

# ビジネスモデルにより算定される 波圧の鉛直分布に関する考察

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

波浪研究グループ 平井翔太・濱野有貴

# 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

## 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。

# はじめに

## 背景

### 入射波高の推定

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

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

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

$H_{gosei}$  : 合成波高

$H_{ref}$  : 反射波高

$R$  : 反射率

$H_{in}$  : 入射波高

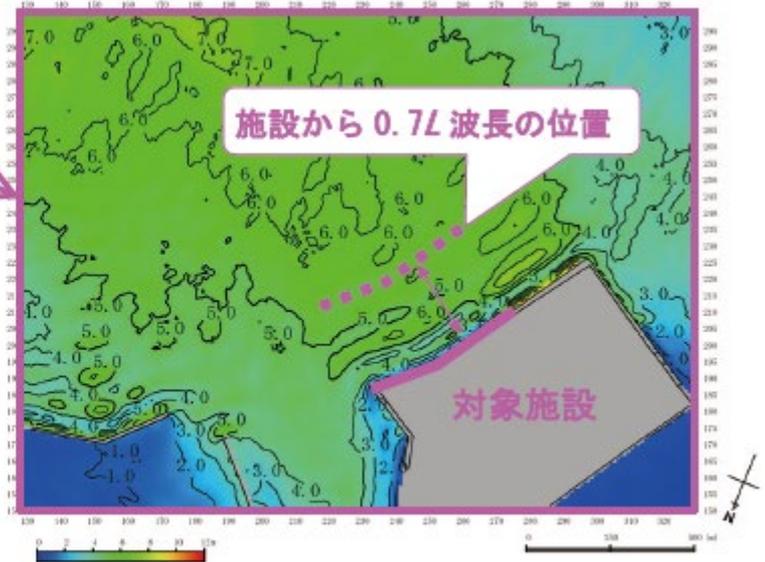
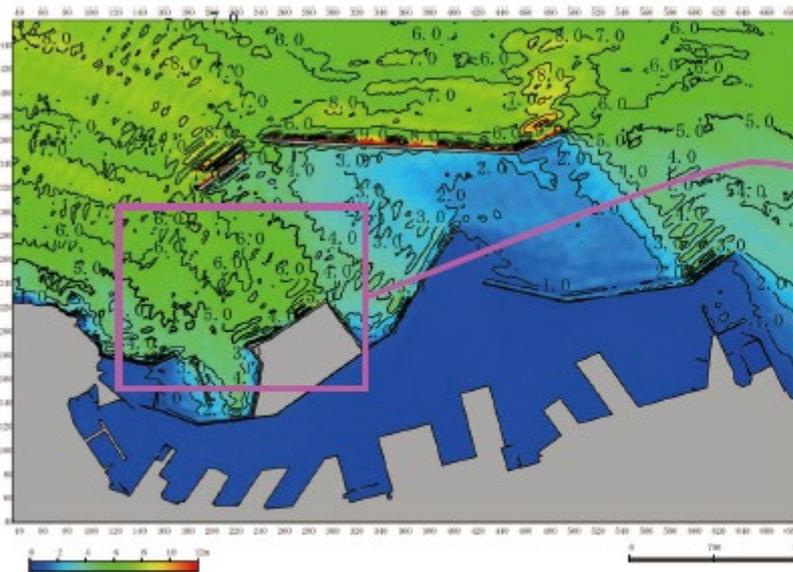
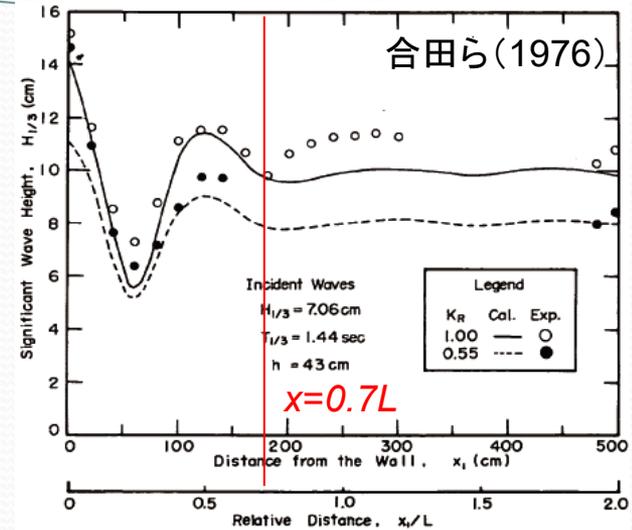


図 6.21 有義波高平面分布および波高抽出地点の設定例 (木港)

# はじめに

## 目的・方法

- 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 することを試みる.
- NOWT-PARI Ver5.2の基礎式 (Madsen型のブシネスク方程式)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{D} \right) \right\}$$

□ 分散補正項  
( $B = 1/15$ )

$$= \mu^2 \left[ \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left( \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \right. \\ \left. + h \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left( \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \right]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{D} \right) \right\}$$

$$= \mu^2 \left[ \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left( \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right) \right. \\ \left. + h \frac{\partial h}{\partial x} \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \right]$$

# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## ● 圧力式に対する補正項の導入

### ● 断面一次元(x方向)の圧力式

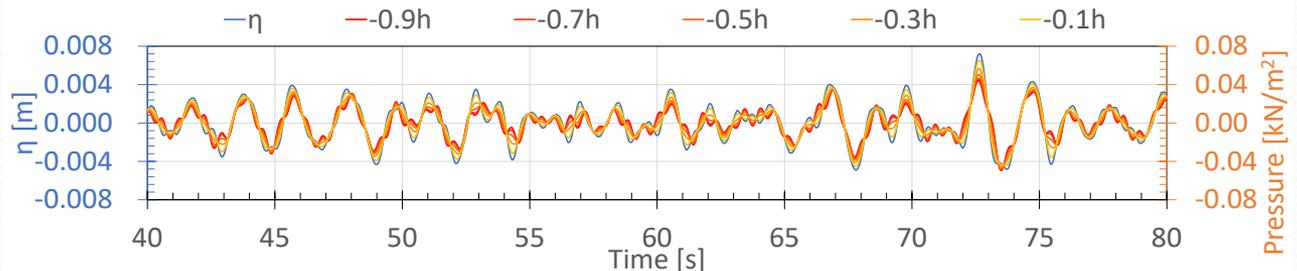
$$\frac{p}{\rho} = g\eta + z \frac{\partial h}{\partial x} \left[ (1 + B_p) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{D} \right) + \frac{B_p}{D} \left\{ \frac{P}{D} \frac{\partial \eta}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\} \right] \quad \square \text{ 補正項 } (B_p = 1/5)$$

$$+ \frac{1}{2} (2zh + z^2) \left[ (1 + B_p) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left( \frac{P}{D} \right) + \frac{B_p}{D} \left\{ \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{D} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{P}{D} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial t} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + h \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) \right\} \right]$$

