

ウォーター・フロント開発における水理学的計画手法に関する検討

運輸省港湾技術研究所 正会員 小舟浩治

1. まえがき

近年、沿岸部の保有するポテンシャルが多方面から注目を集めており、官庁、公共事業団体、民間による様々な沿岸開発プロジェクト構想が提案されてきている。現在行なわれている沿岸開発に関する技術的議論の多くは配置計画や景観設計、あるいは大水深波浪制御構造物、浮体式構造物、波エネルギー利用、人工浅瀬による波浪制御などの外洋に面した水域に物理的な意味での空間を建設するための技術に主眼を置いたものとなっている。これらの技術は、ある意味では、プロジェクトサイトが決まった後、対象となる沿岸域を快適な生活環境に造り変えるための要素技術とも言える。

もちろん、こうした技術はプロジェクトの実施段階において重要な技術であるけれども、計画策定の段階において、プロジェクトの対象海域が、どのような環境水準にあり、人工の構造物により、どのくらいのレベルまで改良することが要請され、また技術的に可能であるのかにつき、適切に評価を行なうことが不可欠である。しかし現在のところ、沿岸域における社会・経済活動が円滑かつ快適に行われるためには、一体どのような水域の環境水準が望まれるのであるのかは必ずしも明確ではない。

本報告は、ウォーター・フロントの開発計画策定の段階で、プロジェクトサイトの水域の水理環境に対し、どのような検討や評価をすべきであるのか、主として波浪環境の評価手法の検討を試みるものである。

2 人と波のかかわり合い

沿岸域においては、気候や天候に加え、海の状況も人の生活に大きな影響を与える。海とのつながりの深い人々、例えば古くから海辺の町に住んでいる人達、漁師、船員、あるいはヨット・ボートなどスポーツをする人達は、自分達の経験から、海象の変化を知り、経験から得た尺度で波を読む方法を身に付けていると思われる。

ところが、新たに造られた沿岸地域に移り住んで来る人達は、必ずしも海についての経験が豊かな人達ばかりとは限らない。また、ヨットやサーフィンなどの海洋性レクリエーションを目的としてやって来る人達の中には、経験の少ない初心者も多いものと予想される。

したがって、沿岸開発プロジェクトの計画策定の際、将来沿岸部で生活をする人にとって、どのような波浪状況であることが望ましいのか、という点についても調査しておくことが望まれる。そのため、先ず沿岸域における種々の活動が、どのように波と関連性を持っているのかを調べてみることにする。

人と波とのかかわり合う形態は、表一に示すような四つの形に分類できる。

第一は、直接人と波が触れ合う形態であり、主として、水泳、サーフィン、ヨットなどの海洋性レクリエーション活動である。

第二は、人の活動環境の一要素として波がかかわり合いを持つ形態であり、海浜公園における散策においては、景観の重要な要素となるほか、砂浜の形成にも波は大きな影響力を持っている。また日常生活において問題となる海水の飛沫や塩害なども、波に起因している。

第三の形態は船などの浮遊式構造物を介して波とかかわり合いを持つ活動である。このグループには、海運、釣り、海上作業など船を用いた活動が含まれる。

第四の形態は、人が固定式構造物を介して波とかかわり合う形態であり、港湾・海岸施設およびその他海上や海中に建設される構造物はすべて波の作用にさらされる。これらの施設や構造物の計画・設計・利用の各段階で、波とのかかわり合いが生じる。

一方、日々出現する波浪の特性を捉えるために必要な情報も、人と波の関連形態の違いによって異なってくる。出現波浪の特性を知る情報としては、

- ① ある特定海域に出現する波浪がどのような現れ方をするかを知るための統計値、
- ② 現在海上がどのような波浪状況であるかを知る速報値、
- ③ 数時間後あるいは数日後どのように波浪状況が変化するかを知る予測値、

