

波浪の極値統計に関する一考察

山口正隆*・土屋義人**・芝野照夫***

1. 緒 言

海岸・海洋構造物の計画設計や海岸防災対策の作成にあたって、対象とする地点にどの程度の規模の波浪がどの程度の割合で来襲するかを推定することはきわめて重要である。こうした設計外力の決定方法として洪水および降雨などの場合には、種々の方法が提案されているが、波浪の場合には、計測器による観測が開始されてから十数年にすぎず、また異常波浪時にはしばしば欠測するので、統計資料として不十分なものが多く、したがって異常波浪統計の作成法も確立していないようである。しかし、近年欧米諸国では、定点観測船による目視観測結果や計測器による観測資料の集積とともに、Draper, Thom, Yang ら, Resio, Khanna ら, Petruaskas らおよび Borgman らによって積極的に研究が進められつつある。一方、わが国では十分長期間の波浪観測資料が取得されていない事情もあって、波浪資料の整理方法や確率波浪の推定方法を提案した合田¹⁾の研究を除いて、波

浪統計に関する研究はきわめて少ないようである。

以上のような波浪統計に関する研究の現状において、最大の問題点は長期間の波浪資料が欠如していることであろう。幸い、彦根気象台では、約 80 年間の風資料が取得されているので、これから琵琶湖における波浪が精度よく推定できれば、波浪統計のための有用な資料を得ることができる。琵琶湖における湖上風の特徴は強風時に比較的一様な風が吹送するということであるので、彦根気象台における風資料から琵琶湖における波浪をかなり適確に推定できると考えられる。そこで、本研究では、彦根気象台の風資料から SMB 法によって図-1 に示す琵琶湖彦根愛西湖岸および長浜湖岸における沖波を推算し、つぎにこれから作成した年最大波高などの期間最大波高資料の確率分布特性を考察することによって、確率波浪の推定方法を明らかにしようとするものである。

2. 彦根気象台での風資料に基づく風波の推算方法と期間最大波高の推定

(1) 彦根気象台における風資料

湖岸より陸上部に約 1 km 程度入った彦根気象台では、1892 年より自記風向風速計による風観測が実施されている。用いられた計測器は計測器の進歩に伴い、矢羽式風向計と 4 杯式風速計を組み合わせたもの、3 杯式風速計と組み合わせたもの、さらにコーシンペーン風向風速計に変わってきている。また観測回数は 1 日 6 回（4 時間ごと）から 24 回（1 時間ごと）までの幅をもっており、さらに平均風速を算出するための平均時間は観測開始当初では 60 分間であり、その後 20 分間になり、1940 年以降は 10 分間になっている。長期間の風および波などの資料に基づいて統計解析を行う場合、資料の均質性が要求されるので、もちろん風資料は同一の風向風速計による記録を同一の方法で解析したものが望ましいけれども、彦根気象台周辺の土地利用形態の変化、波浪推算時における風資料の平均化や誤差などを考えれば、現段階ではこの程度の資料で満足せざるを得ないであろう。

(2) 琵琶湖における風波の推算

図-2 は岩垣²⁾によって得られた彦根愛西湖岸での湖面上約 10 m の湖上風および水深約 4 m の地点にお

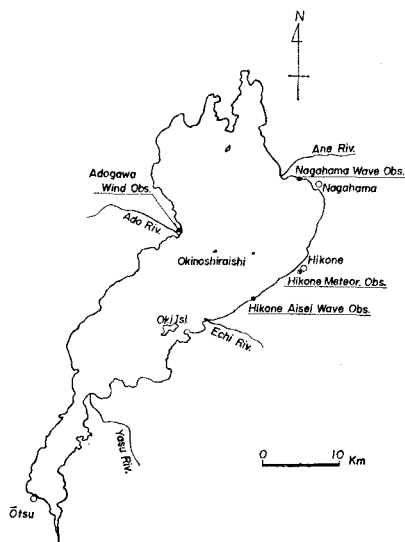


図-1 琵琶湖の概略図

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 正会員 京都大学助手 防災研究所

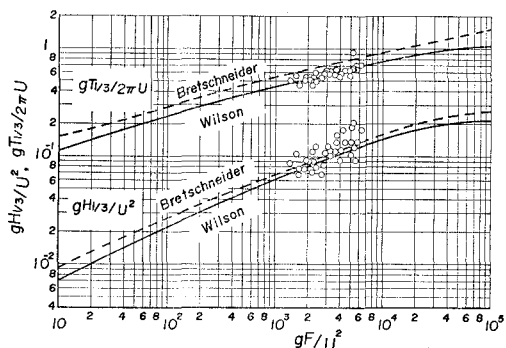
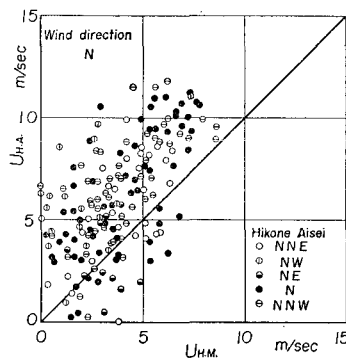


