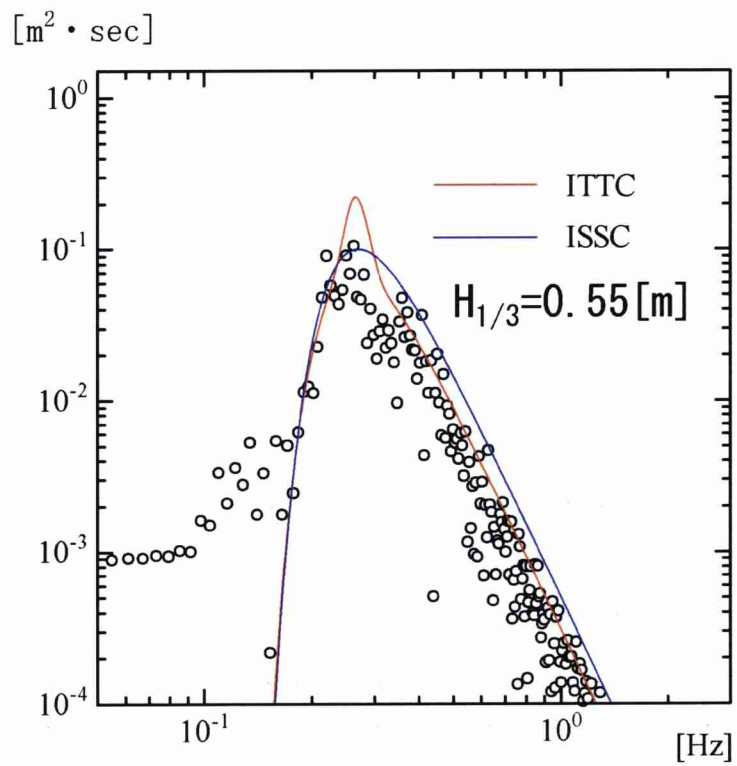
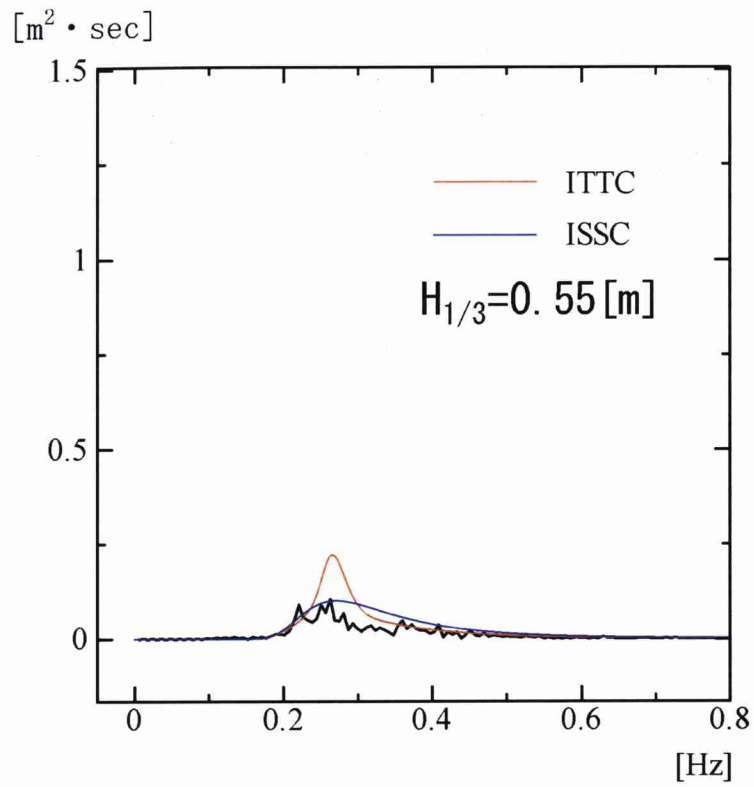


Fig.4.8 P-M wave spectrum of 0.55m wave heights

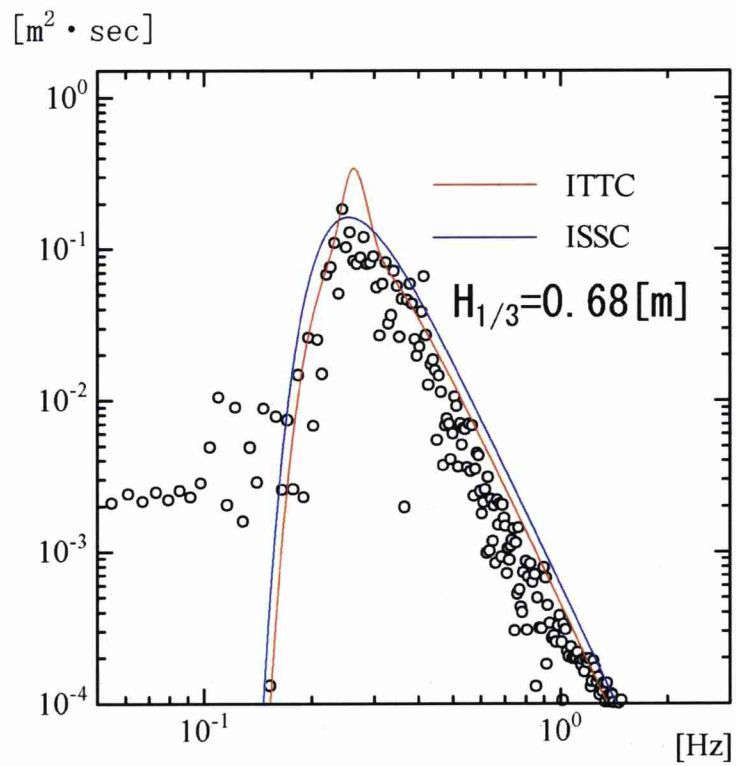
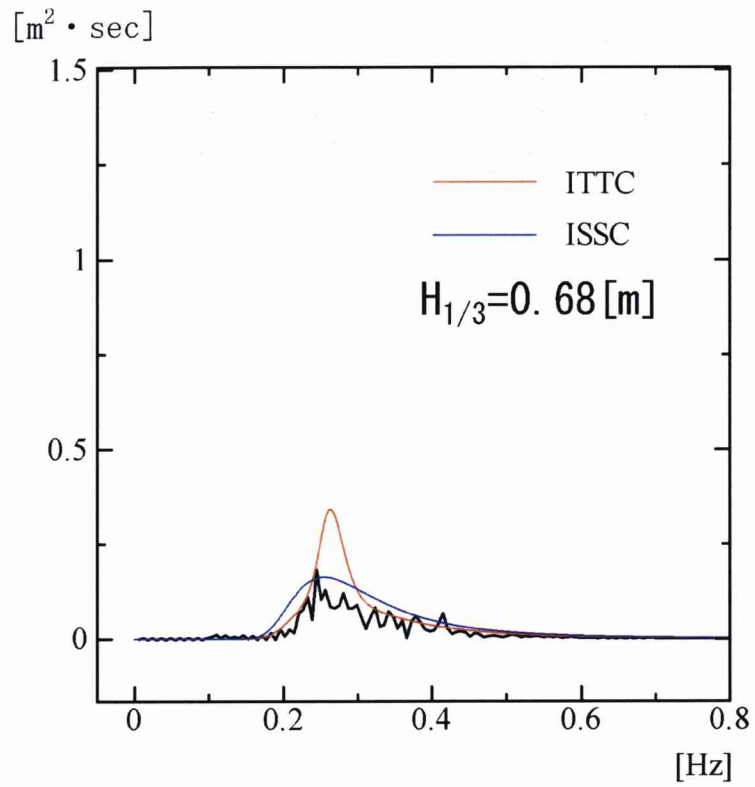


Fig.4.9 P-M wave spectrum of 0.68m wave heights

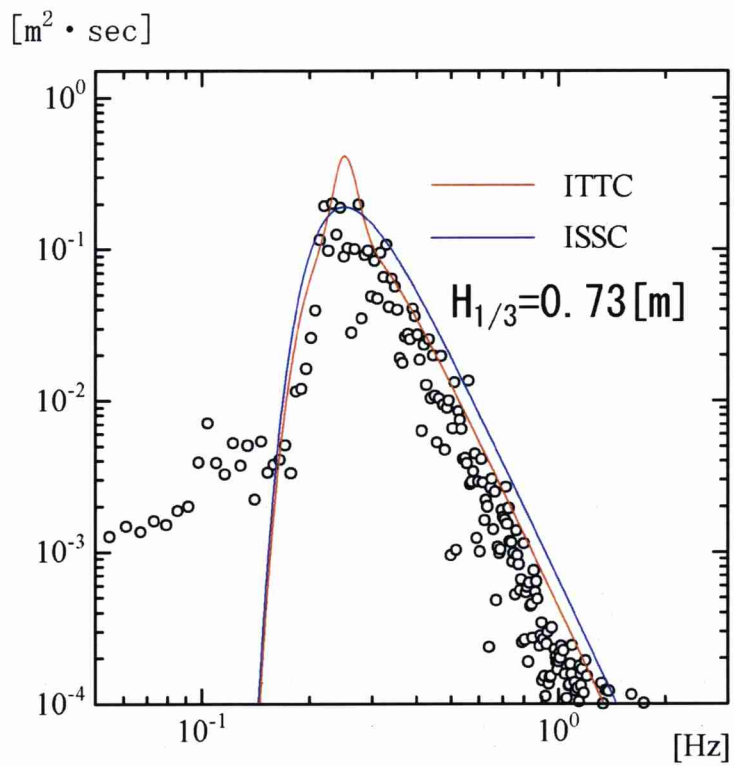
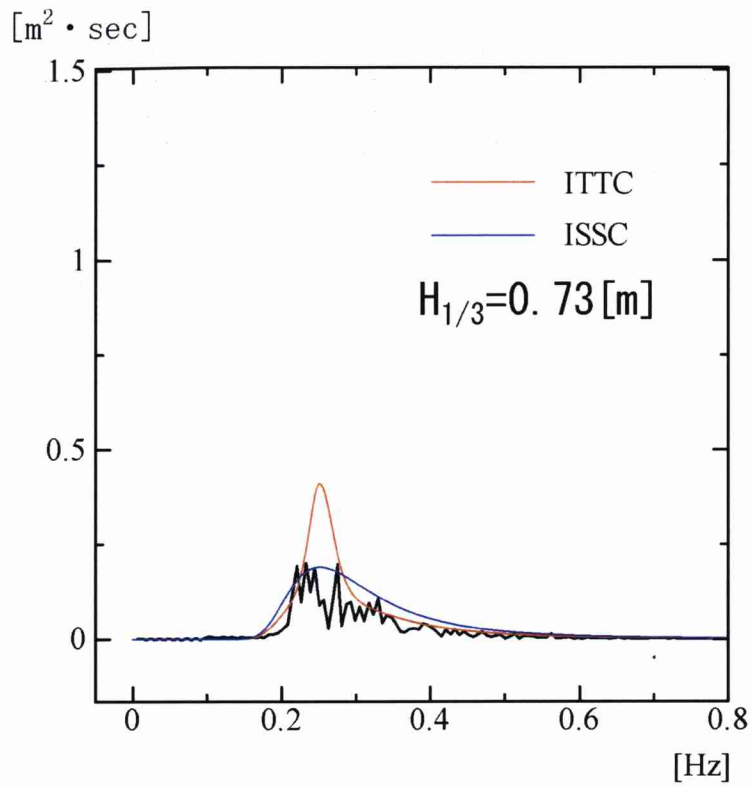


Fig.4.10 P-M wave spectrum of 0.73m wave heights

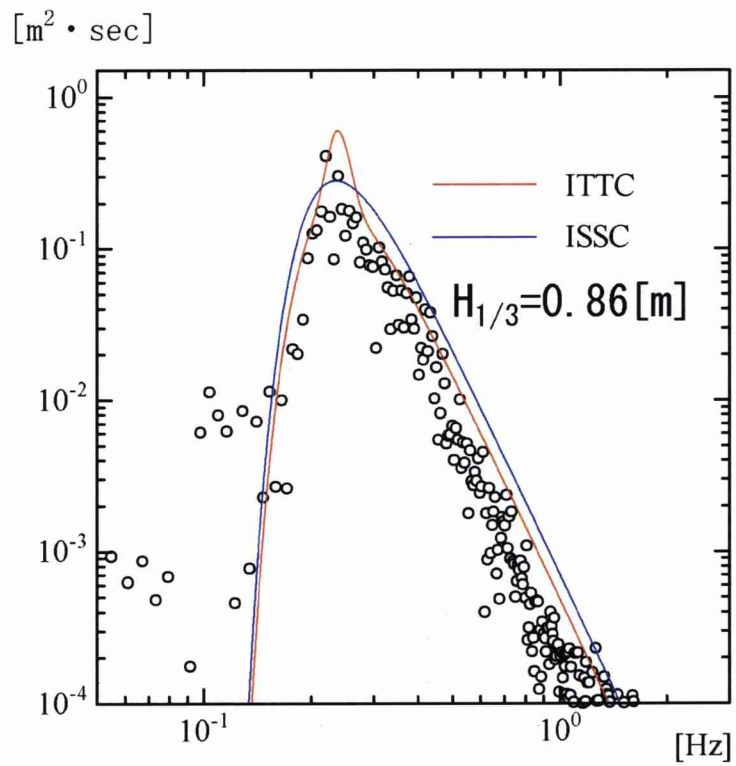
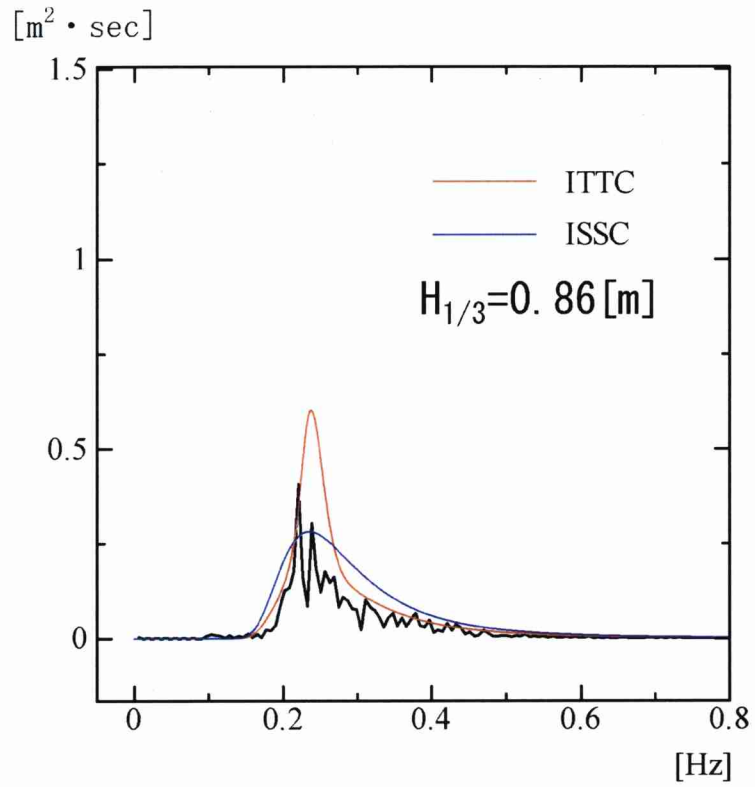


