

横揺を用いた波浪中抵抗増加の簡易推定

横田 早織, 櫻田 顕子, 黒田 麻利子, 辻本 勝

(海上技術安全研究所)

発表内容

1. 背景
2. 簡易推定式
3. 実海域性能評価
4. 結言

背景

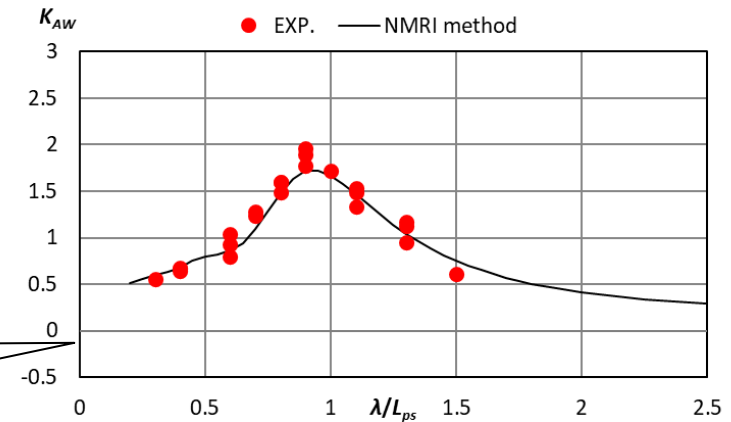
➤ 波浪中抵抗増加推定式

$$R_{AW} = R_{AWM} + R_{AWR}$$

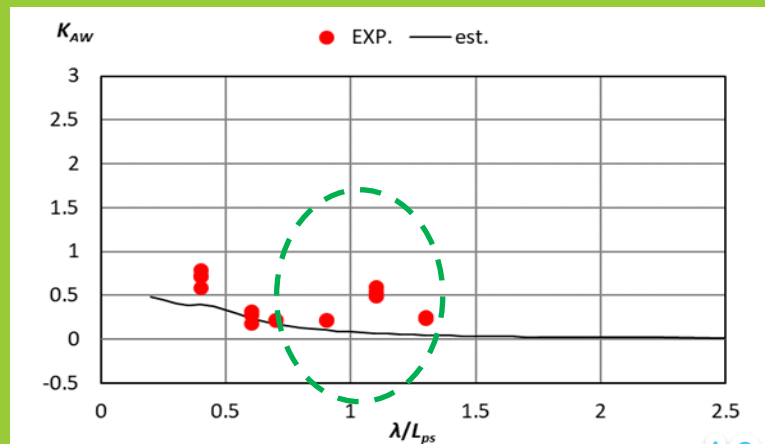
運動成分

反射波抵抗増加成分

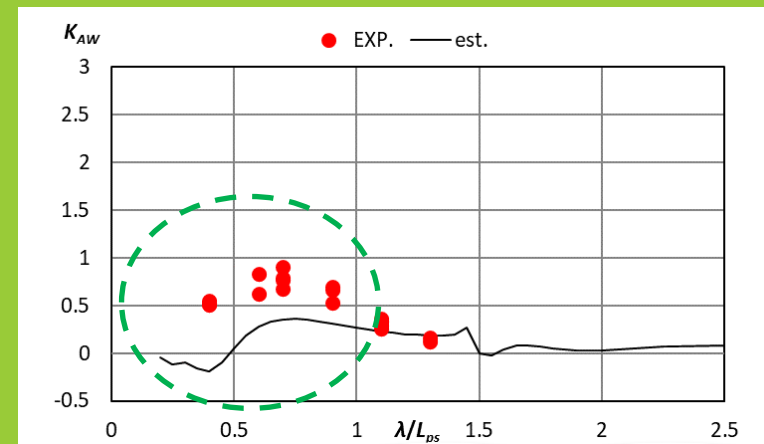
向波中波浪中抵抗増加は精度よく推定できている



▲向波中抵抗増加周波数応答(Fr=0.157,DTC)



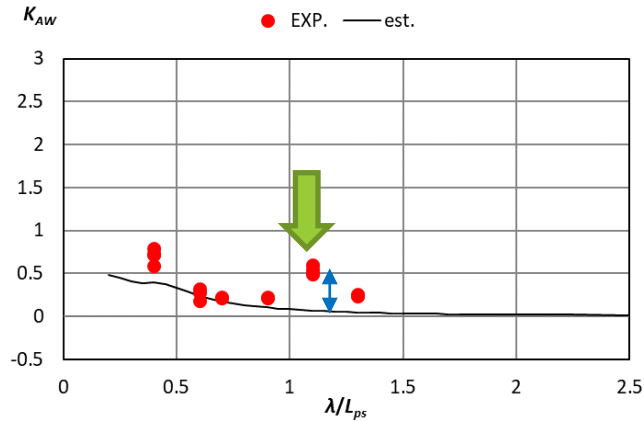
▲波浪中抵抗増加周波数応答(Fr=0.157,DTC,α=90°)