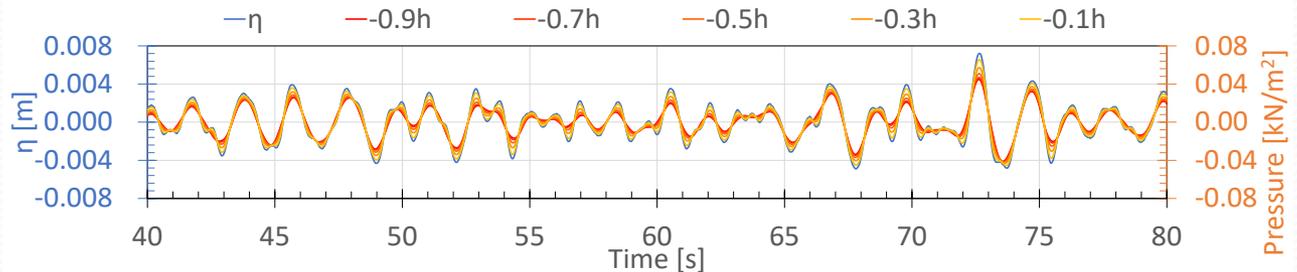
### ● 不規則波の波圧変動 (Case3: 弱非線形弱分散波)

個々波の分散特性は変化 ↑

進行波  $B_p = 0$



進行波  $B_p = 1/5$



# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## 補正項を導入した圧力式の適用範囲

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
水深 $h$ [m]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
波高※ $H$ [m]	0.01	0.01	0.01	0.08	0.16
周期※ $T$ [s]	1.00	1.50	2.00	2.00	2.00
相対水深 $h/L$	0.33	0.18	0.12	0.12	0.12
相対波高 $H/h$	0.02	0.02	0.02	0.16	0.32
アーセル数 $U_r$	0.18	0.64	1.32	10.53	21.05
備考	弱非線形 分散波	弱非線形 分散波	弱非線形 弱分散波	非線形 弱分散波	非線形 弱分散波

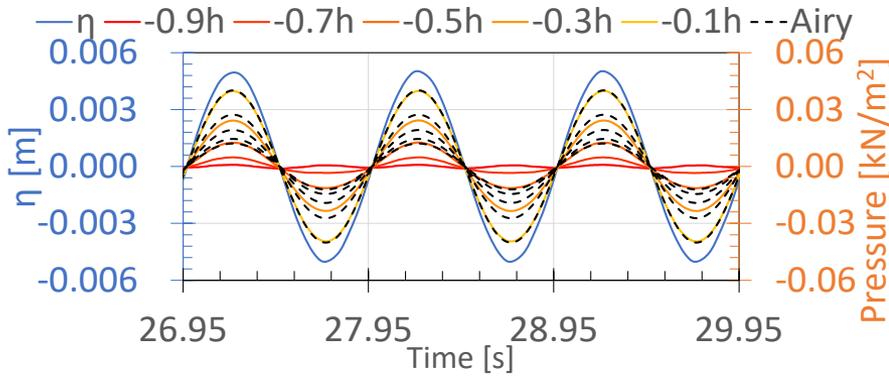
※規則波では平均波高・周期，不規則波では有義波高・周期を表す

差分格子 $\Delta x$ [m]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
差分時間 $\Delta t$ [ms]	1	1	1	0.01	0.01

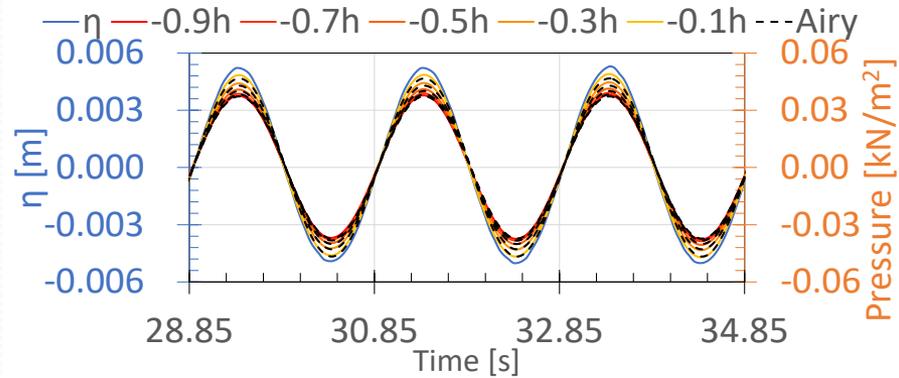
# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## 補正項を導入した圧力式の適用範囲

