ＩＳＳＮ１３４６－７８３２

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所報告

REPORT OF THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

VOL.59 No.1 June 2020

NAGASE,YOKOSUKA,JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総　目　次

1. 浅海域における海水中二酸化炭素分圧の観測と統計解析モデルの適用…… 3

2. 潜堤による港内波の制御に関する基礎的研究…… 66

港湾空港技術研究所報告
第 59 巻第 1 号(2020.6)

潜堤による港内波の制御に関する基礎的研究

平山　克也*・濱野　有貴**・長沼　淳也***

要　旨

地震・津波等により被災し水没した防波堤に残存する防波性能を把握することは，暫定利用する港湾の安全性や事前嵩上げの要否等を評価する上で極めて重要である．また，これと同様な水理特性を有する潜堤は水面付近の波力を直接受けずに波の分裂による伝達波の短周期化が期待されるため，特にうねりによる荷役障害が懸念される離島港湾などで新たな静穏度対策となり得る．

そこで，本研究では，不透過の矩形潜堤及び透過・不透過の台形潜堤を対象として，様々な波浪条件に対する断面模型実験を系統的に行い，潜堤前後の波高・周期の変化に着目して不規則波の変形特性を把握した．また，代表的な波浪条件での直入射波，斜め波及び多方向波を対象として，不透過の矩形・台形潜堤による平面波浪変形実験を実施した．さらに，ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）を用いてこれらの断面・平面模型実験結果に対する再現計算を行い，その適用性について検証するとともに，離散的にしか得ることのできない潜堤周りの波浪変形実験結果を補完した．なお，急激な水深変化部を有する矩形潜堤周りの波浪変形をも安定に計算できるよう，本研究では合わせて「段差境界処理法」を新たに開発・導入した．加えて，鹿島港外港地区の現況港形及び想定した 2 種類の被災港形における港内静穏度解析を実施し，南防波堤先端付近の未消波区間のケーソンが沈下または消失した場合に残存する波の遮蔽効果及び岸壁での荷役稼働率について検討した．

これらの結果，不透過潜堤では，天端上水深が換算沖波波高の 2 倍程度となる砕波直前の非砕波時に不規則波の有義波周期が潜堤背後で最も顕著に短周期化することが確認された．また，潜堤背後の平面波浪場では波の収れんによる局所的な波高増大が生じるものの，矩形潜堤や多方向波ではこの傾向が弱まることが，段差境界処理法を用いた数値計算の再現性とともに確認された．さらに，沈下ケーソンは潜堤として機能し，波の分裂により背後の比較的広い範囲で伝達波の周期が約 80%に短周期化するとともに，ケーソンが完全に消失すると想定した場合に比べ荷役稼働率が 10%以上高くなることが確認された．

キーワード：潜堤，周期変化，分裂，収れん，段差境界，ブシネスクモデル，港内静穏度

* 海洋研究領域　波浪研究グループ　グループ長
** 海洋研究領域　波浪研究グループ　研究官
*** (前)海洋研究領域　波浪研究グループ　主任研究官

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
電話：046-844-5042　Fax：046-841-3888　E-mail：hirayama@p.mpat.go.jp

Fundamental Study on Harbor Waves Sheltered by Impermeable Submerged Breakwater

Katsuya HIRAYAMA*
Yuuki HAMANO**
Junya NAGANUMA***

Synopsis

Drawing up a business continuity plan (BCP) for a harbor, it may be important to estimate a remained performance of a breakwater which is sunk completely by an earthquake and/or a tsunami attack. In the other view point, an impermeable submerged breakwater may be expected to use as a new countermeasure to control the waves which act structures and are transmitted in a harbor, avoiding influence of wave power near the water surface. In concrete, a period of swell which can strongly affect oscillation of mooring vessels and wave overtopping volume on seawalls would be shortened by the submerged breakwaters. However, the relation between the transmitted wave periods and the conditions of both specific incident waves and structures may be still unknown.

In this study, a series of model experiments in a flume is conducted to realize characteristics of variation of significant heights and periods behind impermeable rectangular/trapezoidal submerged breakwaters. Moreover, numerical simulations are also conducted to reproduce such phenomena by using a Boussinesq-type wave model, which is often applied for harbor tranquility analysis. Here, a newly developed “step boundary technique” is installed to conduct a stable calculation of wave transformation on the submerged breakwaters which have large steps. In addition, the effects of uni-/multi-directional wave refraction on transmitted waves behind impermeable submerged breakwaters are investigated in both model experiments and numerical simulations in experimental and numerical basin. Finally, the harbor tranquility analysis is conducted to estimate cargo handling rates on a berth in cases of the submerged breakwater existing and the offshore breakwater missing.

In case that the top of breakwater has sunk by 2 meters below the sea level, the wave period of transmitted wave of which incident wave height is 1 meter is shortened by about 20% in a relative wide area behind the submerged breakwater due to wave fission. And the submerged breakwaters which can reduce multi-directional waves may allow vessels to be moored in a sheltered area, though a local wave height concentration is occurred by uni-directional wave refraction. In addition, the cargo handling rate in the case of the submerged caisson existing is at least 10% higher than one of the caissons missing because of reduction of wave heights due to breaking, and so on.

Key Words: submerged breakwater, variation of wave period, fission, convergence, step boundary, Boussinesq model, harbor tranquility

* Head of Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
** Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
*** Ex) Senior Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 E-mail : hirayama@p.mpat.go.jp

目　　次

要　旨 …… 66

1. はじめに …… 69

2. 潜堤による断面波浪変形特性 …… 69
2.1　潜堤による不規則波の断面波浪変形実験 …… 69
2.2　台形潜堤による波浪変形の再現計算 …… 73
2.3　矩形潜堤による波浪変形の再現計算 …… 79

3. 潜堤による平面波浪変形特性 …… 83
3.1　潜堤による不規則波の平面波浪変形実験 …… 83
3.2　潜堤周辺における波浪変形の再現計算 …… 85
3.3　没水ケーソン堤に残存する防波性能の評価 …… 89

4. まとめ …… 93

5. おわりに …… 94

謝辞 …… 94
参考文献 …… 94
付録A　段差境界処理法の導入効果に関する検討 …… 95
付録B　潜堤周辺の波浪変形とその再現性 …… 97
付録C　鹿島港における波高比・周期比の平面分布 …… 103

1. はじめに

高潮・高波や地震・津波により防波堤が被災して水没した場合（本研究では没水堤と称する），頻繁に来襲する台風下では，続く高潮・高波に港内が曝されることになる．しかし，このような場合にも完全に流出・飛散しない限りは潜堤として振る舞い，例え砕波に至らずとも波の分裂や部分反射が生じるため，その前後で不規則波の波高及び周期が変化し得る．また，一般に，係留船舶の動揺特性は，波高に加え周期による影響も大きい．したがって，没水堤に残存する防波性能を把握することは，暫定利用する港湾の安全性や防波堤の事前嵩上げの要否，あるいは被災した防波堤に作用する高潮・高波による更なる被害リスクを評価する上で，極めて重要である．

一方，水理特性上は没水堤もその１つと考えられる潜堤は，水面付近の波力を直接受けずに分裂による伝達波の短周期化が期待されるため，特に年間を通じ海洋から直接来襲するうねりによる荷役障害が懸念される離島港湾などで，安定性の確保に要する建設コストを抑制した新たな静穏度対策となり得る．しかし，船舶航行の安全性に対する懸念もあり，潜堤が有する波浪制御機能を港湾に活用することを目的とした検討例はさほど多くない．

ところで，基礎マウンドとケーソンからなる混成堤による波高伝達率は，越波や没水時の分裂・砕波，あるいはマウンドを有さない場合も含む実験式[1)]が与えられている．このとき，越波伝達波の周期は50～80%に低減することが知られている[2)]．一方，小島・井島[3)]は，水深が浅い没水水平版及び矩形潜堤上を不規則波が通過する間に成分波間で非線形干渉が生じ，規則波に比べより効果的に波の分裂が生じることを水理模型実験結果で確認している．しかし，断面2次元での検討に留まっているため，例えば，潜堤による波の屈折が背後の波高・周期の変化に与える影響は未だ十分には明らかにされていない．

そこで本研究では，潜堤背後の断面波浪変形を2章で，潜堤周辺の平面波浪変形を3章で取り扱う．各章とも，まず始めに矩形及び台形潜堤を対象とした断面または平面模型実験を実施して，潜堤による不規則波の波高・周期変化または波高比・周期比の分布を整理することにより，港内波の制御が期待できる波浪条件と潜堤諸元との関係を明らかにする．次に，港内静穏度解析に近年多用される平面2次元ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）[4)]によるこれらの再現計算を行い，潜堤周辺の波浪変形に対する計算精度を検証する．さらに3.3節では，モデル港湾において，沖防波堤の一部ケーソンが没水・消失した港形での静穏度解析を実施し，沖防波堤の被災形態の違いが対象岸壁の荷役稼働率に与える影響について考察する．最後に，4章においてまとめを行う．

2. 潜堤による断面波浪変形特性

ここでは，水没したケーソン堤をイメージした不透過の矩形断面，及び通常の潜堤をイメージした透過・不透過の台形断面を対象として，様々な波浪条件に対する断面模型実験を系統的に行い，潜堤前後の波高・周期の変化に着目して不規則波の変形特性を把握した[5)]．

2.1 潜堤による不規則波の断面波浪変形実験

造波水深 0.6m で一定とした長さ 35m の断面水路の中央やや沖寄りに 6 種類の潜堤断面（縮尺 1/25）を設置し，12 種類の不規則波浪をそれぞれ 2 波群ずつ造波して，潜堤前後の有義波高・周期を計測した．また，潜堤による反射率及び波高伝達率，周期変化率をそれぞれ計測・解析して，波浪条件によるそれらの変化を整理した．

（1） 実験方法

対象とした実験断面の諸元を**図-2.1** に示す．これらは，水没したケーソン堤（矩形断面：断面 1，2）及び傾斜堤（台形断面：断面 3～6）に大別される．また，断面 1～5

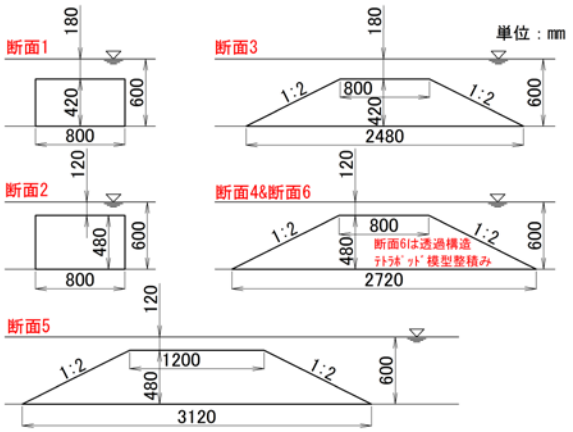


図-2.1 潜堤断面（断面 1～5：不透過，断面 6：透過）

表-2.1 波浪条件（12 種類：H_0'/L_0=0.005～0.040）

T_0 [s]	6.0	7.5	8.5	12.0
L_0 [m]	56.1	87.7	112.7	224.6
H_0' [m]	H_0'/L_0			
0.281	0.005			
0.562	0.010		0.005	
1.125	0.020		0.010	0.005
2.250	0.040		0.020	0.010
3.500		0.040		
4.500			0.040	0.020

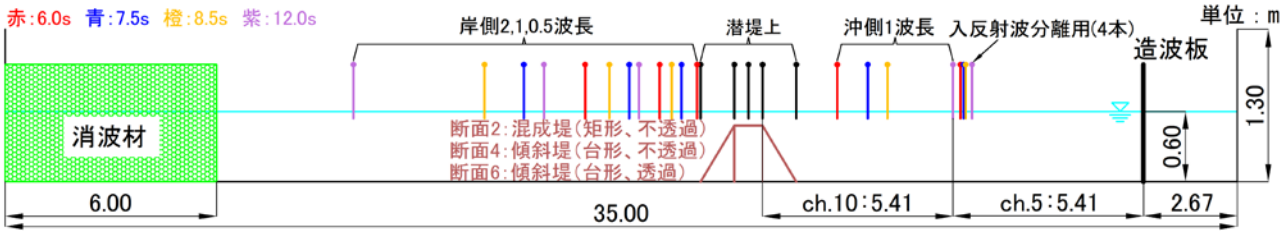
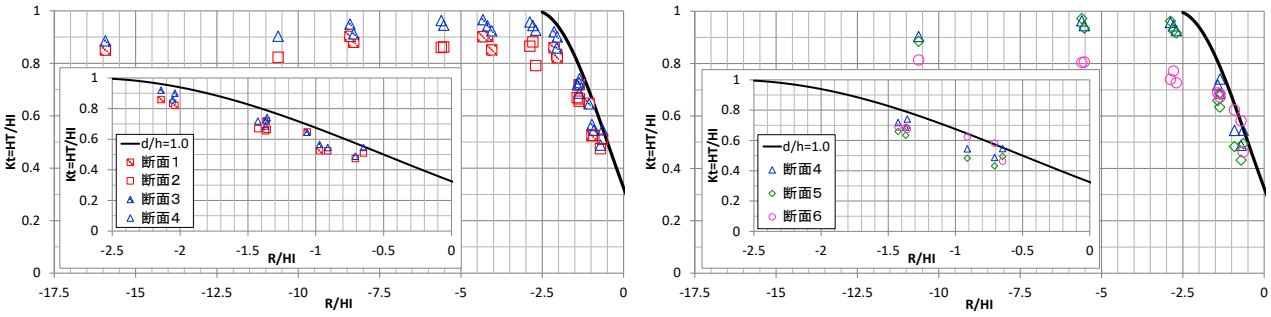


図-2.2　断面模型の設置位置及び水位変動の計測位置（断面 2，4，6 の場合）



(a)　矩形・台形断面の天端高の違い（断面 1～4）　(b)　台形断面における天端高または構造の違い（断面 4～6）

図-2.3　Goda[1)]による波高伝達率の推定式（d/h=1.0）との比較

は不透過構造，断面 6 は透過構造である．なお，断面 6 の寸法は断面 4 と同じである．ここで，台形断面のうち断面 5 は代表例と考えた既往研究 [6)]にならい設定した．また，断面 4 は断面 5 の天端幅を 2/3 に短縮した場合，断面 3 はさらに天端上水深を 1.5 倍に増深した場合である．なお，透過構造とした断面 6 は一般的な潜堤材料とみなした現地 5t 相当のテトラポッドを整積して成形し（空隙率：0.51），波作用による変形を防ぐために目の粗い金網により表面を保護した．一方，矩形断面である断面 1, 2 はそれぞれ断面 3, 4 において前後の法勾配が垂直な場合とした．このように設定した天端幅は現地で施行例の多いケーソン幅 B=20m（断面 5 は B=30m）に対応する．また，天端上水深は設置水深 h=15m に対してそれぞれ h_r=4.5m（断面 1, 3），3.0m（断面 2, 4, 5, 6）である．

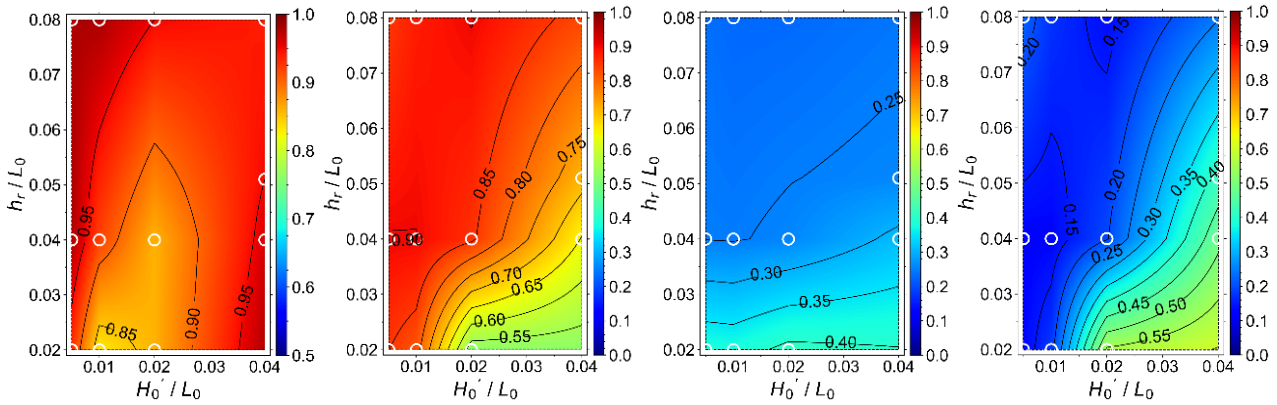
換算沖波諸元は 4 種類の波形勾配 0.005～0.040 に対し 3 種類ずつ（H_0'=0.28～4.5m，T_0=6.0～12.0s）設定し，修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルを用いて造波した．これらの波浪条件を**表-2.1** に示す．模型実験では水路岸側端に繊維状消波材を設置し，入反射波分離解析により検定した波群の異なる 2 種類の造波信号（成分波数 100）を，それぞれ 200 波以上造波した．また，これらの造波周期に対応する沖側 1 波長，岸側 0.5，1，2 波長の位置，及び入射波検定位置に，潜堤上の 5 地点（中央，前後の法肩・法先）を加えた計 25 地点において，水位変動を同時計測した．ただし，法先が法肩と一致する矩形断面における法先地点での計測は台形断面と同様とした．断面毎に異なる計測位置のうち断面 2, 4, 6 の例を**図-2.2** に示す．データサンプリング時間は各造波周期の 1/20 未満となるよう 0.2～0.35s（現地量）とした．

(2)　実験結果

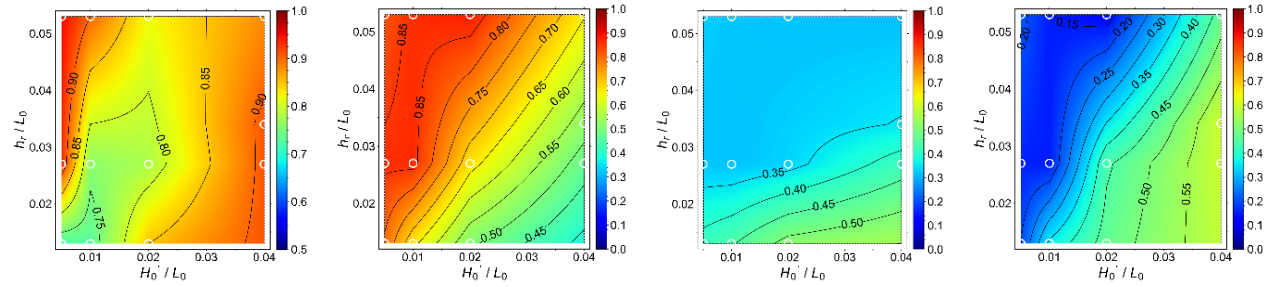
a)　波高伝達率

波群平均した潜堤による波高伝達率 K_T の実験値を，Goda[1)]の推定式と比較した結果を**図-2.3** に示す．ここで，d/h=1 はマウンドなしのケーソン堤（矩形断面）に相当する．また，入射波高 H_I は入反射波分離解析による造波検定で得られたもの，伝達波高 H_T は各波浪条件に対する潜堤岸側法肩から 1 波長及び 2 波長岸側に離れた位置で計測された有義波高の平均値をそれぞれ用いた．さらに，天端高 R= -h_r（h_r は天端上水深）である．

不透過の矩形・台形断面（B=20m）について示した**図-2.3(a)**より，実験値は-2.5 < R/H_I < 0 の範囲においていずれも推定式による値に比べやや過小であるが，推定式が有する±0.1 程度の波高伝達率の推定誤差 [1)]の範囲内である．また，本実験の相対天端幅 B/h=1.3 及び相対水深 h/L=0.11～0.28 はそれぞれ Goda[1)]の実験における値 B/h=0.8～1.1 及び相対水深 h/L=0.07～0.50 とほぼ一致することから，まず妥当な結果と考えられる．なお，矩形・台形断面の違いがほとんど認められないことは，この推定式が不透過の台形断面にもある程度適用できることを示唆している．ただし，R/H_I ≦-2.5 の範囲でも K_T が 1



(a)　断面 1（天端上水深 h_r=4.5m，天端幅 B=20m，不透過構造）



(b)　断面 2（天端上水深 h_r=3.0m，天端幅 B=20m，不透過構造）

図-2.4　矩形断面（左から，周期変化率 T/T_I，波高伝達率 K_T，反射率 K_R，及びエネルギー損失 E_{loss}=1-(K_T^2+K_R^2)））

を下回っている原因は，造波水路の床面及び側面における摩擦に加え，小さな H_I に対しては水の表面張力，さらに矩形断面では不連続部での乱れの影響が考えられる．一方，**図-2.3(b)** より，台形断面の天端幅が断面 4 に比べ 1.5 倍長い断面 5（B/h=2.0）や，断面 4 を透過構造とした断面 6 でも K_T はともに減少するが，これらの違いは，R/H_I< -2.5 に比べ-2.5 < R/H_I< 0 ではさほど有意ではない．

b)　周期伝達率

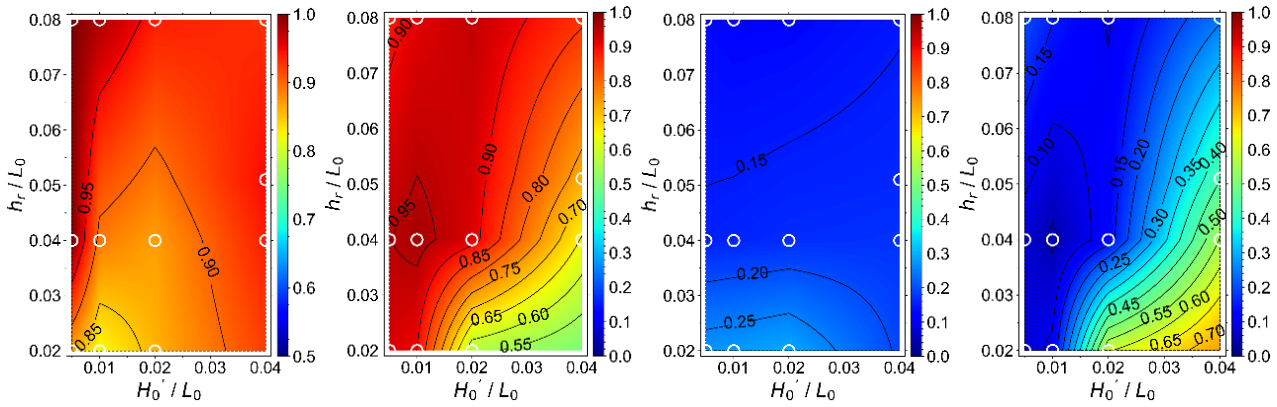
次に，波浪・地形条件に対する周期変化率 T/T_I，波高伝達率 K_T，反射率 K_R，及び波エネルギー損失 E_{loss} の分布を，**図-2.4**（矩形断面）及び**図-2.5**（台形断面）に等値線で示す．ここで，伝達波の周期 T は潜堤岸側法肩から 1 波長岸側の位置で計測された有義波周期とし，入射波周期 T_I は反射率 K_R を算定した入反射波分離解析に用いた 2 本の波高計で計測された有義波周期の平均値とした．エネルギー損失は E_{loss}=1-(K_T^2+K_R^2)として算出した．なお，各図の白丸は各波浪・地形条件で得られた実験値を示し，白丸間はバイリニア法により内挿補間した．

各図の横軸は波形勾配 H_0'/L_0，縦軸は相対天端水深 h_r/L_0 であり，h_r=-R, H_0'≈H_I を踏まえると各図の傾き h_r/H_0' は**図-2.3** の横軸の絶対値にほぼ等しい．したがって，左から 2 番目に示した K_T の図では傾き h_r/H_0'が小さい（-R/H_0'が大きい）ほど K_T が小さくなることが確認できる．また特に，K_R が全体的に小さい台形断面（**図-2.5**）では K_T の分布はそれぞれ E_{loss} の分布によく似ているため，H_T の減少は砕波に伴うエネルギー減衰によるものであることが確認できる．

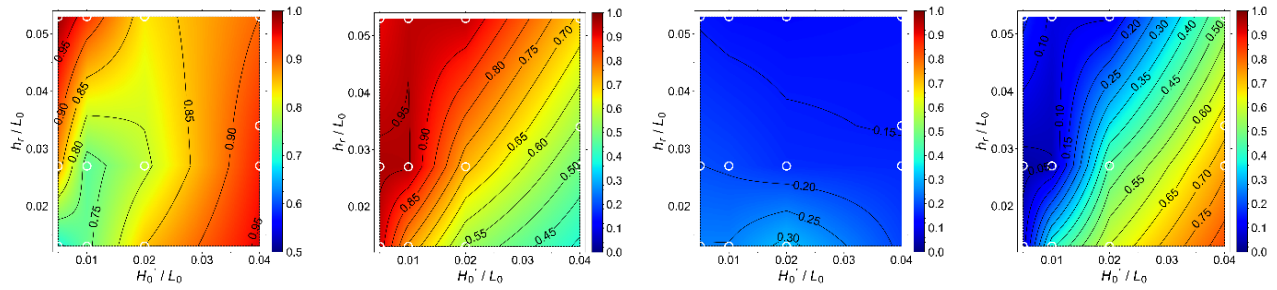
周期変化率 T/T_I は，不透過構造の潜堤では矩形・台形断面の違いによらず，H_0'/L_0，h_r/L_0 がともに小さく，かつ h_r/H_0'=2 程度のとき，顕著な場合では 2 割以上，入射波に比べ伝達波の有義波周期が短くなることが確認できる．また，E_{loss} の分布との比較により，このような短周期化が最も期待されるのは砕波する直前であることがわかる（したがって，このときの K_T はさほど小さくない）．

さらに，台形断面（**図-2.5**）では矩形断面（**図-2.4**）に比べ砕波し難いために，短周期化が生じる波浪・地形条件の範囲が僅かに広がり，天端幅がより広い断面 5 で最も顕著となる．しかし，形状は断面 4 と同じだが透過構造である断面 6 では h_r/H_0'が大きいときにも波浪抵抗が生じ，伝達波の短周期化はほとんどみられなかった．

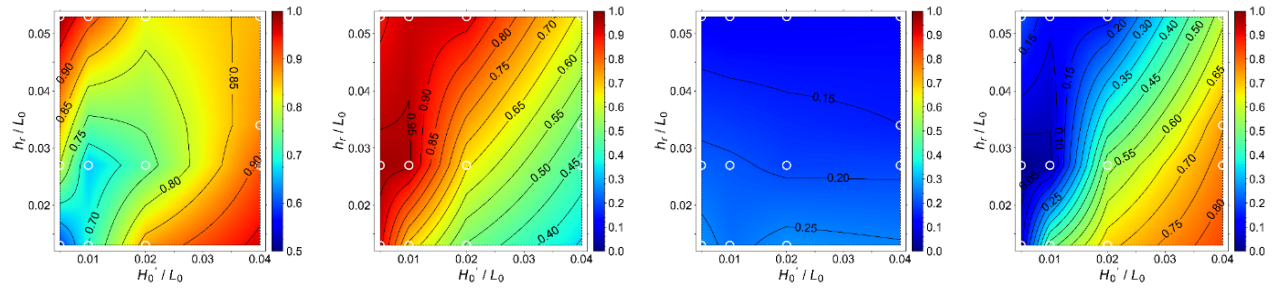
なお，断面 1，2（**図-2.4(a)(b)**）及び断面 3，4（**図-2.5(a)(b)**）はそれぞれ，断面形状が同じ不透過構造で天端水深のみが異なるため，各図の相対天端水深 h_r/L_0 の範囲は部分的に重なっている．しかし，特に T/T_I について，重なっている部分の値は必ずしも一致しないようである．この場合には，H_0'/L_0，h_r/L_0 以外にも，潜堤の



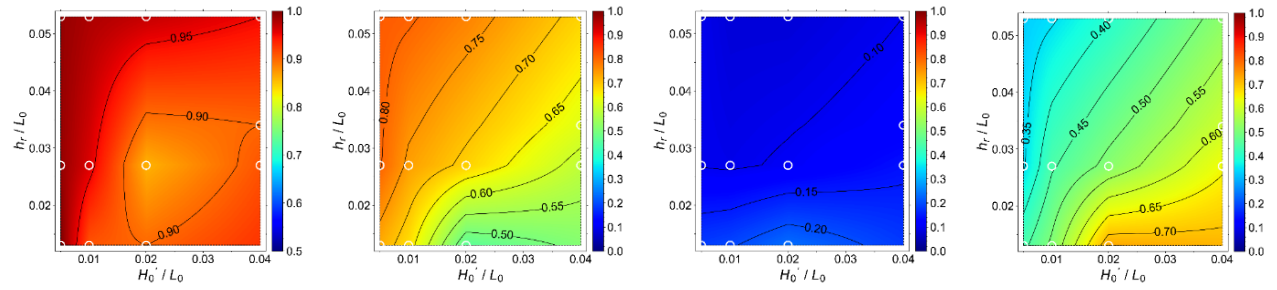
(a)　断面 3（天端上水深 h_r=4.5m，天端幅 B=20m，不透過構造）



(b)　断面 4（天端上水深 h_r=3.0m，天端幅 B=20m，不透過構造）



(c)　断面 5（天端上水深 h_r=3.0m，天端幅 B=30m，不透過構造）



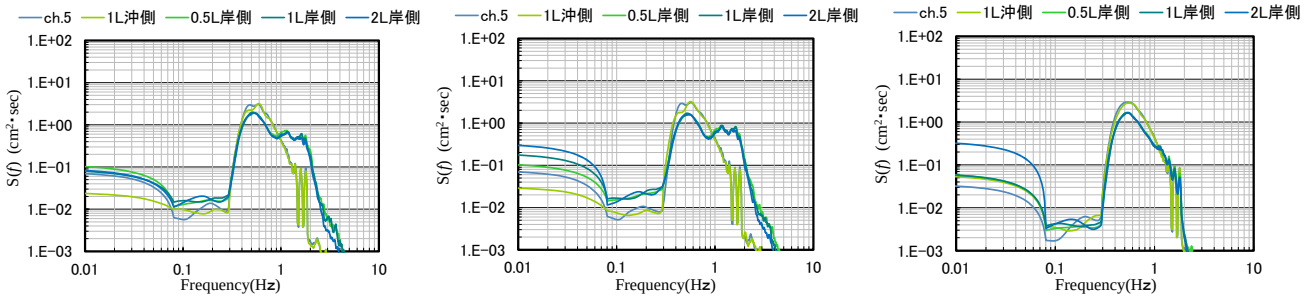
(d)　断面 6（天端上水深 h_r=3.0m，天端幅 B=20m，透過構造）

図−2.5　台形断面（左から，周期変化率 T/T_I，波高伝達率 K_T，反射率 K_R，及びエネルギー損失 E_{loss}=1-(K_T^2+K_R^2)））

相対天端高$(h-h_r)/L_0$ など他のパラメータが関与していることも考えらえるため，本研究ではこれらの各断面での実験結果を 1 つにまとめて図化することは必ずしも適切ではないと判断した．

(3)　潜堤による不規則波の短周期化メカニズム

小島・井島 [3]によれば，没水水平版を通過する規則波が短波長の有義波に変換される現象は，水深の急激な減少による自由表面条件の非線形性によって分裂し，励起された高周波数成分の波の振幅がある大きさに成長することにより生じる．また，不透過な矩形潜堤上を通過する規則波の分裂現象も同様に説明されるが，水平版とは異なり，K_T が顕著に低減する特定の h/L はみられず，h/L の違いが K_T に与える影響は小さいことを示した．なお，榊山 [7]は，水深が浅い地形上で発生する高周波数成



(a) 断面 4（B=20m，不透過） (b) 断面 5（B=30m，不透過） (c) 断面 6（B=20m，透過）

図-2.6 台形潜堤前後での周波数スペクトルの変化（H_0'/L_0=0.010, h_r/L_0=0.027）

分波は拘束波としての性質が強いが，潜堤背後の水深の深い領域にこれらが侵入する際に自由波へエネルギーが移行し，波の分裂が生じることを述べている．

一方，小島・井島 [3]はまた，多くの成分波が重合する不規則波では，水深が浅い版上を通過する間に長周期の波ほど広い範囲で短周期の波との非線形干渉が生じるため，単一成分の波に比べより効果的に波の分裂が生じることを水理実験により明らかにした．したがって，**図-2.4** に示す本実験結果で得られた，不透過な矩形潜堤上を通過する不規則波の分裂現象（有義波周期の短周期化）も水平版と同様に，浅い水深上で生じる成分波間の非線形干渉によって高周波数成分の波の振幅が大きくなり，波の分裂が効率的に生じたものと思われる．ただし，h/L は同じだが天端上水深 h_r が異なる**図-2.4**(a)(b)を見比べると，同じ波浪・地形条件でも T/T_I や K_T，K_R の値は異なることから，前述の通り，これらは h と h_r の関係にも影響を受けることが示唆された．なお，砕波に至っては逆に高次の自由波へのエネルギーの移行が減少し波の分裂が抑制される様子も，本実験結果において小島・井島 [3]の実験結果と同様に確認される．