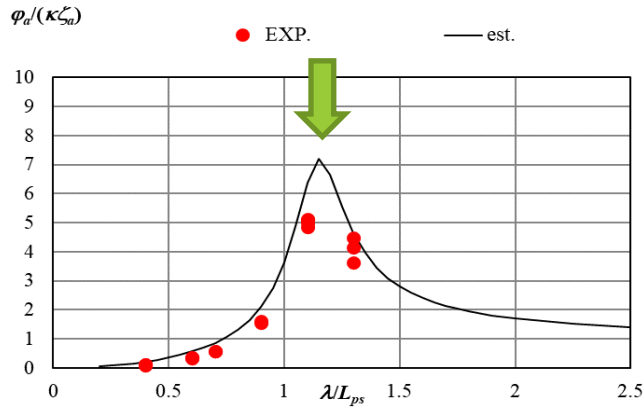
- ・斜波中では傾向が異なる点がある
- ・精度をより向上させたい

背景

横波

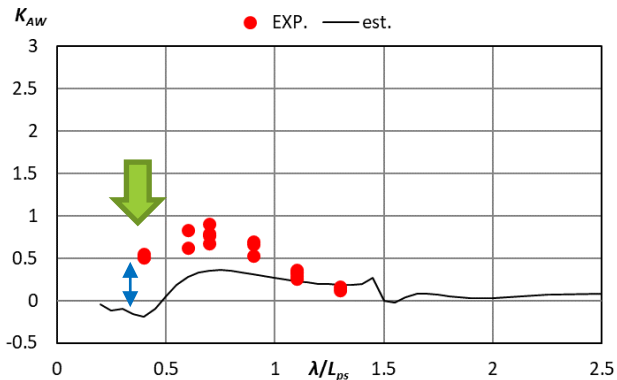


▲波浪中抵抗増加周波数応答(Fr=0.157,DTC,α=90[deg.])

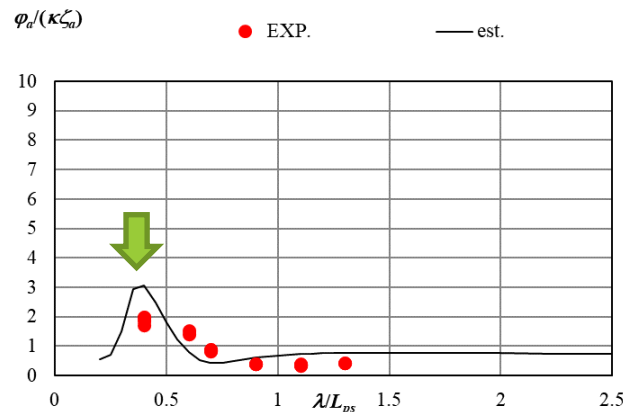


▲横揺振幅周波数応答(Fr=0.157,DTC,α=90[deg.])

斜追波



▲波浪中抵抗増加周波数応答(Fr=0.157,DTC,α=135[deg.])



▲横揺振幅周波数応答(Fr=0.157,DTC,α=135[deg.])

自由横揺試験から得たa,b係数を用いて推定

$$\Delta\phi = |\phi_n| - |\phi_{n+1}|$$

$$\phi_m = \frac{|\phi_n| + |\phi_{n+1}|}{2}$$

$$\Delta\phi = a\phi_m + b\phi_m^2$$

$$B_{44} = \frac{2}{\pi} \frac{\rho g \nabla GM}{\omega_\phi} \left\{ a + \frac{180}{\pi} b\phi_m \right\}$$

ここで、
連続する2つの横揺振幅 ϕ_n の差: $\Delta\phi$
平均: ϕ_m

横揺減衰力係数: B_{44}

流体密度: ρ

重力加速度: g

排水容積: ∇

メタセンタ高さ: GM

横揺固有角周波数: ω_ϕ

背景

現在の計算法では、上下揺・縦揺から計算を行っているため、横揺の影響は考慮されていない

波浪中抵抗増加の乖離の大きい周波数
⇒横揺振幅のピーク



波浪中抵抗増加で横揺影響成分を考慮することで
精度の向上が考えられる

⇒吉田らによる横波中抵抗増加の水槽試験結果からも示されている^[1]

