

# 球面浅瀬上の波高分布の推定に対する鉛直線 グリーン関数法の適用性について

APPLICABILITY OF VLG METHOD TO THE ESTIMATION OF WAVE HEIGHT  
DISTRIBUTION AROUND A CIRCULAR SHOAL

中村孝幸<sup>1</sup>・飯干富広<sup>2</sup>・村上剛<sup>3</sup>

Takayuki NAKAMURA, Tomihiro IIBOSHI and Tuiyoshi MURAKAMI

<sup>1</sup> 正会員 工博 愛媛大学助教授 環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

<sup>2</sup> 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

<sup>3</sup> ㈱アラタニ電算センター (〒730-0833 広島県広島市中区江波本町4-22)

For a circular shoal bathymetry, the conventional wave ray method is comparatively hard to estimate wave height distributions. In order to avoid the difficulty, combined analysis of the vertical line source Green's function method and the regional division method was adopted. Applicability of the method to a circular shoal bathymetry was examined by the comparison between the experimental and computed results. As an extensive case study, a circular shoal bathymetry with a vertical circular caisson at the top was used to know the effect of wave diffraction on the wave refraction by the shoal.

*Key Words : circular shoal bathymetry, wave refraction and diffraction, VLG method, regional division method*

## 1. まえがき

従来, 球面浅瀬上の波高分布の算定法としては, 各種の算定法が提案されている. このような算定法の理論的背景や特徴については, 既に詳しいレビューがなされている<sup>1)</sup>. 従来の算定法を概略的に分類すると, まず時間領域での取り扱いが可能な非定常解析と周波数領域での取り扱いである定常解析がある. 定常解析では, 回折現象と水深変化による屈折現象を採り入れた解析法(緩勾配方程式に基づく方法)が著名である. しかしながら, この方法に基づく算定は, 有限要素法や有限差分法が用いられ, 港湾などの大領域を対象にした算定には巨大な計算機能力が必要とされ, 大領域の波高算定には難しい面もある.

一方, 中村ら<sup>2)</sup>は, 棚形の水深変化を想定して, 鉛直線グリーン関数法と領域分割法を結合した解析法の展開を行い, この解析法の妥当性を港湾模型実験による結果との比較から確認している. この解析法では, 構造物境界や水深変化線を対象にした1次元積分方程式を取り扱うだけで済み, 計算機能力を大幅に減ずることが可能で, 港湾などの大領域を対象にした算定に適すると思われる. しかしながら, 本来, 鉛直線グリーン関数法<sup>3)</sup>は, 平面的に配置さ

れた堤体構造物まわりの回折計算を目的に開発されたものであり, 球面浅瀬のような屈折現象の卓越する海域に対してその適用性は十分に知られていない.

本研究では, 波向き線法による解析が困難となりやすい球面浅瀬を対象にして, 鉛直線グリーン関数法と領域分割法を結合した解析法の適用性を従来の実験結果<sup>4)</sup>との比較から明らかにする. また, 屈折現象と回折現象の両者が現れる場合, 具体的には球面浅瀬上に灯台などを模擬した円筒構造物がある場合について, 同様の解析法による波高算定を行い, 両現象の相互的な干渉効果を考察する.

## 2. 鉛直線グリーン関数法に基づく解析法の概要

鉛直線グリーン関数法は, 水深変化の取り扱いを除けば, Isaacson<sup>3)</sup>により提案されたもので, その後, 薄肉部材にも適用できるように拡張されている. 解析法としては, 定常解析法で線形理論の範疇にある.

中村ら<sup>2)</sup>は, 棚形の水深変化を想定して, 鉛直線グリーン関数法と領域分割法を結合した解析法の展開を行い, 陸域境界による回折・反射現象のみならず, 水深変化による屈折・浅水変形をも近似的に考

慮できるようにしている。そして、解析法の妥当性を断面2次元理論による厳密解析の結果や平面波浪実験の結果と比較している。このとき、水深変化部の接続条件としては、流量と水位の連続条件を用いる方法が、流量と圧力積分量の連続条件を用いる方法より精度の良い算定が行えることなどを報告している。

以下で紹介する球面浅瀬まわりの波高分布の算定は、上記した鉛直線グリーン関数法と領域分割法を結合した解析法により実施した。

一方、現地波浪に対応できるように、多方向の不規則波を入力とする算定も実施しているが、その取り扱い方法としては各成分波の線形重ね合わせを仮定した合田<sup>5)</sup>によるものを用いた。

