長周期波の観測と解析

——回折効果と港口損失効果——

福手　勤*　・片平和夫**・松井　創***
鈴木慎也****・遠藤敏雄*****

1. はじめに

外洋に面した堀込港湾等では，外洋から侵入した長周期波により副振動が生じることがあり，港湾計画の策定や港湾管理上配慮すべき事項となっている．このため，当所では副振動の現地観測及び数値解析手法の開発を進めており，前々報[1]では港内を等水深と仮定した Jiin-Jen Lee の副振動解析手法について，前報[2]では水深変化を考慮できる Mattioli の副振動解析手法について適用性を検討した．その結果，共振周期については現地観測値を良く説明できることが分かった．今回は長周期波の防波堤等による回折効果と港口部におけるエネルギー損失を考慮できる数値解析手法を作成し，共振周期だけでなく増幅率についても現地観測と数値解析を対応させることを目的とした．

2. 数値解析手法の改良及び検証

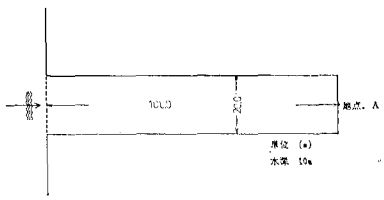
Mattioli の手法を用いた港内副振動解析プログラムに，外洋領域の地形効果による回折波の影響と港口損失の効果を考慮できるようにプログラムの改良を行い，典型的なモデルにより検証計算を行った．

基礎方程式は長波近似できるものと仮定し，港内の水深変化が考慮できる二次元 Helmholtz 方程式としている．解析手法は外洋部では基礎方程式を満足し防波堤や半島などによる地形効果によって生じる回折波を表現することが可能なグリーン関数を用い，港湾内では水深変化を考慮した基礎方程式を満足するグリーン関数を用いた積分方程式を数値解析した．港口損失については，損失項が流速の自乗に比例した非線形計算であるため，ニュートンラプソン法を用いた収束計算を行い港口部のエネルギー損失を評価した．

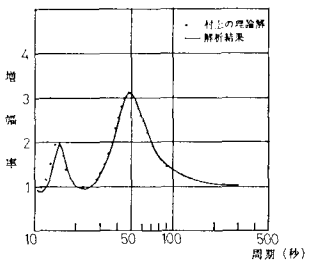
(1) 港口損失の検証

矩形モデル及び同じ矩形モデルの港口部に防波堤のあるモデルの2ケースについて村上の理論解[3]と比較し，港口損失の検証を行った．

a) 矩形モデル　図—1 に示す矩形モデルを用い港口損失係数 f_0 を 1.5 とした場合の湾奥での増幅率を村上の理論解と比較し図—2 に示す．この結果を見ると解析の結果得られた増幅率は，理論解と良く一致している．

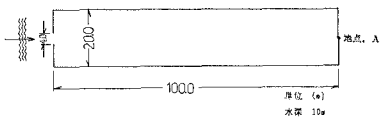


図—1 矩形モデル



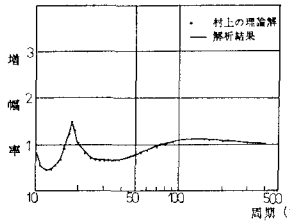
図—2 村上の理論解と解析結果の比較

b) 港口部に防波堤のある矩形モデル　図—3 に示すような，港口部に防波堤のあるモデルを用いて港口損失の検証を行った．港口損失係数 f_0 はこのケースも 1.5

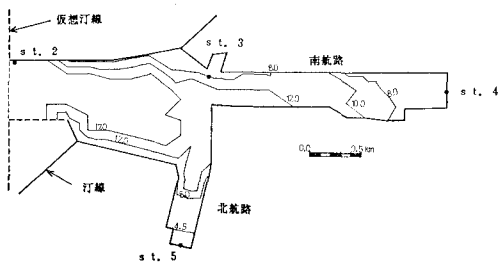


図—3 港口部に防波堤のある矩形モデル

* 正会員　運輸省第二港湾建設局　横浜調査設計事務所次長
**　運輸省第二港湾建設局　横浜調査設計事務所調査課長
*** 正会員　運輸省第二港湾建設局　横浜調査設計事務所検査係長
**** 正会員　運輸省港湾局技術課　技術基準第一係長
*****　運輸省第二港湾建設局　横浜調査設計事務所運輸技官