①波浪中抵抗増加 横揺影響成分の簡易推定式の検討

$$R_{AW} = R_{AWM} + R_{AWR} + R_{AW Roll}$$

②横揺影響成分を考慮したことによる感度解析の実施

参考文献:

[1]吉田尚史, 折原秀夫, 高岸憲璽: 大型肥大船の横波中抵抗増加に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会論文集第29号, p51-56, 2019

簡易推定式

Gerritsma法による波浪中抵抗増加

Gerritsma法での波浪中抵抗増加

減衰力と相対速度で損失エネルギーを表現した実用的計算法

$$R_{AW} = \frac{k}{2\omega_e} \cdot \int_0^L b' \cdot V_{za}^2 dx$$

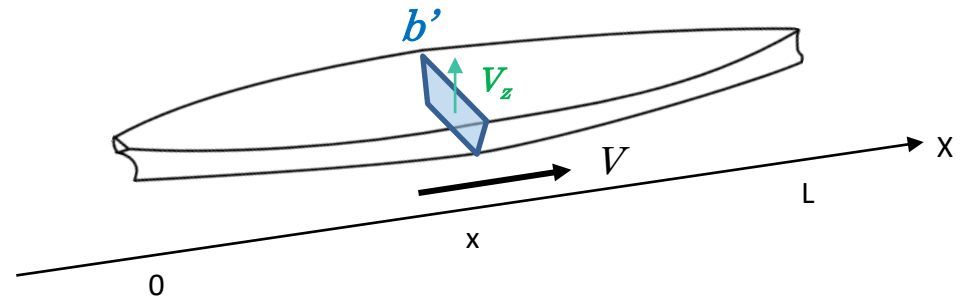
角周波数 k
 出会い波角周波数 $2\omega_e$
 b' : X断面の相対流速の振幅
 V_{za} : X断面の相対流速の振幅

横揺成分のみ取り出し

$$b' = N_H - V \frac{dm_H}{dx}$$

断面造波減衰力係数 N_H
 船速 V
 付加質量 dm_H

横揺減衰力係数の利用



横揺成分の取り出し

$$R_{AW Roll} = \frac{k}{2\omega_e} \cdot \left\{ \int_0^L b' \cdot V_{za}^2 dx \right\}_{Roll}$$

波浪中抵抗増加 横揺影響成分の導出

座標系より船体上任意の点 (x, y, z) における相対変位

$$Z_r = (z_G - x\theta + y\phi) - \zeta - f_s - h_d$$

船体運動による静水面からの変位

静水面に対する進行波面の高さ

静的水位上昇

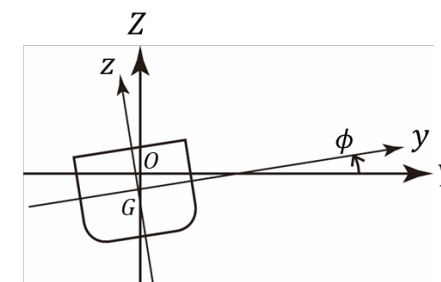
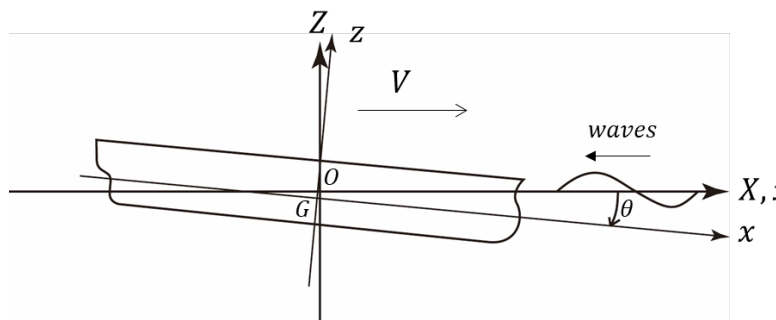
動的水位上昇

➡ X断面の相対流速の振幅

$$V_{Za} = \left(\frac{\partial}{\partial t} - V \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \right) Z_r$$

➡ 横揺成分のみ取り出し

$$\{V_{Za}\}_{roll} = y \frac{\partial \phi}{\partial t}$$



波浪中抵抗増加 横揺影響成分の導出

$$R_{AW Roll} = \frac{k}{2\omega_e} \cdot \left\{ \int_0^L b' \cdot V_{za}^2 dx \right\}_{Roll}$$

$$\left\{ \int_0^L b' \cdot V_{za}^2 dx \right\}_{Roll} = \int_0^L \frac{b_{44}(x)}{B^2 d / L} \cdot (y_s(x) \frac{\partial \phi}{\partial t})^2 dx$$