Fig.4.11 P-M wave spectrum of 0.86m wave heights

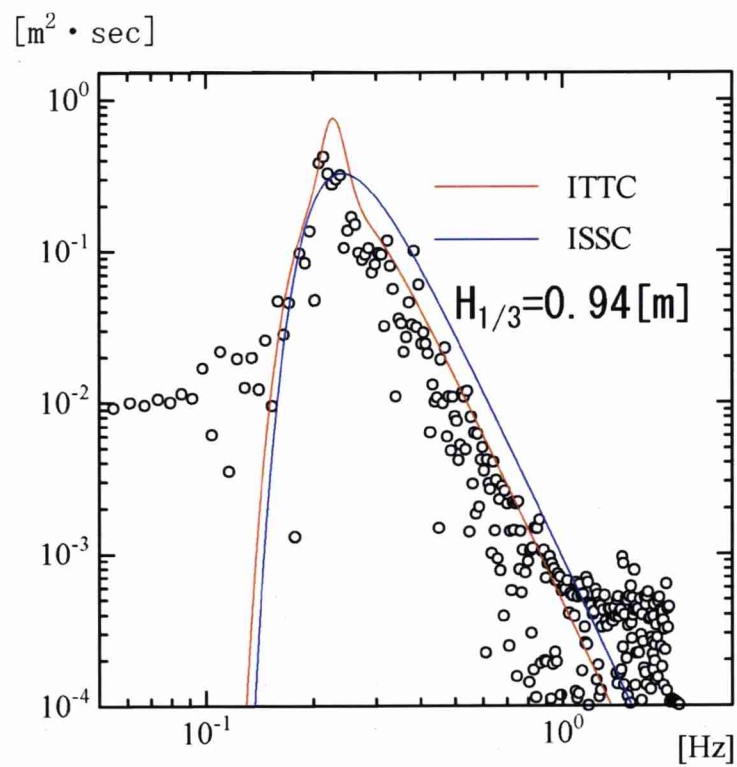
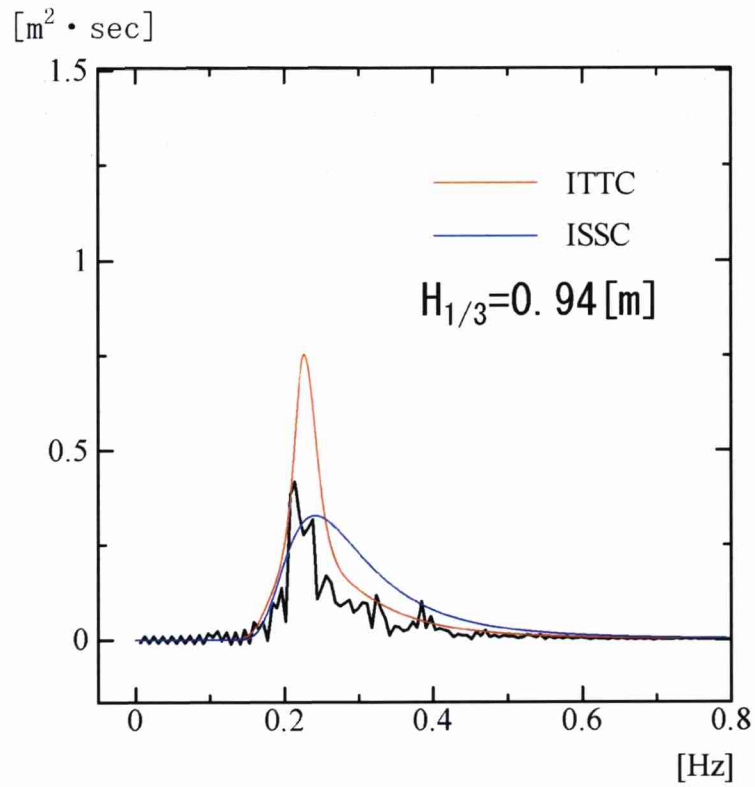


Fig.4.12 P-M wave spectrum of 0.94m wave heights

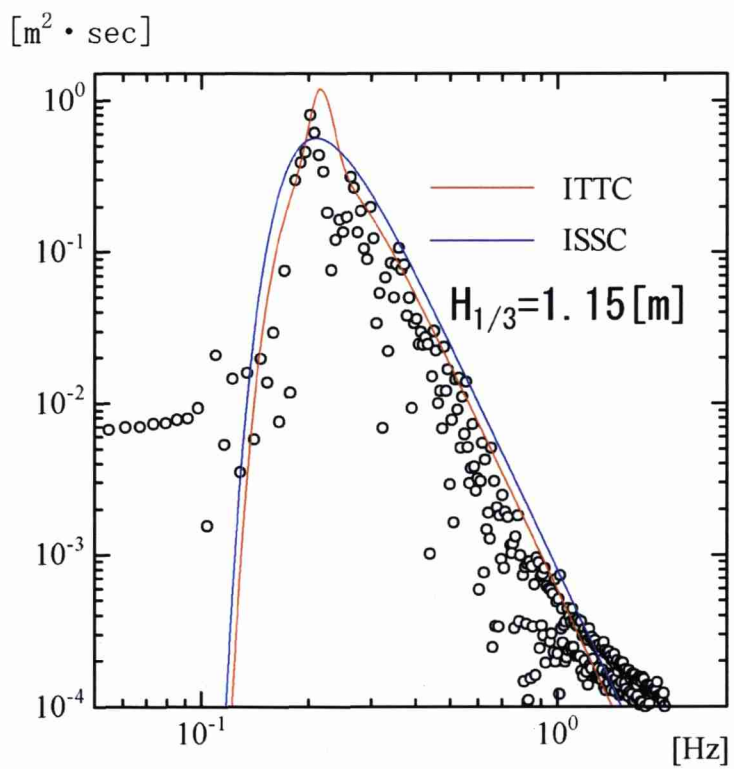
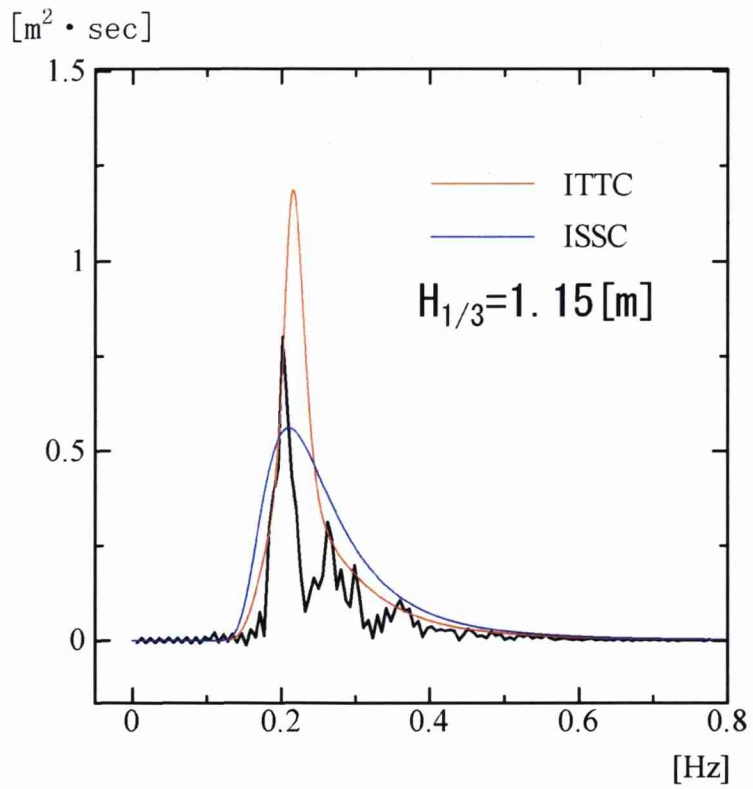


Fig.4.13 P-M wave spectrum of 1.18m wave heights

4-5 結言

本研究では小型漁船の船体動揺への影響を考慮し、東京湾における2.00m以下の有義波高を対象に波浪周波数特性について調べた。その結果、本研究で用いた解析資料167計測中半数以上において、パワースペクトルの高周波域でP-M型を示す結果となった。さらに小型漁船における安全操業に支障をきたすと考えられる有義波高0.50m以上の資料においては、その80%がP-M型を示した。しかし、P-M型を基にしたITTCスペクトル、およびISSCスペクトルといった従来用いられてきた近似式では、東京湾における有義波高2.00m以下のパワースペクトルを全周波数域において表現することが困難である場合が多い結果となった。本研究で対象とした比較的低い有義波高において、特に0.50m以上ではその多くがパワースペクトルの高周波域においてP-M型を示したことから、今後P-M型を主とした東京湾モデルの構築が必要であると考えられる。ただし、東京湾における波浪を考慮すると十分に発達していない可能性があり、パラメータとして吹送時間、および従来式で用いられていない有義波周期等を取り入れた東京湾モデルの構築を進めていくことが妥当であると考えられる。

小型漁船の船体動揺へ影響を及ぼすような比較的低い有義波高を対象とした東京湾の波浪スペクトルに関しては、従来の近似式では表現することが困難であり、パワースペクトルのピークの周波数帯も短時間で変化する可能性がある結果となった。今後新たな近似式、および短時間における卓越周波数を捉えることが、小型漁船における安全操業の確保という点からも重要であると考えられる。

第五章 有義波高の推定

5-1 緒言

船舶の船体動揺を引き起こす主要因は波浪であり、事前に波高等の推定を行うことができれば、船舶における安全運航を考慮する上で、非常に有益である。これまでWilsonらにより、さまざまな有義波高の推定式が提案されてきており、特にWilsonのIV型と呼ばれる推定式はよく用いられる。しかしながら、これらの推定式は外洋での波浪データを基に提案されており、湾内のような海面を考慮して提案されたものではない。

現在、日本における漁船の9割以上が20トン未満の小型漁船であり、さらに7割以上が5トン未満の小型漁船である。このような小型漁船にとっては、大型船には大きな影響を及ぼさないような1m前後の有義波高においても、甲板上での作業が困難となるばかりでなく、危険を伴う可能性が十分考えられる^{59,60}。そのため、事前に操業海域の波高を推定することができれば安全操業への一助となる。東京湾における有義波高の推定では、台風通過時の推定等が報告されているが、小型漁船に影響を及ぼすような波浪を対象とした研究はほとんど無い。

そこで、本章では、海洋波の発生・発達的主要因である風速、吹送距離に着目し、実計測された資料を基に、東京湾における1m前後の有義波高を対象とした新たな簡易推定式を提案し、有義波高の簡易推定を試みた。さらに、海面変位と同時に計測した船体動揺の資料を用いて船体動揺と有義波高の応答関係を調べ、風速および吹送距離の値を用いて有義波高のみならず船体横揺れ角振幅（両振幅）の推定も試みた。

5-2 解析資料

本研究で用いた解析資料は、第2章において記した解析資料を用いている。ただし、計測中の船体漂流により、大きく計測位置から船体が流された資料に関しては、吹送距離を測ることが困難であるため除外した。そのため、本章で用いた解析資料は合計で149計測分である。また、本章で提案した有義波高の簡易推定式のパラメータ推定を行うために、149計測資料中、10計測分の資料を使用したため、実際、有義波高の推定に用いた資料は139計測分である。なお、本章における各有義波高、1/3最大横揺れ角振幅の推定方法において、同様の解析資料（139計測分）を使用した。

5-3 有義波高の推定

5-3-1 解析方法

5-3-1-1 従来法

有義波高を風速および吹送距離の関数とした推定式として(5.1)式に示すWilsonのIV型と呼ばれる推定式が普及している。

まず、本章では、本章で提案している有義波高の簡易推定式との比較検証を行うために、従来法としてWilsonの推定式を用いた。一般的に普及している(5.1)式の他に、WilsonのI型、WilsonのII型、WilsonのIII型と呼ばれる式を使用した。WilsonのI型、WilsonのII型、WilsonのIII型をそれぞれ(5.2)式、(5.3)式、(5.4)式に示す。ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高[m]、 g は重力加速度 $9.8[\text{m/s}^2]$ 、 U は風速[m/s]、 F は吹送距離[m]を表す。

WilsonのIV型：

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^2 \right] \quad (5.1)$$

Wilson の I 型 :

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.26 \tanh \left[0.01 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right] \quad (5.2)$$

Wilson の II 型 :

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.0025 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.4} \quad (5.3)$$

Wilson の III 型

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.0024 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.45} \quad (5.4)$$

5-3-1-2 簡易推定式 I

次に風速および吹送距離を考慮し、新たに簡易推定式 I として(5.5)式で示す有義波高の簡易推定式を提案した。

$$H_{1/3} = \alpha F^\beta U^\gamma \quad (5.5)$$

(5.5)式において設定した各パラメータ α , β , γ の推定には線形最小二乗法を用いた。実計測された資料を基に、10計測分の海面変位資料をさまざまな組み合わせで10パターン用意し、パラメータ推定を行った。10パターンのうち、有義波高が0.37mから1.18mまでの値が偏らないように揃え、推定精度が最良であった10計測分の資料を最終的にはパラメータ推定に使用した。(5.5)式の対数を取り、線形最小二乗法を用いた計算式を下記に示す。

$$\log H_{1/3} = \log \alpha + \beta \log F + \gamma \log U \quad (5.6)$$

ここで、 $\log H_{1/3} = Z$, $\log \alpha = A$, $\log F = X$, $\log U = Y$ とおくと

$$Z_i = A + \beta X_i + \gamma Y_i \quad (5.7)$$

となる。ただし i は資料番号である。回帰式による誤差の二乗和を S とすると、

$$S = \sum_{i=1}^n (Z_i - A - \beta X_i - \gamma Y_i)^2 \quad (5.8)$$

となり、それぞれ α , β , γ で偏微分すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial A} &= \sum_{i=1}^n -2(Z_i - A - \beta X_i - \gamma Y_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta} &= \sum_{i=1}^n -2X_i(Z_i - A - \beta X_i - \gamma Y_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \gamma} &= \sum_{i=1}^n -2Y_i(Z_i - A - \beta X_i - \gamma Y_i) = 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

これより次のような連立方程式としておくことができる。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n Z_i &= A \sum_{i=1}^n 1 + \beta \sum_{i=1}^n X_i + \gamma \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i Z_i &= A \sum_{i=1}^n X_i + \beta \sum_{i=1}^n X_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^n X_i Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i Z_i &= A \sum_{i=1}^n Y_i + \beta \sum_{i=1}^n X_i Y_i + \gamma \sum_{i=1}^n Y_i^2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

(5.10) 式より連立方程式を解いて A , β , γ の値を算出した。また、 α は上式で得られた A の値より次式で計算した。

$$\alpha = e^A \quad (5.11)$$

これにより得られた各係数は次のとおりである。

$$\alpha = 1.004, \quad \beta = -0.220, \quad \gamma = 0.899$$

その結果、得られた簡易推定式は次の (5.12) 式となる。

$$H_{1/3} = 1.004 F^{-0.220} U^{0.899} \quad (5.12)$$

得られた(5.12)式を用いて有義波高の推定を行った。しかしながら、(5.12)式に示す通り、吹送距離 F のパラメータ(β)が負の値となり、本来は吹送距離が長くなるのに伴い波高が高くなっていくのにも関わらず、(5.12)式では吹送距離が長くなるほど推定した有義波高の値が低くなってしまいう物理的問題が生じた。この問題は、今回の10パターンで推定した全てのパラメータ推定結果において同様に見られ、必ず負の値が生じる結果となった。

さらに、(5.12)式では風速が0.0[m/s]の場合、推定した有義波高が0.0mとなってしまうが、実際の海面において風速が0.0[m/s]でも常に海面変動は起こっており、こうしたことから(5.5)式にもう一つパラメータを追加することが最良であると考えたが、線形最小二乗法のみを用いて解くことが困難であるため、行わなかった。

5-3-1-3 簡易推定式Ⅱ

簡易推定式Ⅰで見られたような物理的問題等を考慮し、パラメータ推定に非線形最小二乗法的一种である最急降下法^{61, 62, 63, 64, 65, 66})を用いることとし、次の(5.13)式を有義波高の簡易推定式Ⅱとした。

$$H_{1/3} = \alpha F^{\beta} U^{\gamma} + \mu \quad (5.13)$$

パラメータ推定に用いた最急降下法の一般型を次の(5.14)式に示す。ここで x は各パラメータを表し、 a はステップ幅を示す。また、ステップ幅は $a > 0$ の正の値である。さらに、最急降下法の概念図をFig.5.1に示す。最小化すべき基準となる、ある関数 $f(x)$ に対し、 x に適当な初期値を与え、(5.14)式を用いて x を逐次更新していく。

$$x^{k+1} = x^{(k)} - a \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Big|_{x=x^{(k)}} \quad (5.14)$$

ただし、実際には $f(x)$ に起伏が多数あり容易に最適解を得ることが出来な

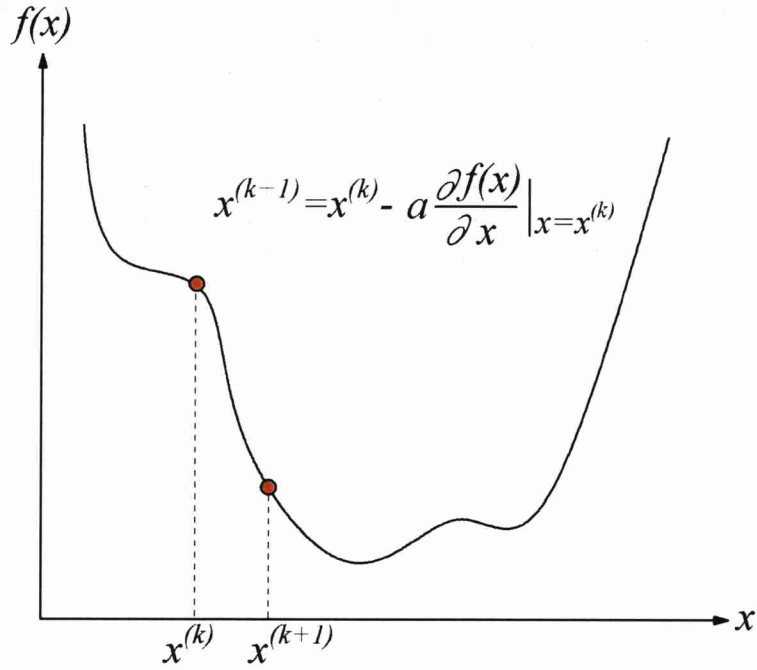


Fig.5.1 A conception diagram of steepest descent method

い場合が多く、これを極小解（ローカルミニマム）と呼ぶ（Fig.5.2）。つまり、(5.14)式を用いて得られた解が最適解ではない可能性がある。

簡易推定式Ⅱにおける最急降下法を用いた具体的なパラメータの推定手順は以下の通りである。

まず線形最小二乗法と同様に誤差 (S) の関数とおき、各パラメータで編微分を行う。なお、 $\widetilde{H}_{1/3i}$ は有義波高の推定値を表す。