などがある。

さらに、統計値として現在入手可能な資料は、年間、季節、月等の期間別に大小の波の出現状況を知るための波候、過去の高波の出現記録である高波の統計、および実際に海面に現れる1つ1つの波の形や大小の波の並び方など、波群に関する統計等、3種類の統計値がある。また、速報値および予測値についても、警告を発するた

表一 人の活動と波浪環境の関連性

人と波の関連形態	活動の種類	具 体 例	関連ある水理現象	波に係わる情報の形態*							
				統計値			速報値		予測値		
				波候	高波	波群	高波	常時	高波	常時	
				計画	設計	設計	警告	利用	警告	利用	
人一波	海洋性レジャー	水泳, ダイビング サーフィン 釣り ヨット, ボート	波, 流れ 波, 流れ 波, 流れ 波, 流れ, 風	○	—	—	○	○	○	○	
				○	—	○	○	○	○	○	
				○	—	○	○	○	○	○	
				○	—	○	○	○	○	○	
人—環境—波	憩い 日常生活	散策, 景観 飛沫, 塩害, 越波	水質, 漂砂, 波 波, 風	○	—	—	○	—	○	—	
				○	○	○	—	—	△	—	
人—浮遊式構造物—波	係留船 海運 漁業 浮体構造物 海上作業	浮遊式施設, 船舶 フェリー, 遊覧船 漁船, 釣り船 浮消波堤, 浮桟橋 作業船, ゴミ回収船	波, 流れ, 風 波	○	○	○	○	○	○	○	
				△	—	△	○	○	○	○	
			波	△	—	△	○	○	○	○	
				○	○	○	—	—	—	—	
			波, 流れ 波, 流れ, 風	○	○	○	○	○	○	○	
				○	—	△	○	○	○	○	
人—固定式構造物—波	港湾構造物 海岸構造物 その他の構造物	防波堤, 岸壁 護岸, 離岸堤 展望塔, 桟橋	波 越波, サーフビート 波, 風	○	○	○	—	—	—	—	
				○	○	○	—	—	—	—	
				○	○	○	○	—	○	—	

* 必要となる波浪情報: ○; 必要, △; 場合により必要, —; あまり必要としない

めの高波情報と、海域の利用に適した比較的静穏な波浪状況であることを知るための情報の2種類がある。

表一には各種の活動の具体例と、その活動に影響を及ぼす水理現象の種類、および必要となる波浪情報の形態を一覧表として示しておいた。このように、沿岸部におけるあらゆる人の活動がなんらかの形で波浪の影響を受けていることがわかる。

以上のような状況を考えると、人—固定構造物—波という関連形態以外の活動も、波浪環境とかなり密接な関係があることがわかる。しかし現状においては、適切な情報を入手できないために、一般的な気象情報をもとに、水域の利用者が自分の経験から修得した知識により独自に判断している状況であると考えられる。そのため、数値として与えられる既存の波浪資料を新たな観点から再整理することが要請される。

3 波浪情報に基づく活動環境の評価の具体例

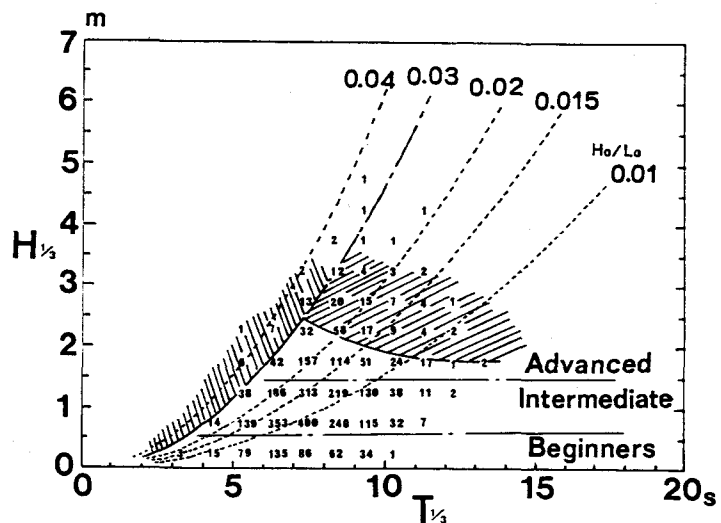
次に、いくつかの具体的活動形態について、どのように波浪環境を定量的に評価できるかを考えてみる。