断面毎の横揺減衰力係数 $b_{44}(x)$

積分

横揺減衰力係数 B_{44}

代表点 $y_s(x)$

代表長さ Y_s

$$Y_s = k_{xx} \cdot B$$

横揺固有周期

$$T_\phi = \frac{2\pi k_{xx} B}{\sqrt{gGM}} \quad [s]$$

$$R_{AW Roll} = \frac{k}{2\omega_e} \cdot \frac{B_{44} (Y_s \frac{\partial \phi}{\partial t})^2}{B^2 d / L}$$

$$\phi = \phi_a e^{i(\omega_e t + \varepsilon_\phi)}$$

$$R_{AW Roll} = \frac{k}{4\omega_e} \cdot \frac{B_{44} \cdot (k_{xx} B)^2 \cdot (\omega_e \phi_a)^2}{B^2 d / L}$$

波浪中抵抗増加が横揺による影響があるとし、分離できるとすると

$$R_{AW} = R_{AWM} + R_{AWR} + R_{AW Roll}$$

運動成分+反射波抵抗増加成分+横揺影響成分

実験値と比較

比較に用いた対象船①～DTC～

● 対象船①

- DTC(Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship)(満載)

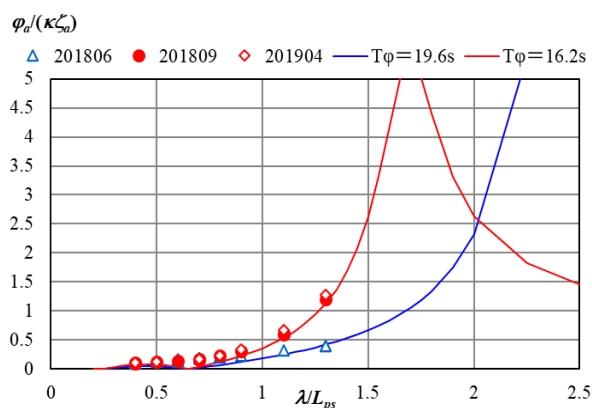
| Item | Full-scale | Model |
|----------------------------------|------------|-------|
| Length between perpendiculars[m] | 355.0 | 5.5 |
| Ship breadth [m] | 51.0 | 0.79 |
| Midship draft [m] | 14.5 | 0.225 |
| Natural period of roll [s] | 16.2 | 1.62 |
| | 19.6 | 2.44 |



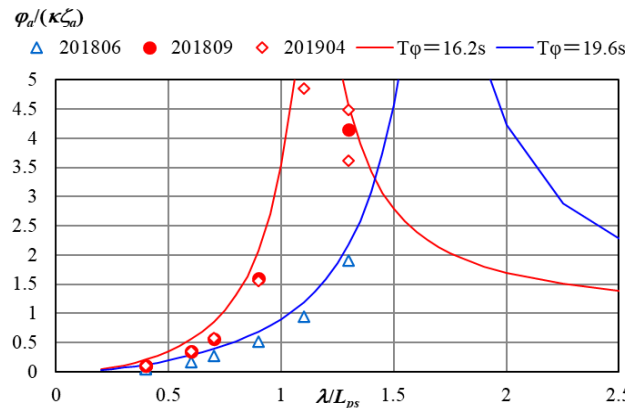
- ・3回試験を実施
- ・3回中2回は同じ $T\phi$ (201809・201904)
- ・ $T\phi$ 2種類の K_{AW} の結果あり(赤・青)