図—4　村上の理論解と解析結果の比較
（港口部防波堤のある場合）

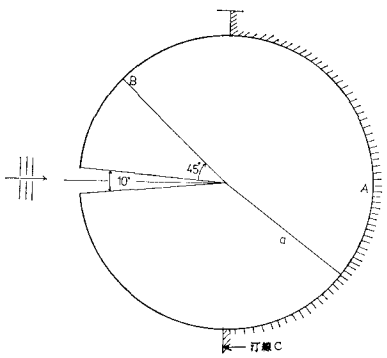


図—7　解析領域及び水深図（仙台新港）

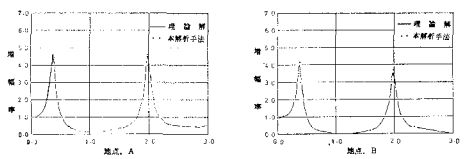
とした．結果を村上の理論解と比較し図—4に示す．このモデルでも解析結果は理論解と良く一致している．

（2）　外洋領域の地形効果（回折波の影響）の検証

図—5に示すような，汀線を対称軸とし防波堤が外洋に突き出ている円形湾を用い，回折波の影響について検証計算を行った．湾奥地点における増幅率を C.C. MEI の理論解[4]と比較し図—6に示す．結果は理論解と良く一致しており，回折波の影響についても検証が行えたと言える．



図—5　円形湾モデル



図—6　C.C. MEI の理論解と解析結果の比較

3.　現地港湾への適用

仙台新港，大船渡湾，鹿島港，長崎湾において本解析手法を適用した．実地形からみて大船渡湾，長崎湾は外洋部における地形効果は少ないと考えられるため，回折波の影響は考慮せず港口部損失のみ考えた．

（1）　仙 台 新 港

仙台新港は松島湾の南に位置する堀込港湾で，外洋に南防波堤が突き出ているため，回折波の影響を受け易いと考えられる．図—7に回折波を考慮しない場合とする場合の解析領域と水深を示す．回折波を考慮しない場合は仮想汀線を，考慮する場合は実際の汀線を用いる．なお，両ケースとも港口損失係数 f_c は 1.5 とした．

観測は昭和56年から57年にかけての6箇月間行われており，入射波は56年12月20日観測値のパワースペクトルから各周期毎の成分波高を計算して用いた．また，回折効果を調べるため，波向は南防波堤に平行とした場合及び汀線に直角とした場合の2ケースとした．

図—8に st. 4 及び st. 5 における56年12月の観測値及び回折波の影響を考慮した場合としない場合の解析結果を示す．

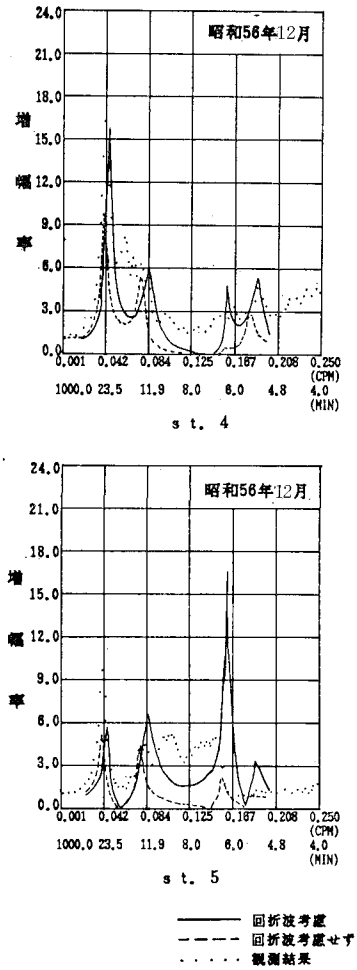
全般に，回折波の影響を考慮した場合の方が共振周期がやや短周期側にずれている．これは，回折波の影響を考慮しない場合南防波堤の先端を通る仮想汀線を設定するため，実際の湾より長い湾で計算していることによると考えられる．