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=1}^N (\widetilde{H}_{1/3i} - H_{1/3i})^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N (\alpha F_i^\beta U_i^\gamma + \mu - H_{1/3i})^2
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

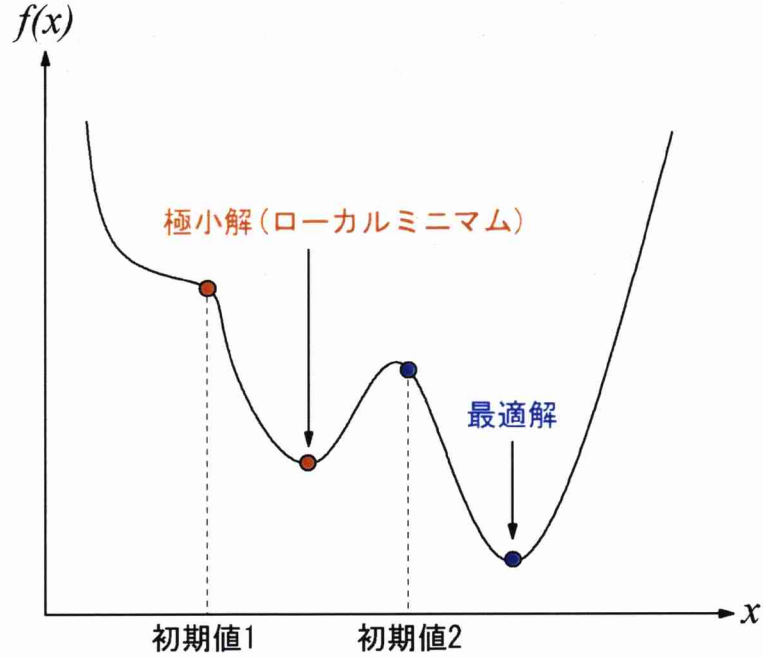


Fig.5.2 A conception diagram of local minimum

(5.15) 式に対し各パラメータで偏微分を行うと

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^N 2(F_i^\beta U_i^\gamma)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma + \mu - H_{1/3i}) \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^N 2(\alpha F_i^\beta \log F_i U_i^\gamma)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma + \mu - H_{1/3i}) \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^N 2(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma \log U_i)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma + \mu - H_{1/3i}) \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^N 2(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma + \mu - H_{1/3i}) \quad (5.19)$$

これより、(5.14) 式の偏微分の項に (5.16), (5.17), (5.18), (5.19) 式を代入し、反復計算を行い、各パラメータの最適解を求める。

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha^{(k)}} \quad (5.20)$$

$$\beta^{(k+1)} = \beta^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\beta^{(k)}} \quad (5.21)$$

$$\gamma^{(k+1)} = \gamma^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \gamma} \Big|_{\gamma=\gamma^{(k)}} \quad (5.22)$$

$$\mu^{(k+1)} = \mu^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \mu} \Big|_{\mu=\mu^{(k)}} \quad (5.23)$$

最急降下法を用いてパラメータ推定を行う際、適当な初期値およびステッ

幅をさまざまなパターンで設定し，最終的に用いた初期値およびステップ幅，反復回数をTable.5.1に示す。

Table.5.1 Condition for Steepest descent method

	α	β	γ	μ
初期値	0.05	0.05	1.00	0.05
ステップ幅	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
反復回数	378			

なお，反復回数は誤差が十分小さくなり，誤差が一定の値に収束したところで打ち切っている。また，パラメータ算出に使用した資料は，簡易推定式 I でパラメータ推定を行った線形最小二乗法を用いた場合と同様のものを使用した。その結果得られた各パラメータの値は以下となる。

$$\alpha = 0.062, \quad \beta = 0.030, \quad \gamma = 0.982, \quad \mu = 0.070$$

ただし，最急降下法より得られた結果が最適解であると断定することは困難であり，極小解である可能性が十分考えられるため，さまざまなパターンを計算した中で最良の推定精度を示した初期値およびステップ幅の組み合わせを用いた。

これより，簡易推定式 II は(5.24)式となる。

$$H_{1/3} = 0.062F^{0.030}U^{0.982} + 0.070 \quad (5.24)$$

(5.24)式を用いて有義波高の推定を行ったが，上でも記したように最急降下法の性質上，極小解であることが考えられ，初期値およびステップ幅の組み合わせにおいて，より良い推定精度を示す組み合わせがあることが考えられる。

5-3-1-4 簡易推定式Ⅱ'

さらに、簡易推定式Ⅱ'として、簡易推定式Ⅰで使用した(5.5)式の各パラメータ (α , β , γ) に対して、簡易推定式Ⅱと同様に最急降下法を用いてパラメータ推定を行った。推定手順は以下の通りである。

簡易推定式Ⅱと同様に誤差 (S) の関数とおき、各パラメータで偏微分を行う。

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^N (\widetilde{H_{1/3i}} - H_{1/3i})^2 \\ &= \sum_{i=1}^N (\alpha F_i^\beta U_i^\gamma - H_{1/3i})^2 \end{aligned} \quad (5.25)$$

(5.25)式に対し各パラメータで偏微分を行うと

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^N 2(F_i^\beta U_i^\gamma)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma - H_{1/3i}) \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^N 2(\alpha F_i^\beta \log F_i U_i^\gamma)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma - H_{1/3i}) \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^N 2(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma \log U_i)(\alpha F_i^\beta U_i^\gamma - H_{1/3i}) \quad (5.28)$$

これより、(5.14)式の偏微分の項に(5.26)、(5.27)、(5.28)式を代入し、反復計算を行い、各パラメータの最適解を求める。

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha^{(k)}} \quad (5.29)$$

$$\beta^{(k+1)} = \beta^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\beta^{(k)}} \quad (5.30)$$

$$\gamma^{(k+1)} = \gamma^{(k)} - a \frac{\partial S}{\partial \gamma} \Big|_{\gamma=\gamma^{(k)}} \quad (5.31)$$

なお、初期値及びステップ幅は4パターン用意し、最急降下法に用いた。パターン毎の初期値、ステップ幅、及び最終的な反復回数をTable.5.2~Table.5.5に示す。

Table.5.2 Condition for Steepest descent method (Pattern1)

	α	β	γ
初期値	0.05	0.05	1.00
ステップ幅	0.0001	0.0001	0.0001
反復回数	530		

Table.5.3 Condition for Steepest descent method (Pattern2)

	α	β	γ
初期値	0.05	0.05	0.05
ステップ幅	0.0001	0.0001	0.0001
反復回数	2048		

Table.5.4 Condition for Steepest descent method (Pattern3)

	α	β	γ
初期値	1.00	1.00	1.00
ステップ幅	0.0001	0.0001	0.0001
反復回数	収束せず		

Table.5.5 Condition for Steepest descent method (Pattern4)

	α	β	γ
初期値	0.05	0.05	0.05
ステップ幅	0.00095	0.00095	0.00095
反復回数	2273		

これより得られた各パラメータの値を Table.5.6 に示す。なお、Pattern3 では収束が見られなかったため、結果を得ることが出来なかった。

Table.5.6 The value of parameters (Pattern1~4)

	α	β	γ
Pattern1	0.075	0.033	0.935
Pattern2	0.087	0.052	0.775
Pattern3	収束せず		
Pattern4	0.089	0.049	0.783

よって、得られた簡易推定式 II' を (5.32)~(5.34) に示す。

$$H_{1/3} = 0.075F^{0.033}U^{0.935} \quad (5.32)$$

$$H_{1/3} = 0.087F^{0.052}U^{0.775} \quad (5.33)$$

$$H_{1/3} = 0.089F^{0.049}U^{0.783} \quad (5.34)$$

これにより簡易推定式 I 及び II と同様に有義波高の推定を行った。

5-3-2 推定式の比較

本研究で用いた有義波高の各推定式の推定傾向を捉えるために、吹送距離、風速及び有義波高の推定値を3軸とした3次元グラフを描いた。 x 軸、 y 軸及び z 軸にそれぞれ吹送距離、風速、有義波高の推定値をとった。また、本研究で用いた実計測資料では、吹送距離が最大で49800mであり、風速は11.77m/sであったため、吹送距離を0~50000m、風速は0~12.00m/sまでを範囲とした。さらに、吹送距離と有義波高の推定値、風速と有義波高の推定値との関係を捉えるために、 $x-z$ 平面及び $y-z$ 平面のグラフを示した。

5-3-2-1 従来法

Fig.5.3~Fig.5.6に従来法として用いたWilsonのI型からIV型までの吹送距離、風速及び有義波高の推定値との関係を示す。四つの推定式とも吹送距離が10000mあたりまで大きくなるにつれ、有義波高の推定値が大きくなっており、その後も吹送距離が大きくなるにつれ推定値も大きくなっている。また、風速と有義波高の推定値との関係では緩やかなカーブを描いており、風速があがるにつれ推定値もほぼ比例して大きくなっている。これより、Wilsonの四つの推定式とも吹送距離と風速が大きく推定値に影響するといえる。

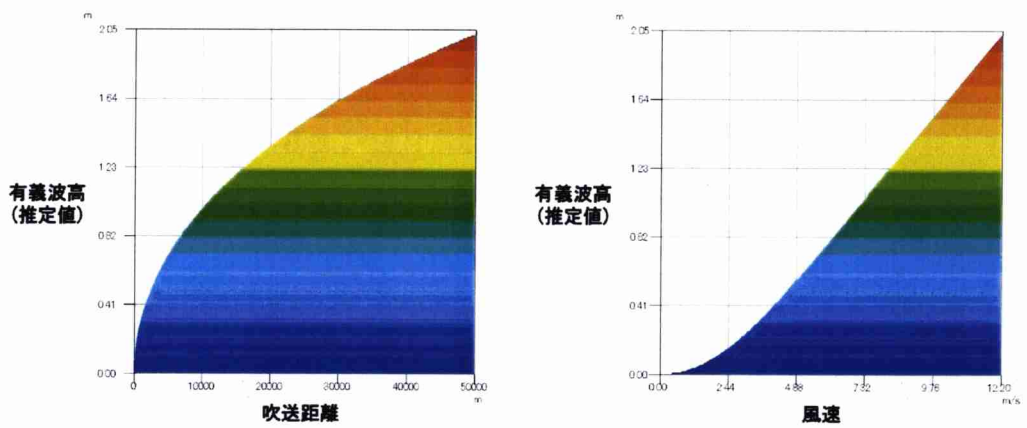
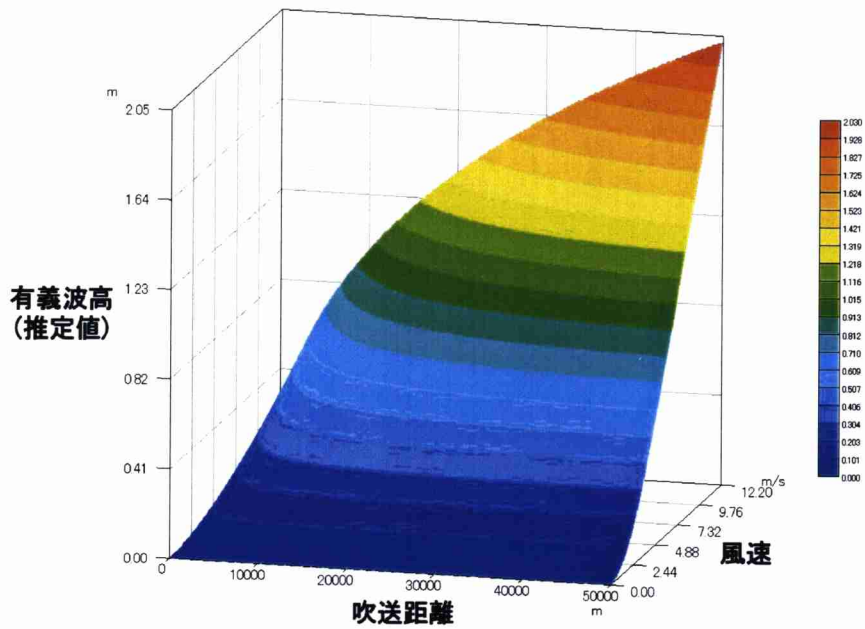


Fig.5.3 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with Wilson I's prediction formula

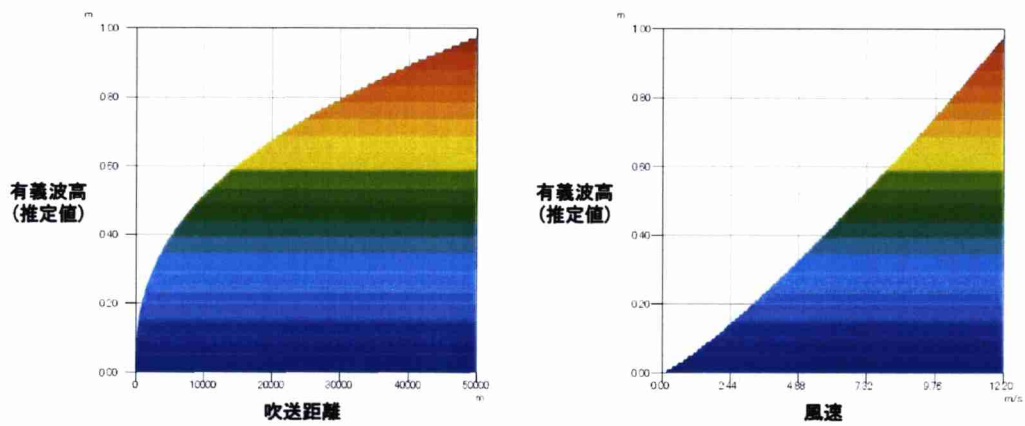
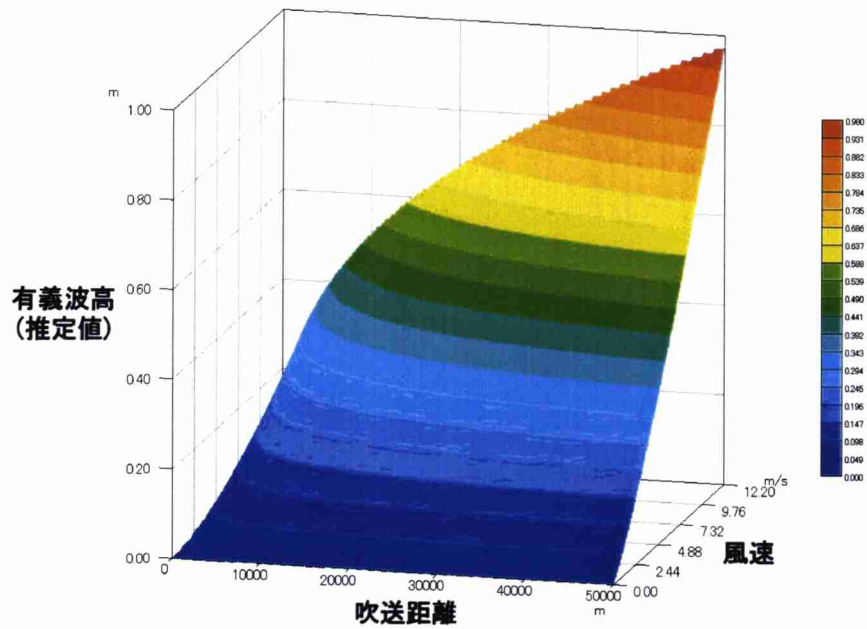


Fig.5.4 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with Wilson II's prediction formula