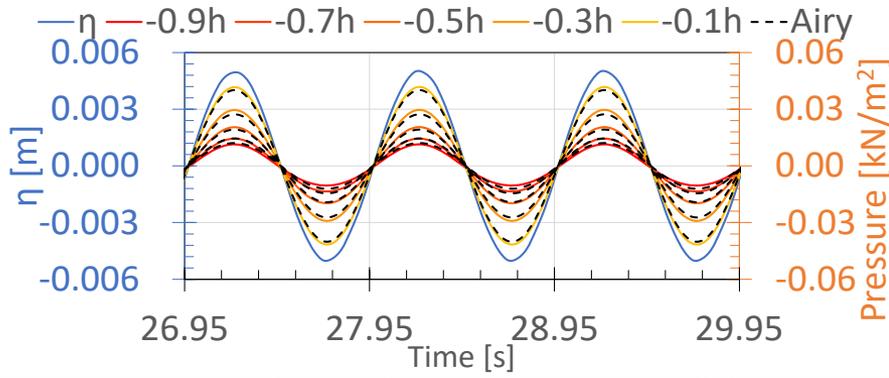
- 圧力式に対する補正係数の設定



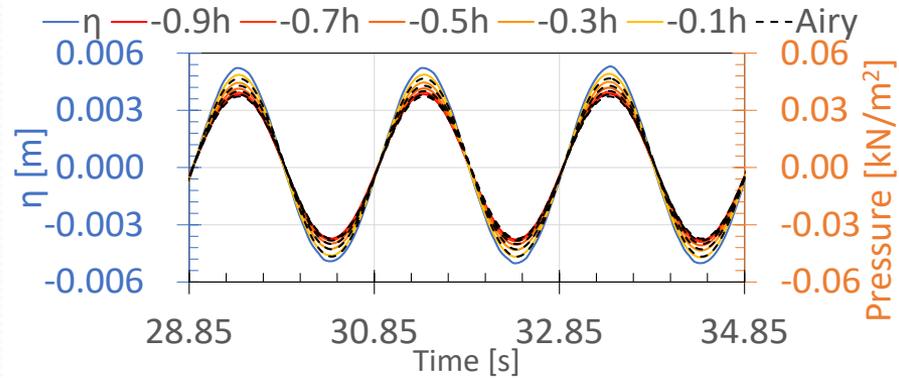
$$B_p = 0$$



$$B_p = 0$$



$$B_p = 1/5$$



$$B_p = 1/5$$

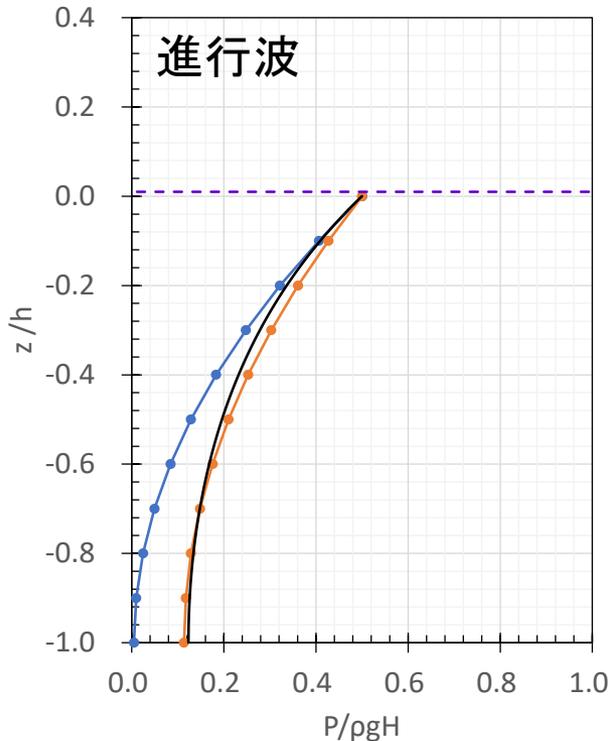
Case1: 弱非線形分散波(進行波)

Case3: 弱非線形弱分散波(進行波)

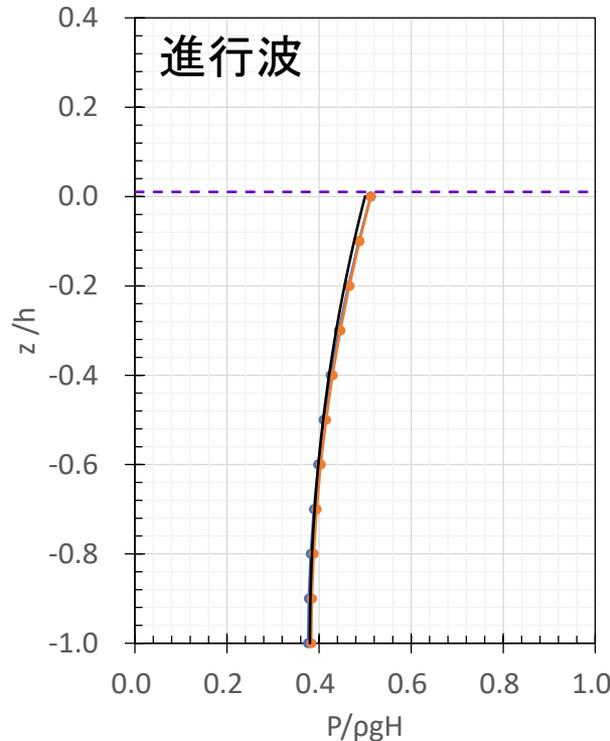
# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## 補正項を導入した圧力式の適用範囲

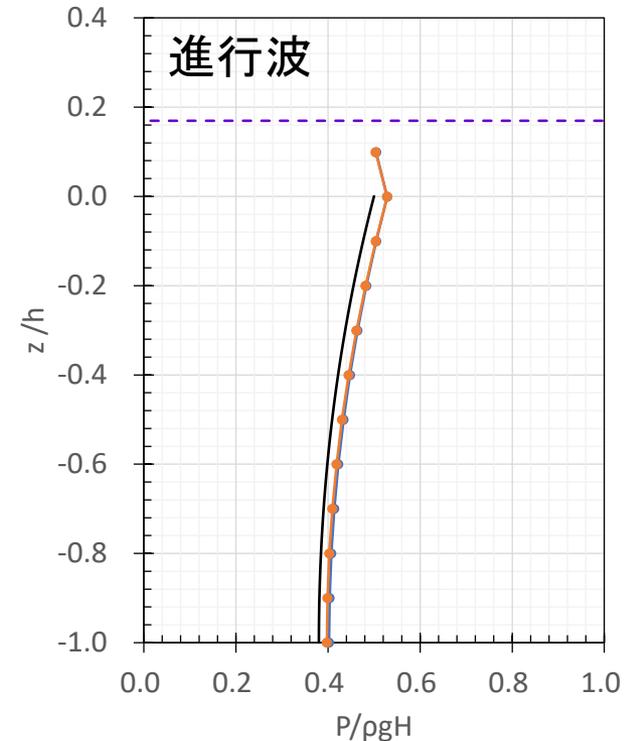
- 微小振幅波理論（進行波）との比較
  - 分散波では補正効果が顕著（Case1）
  - 弱非線形波はAiry波に一致（Case1, 3）
  - 弱分散波では補正効果なし（Case3, 5）