次に各観測点での観測値と解析結果を比較する．st. 4 での最も長周期の共振周期（22分前後）に注目すると，これは港口から南航路に沿う1次の副振動と考えられるが，回折波の影響を考慮した場合の方が観測された増幅率と良く合っている．これは，開口部の形状が実際の地形をより良く再現しているためと考えられる．st. 5 の6分前後の共振周期に注目すると，計算では 20 倍前後の増幅率が見られるが，観測値では5倍前後となっている．これは北航路独自の局所的な1次の副振動と考えられ，計算では北航路の分岐点でのエネルギー損失を考慮していないためであると考えられる．

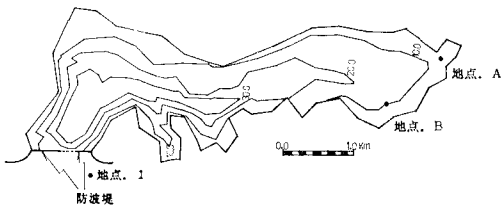
なお，港口部損失の有無による差は殆んど見られなかった．これについては入射波高が小さいためと考えられる．

（2）　大 船 渡 湾

大船渡湾は陸中海岸にあるリアス式の湾であり，湾口部に防波堤が設置されている．本報では港口損失による差をみるため，湾口部に防波堤がある場合とない場合の2ケースについて解析した．図—9に解析領域と水深を



図—8　計算結果と観測値の比較
（仙台新港，波向は南防波堤に平行）

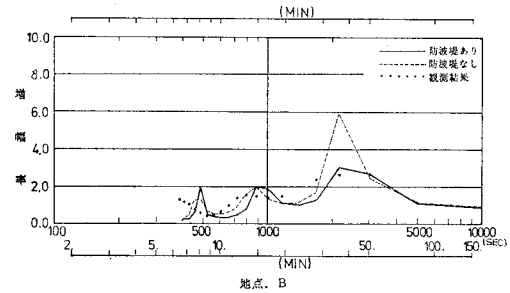


図—9　解析領域と水深図（大船渡湾）

示す．

大船渡湾では昭和53年宮城県沖地震津波の港内外での観測値が得られており，入射波は地点1での観測値をもとにした．**図—10** に観測値及び防波堤のある場合とない場合の計算結果を示す．なお，波向は湾口に直角とした．

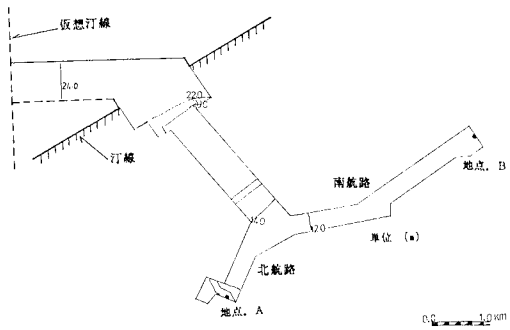
図—10 の計算結果をみると，防波堤を考慮した場合は観測値をよく再現している．また，防波堤の設置により，35分前後に見られる1次の共振周期の増幅率は6倍から3倍程度と半分に抑えられており，湾口防波堤の効果が大きいことがわかる．