### 3. 算定モデルおよび算定条件

#### (1) 球面浅瀬のモデル化

算定の対象にした球面浅瀬は、伊藤ら<sup>4)</sup>が平面水槽を用いて実施した水理実験で用いたモデルの球面浅瀬(縮尺1/100程度)である。この概略図を図-1に示す。伊藤ら<sup>4)</sup>は、水理実験による波高測定のみならず、数値波動解析法による理論算定も行い、両者がほぼ一致することや当時問題であった波向き線の交差する海域での波高算定法として数値波動解析法の有効性などを報告している。

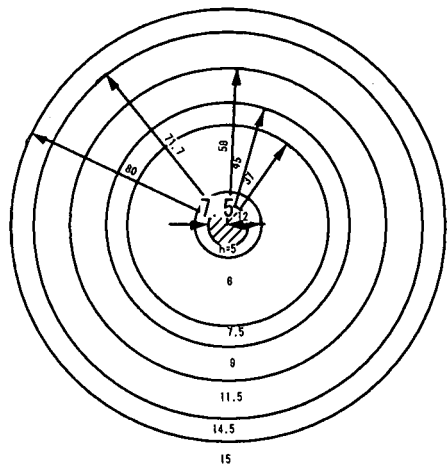
鉛直線グリーン関数法と領域分割法を結合した解析法を用いるとき、まず最初に、連続的な水深変化地形を離散的な棚形的水深変化地形にモデル化する必要がある。ここでは、球面浅瀬を結果的に図-1に示すように、沖合の一定水深場を含めて7つの異なる水深域に分割した。以下の算定では、比較のため5つの異なる水深域に分割した計算も実施している。

各水深域に分割するとき、屈折現象が原理的に異なる水深間での波速に依存することに着目して、以下のような方法で各水深を設定した。

① 対象とする海域での水深の変化範囲、例えば水深 $h$ が $h_1$ から $h_n$ に変化するとき、波速が $C_1$ から $C_n$ に変化する場合を想定する。ただし、 $h_1$ は沖波相当波長の $1/2$ 程度の水深 $h_0$ よりも浅いものとする。

② 水深 $h_0$ に対する波速を $C_0$ として、水深の変化範囲内で $C/C_0$ 対 $h/h_0$ のグラフを作成し、 $h/h_0$ による $C/C_0$ の変化が特定の刻み値 $\Delta C^*$ となるように水深変化の範囲内で各 $h_i$ を決定する。

ここでは、原則的に $\Delta C^* < 0.1$ 程度の基準を満たすように各棚形的水深を選定した。もちろん、 $\Delta C^*$ をさらに小さく設定すると、算定精度は向上するが、計算対象にする水深変化線が増えるため、必要とされる計算機能力と時間が幾何級数的に増大することに注意する必要がある。



単位: cm

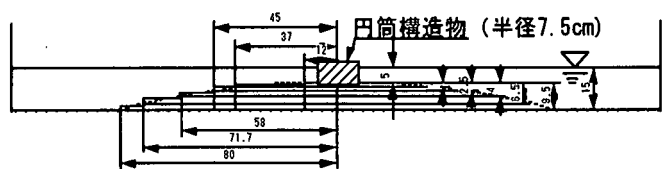


図-1 球面浅瀬の棚型水深地形への近似の際に採用した代表水深とその領域

#### (2) 算定条件

計算での波条件は、伊藤らの球面浅瀬の実験で用いられているものを原則的に用いた。ただし、後に合田ら<sup>6)</sup>により、多方向不規則波を対象にした計算が実施されており、このときには伊藤らの模型実験結果を現地換算した条件(長さのスケールで100倍)が採用されている。そして、ここでも比較の容易さから、同様の現地条件を想定した波条件とした。具体的には、波周期 $T = 5.1$  sである。また、多方向不規則波としては、合田ら<sup>6)</sup>により用いられている条件、有義波周期 $T_{1/3} = 5.1$  s、方向集中度パラメータ $S_{max} = 75$ とした。

鉛直線グリーン関数法では、水深変化線および陸域を線要素に分割して、離散化された1次元の積分方程式を取り扱うことが必要になる。このとき、線要素の大きさが算定精度に関係する。ここでは、従来の研究<sup>1)</sup>を参照して、線素分長は、規則波の場合、作用波長の $1/5$ 以下、不規則波の場合、最小の代表周期に対する波長の $1/5$ 以下となるように設定した。