Case1: 弱非線形分散波



Case3: 弱非線形弱分散波

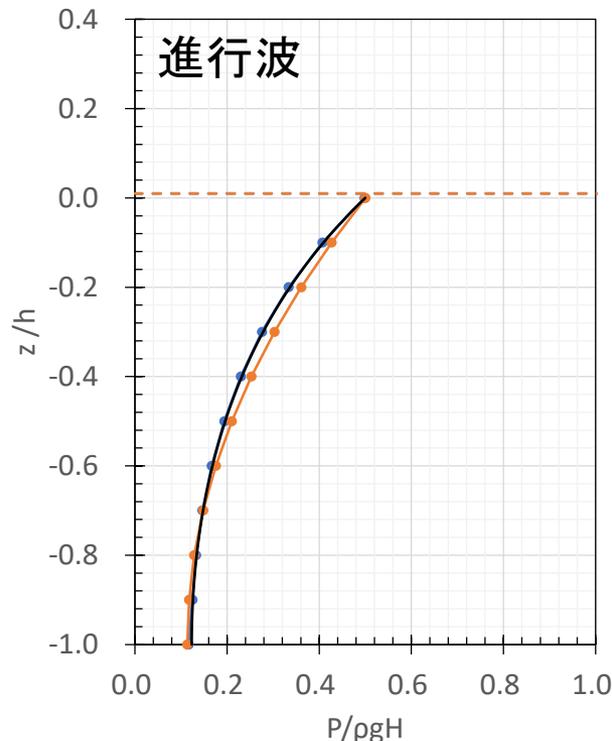


Case5: 非線形弱分散波

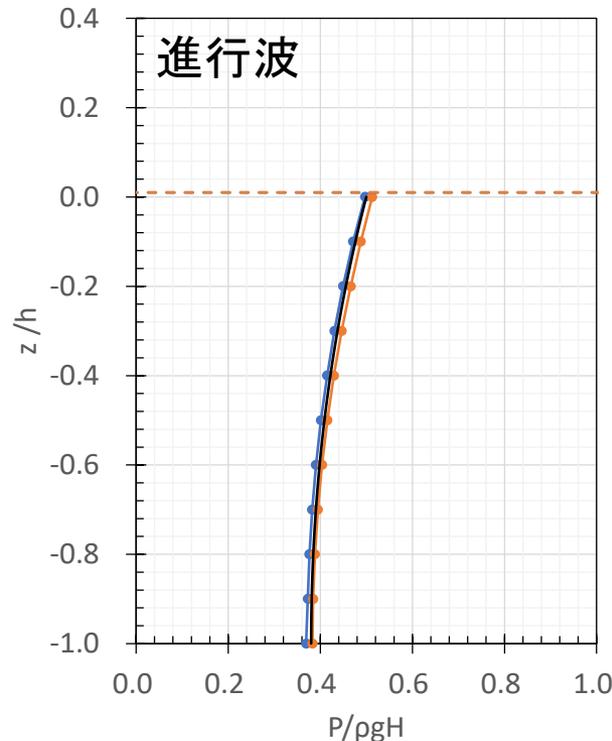
# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## CADMAS-SURF/2Dによる計算結果との比較 ( $B_p=1/5$ )

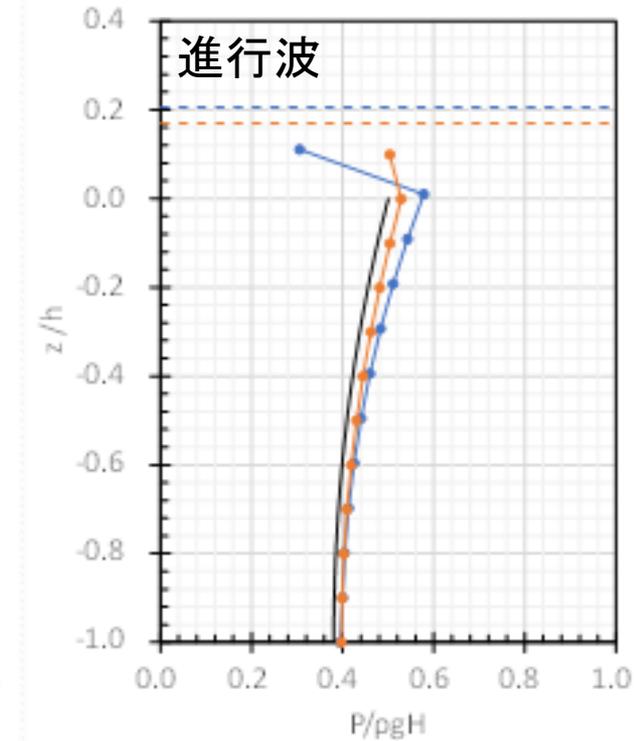
- 弱分散波ではCADMAS-SURF/2Dとほぼ一致 (Case1, 3)
- 非線形波では違いが顕著 (Case5)



