

海岸波浪の変形に伴う波浪の地域分布特性

土屋 義人*・山口 正隆**・芝野 照夫***・矢下 忠彦****

1. 緒 言

周知のように、波浪は浅海域に進むにつれて、海底地形の影響を受け、波高や波長などの波浪特性が変化する。現地海岸の海底地形はきわめて複雑な変化をしており、したがって深海域では理想的に同一条件の波浪であっても、われわれが日常の生産生活活動を行っている海岸地帯では海底地形に対応して複雑な波浪の分布を示し、そのためある場所では波浪が集中することにより海岸災害を被る可能性が高くなると考えられる。そこで、この観点から現地海岸における波浪の分布特性を究明し、海岸災害の防止対策に資するための第1段階として、本研究では、山形県酒田市から石川県江泊町に至る日本海沿岸における海岸波浪の地域分布特性を、規則波を仮定した場合の屈折、shoaling および海底摩擦を考慮した数値計算から明らかにし、その妥当性を観測資料との比較から検討するとともに、過去の波浪災害資料との対比から波高の地域分布と海岸災害の地域分布との相互関係を究明しようとするものである。

2. 波の屈折の計算法

いま、long-crested な規則波の2つの相隣る波向線および波峯線を考えると、波向線および波向線間隔の変化は、それぞれ次式によって表わされる¹⁾。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\beta}{dt^2} + p_t \frac{d\beta}{dt} + q_t \beta &= 0 \\ p_t &= -2 \left(\cos \alpha \frac{\partial c}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ q_t &= c \left(\sin^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - 2 \sin \alpha \cos \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \right. \\ &\quad \left. + \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \\ \beta &= \frac{b}{b_0} = K_r^{-2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α : x 軸と波の入射方向とのなす角度、 c : 波速、 β : 波向線間隔係数、 b : 波向線の間隔、 b_0 : 深海域での波向線の間隔および K_r : 屈折係数、である。式(1)および(2)は浅海での変形計算の精度がよくなるように考慮して、独立変数として時間をとったものであり、そのため波向線に沿う距離 s による表示とは異なり、式(2)の p_t の表示式に係数2が付加されることになる。

次に、波向線を横切るエネルギーの流出入はないものとし、微小振幅波理論を用いれば、水深変化に伴う波高の変化は沖波の諸特性との関係で周知の次式で表わされる。

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_s K_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H : 波高、 c_g : 群速度および K_s : 浅水係数、である。

さて、式(1)、(2)および(3)が水深変化に伴う波高変化を計算するための基礎式であるが、さらに、便宜的に一樣水深の場合の結果を用いて海底摩擦による波高変化を考慮することにする。一樣水深 h の水域を Δl だけ伝播する波の底面摩擦による波高減少率 K_f は、Bretschneider および Reid によれば、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} K_f &= \frac{H_2}{H_1} = \left(1 + \frac{f H_1 \phi_f \Delta l}{K_s T^4} \right)^{-1}; \\ \phi_f &= \frac{64\pi^3}{3g^2} \left\{ \frac{K_s}{\sinh(2\pi h/L)} \right\}^3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 T : 周期、 f : 海底摩擦係数、 g : 重力の加速度および L : 波長、である。式(4)は一樣水深上におけるものであるため、実際の計算は階段上の水深に対して行うことになる。

なお、屈折計算にあたっては、基本的には若干の修正をほどこした Worthington および Herbich²⁾ のプログラムを用いた。

3. 日本海沿岸における波浪の地域分布

(1) 対象領域および波浪条件

波浪の変形計算にあたり、まず第1に問題になるのは対象区域の選定であるが、本研究では海岸災害のひん度の多い新潟海岸を中心とする日本海沿岸を対象として、

* 正 会 員 工 博 京都大学教授 防災研究所
 ** 正 会 員 工 博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科
 *** 正 会 員 京都大学助手 防災研究所
 **** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