図—10　計算結果と観測値（大船渡湾，地点 B）

（3）鹿島港

鹿島港は鹿島灘に面した掘込港湾で，外洋に大きく防波堤が突き出ており，回折波の影響が大きい地形であると考えられる．**図—11** に解析領域と水深図を示す．

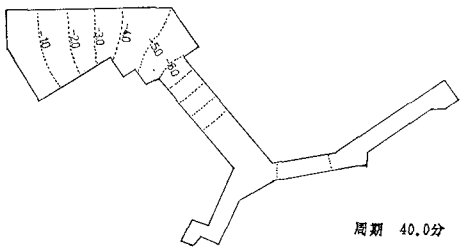


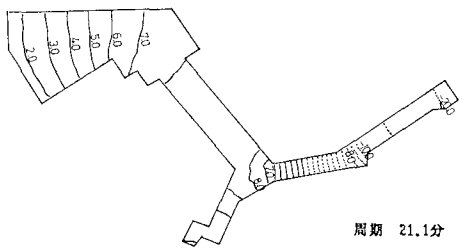
図—11　解析領域と水深図（鹿島港）

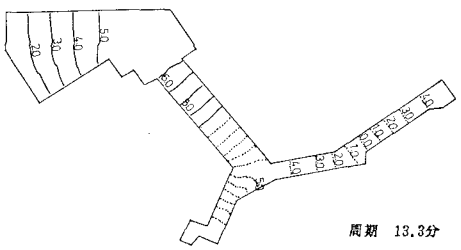
観測は汀線より 2km 沖合地点と地点Bにおいて行われており，入射波高は外洋での観測値をもとにした．波向は南防波堤に平行とし，回折波の影響を考慮しない場合とした場合の2ケースについて解析した．**図—12** に回折波を考慮した場合の振動モード図，**図—13** に解析結果と観測値を示す．

解析結果について見ると，回折波の影響を考慮した場合は考慮しない場合に比べて副振動の発生周期がすべて短周期寄りになっている．これは仙台新港の項で述べたのと同じ理由によると考えられる．

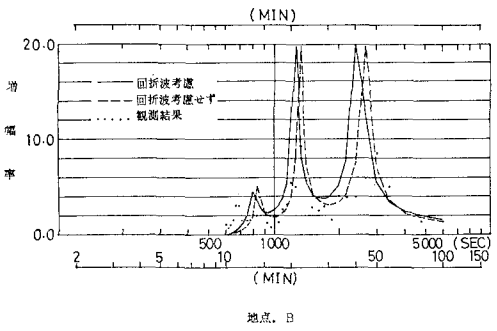
また，観測値と比較すると，共振周期は計算値の方が短周期側であり，回折効果を考慮した場合の方がずれ方が大きい．これは港口部付近の波の節が計算結果より更に沖側にあるためと考えられ，計算上の港口部を更に沖合にする必要があると考えられる．また，増幅率については常に計算値の方が観測値よりも大きくなっている







図—12　振動モード図（鹿島港）



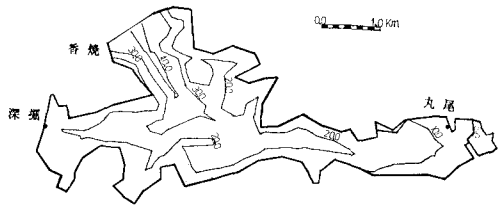
図—13　計算結果と観測値（鹿島港，地点 B）

が，これは計算では入射波の波向を港内で最大の波高が生じる様な波向としていること，及び北・南西航路の分岐点でのエネルギー損失を計算では考慮していないことによるものと考えられる．

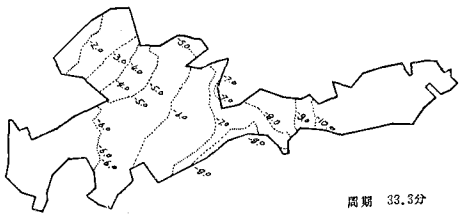
（4）長崎港

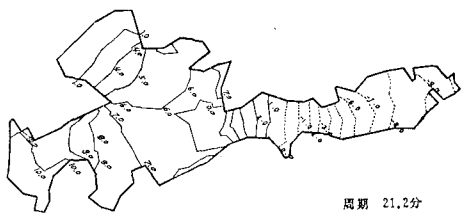
長崎湾は東シナ海に面したリアス式湾で長周期波による副振動が生じ易い形状をしている．**図—14** に解析領域と水深図を示す．