さらに，台形潜堤上を通過する不規則波の分裂現象（**図-2.5**）のメカニズムも同様に説明され，天端幅が最も広い断面 5 では天端上で生じる成分波間の非線形干渉がより長く発達するため，断面 4 に比べ伝達波の短周期化がより顕著になる．一方，断面 6 では，成分波間の非線形干渉が生じるよりも先に，透過構造による波のエネルギー減衰が生じたものと考えられる．断面 4～6 の前後で得られた周波数スペクトルをそれぞれ**図-2.6** に示す．なお，**図-2.2** に示す ch5 及び 1L 沖側（L は波長）で高周波数側にみられるスペクトル変動は，エネルギー的に 100 等分した成分波の周波数密度が高周波数側で粗くなったためであり，造波信号を同様に作成した他の周期でも出現している．

2.2 台形潜堤による波浪変形の再現計算

台形潜堤を対象とした再現計算は模型量で実施し，造波実験とほぼ同じ位置で水位変動を出力して，各解析結果を実験結果と比較した[5]．なお，再現計算には，Madsen 型のブシネスク方程式を基礎式とし，潜堤による砕波，引き波時の干出・遡上，及び透過構造による波浪抵抗をそれぞれ考慮できる各種境界処理法を備えたブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.2）[4]を用いた．

(1) 計算方法

台形潜堤を対象とした断面4，6に対する全12×2ケースの再現計算に用いた計算条件の一覧を**表-2.2**に示す．ここで，差分計算に用いる格子間隔Δxは，沖波波長の70～110分割程度（造波波長の60～80分割程度）となるよう，**表-2.1**に基づき造波した波の有義波周期に応じ，1.2sでは0.025m，1.5s及び1.7sでは0.050m，2.4sでは0.080mとした．また，差分時間間隔Δtは，計算の安定性を確保するために有義波周期の1/12000とした．さらに，不透過構造の断面4は，これらの天端高を水路床とみなした底面境界，透過構造の断面6は，模型実験で用いた現地5t相当のテトラポッド模型（代表径d=77.2mm）を法面に合わせて整積したときの物理量：代表空隙率λ_0=0.50，層流・乱流抵抗係数α_0, β_0 =2100, 2.2，を透水層モデル[8)9)]に与えて設定した．ここで，水没した透水層上を伝播する波は，潜堤法面からの水面高さに応じて変化する空隙率による波浪抵抗を受けて，透水層内の一様水深上で適宜，変形する．なお，水路岸側端には，断面4，6ともに，周期2.4sの波長5.41m以上となる長さのスポンジ層を設け無反射境界とした．

ところで，水深の急変に伴う計算の不安定化を避けるために行う海底地形のスムージング回数KAISU（**付録**を参照）は，水深一定の断面6はもちろん，台形潜堤により水深が変化する断面4でもKAISU=0（スムージングは行わないこと）を基本とした．ただし，計算の不安定化が避けられなかった断面4のケース⑨ではKAISU=1とし，スム

表-2.2　台形潜堤による波浪変形の再現計算に用いた計算条件（上段：断面 4，下段：断面 6）

NOWT-PARI Ver5.2													
断面4		h/L_0=0.267 h_r/L_0=0.053				h/L_0=0.171 h_r/L_0=0.034	h/L_0=0.133 h_r/L_0=0.027				h/L_0=0.067 h_r/L_0=0.013		
沖波周期	T_0 [s]	1.2				1.5	1.7				2.4		
波形勾配	H_0'/L_0	0.005	0.010	0.020	0.040	0.040	0.005	0.010	0.020	0.040	0.005	0.010	0.020
計算ケース	No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
差分格子間隔	Δx [m]	0.025 (=L_0/90)				0.05 (=L_0/70)	0.05 (=L_0/90)			0.06	0.08 (=L_0/112)		
差分時間間隔	Δt [s]	1E-4 (=T_0/12000)				1.25E-4 (=T_0/12000)	1.42E-4 (=T_0/12000)				2E-4 (=T_0/12000)		
スムージング回数	KAISU	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
発散抑制レベル	LABEL	1	1	1	7	7	1	1	7	7	1	1	7

（備考）LABEL=1：Flux急変部に人工粘性を付与，LABEL=2：暫定水位の空間分布の平滑化，LABEL=4：射流部に人工底面摩擦を付与

NOWT-PARI Ver5.2													
断面6		h/L_0=0.267 h_r/L_0=0.053				h/L_0=0.171 h_r/L_0=0.034	h/L_0=0.133 h_r/L_0=0.027				h/L_0=0.067 h_r/L_0=0.013		
沖波周期	T_0 [s]	1.2				1.5	1.7				2.4		
波形勾配	H_0'/L_0	0.005	0.010	0.020	0.040	0.040	0.005	0.010	0.020	0.040	0.005	0.010	0.020
計算ケース	No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
差分格子間隔	Δx [m]	0.025 (=L_0/90)				0.05 (=L_0/70)	0.05 (=L_0/90)				0.08 (=L_0/112)		
差分時間間隔	Δt [s]	1E-4 (=T_0/12000)				1.25E-4 (=T_0/12000)	1.42E-4 (=T_0/12000)				2E-4 (=T_0/12000)		
スムージング回数	KAISU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
発散抑制レベル	LABEL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

（備考）LABEL=1：Flux急変部に人工粘性を付与，LABEL=2：暫定水位の空間分布の平滑化，LABEL=4：射流部に人工底面摩擦を付与

ージングにより台形潜堤の法先及び法肩を丸める影響が台形断面の形状に及ばない程度に限って実施した．

また，LABELは，計算の発散を抑制する3種類の数値処理を組み合わせた発散抑制レベルを示し，その値は用いた処理番号の和で表される．処理番号1は，空間差分のなかで流量Fluxが急変する箇所に人工粘性を付与し，計算領域の境界付近などでみられる流量Fluxの急激な空間変化を抑える働きを有する．また処理番号2は，計算領域の境界付近を除いて，運動方程式を解くために仮に算定した暫定水位の空間分布を平滑化する．さらに処理番号4は，波による変動流速が限界流速を超えた際に人工底面摩擦を付与し，波の遡上端などでみられる過大な変動流速を低減する働きを有する．すべてのケースでLABEL=1とした断面6では，一時的に付加した人工粘性により，潜堤上での急激な水位低下に伴い有効な全水深が急減することで生じる流量Fluxの急変を緩和し，計算の不安定化を予防している．また，断面4では，このような現象がより頻繁に生じる波高が大きなケース：④⑤⑧⑨⑫で計算が発散したためLABEL=1からLABEL=7へと変更し，潜堤周辺での水位の空間分布の平滑化を陰的に図るとともに，潜堤上で瞬間的に生じる過大な流速を低減している．

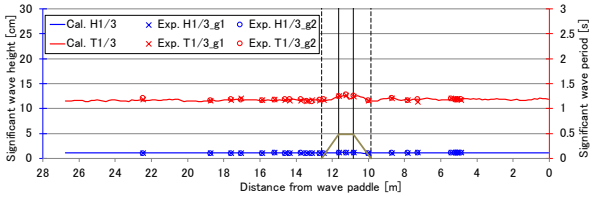
(2)　計算結果

a)　不透過構造の場合（断面4）

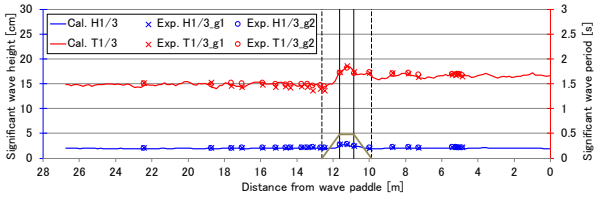
前項のようにして計算された不透過構造の台形潜堤（断面4）に対する有義波高・周期の空間分布を前節で述べた実験と比較した結果を，波形勾配毎に**図-2.7～10**に示す．ここで，各プロット（○×）は実験で計測した各地点での波群毎の時系列波形，実線はブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）による計算で出力した各格子の時系列波形，をそれぞれ波別解析して得た有義値である．

まず，青線及び青プロットで示した潜堤背後の有義波高分布をみると，ブシネスクモデルによる計算結果は，波形勾配及び天端上の相対水深によらず，実験結果と非常によく一致し，台形潜堤による浅水・砕波変形だけでなく，分裂に伴う波高変化をよく再現している．また，潜堤沖側での部分重複波高もよく再現していることから，台形潜堤による波の部分反射も適切に算定されることが確認できる．

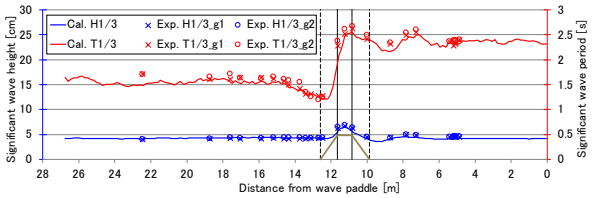
また，赤線及び赤プロットで示した潜堤背後の有義波周期分布をみると，ブシネスクモデルによる計算結果は，砕波の有無により，実験結果に対する再現性の傾向に違いがみられることがわかる．すなわち，天端上の相対水深を波形勾配で除して得られる相対天端高h_r/H_0'が比較的大きい非砕波時（概ね，**図-2.5(b)**の各図の左上半分）には，潜堤前後での波高変化及び分裂による周期変化がともに小さいNo.①，②，⑥（h_r/H_0'=10.4, 5.2），及び分裂による顕著な周期変化が生じるものの波高はさほど変化しないNo.③，⑦，⑩（h_r/H_0'=2.6）において，計算結果は実験結果と非常によく一致している．したがって，台形潜堤背後における波の分裂を含む非砕波時の波高・周期変化は，ブシネスクモデルを用いて適切に算定できることが確認された．



(a) h_r/L_0=0.053 （No.①）

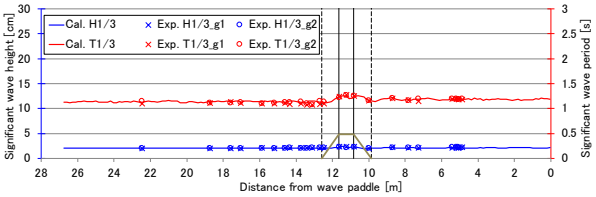


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑥）

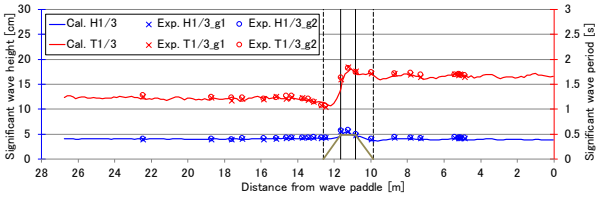


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑩）

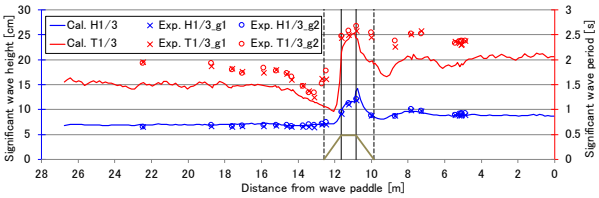
図-2.7　台形潜堤（断面 4）による波浪変形（H_0'/L_0=0.005）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.②）

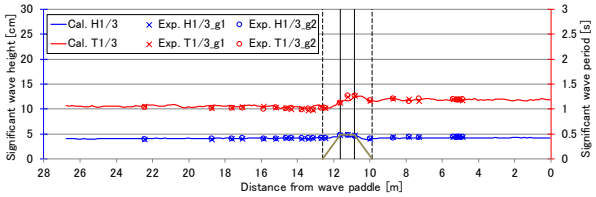


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑦）

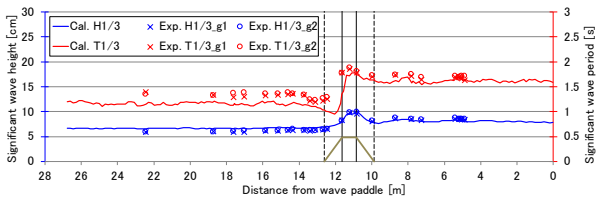


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑪）

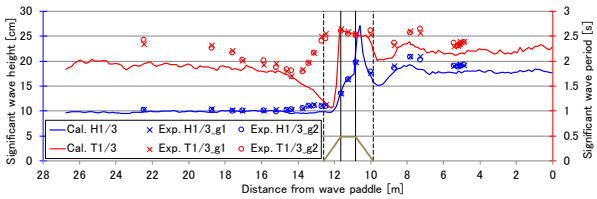
図-2.8　台形潜堤（断面 4）による波浪変形（H_0'/L_0=0.010）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.③）

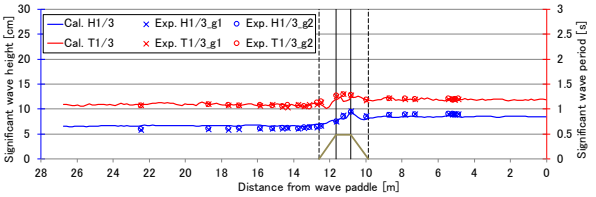


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑧）

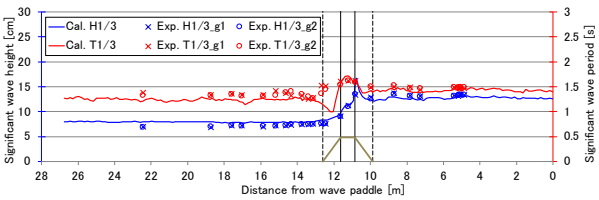


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑫）

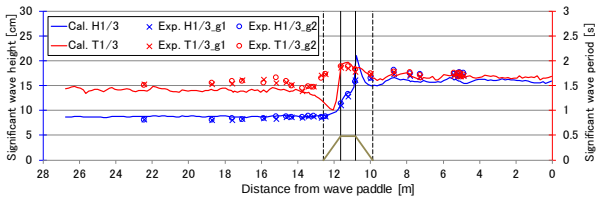
図-2.9　台形潜堤（断面 4）による波浪変形（H_0'/L_0=0.020）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.④）

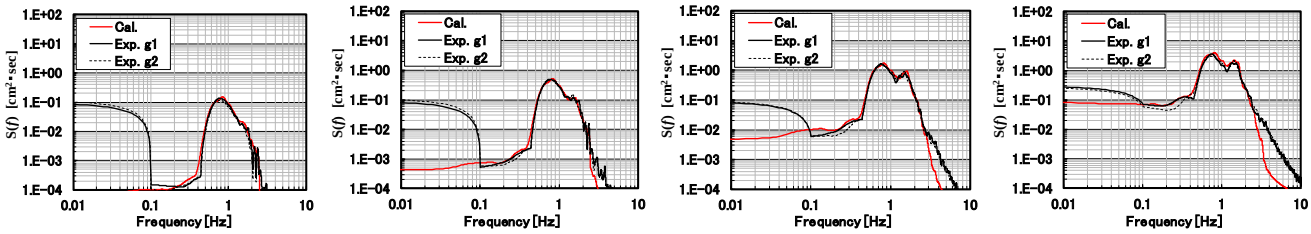


(b) h_r/L_0=0.034 （No.⑤）



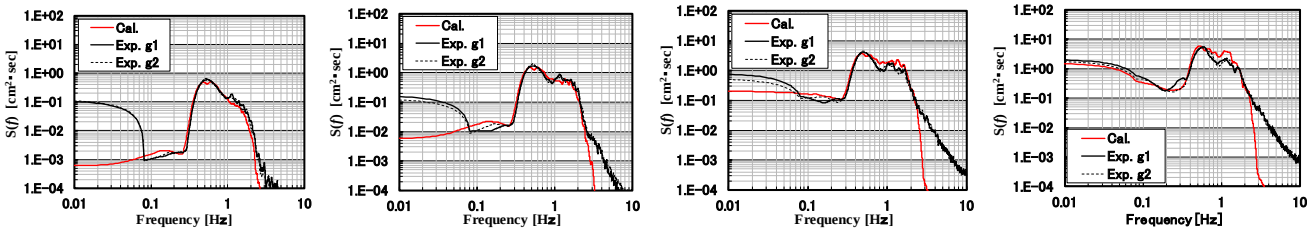
(c) h_r/L_0=0.027 （No.⑨）

図-2.10 台形潜堤（断面 4）による波浪変形（H_0'/L_0=0.040）



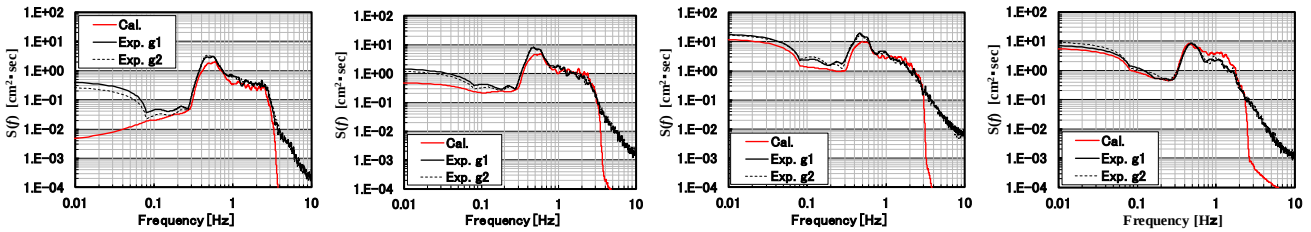
(a)　H_0'/L_0=0.005（No.①）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.②）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.③）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.④）

図-2.11　台形潜堤（不透過：断面 4）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.053：No.①～④）



(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑥）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑦）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑧）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑤）

図-2.12　台形潜堤（不透過：断面 4）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.027：No.⑥～⑧，h_r/L_0=0.034：No.⑤）



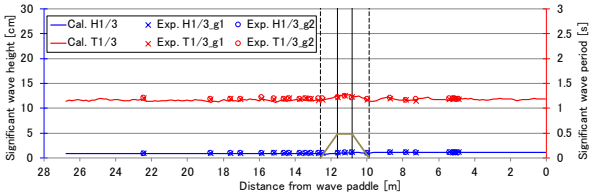
(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑩）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑪）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑫）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑨）

図-2.13　台形潜堤（不透過：断面 4）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.013：No.⑩～⑫，h_r/L_0=0.027：No.⑨）

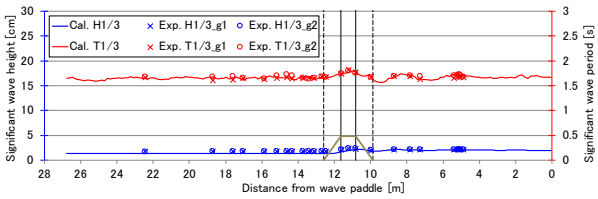
一方，相対天端高h_r/H_0'が比較的小さい砕波時（概ね，**図-2.5(b)**の各図の右下半分）には，分裂による周期変化に加え砕波による波高変化がともに大きいNo.④，⑧，⑪（h_r/H_0'=1.3），及び砕波による波高・周期変化が支配的で潜堤背後での短周期化はみられないNo.⑤，⑨，⑫（h_r/H_0'=0.85，0.65）において，H_0'/L_0が小さく（入射波周期が長く）砕波変形が顕著になるほど，計算結果は実験結果に対し過小となり，特に天端背後での周期変化の再現性に課題が残る．したがって，現行の砕波モデルでは，台形潜堤による波高減衰は適切に算定できるものの，砕波時の周期変化は必ずしも適切に再現されず，砕波による短周期化を過剰に算定する傾向にあることが確認された．

さらに，台形潜堤の0.5波長岸側で計測・計算された周波数スペクトルを比較した結果を**図-2.11～13**に示す．ここで，黒実線及び黒点線は実験で計測した波群毎の時系列波形，赤実線はブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）による計算で出力した時系列波形，をそれぞれFFT解析して得たものである．

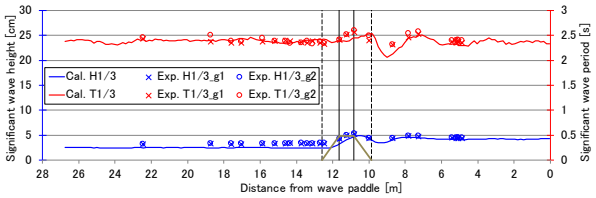
潜堤背後の波高・周期分布の再現性に対応して，相対天端高h_r/H_0'が比較的大きい非砕波時（h_r/H_0'>=2.6）には，分裂による顕著な周期変化が生じる場合も含め，計算で得られたピーク付近の周波数スペクトルは実験結果を非常によく再現している．しかし，相対天端高h_r/H_0'が比較的小さい砕波時（h_r/H_0'<=1.3）には，波の分裂に比べ砕波が支配的になるにつれて，計算で得られたピーク付近の周波数スペクトルのうち短周期波成分のエネルギーについて，実験結果に比べ過大であることが確認された．すなわち，再現計算において砕波による短周期化を過剰に算定する傾向は，砕波モデルにより波エネルギーが減衰する過程において，短周期波成分の波エネルギーが励起されることに起因していると考えられる．



(a) h_r/L_0=0.053 （No.①）

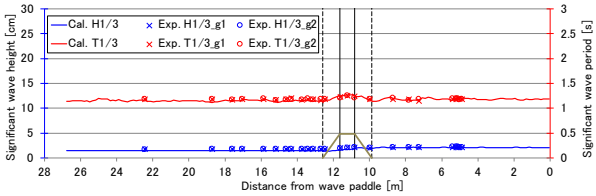


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑥）

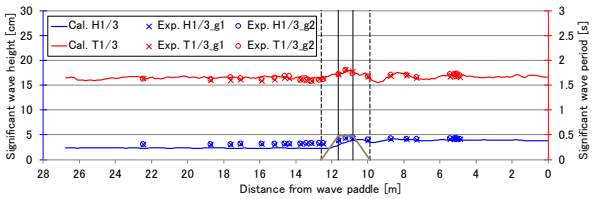


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑩）

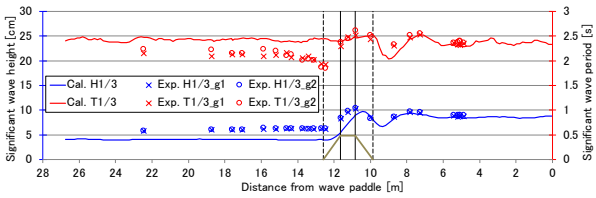
図-2.14 台形潜堤（断面 6）による波浪変形（H_0'/L_0=0.005）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.②）

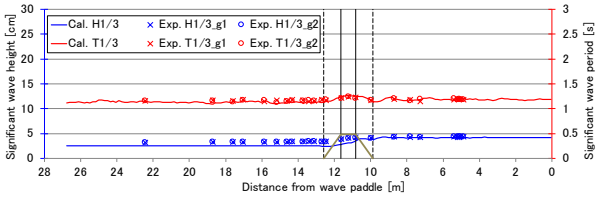


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑦）

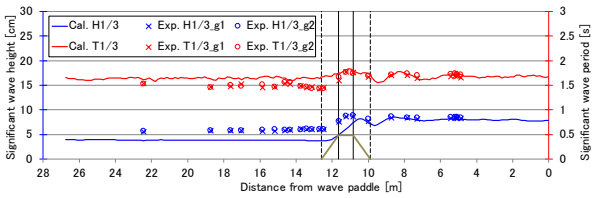


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑪）

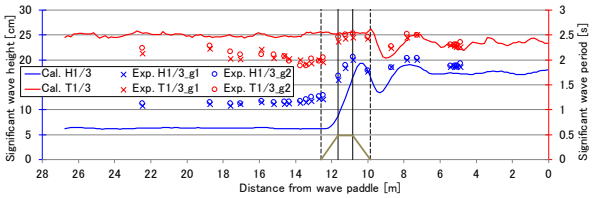
図-2.15 台形潜堤（断面 6）による波浪変形（H_0'/L_0=0.010）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.③）

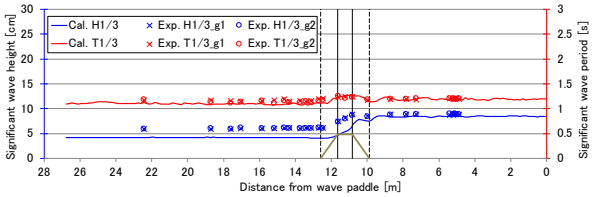


(b) h_r/L_0=0.027 （No.⑧）

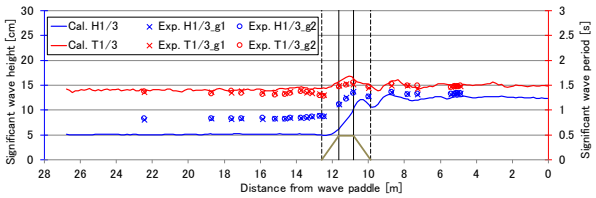


(c) h_r/L_0=0.013 （No.⑫）

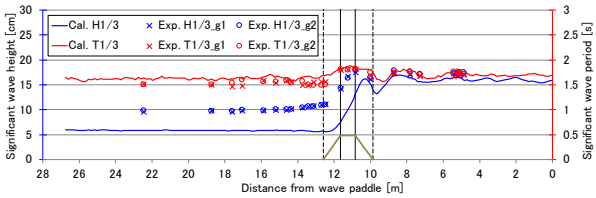
図-2.16 台形潜堤（断面 6）による波浪変形（H_0'/L_0=0.020）



(a) h_r/L_0=0.053 （No.④）

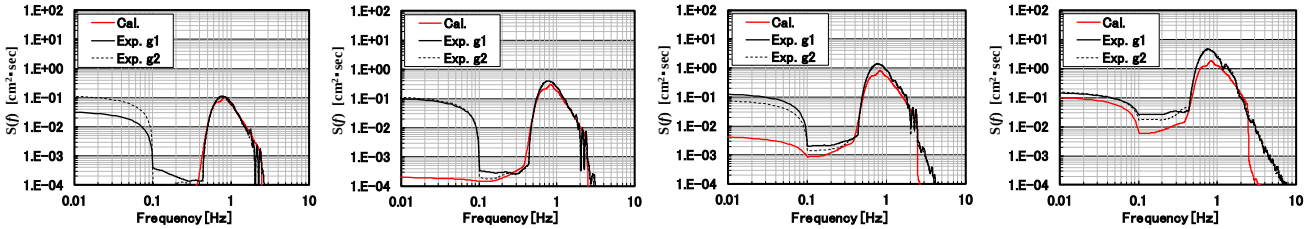


(b) h_r/L_0=0.034 （No.⑤）



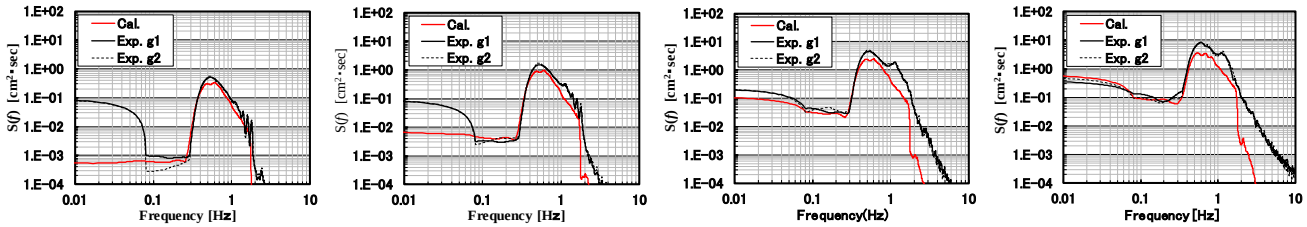
(c) h_r/L_0=0.027 （No.⑨）

図-2.17 台形潜堤（断面 6）による波浪変形（H_0'/L_0=0.040）



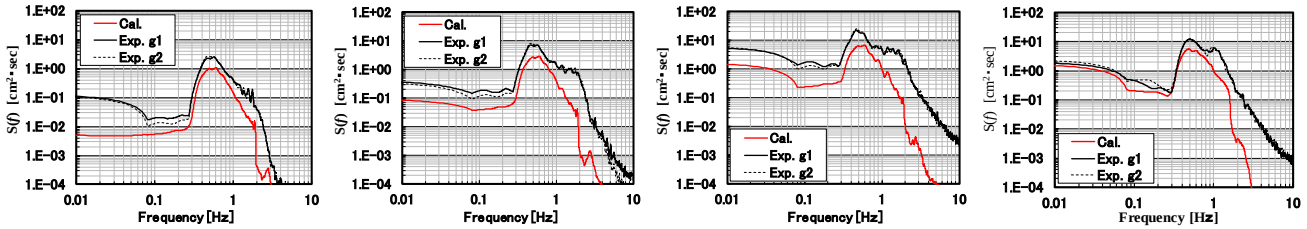
(a)　H_0'/L_0=0.005（No.①）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.②）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.③）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.④）

図-2.18　台形潜堤（不透過：断面 6）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.053：No.①～④）



(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑥）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑦）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑧）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑤）

図-2.19　台形潜堤（不透過：断面 6）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.027：No.⑥～⑧，h_r/L_0=0.034：No.⑤）



(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑩）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑪）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑫）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑨）

図-2.20　台形潜堤（不透過：断面 6）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.013：No.⑩～⑫，h_r/L_0=0.027：No.⑨）

b)　透過構造の場合（断面6）

同様に，透過構造の台形潜堤（断面6）に対する有義波高・周期の空間分布を前節で述べた実験と比較した結果を，波形勾配毎に**図-2.14～17**に示す．ここで，図の凡例は不透過構造の場合（断面4：**図-2.7～10**）と同様である．

青線及び青プロットで示した潜堤背後の有義波高分布をみると，ブシネスクモデルによる計算結果は，相対天端高h_r/H_0'が大きくなるにつれて，実験結果に対し潜堤による波高減衰を過剰に算定していることがわかる．すなわち，相対天端高h_r/H_0'が比較的大きい非砕波時（概ね，**図-2.5(d)**の各図の左上半分）にも，潜堤前後での波高変化が小さいNo.①，②，⑥（h_r/H_0'=10.6, 5.4）から，H_0'/L_0が小さい（入射波周期が長い）ほど有意な波高変化がみられるNo.③，⑦，⑩（h_r/H_0'=2.6）に移るにつれて，実験結果に比べ計算結果が過小となる傾向が伺える．また，相対天端高h_r/H_0'が比較的小さい砕波時（概ね，**図-2.5(d)**の各図の右下半分）には，同様にH_0'/L_0が小さい（入射波周期が長い）ほど波高変化がより顕著となるNo.④，⑧，⑪（h_r/H_0'=1.3）からNo.⑤，⑨，⑫（h_r/H_0'=0.85, 0.65）に移るにつれて，計算結果は実験結果に対し過小となる．田島ほか[10]が指摘しているように，これは，計算に用いたブシネスクモデルが単層モデルであるが故に透水層内の流速を算定できず，透水層によるエネルギー減衰を適切に評価できていない可能性があるためと思われる．したがって，透水層モデルを水没した透過構造物に適用する際には，それらのパラメータを物理量から客観的に設定するだけでは足りず，キャリブレーションを要することが確認された．

また，赤線及び赤プロットで示した潜堤背後の有義波周期分布をみると，ブシネスクモデルによる計算結果は，砕波の有無により，実験結果に対する再現性の傾向に違いがみられることがわかる．すなわち，相対天端高h_r/H_0'

が比較的大きい非砕波時の有義波周期分布を示すNo.①，②，⑥（h_r/H_0'=10.6, 5.4）及びNo.③，⑦，⑩（h_r/H_0'=2.6）では，計算結果は実験結果を比較的よく再現している．しかし，相対天端高h_r/H_0'が比較的小さい砕波時の有義波周期分布を示すNo.④，⑧，⑪（h_r/H_0'=1.3）及びNo.⑤，⑨，⑫（h_r/H_0' =0.85, 0.65）では，H_0'/L_0が小さい（入射波周期が長い）ほど，計算結果は実験結果でみられる砕波による周期変化を再現できていない．したがって，これを改善するためには，（砕波に至る前に）透過構造による波浪抵抗を過大に見積もる透水層パラメータを調整し，台形潜堤による砕波変形を適切に再現する必要があると考えられる．

さらに，台形潜堤の0.5波長岸側で計測・計算された周波数スペクトルを比較した結果を**図-2.18～20**に示す．ここで，これらの図の凡例は不透過構造の場合（断面4：**図-2.11～13**）と同様である．潜堤背後の波高・周期分布の再現性に対応して，相対天端高h_r/H_0'が小さくなるにつれて，計算で得られた周波数スペクトルは周期帯によらず全体的に，実験結果に対し過小になる様子が確認できる．すなわち，実験結果において砕波による周期変化が顕著な場合を除き，再現計算で得られた潜堤背後の波高分布が実験結果に比べて過小となるなかでも周期分布は比較的よく再現された要因は，水没した透過構造を表現した透水層モデルにより，成分波の偏りなく波エネルギー減衰が生じたためであることが確認された．

2.3　矩形潜堤による波浪変形の再現計算

台形潜堤と同様，矩形潜堤を対象とした再現計算は模型量で実施し，模型実験とほぼ同じ位置で水位変動を出力して，各解析結果を実験結果と比較した[11]．なお，再現計算には，矩形潜堤前後の水深急変部での波浪変形を安定に計算するために新たに開発した「段差境界処理法」が導入されたブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2改良版，以下では，改良モデルと称する）を用いた．