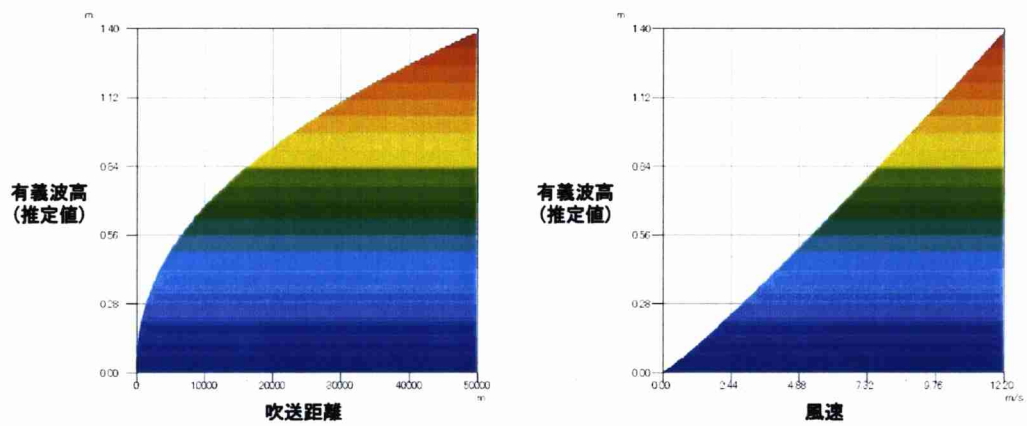
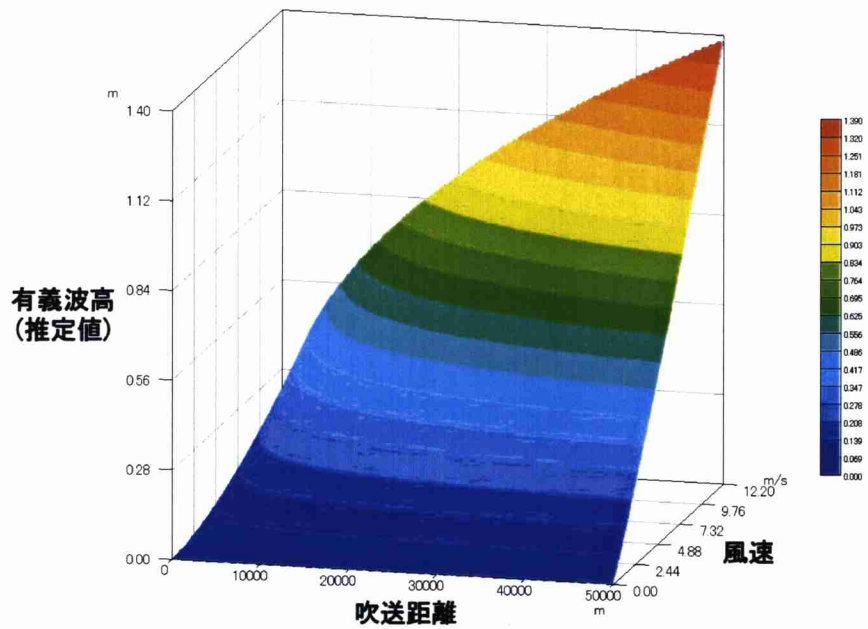


Fig.5.5 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with Wilson III's prediction formula

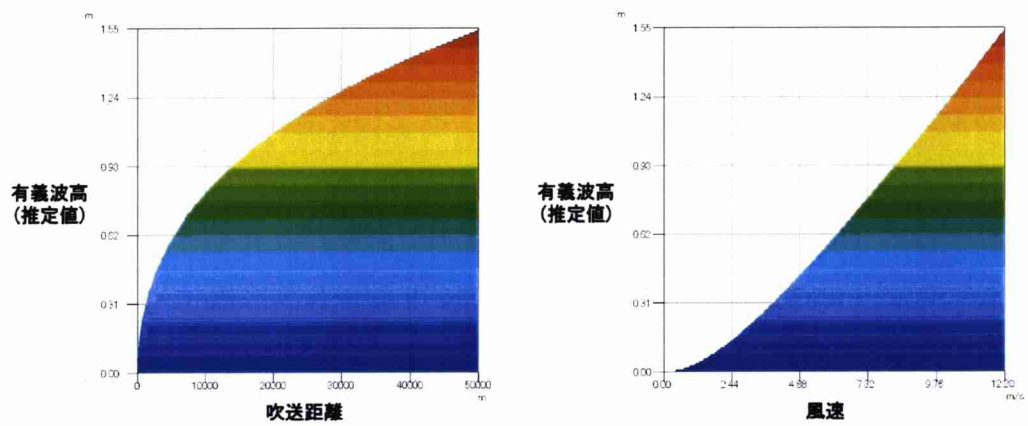
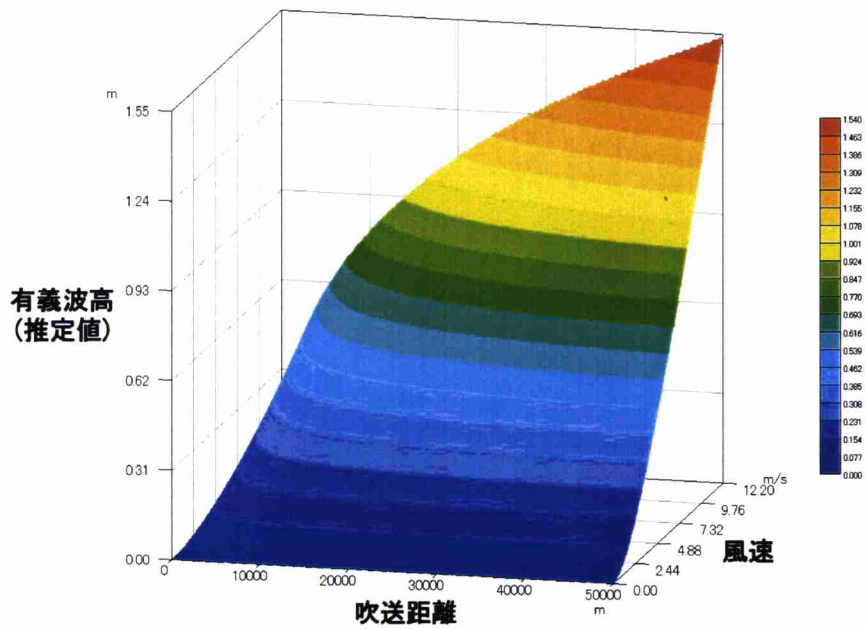


Fig.5.6 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with Wilson IV's prediction formula

5-3-2-2 簡易推定式 I

Fig.5.7に簡易推定式 I の吹送距離，風速及び有義波高の推定値との関係を示す。風速と有義波高の推定値との関係はWilsonの場合と同様に，ほぼ比例の関係にあり，風速の大きさに比例し推定値も大きくなっており，風速の影響が大きいことがわかる。しかし，吹送距離が上がるにつれ推定値が下がる傾向となった。これは，推定式のパラメータ推定に線形最小二乗法を用いたことにより，パラメータ β の値が負となったことが原因であり，吹送距離が大きくなるほど推定値が小さくなったものと考えられる。つまり，本来は吹送距離の長さが長くなるにつれ波浪も発達するが，簡易推定式 I では逆に小さくなっており，矛盾する結果となった。

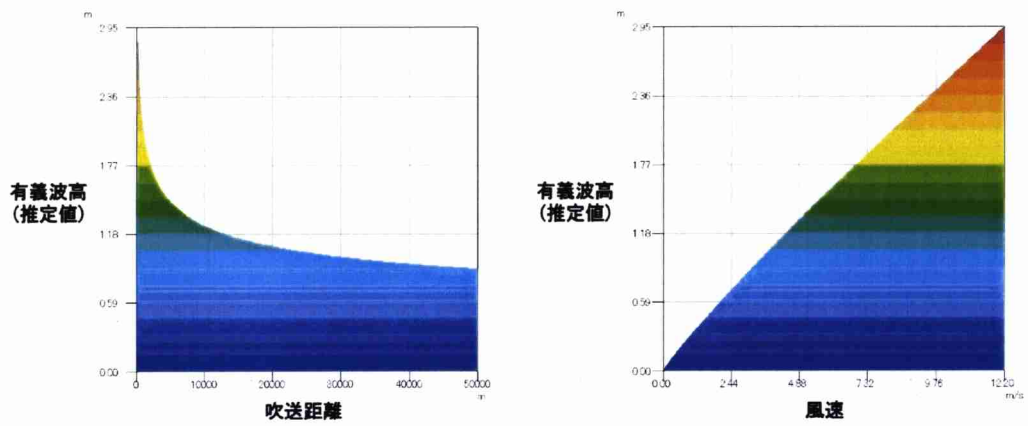
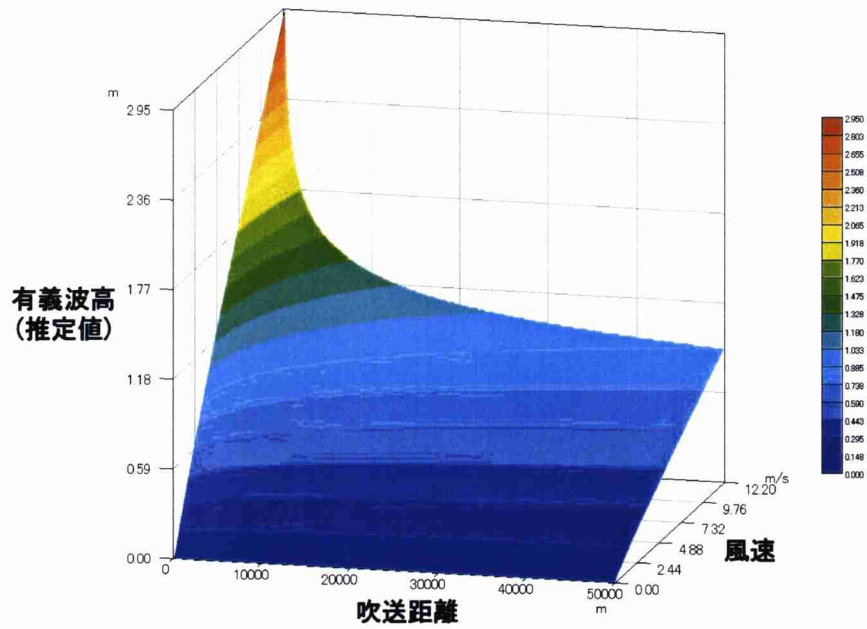


Fig.5.7 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with prediction formula(5.12)

5-3-2-3 簡易推定式Ⅱ

Fig.5.8に簡易推定式Ⅱの吹送距離、風速及び有義波高の推定値との関係を示す。風速と有義波高の推定値との関係はWilson及び簡易推定式Ⅰの場合と同様にほぼ比例の関係にあり、風速が大きくなるにつれ推定値も大きくなり、風速の影響が大きいことがわかる。一方、吹送距離と推定値との関係では急激に推定値が大きくなり、その後は収束するような形となっている。つまり、吹送距離の影響が少ないことがわかる。しかし、推定式のパラメータ推定に最急降下法を用いたことにより、簡易推定式Ⅰのような吹送距離のパラメータが負となるような現象はなく、吹送距離の長さが長くなるにつれ推定値が小さくなる問題が回避できていることがわかる。よって、簡易推定式Ⅱは風速の影響が非常に大きく関係する推定式であるといえる。

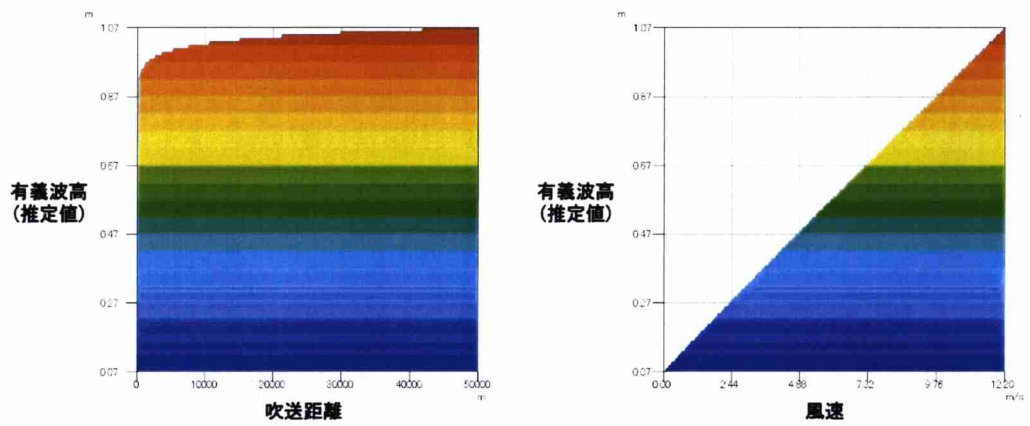
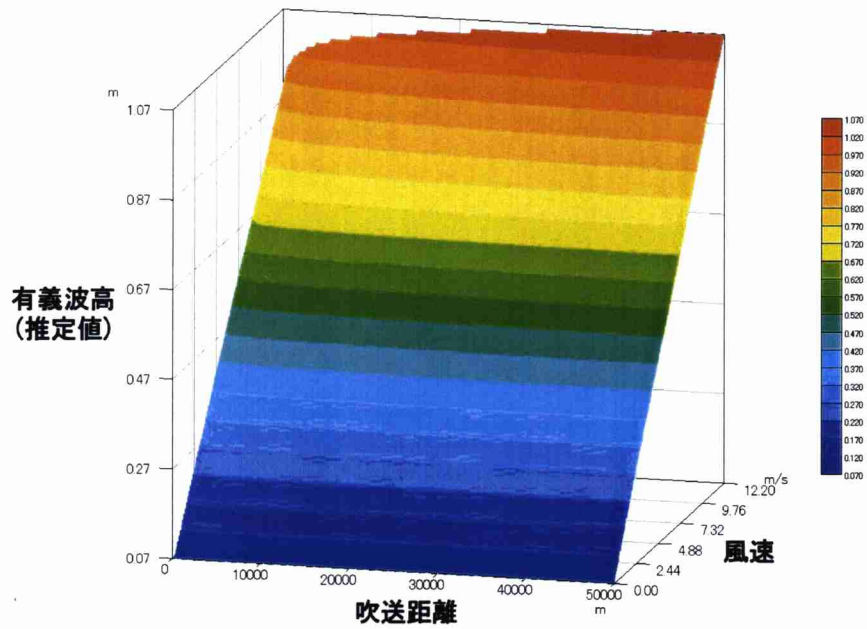


Fig.5.8 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with prediction formula(5.24)

5-3-2-4 簡易推定式Ⅱ'

Fig.5.9～Fig.5.11に簡易推定式Ⅱ'((5.32)～(5.34))の吹送距離，風速及び有義波高の推定値との関係を示す。簡易推定式Ⅱ'として提案した3つの推定式の吹送距離，風速及び有義波高の推定値との関係では，簡易推定式Ⅱの場合とほぼ同様の傾向が見られた。つまり，吹送距離と推定値との関係では推定値の収束傾向が見られ，風速の大きさにほぼ比例して推定値が大きくなっていることがわかる。簡易推定式Ⅱと同様で，吹送距離の値よりも風速の値に非常に影響される推定式であるといえる。

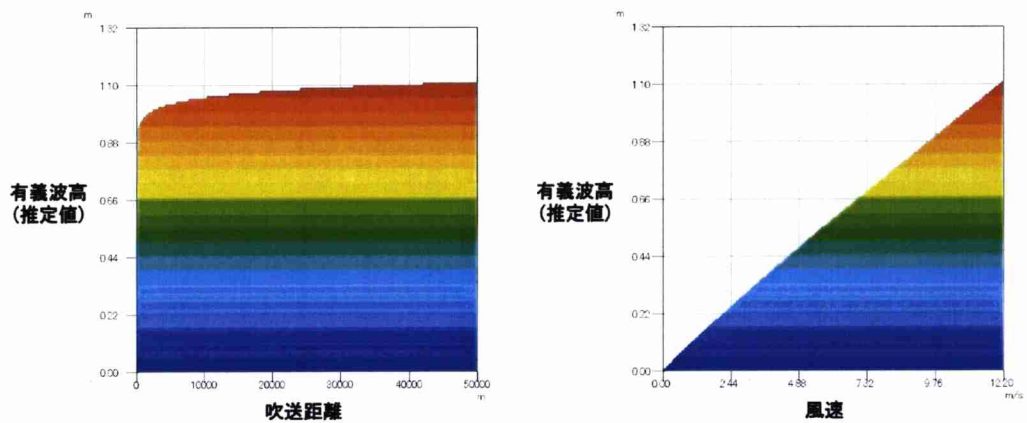
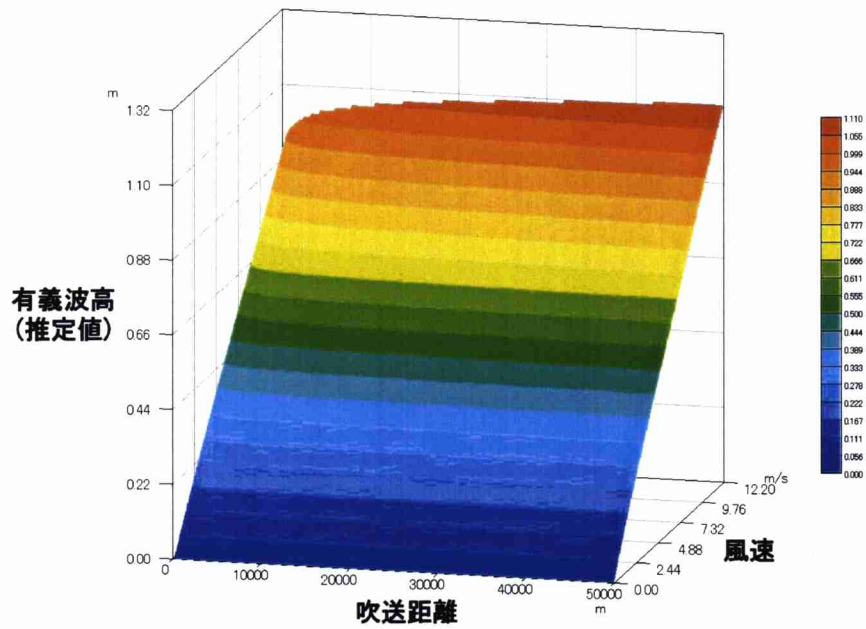