### 4. 算定結果と従来の実験結果との比較

図-2は、球面浅瀬まわりの波高分布の算定結果を入射波高との比で示す。このとき、入射波は紙面の下より上へ作用する。算定では、図-1に示す7段階棚型近似の水深変化が用いた。図中の原点に球面浅瀬の中心があり、半径は波長の2倍に相当することから、屈折に起因する高波高は、浅瀬の中心線

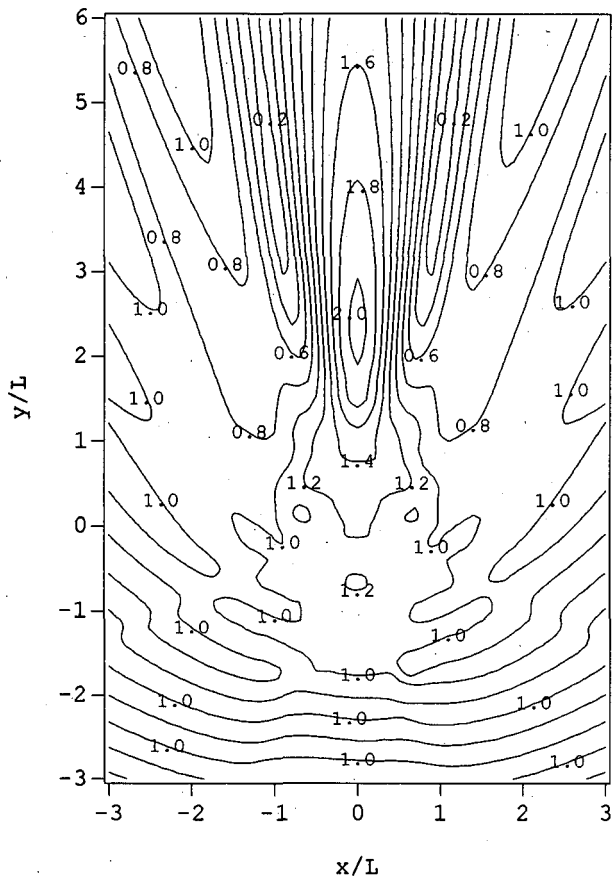


図-2 球面浅瀬まわりの波高比の算定結果  
(水深変化:7段階型近似,  $h/L=0.375$ ,  $h=15m$ ,  $T=5.1s$ )

上で背後端以後に現れることが分かる。また、波高比は、0.2から2程度まで変化するなど、空間変化が激しいことも認められる。

図-3～5は、上記の算定結果と伊藤ら<sup>4)</sup>による実験結果の比較を代表的な横断側線にわたる分布で示す。これらの図に見られるように、算定結果は実験結果の複雑な空間変化をよく推定しており、鉛直線グリーン関数法に基づく算定法により、屈折現象が顕著な球面浅瀬上の波高変化がほぼ予測できるものといえよう。

これは、波向線法で波向きが交差するような浅瀬上では、屈折のみならず波峰線方向にエネルギーが輸送される回折現象も重要になるため、回折現象を重視する鉛直線グリーン関数法により、精度よく波高分布が推定できたものと判断される。

次に、図-6は、より効率的な算定を目的として、どこまで粗く水深変化を分割できるかについて検討した結果の代表例を示す。この算定では、上記の7段階の水深変化に対して、5段階に減じて同様の波条件に対する波高比の分布を求めたものである。

図-2の結果と比較すると、高波高比の領域が拡大する傾向にあることなどが認められる。ただし、全体的な傾向としては、両結果の間に有意な差は認められず、工学的にこの程度の差異は問題にならないと考えられる。

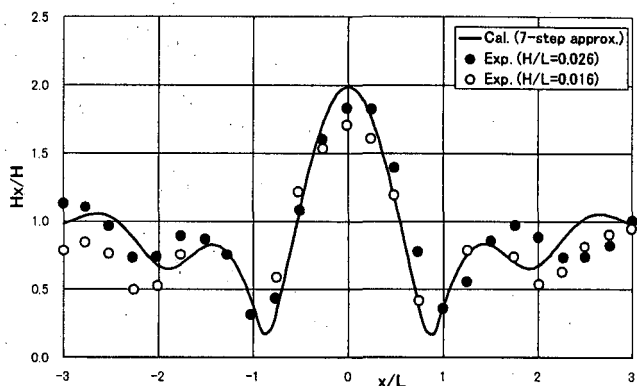


図-3 波高比の横断分布に関する伊藤ら<sup>4)</sup>による実験結果との比較 ( $x/L=3$ )