(1)　段差境界処理の概要

新たに開発された「段差境界処理法」は，既存の波浪変形計算モデルにおいて基礎式を解く代わりに水深急変部で計算領域を強制的に分断し，この境界間でやりとりする流量 Flux を別途算定して与える境界処理法である．

a)　ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）の改良

本研究で扱うブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）の基礎式とした修正ブシネスク方程式[12]は，波の分散特性に対する近似精度を向上させるために補正項が導入されているが，速度ポテンシャルの級数表示などに緩勾配近似が用いられているため，水深が急変する海底地形上の波浪変形を精度よく記述することができない．そこで，平山・濱野[11]は，隣り合う計算格子間の勾配が法先側の相対水深 h/L_0（h は水深、L_0 は沖波波長）に応じて設定した限界勾配を上回る箇所を「段差境界」と定義し，運動方程式を解く代わりに，この境界間でやりとりする流量 Flux を次項で示す方法により別途算定することとした．ただし，NOWT-PARI Ver5.2 に備わる底面摩擦，砕波減衰，及び層流・乱流抵抗（ただし低次に限る）に関する各差分式は海底勾配の影響を直接受けないため，このときも考慮することとした．この結果，段差境界上の流量 Flux を与える実際の差分式は，後述する式(1)にこれらの項が付加され，基礎式のうちほぼ移流項及び分散項のみが省略された形となる．ここで，本研究の限界勾配は，少なくとも矩形潜堤の堤脚部が「段差境界」となるよう，h/L_0=0 のとき 1，h/L_0=0.1 のとき 2 とし，相対水深に応じて線形に変化させた．なお，水面が低下し矩形潜堤天端が干出した際には，段差境界上の流量 Flux は従来モデルに備わる遡上境界処理により与えられる．

b)　段差境界処理に用いる差分式の導出

図-2.21 に，水深急変部（段差高さΔz）を挟む計算格子間に設定する段差境界を模式的に示す．まず，勾配 $\Delta z/\Delta x$（Δx は差分格子幅）が限界勾配以上のとき，段差境界を挟む各計算格子中央に設けた支配断面間（図の赤枠内）で開水路流れに関する運動量保存則を適用した．次に，連続式及び段上への放射条件を用いて，線形長波の式に段差から受ける圧力項が付加された式を導出した．最後に，これを陽的に差分して，境界上の流量 Flux を計算ステップ毎に算定した．この差分式を式(1)に示す．

$$P_i^{n+1} = P_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left[\begin{array}{c}\left(\eta_{i+1/2}^n - \eta_{i-1/2}^n\right)\left\{g\dfrac{d_{i-1/2}^n + d_{i+1/2}^n}{2} \mp \dfrac{P_i^n|P_i^n|}{d_{i-1/2}^n d_{i+1/2}^n}\right\} \\ \mp\left(h_{i-1/2} - h_{i+1/2}\right)\dfrac{P_i^n|P_i^n|}{d_{i-1/2}^n d_{i+1/2}^n}\end{array}\right] \tag{1}$$

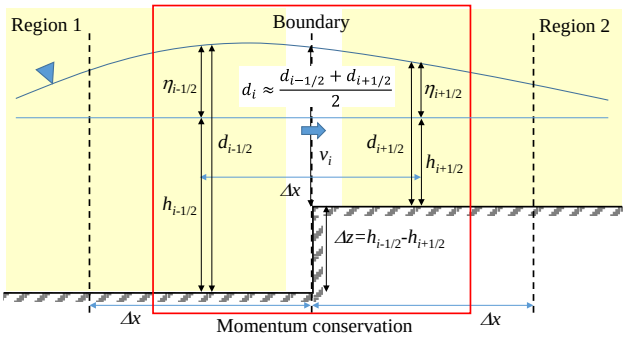


図-2.21　水深急変部（段差）を挟む区間での運動量保存

表-2.3　矩形潜堤による波浪変形の再現計算に用いた計算条件（断面 2）

NOWT-PARI Ver5.2改良版 （改良モデル）														
断面2		h/L_0=0.267 h_r/L_0=0.053				h/L_0=0.171 h_r/L_0=0.034	h/L_0=0.133 h_r/L_0=0.027				h/L_0=0.067 h_r/L_0=0.013		
沖波周期	T_0 [s]	1.2				1.5	1.7				2.4		
波形勾配	H_0'/L_0	0.005	0.010	0.020	0.040	0.040	0.005	0.010	0.020	0.040	0.005	0.010	0.020
計算ケース	No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
差分格子間隔	Δx [m]	0.05 (=L_0/45)				0.05 (=L_0/70)	0.05 (=L_0/90)				0.08 (=L_0/112)		
差分時間間隔	Δt [s]	5E-5 (=T_0/24000)				1E-4 (=T_0/15000)	1E-4 (=T_0/17000)				3E-4 (=T_0/8000)		
スムージング回数	KAISU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
発散抑制レベル	LABEL	5	5	5	1	1	0	0	1	1	0	0	0

（備考）LABEL=1：Flux急変部に人工粘性を付与，LABEL=2：暫定水位の空間分布の平滑化，LABEL=4：射流部に人工底面摩擦を付与

ここに，P：流量 Flux（=v*d，v：代表流速），η：水面変動，h：静水深，d：全水深(=η+h)，g：重力加速度である．また，添え字 n，i はそれぞれ時刻，位置を表す整数であり，Δt，Δx はそれぞれ差分時間間隔，差分格子幅である．Δz は段差高さ(=$h_{i-1/2}$-$h_{i+1/2}$)である．さらに，∓ は，段上がりでは“－”，段落ちでは“＋”とする．

(2)　計算方法

矩形潜堤を対象とした断面2に対する全12ケースの再現計算に用いた計算条件の一覧を**表-2.3**に示す．ここで，差分計算に用いる格子間隔Δxは，沖波波長の45～110分割程度（造波波長の30～80分割程度）となるよう，**表-2.1**に基づき造波した波の有義波周期に応じ，1.2s，1.5s及び1.7sでは0.050m，2.4sでは0.080mとした．また，差分時間間隔Δtは，演算に要する時間を極力短縮しつつ計算の安定性を確保するために，有義波周期の1/8000～1/24000とした．さらに，断面4と同様，不透過構造である断面2の天端高には水路床と同じ底面境界を設定し，水路岸側端には周期2.4sの波長5.41m以上となる長さのスポンジ層を設け，無反射境界とした．

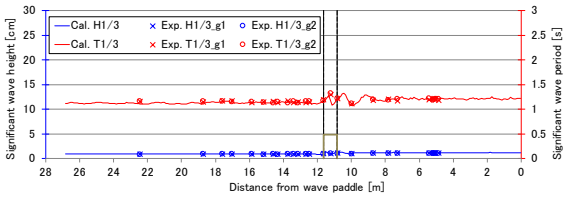
ところで，水深の急変に伴う計算の不安定化を避けるために行う海底地形のスムージング回数KAISUについて，これらの計算はすべて改良モデルを用いて実施したため，矩形潜堤前後の海底地形の平滑化処理は行っていない（KAISU=0）．一方，LABELについて，波高が大きいため計算が発散したケース：④⑤⑧⑨ではLABEL=1とし，一時的に付加した人工粘性が潜堤周辺での流量Fluxの急変を緩和することによる計算の安定化を図った．また，水深が深く波高が小さいケース：①～③ではLABEL=5とし，さらに一時的に付加した大きな人工底面摩擦を用いて，潜堤上で瞬間的に生じる過大な流速を低減する必要があった．この原因は，波の分散性が卓越する相対水深が深い海域から急激に浅くなる潜堤周辺において，波高が小さいほど式(1)で与える段差境界上の流量Fluxが線形に近づき，激しく変化する波の非線形性及び分散特性に追従できなくなるためではないかと考えられる．

(3)　計算結果

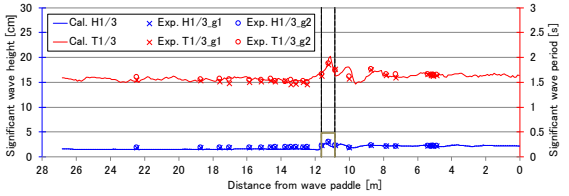
不透過構造の矩形潜堤（断面2）に対する有義波高・周期の空間分布をこれらの実験結果と比較した結果を，波形勾配毎に**図-2.22～25**に示す．ここで，図の凡例は台形潜堤の場合（断面4：**図-2.7～10**，断面6：**図-2.14～17**）と同様である．

青線及び青プロットで示した潜堤前後の有義波高分布をみると，改良モデルによる計算結果は，従来モデル（NOWT-PARI Ver5.2）を用いて実施した不透過構造の台形潜堤（断面4）に対する再現計算と同様，波形勾配及び天端上の相対水深によらず，実験結果を比較的よく再現している．したがって，矩形潜堤の前後に段差境界処理法を適用した改良モデルは，水深急変による計算の不安定化を防ぎつつ，矩形潜堤による砕波や分裂に伴う波高変化を計算できることが確認された．また，潜堤沖側での部分重複波高もよく再現していることから，矩形潜堤前後での波の透過と反射も適切に算定されている．

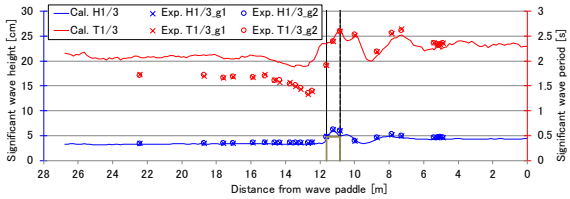
また，赤線及び赤プロットで示した潜堤背後の有義波周期分布をみると，改良モデルによる計算結果は，不透過構造の台形潜堤と同様，砕波の有無により，実験結果に対する再現性の傾向に違いがみられることがわかる．すなわち，相対天端高h_r/H_0'が大きい非砕波時（概ね，**図-2.4(b)**の左上半分）には，潜堤背後での周期変化率が小さく波の分裂がさほど顕著でないNo.①，②，⑥（h_r/H_0'=10.4，5.2）において，計算結果は実験結果と比較的よく一致する．しかし，顕著な分裂が生じ始めるNo.③，⑦，⑩（h_r/H_0'=2.6）では，計算結果は実験結果よりも大きく，潜堤背後での周期の低減を過小評価することが確認された．これは段差境界処理による分散効果の再現性に依存すると考えられるため，この改善に向けた検討は今後の課題である．



(a) h_r/L_0=0.053（No.①）

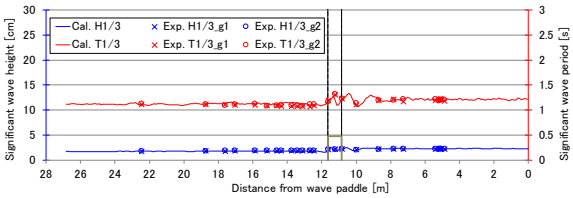


(b) h_r/L_0=0.027（No.⑥）

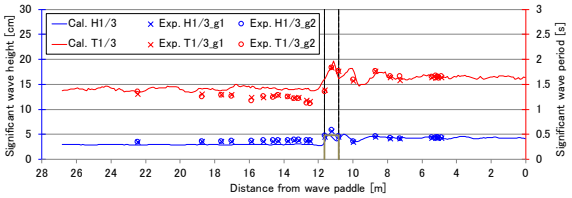


(c) h_r/L_0=0.013（No.⑩）

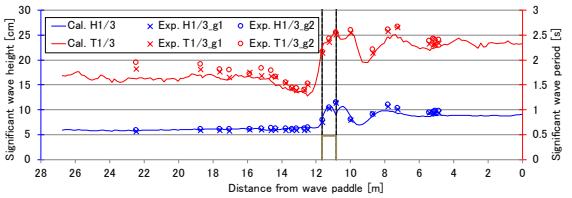
図-2.22 台形潜堤（断面 2）による波浪変形（H_0'/L_0=0.005）



(a) h_r/L_0=0.053（No.②）

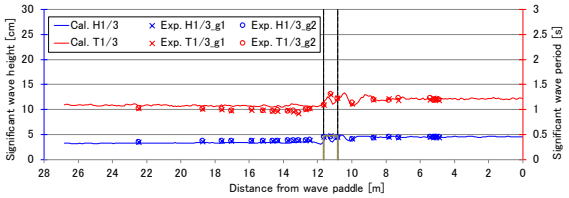


(b) h_r/L_0=0.027（No.⑦）

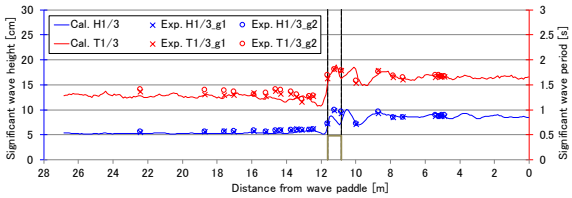


(c) h_r/L_0=0.013（No.⑪）

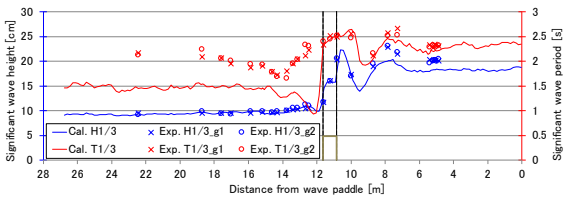
図-2.23 台形潜堤（断面 2）による波浪変形（H_0'/L_0=0.010）



(a) h_r/L_0=0.053（No.③）

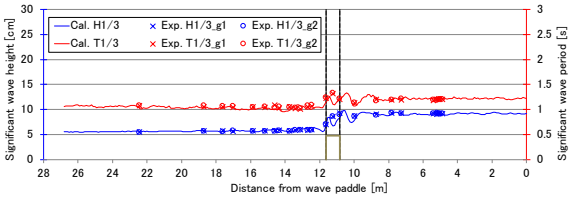


(b) h_r/L_0=0.027（No.⑧）

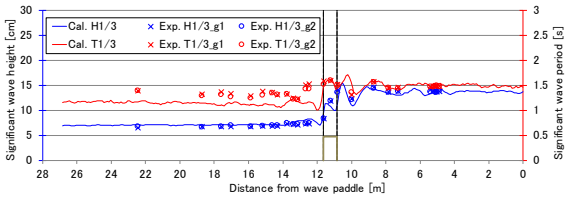


(c) h_r/L_0=0.013（No.⑫）

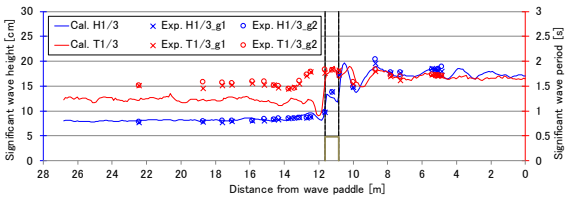
図-2.24 台形潜堤（断面 2）による波浪変形（H_0'/L_0=0.020）



(a) h_r/L_0=0.053（No.④）

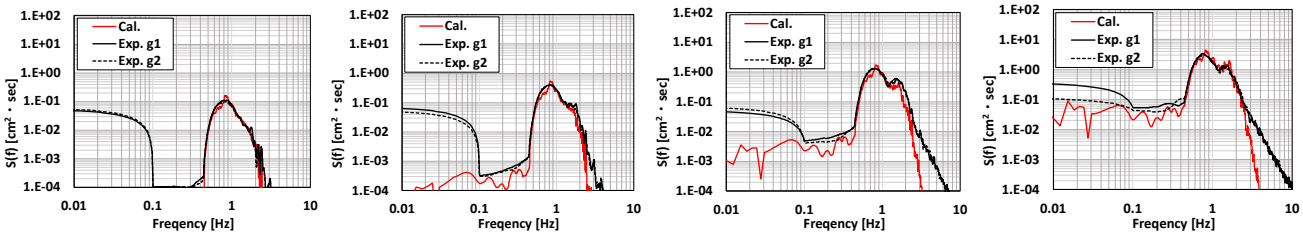


(b) h_r/L_0=0.034（No.⑤）



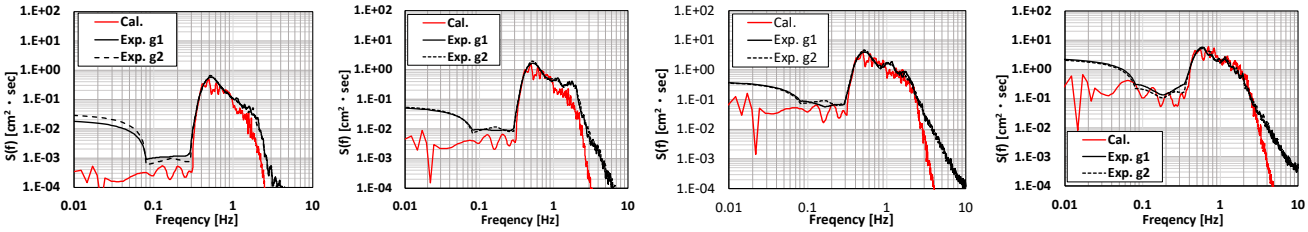
(c) h_r/L_0=0.027（No.⑨）

図-2.25 台形潜堤（断面 2）による波浪変形（H_0'/L_0=0.040）



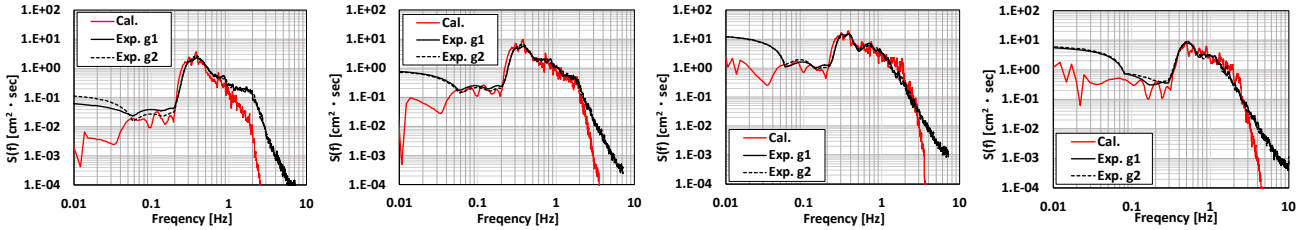
(a)　H_0'/L_0=0.005（No.①）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.②）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.③）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.④）

図-2.26　台形潜堤（不透過：断面 2）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.053：No.①～④）



(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑥）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑦）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑧）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑤）

図-2.27　台形潜堤（不透過：断面 2）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.027：No.⑥～⑧，h_r/L_0=0.034：No.⑤）



(a)　H_0'/L_0=0.005（No.⑩）　(b)　H_0'/L_0=0.010（No.⑪）　(c)　H_0'/L_0=0.020（No.⑫）　(d)　H_0'/L_0=0.040（No.⑨）

図-2.28　台形潜堤（不透過：断面 2）の 0.5 波長岸側での周波数スペクトル（h_r/L_0=0.013：No.⑩～⑫，h_r/L_0=0.027：No.⑨）

一方，相対天端高h_r/H_0'が小さい砕波時（概ね，**図-2.4(b)**の右下半分）には，顕著な砕波が生じるNo.⑤，⑨，⑫（h_r/H_0'=0.85，0.65）において，計算結果は実験結果よりも小さく，潜堤背後での短周期化を過大評価する．前節でも述べた通り，この現象は段差境界処理を行わずに実施した台形潜堤に対する再現計算結果でも同様にみられた．また，砕波と分裂が同時に生じるNo.④，⑧，⑪（h_r/H_0'=1.3）では，計算結果は実験結果とほぼ一致する．しかし，これらは過小評価された分裂時の周期低減が砕波時の過大評価によってちょうどバランスした可能性も考えられるため，上述した課題と合わせて今後精査すべき事項と考える．

さらに，矩形潜堤の0.5波長岸側で計測・計算された周波数スペクトルを比較した結果を**図-2.26～28**に示す．ここで，図の凡例は台形潜堤の場合（断面4：**図-2.11～13**，断面6：**図-2.18～20**）と同様である．

潜堤背後の波高・周期分布の再現性に対応して，相対天端高h_r/H_0'が大きい非砕波時（h_r/H_0'=10.4, 5.2）には，計算で得られたピーク付近の周波数スペクトルは実験結果を非常によく再現している．また．相対天端高h_r/H_0'が比較的大きい非砕波時（h_r/H_0'=2.6）にもピーク付近の周波数スペクトルは実験結果を比較的よく再現しているが，H_0'/L_0が小さく（入射波周期が長く）波の分裂がより顕著になるにつれて，実験結果でみられる短周期側のピークをうまく再現できず波エネルギーが過小である．すなわち，この場合には，周期分布と同様，段差境界処理法を導入した改良モデルにおいて矩形潜堤による波の分裂が十分に算定できていないと考えられるため，この改善に向けた検討は今後の課題である．一方で，相対天端高h_r/H_0'が小さい砕波時（h_r/H_0'=0.85，0.65）には，ピーク付近の周波数スペクトルのうち短周期側の波エネルギーについて，計算結果は実験結果に対し過大であるが，これらは

台形潜堤と同様，計算に用いた砕波モデルにより数値的に励起されたものと考えられる．したがって，相対天端高h_r/H_0'が比較的小さい砕波時（h_r/H_0'=1.3）に，計算で得たピーク付近の周波数スペクトルが実験結果を非常によく再現している理由は，改良モデルにおいて，段差境界処理法により波の分裂が弱められ，実験結果に比べ発生・発達が過小となった短周期波成分の波エネルギーを，砕波モデルによる励起によって結果的に補っているためと考えることもできる．

3. 潜堤による平面波浪変形特性

ここでは，2.1 節で述べた断面模型を対象とした波浪変形実験を平面水槽実験へ拡張するとともに，水深が急変する矩形潜堤を取り扱えるよう開発した段差境界処理法を有するブシネスクモデルによる再現計算を実施し，台形及び矩形潜堤による平面波浪変形特性を調べた．[13)]

3.1 潜堤による不規則波の平面波浪変形実験

平面波浪変形実験には当所が所有する環境インテリジェント水槽（長辺 34.3m，短辺 23.5m，深さ 1.3m）を使用した．ただし，斜め波及び多方向波の造波に用いた L 字配置サーペント型造波装置は現在，全 94 台のうち長辺端の 8 台（5.3m）の稼働を停止している．

(1) 実験方法

模型縮尺は 1/25 とし，水深 h=0.6m で一定とした造波水槽内に，長さ 6m，幅 0.8m，高さ 0.48m（天端上水深 h_r=0.12m）の矩形潜堤，及びその周囲に勾配 1:2 の斜面模型を加えた台形潜堤を設置した．実験波は波形勾配 H_0'/L_0=0.010 の一方向波及び多方向波（S_{max}=25：光易型方向関数）とし，潜堤法線に直入射する（波向 0°）換算沖波波高 H_0'=2.3, 4.5, 9.0cm，沖波周期 T_0=1.2, 1.7, 2.4s の不規則波（修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトル）を 2 波群ずつ，計測開始後 200 波以上造波した．なお，多方向波を除きこれらの波浪・造波条件は，波形勾配 H_0'/L_0=0.010 について 2.1 節で述べた断面模型実験と同様である．また，矩形・台形潜堤の断面はそれぞれ断面 2, 4 に対応している．さらに，一方向波は波向 15°，30° でも造波した．

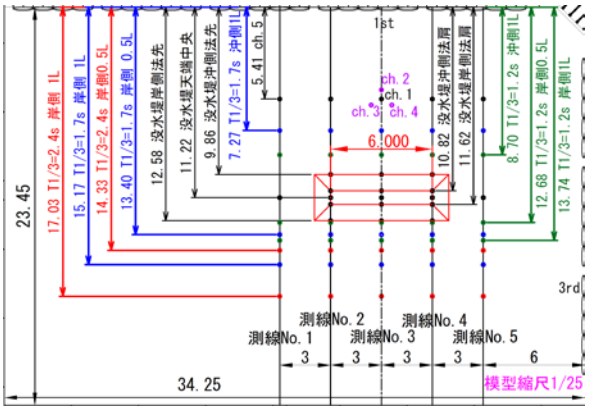
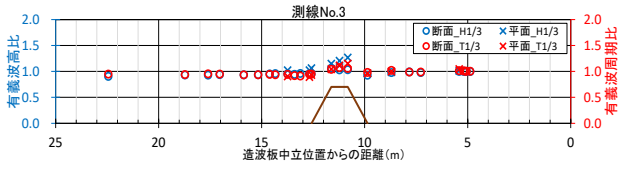
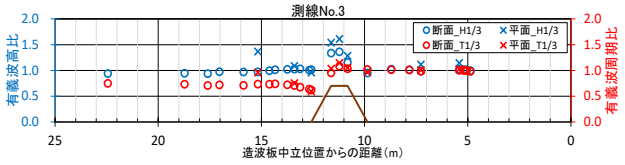


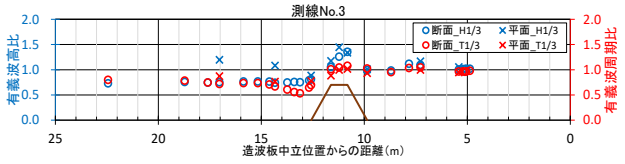
図-3.1 平面水槽内の潜堤模型と波高計の配置（単位：m）



(a) 沖波周期 T_0=1.2s（h_r/L_0=0.053），波向 0°

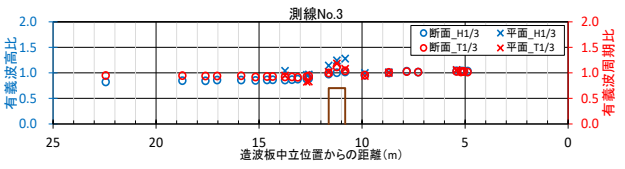


(b) 沖波周期 T_0=1.7s（h_r/L_0=0.027），波向 0°

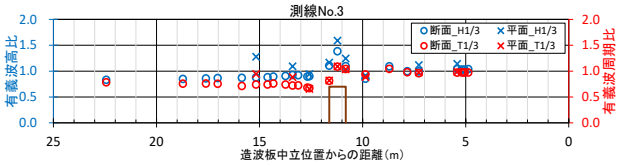


(c) 沖波周期 T_0=2.4s（h_r/L_0=0.013），波向 0°

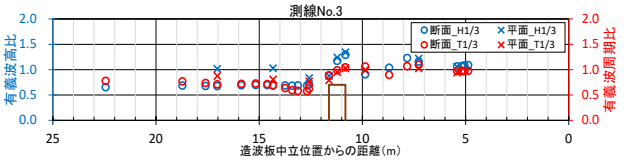
図-3.2 測線 3 の計算値と断面実験結果との比較（台形潜堤）



(a) 沖波周期 T_0=1.2s（h_r/L_0=0.053），波向 0°

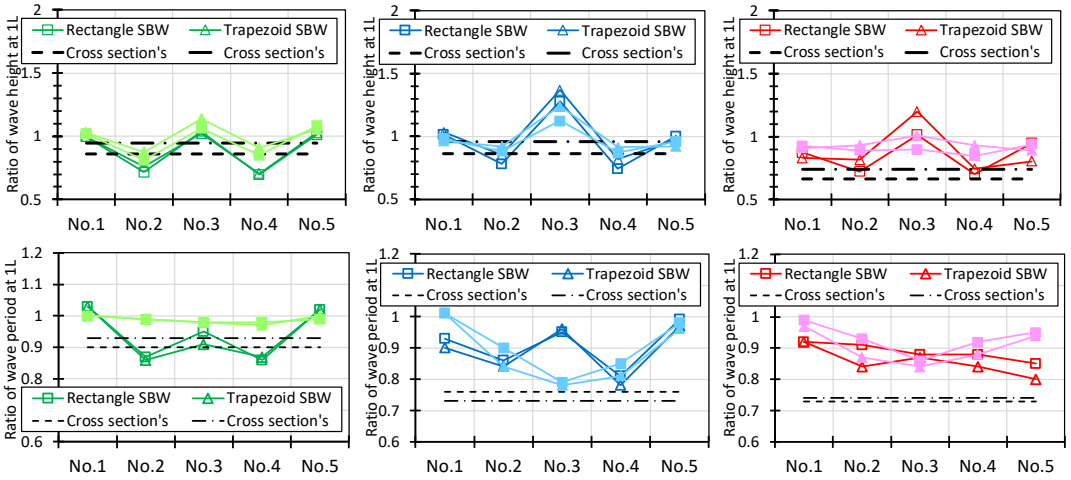


(b) 沖波周期 T_0=1.7s（h_r/L_0=0.027），波向 0°



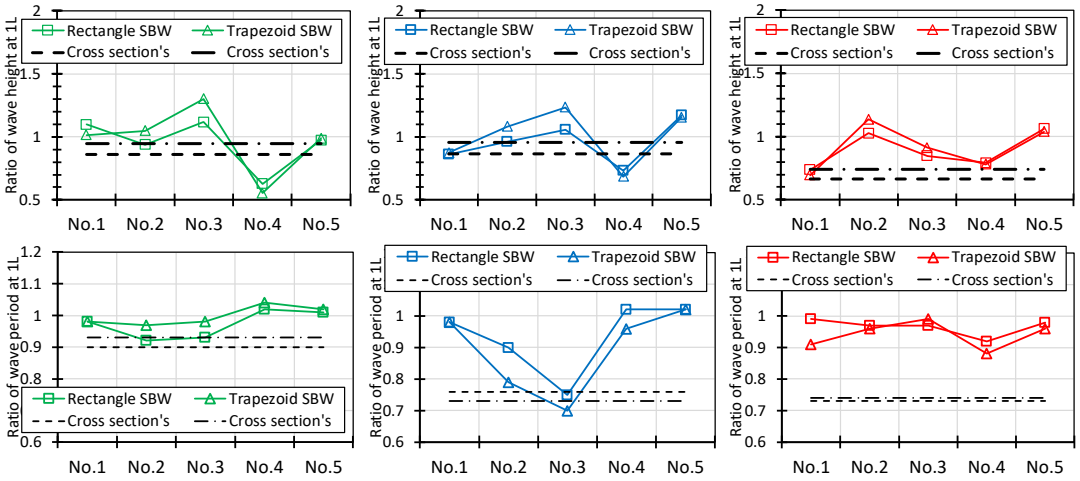
(c) 沖波周期 T_0=2.4s（h_r/L_0=0.013），波向 0°

図-3.3 測線 3 の計算値と断面実験結果との比較（矩形潜堤）



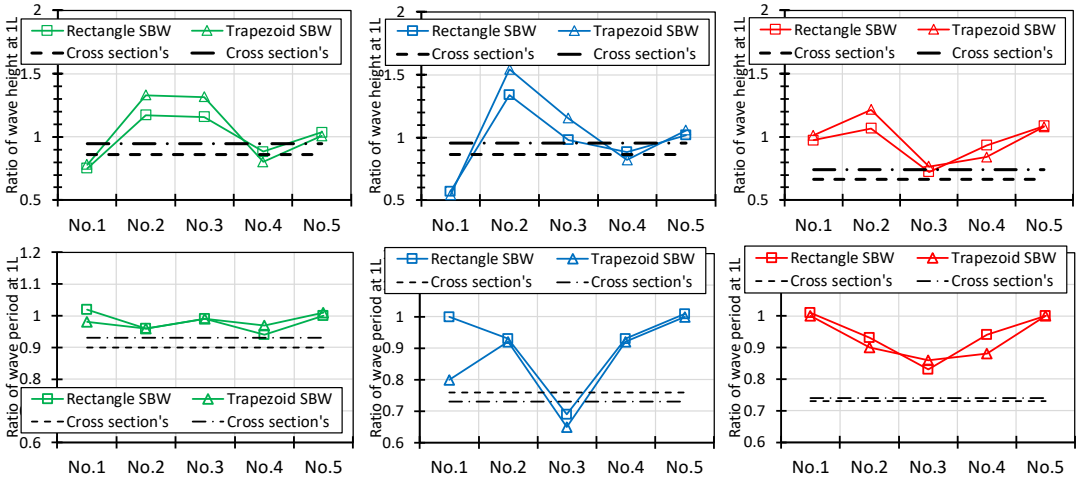
(a)　沖波周期 T_0=1.2s　　(b)　沖波周期 T_0=1.7s　　(c)　沖波周期 T_0=2.4s

図-3.4　潜堤背後（岸側 1 波長位置）での波高伝達率（上段）と周期変化率（下段）（波向 0°の一方向波及び多方向波）



(a)　沖波周期 T_0=1.2s　　(b)　沖波周期 T_0=1.7s　　(c)　沖波周期 T_0=2.4s

図-3.5　潜堤背後（岸側 1 波長位置）での波高伝達率（上段）と周期変化率（下段）（波向 15°の一方向波）



(a)　沖波周期 T_0=1.2s　　(b)　沖波周期 T_0=1.7s　　(c)　沖波周期 T_0=2.4s

図-3.6　潜堤背後（岸側 1 波長位置）での波高伝達率（上段）と周期変化率（下段）（波向 30°の一方向波）

潜堤模型及び波高計の設置状況を**図-3.1**に示す．潜堤法線の中央，天端両端及びそれらの等間隔外側に岸沖方向の5測線を設け，各測線において，沖1点と潜堤天端中央及び法肩・法先の5点（外側では中央1点）以外は対象周期に応じて測点の位置を変え，入反射波分離解析による反射率，及び潜堤沖側1波長，岸側0.5，1波長位置での波浪統計量を計測した．測線3の沖に設けた波高計アレイを含め,同時計測を行う波高計本数は計40本である．

