

弱非線形ブシネスクモデルにより 算定された重複波力の補正式の提案

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 沿岸水工研究領域 ○平山克也

前・港湾空港技術研究所 波浪研究グループ 平井翔太

(現・(株)ニュージェック 技術本部 港湾・海岸グループ)

はじめに

背景

- 気候変動に伴う海面上昇や台風の強大化リスク
- 高潮・高波による堤外地の越波浸水被害（大阪湾，東京湾）



港湾施設における浸水リスクの評価や対策への関心が高まっている

はじめに

第6回検討委員会【資料2】P.11

 国土交通省

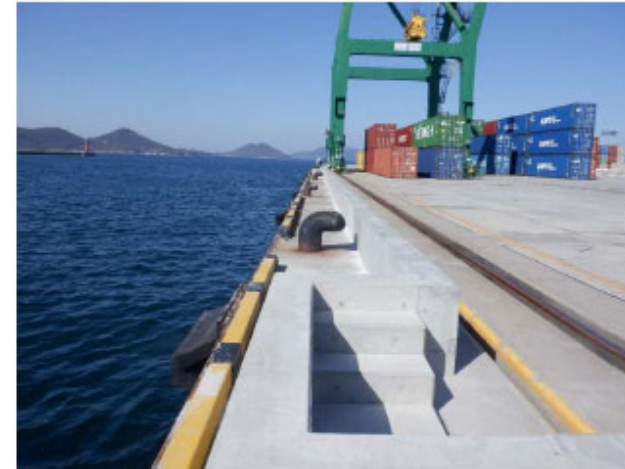
岸壁水際線の防潮壁設置の特性と配慮事項

岸壁水際位置等での活動を阻害しない配慮が必要。



ハンブルグ港の事例

- ・ 係船柱近傍に陸閘を設置し、係留作業に配慮



高松港の事例

- ・ 要所に階段を設け、作業員の往来に配慮

岸壁水際線の防潮壁設置における配慮事項例

- ・ 防潮堤内外の作業員等の往来に配慮し、乗り越し階段又は陸閘等を設ける。
- ・ 防潮壁と係船柱との離隔を係船作業に支障の無いよう定める。
- ・ コンテナ岸壁の場合、荷役機械や構内トレーラー等の走行に支障の無い位置に防潮壁を設ける。
- ・ 海側のガントリークレーンの設置・撤去に支障の無いよう配慮する。

78



はじめに

● 背景（胸壁の設計に用いる波力の算定）

● 入射波高の推定

$$H_{gosei} = \sqrt{H_{in}^2 + H_{ref}^2}$$

H_{gosei} : 合成波高

H_{ref} : 反射波高

$$H_{ref} = R \times H_{in}$$

R : 反射率

$$H_{in} = H_{gosei} / \sqrt{1^2 + R^2}$$

H_{in} : 入射波高



港内施設に作用する波力を直接算定できないか

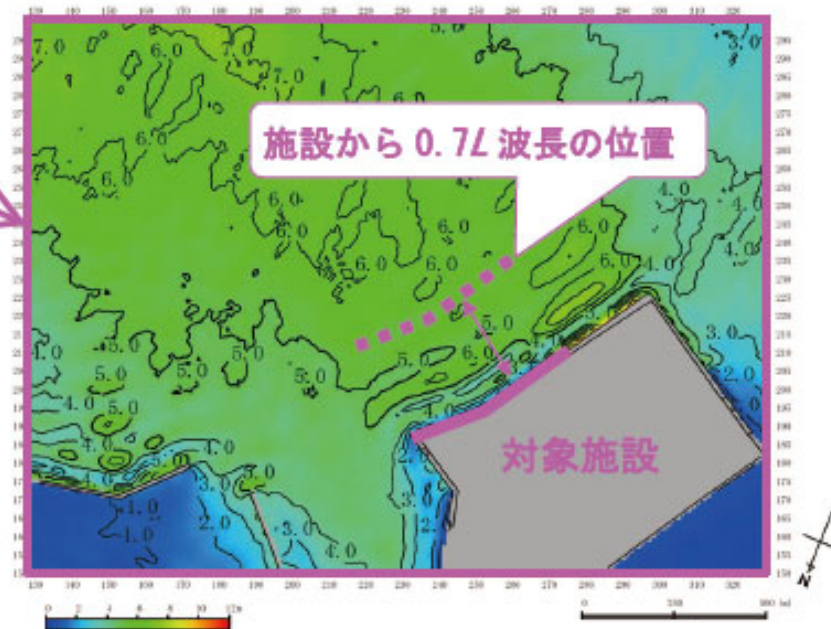
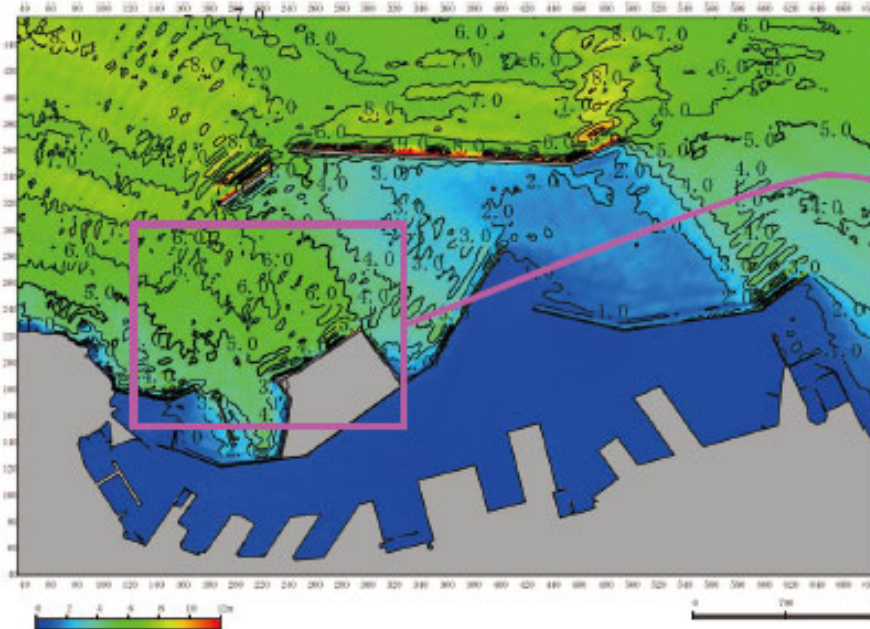


図 6.21 有義波高平面分布および波高抽出地点の設定例（木港）

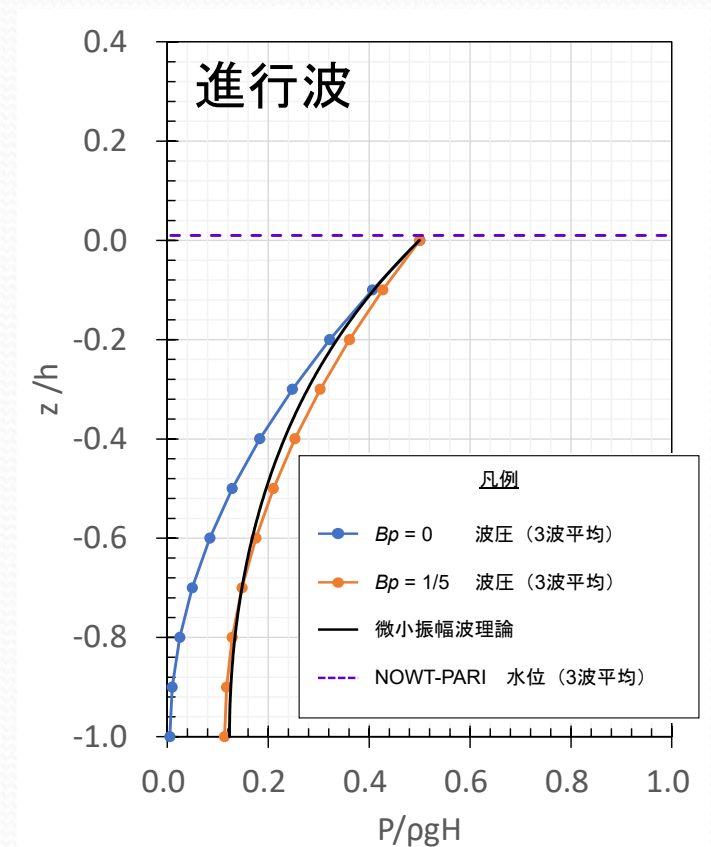
はじめに

● 平山ら(2024)

- ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver5.2)に新たな圧力式を組み込み, (合田波圧式によらず,) 岸壁前面位置での直立壁に作用する波圧の鉛直分布を直接算定することを試みた.
- 断面一次元(x方向)の圧力式

$$\frac{p}{\rho} = g\eta + z \frac{\partial h}{\partial x} \left[\left(1 + \boxed{B_p}\right) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{D}\right) + \frac{B_p}{D} \left\{ \frac{P}{D} \frac{\partial \eta}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\} \right]$$
$$+ \frac{1}{2} (2zh + z^2) \left[\begin{aligned} & \left(1 + \boxed{B_p}\right) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(\frac{P}{D}\right) \\ & + \frac{B_p}{D} \left\{ \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D}\right) \frac{\partial \eta}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. + \frac{P}{D} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial t} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + h \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) \right\} \end{aligned} \right]$$

$\boxed{}$ 補正項 ($B_p = 1/5$)



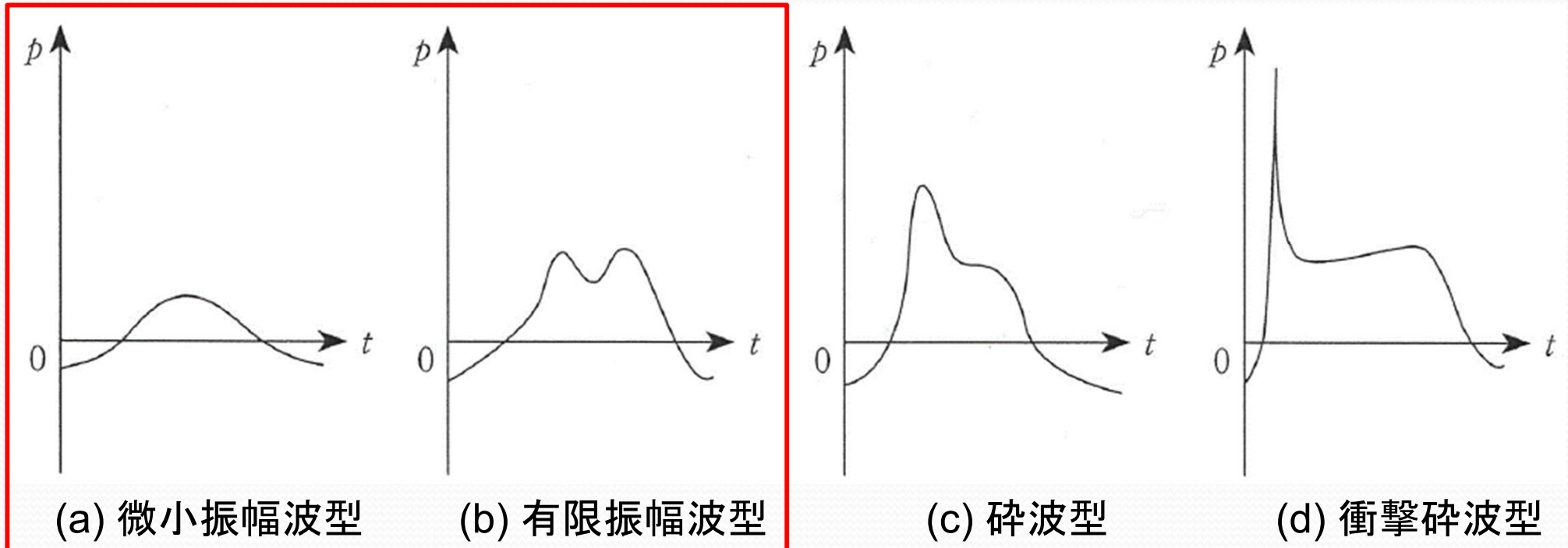
Case1: 弱非線形分散波

はじめに

● 平山ら(2024)

● 波力の時間波形

岩田好一朗, 水谷法美, 青木伸一, 村上和男, 関口秀夫:
役にたつ土木工学シリーズ①, 海岸環境工学, 朝倉出版, p.113, 2005.



Madsen型のブシネスク方程式が有する弱非線形性のために, 非線形重複波により生じる双峰型の波圧の時間波形が再現されず, 個々波の極大重複波力を過大に算定する. ⇒ **補正式の提案**

合田・柿崎(1966)