入射波は港口部に位置する香焼で観測されたパワースペクトルをもとにし，波向は湾口に直角とした．**図—15**

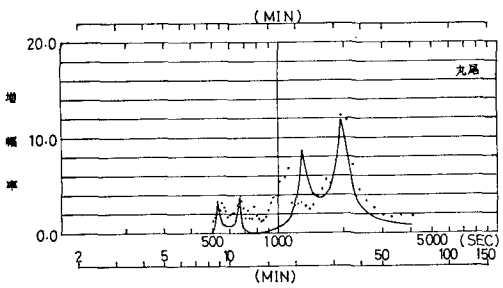


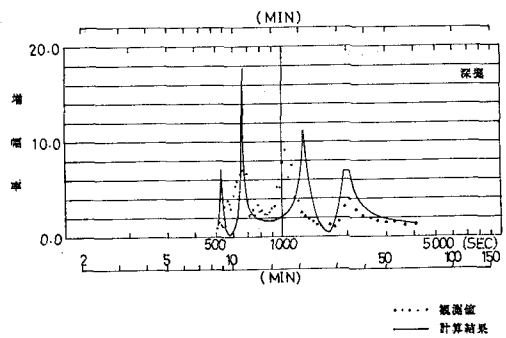
図—14　解析領域と水深図（長崎湾）





図—15　振動モード図（長崎湾）





図—16　計算結果と観測値（長崎湾）

に振動モード図，**図—16** に計算結果と観測値を示す．丸尾地点については増幅率は観測値と良く合っている．また，**図—16** から分かる様に，20 分前後にみられる共振周期（これは **図—15** の振動モード図から丸尾・深堀地点間の1次の振動モードと考えられる）が観測値より長周期側にずれている他は，共振周期についても観測値と良く合っている．20 分前後の共振周期のずれは実際の湾では湾口損失により計算上の湾の長さよりも短い湾での応答が生じているためとも考えられる．

深堀地点については殆んどの副振動周期において観測値より大きな増幅率となっているが，これは深堀地点付近の地形から，計算では考慮していない局所的な湾口損失が生じているためと考えられる．

4. 結　　語

本稿では，前稿[2]で検討した任意形状，不等水深の湾に適用できる Mattioli の手法に対して，防波堤等の外洋領域の地形効果による回折波の影響及び港口部におけるエネルギー損失を考慮できる様にプログラムの改良を行い現地港湾への適用性を検討した．その結果，以下の事項が明らかとなった．

（1） 外洋領域の地形効果による回折波の影響を考慮することにより，地形のモデル化がより現実的なものとなり，低次の共振モードについては共振周期・増幅率とも観測値に近い値が得られることがわかった．

（2） 外洋から侵入する長周期波の波高が比較的大きい場合は，港口部のエネルギー損失を考慮した数値解析によると，増幅率は観測値と良く一致した．

（3） 湾内に航路の分岐等の局所的な地形変化が存在する場合，増幅率の計算値が観測値より数倍大きくなる傾向があるため，この様な場合は局所的なエネルギー損失を考慮することが必要であることがわかった．

参 考 文 献

1) 山田尚人・山本修司・細川泰広・後藤　寿：長周期波の観測と解析について，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 178～182, 1982.
2) 廣本文泰・福手　勤・鈴木慎也・後藤　寿：長周期波の観測と解析，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 138～142, 1983.
3) 村上仁士・野口英二：湾水振動における防波堤開口部のエネルギー損失について，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 416～421, 1976.
4) C. C. MEI: Wave in a harbor with protruding breakwaters, Journal of the Waterways and Harbor Division, WW2, pp. 209～229, 1973.
5) 大村哲夫・福代倫男・蒔田靖紀・森谷誠生：長周期波の観測と解析について (1)，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 49～53, 1981.
6) J. J. Lee: Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, Jour. of Fluid Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 375～394, 1971.
7) F. Mattioli: Wave-induced oscillations in harbours of variable depth, Computers and Fluids, Vol. 6, pp. 161～172, 1978.
8) F. Mattioli and S. Tinti: Wave-induced oscillations in large-mouthed harbours, NUOVO CIMENTO, Vol. 1C, No. 1, pp. 18～30, 1978.