Case1: 弱非線形分散波



Case3: 弱非線形弱分散波

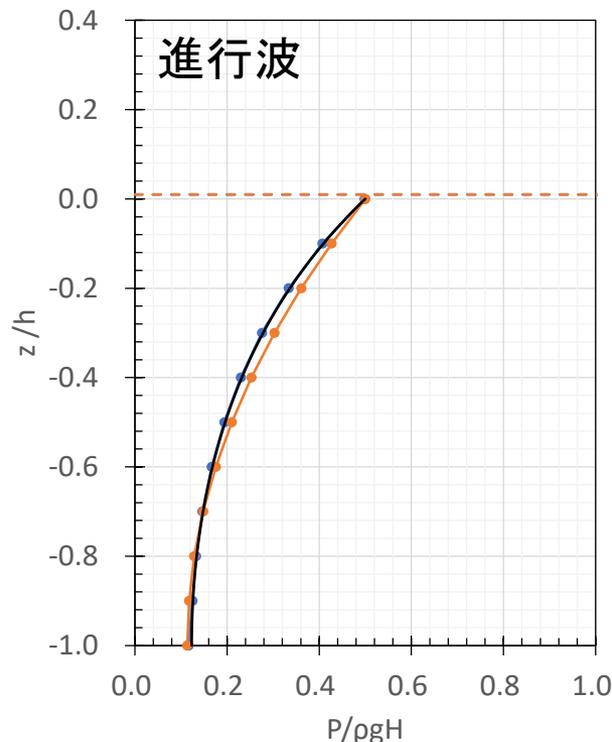


Case5: 非線形弱分散波

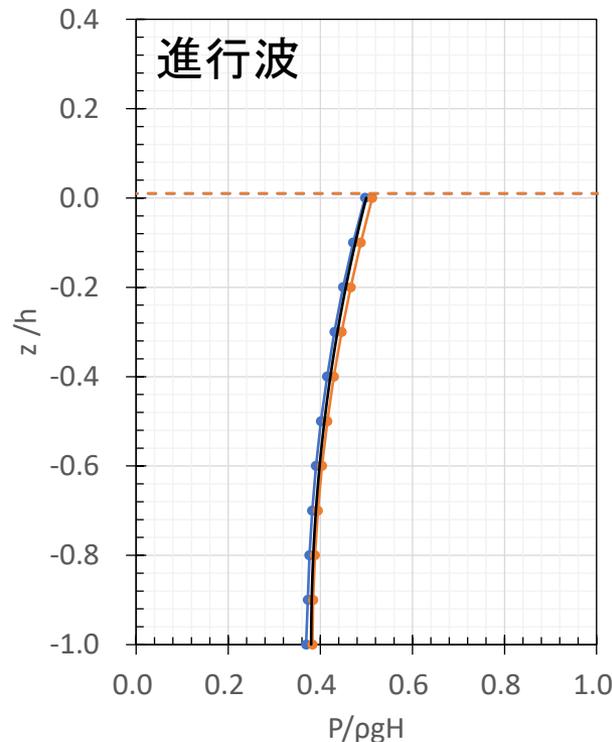
# Madsen型のブシネスク方程式における圧力式の提案

## CADMAS-SURF/2Dによる計算結果との比較 ( $B_p=1/5$ )

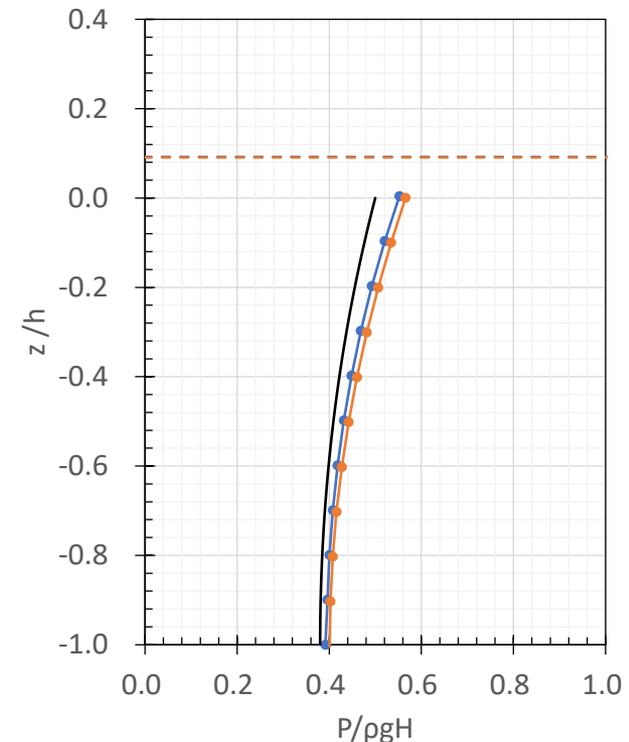
- 弱分散波ではCADMAS-SURF/2Dとほぼ一致 (Case1, 3)
- 非線形波では違いが顕著 (Case5)



Case1: 弱非線形分散波



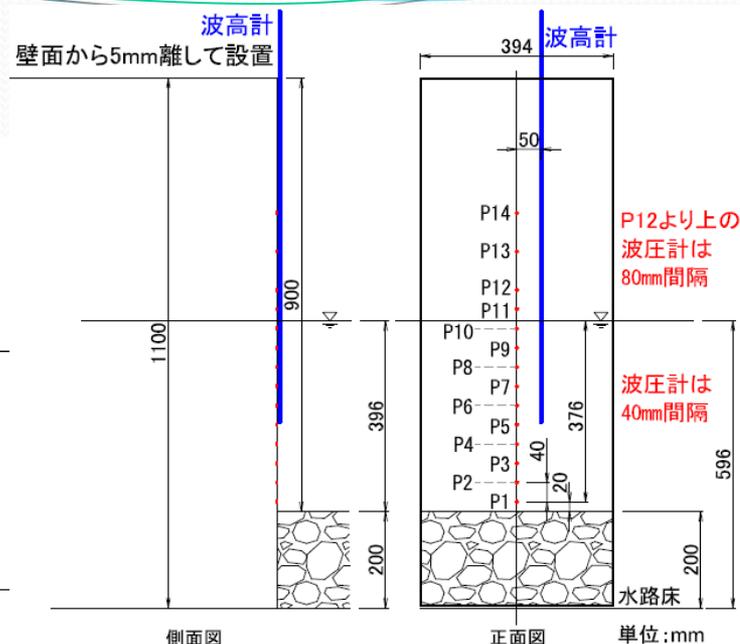
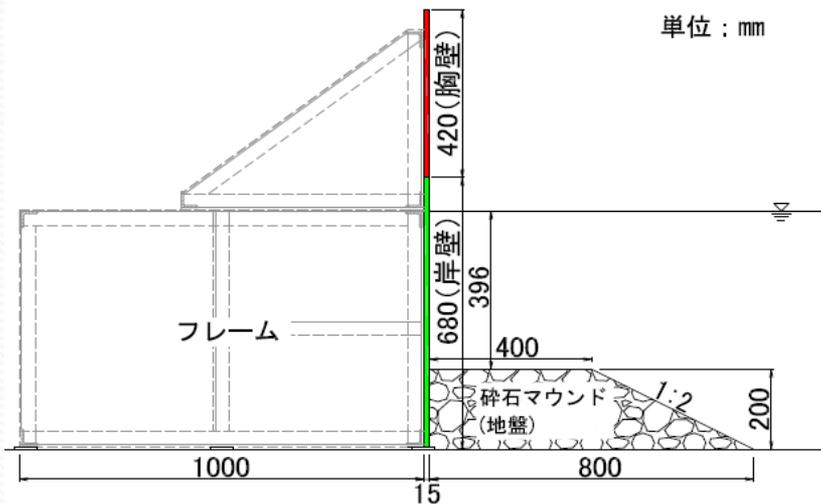
Case3: 弱非線形弱分散波