● 双峰型波圧(波力)の出現限界

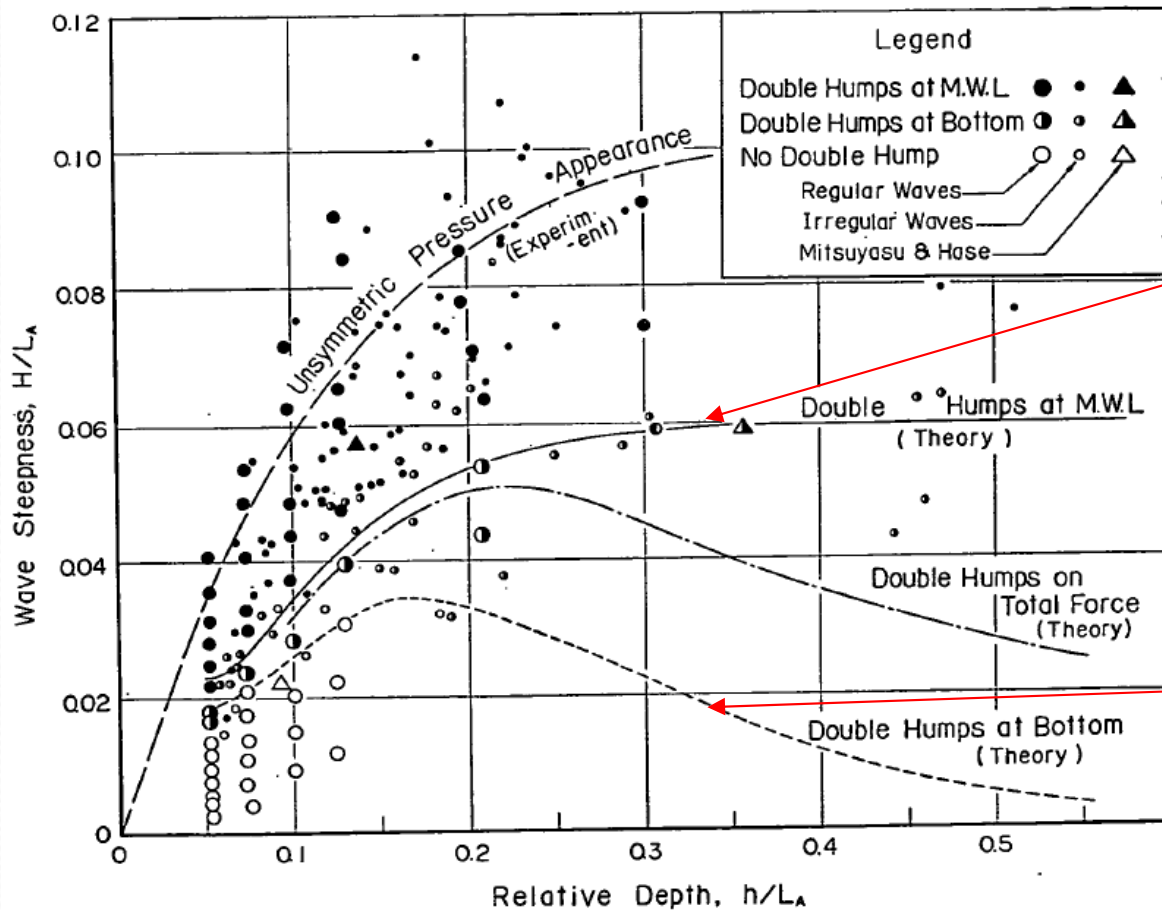


図-12 双峰型波圧の出現限界

Fig.12 Appearance Limit of Double Humped Wave Pressures

表-4 双峰型波圧出現の限界波形勾配

静水面 $y=0$

h/L	0.05	0.07	0.10	0.15	0.2	0.3	1.0
第2次近似解	—	—	—	—	—	(0.221)	(0.159)
第3次近似解	—	—	—	(0.101)	0.072	0.065	0.064
第4次近似解	—	—	0.055	0.052	0.051	0.058	0.060
修正第4次近似解	0.023	0.026	0.034	0.047	0.058	—	—

水底 $y=-h$

h/L	0.05	0.07	0.10	0.15	0.2	0.3	1.0
第2次近似解	—	—	—	(0.108)	0.05	0.028	0.0003
第3次近似解	—	—	(0.070)	0.041	0.034	0.022	0.0002
第4次近似解	—	0.034	0.032	0.035	0.033	0.022	0.0002
修正第4次近似解	0.019	0.020	0.026	0.34	0.033	0.022	0.0002

注) () 内の数値は、碎波限界をこえている。

波圧の双峰性が現れるのは一般的に相当高次の高調波成分によるとされている

はじめに

目次

- はじめに
- 重複波力の補正式の提案
 - 数値実験の概要
 - 波浪条件
 - 計算条件
 - 数値実験結果の整理
- 補正式の適用性に関する検討
 - 不規則波を対象とした非線形重複波力の補正
 - 補正式の適用方法
 - 補正式の適用結果
 - 不規則波の個々波の重複波力比に関する考察
 - 波圧の鉛直分布の補正方法に関する考察
- おわりに

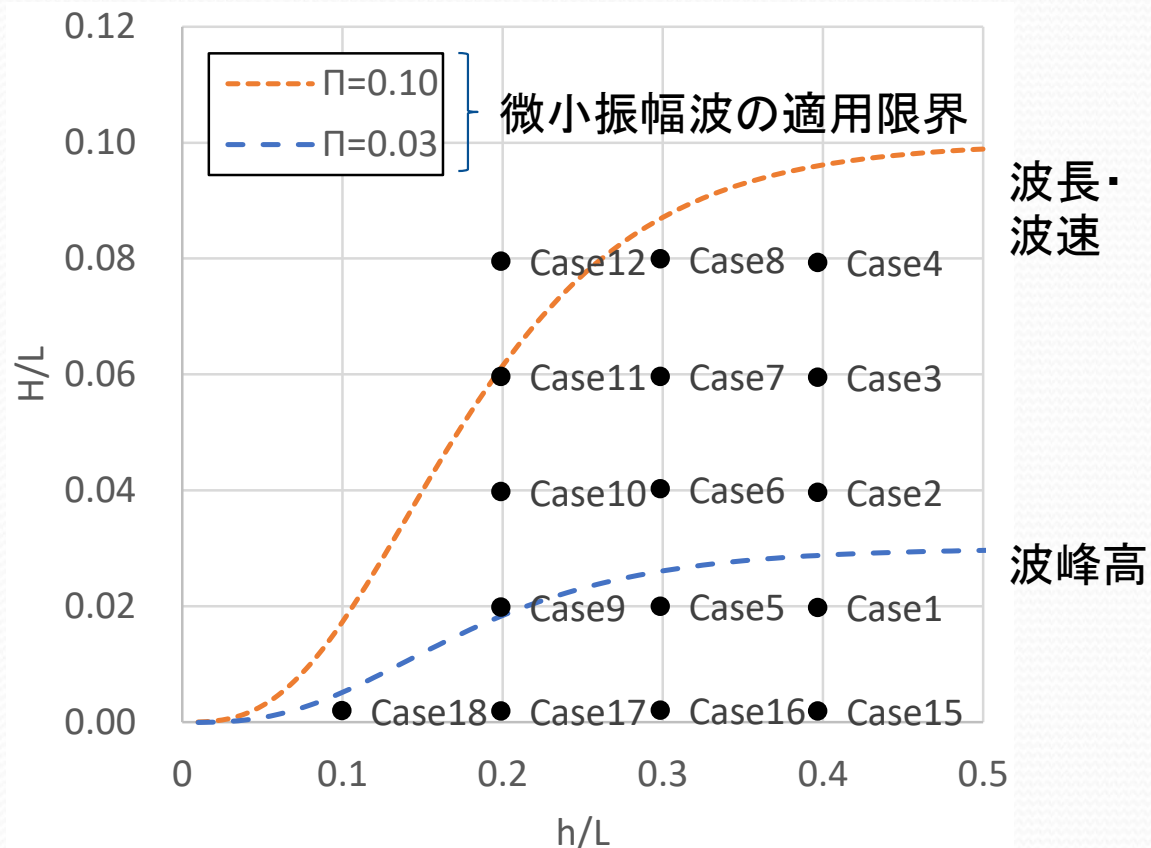
重複波力の補正式の提案

数値実験の概要(模型縮尺: 1/25)

波浪条件

(規則波: NOWT-PARI Ver5.2とCADMAS-SURF/2Dで共通)

	case15	case1	case2	case3	case4	case16	case5	case6	case7	case8	case17	case9	case10	case11	case12	case18
水深 h [m]	1.00															
波高 H [m]	0.005	0.050	0.100	0.150	0.200	0.007	0.067	0.135	0.200	0.268	0.010	0.100	0.200	0.300	0.400	0.020
周期 T [s]	1.28					1.50					1.95					3.40
相対水深 h/L	0.40					0.30					0.20					0.10
波形勾配 H/L	0.002	0.020	0.040	0.060	0.080	0.002	0.020	0.040	0.060	0.080	0.002	0.020	0.040	0.060	0.080	0.002
非線形パラメータ Π	0.002	0.021	0.041	0.062	0.083	0.002	0.023	0.046	0.069	0.092	0.003	0.033	0.065	0.098	0.130	0.012



線形重複波の波形勾配は入射波の2倍となるため、Case1~12において直立壁前面で生じる重複波の波峰高はいずれも非線形性を有する

重複波力の補正式の提案

数値実験の概要(模型縮尺:1/25)

計算条件

表-2 NOWT-PARIとCADMAS-SURFの計算条件

(a) NOWT-PARI	
項目	設定値
格子サイズ	$\Delta x = \Delta y = 0.05\text{m}$
差分時間	0.1ms (ただし, Case8, 10, 11, 12, 18は0.01ms)
(b) CADMAS-SURF	
項目	設定値
格子サイズ	$\Delta x =$ 計算領域: 0.02 m, 減衰領域: 0.04 m $\Delta z = 0.01\text{ m}$ (ただし最下層の Δz は0.005 m)
物性値	流体密度: 1.0 kg/m ³ , 重力加速度: 9.8 m/s ²
差分スキーム	VP-DONOR 0.2
境界条件	流速・圧力: SLIP, VOF関数F: FREE
差分時間	Auto
オプション	気泡上昇速度: 0.2 m/s 水滴の処理: 自由落下かつ斜面の処理も行う 表面セルの流速を勾配ゼロから求める 流速・圧力計算のサブグループ: 2回
造波方法	造波ソース