(2)　実験結果

波の屈折効果を含む各潜堤による波高伝達率，周期変化率は，潜堤を設置せずに計測した各地点の有義波高・周期で潜堤設置時の計測結果を除し，さらに波群平均した波高比，周期比として算定した．

a)　断面実験結果との比較

屈折による影響は潜堤形状及び波浪条件により各地点で異なる．そこで，対象波浪のうち波向 0° の一方向波に対し測線3で得た矩形及び台形潜堤に対する波高比・周期比の縦断分布（×印）を，屈折を無視できる2.1節の断面実験結果（○印）とともに**図-3.2**及び**図-3.3**に示す．なお，青プロットは波高比，赤プロットは周期比である．

2.1節で述べた断面実験結果では，潜堤上の相対水深を波形勾配で除して得られる相対天端高 h_t/H_0'=2 程度のとき，矩形・台形潜堤背後で波の分裂による周期の顕著な低減がみられた．各図の(b)(c)より，平面実験結果でも潜堤直背後では同様な現象がみられるが，少なくとも1波長離れた地点ではほぼ分裂前の周期に近づく．また，潜堤背後の波高比についてみると，断面実験結果では潜堤上で一部が砕波し波高が低減する様子もみられるが，平面実験結果では少なくとも1波長離れた地点で入射波高に比べ同等以上に増大する．平面実験結果におけるこれらの現象はいずれも後述する潜堤両端からの波の屈折により説明できる．

b)　波向及び方向集中度による違い

図-3.4～6に，各測線上の矩形（□印）・台形（△印）潜堤の背後（岸側1波長位置）で計測された，各波向の一方向波に対する波高伝達率及び周期変化率を示す．また，点線（矩形潜堤）及び破線（台形潜堤）はそれぞれ2.1節で述べた断面実験結果である．さらに**図-3.4**には，多方向波に対する結果を塗潰しプロット（■，▲印）で併記した．

まず，潜堤に対し直入射する波向0°の場合（**図-3.4**）に着目すると，波高伝達率は一方向波のどの周期でも，潜堤中央の測線3で最大,両端の測線2,4で最小となり，潜堤から外れた測線1,5ではその中間となっている．これらは，潜堤両端での屈折により潜堤背後で波が収れんしたためであり，同様な傾向は周期変化率にもみることができる．また，台形潜堤では周期が長くなる（潜堤上の相対水深が浅くなる）ほど周囲の法面上で波が屈折し易くなるために,矩形潜堤に比べこの傾向が顕著となる．

したがって，平面波浪場の潜堤背後では，潜堤上で分裂・砕波変形を受けない波が重畳することによる影響を受ける．このため断面実験結果とは異なり，分裂とともに砕波が生じる T_0=2.4s でも測線3の波高伝達率は1を超え，周期変化率も0.85前後に留まる．また，分裂が卓越する T_0=1.7s でも測線3の周期変化率は0.95程度に留まり，波高伝達率は1.3程度にも達する一方，その分，波が伝播し難くなる測線2,4では断面実験結果に比べ，波高伝達率は低下し周期変化率は同等程度となっている．さらに，潜堤上で顕著な分裂・砕波変形が生じない T_0=1.2s では屈折変形が卓越するものと考えられるが,レンズ効果により成分波が選別されるため，測線2,4では断面実験結果を下回る周期変化率が計測された．加えて，一方向波に比べ屈折変形が緩やかな多方向波の場合には，測線間での波高伝達率の違いは平滑化される．また，一方向波では測線3で極大化した周期変化率は逆に測線3で極小化し，同時に潜堤上で波の分裂が生じる場合には潜堤背後で多方向波が短周期化することが確認された．

次に,潜堤に対し斜めに入射する波向15°及び波向30°（**図-3.5**及び**図-3.6**）の一方向波についてみると，特に波高伝達率は入射波向に応じて測線間で非対称となり，波下側で波が収れんする様子がみてとれる．これは，堤幹部での屈折がさほど顕著ではないためと考えられるが，周期（潜堤上の相対水深）によっても違いがみられる．また，周期変化率の極小値も波向角の増加につれて波下側にシフトしているが，これは，潜堤端部から直接入射する波よりも潜堤上で分裂した波が支配的となる範囲に対応しているものと考えられる（なお，波向0°では直入射した波に比べ潜堤両端から入射した重畳波の影響が大きくなり，測線3上で周期変化率の極大値を形成したものと推察される）．

3.2　潜堤周辺における波浪変形の再現計算

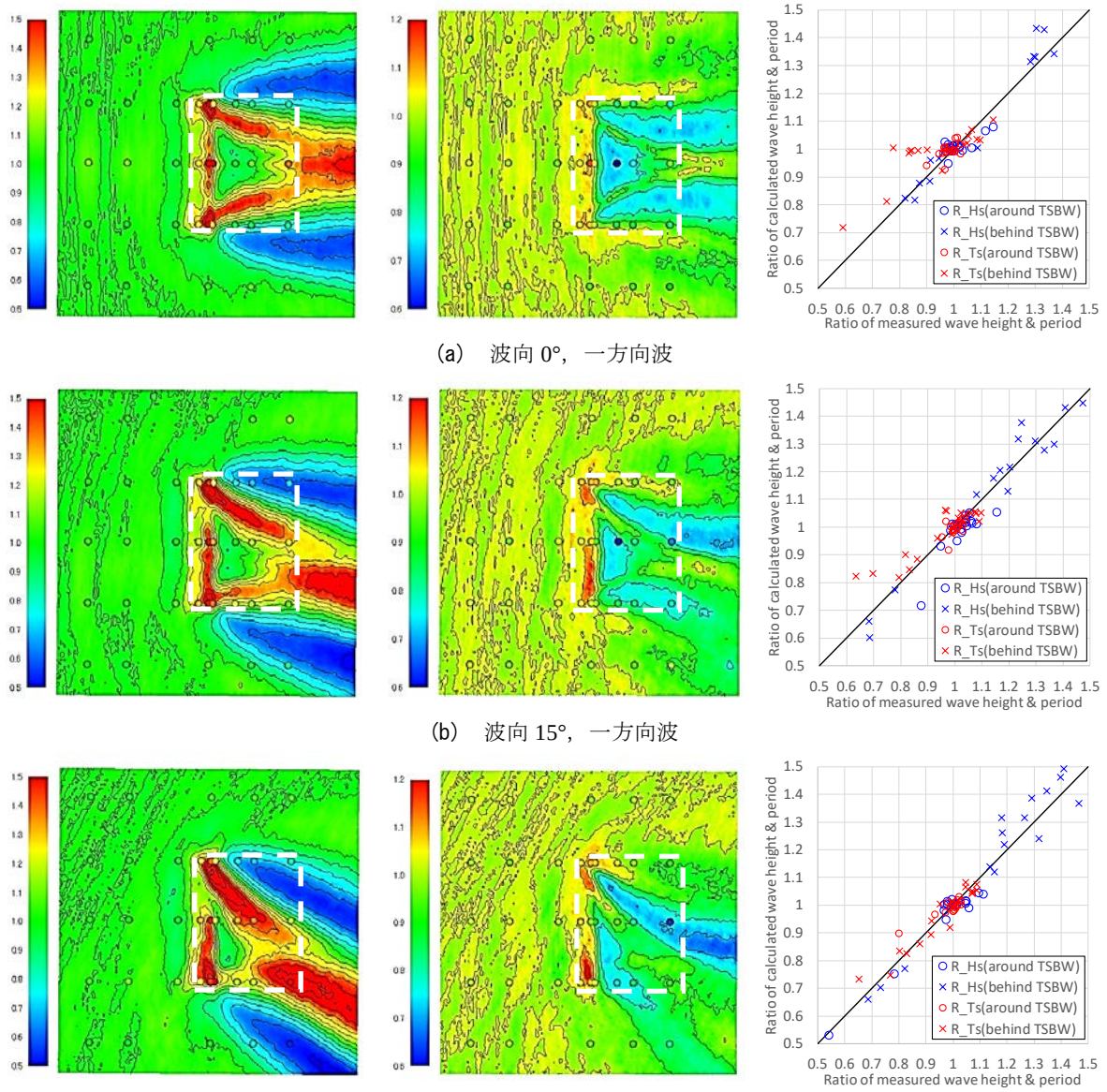
分裂・砕波した波と屈折波とが重畳するなどの平面波浪変形特性を把握しようとした場合，前節のようにこれらの離散データだけで考察することには限界がある．そこで，ここでは，平面2次元ブシネスクモデルを用いてこれらの再現計算を行い，精度を検証するとともに，得られた波高比及び周期比の平面分布について考察を加える．

(1)　計算方法

台形・矩形潜堤周辺の平面波浪変形実験に対する再現計算は，段差境界処理法を導入した平面2次元ブシネスクモデルにより実施した．ここで，段差境界処理法は水深急変部での計算の不安定化を回避するために用いられ，特に矩形潜堤周りの波浪変形計算において効果を発揮する．計算に用いた波浪諸元は，前節で述べた実験波と同様，波形勾配H_0'/L_0=0.010の一方向波及び多方向波（S_{max}=25：光易型方向関数）とし，潜堤法線に直入射する波向0°に加え，一方向波については波向15°，30°も対象とした．修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルに従う不規則波の換算沖波波高はH_0'=2.3, 4.5, 9.0cm, 沖波周期はT_0=1.2, 1.7, 2.4sである．また，計算領域は**図-3.1**にならい設定したが，水槽側面の造波装置から入射する斜め波を再現するために，波向0°の多方向波，及び波向15°, 30°の一方向波では，仮想的に一列に並べた造波面を想定し，それに対応した幅（(34.3m-5.3m)+23.5m=52.5m）の計算領域を用いた．さらに，計算領域の周囲には造波周期毎に1波長幅となる高次スポンジ層を設置し無反射境界とした．空間格子幅は$\Delta x=\Delta y$=0.1m，差分時間間隔は計算精度と安定性を高めるために$\Delta t=T_0$/2400s程度とした．

(2)　計算結果

各波浪諸元に対し，再現計算で算定された台形・矩形潜堤周辺の有義波高比及び有義波周期比の平面分布を，



(a)　波向 0°，一方向波

(b)　波向 15°，一方向波

(c)　波向 30°，一方向波

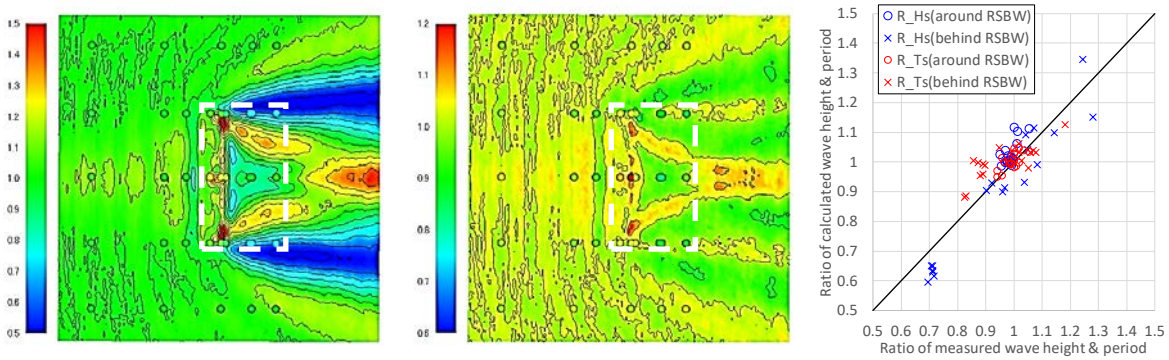
図-3.7　台形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=1.7s）

波別解析により模型実験で計測した各地点での値とともに，**付録 B**, **付図 B-1～6** の左側及び中央に示す．ここで，有義波高・周期の平面分布は造波スペクトル形状に応じた係数を各計算格子での平均値に乗じて算定したが，別途実施した断面実験の再現計算結果と同様，本研究では後述する一部を除き，波別解析による有義値との違いは無視できる程度であった．なお，これらの波高比（＝波高伝達率）・周期比（＝周期変化率）は実験結果と同様，潜堤を設置しない計算結果で除して算定した．一方，波別解析で得た計算値を実験値と比較した結果を**付録 B**, **付図 B-1～6** の右側に示す．ここで，青プロットは波高比，赤プロットは周期比を表す．また，平面分布図に示す点線枠内（潜堤背後）の地点での値を×印，それ以外の値を○印で示し，潜堤による影響の大小を区別した．

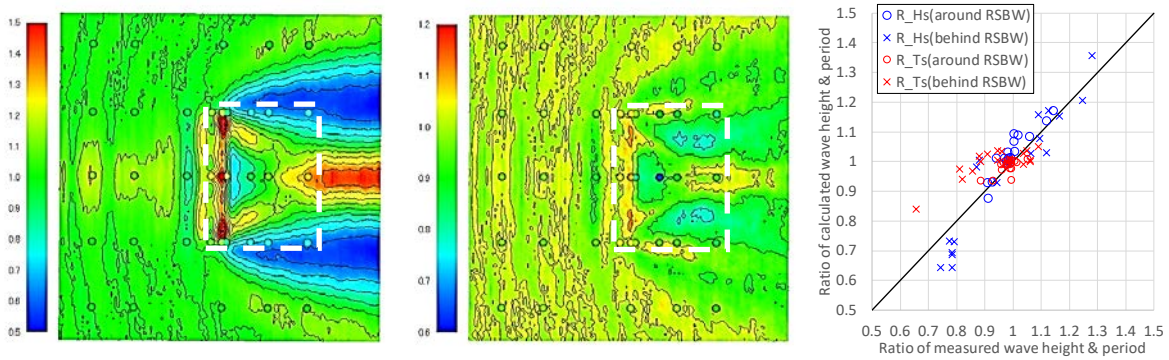
a)　台形潜堤

例として，沖波周期T_0=1.7s，波向0°，15°，30°の一方向波に対する有義波高比，有義波周期比の平面分布，及び各地点におけるこれらの計算値と実験値を比較した結果を，**図-3.7**に示す．

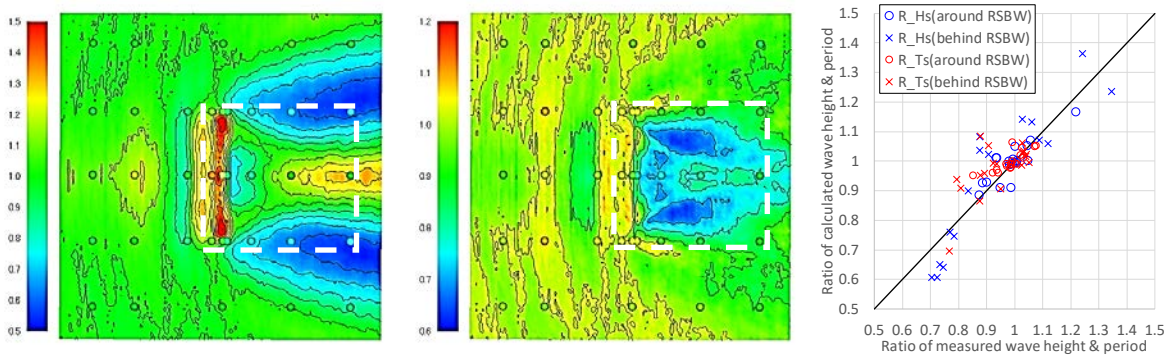
波高比・周期比の平面分布において，波向に応じ，周期比は潜堤背後の比較的広い海域で減少するものの，波高比は潜堤端部からの屈折波が到達する波下側で増加しその両側で減少することがわかる．より詳細には，屈折による波の収れん（波下での波高増大とその両側での波



(a)　沖波周期 T_0=1.2s，一方向波



(b)　沖波周期 T_0=1.7s，一方向波



(c)　沖波周期 T_0=2.4s，一方向波

図-3.8　矩形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，波向 0°）

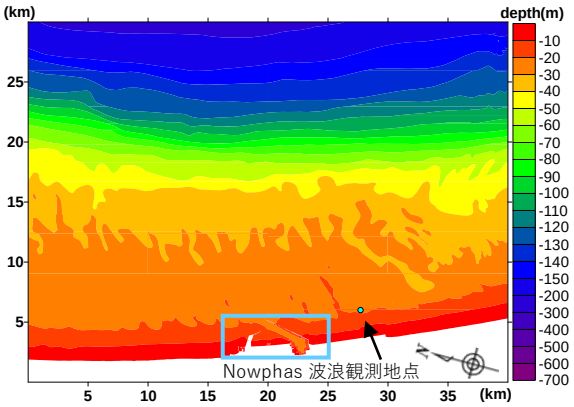
高減少）がみられない海域で周期比が大きく減少することがみてとれる．ただし，実験結果と同様，多方向波ではこれらの傾向が弱まることが確認された（付図B-2(a)を参照）．

一方，計算と実験で共通としたカラー値は各地点とも比較的よく一致している．また，両者の比較図において，これらの数値的な差異は分裂・屈折変形が顕著な潜堤背後の各地点（×印）においても概ね1割程度であることから，潜堤法線に入射する波向によらず，これらの波浪変形に対するブシネスクモデルによる再現性は比較的高いことが確認された． ただし，ここで対象とした相対天端高h_r/H_0'=2.7（= $(h_r/L_0)/(H_0'/L_0)$=0.027/0.010）のとき，分裂後の周期低減を過小（周期比を過大）評価する傾向は，2.2節で述べた不透過構造の台形潜堤を対象とした断面実験結果に対する再現計算結果と同様である．

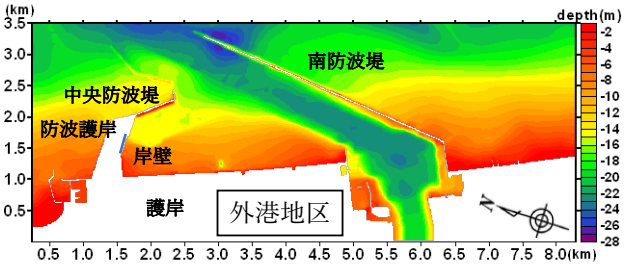
b)　矩形潜堤

例として，沖波周期T_0=1.2s, 1.7s, 2.4s，波向0°の一方向波に対する有義波高比，有義波周期比の平面分布，及び各地点におけるこれらの計算値と実験値を比較した結果を，図-3.8に示す．ただし，潜堤上で砕波が生じるT_0=2.4sに対して算定された周期比の平面分布（図-3.8(c)の中央）について，波別解析で得た潜堤背後の有義波周期を最大で15%程度過小評価していることに注意されたい．

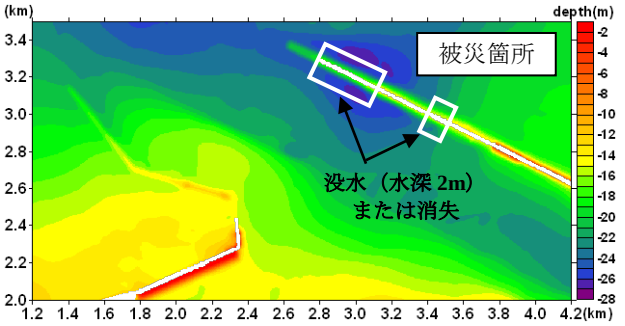
波高比・周期比の平面分布及び各地点での計算値を実験値と比較したこれらの計算結果は，入射波の周期によらず，段差境界処理法を導入したブシネスクモデルが矩形潜堤による平面的な波浪変形も安定かつ精度よく計算できることを示している．また，潜堤両端での屈折に伴う波浪集中は矩形潜堤でも同様に生じるが，同じ波浪条件（一方向波：波向0°，沖波周期T_0=1.7s）に対する波浪変形を示す図-3.7(a)と図-3.8(b)を比較すると，台形潜堤に比べ矩形潜堤では，背後での波の収れんや周期の顕著な減少がみられる範囲が縮小することがわかる．これは，波の屈折点が潜堤端部に限定されるためと考えられる．なお，多方向波でこれらの平面分布が平滑化される傾向は台形潜堤と同様であった（付図B-4(a)～6(a)を参照）．一方，入射波の周期が長くなる（潜堤上の相対水深が浅くなる）につれて，潜堤による波の反射が顕著となるため，潜堤背後の波高比が全体的に低減している．また，このとき周期比も同様に低減する理由は，周期の長い成分波は潜堤により部分反射され，周期の短い成分波ほど潜堤上を伝播し易いためと推察される．したがって，天端水深が浅い不透過潜堤はまた，うねりを部分的に遮蔽する効果を有することが確認された．



(a)　鹿島港沖（エネルギー平衡方程式法の計算領域）



(b)　鹿島港外港地区（ブシネスクモデルの計算領域）



(c)　被災港形で想定した南防波堤の被災箇所

図-3.9　鹿島港外港地区周辺の海底地形と施設配置

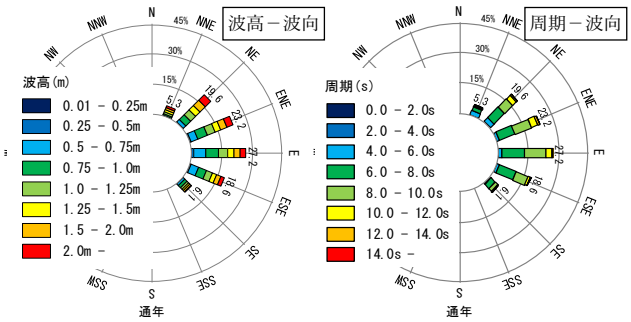


図-3.10　波浪出現頻度（鹿島港 NOWPHAS:2013-2017 年）

表-3.1　鹿島港 NOWPHAS 地点における代表波浪諸元

$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	H/L_0	S_{max}	Direction
1.0	8.0	0.0100	75	NE, ENE, E, ESE
1.0	10.0	0.0064		
1.0	12.0	0.0045		
2.5	8.0	0.0250	25	
2.5	10.0	0.0160		

3.3 没水ケーソン堤に残存する防波性能の評価

ここでは，水深が急変する潜堤上での波の分裂・屈折（・回折）・砕波を含む波浪変形計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用いて，対象港湾の沖防波堤の一部ケーソンが没水・消失した港形での静穏度解析を実施し，沖防波堤の被災形態の違いが対象岸壁の荷役稼働率に与える影響について考察した．[14)]

(1) 対象港湾の概要と波浪・地形条件

対象とした鹿島港外港地区の海底地形及び施設配置を**図-3.9** に示す．また，2013～2017 年の 5 年間に鹿島港 NOWPHAS で観測された波浪出現頻度を**図-3.10** に示す．

図-3.9(a)に示すように，鹿島港 NOWPHAS は鹿島港南方沖の水深-24.6m 地点に位置し，**図-3.10** をもとに設定した**表-3.1** に示す周期 6s 程度以上の代表波浪諸元はいずれも既に何らかの浅海変形を受けていると考えられる．そこで，**図-3.9(b)**に示す鹿島港外港地区に入射する波を推定するために，本研究ではエネルギー平衡方程式法を用いた試行計算を鹿島港 NOWPHAS 位置での波向毎に行い，代表波浪諸元を再現する沖波諸元を逆推定するとともに，得られた沖波諸元に対する波浪変形計算を実施した．ここで，エネルギー平衡方程式法の入射境界に与える沖波スペクトルは修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトル及び光易型方向関数で与え，沖波諸元は浅海変形後の値が**表-3.1** の代表波浪諸元を再現するように設定した．なお，**図-3.9(a)**はエネルギー平衡方程式法，**図-3.9(b)**はブシネスクモデルで設定した計算領域のうち波向 ENE に対応し，計算格子幅はそれぞれ 10m，5m である．また，**図-3.9(b)**の上辺は両計算モデルの接続境界に対応し，両者のカップリング計算法 [15)]を用いて，エネルギー平衡方程式法で算定された方向スペクトルの沿岸分布をブシネスクモデルにそのまま入力（造波）することで，沖から港内に至る広域な波浪変形計算の省力化を図ることとした．

これらの波浪変形計算は**表-3.1**に示す計 20 ケース（＝周期 $T_{1/3}$=8, 10, 12s，波高 $H_{1/3}$=1.0, 2.5m を組み合わせた 5 種類×4 波向：NE, ENE, E, ESE）実施した．ここで，**図-3.10** からもわかるように，鹿島港は全国的にみてもうねりの来襲頻度が高く，その多くは沖に開けた E 系の波向を有する．そこで，これらの代表波浪諸元のうち波形勾配 H/L_0＝0.0100 以下の波は減衰距離の長いうねり（S_{max}=75），H/L_0＝0.0100 を超える波は減衰距離の短いうねり（S_{max}=25）と仮定した．また，**図-3.9(a)(b)**より，南防波堤は出現頻度の高いこれらの波を遮蔽し，端部から生じる回折波及びN系の波は中央防波堤とそれに続く防波護岸で防ぐことがわかる．

一方，後述する被災港形では，南防波堤先端付近の上部斜面ケーソン堤を除く未消波区間（**図-3.9(c)**の□囲み部分）のケーソンが水面下 2m まで没水（被災港形Ⅰ），または，マウンドのみを残して完全に消失（被災港形Ⅱ）するものと仮定した．ここで，被災港形Ⅰでは潜堤化した被災箇所からうねりが港内に侵入するものの，波高に応じて潜堤上で分裂・砕波し，港内周期比の減少及び港内波高比の増大抑制が期待される．しかし，利用上安全側となるよう被災時に通常想定される被災港形Ⅱでは，うねりの侵入に伴い港内波高比の増大が懸念される．

なお，**図-3.9(b)(c)**に示す現況港形，被災港形Ⅰ，Ⅱを対象とした港内波浪変形計算では，前節で用いたブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2改良版）に対し，越波モデルを加えたブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.3）[4)]を用いて，防波堤上の越波と背後で発生する越波伝達波を考慮した．しかし，予備検討の結果，少なくとも**表-3.1**に示す波浪条件において，越波伝達波が港内波高比・周期比の平面分布に与える影響は無視し得る程度であったため，本研究では越波伝達波に関してこれ以上の議論は行わない．一方，港内護岸前面を含め，港内外の消波工による波の部分反射は透水層モデルにより再現し，内港に続く水路境界は沖側・側方境界と同様，少なくとも1波長幅のスポンジ層を設置し開境界とした．また，潮位は M.W.L.とした．

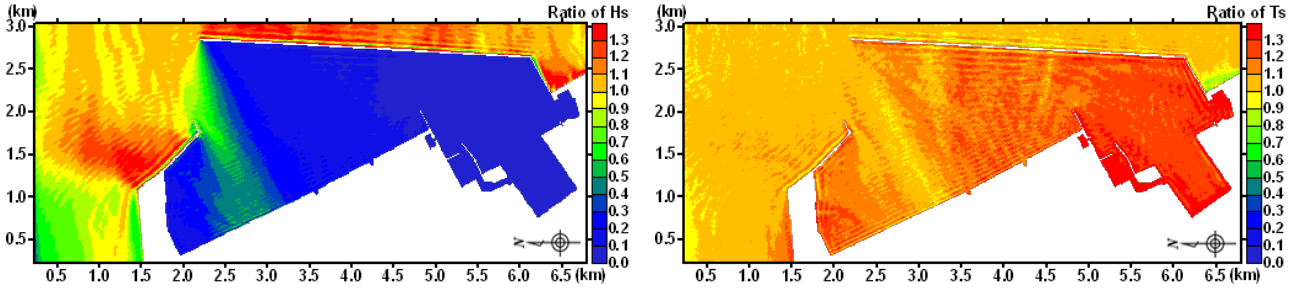
(2) 港内波浪変形計算

各波浪条件に対し，ブシネスクモデルで算定された各波向の現況港形及び被災港形Ⅰ，Ⅱにおける港内波高比・周期比の平面分布を，**付録 C**, **付図 C-1～12** に示す．

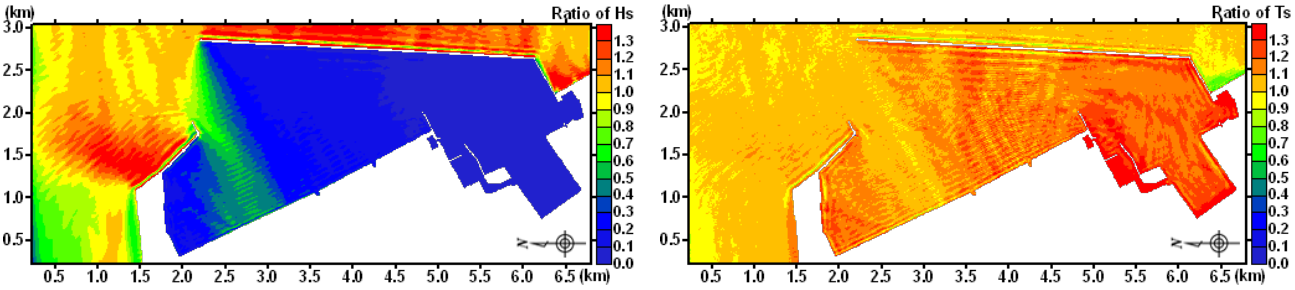
a) 現況港形

例として波向 E を取り上げ，$H_{1/3}$ = 1.0m，$T_{1/3}$ = 10s と 12s，及び $H_{1/3}$ = 2.5m，$T_{1/3}$ = 10s の代表波浪が現況港形に入射した場合の波高比，周期比の平面分布を**図-3.11** に示す．また，各代表波浪諸元に対し，岸壁（**図-3.9(b)**の青線）の前面に沿って算定された波高比・周期比の平均値（以下，平均波高比・周期比）の波向による変化を**図-3.12(a)**に示す．

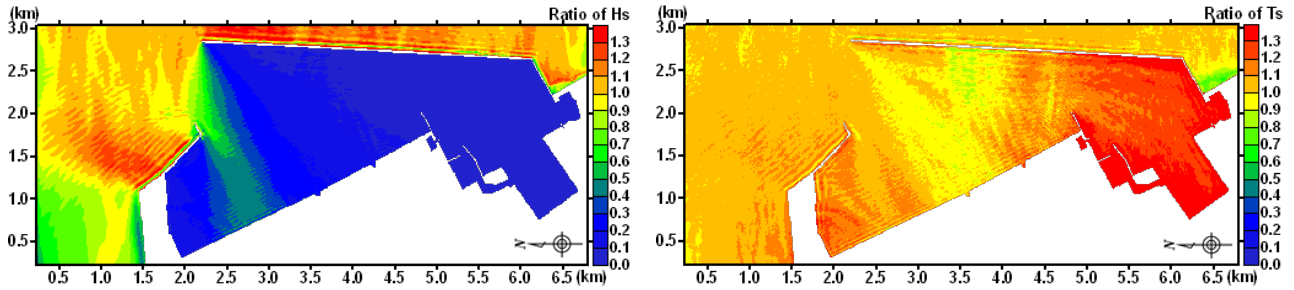
波高比の平面分布図で確認する限り岸壁に直接到達する波はさほど多くないが，波向に応じて，周期が長いほど，岸壁前面で平均波高比の増大がみられる．また，平均周期比は波向や周期によらずいずれも1より大きいが，これは回折変形の違いにより低周波数の成分波ほど岸壁に到達し易いためであることが，周期比の平面分布図より確認できる．なお，砕波減衰のために同じ周期では波高が大きいほど平均波高比が小さくなるが，平均周期比は波向に応じてこの大小関係が逆転する傾向にある．