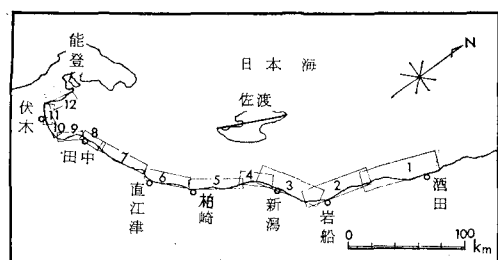


図-1 屈折図の作成領域

山形県酒田市から新潟県岩船町、新潟市、直江津（上越市）を経て、さらに富山県富山市から石川県江泊町に至る延長約 400 km の領域を取り扱うことにした。

図-1 は屈折図の作成領域を示したものである。屈折図の作成領域は非常に広範囲にわたるので、計算機の容量および計算時間を考慮して、全体を 12 の領域に分割した。その場合、波向線がすべての領域で得られるように、かなりの部分を重複させた。

第 2 の問題は深浅測量図の入手であるが、詳細な深浅測量図は港湾区域および海岸工事区域のものしかなく、しかも水深 20 m 程度までのものが大部分であるので、ここでは、1/5 000 の深浅測量図によった領域 8 を除いて、1/12.5 万（領域 9～12）、1/20 万（領域 4～7）および 1/25 万（領域 1～3）の海図を用いることにした。水深は海図に透明な正方眼紙をあて、後述する波の周期に対して屈折の影響のほとんどない水深 100 m の地点から 2 mm おきに水深 0 の地点まで読みとった。したがって、読み取り間隔は実距離にして 250 m、400 m および 500 m（領域 8 の場合には 100 m）であり、たとえ計算において補間を行っても、この間の海底地形の変動は無視されることになり、若干平滑化された屈折図が得られることに留意すべきである。

第 3 の問題は計算に用いる波浪条件の選定である。屈折図の作成にあたり、波浪条件を的確に選定することは非常に重要であるが、必ずしも明確でないので、ここでは一応各領域の海岸構造物の計画波浪を用いることにした。これによれば、酒田から姫川に至る領域では寺泊を除いて、波高は 5.5 m～7 m とかなり大きく、周期も 10 sec～11 sec であるのに対して、富山湾内にある魚津から伏木では波高 3 m～3.5 m、周期 10 sec である。前者は低気圧による直接的な風浪であり、また後者はいわゆる「寄り廻り波」といわれるうねりであると考えられる。

屈折図の作成に用いる波浪は、波向を計画波の方向およびそれと $\pm 22.5^\circ$ をなす方向、周期 8 sec、10 sec および 12 sec を主体とすることにし、屈折図は各領域につき、時間間隔 8 sec および沖側の波向線間隔をメッシュで 1 として約 15 ケース作成した。

(2) 波高の地域分布

本節では波高の地域分布について検討するが、それに

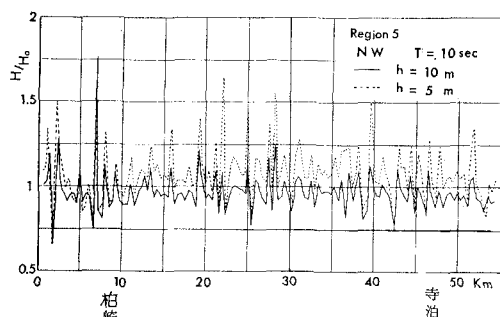
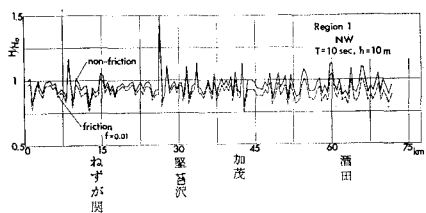