(1) 人と波が直接かかわり合いを持つ活動

1) ヨット

ヨットの操船技術の中でも、どのように波を乗り越えるかは、速くかつ安全に帆走するための重要な技術と思われ、ヨット関連の雑誌でも、その手法についてのかなり詳しい記事がみられる。ヨットにとって最も危険であるのは、船上から波をかぶって浸水することである。もちろんこのような状態が生じないようにヨットを操作するけれども、時として船首が波の峰に突っ込んだり、追い波によってデッキ高の低い船尾から波をかぶるという事態が生じる。

前者の状況は、波長が比較的短くて波形勾配の大きな波の場合に、ヨットの動きが海面の上下運動に追いつかず、波の峰に乗り上げることができないような時に生じる。また、後者は、波速がヨットの進行速度より大きい長周期の波が碎波することにより、船内に水塊が飛び込むという状況と考えられる。これら2つの状況を考え合わせると、ヨットの帆走には不向きな波浪条件の範囲を想定することができる。図一1は一例として、宮崎



図一1 ヨットの帆走に不向きな波浪条件

県油津における有義波高と有義波周期の結合分布図¹⁾を用いて、ヨットに対して危険な波浪条件を示したものである。図の左側の斜線部分の波浪状態では、波形勾配が大きく船首が波の峰に突っ込む可能性がある。また上側の斜線部分は、水深10mより深い水域で波が砕けるような波浪状態であり、砕波によりヨットが波をかぶる危険性のある範囲である。

また、波の状況がヨットに対して危険であるか否かは操船する人の技量にもよる。初心者の場合には、波の峰がヨットのデッキを越えない程度の波高、中級者はヨットの操船が困難になる波高²⁾を限界値として、初心者から上級者に対する波浪条件を図-1に合わせ示しておいた。

もちろん実際状況では天候、風速などの影響も同時に考えなければならず、またヨットを操船する上で、うねりと風波が別な方向から来るような二方向性波浪は厄介である。したがって、ヨットの帆走に適した海象・気象状況は、波浪と風のデータを合わせた解析を行なうことによって、さらに詳細にヨットと波の関連性が理解できるものと思われる。

このように、ヨットに乗る人の波の見方を工学的な尺度で表示することにより、その海域がヨットの帆走に適した波浪環境であるかどうかの評価ができ、その結果を施設計画に反映させることが可能となる。また図-1のような波浪出現特性図を水域ごとに作成しておけば、波浪予測値が出された場合、それに応じて帆走水域を指定するといった処置も可能となる。

ii) サーフィン

サーフィンはボードに乗って波の前斜面をすべりおりるスポーツであるが、スキーと異なり、斜面が固定しておらず、進行する斜面にうまく乗らなければならない。そのためには波の進行速度（位相速度）と同じ速さまで加速しなければうまく波の前斜面に出ることができない。

幸い、水深が浅くなるに連れて波速は次第に小さくなり、また波の峰における水平流速は次第に大きくなる。さらに浅い水域に波が進行し、波が砕けるようになれば、波の進行速度と波の峰における水平流速は同じ速さとなるので、サーファーは少しパドルング（サーフ・ボードの上に乗って手で漕ぐこと）することによって波の前斜面に出る（テイク・オフと言う）ことができる。