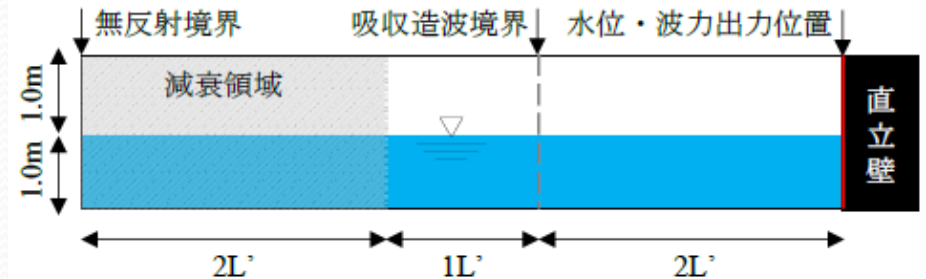


図-2 数値実験に用いた造波水路の概要

- *1: L' は、各周期に対する L を1m単位で切り上げた数値とした
- *2: NOWT-PARIでは、吸収造波境界沖側の $1L'$ 区間を省略した
- *3: NOWT-PARIのCase18のみ、重複波区間を $2L' \rightarrow 10L'$ とした

【重複波力】

静水面下:0.10m毎, 静水面上:0.05m毎に出力した波圧を鉛直積分して算出

【波高及び波力の代表値】

10～30波程度を対象に水位変動のゼロアップクロス解析を行い、得られた個々波の極大波高及び極大波力のrms値として定義(二次波の発生による波形の乱れの影響を考慮するため)

重複波力の補正式の提案

数値実験結果の整理

$$Ratio = F_{cadmas} / F_{nowt}$$

- F_{nowt} : NOWT-PARIによる重複波力
 F_{cadmas} : CADMAS-SURFによる重複波力

NOWT-PARIによる重複波高 $H_{c_{nowt}}$ を L で除した波形勾配 $H_{c_{nowt}}/L$ に対してプロット
(波長 L_{nowt} は微小振幅波の波長 L に等しいと仮定)

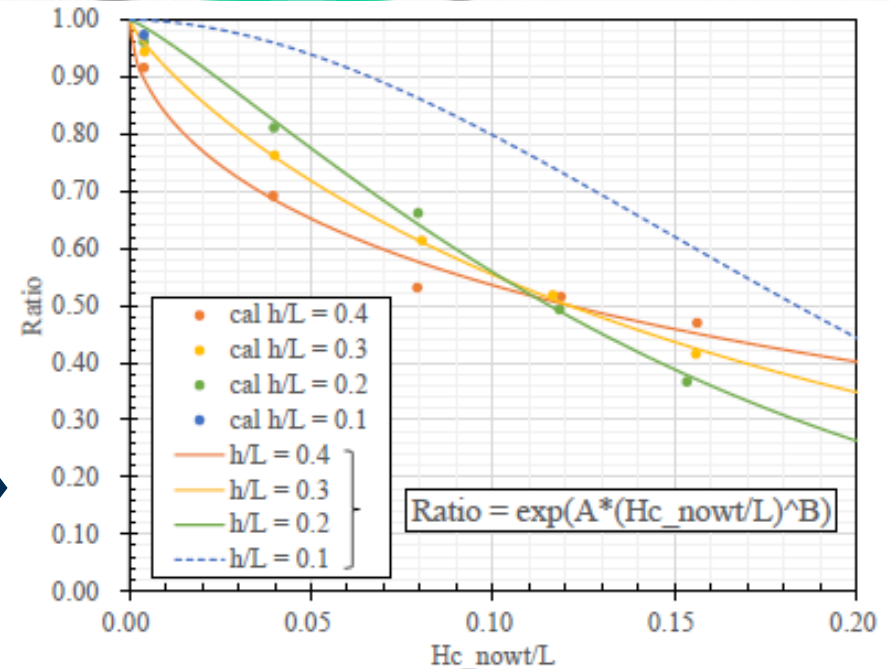


図-3 数値実験で得られた補正係数 $Ratio$ と波形勾配との関係

重複波力の補正式

各プロットを h/L 毎に近似

$$Ratio = \text{Exp}[A(H_{c_{nowt}}/L)^B]$$

非線形最小二乗法により設定した
各係数 A , B を近似

$$\begin{cases} A = 10.191 \ln h/L + 7.5374 \\ B = -0.934 \ln h/L - 0.3014 \end{cases}$$

ただし, $A \leq 0, B \geq 0$

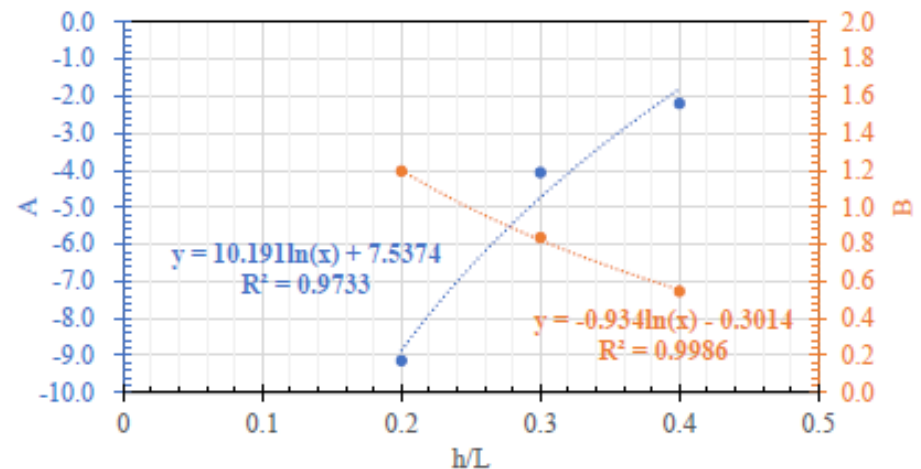


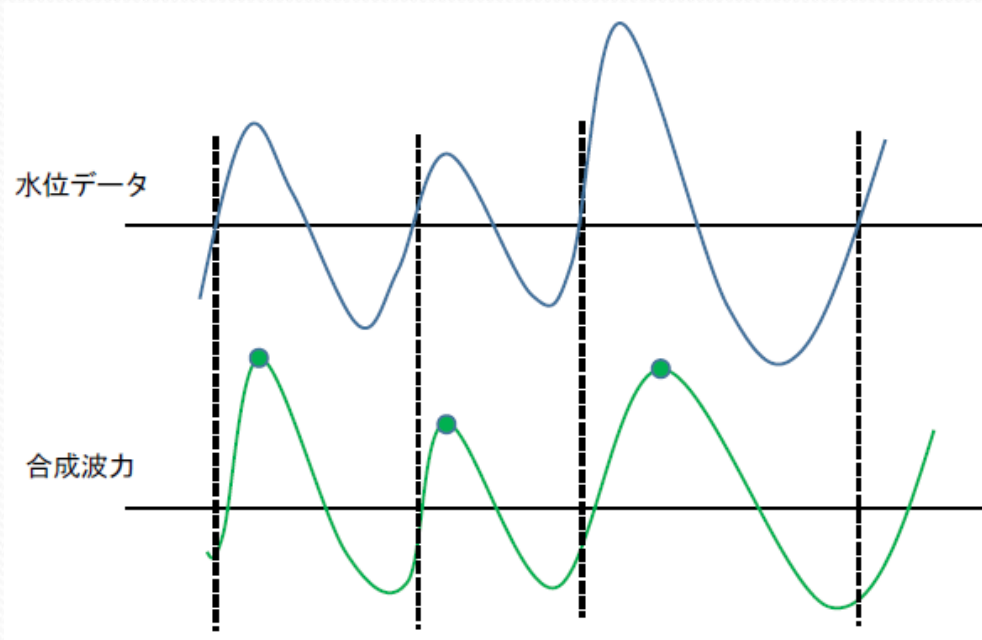
図-4 近似曲線の係数 A, B と相対水深との関係

補正式の適用性に関する検討

不規則波を対象とした非線形重複波力の補正

補正式の適用方法

NOWT-PARIによる算定結果の波別解析



統計量

$$(Hc_{\text{nowt}})_{\text{max}}$$
$$(Hc_{\text{nowt}})_{1/3}$$

補正量

重複波力の補正式

$$\text{Ratio} = \text{Exp}[A(Hc_{\text{nowt}}/L)^B]$$
$$\begin{cases} A = 10.191 \ln h/L + 7.5374 \\ B = -0.934 \ln h/L - 0.3014 \end{cases}$$

$$(F_{\text{nowt}})_{\text{max}}$$
$$(F_{\text{nowt}})_{1/3}$$

補正前の波力

$$(F_{\text{nowt}} * \text{Ratio})_{\text{max}}$$
$$(F_{\text{nowt}} * \text{Ratio})_{1/3}$$