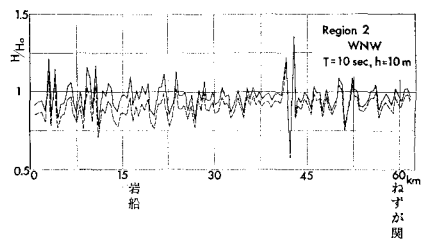
図-2 波高分布に及ぼす対象水深の影響

先だち、波高分布に及ぼす対象水深、周期および波向の影響について述べる。

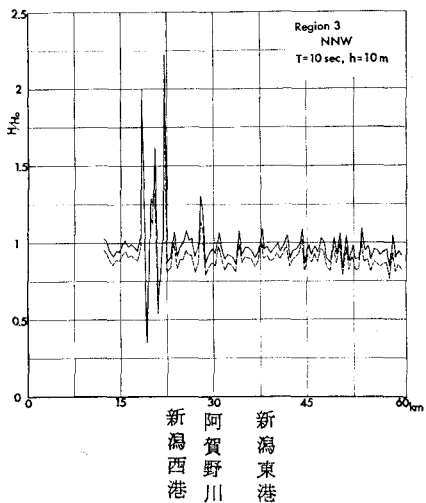
図-2 は波高の地域分布に及ぼす対象地点の水深の影響を調べるために、沖波波高に対する水深 10 m および 5 m の地点での波高の地域分布を示したものであるが、この図から、水深 5 m における波高分布の変化の方が 10 m の場合のそれよりはるかに著しいことがわかる。これは波高の変化が水深変化に鋭敏であることを示しており、このことから屈折の数値計算には時間を独立変数とした式を用いた方がより精度がよいといえるであろう。しかし、水深は大部分海図から求めたために、海底勾配の急な領域では浅い場所の水深、したがって波高の推定精度が悪いことおよび波高の地域分布の平均的特性はそれほど変化しないなどを考慮して、以下の考察では水深 10 m の地点での波高を用いることにする。なお、紙数の都合上、図は省略するが、周期が長いほど波高変化が著しく、また波向によって波の集中箇所が移動し、その結果、波高分布の特性がかなり変化する。このように、多くの問題が含まれているけれども、一応それらの影響を無視し、各領域で主方向と考えられる波向に対する波高の地域分布を各領域ごとに示したのが 図-3 であり、図中の実線は海底摩擦を考慮しない場合を、点線は $H_0=7\text{ m}$ および $f=0.01$ として海底摩擦を考慮した場合を示す。これらの図によれば、まず領域 1 では堅苔沢付近を除いて多少の変動はあるにせよ、顕著に波高比の大きい箇所は現われていない。このことは領域 2 および 3 でも同様であるが、領域 2 では中村浜～岩船間および大島崎付近に、領域 3 では新潟西港付近に局所的に波高比の大きいところが見られる。また、領域 4, 5, 6 および 7 では弥彦鼻、柏崎、直江津、能生および糸魚川近傍で局所的に波高比が大きい、その周辺では平均的にはむしろ波高比は小さい。さらに、領域 8 では横尾、吉原、五十里、領域 10 では海老江～水橋間、領域 11 では新湊、伏木付近に高波高比の領域が出現している。これらの区域は海岸欠陥あるいは海岸災害の被災で有名な箇所であり、後述するように、両者の間に強い相関があるように思われる。一方、領域 9 の魚津～生地間、



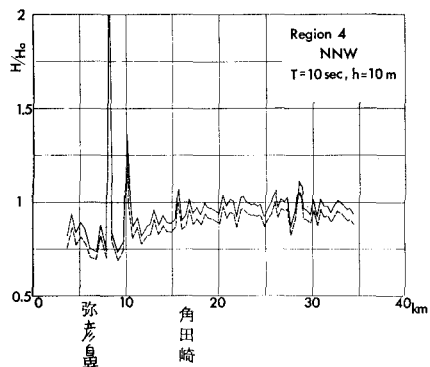
(a)



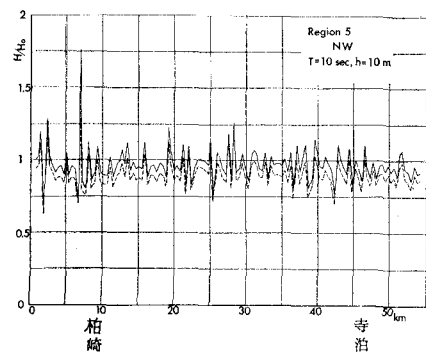
(b)