(a)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）

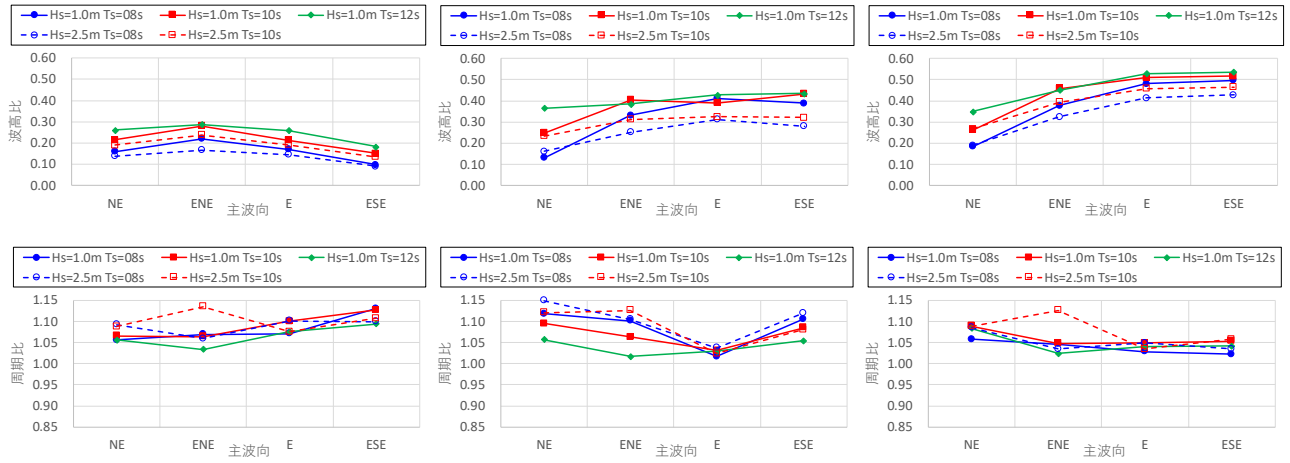


(b)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）



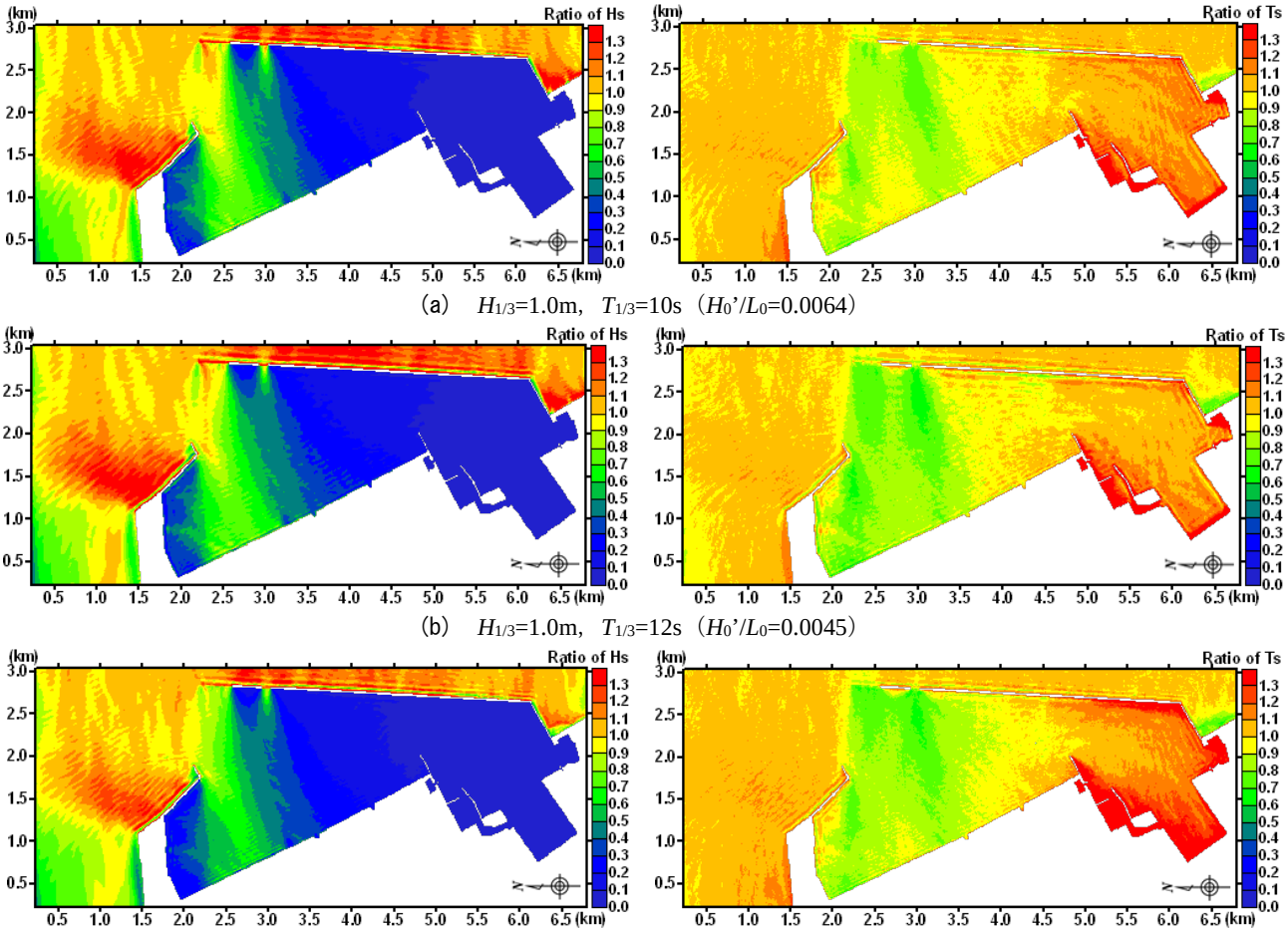
(c)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

図-3.11　現況港形における波高比・周期比の平面分布（波向 E）（左側：波高比，右側：周期比）



(a)　現況港形　　(b)　被災港形 I　　(c)　被災港形 II

図-3.12　各代表波浪諸元に対する岸壁前面での平均波高比・周期比の波向変化（上段：平均波高比，下段：平均周期比）



(a) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=10s (H_0'/L_0=0.0064)

(b) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=12s (H_0'/L_0=0.0045)

(c) $H_{1/3}$=2.5m, $T_{1/3}$=10s (H_0'/L_0=0.0160)

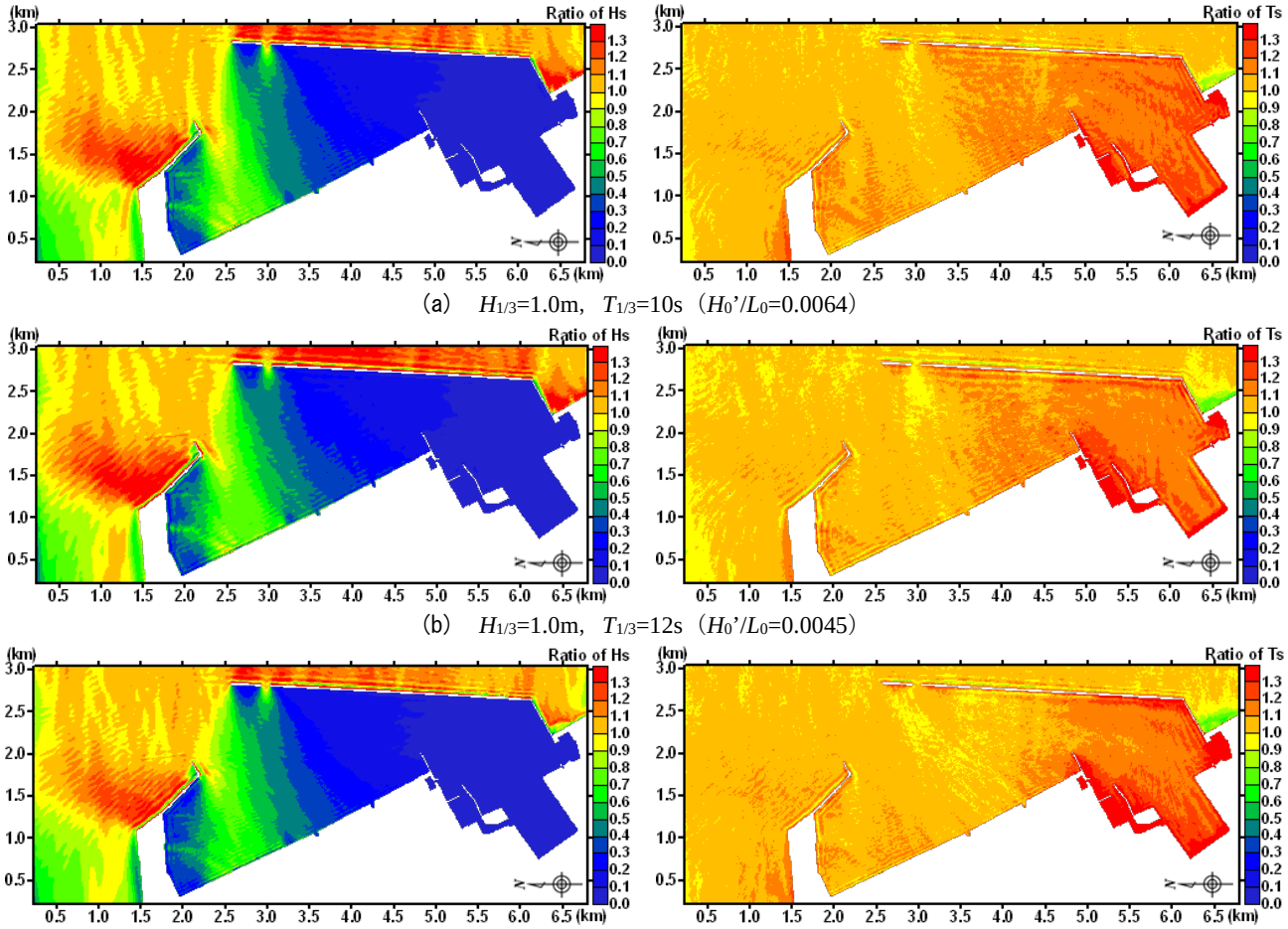
図-3.13 被災港形Ⅰにおける波高比・周期比の平面分布（波向E）（左側：波高比，右側：周期比）

b) 被災港形Ⅰ，Ⅱ

被災港形Ⅰでは，水面下2mまで没水したケーソンが矩形潜堤として機能することを考慮する．このため，没水ケーソンを海底地形の一部とみなし，この前後で急変する海底地形上に段差境界処理法を適用することにより，沈下ケーソンによる波浪変形を適切かつ安定に計算することとした．また，高波高時に天端上で生じる砕波現象は，前章及び前節で述べた断面・平面模型実験に対する再現計算と同様，1方程式乱流モデルによる砕波モデル[16)17)]を用いて算定した．ただし，隣り合う2辺に段差境界を有する計算格子への斜め入射波が卓越する波向では，計算の安定性を高めるために必要に応じ，流量Fluxの急変時にのみ一時的に人工粘性を付与した．

現況港形と同じ代表波浪が被災港形Ⅰ及びⅡに入射した場合の波高比，周期比の平面分布を**図-3.13**及び**図-3.14**に示す．また，各代表波浪諸元に対し，岸壁前面で算定された平均波高比・周期比の波向変化を**図-3.12**(b)(c)に示す．

ケーソン消失により港口が拡大した被災港形Ⅱはもちろん，一部が潜堤化した被災港形Ⅰでも砕波し難い$H_{1/3}$ = 1.0mのケースでは，波高比の平面分布図で確認されるように現況港形に比べ港内に多くの波が入射し，岸壁前面での平均波高比が増大した．一方，岸壁前面の平均周期比について，同様に現況港形に比べ被災箇所から港外波浪が多く入射する被災港形ⅡではSよりの波向で回折による増大が弱まるのに対し，潜堤上で波の分裂・砕波が生じる被災港形Ⅰでは被災港形Ⅱに比べ，波向Eでは減少，その他の波向では増加する傾向にある．また，周期比の平面分布図をみると，波向Eでは潜堤背後の比較的広い範囲で入射波の周期が約80 %に短周期化することが確認できるが，他の波向では範囲が縮小し，岸壁前面にまでは及んでいない（**付図C-5～C-8**）．なお，入射波向に沿って潜堤背後で波が短周期化する傾向は前節で述べた平面模型実験結果（例えば，**付図B-6**）でも確認されている．



(a)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）

(b)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

(c)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

図-3.14　被災港形Ⅱにおける波高比・周期比の平面分布（波向 E）（左側：波高比，右側：周期比）

(2)　被災港形に残存する港内静穏度の評価

ここでは，岸壁前面での平均波高比・周期比をもとに港内波浪出現頻度及び荷役稼働率を推定して，被災港形に残存する港内静穏度の成因について考察する．

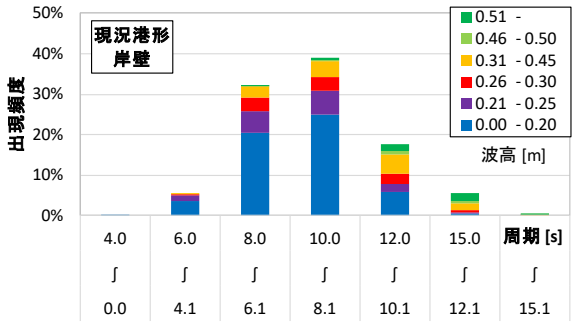
a)　被災前後の波浪出現頻度

図-3.12に示す波向毎の平均波高比・周期比の計算結果を用いて，**図-3.10**に示す観測波浪出現頻度を各港形における岸壁前面での波浪出現頻度に変換した結果を，**図-3.15**に示す．ここで，$H_{1/3}$ = 1.0～2.5mかつ$T_{1/3}$ = 8～12sの観測波諸元に対する平均波高比・周期比は線形内挿補間により算出し，この範囲外では外縁での値を与えることとした．また，波向NE～ENE～E～ESEの範囲では隣接する2波向間で線形補間し，波向NEよりN寄り及び波向ESEよりS寄りではそれぞれ波向NE，ESEでの値を与えた．

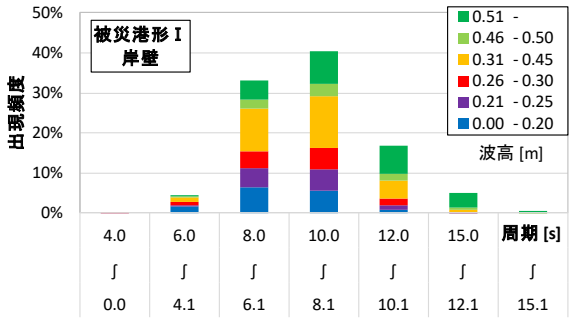
前項で述べた平均波高比・周期比の変化傾向に対応して，被災港形Ⅰ及びⅡでは現況港形に比べ，各周期ランクとも大きな波高ランクの出現頻度が増加していることが図より読み取れる．また，長い周期ランクの出現頻度が減少する傾向は被災港形Ⅰ及びⅡで共通にみられるが，被災港形Ⅰでは同時に大きな波高ランクの出現頻度が減少しており，潜堤上で砕波する効果が表れたものと推測される．なお，被災港形Ⅰで確認された波の分裂による短周期化が周期別の出現頻度にさほど表れない理由は，波向Eを除く他の分裂波は岸壁に到達し難いためである．なお，被災港形Ⅱの周期別の頻度分布は観測波浪に近い．

b)　被災前後の荷役稼働率

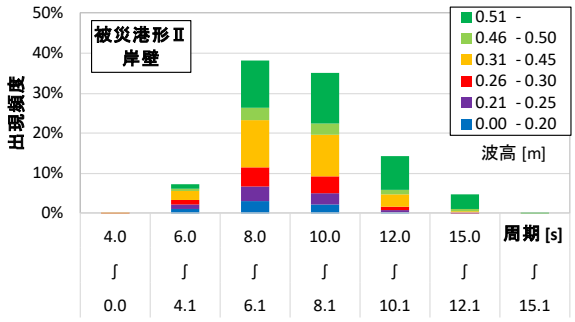
対象船舶・岸壁における荷役稼働率は，周期毎に異なる荷役限界波高を用いる標準解析法[18]に基づき算定した．対象岸壁を利用する鉱石運搬船50,000DWTに対する荷役限界波高の提案値を**表-3.2**に示す．ここで，波向には岸壁から港口を見通す角度（15°）及び隣接する港内護岸からの反射波の波向（60°）の2通りを採用した．



(a)　現況港形



(b)　被災港形 I



(c)　被災港形 II

図-3.15　岸壁前面で推定された波浪出現頻度

表-3.2　対象船舶の荷役限界波高（単位：m）[18)]

船型 [DWT]	波向 [deg]	有義波周期 [s]					
		4	6	8	10	12	15
鉱石運搬船 50,000	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	60	0.50	0.50	0.45	0.30	0.25	0.20

表-3.3　各港形に対する荷役稼働率

対象船舶	波向	現況港形	被災港形 I	被災港形 II
鉱石運搬船 50,000 DWT	15°	95.5%	75.3%	61.2%
	60°	79.0%	47.2%	38.1%

これらを**図-3.15**に示す岸壁前面での波浪出現頻度に当てはめ算定された各港形での荷役稼働率を**表-3.3**に示す．岸壁に係留された対象船舶に対し，港口からの入射波が直接作用する場合，現況港形での荷役稼働率（95.5%）は被災港形 II では61.2%に悪化するが，ケーソンが沈下した被災港形 I では75.3%が確保される．このとき荷役限界波高は周期によらず0.5m一定であるから，これらの荷役稼働率には波高ランク毎の出現頻度が大きく影響している．一方，港内護岸からの反射波が作用する場合には，現況港形での荷役稼働率（79.0%）は被災港形 II では38.1%に悪化するが，被災港形 I では47.2%が確保される．このときの荷役限界波高は周期が長いほど低くなるため，波の短周期化によって長い周期ランクの出現頻度が少なくなればその分，荷役稼働率の向上が期待される．本研究では，潜堤による波の分裂が被災港形 I の静穏度確保にどれほど寄与しているかを明確に示すまでには至らなかったものの，いずれにしても対象船舶・岸壁での荷役稼働率は被災港形 II ＜被災港形 I ＜現況港形の順に有意に変化し，被災港形 I で考慮した没水ケーソンによる静穏度低下の緩和効果が定量的に確認された．

4. まとめ

本研究では，沈下し水没したケーソン堤をイメージした不透過の矩形潜堤及び空隙率が異なる通常の潜堤をイメージした透過・不透過の台形潜堤を対象として，様々な波浪条件に対する断面模型実験を系統的に行い，潜堤前後の波高・周期の変化に着目して不規則波の変形特性を把握した．また，このうち代表的な波浪条件での直入射波，斜め波及び多方向波を対象として，不透過の矩形・台形潜堤による平面波浪変形実験を実施した．さらに，ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）を用いてこれらの断面・平面模型実験結果に対する再現計算を行い，その適用性について検証するとともに，離散的にしか得ることのできない潜堤周りの波浪変形実験結果を補完した．なお，急激な水深変化部を有する矩形潜堤周りの波浪変形をも安定に計算できるよう，本研究では合わせて「段差境界処理法」を新たに開発・導入した．

不透過潜堤では，砕波直前の非砕波時（天端上水深が換算沖波波高の2倍程度のとき）に不規則波の有義波周期が潜堤背後で最も顕著に短周期化することが確認された．これは，成分波間の非線形干渉により規則波に比べ効果的に波が分裂するが，砕波に至ると潜堤背後での自由波へのエネルギー移行が減少し，波の分裂が抑制されるためと推測された．また，これらの現象は矩形断面に比べ

砕波し難い台形断面でより顕著であり，砕波時の周期変化を除き，ブシネスクモデルによる再現性も良好であった．さらに，潜堤背後の平面波浪場では（屈折に伴う）波の収れんによる局所的な波高増大が生じるものの，矩形潜堤や多方向波ではこの傾向が弱まることが，段差境界処理法を用いた数値計算の再現性とともに確認された．加えて，矩形潜堤ではうねりの遮蔽効果も期待されるため，入射波に対して適切な諸元及び配置を有する不透過潜堤は波の短周期化を主目的とした静穏度対策工として機能する可能性が示唆された．

一方，透過潜堤では伝達波の短周期化はほとんどみられず，成分波間の非線形干渉が生じる前に透過構造による波のエネルギー減衰が生じたものと推測された．また，単層の透水層モデルを用いた再現計算では，透水層パラメータを調整する必要性が示唆された．

最後に，鹿島港外港地区の現況港形及び想定した2種類の被災港形における港内静穏度解析を実施し，南防波堤先端付近の未消波区間のケーソンが沈下または消失した場合に残存する波の遮蔽効果及び岸壁での荷役稼働率について検討した．沈下ケーソンは潜堤として機能し，波の分裂により背後の比較的広い範囲で伝達波の周期が約80%に短周期化した．また，標準解析法に基づき算定された対象船舶・岸壁での荷役稼働率は，砕波減衰などのために，ケーソンが完全に消失すると想定した場合に比べ10%程度高くなることが確認された．

5. おわりに

沖波の波形勾配と不透過潜堤上の相対水深をパラメータとした波高伝達率及び周期変化率の算定図は，潜堤による波浪変形特性（あるいは，水没した防波堤に残存する波浪制御機能）を示す新たな図表として，港湾設計の実務に資することが期待される．ここで，潜堤の法面勾配は1:2（台形潜堤）と垂直（矩形潜堤）の2種類を対象としたので，これらの中間の法面勾配を有する台形潜堤による波浪変形特性は，両者を対象とした算定図を内挿補間して類推することが可能である．また，台形潜堤の天端幅は現地量で20mと30mの2種類を対象とした．さらに，天端水深は天端幅20mに対し現地量で3.0mと4.5mの2種類を対象としたが，潜堤の法先水深は15mで一定としたため，矩形・台形潜堤ともに，どちらの算定図を用いるべきかは，法先から法肩へと至る波浪変形（分散特性の変化）過程が両者で異なることに留意して選択すべきである．

本研究で開発・導入した段差境界処理法は，様々な法面勾配を有する台形潜堤に加え，矩形潜堤による急激な海底地形の変化をもそのまま考慮できるよう技術基準で参照されるNOWT-PARIの適用範囲を拡張しただけでなく，複雑な海底地形を対象とした波浪変形計算のうち，特に浅海域における計算の安定性を高めるうえでも有益と考えられる．さらに，高潮等により水没した岸壁における波の遡上計算にもそのまま適用することができる[19]．

平面波浪場を含め，潜堤による防波性能を評価できる本研究で得られた知見及び計算ツールが，復旧前の港湾における利用上・防災上のリスク評価，あるいは離島港湾における新たな静穏度対策工の検討などに寄与できればまことに幸いである．

（2020年6月5日受付）

謝辞

港内静穏度解析の実施に当たっては，国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所から多大なるご協力を賜りました．ここに記し，謝意を表します．

参考文献

1) Goda, Y.: Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters, *Rept. of the Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.8, No.3, pp.3-18, 1969.
2) 合田良実，鈴木康正，岸良安治：不規則波浪実験とその特性について，第21回海岸工学講演会論文集，pp.237-242，1974.
3) 小島治幸，井島武士：没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究，海岸工学論文集，第36巻，pp. 529-533，1989.
4) 平山克也:ブシネスクモデルによる波浪変形計算の精度と現地適用性,2007年度(第43回)水工学に関する夏期研修会テキスト，B-7，土木学会海岸工学委員会，20p，2007.
5) 平山克也，長沼淳也，柴田邦善，森谷拓実：没水堤周辺での不規則波の波高及び周期の変化に関する考察，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol. 74，No. 2，pp. I_575-I_580，2018.
6) 土木学会海岸工学委員会，研究現況レビュー小委員会：海岸波動－波・構造物・地盤の相互作用の解析法－，pp. 146-148，社団法人土木学会，1994.
7) 榊山勉：透過潜堤上で砕波をともなう波の変形特性，海岸工学論文集，第42巻，pp. 771-775，1995.
8) 平山克也:ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発,海岸工学論文集，第48巻，pp. 26-30，2001.
9) 平山克也:透水層を用いた任意反射境界処理法の高精

度化と遡上計算への適用，海洋開発論文集，第22巻，pp.241-246，2006.
10) 田島芳満，小塚将之，大島香織：透過式潜堤による非砕波波浪の低減効果およびその評価手法について，海洋開発論文集，第21巻，pp.499-504，2005.
11) 平山克也，濱野有貴：水深が急変する浅海地形上の波浪変形計算に用いる境界処理法の提案，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.75，No.2，pp.I_271-I_276，2019.
12) Madsen, P.A. and O.R. Sørensen: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Engineering.*, 18, pp.183-204, 1992.
13) 平山克也，濱野有貴，長沼淳也：没水堤周辺での不規則波の分裂・屈折変形に関する平面模型実験とその再現計算，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.75，No.2，pp.I_763-I_768.
14) 平山克也，濱野有貴，山田宗拓：没水したケーソン堤に残存する波浪低減効果に着目した港内静穏度解析，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.76，NO.2（印刷中）.
15) 平山克也，岩瀬浩之，加島寛章：任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.I_11-I_15，2010.
16) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第51巻，pp.11-15，2004.
17) 宇野喜之，平山克也：乱れの生成・逸散過程に着目した砕波モデルの計算精度に関する考察，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.I_26-I_30，2012.
18) 財団法人沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.21，pp.15-28，付録A-7，2004.
19) 平山克也，長沼淳也，濱野有貴：高潮位時における岸壁上の越波遡上実験とその再現計算，土木学会全国大会，第74回年次学術講演会，II-67，2019.

付録A　段差境界処理法の導入効果に関する検討

本編2.1節で述べた実験結果によれば，天端上相対水深h_r/L_0=0.027（L_0は沖波波長）のとき，H_0'/L_0=0.010では矩形潜堤上で波が分裂し，背後の波高伝達率は0.85，周期変化率は0.79であった．また，H_0'/L_0=0.040では矩形潜堤上で砕波し，背後の波高伝達率は0.48，周期変化率は0.91であった．ここで，これらの波浪変形の特徴は台形潜堤でも同様にみられたため，本編2.2節では従来モデルの適用限界を考慮し，台形潜堤のみを対象に再現計算を実施した．一方，本編2.3節では，新たに段差境界処理法を導入した改良モデルを用いて，矩形潜堤を対象とした再現計算を実施した．そこで，ここでは，従来モデルでの計算が可能となるまで矩形潜堤前後を含む海底地形の平滑化処理を施した場合に，それらの計算結果が実験結果及び改良モデルによる計算結果とどの程度異なるかを確認し，段差境界処理法を導入した改良モデルの必要性について検討した．

有義波高・周期の空間分布を比較した結果を，**付図A-1(a)(b)**に示す．ここで，各プロット（○×）は実験で計測した各地点での波群毎の時系列波形，実線は改良モデル，点線は従来モデルによる計算で出力した各格子の時系列波形をそれぞれ波別解析して得た有義値である．なお，**付表A-1**に示すように，以下で述べる海底地形の平滑化回数：KAISUを除き，差分条件及び発散抑制レベルの設定は両モデルで共通とした．

海底地形の平滑化には次式を用い，計算領域全体にこれを繰り返し適用する回数を平滑化回数KAISU(=k)として定義した．**付図A-1(c)**に示す通り，従来モデルによる計算結果を得るためには，H_0'/L_0=0.010ではKAISU=7，H_0'/L_0=0.040ではKAISU=50の平滑化処理を行い，矩形潜堤を含む海底形状を改変する必要があった．なお，改良モデルではいずれもKAISU=0とし，矩形潜堤の形状をそのまま用いた．

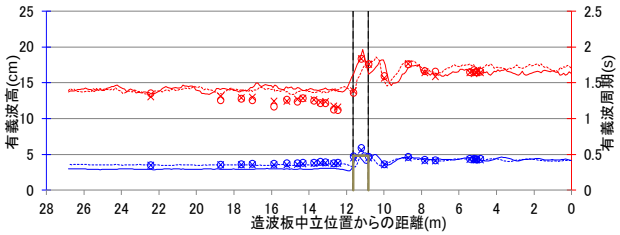
$$h_{i+1/2}^{k}=\left(h_{i-1/2}^{k-1}+2h_{i+1/2}^{k-1}+h_{i+3/2}^{k-1}\right)/4 \qquad \text{付式(1)}$$

従来モデルによる計算結果は，特に天端が下がるほどの平滑化を要したH_0'/L_0=0.040では十分な砕波が生じず，矩形潜堤による波高減衰や沖への反射が再現されていない．また，平滑化により天端幅が半減したH_0'/L_0=0.010では，潜堤上での波高・周期変化の位置にずれが生じている．一方，改良モデルによる計算結果は，実験結果で波の分裂が顕著に生じた波形勾配H_0'/L_0=0.010では潜堤背後

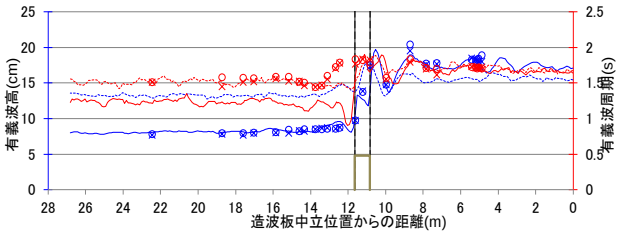
付表 A-1　導入効果の検討に用いた計算条件

計算条件	従来モデル		改良モデル	
	断面2 (h_r/L_0=0.027)		断面2 (h_r/L_0=0.027)	
	H_0'/L_0=0.010	H_0'/L_0=0.040	H_0'/L_0=0.010	H_0'/L_0=0.040
差分格子間隔: Δx [m]	0.05 (=L_0/90)			
差分時間間隔: Δt [s]	1E-04 (=T_0/17000)			
地形の平滑化回数: KAISU	7	50	0	0
発散抑制レベル:LABEL	0	1	0	1

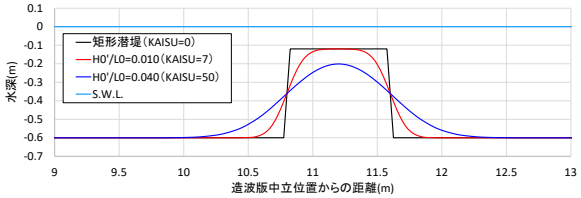
（備考）LABEL=1:Flux急変部に人工粘性を付与



(a)　分裂（H_0'/L_0=0.010）

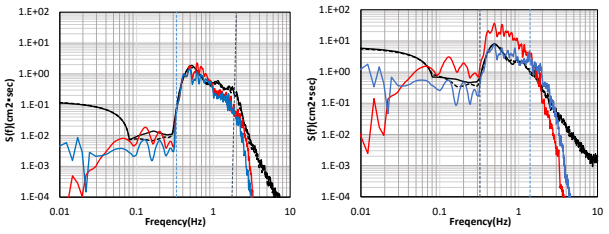


(b)　砕波（H_0'/L_0=0.040）



(c)　矩形潜堤とその前後の海底地形

付図 A-1　矩形潜堤前後の波高・周期分布（h_r/L_0=0.027）
（○×：実験，実・点線：計算，青：波高，赤：周期）



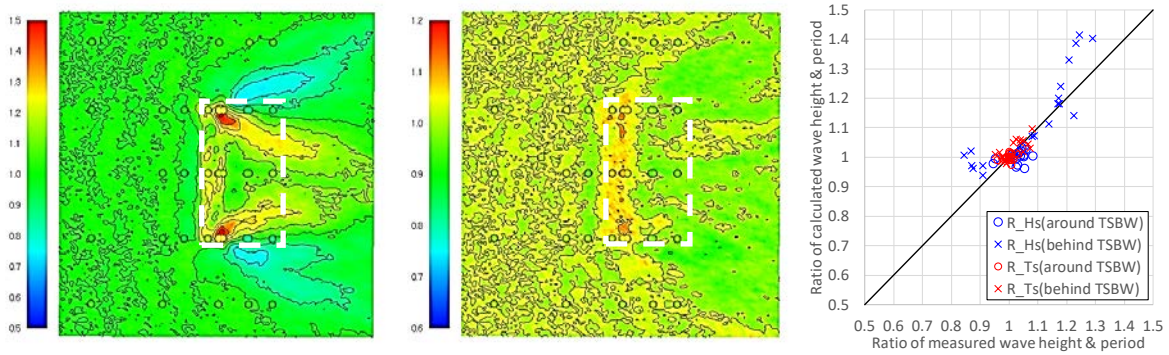
(a)　分裂（H_0'/L_0=0.010）　(b)　砕波（H_0'/L_0=0.040）

付図 A-2　矩形潜堤前後の周波数スペクトル（h_r/L_0=0.027）
（黒線：既往実験，赤線：従来モデル，青線：改良モデル）

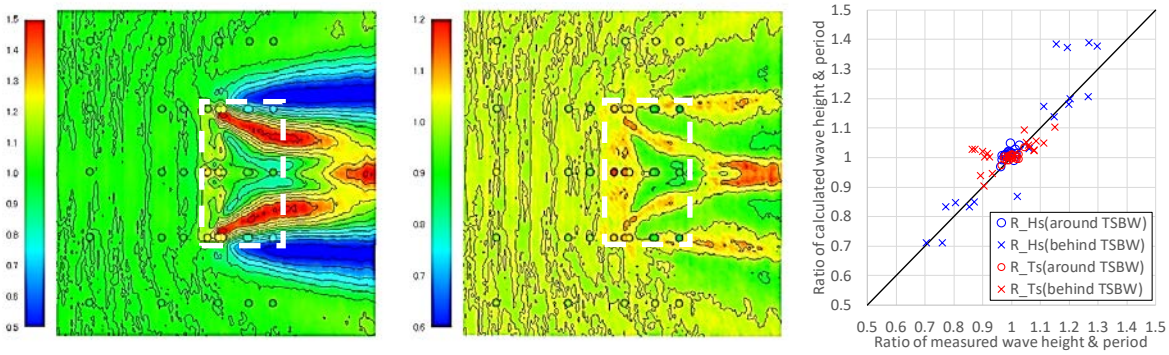
で有義波高がやや過小，有義波周期がやや過大であるが，それらの変化傾向は比較的よく再現している．また，顕著な砕波がみられた波形勾配H_0'/L_0=0.040では短周期化が過大に生じているものの，砕波による波高減衰はよく再現できている．なお，砕波時の過大な短周期化は段差境界処理を必要としない台形潜堤に対する既往の再現計算結果でも同様に見られたため，むしろ砕波変形の再現性に関する課題であることが疑われる．そこで，**付図A-2**に示す矩形潜堤背後での周波数スペクトルの比較図をみると，台形潜堤と同様，改良モデルによる計算結果では砕波時に短周期波成分のエネルギーが一時的に増大していることが確認できる．したがって，この原因は砕波が遅れ計算が不安定になる砕波判定の不具合と考えられるが，この改善に向けた検討は今後の課題である．