補正後の波力

($\doteq F_{\text{cadmas}}$)

※1 実験値 F_{exp} やCADMAS-SURFによる計算値 F_{cadmas} に対しても同様に整理

※2 合田波圧式の重複波力 F_{goda} の統計量は、進行波の個々波の H_{max} や $H_{1/3}$ に対して算定

補正式の適用性に関する検討

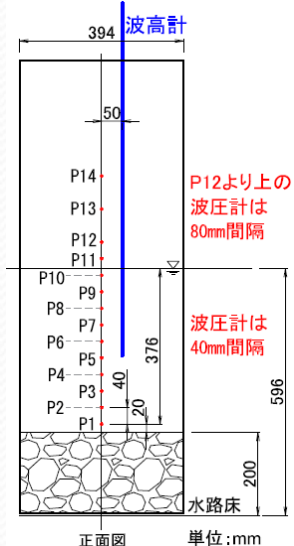
不規則波を対象とした非線形重複波力の補正

● 補正式の適用結果

表-3 既存実験の再現計算で算定された重複波諸元

(a) 最高波諸元			
	CaseA	CaseB	CaseC
h/L	0.244	0.230	0.129
Hc_{max_nowt}/L	0.171	0.220	0.143

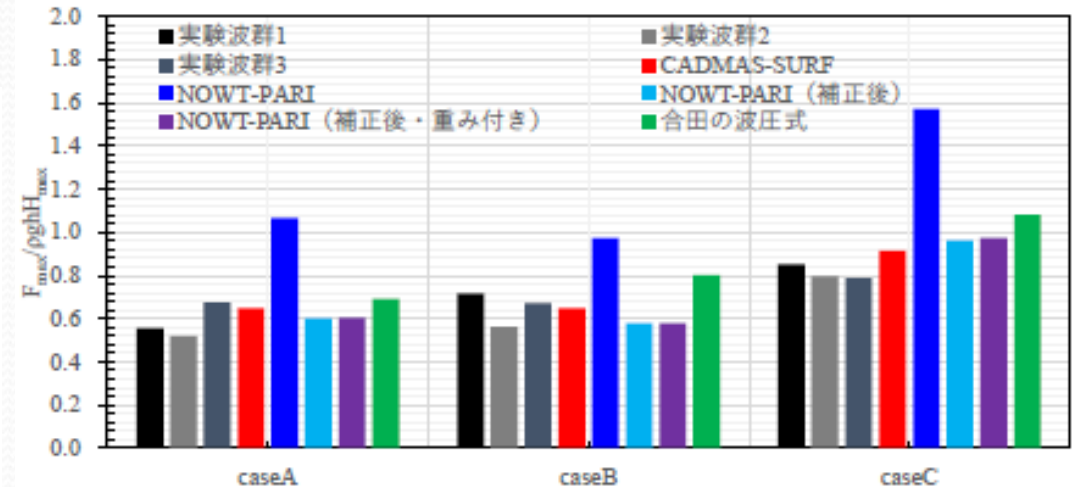
(b) 有義波諸元			
	CaseA	CaseB	CaseC
h/L	0.212	0.205	0.134
$Hc_{1/3_nowt}/L$	0.098	0.130	0.089



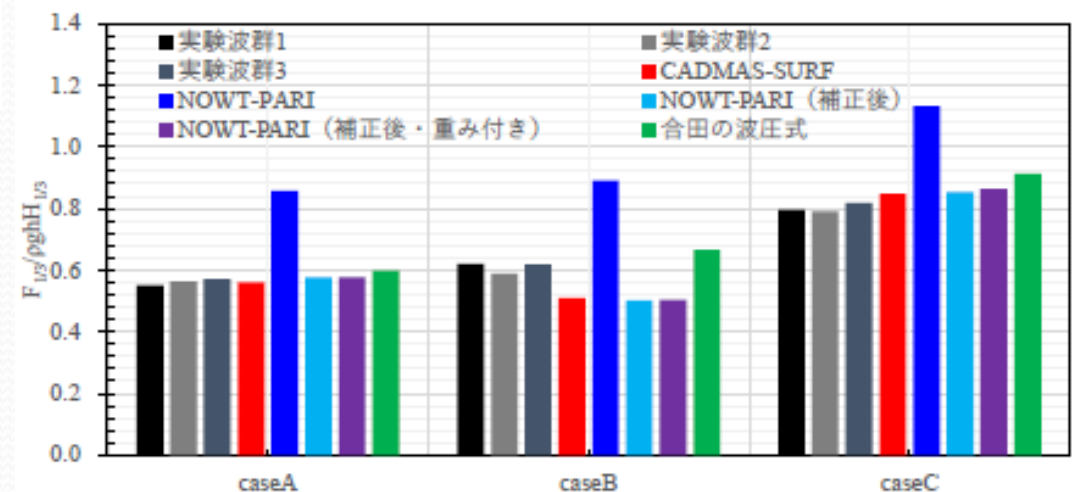
非線形
分散波

非線形
弱分散波

【波圧計測・算定】
 灰: 模型実験(3波群)
 赤: CADMAS-SURF
 青: NOWT-PARI
 緑: 合田波圧式



(a) 最大波力



(b) 有義波力

図-5 非線形重複波力の実験結果と計算結果の比較

補正式の適用性に関する検討

不規則波を対象とした非線形重複波力の補正

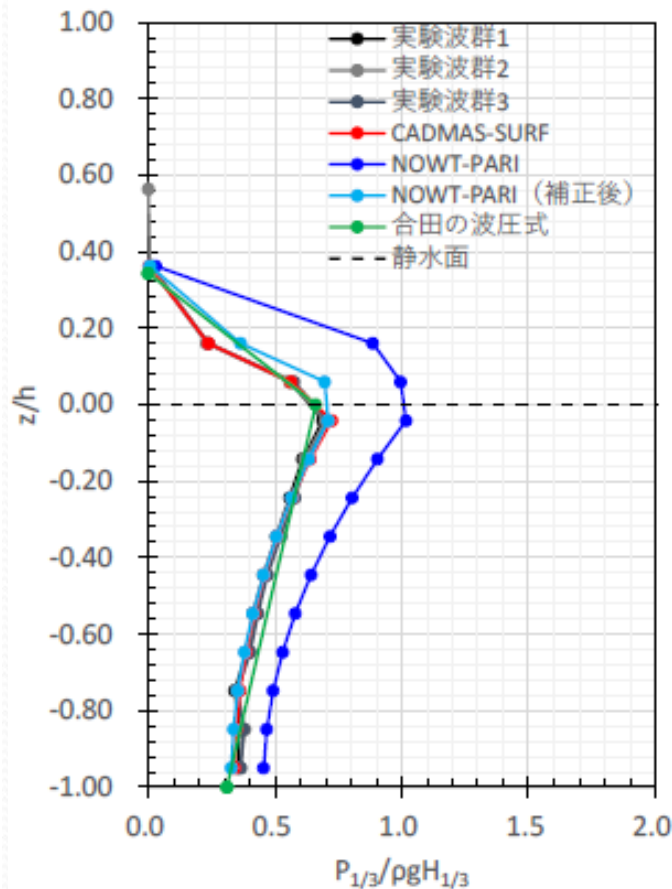
- 補正式の適用結果(有義波圧)