横揺振幅の比較

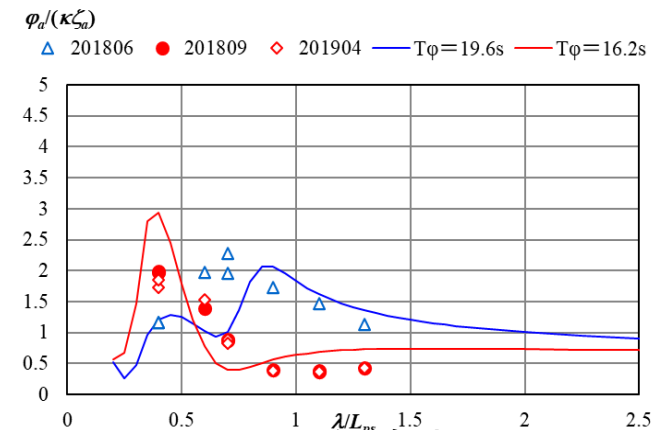
自由横揺試験から得たa,b係数を用いて推定



(a)斜向波



(b)横波

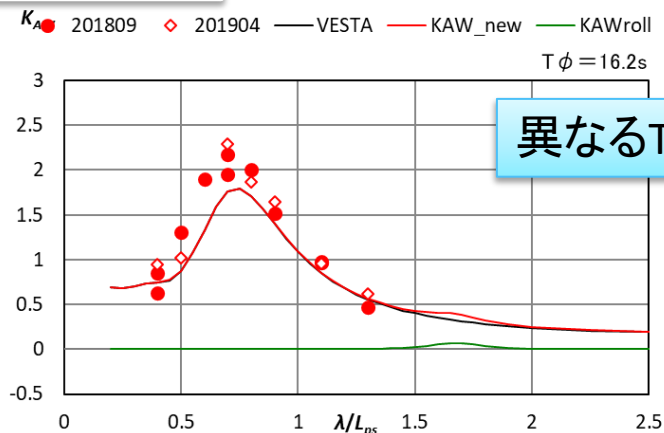


(c)斜追波

実験値との比較①～DTC～

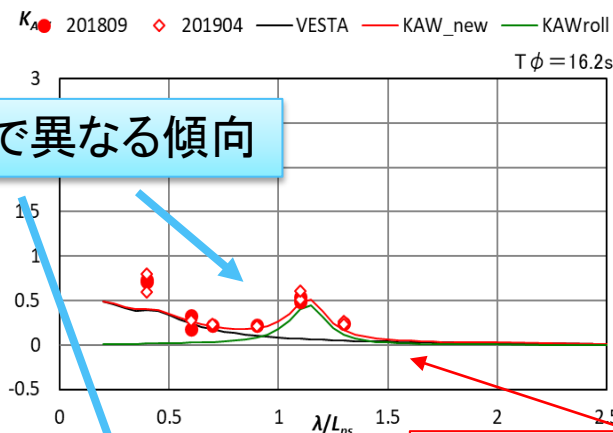
波浪中抵抗増加

$T\phi=16.2s$



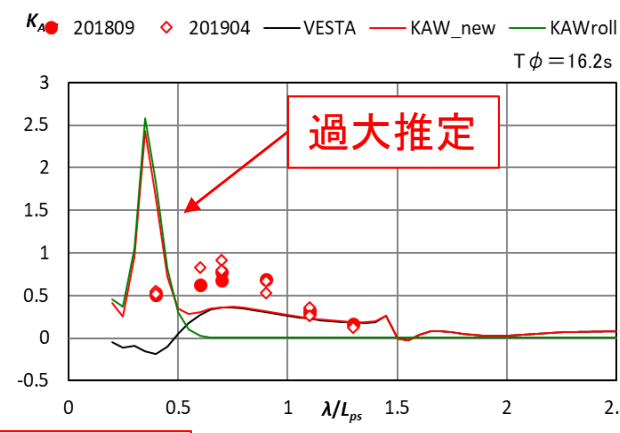
(a)斜向波

異なる $T\phi$ で異なる傾向



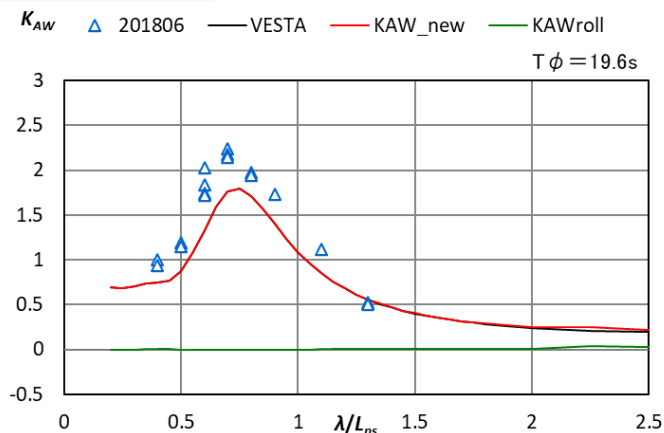
(b)横波

横揺影響を考慮すると傾向を捉えている