Case4: 非線形弱分散波

# 直立壁に作用する波圧鉛直分布の再現性

## 実験及び計算条件



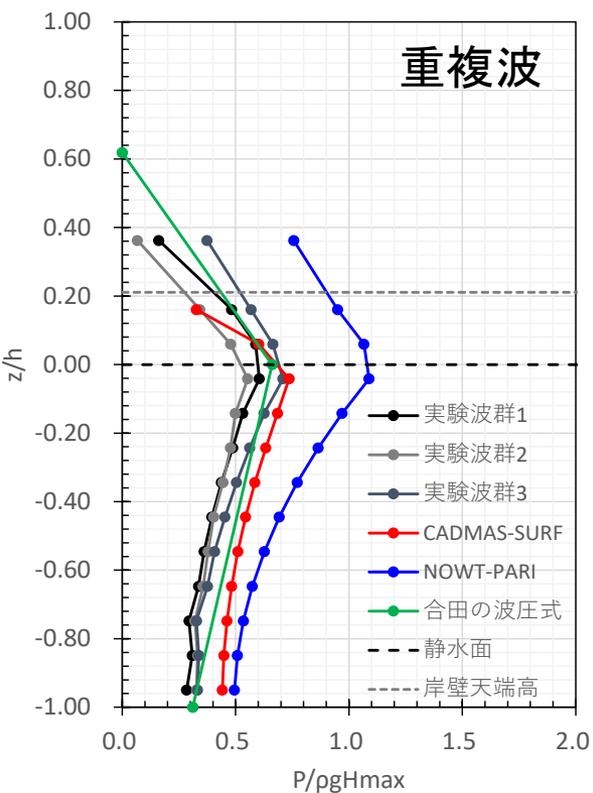
	CaseA	CaseB	CaseC
水深 $h$ [m]	0.396	0.396	0.396
有義波高 $H_{1/3}$ [m]	0.091	0.133	0.132
有義波周期 $T_{1/3}$ [s]	1.142	1.168	1.690
相対水深 $h/L$	0.221	0.214	0.131
相対波高 $H/h$	0.229	0.335	0.334
アーセル数 $U_r$	4.698	7.341	19.371
備考	非線形分散波	非線形分散波	非線形弱分散波
差分格子 $\Delta x$ [m]	0.05	0.05	0.05
差分時間 $\Delta t$ [ms]	0.1	0.1	0.1

項目	設定値
格子サイズ	$\Delta x =$ 計算領域 : 0.02m, 減衰領域 : 0.04m $\Delta z = 0.01m$
物性値	流体密度 : 1.0 t/m <sup>3</sup> , 重力加速度 : 9.8m/s <sup>2</sup>
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
計算時間	波浪場が安定してから少なくとも250波以上
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
造波方法	造波ソース

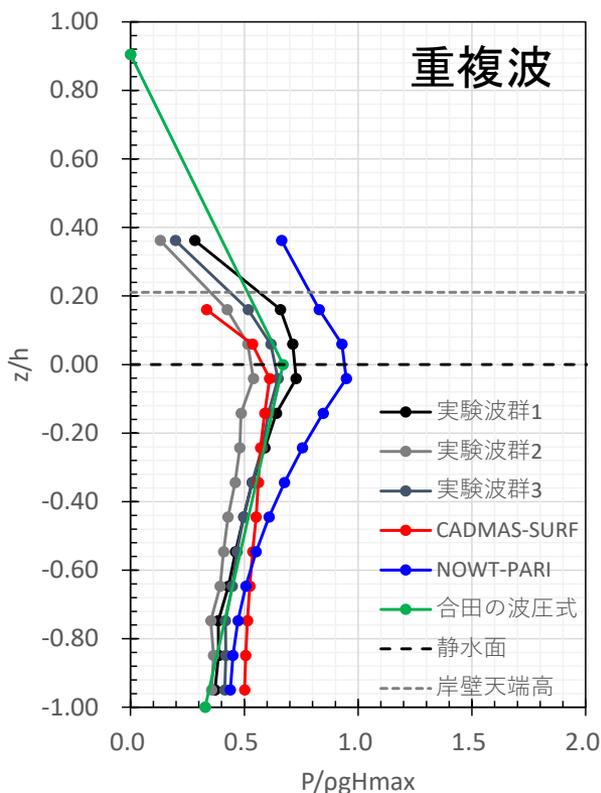
# 直立壁に作用する波圧鉛直分布の再現性

## 実験及び計算結果

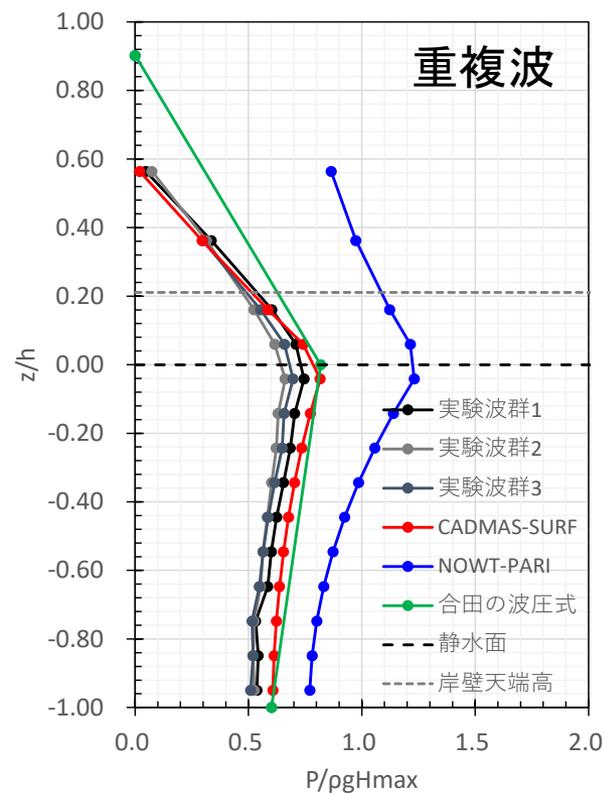
- 直立壁に作用する重複波圧の鉛直分布(最大波力)
  - 合田波圧式, CADMAS-SURF/2Dによる算定結果は, 実験結果と同等
  - NOWT-PARI Ver5.2による算定結果は実験結果に対し過大