- 補正值が目標値に完全一致しない要因

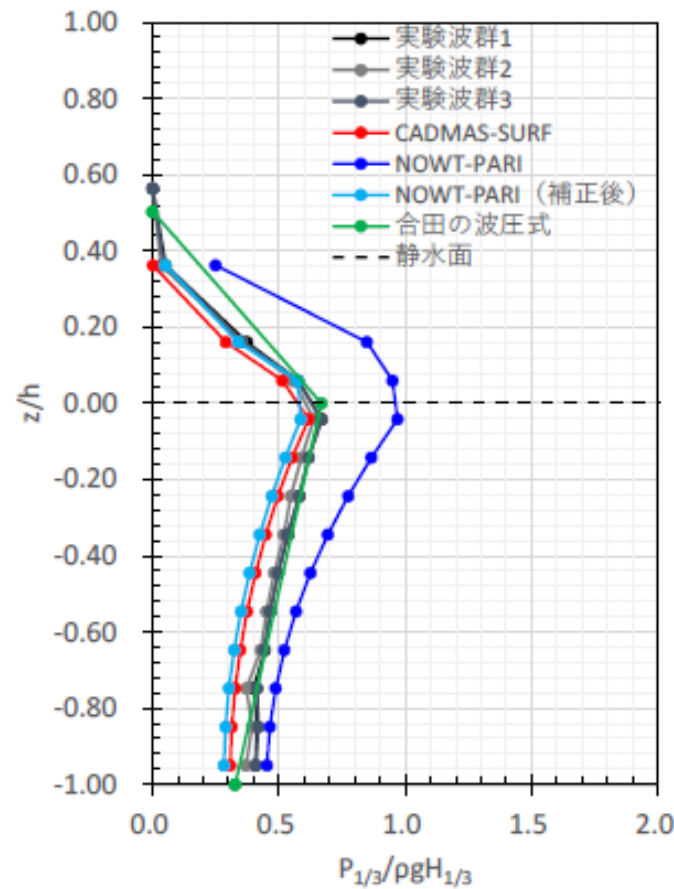
・補正式の近似誤差

・波群に伴う二次波の影響

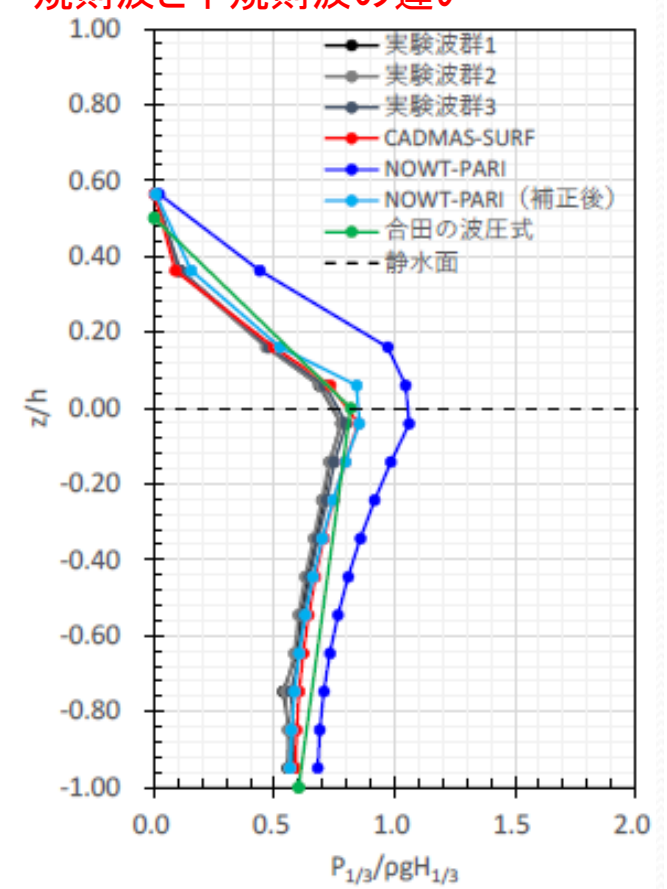
規則波と不規則波の違い



(a) CaseA : 非線形分散波



(b) CaseB : 非線形分散波



(c) CaseC : 非線形弱分散波

図-7 NOWT-PARIで算定された補正前後の非線形重複波圧の鉛直分布の比較 (有義波圧)