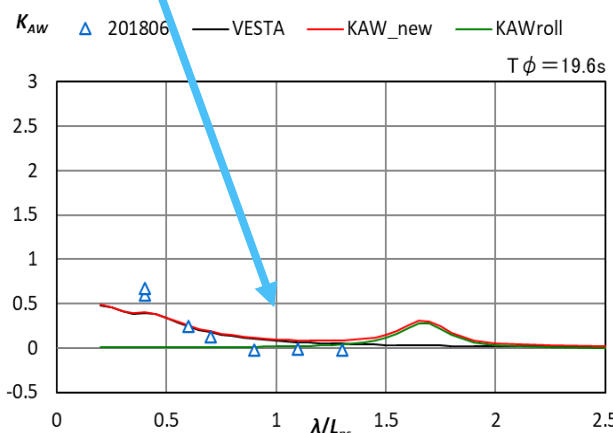


(c)斜追波

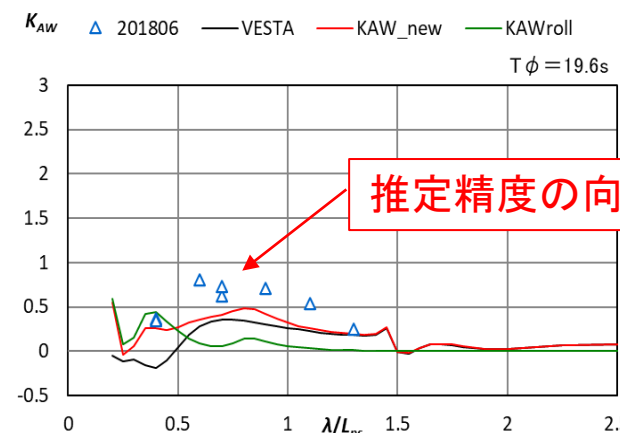
$T\phi=19.6s$



(a)斜向波

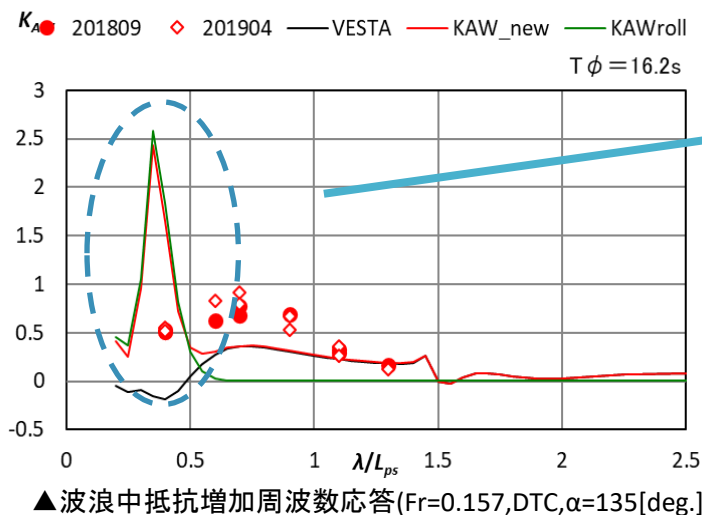


(b)横波



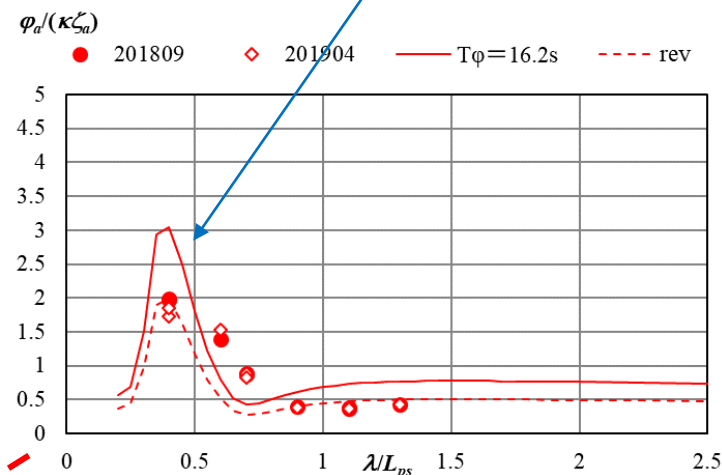
(c)斜追波

斜追波での過大推定について

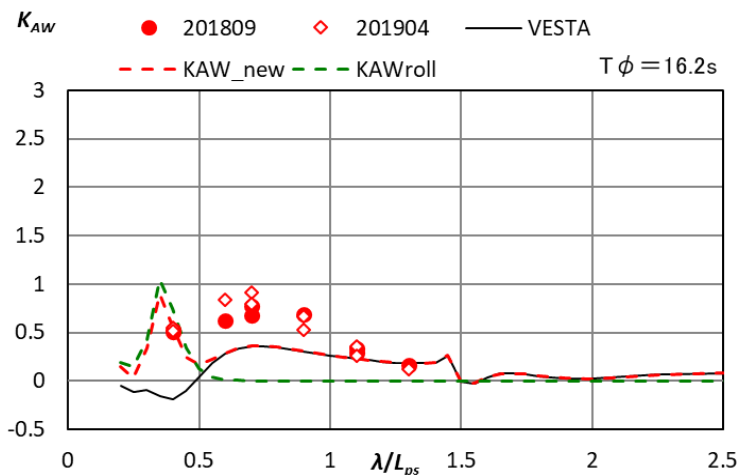


横揺振幅をみてみると...

横揺振幅も過大推定



横揺振幅を2/3倍して再計算



横揺振幅の推定精度が向上すれば
波浪中抵抗増加の推定精度も向上