Fig.5.9 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with prediction formula(5.32)

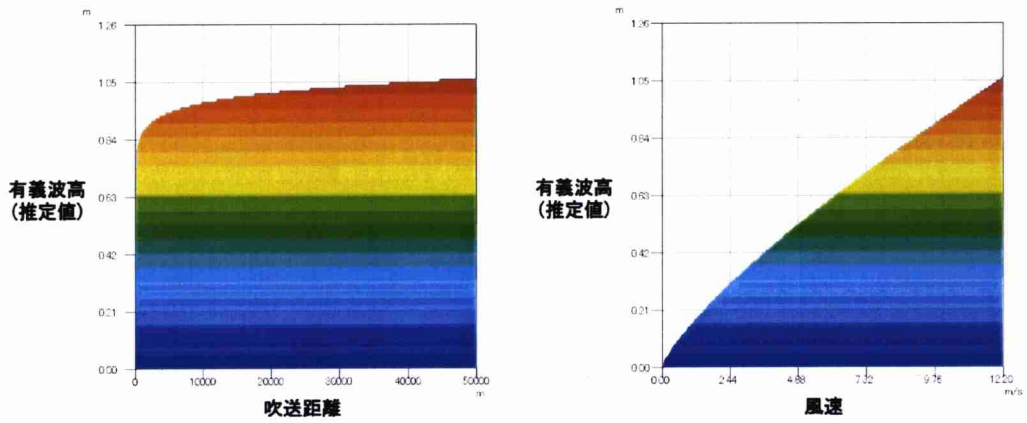
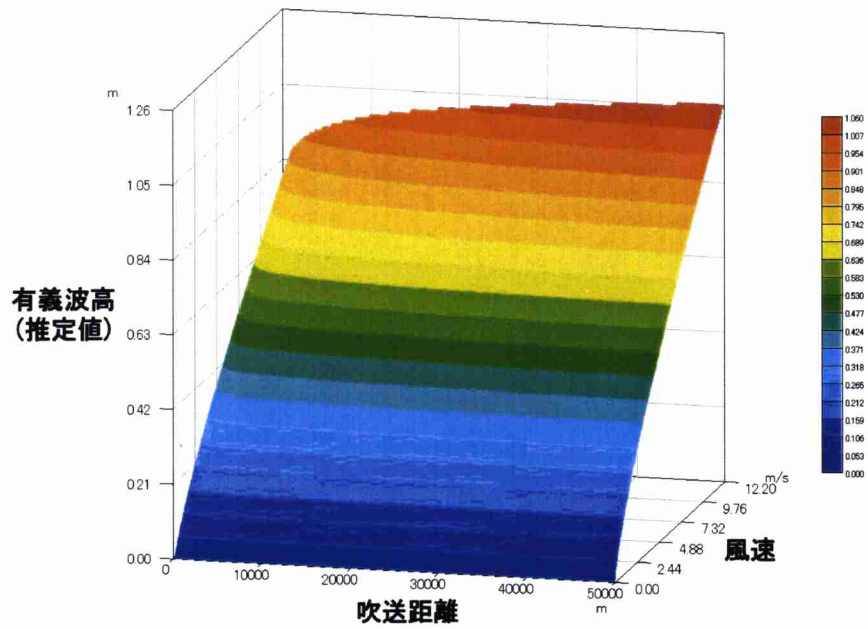


Fig.5.10 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with prediction formula(5.33)

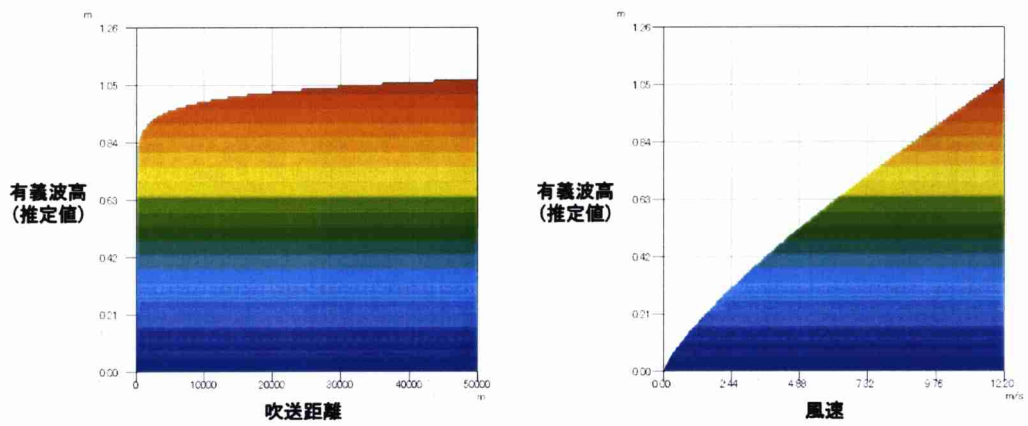
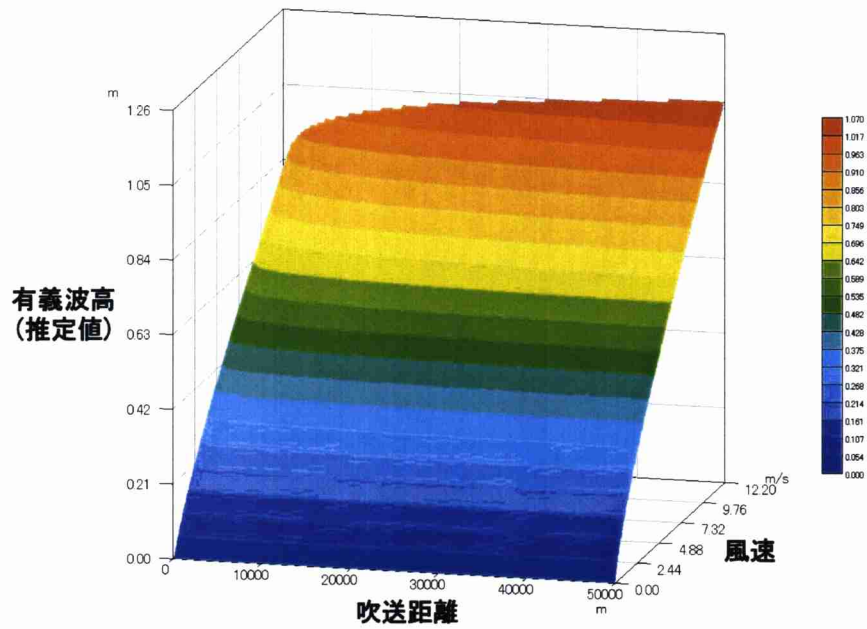


Fig.5.11 Relationship between fetch, wind velocity and estimated significant wave height with prediction formula(5.34)

5-3-3 結果及び考察

実測値と推定値との誤差の指標に二乗平均平方根誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を用いた。RMSEの計算式は次の(5.35)式で示す。なお、 $\widetilde{H}_{1/3i}$ は有義波高の推定値を表し、 $H_{1/3}$ はここでは実測値を表す。(5.35)式に示す通り差の二乗平均値であるため、RMSEの値が大きい場合、実測値と推定値との全体的な誤差が大きいことを示し、逆にRMSEの値が小さければ全体的な誤差が小さいことを示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\widetilde{H}_{1/3} - H_{1/3} \right)^2} \quad (5.35)$$

さらに、誤差の目安として各推定結果のグラフにおいて $\pm 0.20\text{m}$ で点線を引いた。なお、グラフの横軸に実測値をとり、縦軸に推定値をとっている。

5-3-3-1 従来法

WilsonのI型を用いた有義波高の推定結果をFig.5.12に示す。図に示すように、実測値が 0.4m 前後において推定値のほうが小さい値を示す過小推定が認められた。最大で 0.5m 以上の推定誤差があり、実測値の約 0.5m に対して、推定値では約 0.0m となっており、小型漁船への影響を考慮すると無視できる誤差ではない。元来、最大波高は有義波高の約2倍の値に近くなると考えられており、このような有義波高の性質を考慮すると、最大波高にして約 1.0m の誤差となることが考えられ、小型漁船における安全な操業に対して大きな影響を与えるものと考えられる。

また、実測値が 1.0m 付近では、推定値のほとんどが $\pm 0.2\text{m}$ の点線枠内から大きく外れており、過大推定となった。小型漁船への影響も大きいと考えられる波高であり、上記とは逆に推定値を参考にして海面状態を判断すると、出漁の可否の問題へと繋がり、問題となる。

RMSEの値は 0.21m と、このような大きな推定誤差から考えれば小さい値

であるが、実際は上記のような問題が発生する結果となった。

Fig.5.13にWilsonのⅡ型を用いた推定結果を示す。WilsonのⅡ型を用いた推定結果では、従来法の中で、最も推定精度が低く、RMSEの値も従来法の中でも最も大きい0.23mであった。また、推定値のほとんどが実測値よりも小さい値を示す過小推定であり、WilsonのⅠ型で見られたような大きな過小推定の問題も残されたままとなった。これより、従来法の中には最も実用的でない結果であると考ええる。

同様にFig.5.14にWilsonのⅢ型を用いた推定結果を示す。推定精度は従来法の中では、この後に記しているWilsonのⅣ型を用いた推定精度とほぼ同等で、RMSEの値も0.17mと比較的小さな値となった。

しかし、実測値が0.4m前後における推定値が非常に小さな値を示す場合が多く認められ、過小推定の問題を解決できていない結果となった。ただし、WilsonのⅠ型を用いた推定結果と比較して、実測値約1.0m付近の過大推定の問題はほとんど認められず、WilsonのⅠ型、Ⅱ型と比較すると、より実用的であると考ええる。

WilsonのⅣ型を用いた場合の推定結果をFig.5.15に示す。一般的によく用いられる推定式であり、WilsonのⅢ型の推定結果と同様に、従来法の中では推定精度の高い結果となった。RMSEの値もWilsonのⅢ型を用いた場合と同様で、0.17mであった。しかしながら、過小推定の問題はWilsonのⅣ型でも認められ、小型漁船の安全操業を考慮した場合、危険性が残存する結果となった。

本来、Wilsonの推定式は外洋における実測資料を基に提案されているため、東京湾という陸地に囲まれた狭い海域で、外洋の影響を受けないような海域において使用したことなどが、上記のような問題が発生した原因と考えられる。このような問題を考慮し、東京湾における小型漁船の安全操業への適用を考えると、実用的ではないと考える。

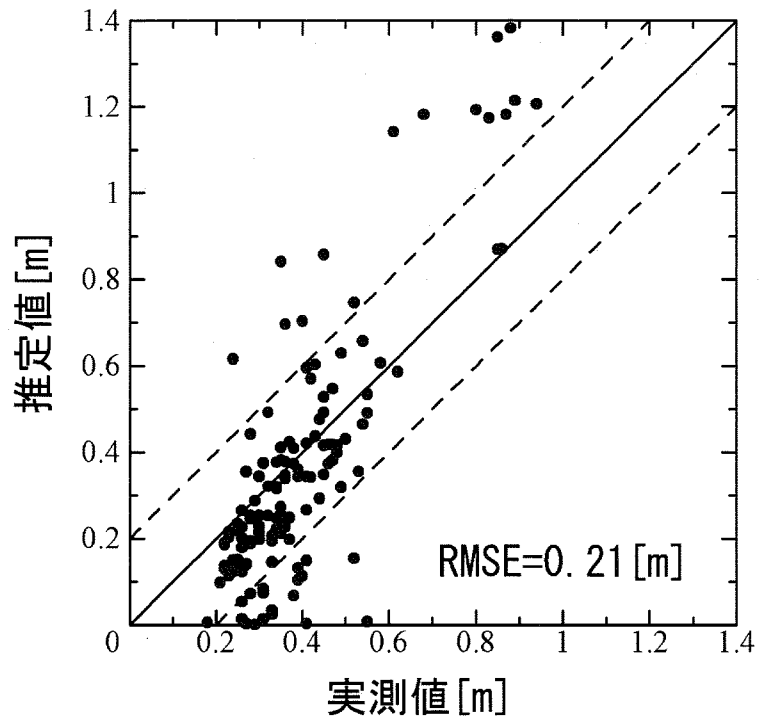


Fig.5.12 Relationship between observed and estimated significant wave height with Wilson I's prediction formula

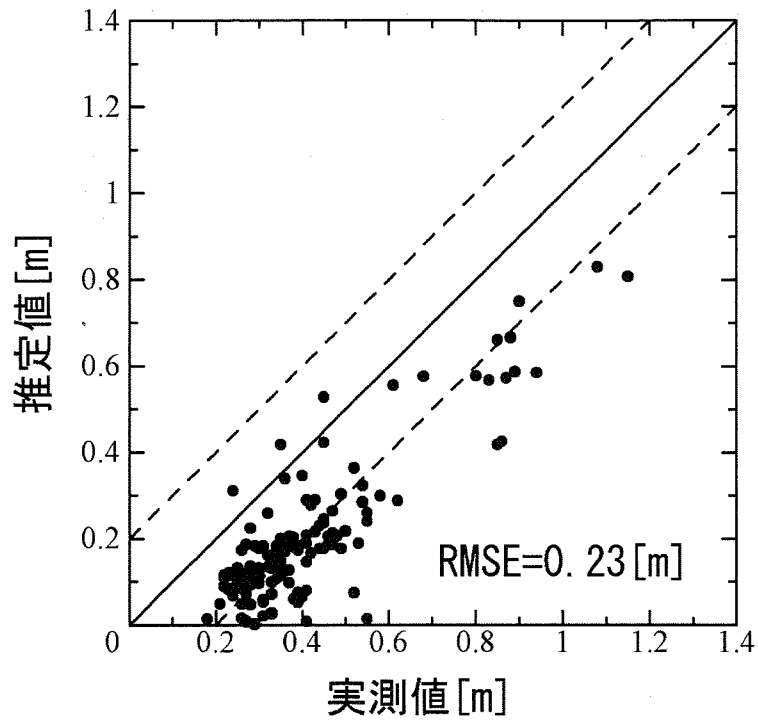


Fig.5.13 Relationship between observed and estimated significant wave height with Wilson II's prediction formula

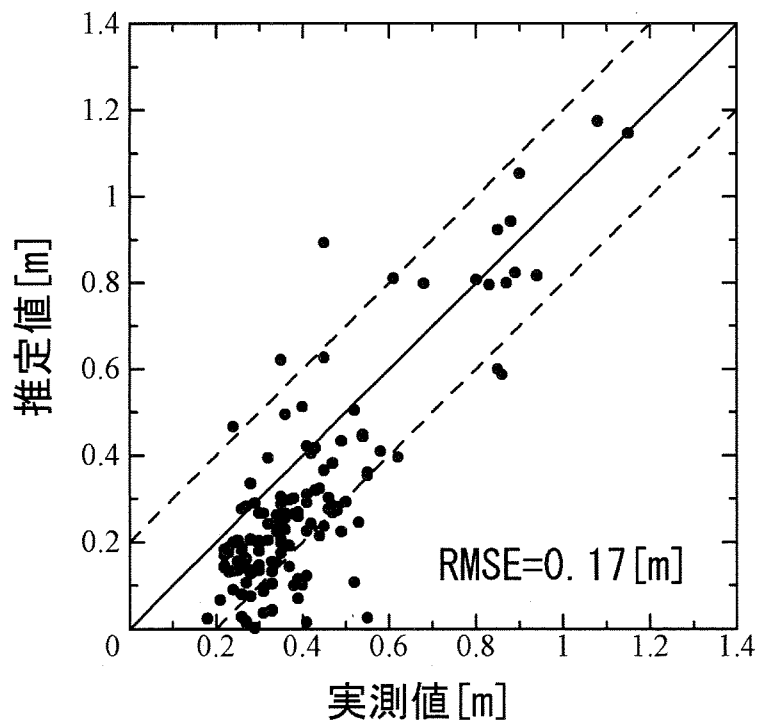


Fig.5.14 Relationship between observed and estimated significant wave height with Wilson III's prediction formula

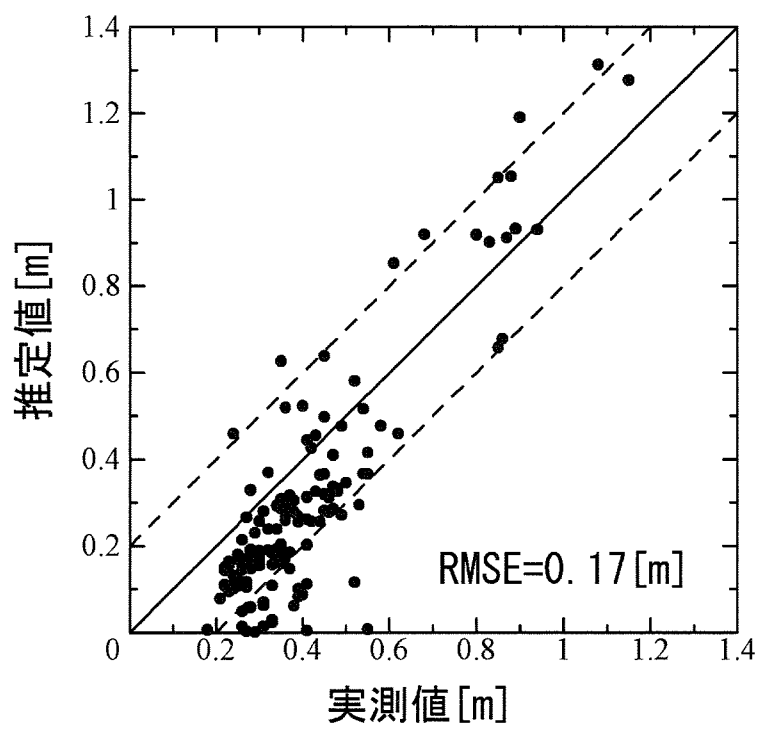


Fig.5.15 Relationship between observed and estimated significant wave height with Wilson IV's prediction formula