付録B　潜堤周辺の波浪変形とその再現性

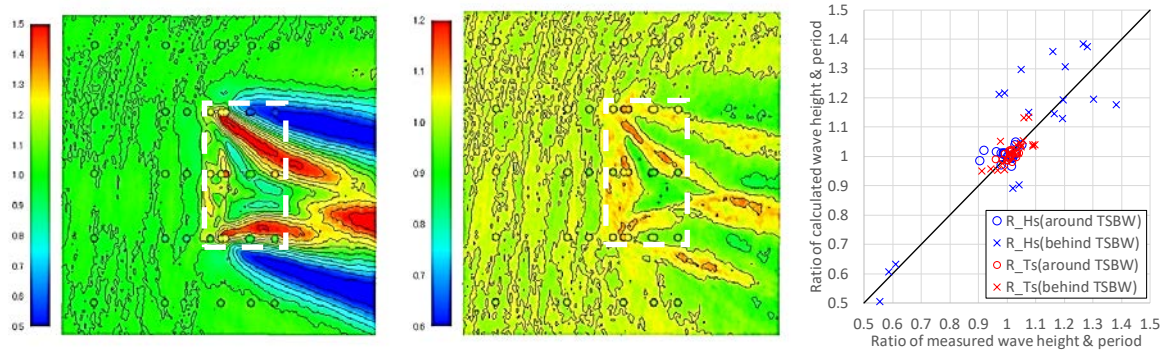
B-1.　台形潜堤



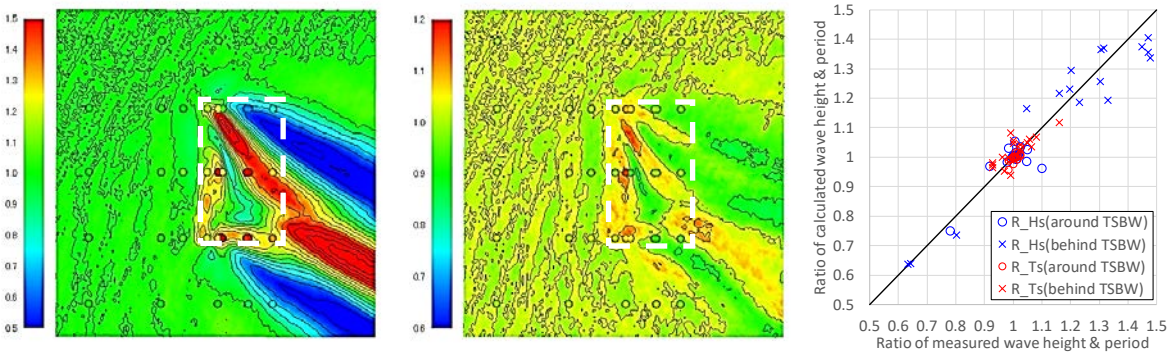
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波

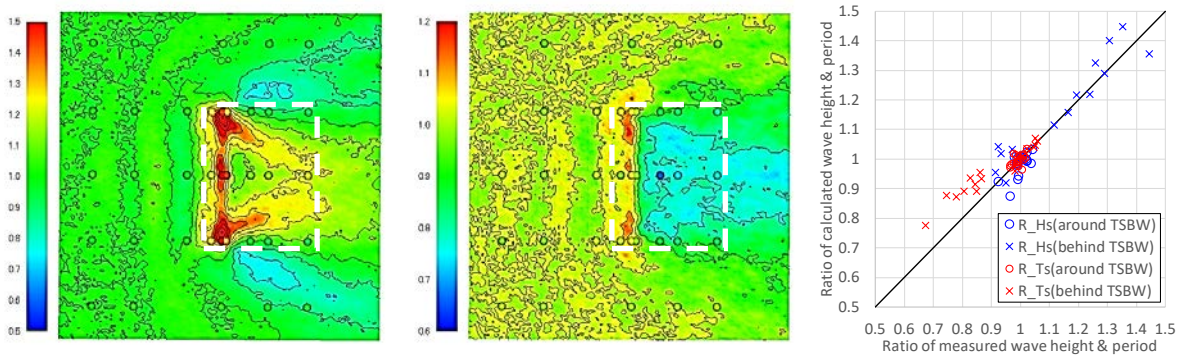


(c)　波向 15°，一方向波

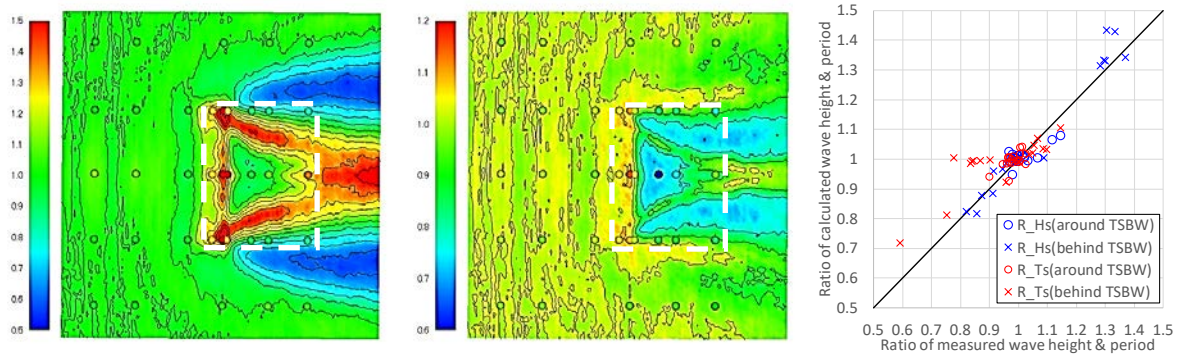


(d)　波向 30°，一方向波

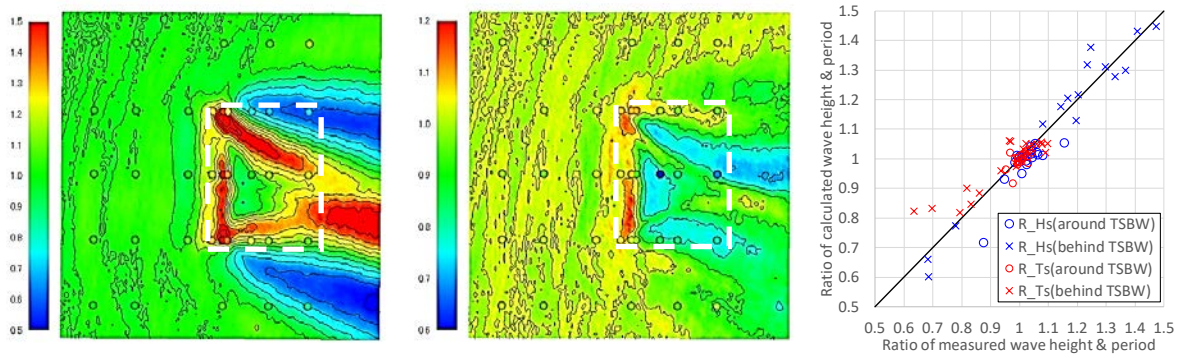
付図 B-1　台形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=1.2s）



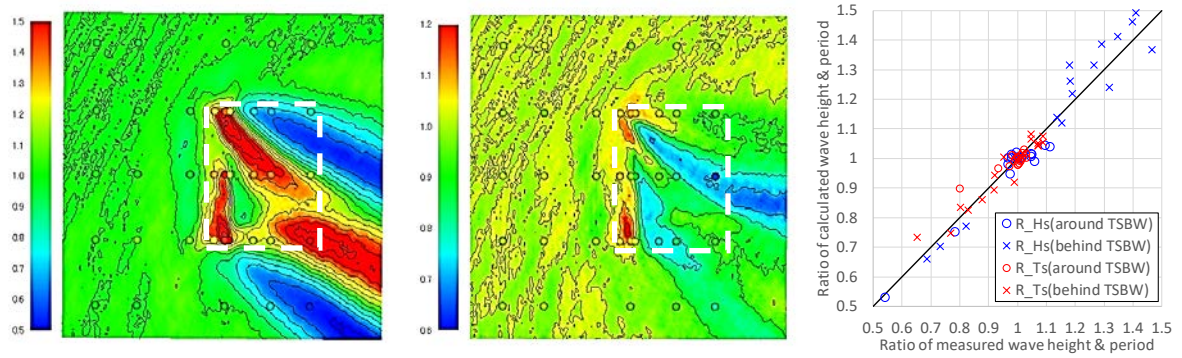
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波

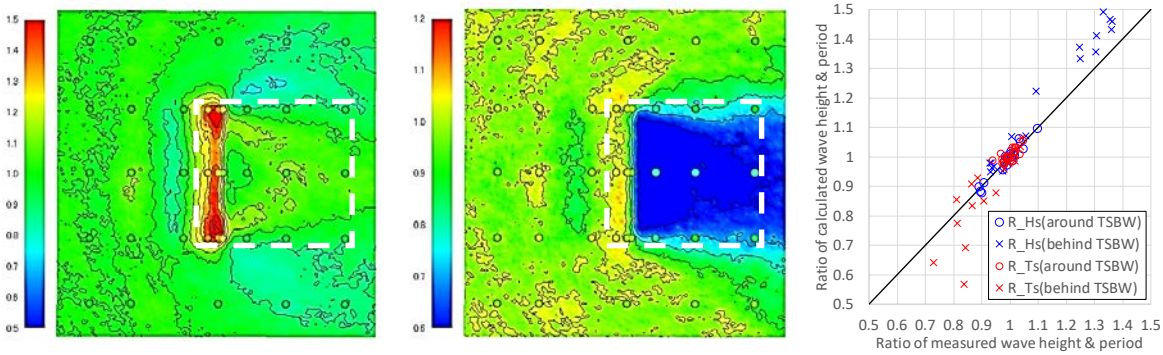


(c)　波向 15°，一方向波

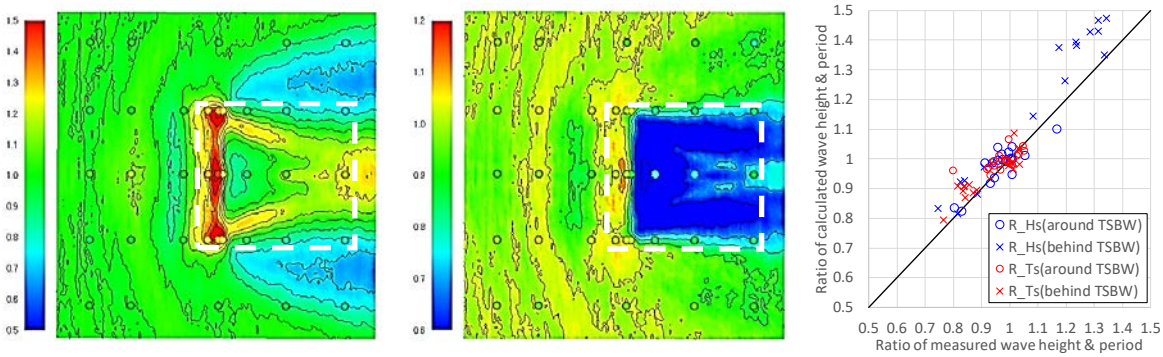


(d)　波向 30°，一方向波

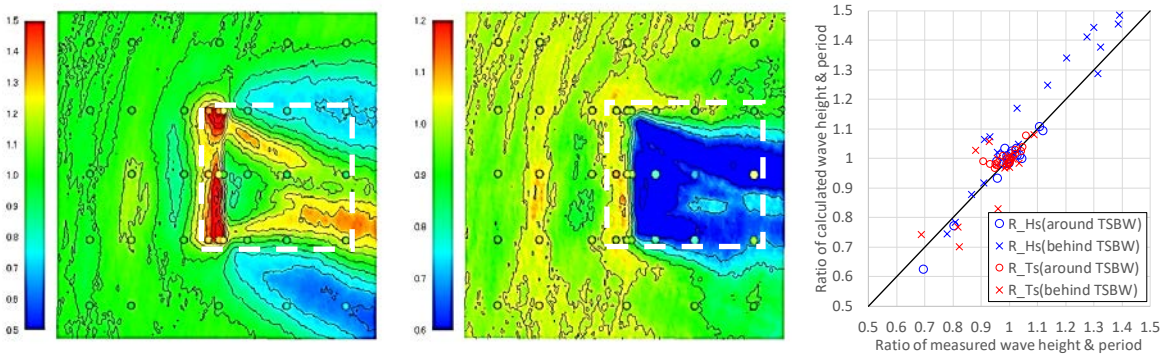
付図 B-2　台形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=1.7s）



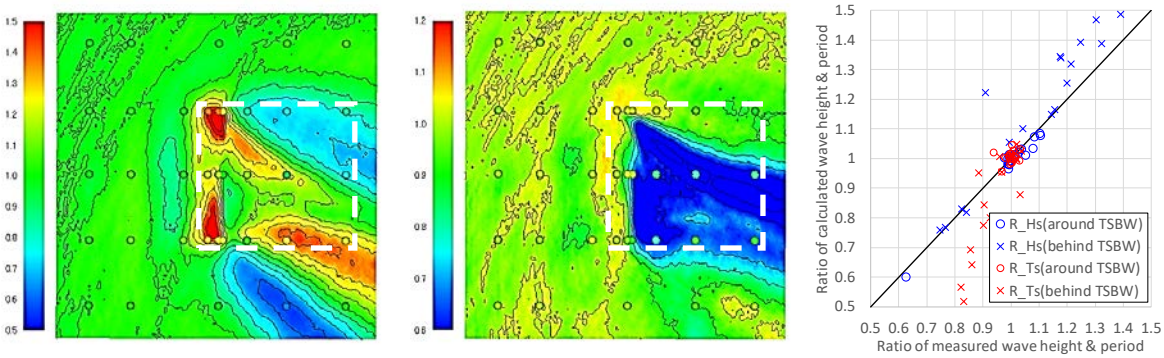
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波



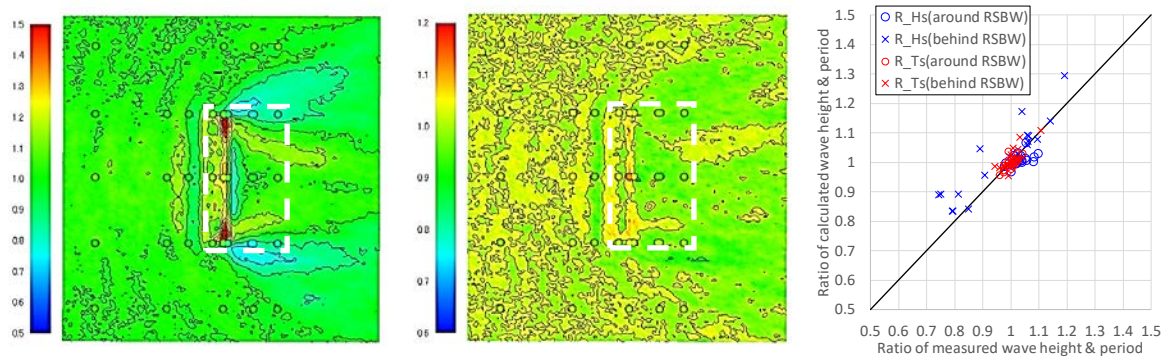
(c)　波向 15°，一方向波



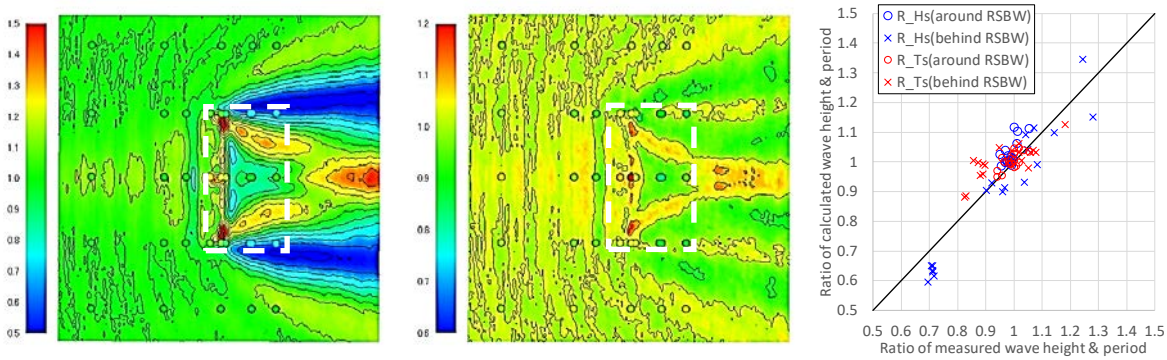
(d)　波向 30°，一方向波

付図 B-3　台形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=2.4s）

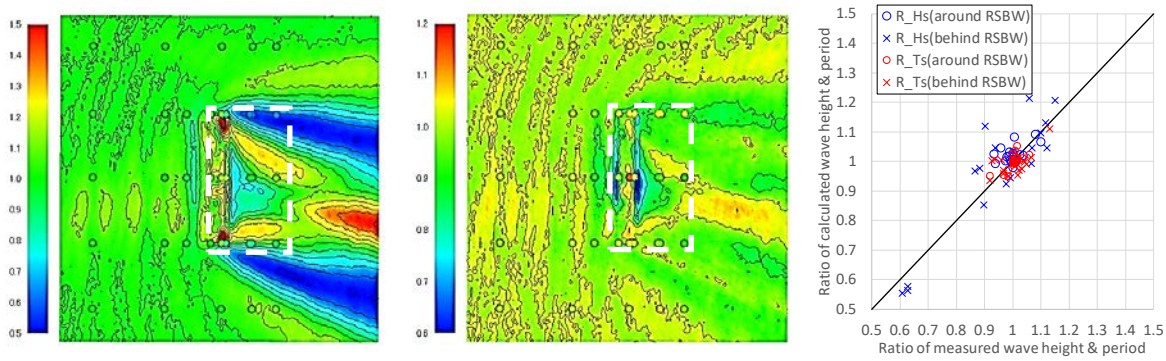
B-2.　矩形潜堤



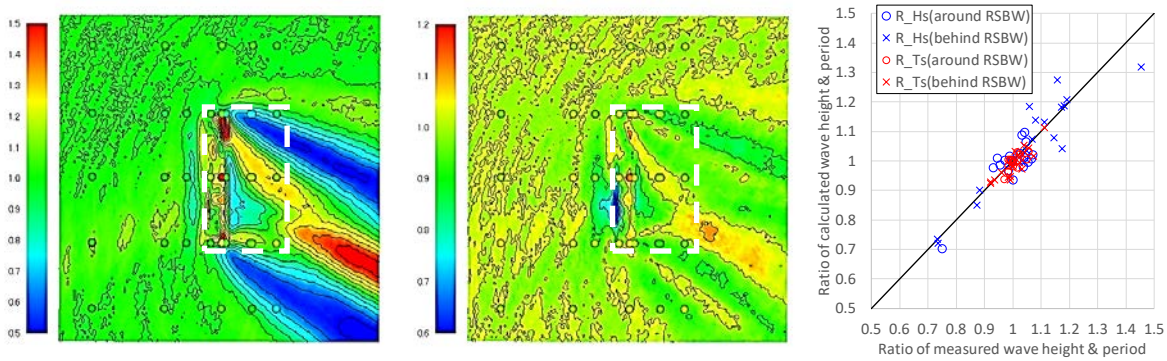
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波

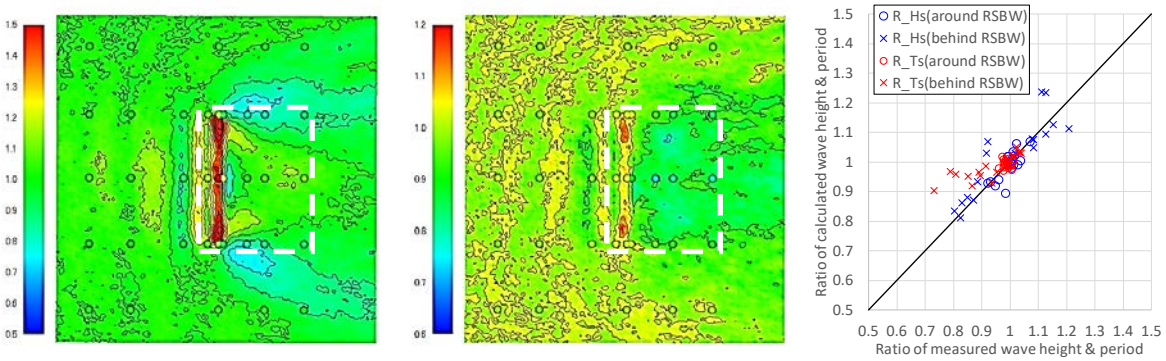


(c)　波向 15°，一方向波

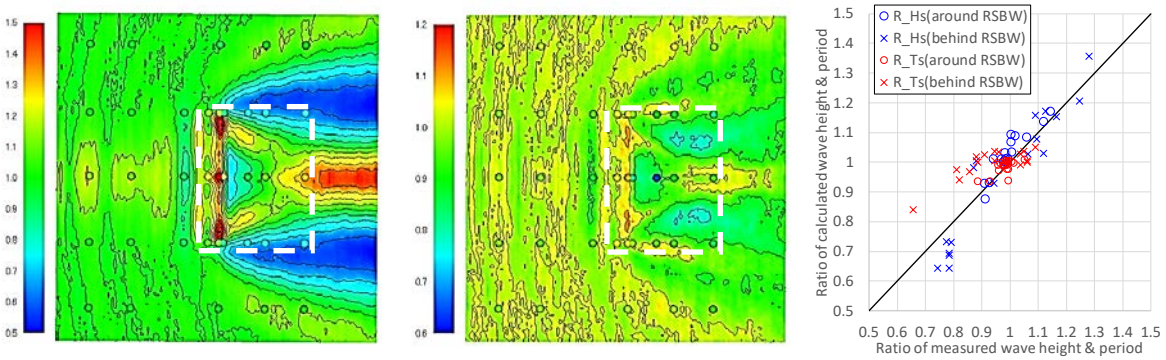


(d)　波向 30°，一方向波

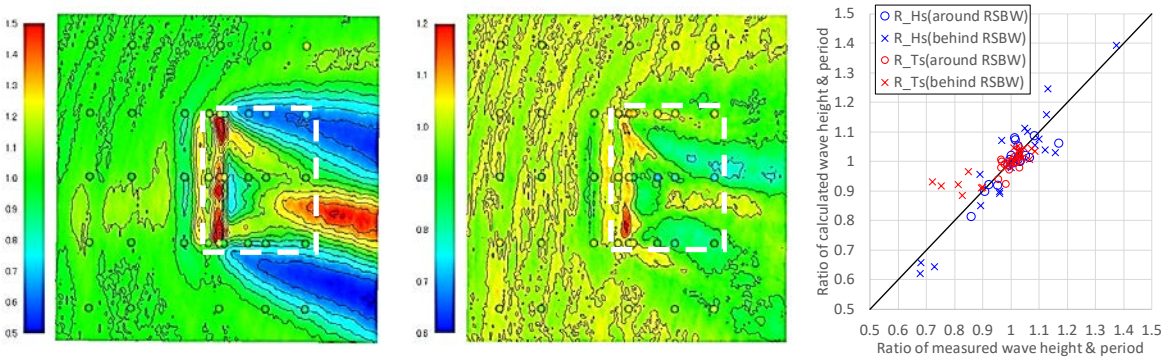
付図 B-4　矩形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=1.2s）



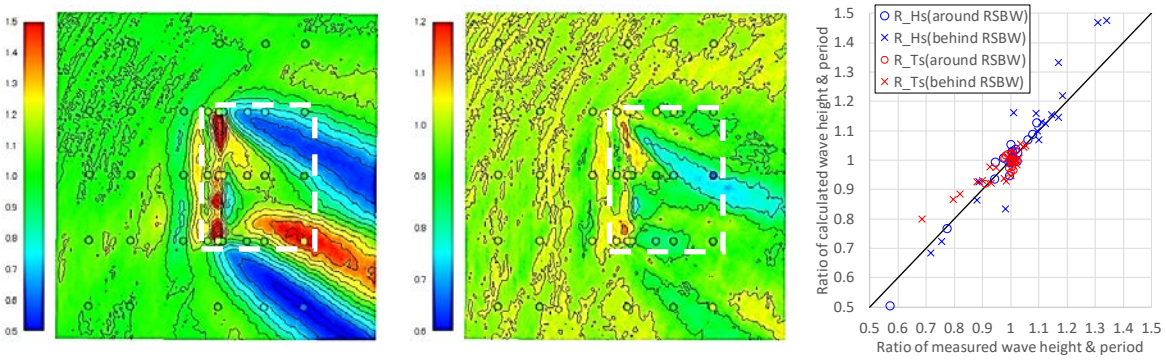
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波

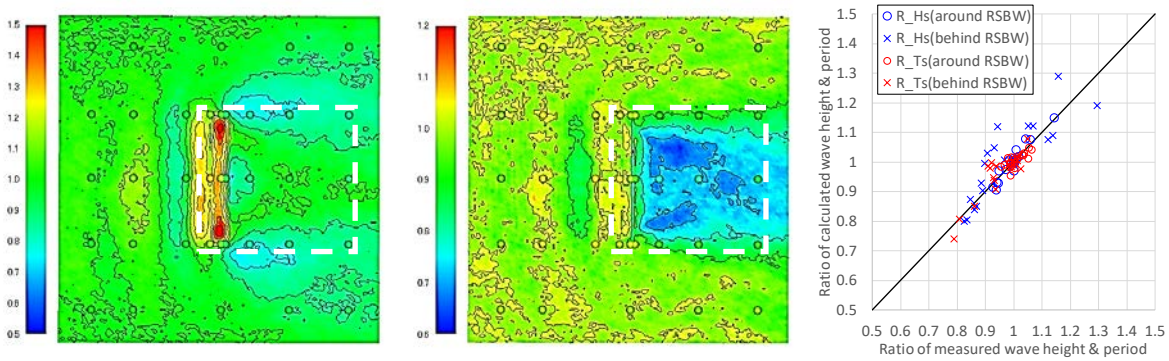


(c)　波向 15°，一方向波

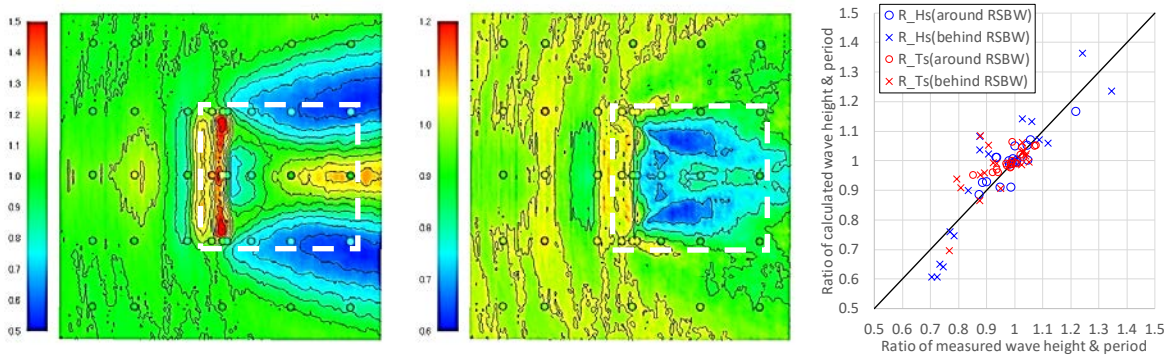


(d)　波向 30°，一方向波

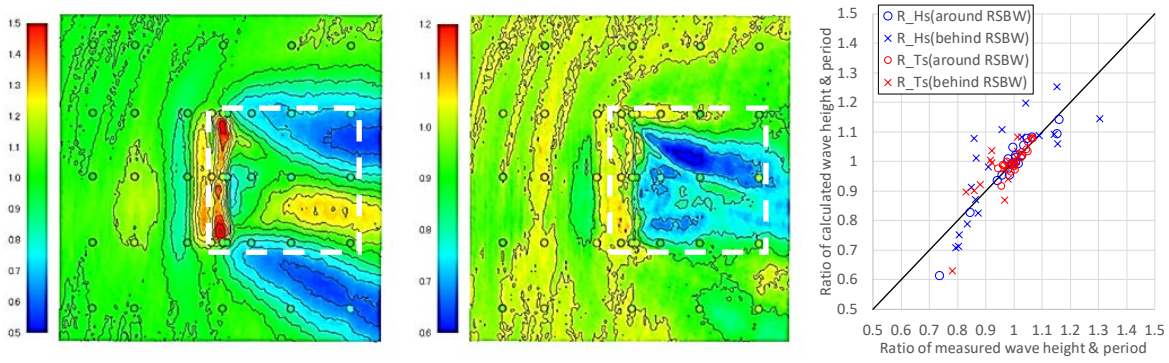
付図 B-5　矩形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=1.7s）



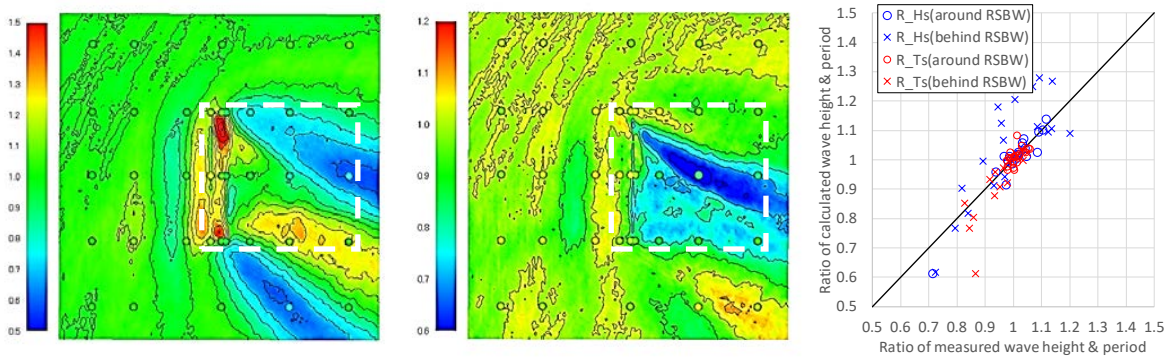
(a)　波向 0°，多方向波



(b)　波向 0°，一方向波



(c)　波向 15°，一方向波

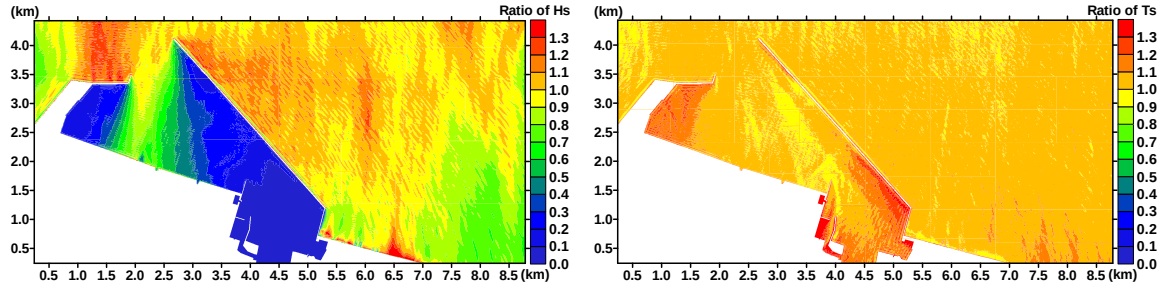


(d)　波向 30°，一方向波

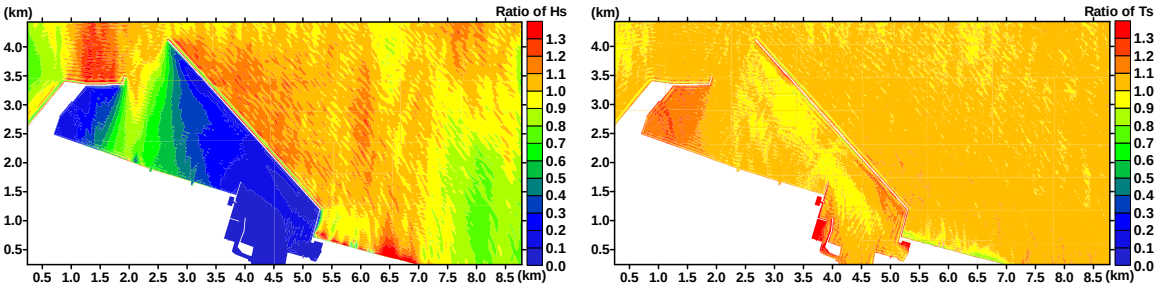
付図 B-6　矩形潜堤周辺の波浪変形とその再現性（左：波高比，中：周期比，下：実験値と計算値）（H_0'/L_0=0.010，T_0=2.4s）