図-2 SMB法曲線と観測結果との比較(1)

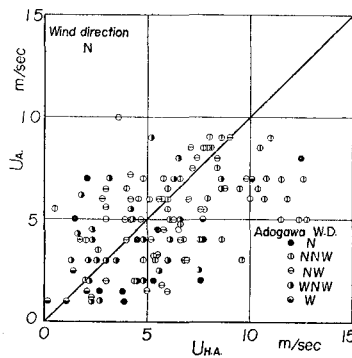
ける波浪の観測結果から求めた無次元有義波高および無次元有義波周期と無次元吹送距離との関係を示したもので、図中の実線は、SMB法におけるWilsonの改良式であり、また点線はBretschneiderが観測結果によく一致するようにSM曲線を修正した曲線である。この場合、平均風速としては、波が定常状態になる最小の吹送時間を考慮して、波浪の観測時点から3時間前の間で30

分間ごとに読みとられた10分間平均風速の3時間平均値を採用し、また吹送距離としては、自記風向風速計の原記録から詳細な読み取りを行った風向に対応する対岸距離を用いた。この図によれば、いずれの観測結果もWilsonの改良式と一致しており、とくに周期についてはその傾向が著しい。以上のように、湖上風の推定が適切であれば、琵琶湖における波浪をSMB法によってかなり適確に評価できることになる。

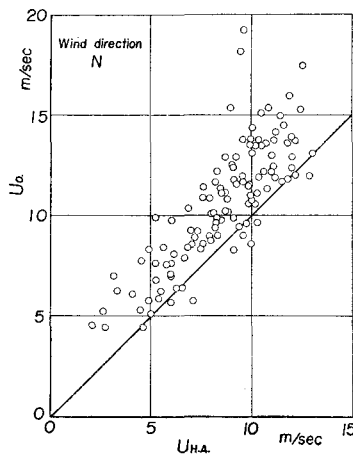
つぎに、図-3(a)は湖上風と陸上風との関係を調べるために、彦根気象台および彦根愛西湖岸での同時刻における10分間平均風速の関係を、彦根気象台における風向がNのものについて示したものである。図から明らかに、資料のばらつきが大きく、両者の間に明確な関係は見出せないが、湖上風の方が陸上風より平均的に20~30%程度大きい。また同様に彦根愛西湖岸、対岸の安曇川河口および彦根愛西湖岸と安曇川河口の中間に位置する沖の白石での平均風速の関係を示したのが図-3(b)および(c)であって、これから安曇川河口での風速は背後の山のしゃへい効果のため、彦根愛西湖



(a)



(b)



(c)

図-3 彦根気象台(U_{HM})、彦根愛西湖岸(U_{HA})、安曇川河口(U_A)および沖の白石(U_O)における風速の関係

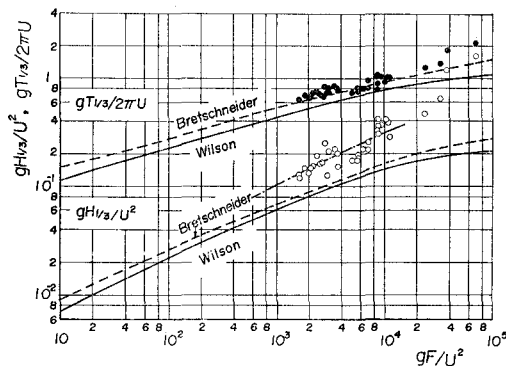


図-4 SMB法曲線と観測結果との比較(2)

岸より約20%程度小さいことおよび沖の白石での風速は15分間平均風速であるにもかかわらず、彦根愛西湖岸より約20%程度大きいことがわかる。以上のように、琵琶湖上では、気象台に比べてかなり強い風が吹いていることになる。したがって、気象台の風資料を用いて波の推算を行う場合、この補正をする必要が当然生ずるけれども、両者の間に明確な関係が見出せないで、ここではつぎに述べる方法を用いることにした。