さて、サーファーがうまく波に乗れたとしても、波が一瞬にして崩れてしまったのではサーフィンを楽しむことはできない。波の砕け方には崩れ波（spilling wave）、巻波（plunging wave）および砕け寄せ波（surging wave）の三形式がある。これらのうち、砕波の状態が最も長く持続するのは崩れ波であり、ついで巻波である。サーフィンに適した場所というのは、崩れ波あるいは崩れ波に近い巻波が発生する水域である。

砕波の形式は海底勾配と波形勾配の関係によって定まる。例えば海底勾配が1/100であるような緩勾配の海底地形においては、波形勾配が比較的小さい $H_0/L_0=0.01$ 程度でも崩れ波に近い砕波形式となる³⁾。

ところで、サーフィンが行なわれる水域は、それほど海岸から遠くない位置と考えられるので、水深が10m程度の水域と仮定する。沖から進行してきた波が、ちょうど水深10mの地点で砕け始めるような波浪条件は、砕波指標³⁾を用いて推定できる。油津の観測データを用いて、水深が10m前後の地点でちょうど砕波が生じるような波浪条件を示すと、図-2の太い曲線となる。この曲線に近い特性を持つ波がサーフィンに最も適した波となる。

一方、サーフィンがどのくらいの波高まで可能であるかについては、ハワイの各地の海岸における観測値に基づく調査結果が報告されている⁴⁾。これによれば、初心者は砕波波高が約1.5m、中級者は約3m、上級者でも約5mが限度のようである。この限界値を用いて初心者、中級者、上級者に合った波浪条件を図-2に示しておいた。ちなみに、波形勾配 $H_0/L_0=0.015$ を境に左側は崩れ波、右側は巻波の砕波形式であり、左上半分の斜線部が最もサーフィンに適した波といえる。

図-2をもとに、サーフィンに適した波が年間何日ぐらい期待できるかを推定することができる。さらに、人工浅瀬を造ることを計画するような場合にも、浅瀬による波の変形を考慮して同様の図を作成すれば、どの程度

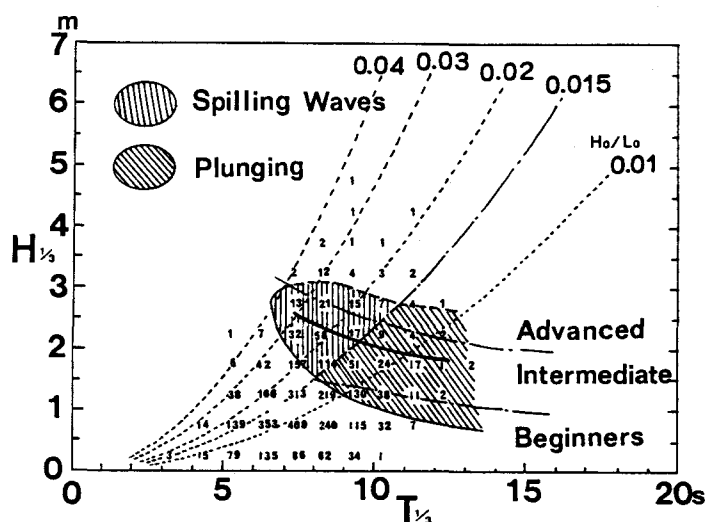


図-2 サーフィンに適した波浪条件

サーフィン可能日数を増やすことができるかを算定することも可能となる。

iii) 水泳, ダイビング

水泳やダイビングをする人たちにとっては、波は大変危険な存在であり、各地の海水浴場では風や波があるレベルを超えると遊泳を禁止するという安全策を取っている。

ところが、波がそれほど高くなくても、沿岸水域には波に起因する様々な流れが発生しており、これらの流れの一つである離岸流（リップ・カレントと呼ばれる）が時として水難事故を引き起こしている。

離岸流は、平行等深線を持つような比較的長い海岸では規則的な間隔で発生する。観測事例によれば、離岸流の間隔と碎波帯の幅には一定の関係がある⁵⁾。一方、碎波帯の幅は海底勾配と出現沖波の波高と周期により定まる⁵⁾ので、ある特定の海岸を対象とすれば、その海岸の海底勾配と出現波浪の特性値（有義波高と有義波周期）がわかれば、離岸流の発生間隔を推定することができる。