5-3-3-2 簡易推定式 I

本章で提案した二つの有義波高の簡易推定式のうち、まず簡易推定式 I を用いた場合の推定結果を Fig.5.16 に示す。Wilson の推定式を用いた結果に見られたようなが過小推定されてしまう現象は軽減できたが、逆に突出した過大推定推定が多く認められた。また、実測値で 1.2m 付近の資料に対して過小推定してしまう結果となり、実用上危険を伴う恐れが考えられる。さらに、RMSE の値も 0.27m と非常に大きく Wilson の推定式を用いた場合と比較して推定精度を下回る結果となった。提案式のパラメータ β が負の値であることなどが大きな原因と考えられ、実用的でない結果となった。

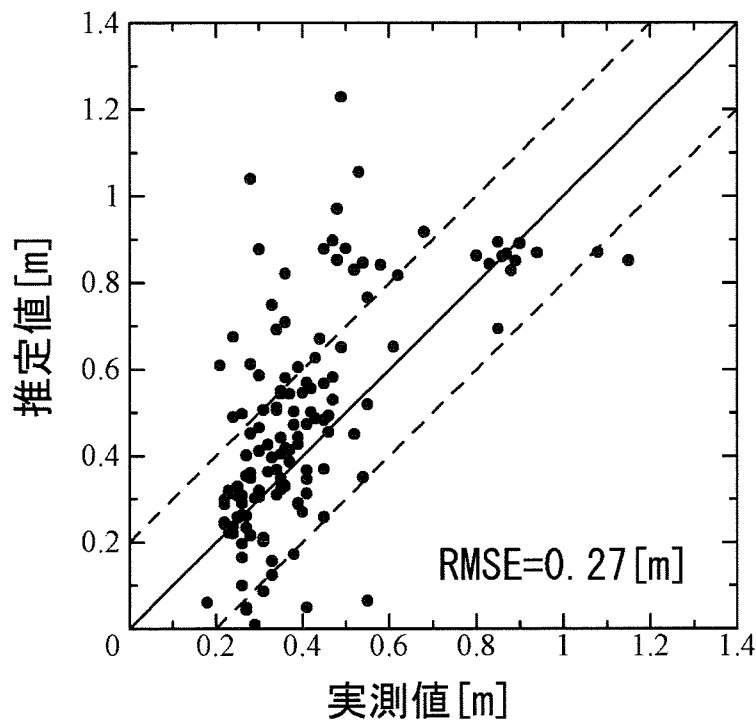


Fig.5.16 Relationship between observed and estimated significant wave height with formula(5.12)

5-3-3-3 簡易推定式 II

最急降下法を用いてパラメータ推定を行った簡易推定式 II ((5.24) 式) を用いた場合の推定結果を Fig.5.17 に示す。簡易推定式 I を用いた結果と同様に、Wilson の推定式を用いた推定結果のような過小推定をさらに軽減することができた。また、簡易推定式 I を用いた場合のような突出した過大推定も認められず、推定結果のほとんどが許容誤差の目安範囲内に収まる結果となった。さらに、簡易推定式 I を用いた結果に見られた実測値 1.2m 付近の資料に対する過小推定も軽減された。RMSE の値も 0.13m と最も小さい値となり、Wilson の推定式、簡易推定式 I と比較し、高い推定精度が得られた。東京湾における実際の小型漁船における操業を考慮すると、非常に有効的な推定式であると考えられる。簡易推定式 I と比較すると、簡易推定式 I のパラメータ β が負となる現象も最急降下法を用いることにより現れず、また線形最小二乗法のみでは推定することができなかった μ の項の推定が行えたことなどから、(5.24) 式の推定精度が他と比較して非常に高くなったものと考えられる。ただし、解析方法でも述べたように最急降下法の特長上、(5.24) 式のパラメータの値が最適解であるとは言い切れず、初期値やステップ幅等により、精度向上の可能性も考えられる。

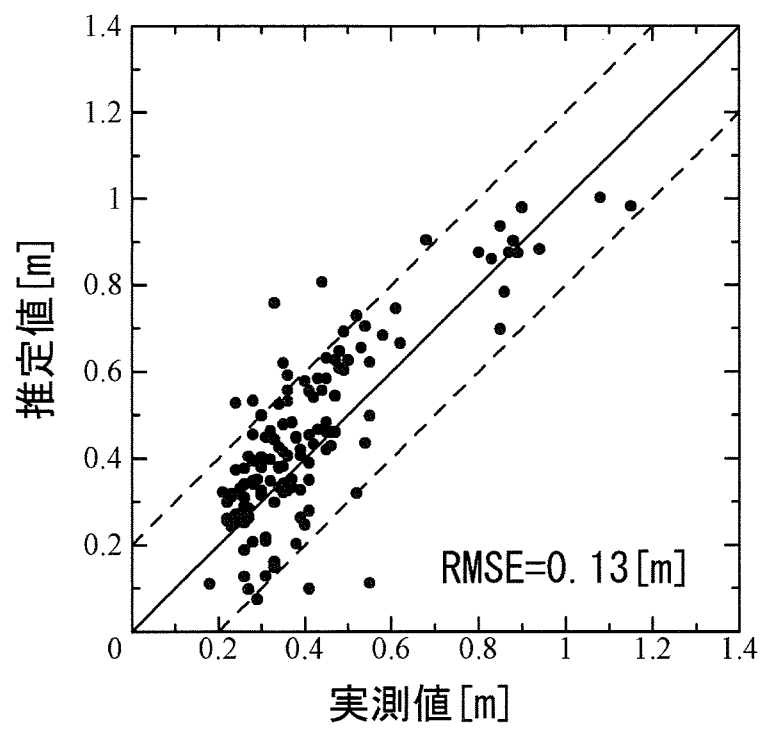


Fig.5.17 Relationship between observed and estimated significant wave height with formula(5.24)

5-3-3-3 簡易推定式Ⅱ'

簡易推定式Ⅱ'((5.32)~(5.34)式)を用いてパラメータ推定を行った結果をFig.5.18~Fig.5.19に示す。それぞれ3つの推定結果に大きな差はなく、ほぼ同精度の結果となった。RMSEも全て等しく0.14mであった。また、簡易推定式Ⅱを用いた結果とも比較すると、ほとんど変化が見られなかったが、実測値0.4m付近で過小推定が大きくなっており、最大で0.5m近くも小さく推定する結果も認められた。これは、簡易推定式Ⅱ'において簡易推定式Ⅱで設定したパラメータ μ を使用していないことが原因であると考えられる。

推定精度的には簡易推定式Ⅰを大きく上回る結果となったが、簡易推定式Ⅱには及ばず、大きな過小推定問題も残ってしまった。実用的な面で考慮すると、簡易推定式Ⅱを用いた方が、より適切であると考ええる。

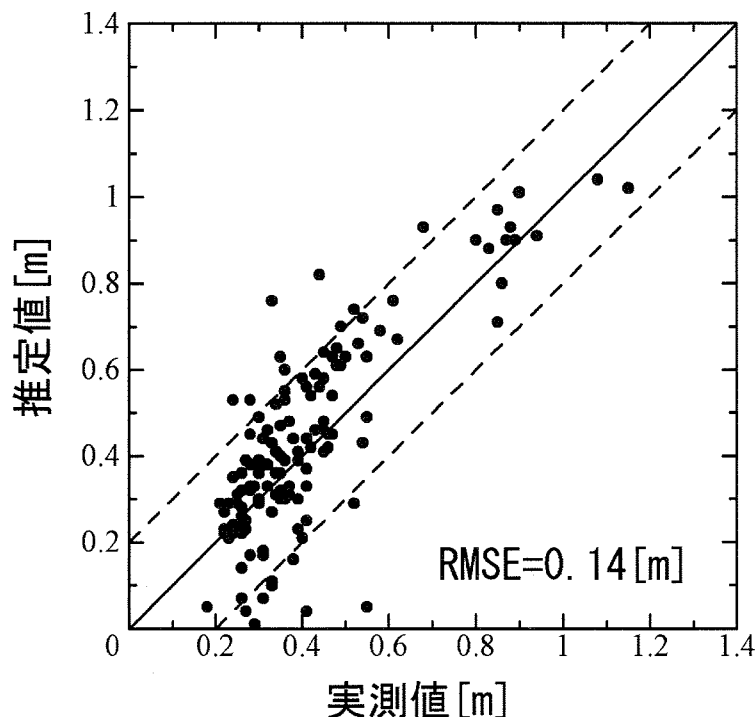


Fig.5.18 Relationship between observed and estimated significant wave height with formula(5.32)

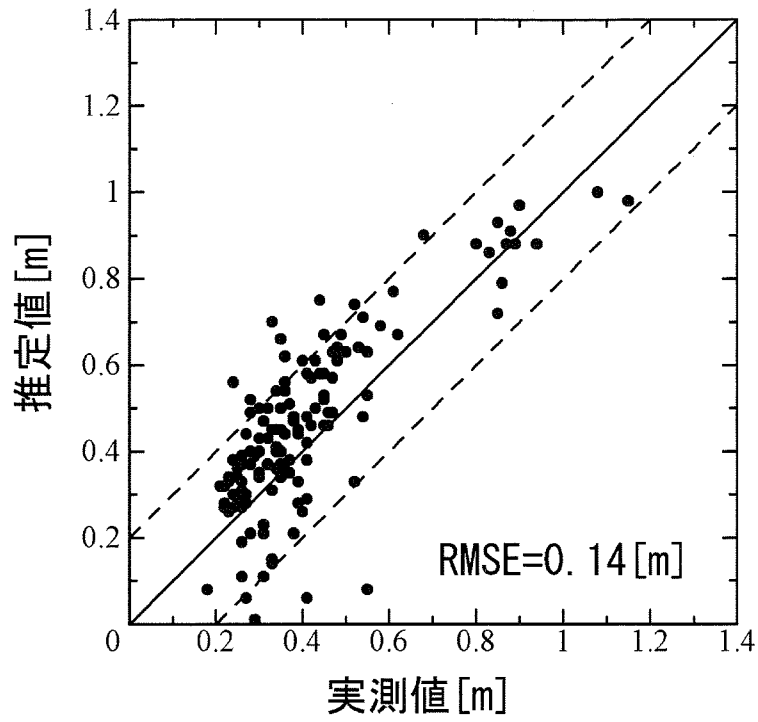


Fig.5.19 Relationship between observed and estimated significant wave height with formula(5.33)

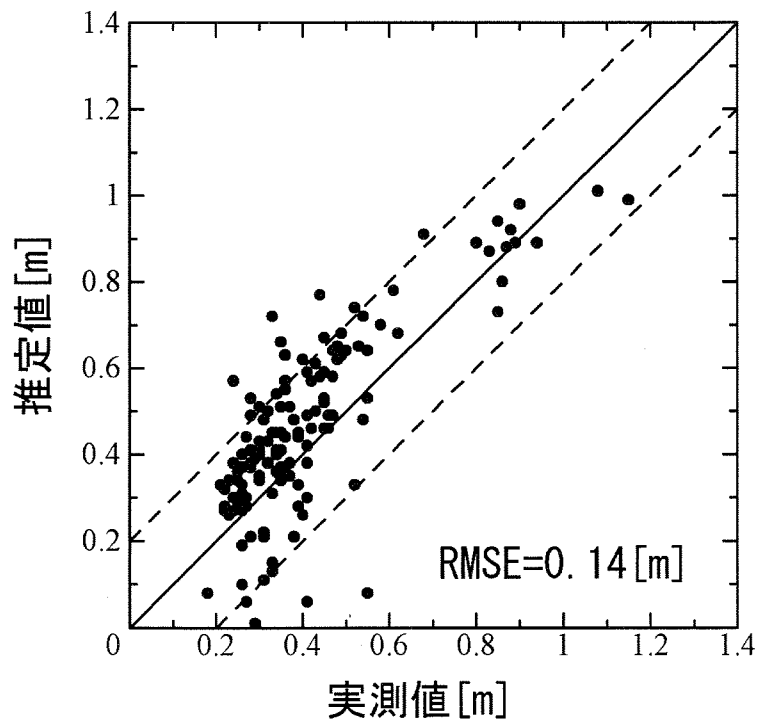


Fig.5.20 Relationship between observed and estimated significant wave height with formula(5.34)

5-4 船体横揺れ角振幅（両振幅）の推定

5-4-1 解析方法

Fig.5.21 に、実計測された有義波高と1/3最大横揺れ角振幅の応答関係を示す。

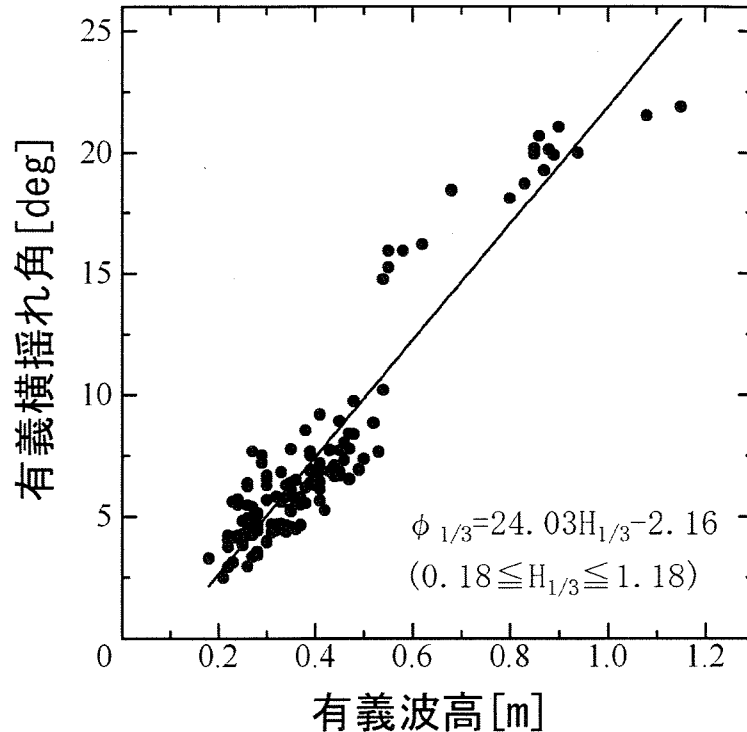


Fig.5.21 Relationship between significant wave height and double amplitude of the highest one third of ship roll angle

図に用いた資料より、有義波高に対する1/3最大横揺れ角振幅⁶⁷⁾の回帰直線を求めた。(5.36)式に回帰直線の式を示す。ただし、回帰直線の有効範囲は実計測された有義波高に伴い $0.18\text{m} \leq H_{1/3} \leq 1.18\text{m}$ とした。また、 $\phi_{1/3}$ は、1/3最大横揺れ角振幅を表す。

$$\phi_{1/3} = 24.03H_{1/3} - 2.16 \quad (0.18 \leq H_{1/3} \leq 1.18) \quad (5.36)$$

これにより得られた回帰直線の有義波高の項 ($H_{1/3}$) に、簡易推定式Ⅱを用いて推定した有義波高の値を代入し、1/3最大横揺れ角振幅の推定を行った。すなわち、風速および吹送距離のみの情報から、供試船「ひよどり」の

1/3最大横揺れ角振幅の推定を行うこととなる。なお、簡易推定式Ⅱの推定結果を用いたのは、本章で使用した有義波高の推定方法の中で最良の推定精度を示したためである。

Fig.5.22及びFig.5.23にそれぞれ有義波高と平均横揺れ角振幅 ($\bar{\phi}$) 及び、有義波高と最大横揺れ角振幅 (ϕ_{max}) の応答関係を示す。それぞれの回帰直線は以下の(5.37), (5.38)式に示す。回帰直線の有効範囲は有義波高と1/3最大横揺れ角振幅の応答関係と同様に $0.18\text{m} \leq H_{1/3} \leq 1.18\text{m}$ である。これにより、同様に平均横揺れ角振幅及び最大横揺れ角振幅の推定を行った。