CaseA: 非線形分散波



CaseB: 非線形分散波

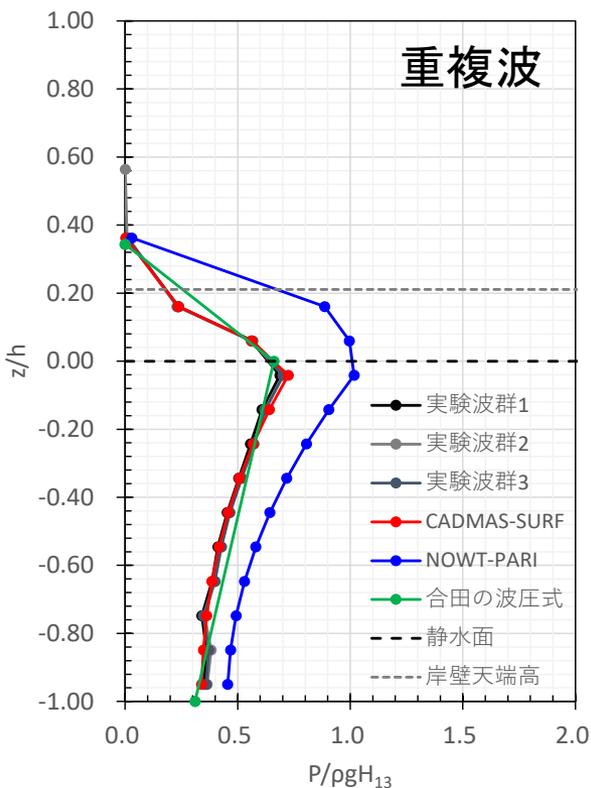


CaseC: 非線形弱分散波

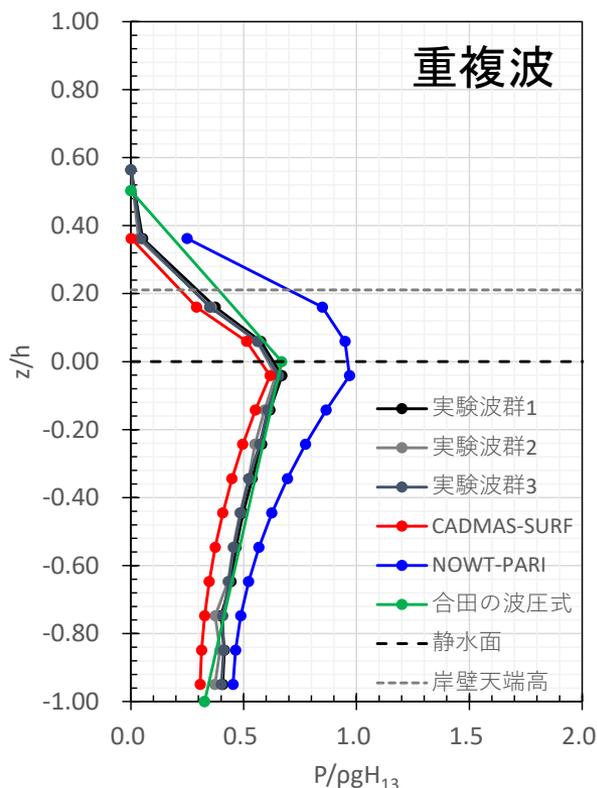
# 直立壁に作用する波圧鉛直分布の再現性

## 実験及び計算結果

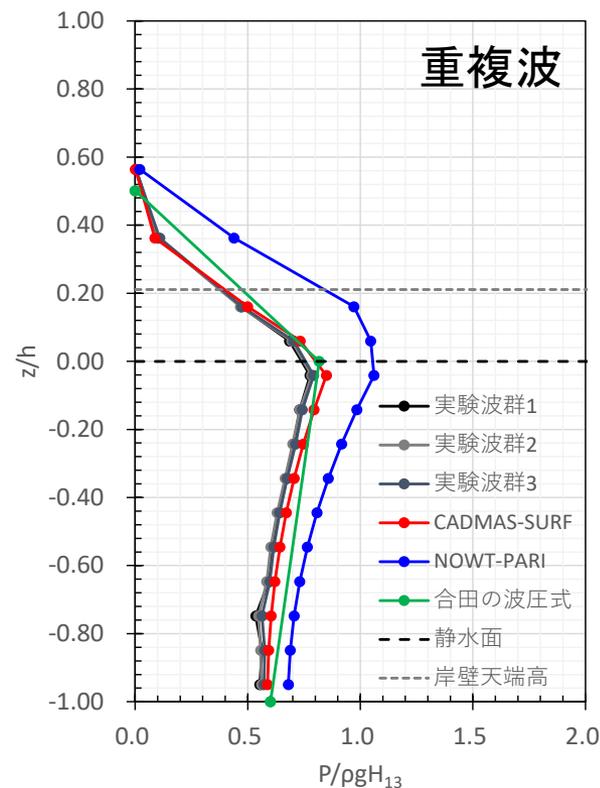
- 直立壁に作用する重複波圧の鉛直分布(有義波力)
  - 合田波圧式, CADMAS-SURF/2Dによる算定結果は, 実験結果と同等
  - NOWT-PARI Ver5.2による算定結果は実験結果に対し過大



CaseA: 非線形分散波



CaseB: 非線形分散波

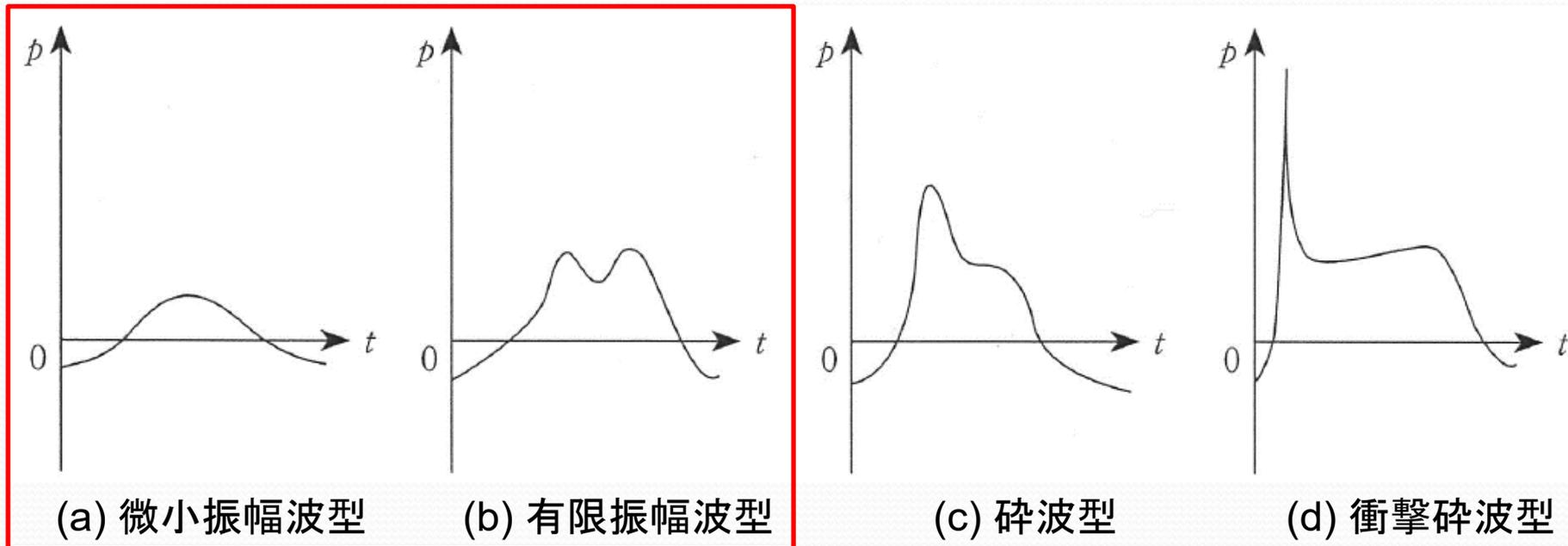


CaseC: 非線形弱分散波

# 直立壁に作用する波圧鉛直分布の再現性

## 波力の時間波形

岩田好一郎, 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.