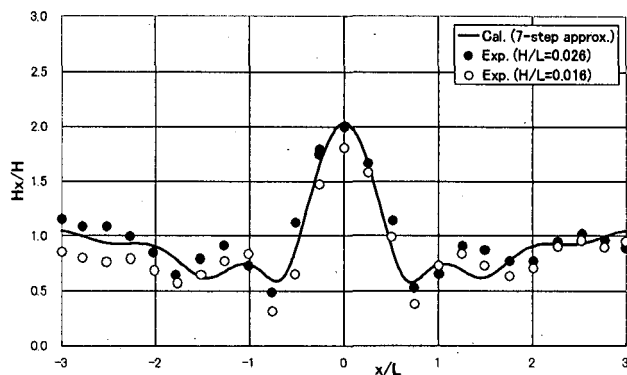


図-4 波高比の横断分布に関する伊藤ら<sup>4)</sup>による実験結果との比較 ( $x/L=2$ )

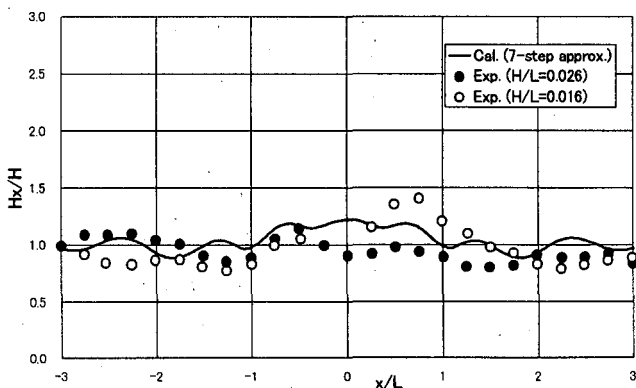


図-5 波高比の横断分布に関する伊藤ら<sup>4)</sup>による実験結果との比較 ( $x/L=0$ )

いずれにしても、各水深間での無次元波速変化が0.1程度に設定しておけば、算定結果の精度は十分なものと結論される。今後は、水深変化の状況として、一様勾配領域など解析解の知られている場合を対象にしてさらに検討を進めていきたい。