図-4は彦根気象台での定時における10分間平均風速および風向の3時間平均値(たとえば、3時と6時の風速および風向の平均値)を用いて図-2の観測結果を図示しなおしたものである。この場合の風資料は波浪観

測時にできるだけ近い定時のものを用いている。前述のように、気象台での風は彦根愛西湖岸に比べて平均的に20~30%小さいので、観測結果はかなりWilsonの改良式より離れる。しかし、系統的な傾向が見出されるので、点線で示したこれらの平均曲線を用いれば、一応気象台の風から琵琶湖での波浪を直接推算できる。なお、4時間おきの定時の風資料を用いても、同様の平均曲線が得られた。

(3) 期間最大波高の推定

まず、波浪推算地点として波浪観測を実施した彦根愛西湖岸および長浜湖岸を選んだ。図-1から明らかなように、両地区の対岸距離の傾向はかなり異なっている。すなわち、前者では、季節風期に波浪が発達するN~W方向にかけての対岸距離が、一方、後者では、台風期に波が発達するWNW~SSW方向でのその大きいが。波浪の推算にあたっては、湖上風が一樣に吹くものと仮定して彦根気象台での定時における風観測値の平均値と図-4から両地点における有義波高を算出した。現段階では、長浜湖岸と気象台における風特性の相関が明らかでないため、長浜湖岸での推算結果の精度は彦根愛西湖岸より劣るであろう。

年最大波高は波浪の推算結果からつぎの手順で推定された。まず1~4時間ごとの波の推算結果から日最大波高および月最大波高を求めた。ついで、このようにして推定された月最大波高の統計的な独立性を検討するために、これらが同一の季節風あるいは台風によって生じたものでないことを風記録の時間的変化を調べて確認し、同一の風による場合には、2番目に大きい波高を月最大波高とした。そして、最後にこれらの資料から年最大波高を各年について選びだした。また、極値波浪に及ぼす季節性を考慮するために、1年を台風期(5月~10月)および季節風期(11月~4月)にわけて、それぞれの期間最大波高を同様の方法で求めた。

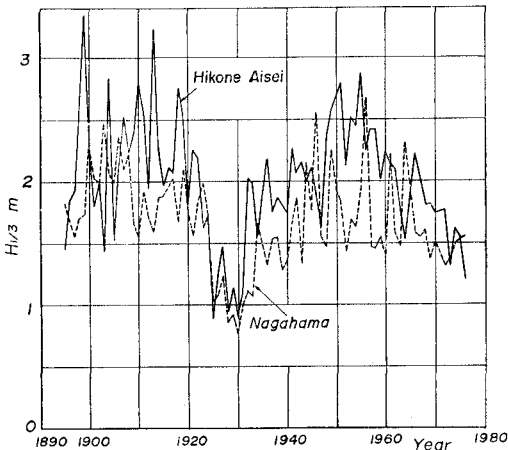
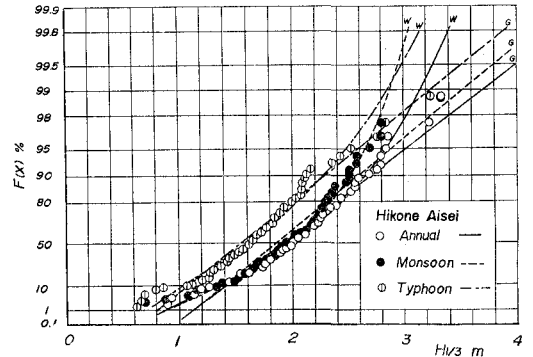


図-5 年最大波高の経年変化

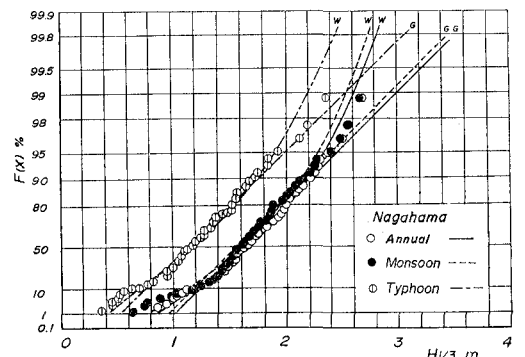
図-5は以上の方法によって求めた両湖岸における年最大波高の経年変化を示したものである。これから、両地区でのそれは比較的良好な変化を示しているが、彦根愛西湖岸の方が長浜湖岸より全般的に大きいことや、最近ではあまり大きな波浪が生じていないことがわかる。また、この図では、経年変化に顕著な周期性が現われている。しかし、ここでは年最大波高を統計的に独立であると考え、その出現率を確率とみなして考察を進めることにした。