付録C　鹿島港における波高比・周期比の平面分布

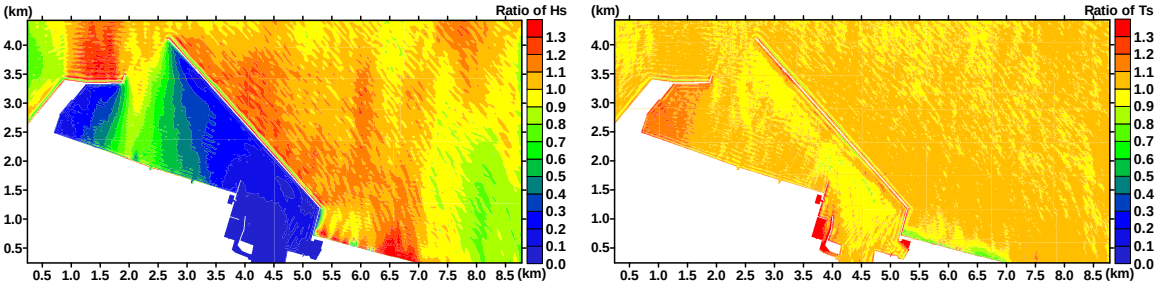
C-1.　現況港形



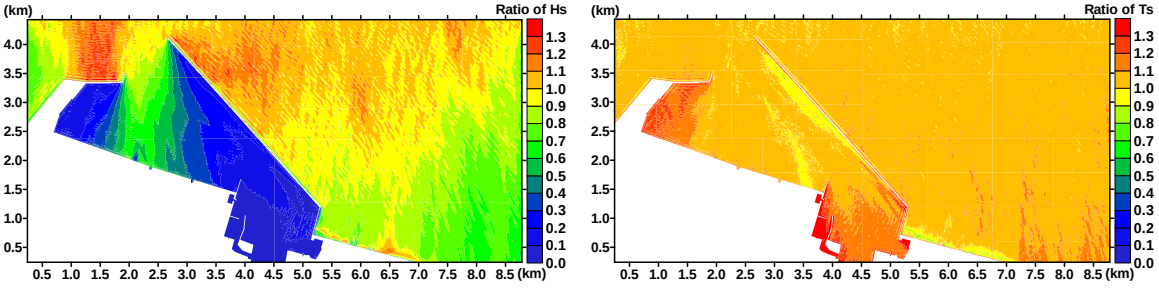
(a)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



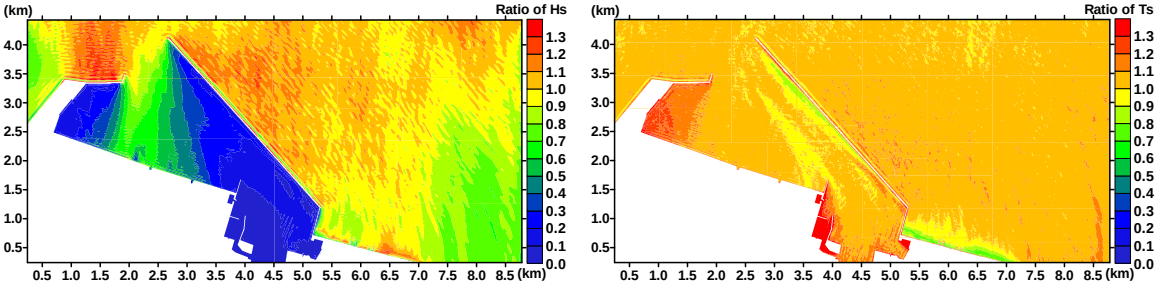
(b)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

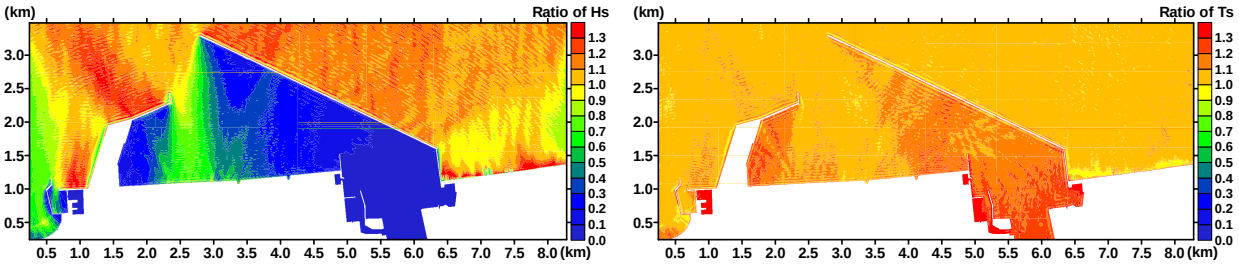


(d)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

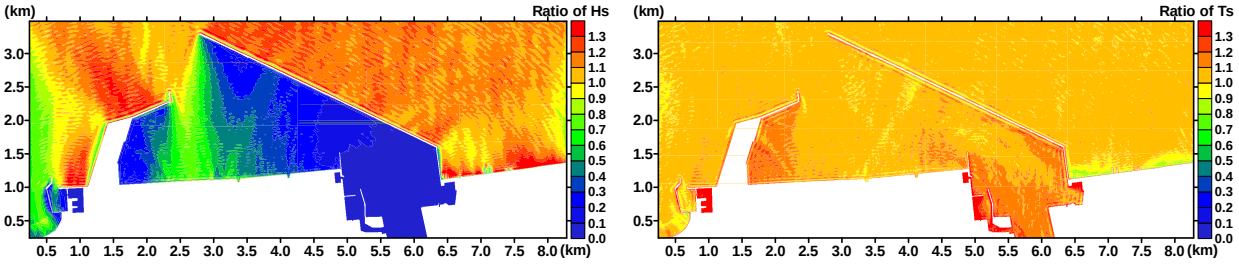


(e)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

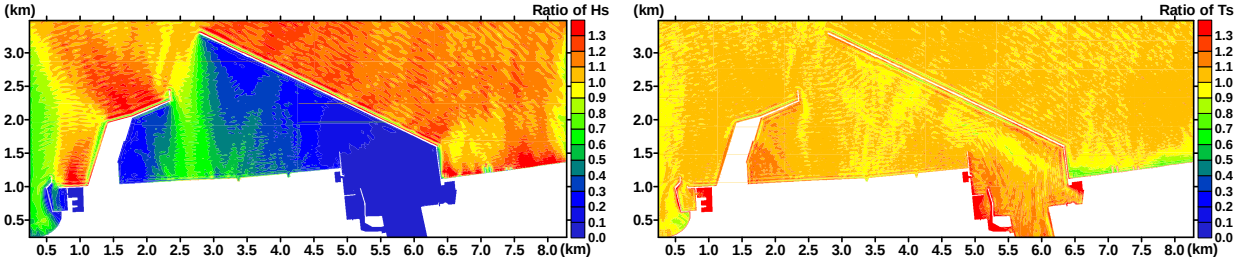
付図 C-1　現況港形における波高比・周期比の平面分布（波向 NE）（左側：波高比，右側：周期比）



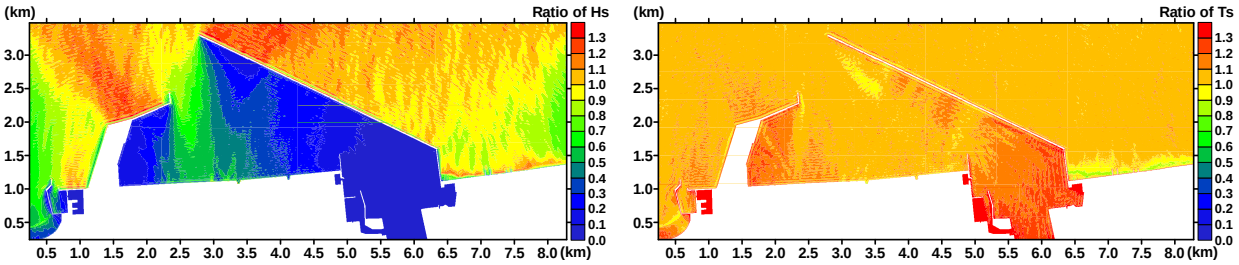
（a）　$H_{1/3}$=1.0m，　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



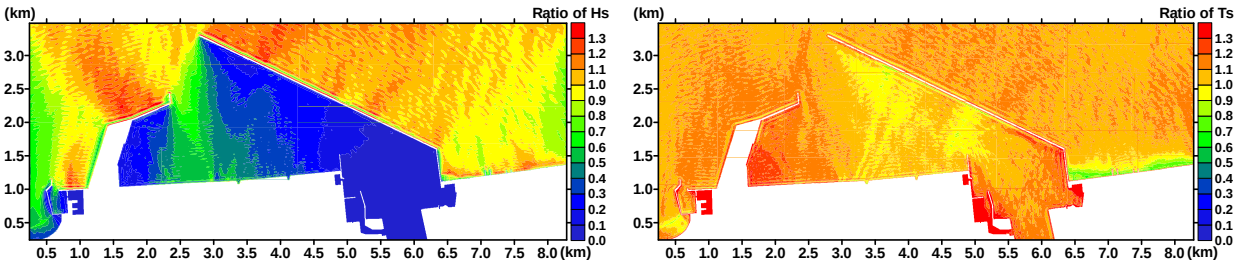
（b）　$H_{1/3}$=1.0m，　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



（c）　$H_{1/3}$=1.0m，　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

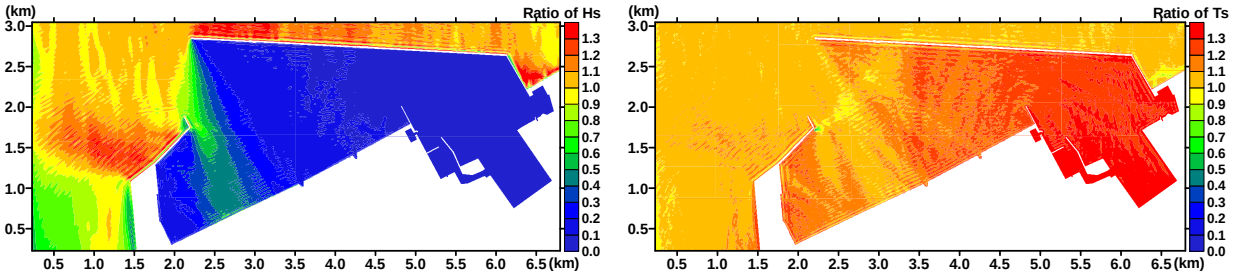


（d）　$H_{1/3}$=2.5m，　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

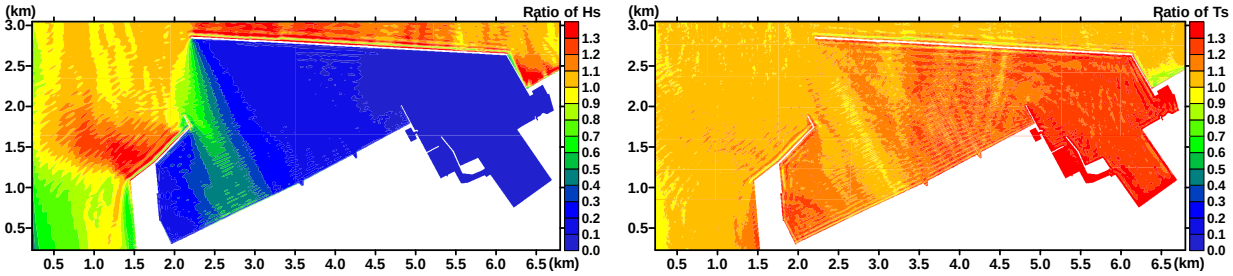


（e）　$H_{1/3}$=2.5m，　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

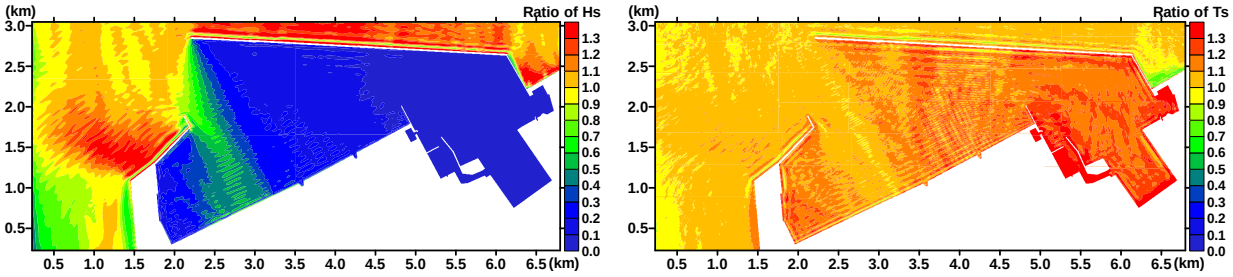
付図 C-2　現況港形における波高比・周期比の平面分布（波向 ENE）（左側：波高比，右側：周期比）



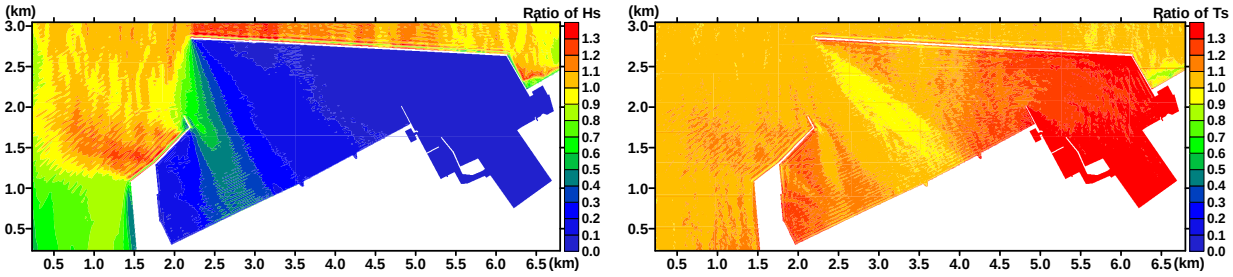
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



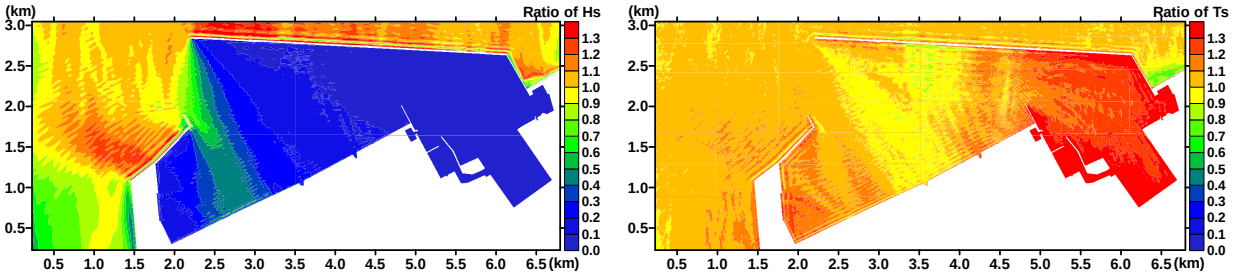
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

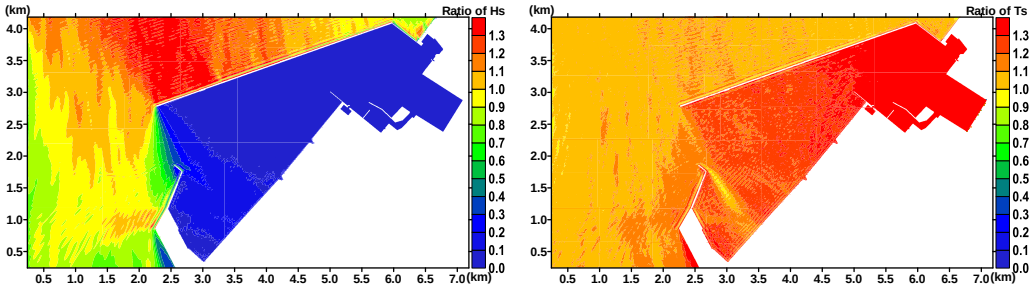


(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

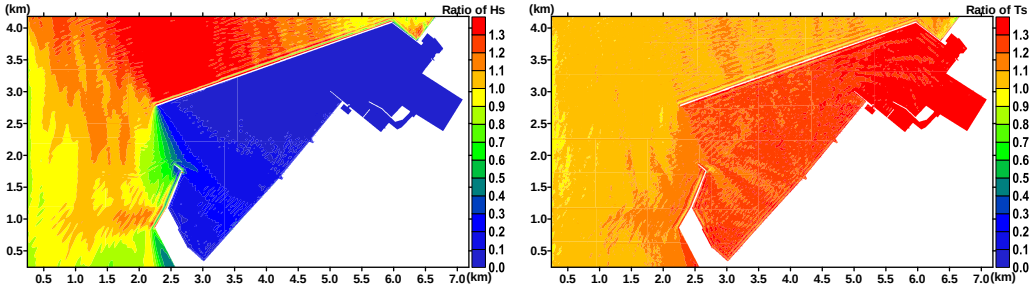


(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

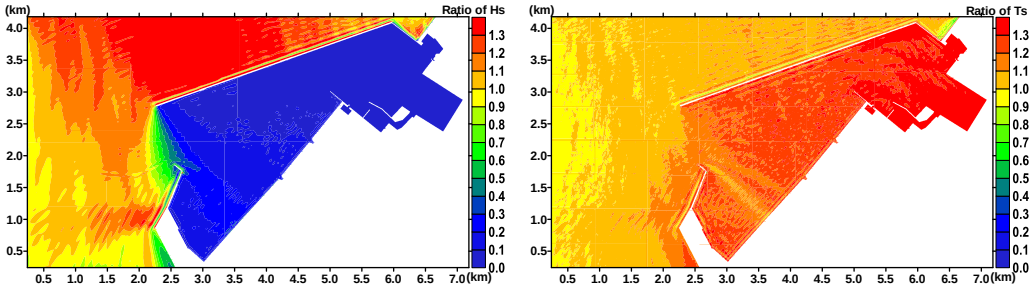
付図 C-3　現況港形における波高比・周期比の平面分布（波向 E）（左側：波高比，右側：周期比）



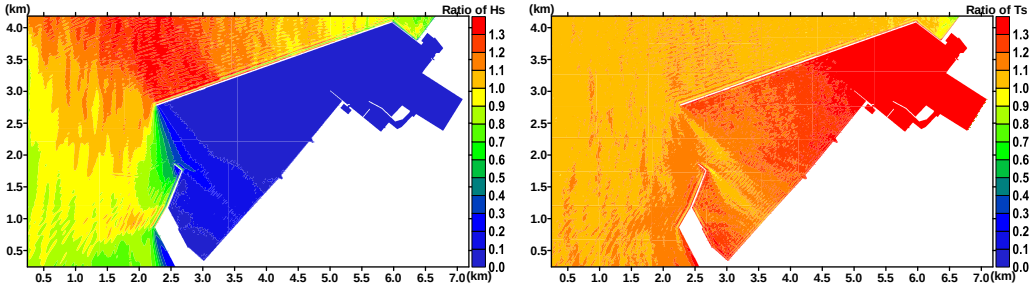
(a)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



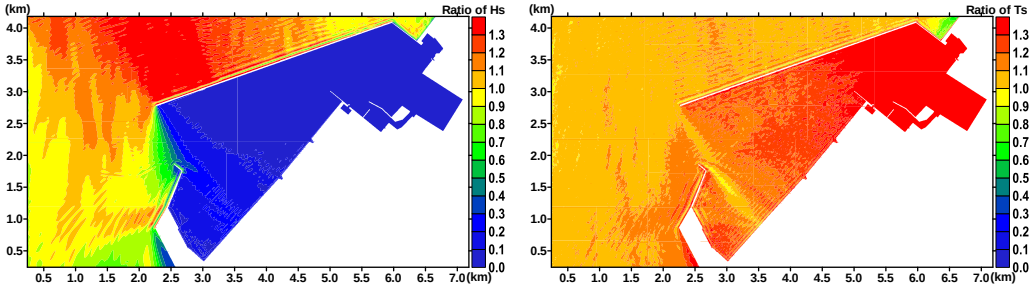
(b)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）



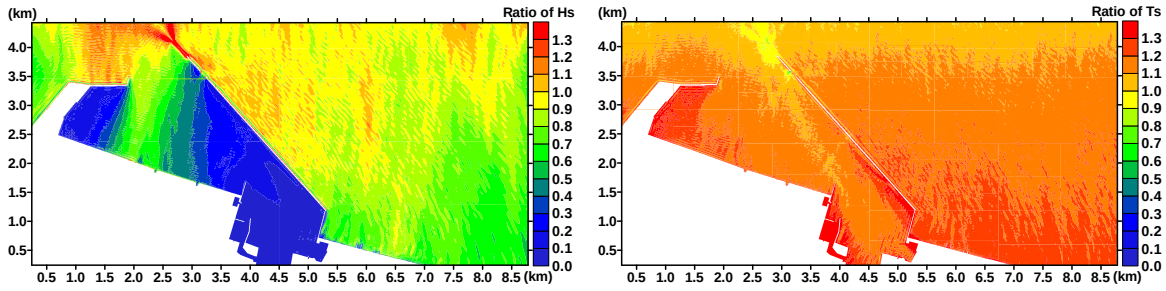
(d)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）



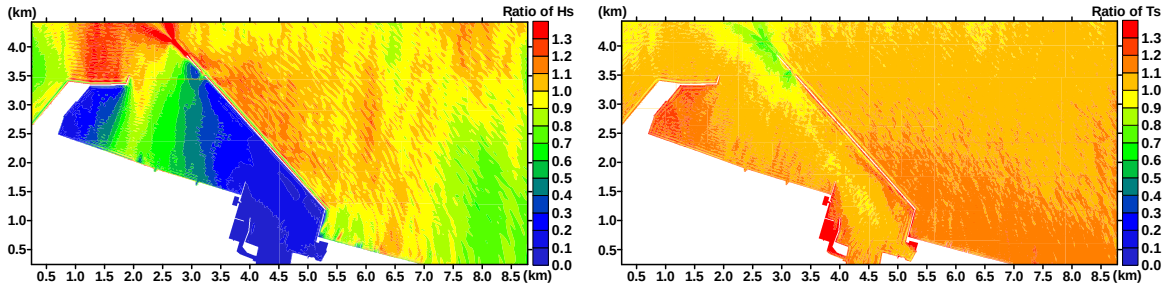
(e)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

付図 C-4　現況港形における波高比・周期比の平面分布（波向 ESE）（左側：波高比，右側：周期比）

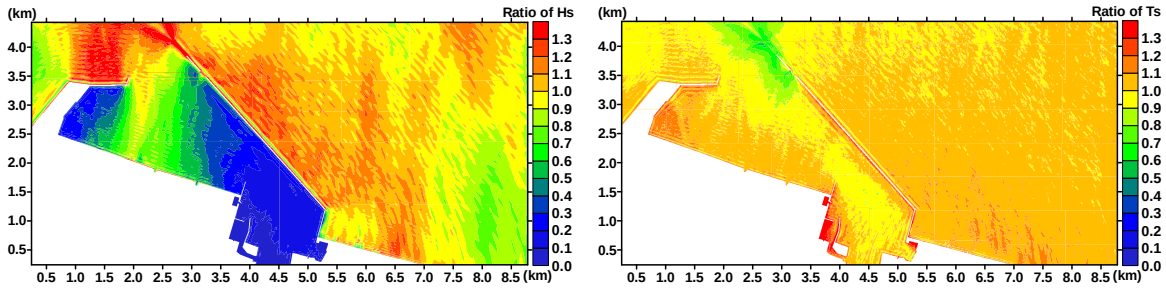
C-2. 被災港形Ⅰ（防波堤ケーソンの一部が沈下）



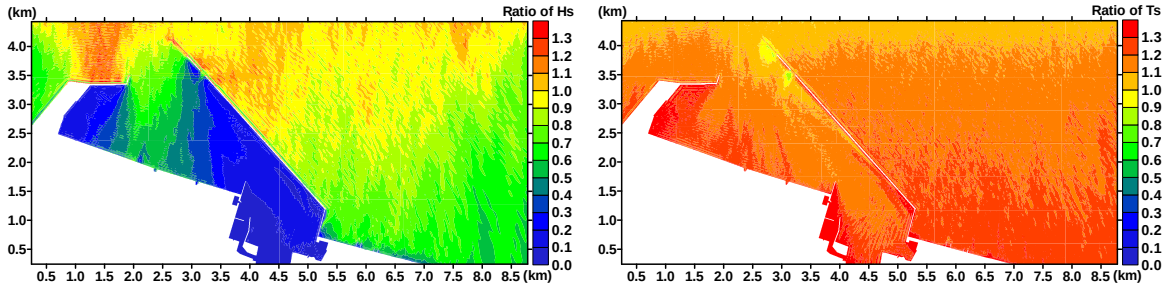
(a) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



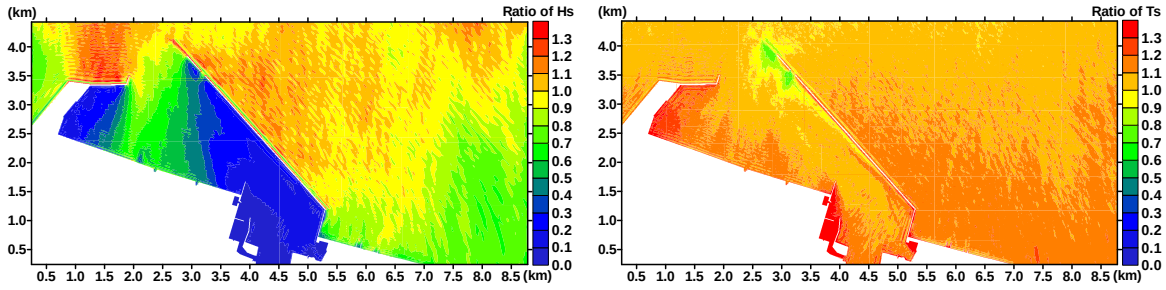
(b) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

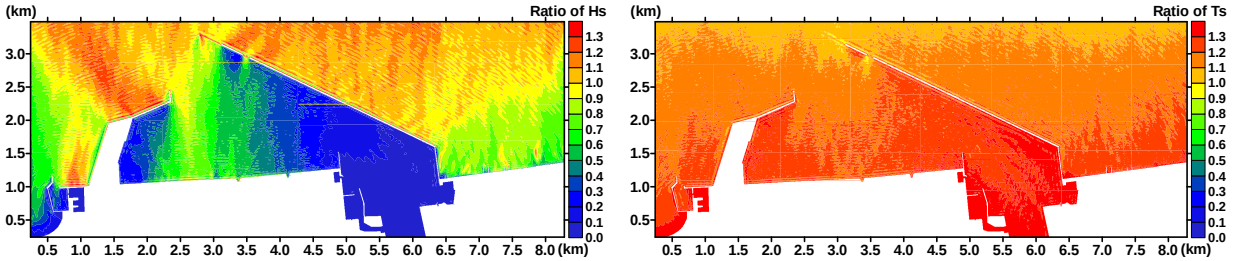


(d) $H_{1/3}$=2.5m, $T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

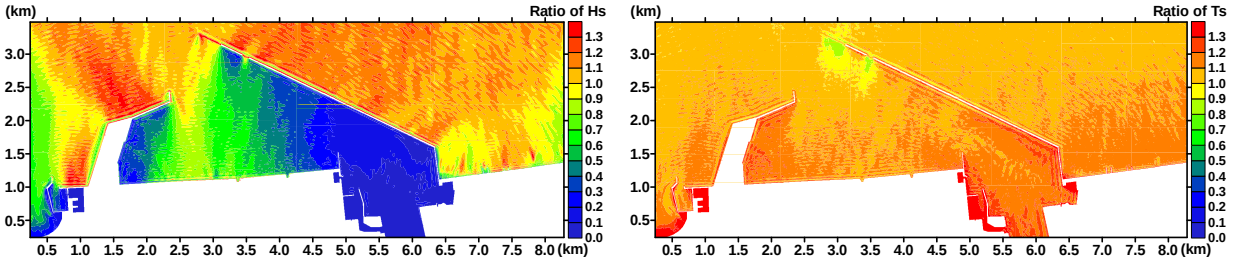


(e) $H_{1/3}$=2.5m, $T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

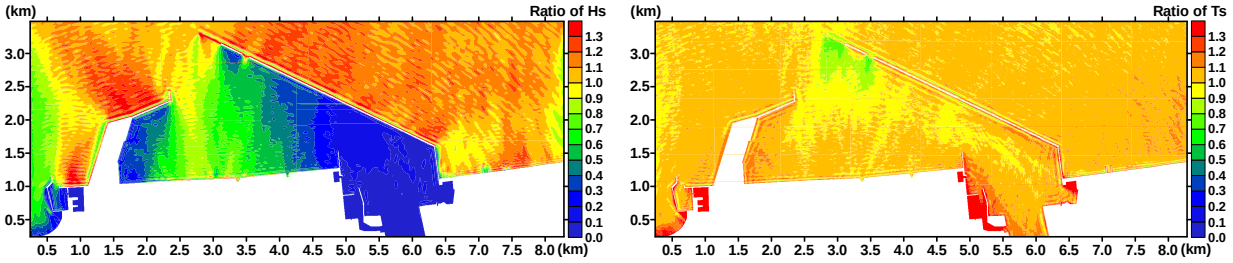
付図 C-5 被災港形Ⅰにおける波高比・周期比の平面分布（波向 NE）（左側：波高比，右側：周期比）



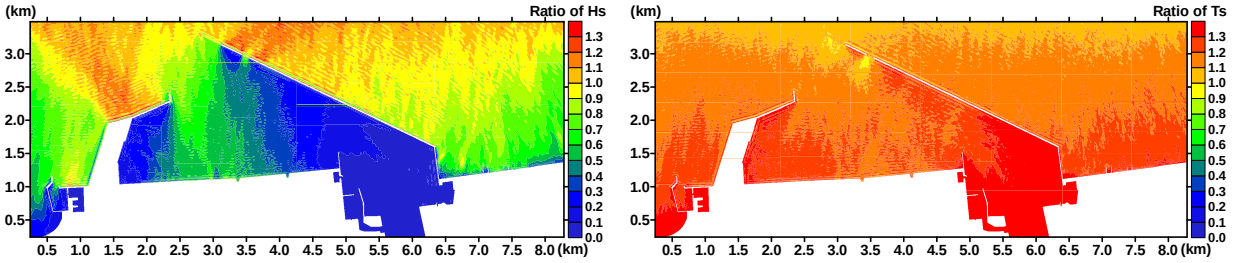
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



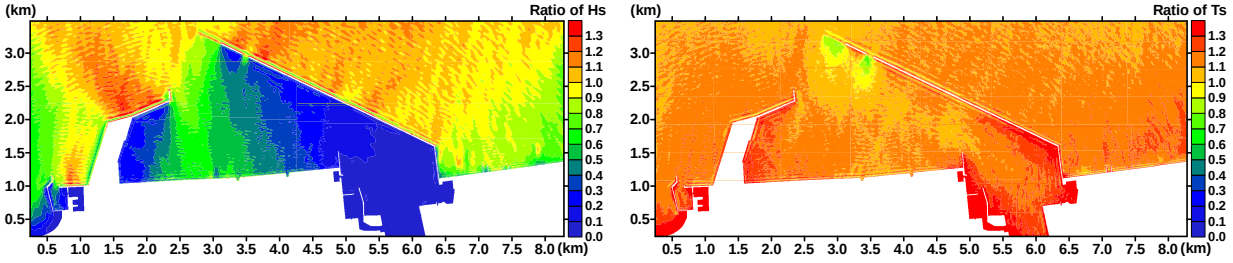
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