## 5. 浅瀬上に設けた円筒構造物の影響

ここでは、上記で検討対象にした球面浅瀬の頂部に灯台などを模擬した円筒構造物がある場合について算定を行い、その影響を考察してみる。

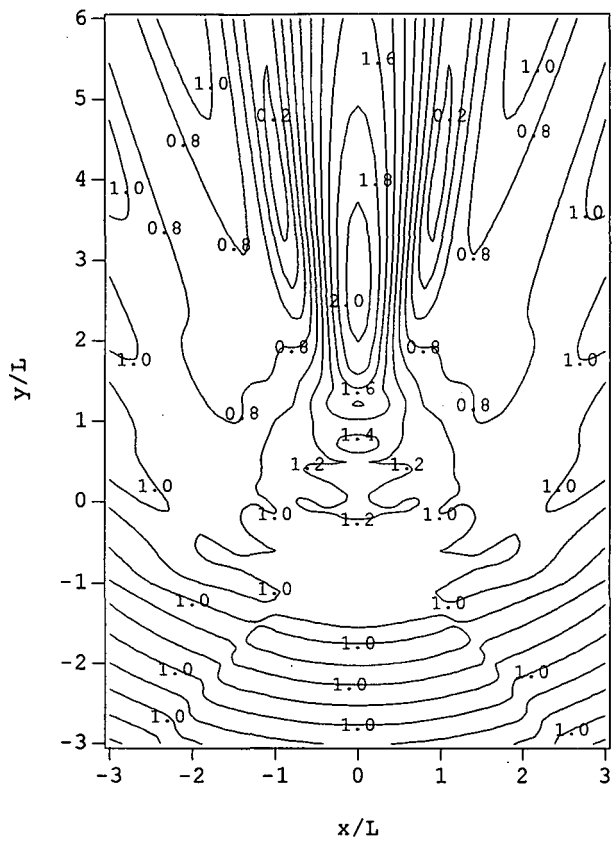


図-6 5段階の棚型水深変化を用いたときの結果

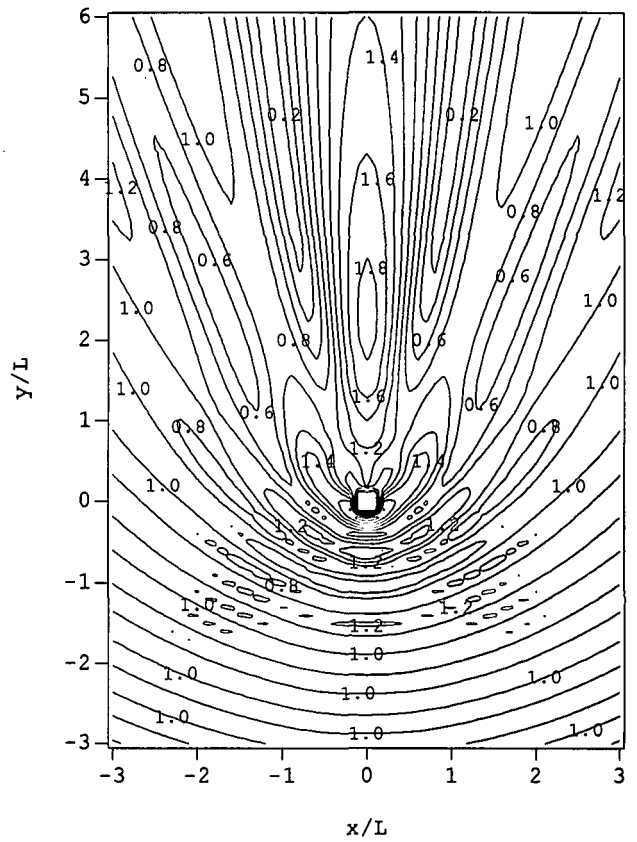


図-7 浅瀬頂部に円筒構造物を設けた場合

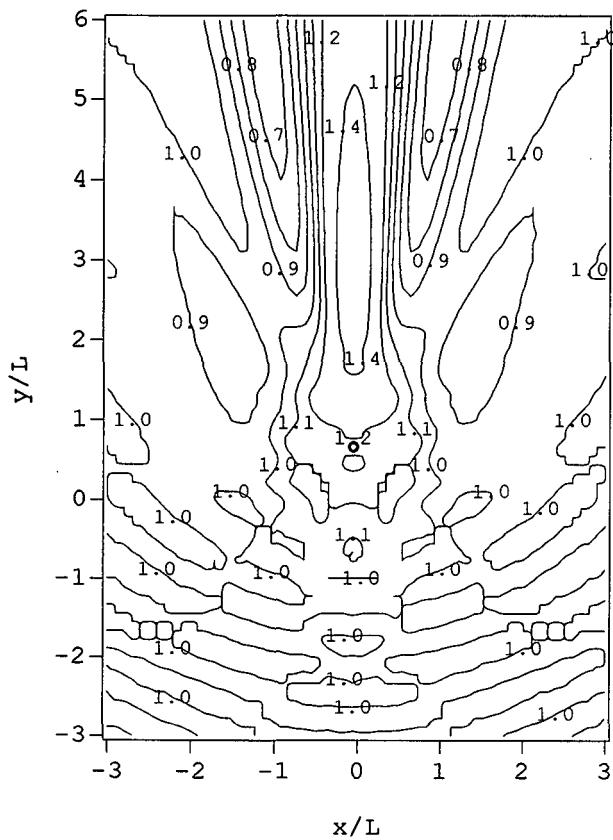


図-8 多方向不規則波に対する波高比の分布  
( $T1/3=5.1s$ ,  $S_{max}=70$ )