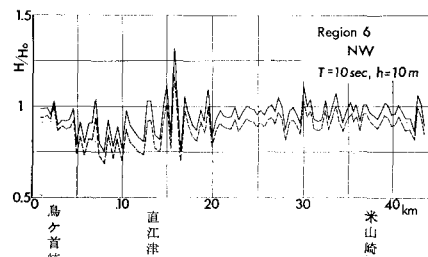
(c)



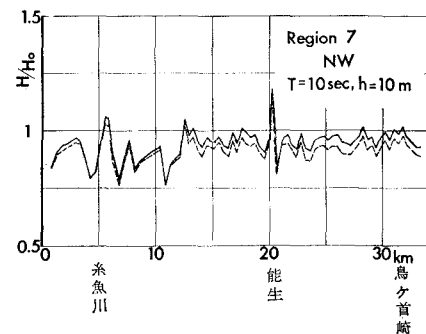
(d)



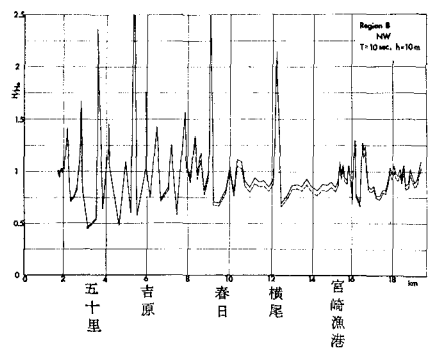
(e)



(f)



(g)



(h)

図-3 (a)~(h) 波高の地域分布 (1)

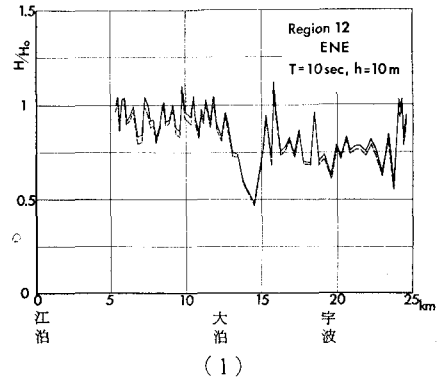
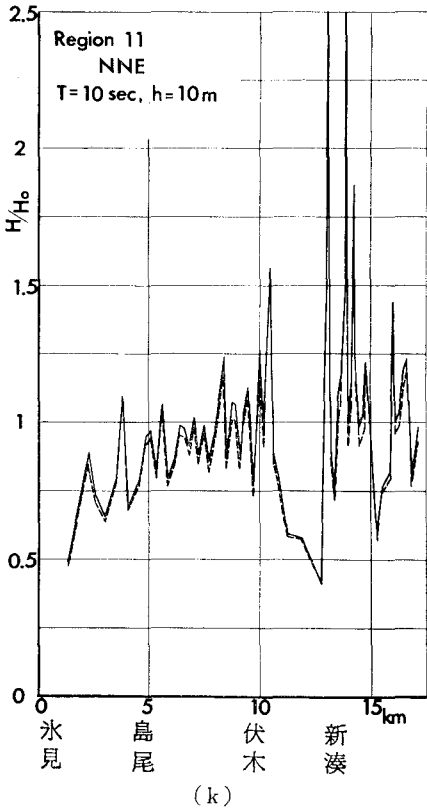
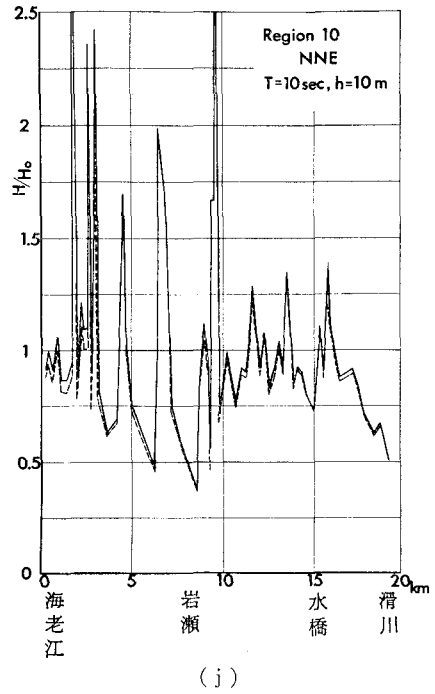
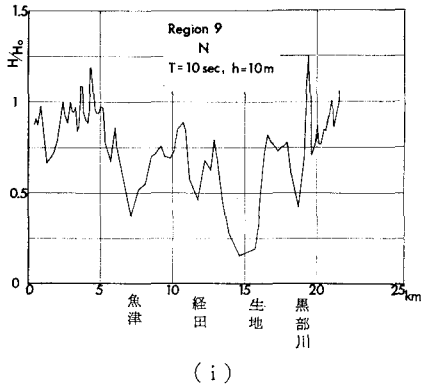