3. 期間最大波高の確率分布特性

期間最大波高がいかなる確率分布に従うかを検討することは長期の再現期間をもつ波高を精度よく推定するうえできわめて重要である。従来、極値波高の確率分布としては、対数正規分布、Gumbel分布、Weibull分布および対数極値分布A型(Fréchet分布)などが用いられている。これらの確率分布のうち、対数正規分布を除けば、これらはいわゆる極値分布であるので、極値波高の解析に適しているように思われるが、標本数があまり多くないことや母集団のタイプに制約があることなどから、必ずしも極値分布にこだわる必要はない。そこで、ここでは、Gumbel分布、Weibull分布、正規分布およびガンマ分布(Pearson III型分布)を用いることにし



(a)



(b)

図-6 Gumbel分布およびWeibull分布の適合性

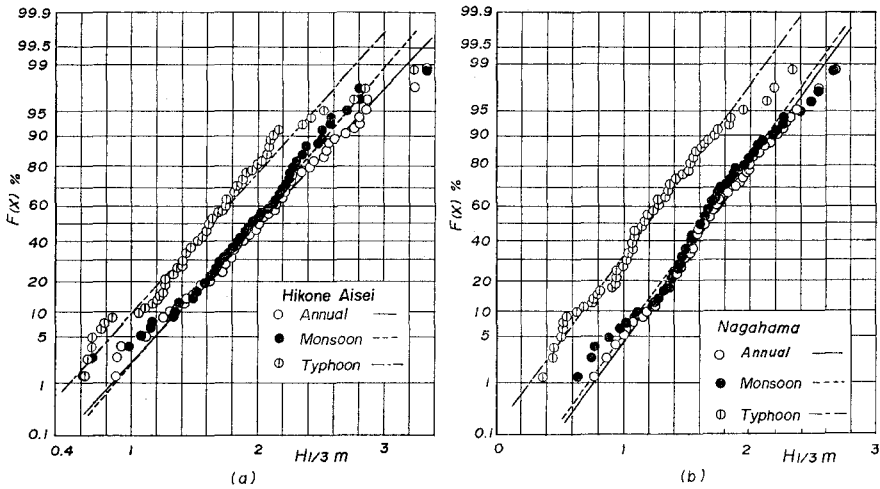


図-7 正規分布の適合性

た. なお対数正規分布, 指数分布および対数 Gumbel 分布の適用も考慮したが, 予備検討の段階で妥当な結果が得られなかったため, 除外することにした.

図-6 は両地点における期間最大波高のトーマスプロットによる非超過確率値に対する Gumbel 分布および Weibull 分布の適合性を検討したものである. 一般に, 確率分布に含まれる母数の推定方法として積率法および最尤法があり, 小標本の場合には, 最尤法は解の不偏性や有効性において積率法より優れているといわれている. しかし, 上述の資料から両者の方法によって Gumbel 分布および Weibull 分布の母数を推定し, それらの適合度を検討したところ, 積率法の方法がより妥当であったので, 図-6 には積率法による結果のみを示した. さて, これらの図では, 台風期最大波高は Gumbel 分布に比較的好くあてはまるが, 年最大および季節風期最大波高は両分布の中間に図示され, 両分布の適合性は必ずしも良くない. また, 一般に, 季節風による波浪の発達には限界があり, 一方台風による波浪はかなりの大きさまで発達するので, 年最大波高の非超過確率値の大きい部分は台風に伴う波浪によって, それ以外は季節風に伴う波浪によって規定される. このため, 台風期最大波高および季節風期最大波高の非超過確率曲線が交差することが予想される. しかし, この傾向は彦根愛西湖岸においてわずかにうかがえるだけで, 両地点とも季節風に伴う波浪が卓越している. したがって, とくに, 長浜湖岸では台風期の波浪が卓越するという波浪の地域性が現われていないことになるが, この原因の 1 つは気象台の風をそのまま用いて長浜湖岸での波浪を推算した点にあると思われる.