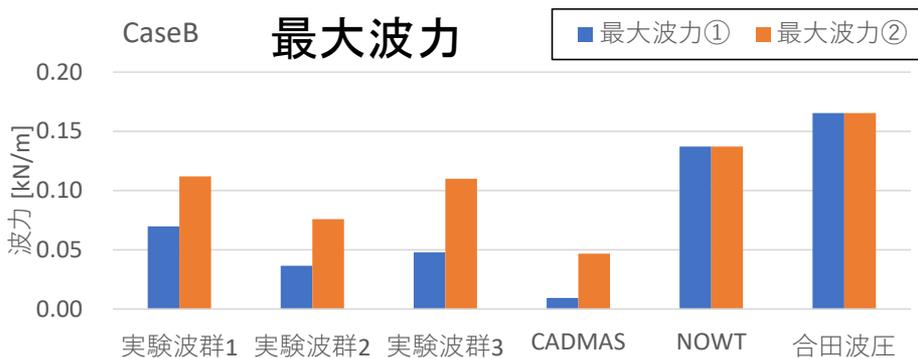


# 直立壁に作用する波圧鉛直分布の再現性

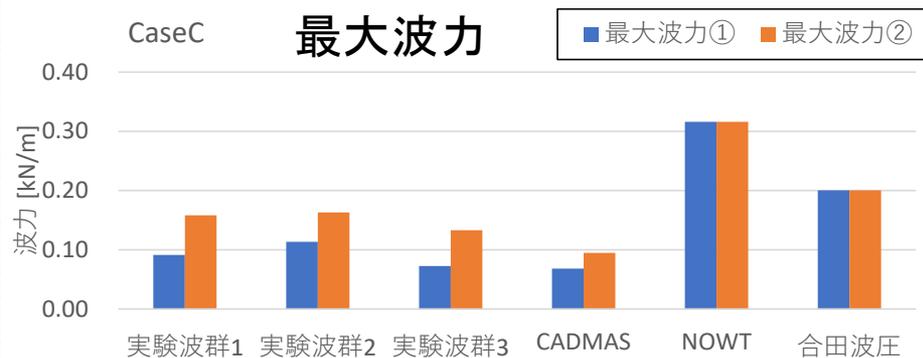
## 実験及び計算結果

### 岸壁上の胸壁に作用する波力の評価

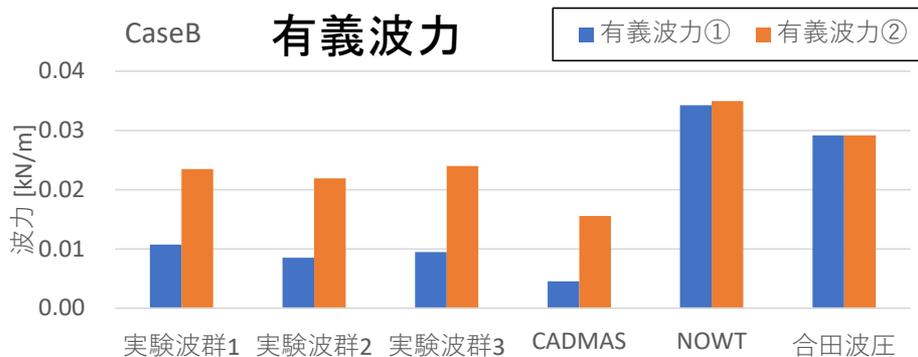
- 波力①: 直立壁に作用する最大・有義波力から胸壁部分を抽出
- 波力②: 胸壁に作用する波力のみに対し最大値・有義値を算定



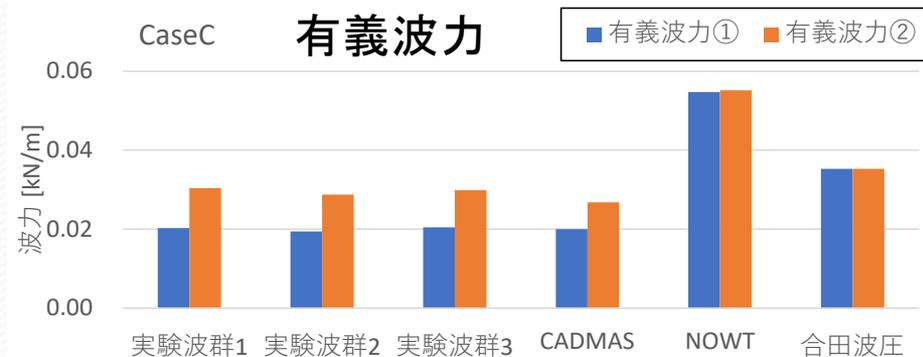
CaseB: 非線形分散波



CaseC: 非線形弱分散波



CaseB: 非線形分散波



CaseC: 非線形弱分散波

# おわりに

- 本研究では、ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver5.2)の基礎式であるMadsen型のブシネスク方程式に対する圧力式の補正項を新たに導出するとともに、数値実験を通じて最適な補正係数を設定することにより、個々波の分散特性が変化する不規則波に対しても、分散波による波圧の鉛直分布を適切に算定できることを示した。
- また、弱非線形波に対する進行波の波圧分布も再現された。
- しかし、非線形重複波により生じる2山型の波力の時間波形が再現されないために、少なくとも護岸などの設計実務上は安全側ではあるが、非線形波に対する直立壁での重複波圧を過大に算定することが確認された。
- 岸壁上の胸壁に作用する波力を適切に算定するためには、静水面上の波圧分布に関して、より詳細なモデル化を検討する必要があることが明らかとなった。