このように、水難防止の面からも、波浪情報は有効な情報源となり得ることがわかる。

iv) 釣り

沿岸部の開発プロジェクトでは、護岸や防波堤の一部に釣り場を設けた構造を採用する例が見られる。しかし、時として防波堤場の釣り客が高波にさらわれるという事故も報じられている。このような事故の中には、荒天時に警告を無視して防波堤で釣りをするという無謀な事例も多いと思われるが、他方、それほどの高波ではないのに、急に大きな波が現われて釣人をさらって行ったという事例もあるのではないかなと思われる。いずれにせよ、釣人の事故は、不規則に変化する波群の中で、まれに現われた大きい波が突然人を襲った結果であろう。

それでは、まれに現われる大きい波というのはどのような波であろうか。先ず思いつくことは、一連の波群中の最高波高 H_{max} が有義波高 $H_{1/3}$ に比べてどの程度の倍率になっているかということである。図-3は全国各地の実測波浪資料から求めた $H_{max}/H_{1/3}$ の平均値を、図-4はその標準偏差を示した図である⁶⁾。理論的には最高波高と有義波高の比は観測波形記録に含まれる波の数 N の関数として与えられ（図中の曲線）、観測する波の数が増えるほど $H_{max}/H_{1/3}$ の値は大きくなる。

さて、釣客が防波堤場で釣りをしているような波浪状況である、比較的小さい有義波高を持つ波群（図の黒丸のグループ）について考えてみることにする。先ず、釣りをする人は長時間海上に滞在するのが普通であり、数多い波にさらされる。その結果その間に遭遇する H_{max} は有義波高に比べ

大きい倍率となる。さらに、図-4の標準偏差を見ると、平均的には黒丸（小さい波）のグループのほうが白丸（大きい波）のグループより小さい値となっているけれども、黒丸のばらつきの範囲は白丸より大きくなっていることがわかる。ちなみに、特に標準偏差が大きい二つの黒丸は、むつ小川原港と鹿島港の観測結果である。したがって、これらの港で釣りをする人は他の地点に比べて突然大きい波（ $H_{max}/H_{1/3}=1.96\sim 2.01$ ）に遭遇する可能性が高いと言える。特に、外海に面した水深の大きい護岸や防波堤を釣場として解放する場合には、碎波による波高減衰を期待できないので、釣場の計画や運営にあたっては、比較的静穏な日でも波に対する配慮が重要となる。

(2) 人が環境を通じて波とかかわり合いをもつ場合

i) 波の音

海辺という言葉から連想するものの一つに、波の音がある。観光目的で短期間沿岸部に滞在するのであれば、波の音は内陸部にはない雰囲気を作る一要素として歓迎される。しかし、生活の場として長期にわたって定着する人にとっては、波の音は耳障りな騒音になりかねない。