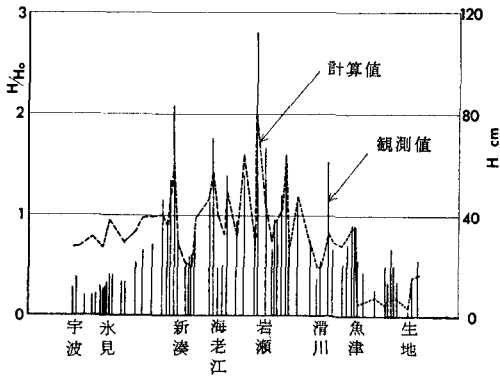
図-3 (i)~(1) 波高の地域分布 (2)

領域 10 の岩瀬あるいは四方付近、領域 11 の伏木～新湊間および島尾～氷見間では逆に波高比はかなり小さく、とくに、領域 9 の魚津～生地間では波高比の小さい領域が広範囲にわたっている。また、領域 12 では相対的に高波高比の領域はほとんど存在しない。このように、富山湾内で波高比の変化の著しいのは、洋谷など富山湾特有の海底地形によるものである。

以上まとめれば、堅苔沢、大島崎、新潟西港、弥彦鼻、柏崎、直江津、能生、糸魚川、横尾～五十里、水橋～新湊間および伏木近傍では波の集中によりかなり波高比が大きくなっているといえよう。

また、海底摩擦の影響は比較的緩勾配の領域 1～6 ではかなりの程度見られるが、海底勾配の急な領域 7～12 ではあまりないと考えられる。したがって、領域 1～6 では対象水深がさらに浅くなっても、海底摩擦を考慮すれば波高の地域分布特性はそれほど変化しないのに対して、領域 7～12 では波高は著しく増幅されることになる。

なお、佐渡島の遮へい効果について、半無限堤を仮定した回折計算によって若干検討した結果、波向NWに対しては、寺泊から弥彦鼻さらに新潟市付近ではその影響が大きいため、波高比が小さくなることがわかった。



図—4 富山湾内での波高の地域分布に対する目視観測結果と計算結果との比較

(3) 波浪観測結果との比較

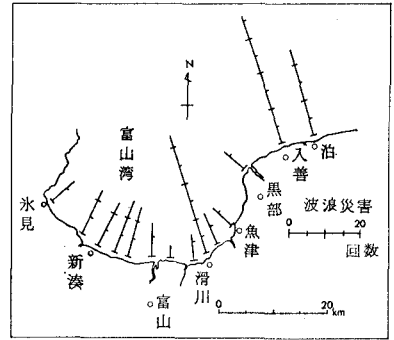
日本海沿岸では運輸省はじめ関係各官公庁によって多くの地点で波浪観測が継続実施されている。そこで、1970年～1974年の間での同一の低気圧において各波高計によって観測された最大の有義波高の分布を計算結果と比較したが、資料のばらつきなどのため、計画波高の地域分布の妥当性を裏づけるにとどまった。

富山湾内でのほぼ同時の波高分布は斉藤⁹⁾によって得られている。これは1952年9月21日9時～16時の低気圧によるうねり時に富山湾内の海岸のうち市振から宇波に至る約86kmの間の約100か所の地点で波浪などの目視観測を実施したものである。図—4は斉藤の目視観測結果と計算結果(周期10sec, 波向NNE, 水深10mの地点, $f=0$)とを比較したものである。斉藤の観測結果では沖波の波高および波向が明確でない上に、波高は汀線から砕波線までの距離の約2倍沖合いの地点での測定結果である。また、必ずしも同時分布でなく、さらに、各観測点での周期もかなり変動しており、比較するには十分とはいえないが、富山湾沿岸に沿った波浪の観測結果として唯一の例であり、あえて比較したものである。このような両者の条件の相違にもかかわらず、宇波および氷見付近を除いて波高分布の形がかなり類似している。したがって、少なくともうねりなどに対しては、本研究の計算法はある程度の妥当性をもつものといえよう。