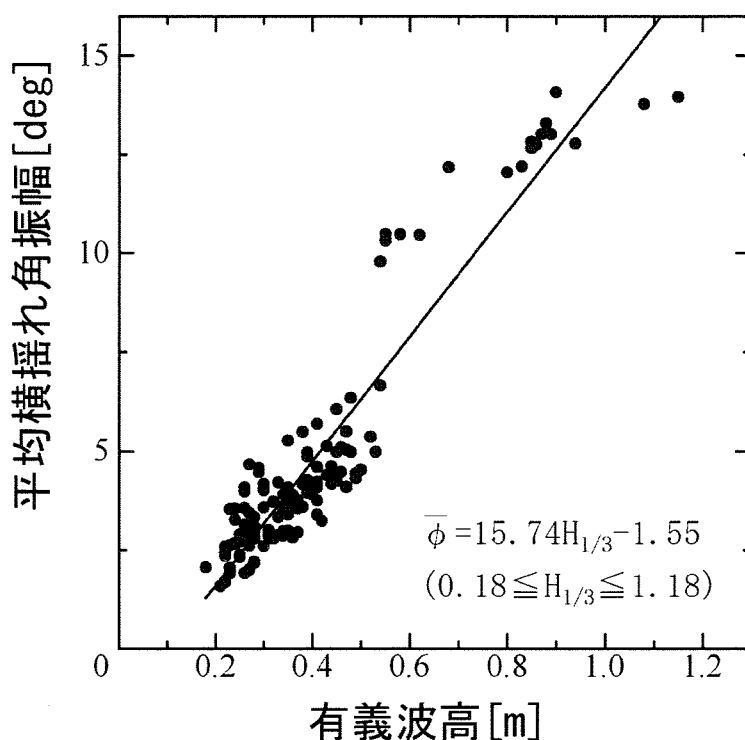


Fig.5.22 Relationship between significant wave height and mean double amplitude of ship roll angle

$$\bar{\phi} = 15.74H_{1/3} - 1.55 \quad (0.18 \leq H_{1/3} \leq 1.18) \quad (5.37)$$

$$\phi_{max} = 37.19H_{1/3} - 2.40 \quad (0.18 \leq H_{1/3} \leq 1.18) \quad (5.38)$$

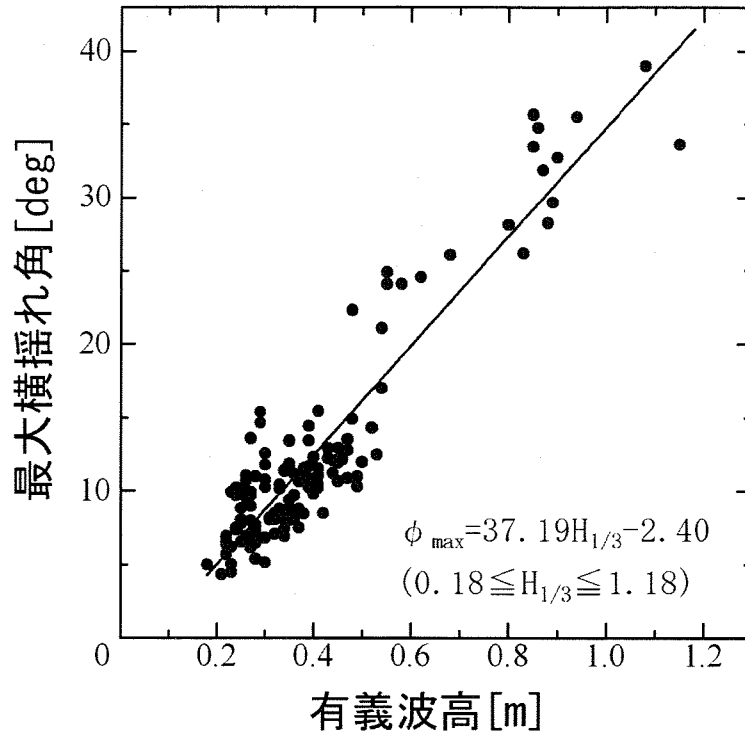


Fig.5.23 Relationship between significant wave height and maximum double amplitude of ship roll angle

5-4-2 結果及び考察

Fig.5.24に1/3最大横揺れ角振幅の推定結果を示す。有義波高の推定結果と同様に許容誤差の目安として±5degの範囲に点線を引いている。

上でも記しているように、Fig.5.24に示す結果は有義波高と1/3最大横揺れ角振幅との応答関係より得られた回帰直線((5.36)式)に、本章で提案した簡易推定式Ⅱにより推定した有義波高を用いて得られた結果である。7deg前後で多少の過小推定および過大推定が見られた。しかしながら10deg以上では推定結果のほとんどが許容誤差の目安内であり、振幅が大きくなるにつれ推定精度が高まる結果となった。7deg前後における推定誤差は、有義波高の推定を行った上で生じた誤差が影響したものと考えられる。風速および吹送距離のみの情報から有義波高のみならず船体動揺まで推定を行うことができるとともに、十分な推定精度を示すことができたと考えられ、事前に操業海域の情報を得ることが出来るならば有義波高のみならず、船体動

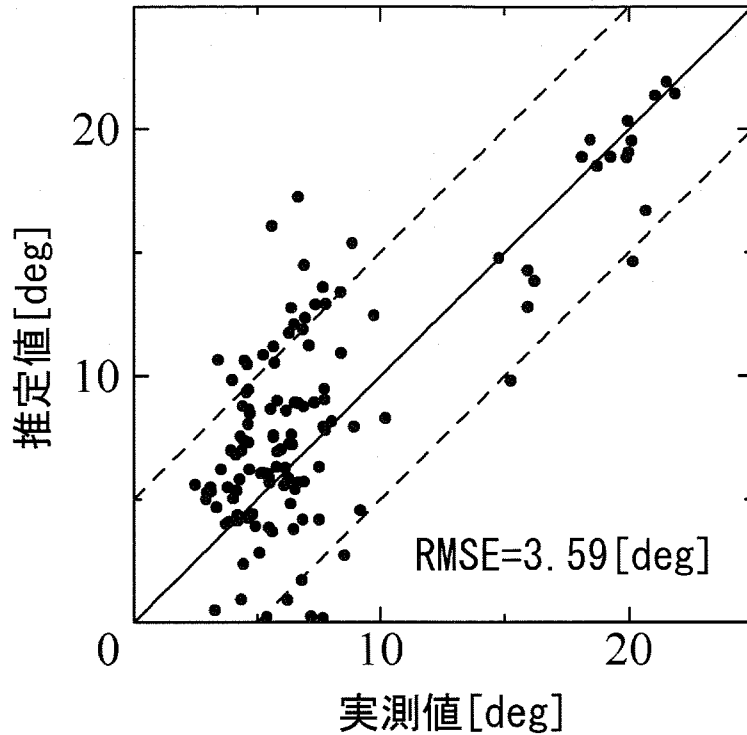


Fig.5.24 Relationship between observed and estimated double amplitude of the 1/3 highest ship roll angle with formula(5.36)

揺まで把握することができるものと期待できる。

同様に、Fig.5.25, Fig.5.26に平均横揺れ角振幅及び最大横揺れ角振幅の推定結果を示す。

平均横揺れ角振幅の推定においては、1/3最大横揺れ角振幅の推定結果と比較して、RMSEも3.59degから2.35degに下がり、推定値の大半が誤差の目安内に収まった。これは、平均値及び1/3最大値共に、振幅の平均をとっていることが要因であると考えられる。

また、最大横揺れ角振幅の推定においては、実測値で30deg前後では高い推定精度を示しているものの、20deg以下において大きな過大推定、過小推定が多く見られた。これは、1資料中最大値を示した1振幅のみを扱っているため、突発的な波浪等による船体動揺がその原因と考えられる。

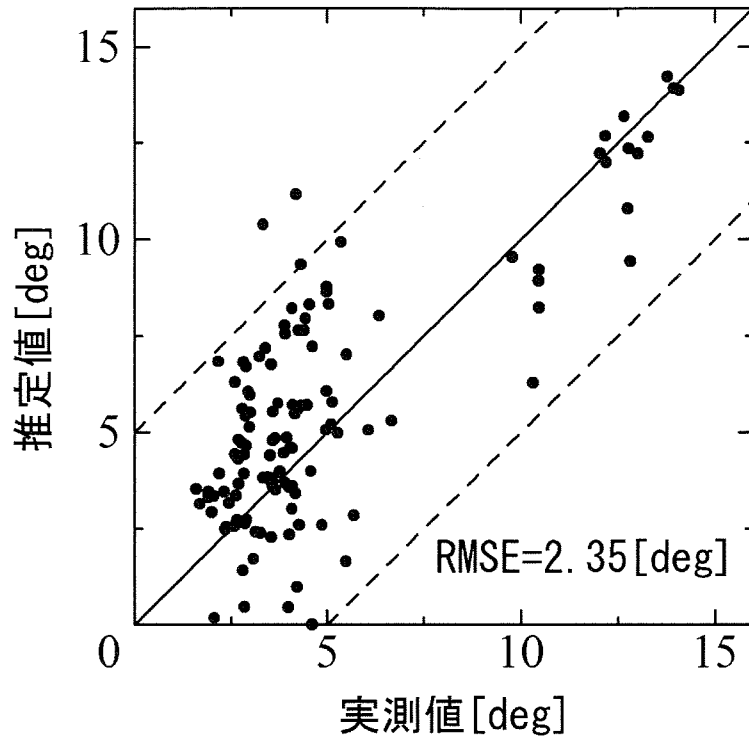


Fig.5.25 Relationship between observed and estimated mean double amplitude of ship roll angle with formula(5.37)

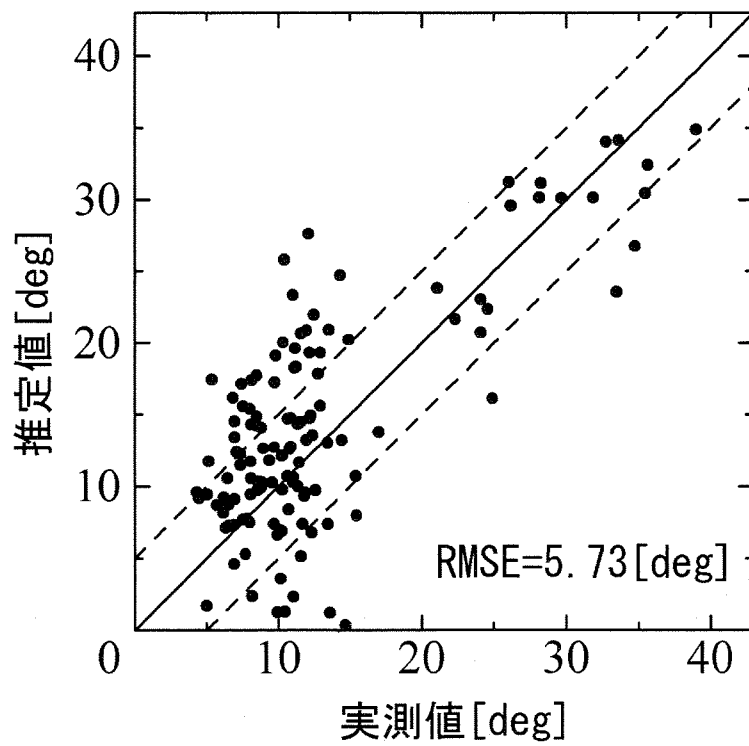


Fig.5.26 Relationship between observed and estimated maximum double amplitude of ship roll angle with formula(5.38)

5-5 結言

東京湾における有義波高の推定では、従来提案されてきた推定式では十分な精度を得ることができなかつた。これは本研究で目的としているのが小型漁船への影響であり、対象とした資料が比較的低い波浪であったこと、また、東京湾という陸地に囲まれた狭い海域であったことなどが原因であると考えられる。また、第三世代波浪推定モデルであるSWAN^{68, 69)}やエネルギー保存則を用いた有義波高の推定方法、また、ニューラルネットワークを用いた有義波高の推定等^{70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78)}の研究報告もあるが、実際の現場において誰しもが簡便に推定を行えるという観点から、本研究では用いていない。

本章で提案した簡易推定式 I を用いた推定結果では、Wilson の推定式を用いた際に見られたような過小推定は軽減されたものの、突出した課題推定等が認められ、全体的な推定精度は従来法を下回る結果となった。また、パラメータ推定に線形最小二乗法を用いたため、パラメータの値に物理的問題が発生するなどの現象が見られた。

一方、本章で提案した簡易推定式 II では十分な推定精度が得られ、線形最小二乗法を用いたときのようなパラメータの値が負になる等の問題を回避することができた。最急降下法という非常に単純な手法で高い精度の推定式が得られたため、波浪等のデータさえあれば、同様にして海域毎の推定式を容易に作成することが出来るものと期待できる。さらに風速および吹送距離のみの情報から有義波高を容易に計算することができるため、実用上非常に有効的であると考えられる。また、推定した有義波高から、船体動揺の予測まで行うことができ、東京湾での有効性を確認できた。

また、簡易推定式 II' では簡易推定式 I と比較すると、非常に高い推定精度を得ることが出来たものの、過小推定等の問題もあり、簡易推定式 II ほど

の推定精度とはならなかった。

さらに、有義波高の各推定式の特徴は、Wilsonの四つの推定式が吹送距離と風速の両者の影響を強く受けているのに対し、本研究で提案した簡易推定式Ⅱ及び簡易推定式Ⅱ'では吹送距離の影響が少ない結果となった。その分風速の影響を強く受けており、東京湾という陸に囲まれた海域であることが要因の一つであると考ええる。また、負の値を示したパラメータを持つ簡易推定式Ⅰでは、吹送距離が大きくなるに従い、推定値が小さくなる傾向が見られた。以上のことより、推定精度の最も高かった簡易推定式Ⅱを使用する際は、風速の値がより重要となることを考慮しておく必要があると考える。

今後、本研究で得られた簡易推定式等を現場にフィードバックを行えるような環境を設け、情報を提供することができれば、東京湾における小型漁船の安全操業への一助となるものと考ええる。

第六章 総合考察

再三述べているように、現在の日本における漁船ではその大半が20トン未満の小型漁船であり、さらに5トン未満がそのほとんどを占めているのが現状である。そのため1m前後の比較的低い波高でさえ、大動揺を引き起こす可能性があり、小型漁船における安全操業に支障を来す可能性が十分に考えられる。しかしながら、このような比較的低い波浪を対象とした研究報告は少なく、大型船に影響を及ぼすような波浪に対する研究報告が多くなされている。

そこで本研究ではこのような1m前後の波浪に着目し、その特性を把握し、簡便に精度の良い推定を行い、小型漁船の安全操業への一助となることを目的として行った。

まず、本研究で用いた海面変位資料の計測方法、また、これにより得られた資料の統計的処理等について述べた。本研究で用いた解析資料は、東京海洋大学実習艇「ひよどり」の船首先端に設置したマイクロ波式波高計により計測された海面変位であり、一回の計測時間は819.2sであり、サンプリング周期は0.1sである。海面変位の代表値の算出にはゼロアップクロス・ゼロダウンクロス法を使用した。本研究で使用した解析資料は有義波高が最小で0.18mで、最大で1.18mであり、さらに最大波高では2.24mを示す資料を得た。

また、風速は船体に設置されている風速計により計測しており、吹送距離は風速と同時に計測された風向より、陸地の端から計測を行っている船舶の位置までの距離を吹送距離と定義した。なお、計測された平均風速の最大値は11.77[m/s]あり、そのときの船体動揺の資料は船体横揺れ角（両振幅）で、最大40.5degを示しており、操業に支障を来すような大動揺を生じていることがわかる。

次に、短時間で区切った時系列のパワースペクトルでは、パワースペクトルの帯域幅を示す帯域幅パラメータ ε の値に短時間ごとの大きな変化はなかった。すなわちパワースペクトルの帯域性がほとんど変化しないことを示す結果となった。しかし、パワースペクトルのパワーのピーク周波数帯が短時間ごとに変化する結果となった。すなわち、819.2s(約14分)の間にもパワースペクトルのピークの周波数帯が変化していることから、小型漁船の横揺れ固有周期と波浪スペクトルのピークの周波数帯とが近づく可能性が考えられる。これにより船体横揺れ固有周期と波浪スペクトルのピーク周波数帯とが同調し、より大きな船体動揺を生じる可能性がある。つまり小型漁船における安全操業を考えた場合、短時間における卓越周波数の時間的変化を捉えることも必要であると考えられる。

さらに、波浪スペクトルの時間的変化より、波浪が非定常性を有するという説に対して、東京湾においても同様のことが考えられるのか検証し、また従来のスペクトル法の問題点へまで言及を行った。具体的にはFTサロゲートデータ法を用いて海面変位の資料を基にサロゲートデータを作成し、そのパワースペクトルの時間的変化を確認することにより非定常性の有無について検証を行った。その結果、理論的には完全な定常であるサロゲートデータのパワースペクトルに時間的変化が見られ、原波浪データのパワースペクトルの時間的変化のみから非定常性の有無を判断することは困難となる結果となった。これはパワースペクトルを求める際、理論上は積分範囲が無限であるのに対し、実際には有限な範囲で積分計算していることが要因の一つであると考えられる。さらに、積分範囲を有限で計算することによるパワースペクトルの分可能の低下も要因の一つであると考えられる。