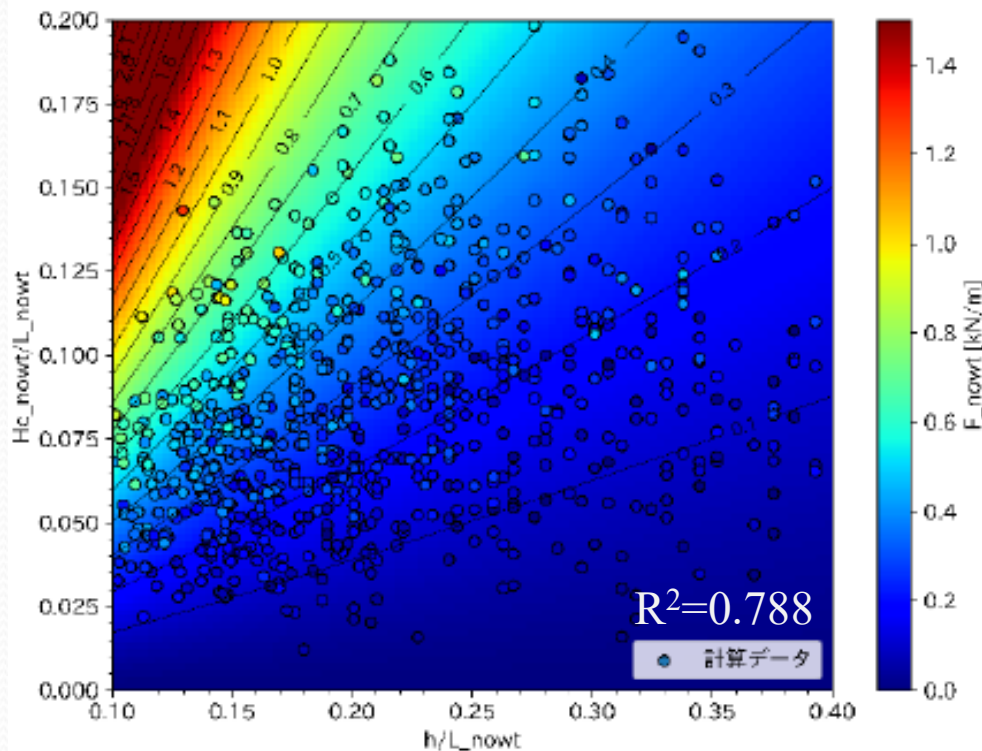
補正式の適用性に関する検討

不規則波の個々波の重複波力比に関する考察

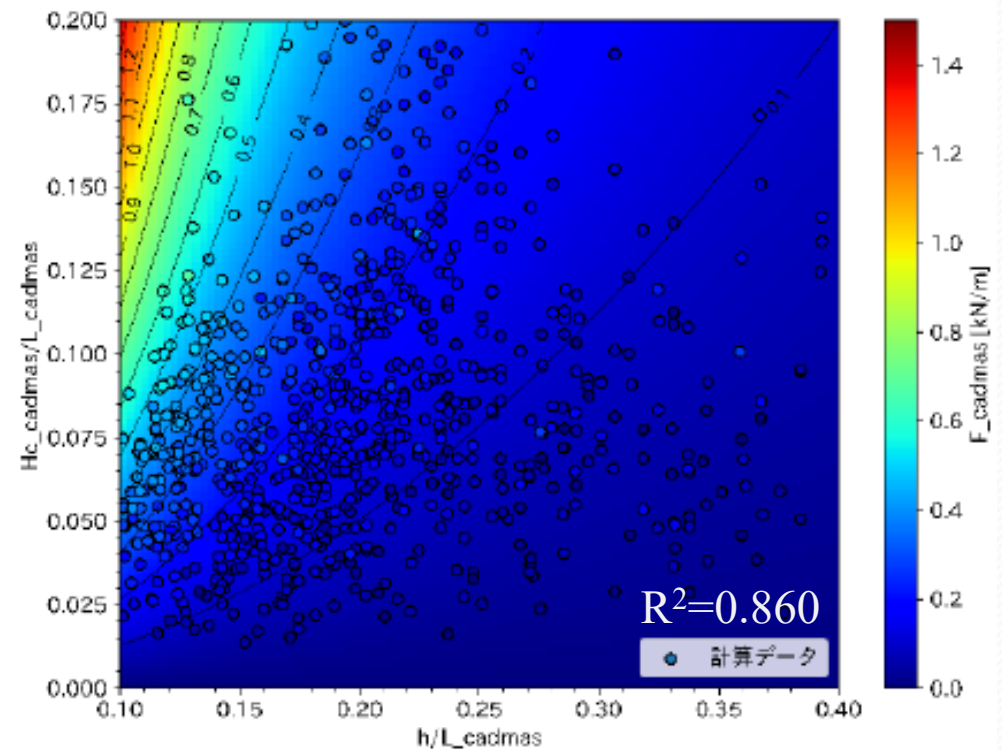
- 規則波と波群中の個々波で算定される重複波力の比較
 - 規則波に対して算定される重複波力比: $Ratio = \text{Exp}[A(Hc_{nowt}/L)^B]$
 - 波群中の個々波に対して算定される重複波力:

$$F_{nowt} = 0.579(h/L_{nowt})^{-1.524}(Hc_{nowt}/L_{nowt})^{1.296}$$

$$F_{cadmas} = 0.082(h/L_{cadmas})^{-1.884}(Hc_{cadmas}/L_{cadmas})^{0.950}$$



(a) NOWT-PARI



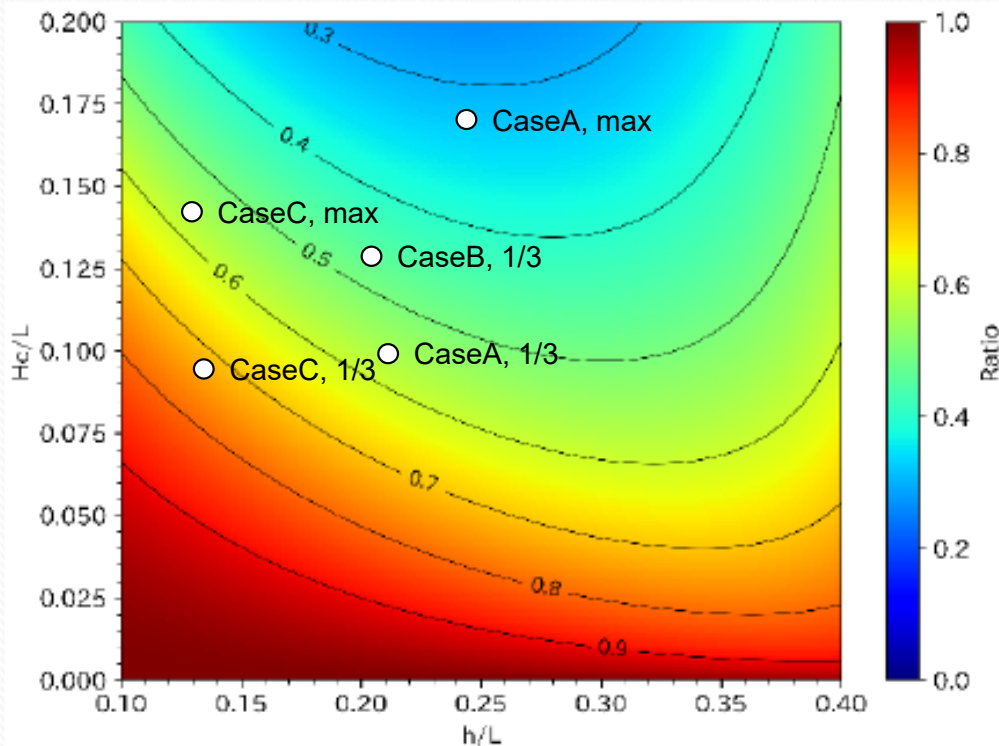
(b) CADMAS-SURF

図-8 波群中の個々波の諸元と重複波力との関係

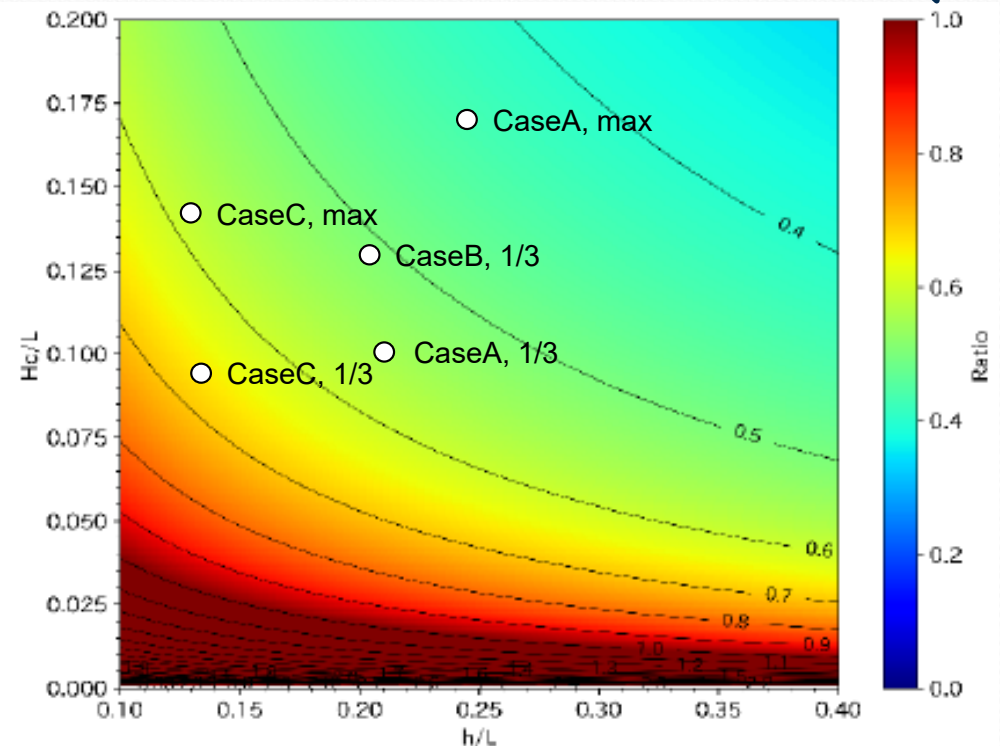
補正式の適用性に関する検討

不規則波の個々波の重複波力比に関する考察

- 規則波と波群中の個々波で算定される重複波力の比較
- 規則波に対して算定される重複波力比: $Ratio = \text{Exp}[A(Hc_{nowt}/L)^B]$
- 波群中の個々波に対して算定される重複波力比: F_{cadmas}/F_{nowt}



(a) 規則波における重複波力の比 (Ratio)