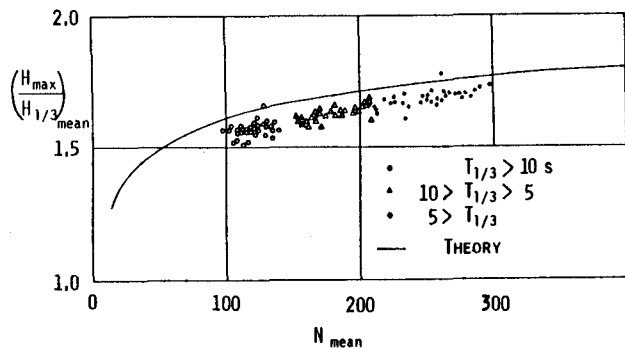


図-3 最高波高と有義波高の比の平均値と波数の関係

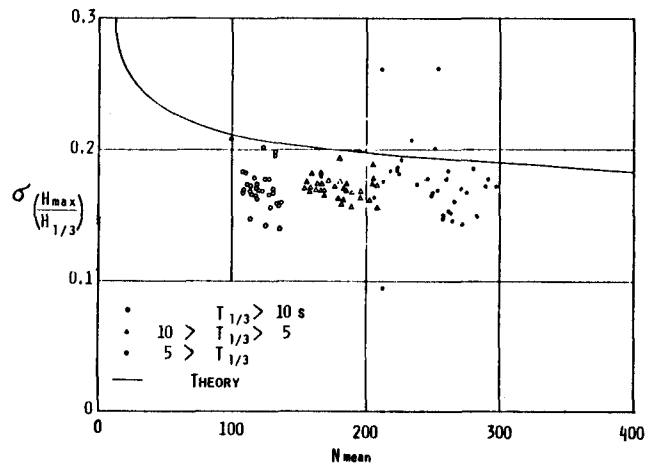


図-4 最高波高と有義波高の比の標準偏差と波数の関係

灘岡ら⁷⁾は、波の音が快く感じるか不快に感じるかは、そのリズム性が重要な役割を果たしているものと考え、鹿島灘に面する波崎海岸と相模湾に面する袖ヶ浦海岸の二つの海岸において録音した波の音の波形及びスペクトル解析を行なっている。図-5は解析結果の一例として、両海岸での波の音の強さの時間的変化を描いた図であり、袖ヶ浦海岸では規則的な音の強弱の変化を示しているのに対し、波崎海岸では強弱の少ない様な強さとなっている。

このような波の音の違いは、袖ヶ浦海岸が急深海岸であるのに対し、波崎海岸は遠浅の緩勾配海浜であるという、海底勾配の相違によるものであることを指摘している。さらに、音のリズム性は海底勾配と波の波形勾配の平方根の比 $\tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$ (surf similarity parameter と呼ばれる) が 0.6 を超えると急速に強くなる。

このように、波の情報は海底地形の情報と組み合わせることにより、対象海域の波の音が、そこで生活する人にとって、耳障りなものであるか快いものであるかという情報を与えてくれる。

ii) 塩害

沿岸部で生活する者の大きな悩みの一つは、潮風によって引き起こされる様々な問題(例えば金属部分が錆びること、電気系統の絶縁不良等)である。海面からどのように海水滴が空中に取り込まれるか、また、その後どのように高い大気中や陸上へ輸送されるかというのは、様々な不確定かつ非定常な要素を含んだ複雑な機構である。そのため、現在ではまだ基礎的な研究が進められている段階にある。

これらの研究成果の中に、海面におけるレイノルズ数 $Re (= u \cdot H / \nu)$ (ここに u は海面上の風の摩擦速度であり、平均的には $u_{10}/25$ (u_{10} は海面上 10m の風速) で与えられる、 H は波高、 ν は海水の渦動粘性係数である) と海面における海水滴の存在量の関係を求めた図(図-6)がある⁸⁾。沿岸水域上の風速及び波浪諸元に関する情報が入手できれば、図-6を用いて、どの程度の海水滴が空中に持ち込まれるか、おおよその値を推定することができる。

潮風による塩害の程度とこの海水滴の量との相関については、現在のところよくわからないけれども、プロジェクトの適地選定や施設配置計画における比較検討の際に、このようにして推定した海水滴の量を一つの相対的な指標として用いることも可能かと思われる。

iii) 散策(砂浜の挙動、砂浜上の波の挙動)

沿岸部に人工の構造物を建設することを計画するにあたり、考慮に入れておかねばならない要素は、構造物の完成後に海浜がどのように変化するかということである。

最近では海浜流の数値モデルおよびそれに伴う海浜変形の数値モデルが開発され、外力として働く波のエネルギーをうまく与えることができれば、かなりの精度で汀線の変化を予測することが可能となってきている。