比較に用いた対象船②～33CT～

● 対象船②

- 33CT(ケミカルタンカー)(満載)

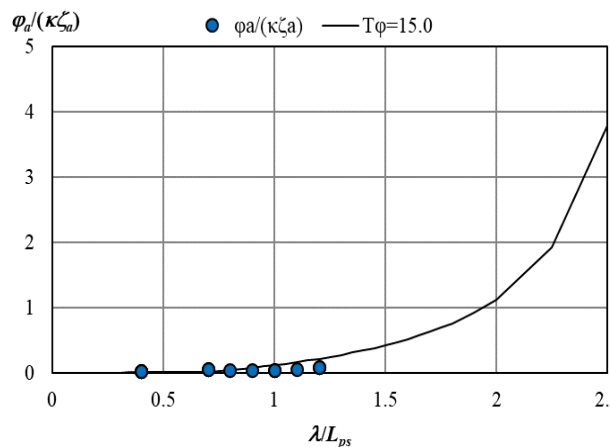
| Item | Full-scale | Model |
|----------------------------------|-------------|-------|
| Length between perpendiculars[m] | 170.5 | 4.65 |
| Ship breadth [m] | 27.7 | 0.756 |
| Midship draft [m] | 14.5 | 0.273 |
| Natural period of roll [s] | 15.0 | 2.48 |