図-7 は同一資料に対して正規分布の適合性を検討したものであるが, 理論直線は平均的に期間最大波高の非超過確率値とよく対応していることがわかる. しかし,

波浪の極値統計で問題になる非超過確率値の大きい部分での適合性は十分でないため, より一般的な確率分布であるガンマ分布の適用を試みる. ガンマ分布は母数の選択に応じて正規分布に近い形から指数分布など極端に逆 J 字型の非対称分布までの非常に広範囲の形状を表現しうることから, 水文統計や気象統計の分野でよく用いられる. 図-8 は, ガンマ分布の適合性を調べたものであ

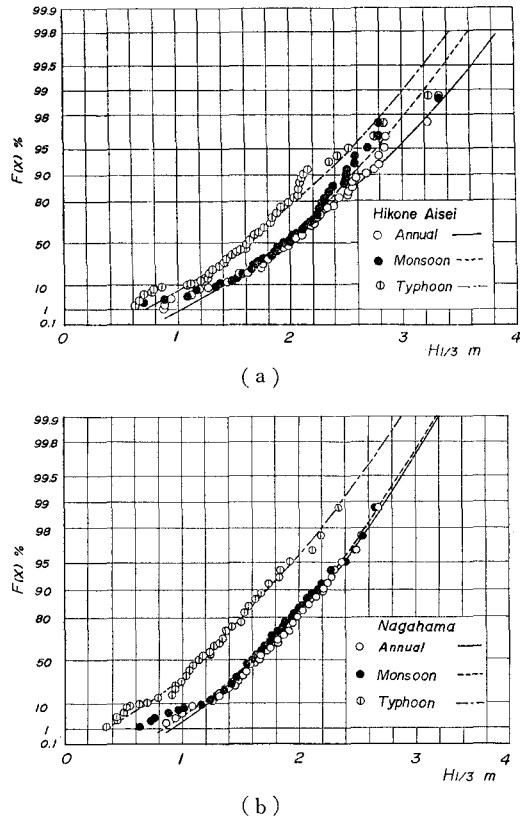


図-8 ガンマ分布の適合性

る。この場合、積率法よりも最尤法による結果の方がよい適合性を示したので、図中には原点母数を 0 として最尤法により他の母数を推定したガンマ分布の理論曲線のみが示されている。これらの図において、非超過確率値の小さいところでのガンマ分布の適合性は正規分布より若干悪くなる傾向があるが、非超過確率値の大きいところでの適合性はおおむね良くなっている。したがって、個々の場合については、極値分布である Gumbel 分布および Weibull 分布がよい適合性をもつ場合もあるけれども、波浪の極値統計を行う場合にはより広い適用性をもつガンマ分布を用いるのが適切であると考えられる。

つぎに、多くの問題はあるけれども、期間最大波高の確率分布特性が一応明らかになったので、両湖岸における再現期間 200 年（非超過確率 99.5%）の期間最大波高を前述の 4 つの確率分布および経験的確率法（ヘイズンプロットで図示した期間最大波高の非超過確率値の平均的傾向を視察によって求める方法）から推定してみた。その結果、200 年確率波高に対して、正規分布および Weibull 分布による推定値が最も小さく、一方 Gumbel 分布による値が最も大きくなることおよびガンマ分布による結果はそれらの中間の値をとり、ほぼ経験的確率法による値と対応していること、さらに推定結果の差は最大 25% 程度でかなり大きいことなどがわかった。なお、この場合の再現期間はその波高を越える大きさの波浪が発生する時間間隔の平均値であり、その間にそれ以上の高波が発生しないということではないこと、推算した波浪は沖波に対するもので、対象地点が浅海である場合には、屈折、回折、shoaling および砕波など種々の要素を考慮する必要があること、さらに確率波高として

有義波高を用いているので、最高波高を扱う場合には、何らかの手段で換算する必要があることなどに注意しなければならない。

4. 結 語

以上、本研究ではまず、彦根気象台における長期間の風資料から SMB 法を用いて、彦根愛西湖岸および長浜湖岸における波浪推算を行った。ついで、それらの結果から期間最大波高を求め、それらの確率分布特性を検討した結果、平均的にはガンマ分布でよく表示されることが見出された。しかし、風資料の均質性の問題や波浪推算法の精度など多くの問題が含まれているので、今後さらに検討を行う必要がある。

最後に、本研究の初期に御指導賜った京大工学部岩垣雄一教授、資料の収集整理に御協力載いた京大大学院間瀬肇君、愛媛大学工学部池本裕亮君ならびに京大工学部海岸工学研究室、彦根気象台および滋賀県土木部長浜土木事務所の方々に謝意を表明する次第である。また、図面の作成にあたり、助力載いた愛媛大学工学部海洋工学科大福学技官に感謝の意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者岩垣雄一教授）による成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実：波浪統計に関する二、三の考察，港湾技術資料，No. 39，pp. 239-255，1967.
- 2) 岩垣雄一・土屋義人ほか：琵琶湖における波浪観測について，京大防災研究所年報，第 19 号 B-2，pp. 361-379，1976.