しかし他方、航空写真による過去の海岸線変化過程の調査成果や長年にわたる深淺測量の成果が蓄積されているながら、外力である波浪に関する情報を欠いているために、これらにデータを有効に活用することが困難な状況にある。

このように、なんらかの形で海浜変形を引き起こした波浪の情報が与えられれば、上記の数値モデルを有効に活用して、より詳しい海浜変形の予測ができるようになると考えられる。

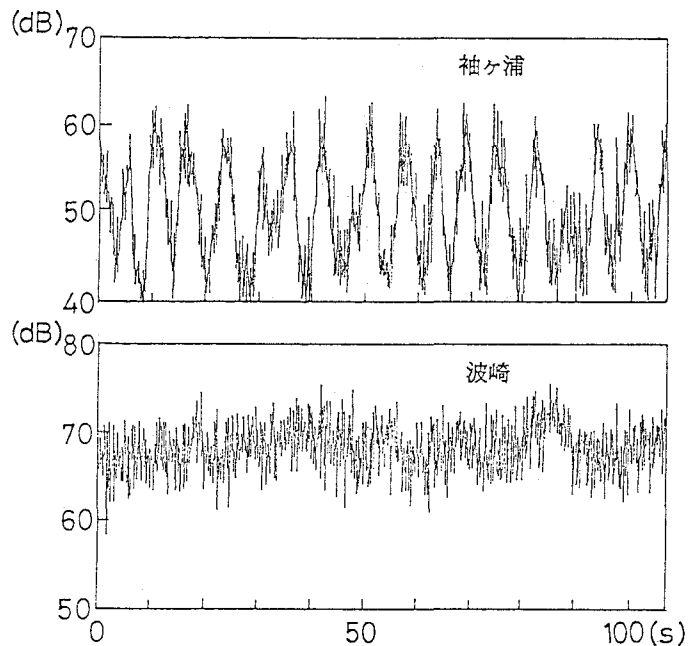


図-5 波の音の時間変動記録(灘岡⁷⁾による)

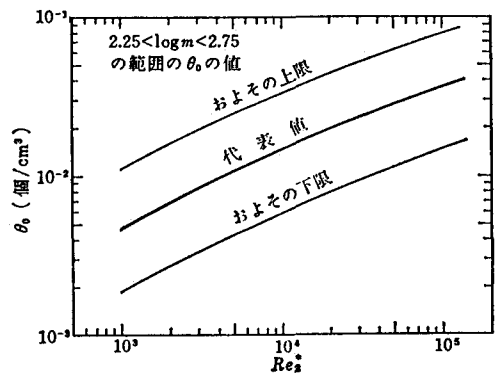


図-6 海面上の水滴の数の算定(文献⁸⁾による)

そのほか、出現波浪の特性値と海底勾配との組合せにより、汀線付近の波は様々に異なったを示す。この汀線付近の波の挙動は i) で音のリズム性の判別に用いたのと同じパラメーター (Surf Similarity Parameter) を用いて判別することができる。例えば、砕波形式、砕波点の位置、進行波か重複波かといった波の性質、砂浜による波の反射率、波の遡上高さ、砂浜上の波の先端の運動状況などが、このパラメーターを知ることによって推定可能となる⁵⁾。

(3) 係留船舶の動揺

岸壁に係留された船の動揺は荷役作業の効率に影響を及ぼす。そのため、防波堤や岸壁などの港湾施設の配置計画を立てる際には、船の大きさに応じた荷役限界波高を設定し、岸壁前面における波高がこの限界波高を超えない日数が例えば年間90から95%となるように施設の配置を決定している。