この結果によりスペクトル法の問題点が浮き彫りとなったが、第四章においても用いているように現在も波浪のパワースペクトルを用いた解析法は

十分有効であり、非常に重要なものである。ただし、上記のような観点から、原波浪データにおけるパワースペクトルの時間的変化を捉える場合は十分注意を払う必要がある。

上記のような問題点もふまえた上で、小型漁船の船体動揺への影響を考慮し、東京湾における1m前後の有義波高を対象に波浪周波数特性について調べた。その結果、本研究で用いた解析資料167計測中半数以上において、パワースペクトルの高周波域がP-M型を示す結果となった。さらに小型漁船における安全操業に支障をきたすと考えられる有義波高0.5m以上の資料においては、その80%がP-M型を示した。しかし、P-M型を基にしたITTCスペクトル、およびISSCスペクトルといった従来用いられてきた近似式では、東京湾における有義波高1m前後のパワースペクトルを全周波数域で表現することが困難である場合が多い結果となった。本研究で対象とした比較的低い有義波高において、特に0.5m以上ではその多くの資料がパワースペクトルの高周波域においてP-M型を示したことから、今後P-M型を主とした東京湾モデルの構築が必要であると考えられる。ただし、東京湾における波浪を考慮すると十分に発達していない可能性があり、パラメータとして吹送時間、および従来式で用いられていない有義波周期等を取り入れた東京湾モデルの構築を進めていくことが妥当ではないかと考える。

上記に記したように、小型漁船の船体動揺へ影響を及ぼすような比較的低い有義波高を対象とした東京湾の波浪スペクトルに関しては、従来の近似式では表現することが困難であり、パワースペクトルのピークの周波数帯も短時間で変化する可能性がある結果となった。今後、新たな近似式、および短時間における卓越周波数を捉えることが、小型漁船における安全操業の確保という点からも重要であると考えられる。

さらに、小型漁船の安全操業を目的とした東京湾における有効な推定式

等の研究報告が見あたらないことから、本研究では、東京湾における1m前後の有義波高を対象にした簡易推定式の提案を行った。

比較対象として、同じような実験式であり、広く普及しているWilsonの推定式を用いた。しかしながら、東京湾においては、広く普及しているWilsonの推定式では十分な精度を得ることができなかつた。これは、Wilsonの推定式が外洋での観測データを基に作成されており、本研究で目的としているのが小型漁船への影響であるため、対象とした資料が比較的低い波浪であったこと、また、東京湾という閉鎖された海域であったことなどが原因であると考えられる。

それに対し、本研究で提案した簡易推定式では十分な推定精度が得られた。さらに提案式は風速および吹送距離のみの情報から容易に計算することができるため、実際の現場において簡便に有義波高の推定が行えることより、実用上非常に有効であると考ええる。

また、有義波高と船体動揺の応答関係から上記で推定した有義波高を用いて船体横揺れ角の推定を行った。この結果より、多少の推定誤差は見られたが、推定した有義波高を用いていること、また、波浪と船体動揺の単純な応答関係から推定していることを考慮すれば精度の高い推定が行えたものと考ええる。つまり、風速および吹送距離のみの情報で船体動揺の推定まで行えるため、実際の現場における安全操業において大いに貢献できるものと考えられ、東京湾での有効性を確かめることができた。

小型漁船の安全性を対象とした東京湾における波浪の研究報告がほとんど見られないことから、本研究ではこのような波浪を対象に、その特性および推定方法等について述べているが、スペクトルのパワーを有するピークが時間的に変化することからも考えられるように、たとえ低い波浪であっても船体の横揺れ固有周期と波浪の周期とが同調すれば大きな横揺れが生

じることが考えられ、危険な状態に陥る可能性が十分考えられる。そのため、今後東京湾におけるスペクトルの近似式等の提案が必要であると考えられる。さらに、本研究で提案した有義波高の簡易推定式を普及させることにより、東京湾における小型漁船の安全操業に寄与できるものと期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京海洋大学海洋環境学科、海上安全工学研究室の武田誠一教授、ならびに上野公彦助教授に終始御指導をいただき謹んで御礼申し上げます。

本論文の取り纏めにあたり、親切な御教示と丁寧な御校閲を賜った東京海洋大学海洋計測工学研究室の古澤昌彦教授、航法システム工学研究室の柿原利治教授に深く感謝いたします。

また、本研究で用いた解析資料の計測にあたり、快くご協力をいただきました東京海洋大学実習艇「ひよどり」の酒井一英艇長、ならびに川淵啓司元機関長（現「海鷹丸」操機手）に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、日々御助言、ご協力をいただきました博士前期課程の溝口弘泰さんをはじめとする同研究室の学生諸氏に深く感謝申し上げます。

日々の生活面において、精神面での支えとなりました友人諸君に心より感謝申し上げます。また、大学院での研究を続けることを快く理解していただきました両親に深く感謝いたします。

本研究の進行にご協力いただきました皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 光易恒：海洋波の物理，岩波出版，第二刷，2002
- 2) Sverdrup,H.U. and Munk,W.H. : Empirical and Theoretical Relations Between Wind, Sea, and Swell, American Geophysical Union, Vol.27, No.VI, pp.823-827, 1946
- 3) Jeffreys,H. : On the Formation of Water Waves by Wind, Proceedings of the Royal Society, A107, pp.189-206, 1924
- 4) Bretschneider,C.L. : Revisions in Wave Forecasting : Deep and Shallow Water, Coastal Engineering, Proc. 6th Conf, pp.30-67, 1958
- 5) Wilson,B.W. : Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, JAHRGANG 18(HEFT3), pp.114-130, 1965
- 6) Günther,H. and Rosenthal,W. : A hybrid parametric wave prediction model, Journal of Geophysical Research, 84, pp.5727-5738, 1979
- 7) Cavaleri,L. and Malanotte-Rizolli,P. : Wind wave prediction in shallow water: theory and applications, Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.C11, pp.961-973, 1981
- 8) Graham,C. : The parameterisation and prediction of wave height and wind speed persistence statistics for oil industry operational planning purposes, Coastal Engineering, Volume 6, Issue 4, pp.303-329, 1982
- 9) Holthuijsen,L.H., Booij,N., et al. : A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, Coastal Engineering, Volume 13, Issue 1, pp.23-54, 1989

- 10) Bondzie,C.,Panchang,V.G. : Effects of bathymetric complexities and wind generation in a coastal wave propagation model, Coastal Engineering,Volume 21,Issue 4,pp.333-366,1993
- 11) WAMDI Group : The WAM model-a third generation ocean wave prediction model,Journal of Physical Oceanography,18,pp.1775-1810, 1988
- 12) Cavaleri,L.,Bertotti,L.,et al : Shallow water application of the third generation WAM wave model,Journal of Geophysical Research, C94,pp.8111-8124,1989
- 13) 橋本典明, 川口浩二, 他 : 第3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,pp.3-47,1999
- 14) 川口浩二, 橋本典明, 他 : ECMWF風データとWAMに基づく日本沿岸波浪の推算精度に関する検討, 海岸工学論文集, 第48巻,pp.231-235,2001
- 15) 川口浩二, 橋本典明, 他 : 内湾域における波浪推算精度向上を目的とした第三世代波浪推算モデルWAMの改良, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.191-195,2003
- 16) Kobayashi,T.,Yasuda,T : Nearshore wave prediction by coupling a wave model and statistical methods,Coastal Engineering, Volume 51,Issue 4,pp.297-308,2004
- 17) Albiach,J.C.C,Fanjul,E.A.,et a. : Ocean forecasting in narrow shelf seas: application to the Spanish coasts,Coastal Engineering, Volume 41,Issues 1-3,pp.269-293,2000
- 18) Sebastiao,P.,Guedes Soares,C.,et al. : Wave hindcasting off the coast of Portugal,Coastal Engineering, Volume 40,Issue 4,pp.411-425,2000
- 19) Gomez,M.,Carretero,J.C. : A two-way nesting procedure for the WAM model: application to the Spanish Coast,J. Offshore Mech., Artic Eng,119

- 20) Booij,N.,Ris,R.C.,Holthuijsen,L.H. : A third-generation wave model for coastal regions 1.Model description and validation, Journal of Geophysical Research,Vol.104,No.C4,pp.7649-7666,1999
- 21) Ris,R.C.,Holthuijsen,L..H.,Booij,N.:A third-generation wave model for coastal regions 2.Verification,Journal of Geophysical Research, Vol.104,No.C4,pp.7667-7681,1999
- 22) Wood,D.J.,Muttray,M.,et al. : The SWAN model used to study wave evolution in a flume,Ocean Engineering,28,pp.805-823,2001
- 23) Shan-Hwei Ou,Jian-Ming Liao,et al.:Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan, Ocean Engineering,29,pp.947-971,2002
- 24) Rogers,W.E.Kaihatu,J.M.,et al. : Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model,Ocean Engineering, 29,pp.1357-1390,2002
- 25) Longuet-Higgins,M.S. : On the Statistical Distribytion of the Heights of Sea Waves,Journal of Marine Research,Vol.XI, No.3,pp.245-266, 1952
- 26) Cartwright,D.E. and Longuet-Higgins,M.S. : The Statiscal Distribution of the Maxima of a Random Function,Proceedings of the Royal Society of London, Series A,Vol.237,No.1208,pp.212-232,1956
- 27) Neumann,G. : On Ocean Wave Spectra and a New Method of Forecasting Wind Generated Sea,Technical Memorandum, Beach Erosion Board,No.43,1953
- 28) Pierson,W.J,Jr. and Moskowitz,L. : A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similality Theory of S.A.Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research,Vol.69,No.24,1964
- 29) ITTC. : Proceedings of 17th ITTC,Göteborg,1984

- 30) ITTC. : Proceedings of 15th ITTC,den Haag,1978
- 31) ISSC. : Report of the Committee 1.Environmental Conditions,Proceedings of 2nd ISSC,1964
- 32) Hasselmann,K.,et al. : Measurement of Wind Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsche Hydrographische Zeitschrift,A(8 °),Nr.12,1973
- 33) Hasselmann,D.E.,Dunkel,M.,et al. : Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973,Journal of Physical Oceanography, 10,pp.1264-1280,1980
- 34) Toba,Y. : Local Balance in the Air-Sea Boundary Processes III.On the Spectrum of Wind Waves,Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol.29,pp.209-220,1973
- 35) 合田良美 : 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質,第34回海岸工学講演論文集,pp.131-135,1987
- 36) Toba,Y.,Okada,K.,et al. : The response of wind-wave spectra to changing winds, Part I : Increasing winds, Journal of Physical Oceanography,18,pp.1231-1240,1988
- 37) Booij,N., and Holthuijsen,L.H. : Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models,J.Comp.Phys.,68, pp.307-326,1987
- 38) Takeda,S.,Ueno,K.,et al. : A Case Study of the Wave Characteristics in the Actual Sea During Typhoon, Fisheries Engineering,Vol.40,No.1,pp.55-64,2003
- 39) (財)農林統計協会 : 水産白書,平成14年度
- 40) 馬寧,平山次晴:漁船安全確保支援技術,日本水産工学会,第41巻,第1号,pp.69-74,2004

- 41) 日本海難防止協会：非GMDSS船遭難時における連絡手段の確保等に関する調査研究事業中間報告書,平成12年度
- 42) 日本海難防止協会：漁船の荒天時安定性等に関する調査研究（中間報告書）,昭和43年度
- 43) 日本海難防止協会：内海の波の特性が小型船の安全性におよぼす影響の研究（完了報告書）,昭和44年度
- 44) 日本海難防止協会：輻輳海域における船舶通航規制緩和に関する調査研究報告書,平成14年度
- 45) 日本海難防止協会：船舶交通と漁業操業に関する問題の調査事業,平成13年度
- 46) 合原一幸 編：カオス時系列解析の基礎と応用,産業図書,2000
- 47) H.P.スウ,佐藤平八(訳)：フーリエ解析,森北出版,第一版第19刷,2002
- 48) 中村理一郎,伊藤惇,他：Fortran 基礎編 文法と理工学問題,森北出版,第1版第4刷,1999
- 49) 中村理一郎,伊藤惇,他：Fortran 応用編 数値解法と理工学問題,森北出版,第1版第3刷,1998
- 50) 山内保文,菅井和夫,他：不規則現象論,海文堂,初版,1986
- 51) 甫喜本司,木村暢夫,他：内浦湾の冬季の海面変動に関する統計的特性について－Ⅱ.－非定常性の観点からみた海面変動のスペクトル密度関数に関する統計的推測－,日本航海学会論文集,102号,pp.255-262,2000
- 52) 日野幹雄：スペクトル解析,朝倉書店,1977

- 53) Prichard,D.,Theiler,J.:Generating Surrogate Data for Time Series with Several Simultaneously Measured Variables, Physical Review Letters,Vol.73,No.7,pp.951-954,1994
- 54) Theiler,J.,Eubank,S.,et al. : Testing for nonlinearity in time series : the method of surrogate data, Physica D,Vol.58,pp.77-94,1992
- 55) Theiler,J.,Prichard,D. : Constrained-Realization Monte-Carlo method for Hypothesis Testing,Physica D,Vol.94,pp.221-235,1996
- 56) 飯島泰蔵 : デジタル自然観速報 - 時系列解析のための新しい理論 -, 森北出版,2001
- 57) Bouws,E.,Gunther,H.,et al. : Similarity of the wind wave spectral form,Journal of Geophysical Research,Vol.90, C1,pp.975-986,1985
- 58) ブレア・キンズマン著,大久保明,大久保慧子共訳 : 海洋の風波 (下) , 築地書店,1972
- 59) 加藤弘,元良誠三,他 : 不規則な波及び風の中における船の横揺れについて,造船協会論文集,第102号,pp.23-37,1958
- 60) 西ノ首英之,川島利衛兵 : 実船試験による漁船の耐航性について-III 運動振幅極値の統計的特性,日本航海学会論文集,第55号,pp.1-6,1976
- 61) 坂和正敏 : 非線形システムの最適化 (一目的から多目的へ) , 森北出版,第一版第五刷,1986
- 62) 茨木俊秀 福島雅夫 : 最適化の手法, 共立出版, 初版二刷,1993
- 63) Yixun Shi : A Combination of Potential Steps and Steepest Descent Steps for Solving Convex Programming Problems, Numerical Linear Algebra,9,pp.195-203,2002

- 64) Grana Drummond,L.M., and Svaiter,B.F. : A steepest descent method for vector optimization,Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 175,Issue 2,pp.395-414,2005
- 65) Abrishami Moghaddam,H.,Matinfar,M.,et al. : Algorithms and networks for accelerated convergence of adaptive LDA, Pattern Recognition,In Press,Corrected Proof,Available online 18,2004
- 66) Svetlana S. Petrova, Alexander D. Solov'ev : The Origin of the Method of Steepest Descent,Historia Mathematica, Volume 24,Issue 4,pp.361-375,1997
- 67) Ueno,K.,Yamaguchi,S.,et al. : Estimation of Significant Wave Height for Small Boats in Tokyo Bay, Fisheries Engineering,Vol.41 No.3,2004 (受理済み掲載予定)
- 68) 水谷夏樹,S.H.Oh,他 : 浅海波浪推算モデルSWANの風洞水槽実験による比較検証,海岸工学論文集,第49巻,pp.81-85,2002
- 69) 橋本典明,杉本彰,他 : 局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用,海岸工学論文集,第49巻,pp.201-205,2002
- 70) 上野公彦,山口繁,他 : 流れの影響を考慮した有義波高の推定Ⅰ－推定方法－,日本水産工学会学術講演論文集,pp.195-198,1999
- 71) 上野公彦,山口繁,他 : 流れの影響を考慮した有義波高の推定Ⅱ－実測値データによる検証－,日本水産工学会学術講演論文集,pp.199-200,1999
- 72) 青野利夫,後藤智明,他 : 沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測法,港湾技術研究報告,第32巻第3号,pp.39-63,1993

- 73) 永井紀彦,後藤智明,他:ハイブリッドパラメータ法による波浪推定モデル(第1報)－東京湾における検討－,港湾技術研究報告,第29巻第4号,pp.85-118,1990
- 74) 後藤智明,青野利夫:沿岸域における風波の周波数スペクトルと無次元パラメータの特性－ハイブリッドパラメータ法による波浪推定モデル(第2報)－,港湾技術研究報告,第32巻第1号,pp.53-99,1993
- 75) 加藤始,佐野喜久雄:流れの中の風波についての実験的研究(1),港湾技術研究報告,第9巻第3号,pp.59-87,1970
- 76) 加藤始,鶴谷広一,他:流れの中の風波についての実験的研究(2),港湾技術研究報告,第15巻第4号,pp.3-48,1976
- 77) 加藤始,鶴谷広一,他:流れの中の風波についての実験的研究(3),港湾技術研究報告,第20巻第3号,pp.93-129,1981
- 78) Mituyasu,H. : Interractions Between Water Waves and Winds (I) – co-existent system of wind wave and regular oscillatory wave – , Report of Research Institute for Applied Mechanics, Vol.XIV, No.48, pp.67-89,1966