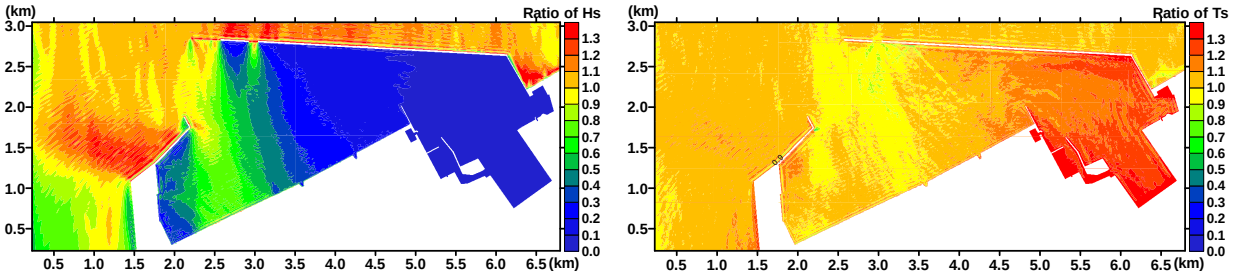


(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

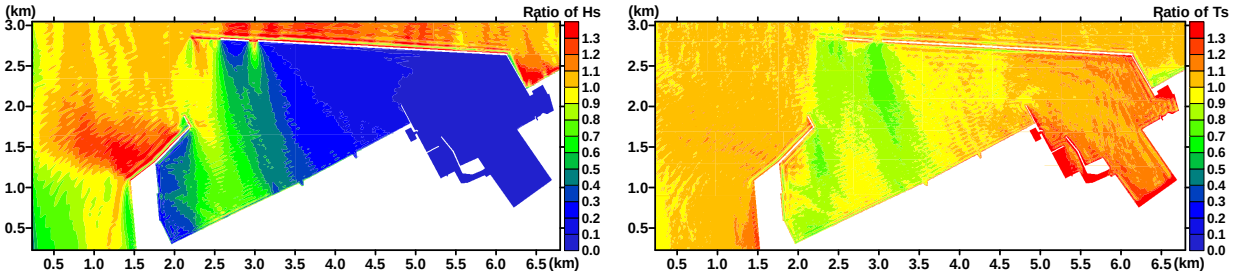


(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

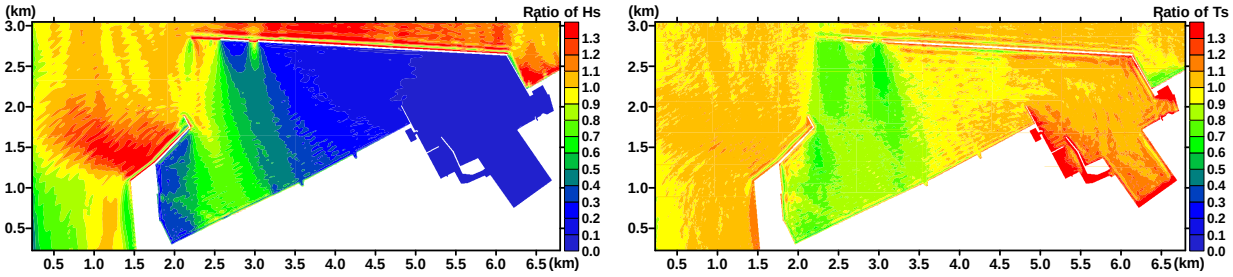
付図 C-6　被災港形Ⅰにおける波高比・周期比の平面分布（波向 ENE）（左側：波高比，右側：周期比）



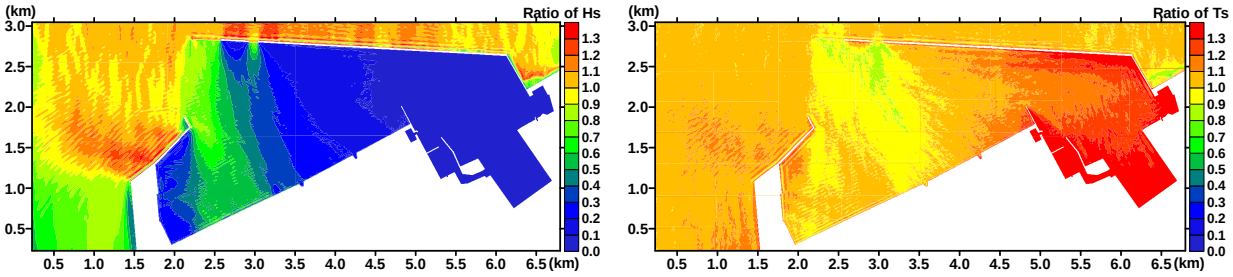
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



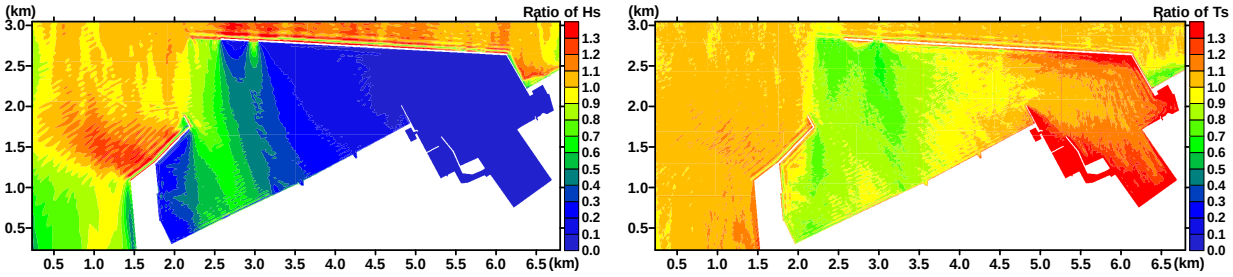
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

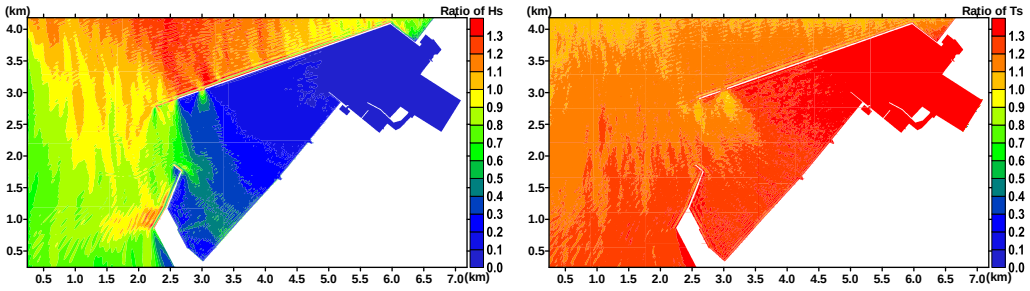


(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

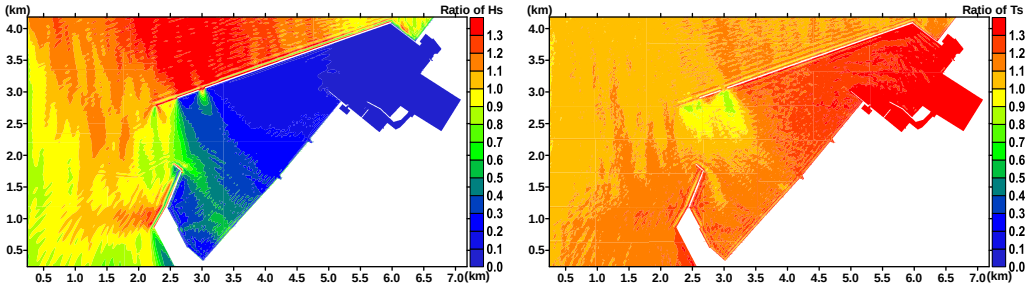


(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

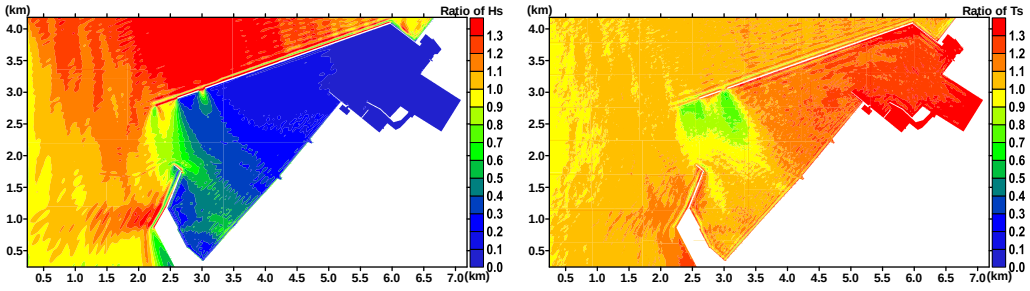
付図 C-7　被災港形 I における波高比・周期比の平面分布（波向 E）（左側：波高比，右側：周期比）



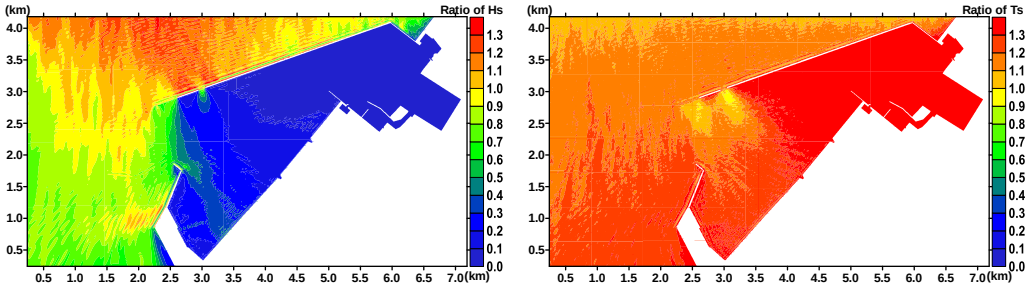
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



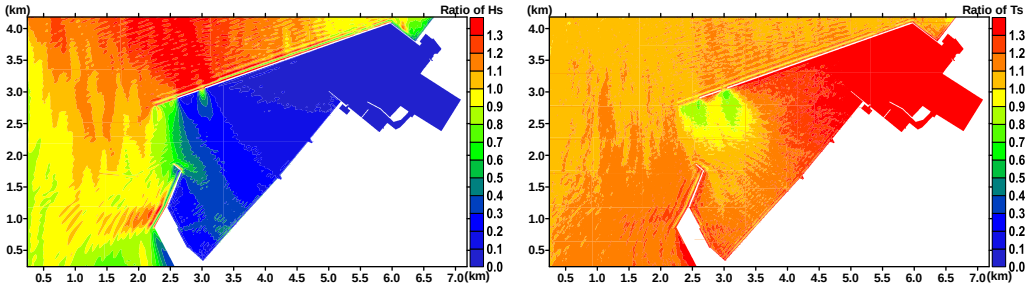
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）



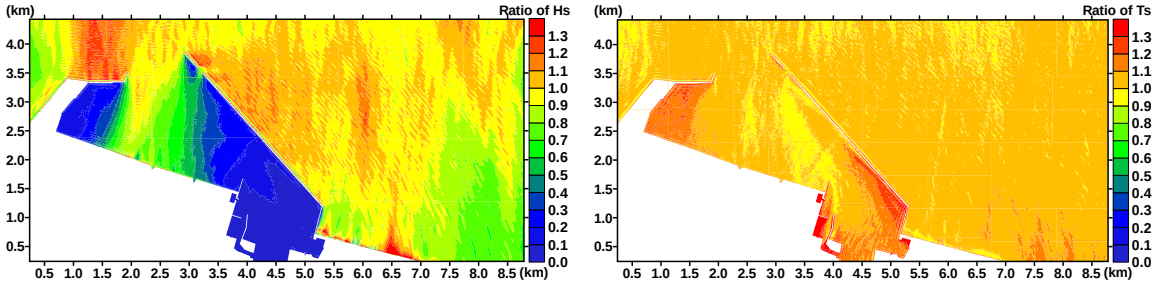
(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）



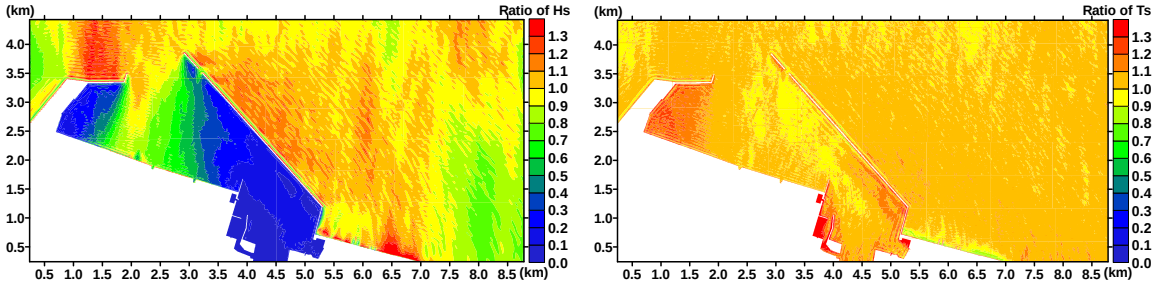
(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

付図 C-8　被災港形 I における波高比・周期比の平面分布（波向 ESE）（左側：波高比，右側：周期比）

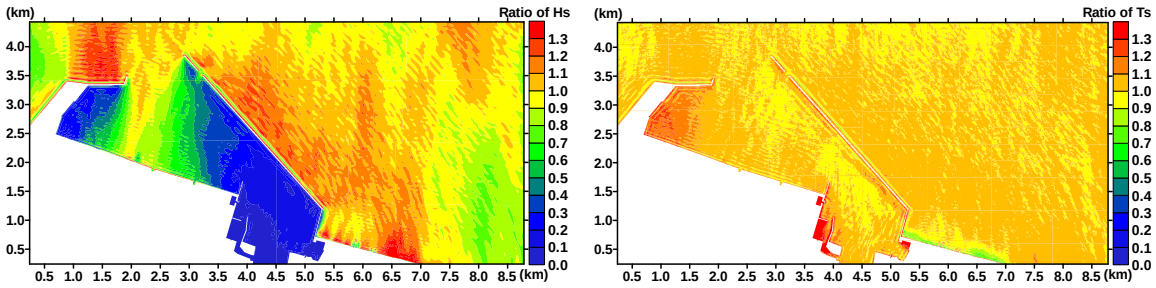
C-3. 被災港形Ⅱ（防波堤ケーソンの一部が消失）



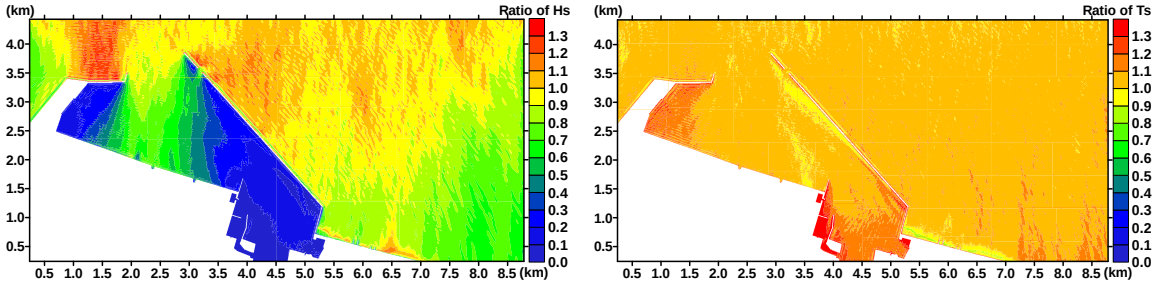
(a) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



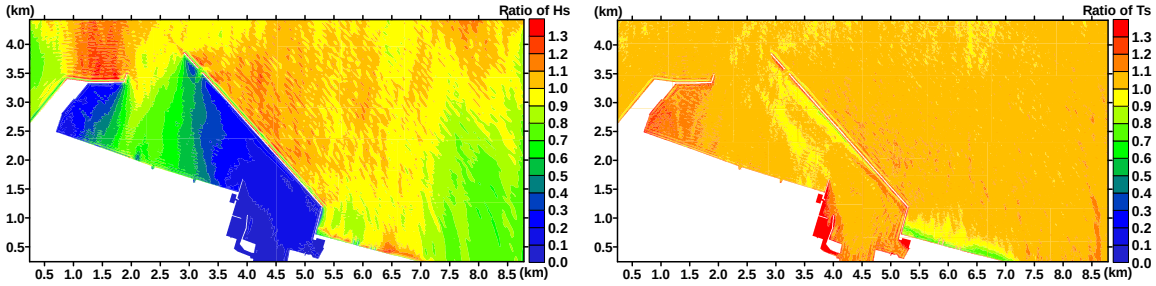
(b) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c) $H_{1/3}$=1.0m, $T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

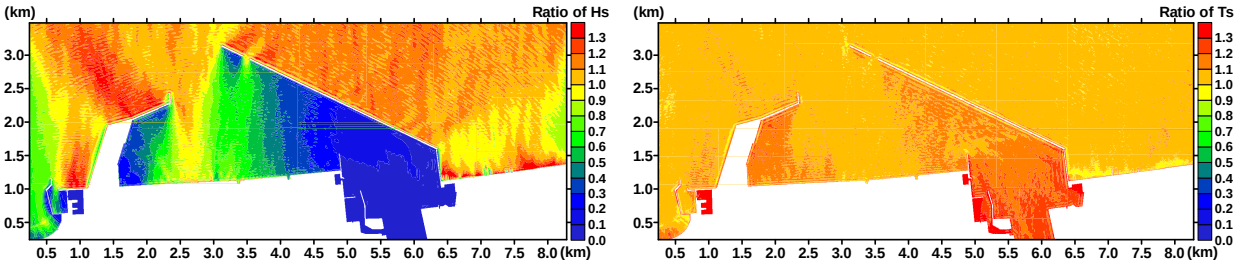


(d) $H_{1/3}$=2.5m, $T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

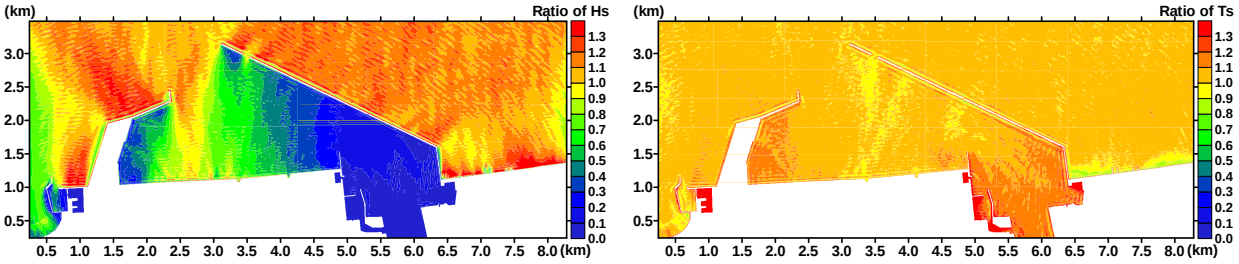


(e) $H_{1/3}$=2.5m, $T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

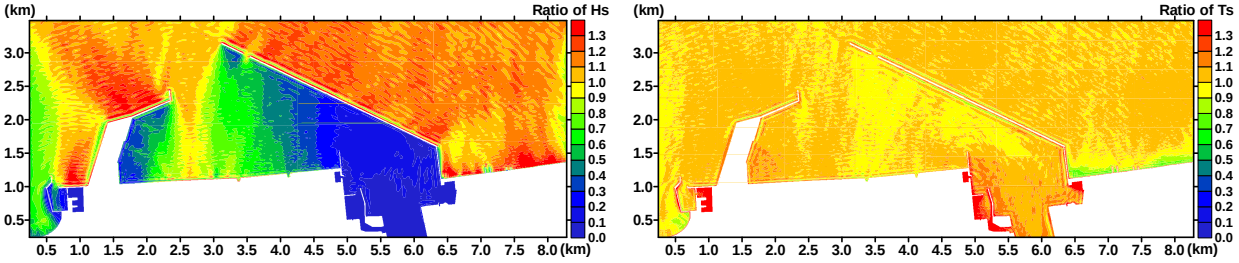
付図 C-9 被災港形Ⅱにおける波高比・周期比の平面分布（波向 NE）（左側：波高比，右側：周期比）



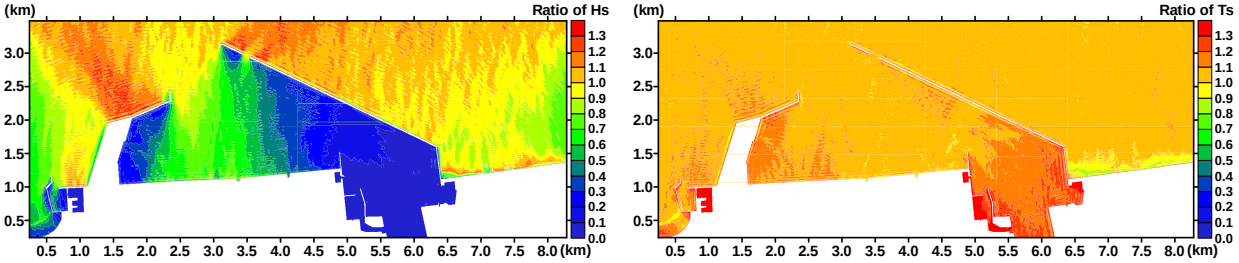
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



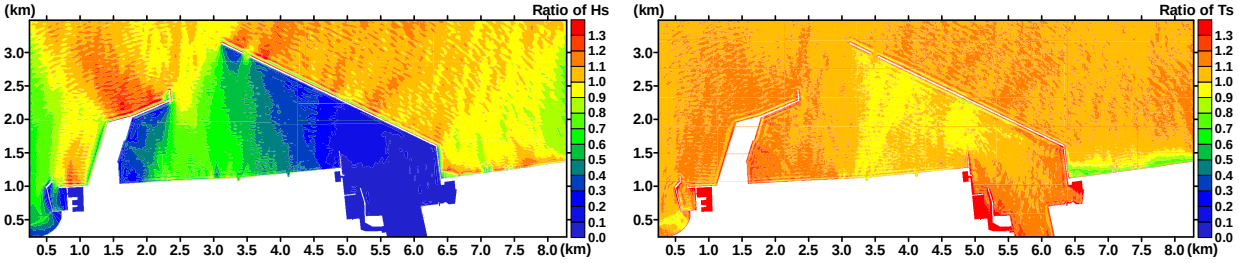
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

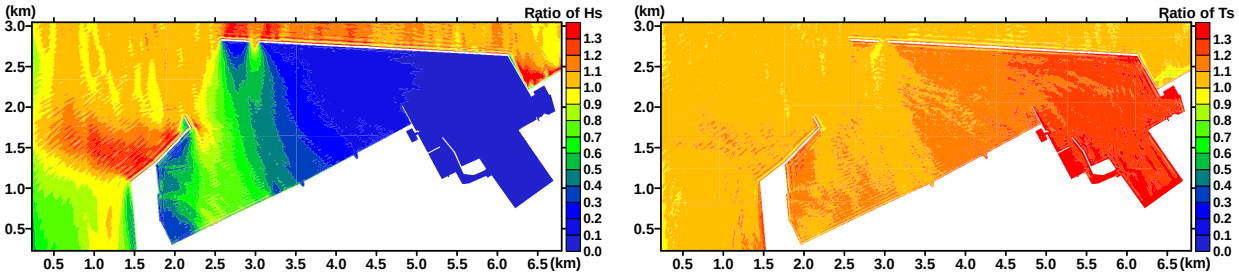


(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

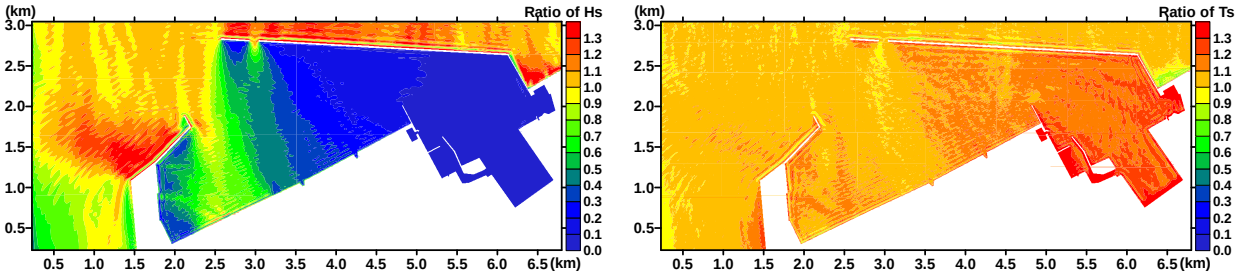


(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

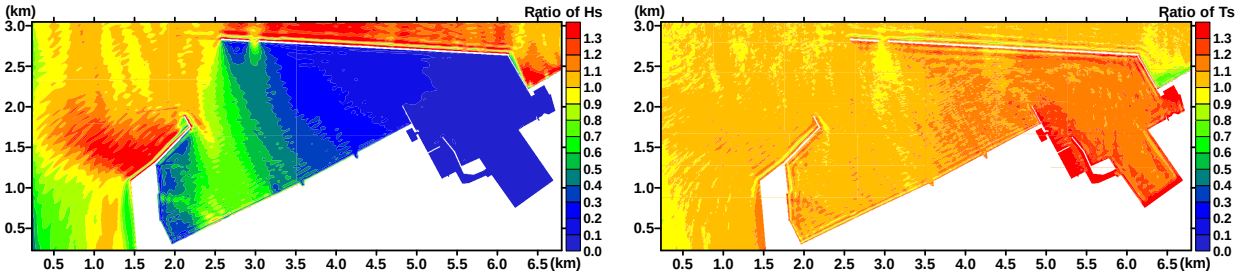
付図 C-10　被災港形Ⅱにおける波高比・周期比の平面分布（波向 ENE）（左側：波高比，右側：周期比）



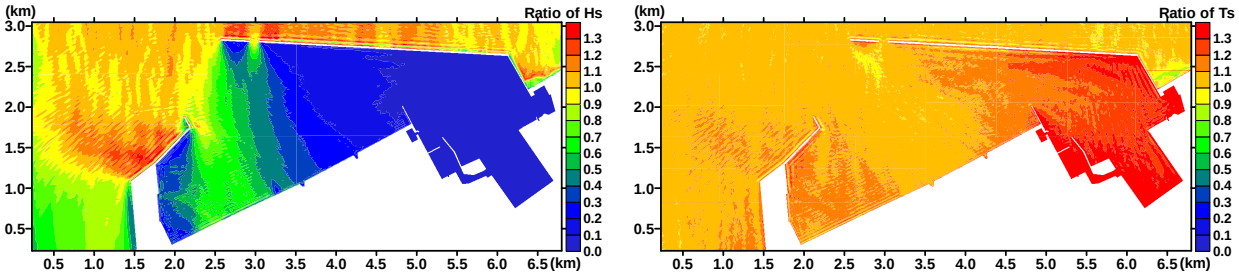
(a)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



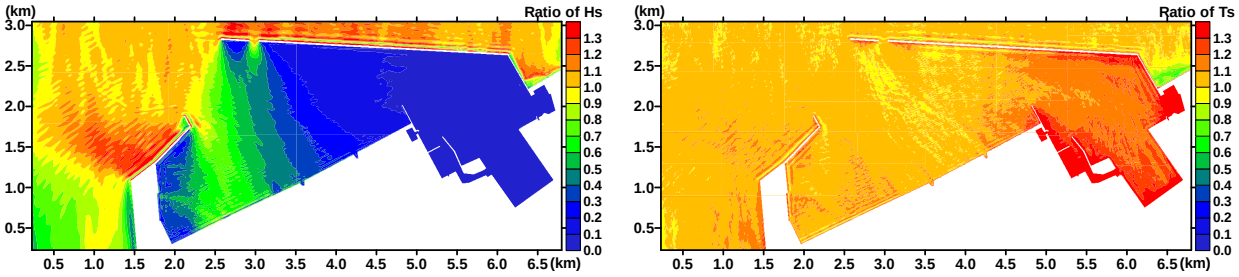
(b)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m,　$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）

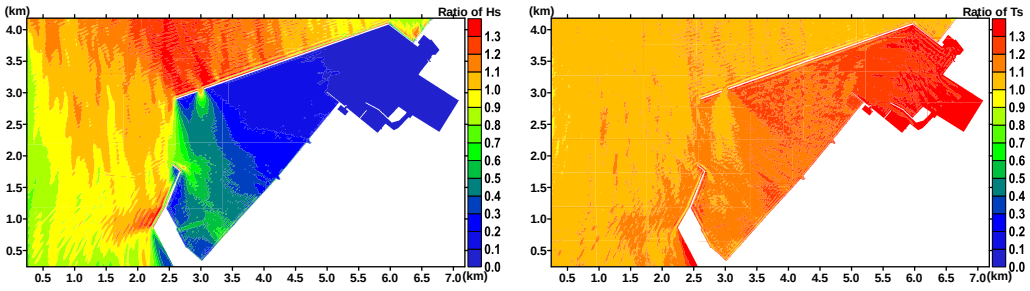


(d)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）

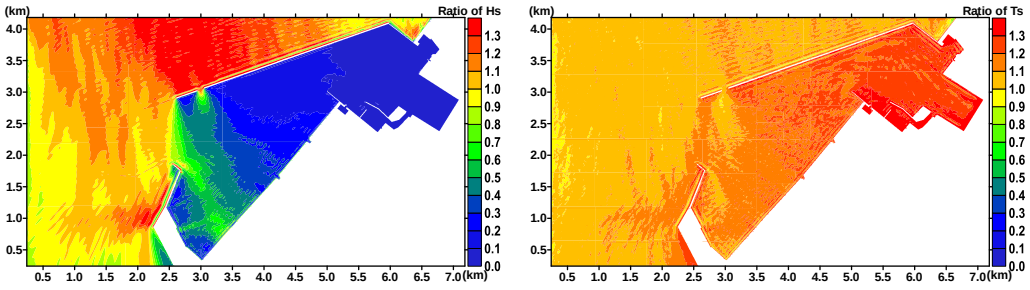


(e)　$H_{1/3}$=2.5m,　$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

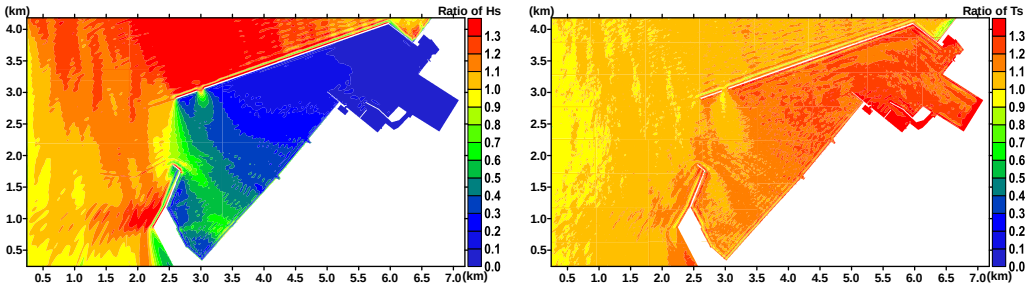
付図 C-11　被災港形Ⅱにおける波高比・周期比の平面分布（波向 E）（左側：波高比，右側：周期比）



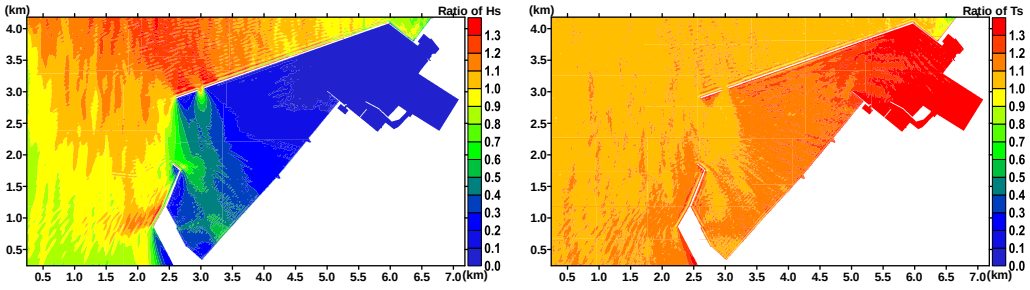
(a)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0100）



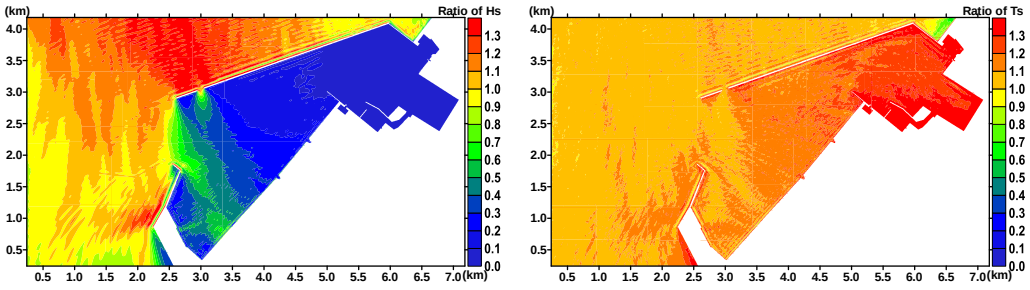
(b)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0064）



(c)　$H_{1/3}$=1.0m，$T_{1/3}$=12s（H_0'/L_0=0.0045）



(d)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=8s（H_0'/L_0=0.0250）



(e)　$H_{1/3}$=2.5m，$T_{1/3}$=10s（H_0'/L_0=0.0160）

付図 C-12　被災港形Ⅱにおける波高比・周期比の平面分布（波向 ESE）（左側：波高比，右側：周期比）

港湾空港技術研究所報告　第 59 巻 第 1 号

２０２０．６

編集兼発行人　国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発　行　所　港　湾　空　港　技　術　研　究　所
横須賀市長瀬３丁目１番１号
TEL. 046(844)5040　URL. http://www.pari.go.jp/

Copyright ©（2020）by MPAT
All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT
　この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Field Observation and Statistical Analyses of the Fugacity of Carbon Dioxide in Shallow Coastal Waters
Kazufumi TADA, Tatsuki TOKORO, Kenta WATANABE, Hirotada MOKI, Tomohiro KUWAE… 3

2. Fundamental Study on Harbor Waves Sheltered by Impermeable Submerged Breakwater
Katsuya HIRAYAMA, Yuuki HAMANO, Junya NAGANUMA…… 66