(b) 個々波に対する重複波力の比

図-9 波群中の個々波の諸元と重複波力との関係

補正式の適用性に関する検討

波圧の鉛直分布の補正方法に関する考察

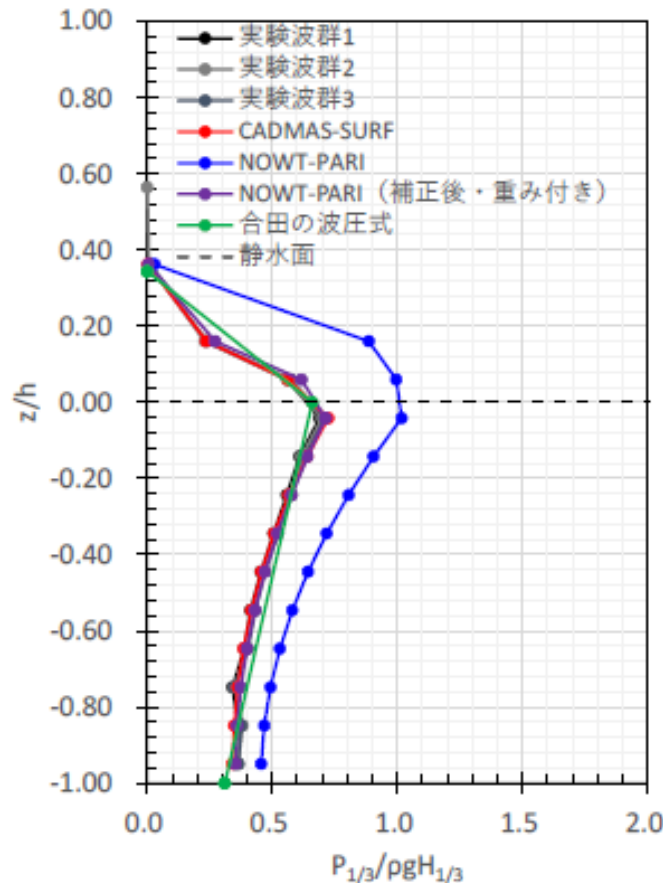
- 波圧の鉛直分布の合わせ込み

- Ratio*の鉛直分布に関する重み

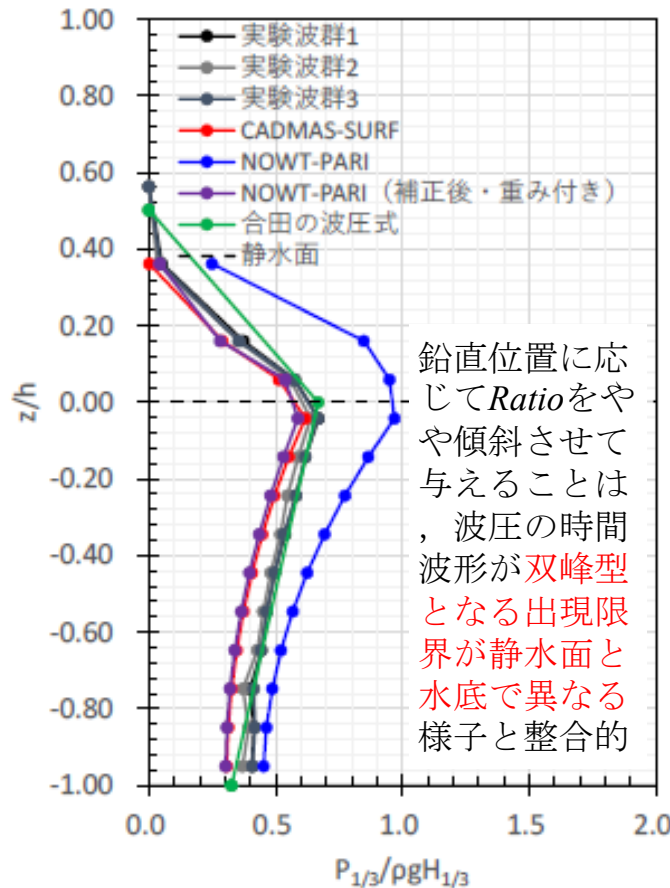
静水面下での ω 分布の傾き: $b=-0.1$

$$\omega = 1 + \frac{b}{\eta_{max} + h} z \quad (-h \leq z < 0)$$

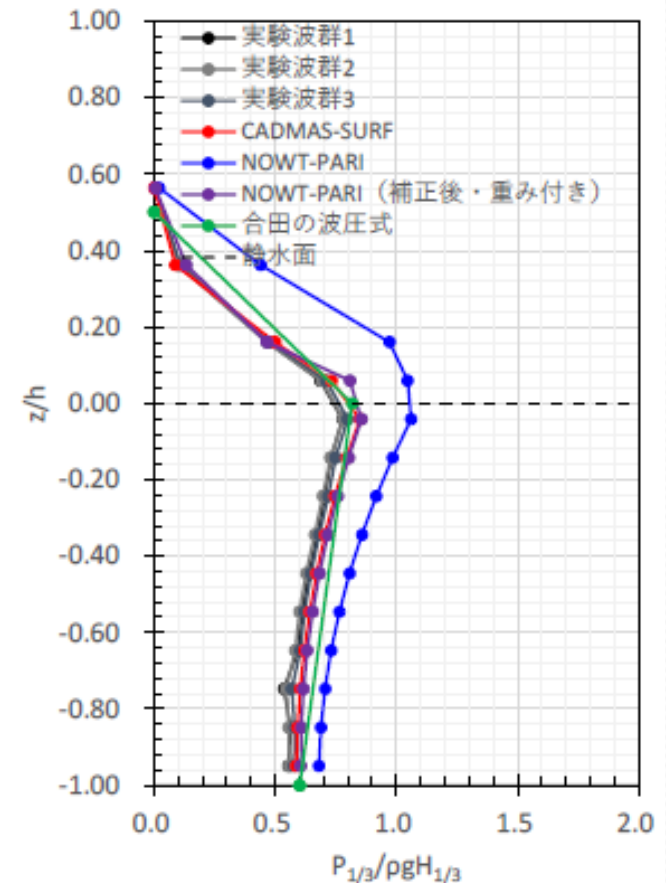
$$\omega = 1 + \left(\frac{h}{\eta_{max}} \right)^2 \frac{b}{\eta_{max} + h} z \quad (0 \leq z < \eta_{max})$$



(a) CaseA : 非線形分散波



(b) CaseB : 非線形分散波



(c) CaseC : 非線形弱分散波

図-10 NOWT-PARIで算定された（重み付き*Ratio*による）補正前後の非線形重複波圧の鉛直分布の比較（有義波圧）

おわりに

- 本研究では、水深が比較的深い直立壁前面で規則波により形成される非線形重複波を対象とした数値実験を行い、弱非線形NOWT-PARIで過大に算定される重複波力・波圧を相対水深 h/L 及び重複波の波形勾配 Hc_{nowt}/L に応じ、実験結果の再現性が高いCADMAS-SURFによる算定結果に近づけるための補正式を提案した。
- これを $h/L=0.20$ 程度以浅の不規則波に対して算定された非線形重複波力・波圧に適用したところ、波浪諸元により若干の再現傾向の違いがみられたものの、重複波力の非線形効果を簡便な式で考慮できることを示した。
- 今後は、平面造波水槽内に設置したモデル港湾岸壁で計測された、非線形重複波に対する波圧の鉛直分布及びこれらを積分した非線形重複波力を検証データとして、NOWT-PARIによる再現計算で算定された重複波力・波圧に対して本研究で得た補正式を適用し、岸壁に対し多方向波が作用する場合などの適用性について検討を行う予定である。
- ただし、重複波領域であれば、斜め入射の場合でも波頂高及び波圧は直入射のときとほとんど同じと考えられるとの指摘がある。