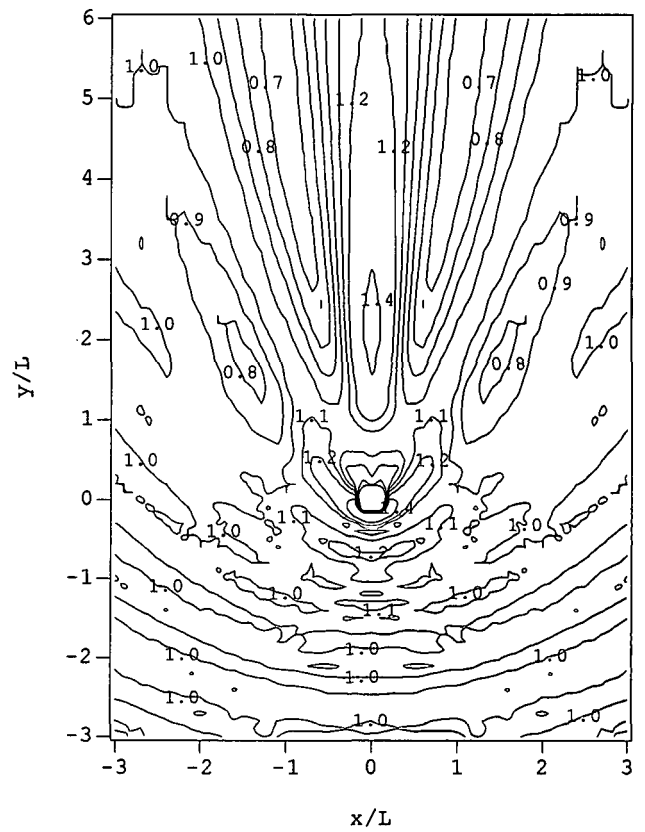


図-9 多方向不規則波に対する波高比の分布  
頂部に円筒構造物あり( $T1/3=5.1s$ ,  $S_{max}=70$ )

算定では、円筒構造物は直立型を想定して反射率を0.9に設定した。なお、水深変化は図-2の場合と同様に7段階変化としてある。図-7と前出の図-2との比較から、頂部に円筒構造物を設けると、反射波の影響により円筒構造物前面の波高が増大することや、その遮蔽効果により、逆に背後側では波高は低下することなどが確認できる。

## 6. 多方向不規則波に対する検討

図-8, 9は、成分波の線形重ね合わせを仮定する合田<sup>5)</sup>の方法論を用いて多方向不規則波に対する球面浅瀬上の波高分布を算定した結果を示す。

このとき、周波数スペクトルの代表周波数への分割数は5、各周波数のエネルギーの方向分割数は7とした。なお、図-9は、図-7の場合と同様に浅瀬頂部に円筒構造物を設けたときの結果に相当する。

これらの算定結果と前出の規則波の場合の結果を比較すると、既に合田ら<sup>6)</sup>により指摘されているように、多方向不規則波では、各種の波向きおよび周波数の成分波を含むことから、波高比は空間的に平滑化され、規則波のように変化が大きく現れない。

ただし、エネルギー平衡方程式による合田ら<sup>6)</sup>の結果に比較すると本算定では回折効果が正確に取り込まれていることから、波高比の空間変化は本算定の方が合田らによるものより、大きく現れる傾向にあることを確認しており、ここに付記しておく。

最後に、円筒構造物のある図-9に着目すると、やはり、円筒構造物の存在により、浅瀬前面海域では波高は増大し、背後域では低下することが確認できる。

## 7. 結語

(1) 球面浅瀬上の波高分布は、鉛直線グリーン関

数法と領域分割法を結合した解析法を用いてほぼ推定できる。このとき、球面浅瀬を棚型水深変化に近似する必要があり、その代表水深は沖波に対する各水深領域の波速比の変化が0.1程度となるように選定すると比較的正確な波高分布の予測が可能になる。

(2) 球面浅瀬の最浅部に円筒構造物を設けると、設けない場合に比較して、特に構造物の沖合側の波高は増大し、屈折現象で高波高を示していた背後側の波高は減少する傾向にある。

(3) 多方向不規則波に対する球面浅瀬まわりの波高変化は、規則波にたいするそれに比較すると、比較的緩やかなものになる。また、屈折現象に加えて回折現象も考慮すると、屈折現象のみを考慮して平滑化する結果よりも波高変化は増大する。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：海岸波動，520p，1994.
- 2) 中村孝幸・加藤孝輔・森田知志(1997)：鉛直線グリーン関数法による水深変化を伴う港湾域の波高分布の算定法，海岸工学論文集，第44巻，pp.106-110.
- 3) Isaacson, M. Q.(1978)：Vertical cylinder of arbitrary section in waves, Jour. of Waterways, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol.104, No. WW4, pp.309-322
- 4) 伊藤喜行・谷本勝利・山本庄一：波向線交差領域における波高分布，港湾技術研究所報告，第3号，pp.87-109, 1972.
- 5) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.9-84, 1977.
- 6) 合田良實・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技術研究所資料，No.230, 45p, 1975.