4. 波高の地域分布と海岸波浪災害の発生頻度

3.では波浪の変形計算に基づいて日本海沿岸に沿う波高の地域分布が求められたので、以下では海岸波浪災害との関連を考察する。

図—5は小林⁴⁾の研究に基づき、1154年以降の富山湾における海岸波浪災害の沿岸方向分布を図示しなおしたものである。この図から下新川海岸(黒部川右岸～宮崎漁港間)をはじめ図—3で検討した波高比の大きいところでは相対的に波浪災害の発生回数が多く、波高の地域



図—5 富山湾における波浪災害の発生頻度の沿岸方向分布

分布と波浪災害の発生回数のそれとの対応がかなりよいことがわかる。したがって、波高の地域分布図から波浪災害の危険箇所を予測することはある程度可能であろう。しかし、一般に、波浪災害は来襲波浪の波高が大きければ、必ず発生するというものでなく、海岸地形、土地利用形態および海岸防御施設などとの関係で考察する必要がある。たとえば、山形県南部の加茂から鼠ヶ関の間では山地が海岸まで迫り、岩礁地帯であるために、高波浪が来襲しても波浪災害の可能性は少ない。一方、海岸の背後地が平坦で人家が密集した下新川海岸などでは、たとえ波浪の集中発散を考慮しなくても、適切な海岸防御施設がなければ、甚大な被害を被る可能性があるといった土地利用形態の違いにも起因することは明らかである。以上のように、海岸波浪災害は波浪のほかの種々の要因が重なって発生するものであり、したがって、波浪災害の危険箇所を的確に予測するためには、今後波浪の地域分布のみならず、これらを総合的に考察する必要があるのはいうまでもない。なお、最後に海岸防御施設の1つである海岸堤防の天端高さや波高の地域分布には計画波高に対して相対的にある程度の対応関係が見られ、防災対策の観点からみて興味深い。

5. 結 語

以上、本研究では波浪の屈折、shoaling および海底摩擦を考慮した数値計算結果に基づき、山形県酒田市から石川県江泊町に至る延長約400kmの間の波高の地域分布を求めて、波浪の集中発散箇所を明らかにするとともに、富山湾における目視観測結果との比較から、計算結果の妥当性のある程度確かめた。ついで、富山湾内での波浪災害回数の地域分布図と波高の地域分布図との比較から、両者に良好な相関性があることを示し、この結果から波浪の集中箇所を見出すことにより波浪災害の危険箇所をある程度予測できることを示唆した。

最後に、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究による成果の一部であることを付記するとともに、資料

の収集に御協力戴いた運輸省第1港湾建設局広本課長および安井技官をはじめとする企画課の諸氏ならびに富山県、新潟県および山形県土木部港湾課の方々に謝意を表明する。なお、数値計算はすべて京大大型電子計算機センターの Facom 230-75 を用いた。

参 考 文 献

- 1) Skovgaard, O., I.G. Jonsson and J.A. Bertelsen: Computation of wave height due to refraction and friction, Proc. ASCE, WW1, pp. 15-32, 1975.
 - 2) Worthington, H.W. and J.B. Herbich: A computer program to estimate the combined effect of refraction and diffraction of water waves, Sea Grant Pub., No. 219, Texas A & M Univ., 1970.
 - 3) 斉藤外吉: 富山湾海岸浸蝕調査報告書, 富山県土木部河港課, pp. 1-20, 1953.
 - 4) 小林清久: 富山湾の沿岸風, 波浪, ウネリの観測及び浪害状況, 富山湾海岸浸蝕調査報告書, 富山県海岸対策協議会, pp. 265-298, 1952.
-