荷役限界波高の値は、港湾施設の配置を決定する際の目安であって、実際に船を着岸するか否か、あるいは荷役を続けるか中止するかという判断は、船長や荷役作業の責任者が自分の経験に基づいて判断しているのが現状であると思われる。実際の岸壁で、どのような波浪状況下で荷役作業が中断されたかを調査した結果⁹⁾の一例が図-7である。この例では500~3,000 GTの中型船舶が荷役を中断したときの対象バースにおける波高および港外における波の周期を示している。港湾計画策定の際には、中型船の荷役限界波高として0.5mを用いているけれども、この図が示すように、この限界波高より小さい波高でも荷役作業ができなくなる状況がかなり多く見られる。特に波の周期が長い場合(図中の三角印)には、波高が0.1m程度でも荷役作業に支障が生じている。

以上のような検討結果は、港湾施設を造る側と完成した施設を使う側の、波に対する見方、尺度が異なっていることを示す例でもある。もちろん、技術の進歩に伴って、港内静穏度の評価方法も変化して行くものと思われるけれども、その過程において、有義波高および有義波周期といった波の代表値ばかりでなく、波向に関する情報、うねりと風波が重なった二方向性波浪か否かの情報、さらに風向・風速などの気象情報など考慮に入れた検討が望まれる。

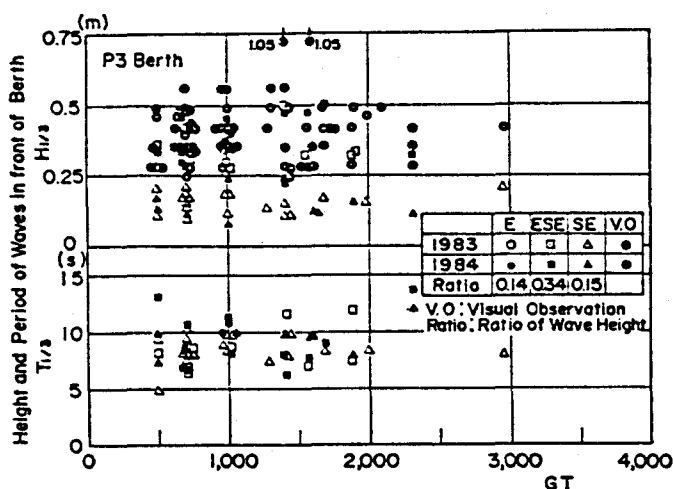


図-7 荷役中断時の波高・周期と船のトン数の関係
(上田⁹⁾による)

4. まとめ

ウォーター・フロントにおける、人の様々な活動形態が、その海域に出現する波浪によりどのように影響を受けるかを検討した結果、次の事柄が主要な結論としてまとめられる。

- (1) これまでに蓄積された波浪観測資料を再整理することにより、プロジェクトの適地選定において有効な判断資料が得られる。
- (2) 波浪情報として、従来のような有義波高および周期のみの資料では不十分であり、波向、(方向スペクトル)、風などの気象情報、海底地形の情報、さらに、人の活動状況に関する情報とを合わせ、対照しながら解析することにより、様々な角度からの詳細検討や評価が可能となる。

参考文献

- 1) 小舟浩治ほか：沿岸波浪観測年報(1986), 港研資料, No. 612, 1988, pp. 237~241
- 2) 染谷昭夫・藤森泰明・森繁 泉：マリーナの計画, 鹿島出版会, 1988, pp. 23~25
- 3) 土木学会：水理公式集, 1985, pp. 510~512
- 4) 土木学会：土木学会誌, 1974, 10月号, pp. 74~75
- 5) 本間 仁監修：海岸環境工学, 東京大学出版会, 1985, 582p.
- 6) 菅原一晃ほか：沿岸波浪観測15年統計, 港研資料, No. 554, 1986, pp. 407~442.
- 7) 灘岡和夫・日徳見敏夫：海岸の音環境に関する基礎的研究, 第35回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 1988
- 8) 東海大学出版会：海洋物理 I, 海洋科学基礎講座 1, 1970, pp. 212~231
- 9) 上田 茂：係留船舶の動揺とその港湾の稼働率に及ぼす影響について, 港研報告, 第26巻第5号, 1987