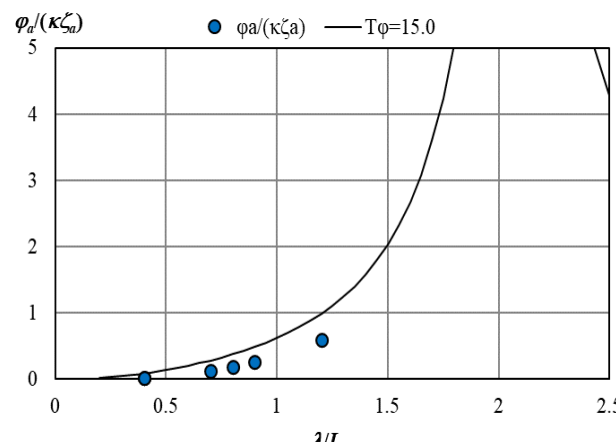
横揺振幅の比較

自由横揺試験から得たa,b係数を用いて推定

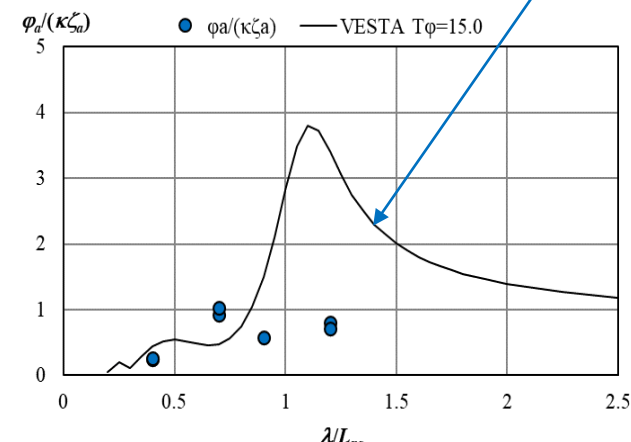
推定精度が良くない



(a) 斜向波



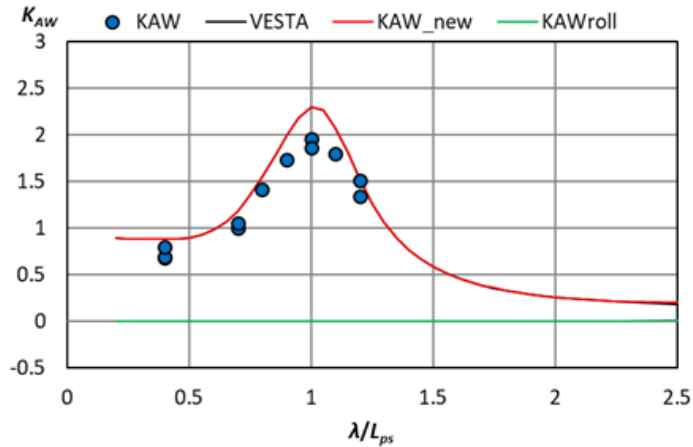
(b) 横波



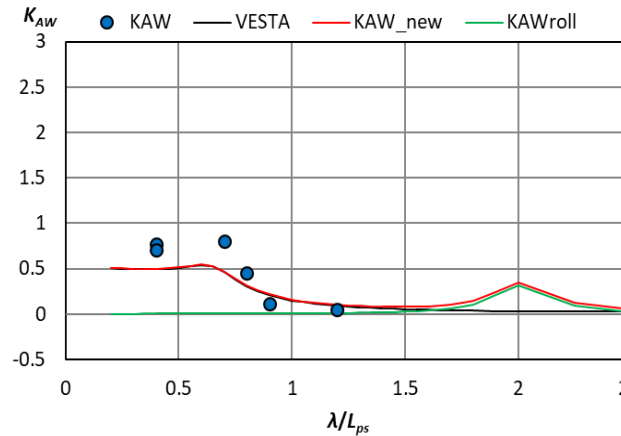
(c) 斜追波

実験値との比較②～33CT～

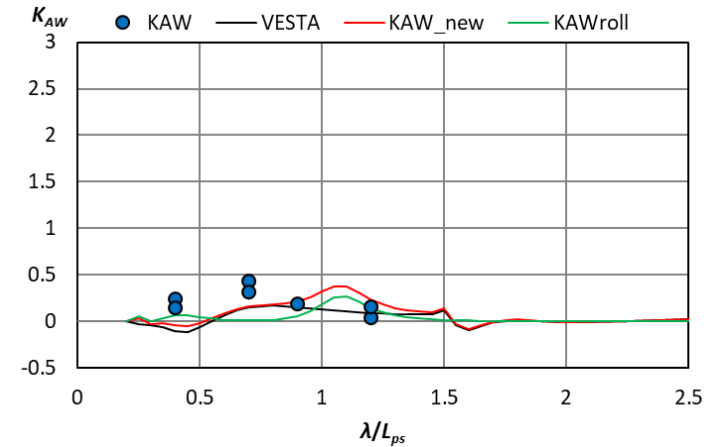
波浪中抵抗増加



(a)斜向波

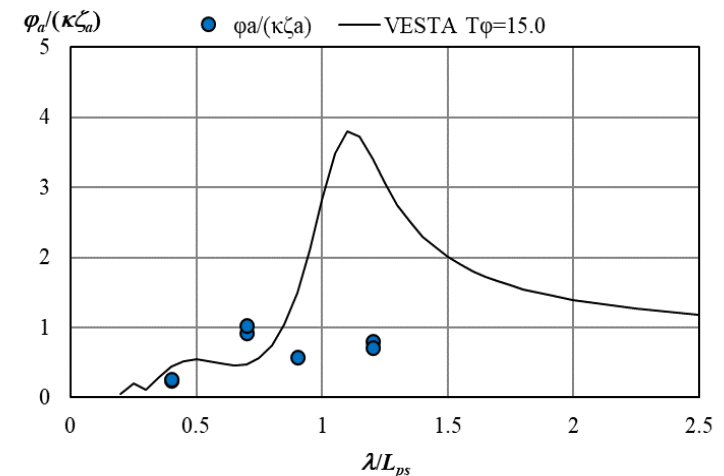


(b)横波



(c)斜追波

横揺振幅の推定精度が向上すれば
波浪中抵抗増加の推定精度の向上が期待できる



実海域性能評価

感度解析

横揺減衰力影響を考慮する場合としない場合での実運航上での影響を調査するため、それぞれの手法で波浪中抵抗増加を推定した場合での実運航シミュレーションを実施し、燃料消費量および船速低下の比較を行う

- 対象船： DTC(満載)、33CT(満載)
- 比較： 燃料消費量、船速低下
- 横揺推定：自由横揺試験から得たa,b係数を用いて推定

※ DTCは $T\phi=19.6s$ の結果を使用

- 主機：回転数一定(計画速力)

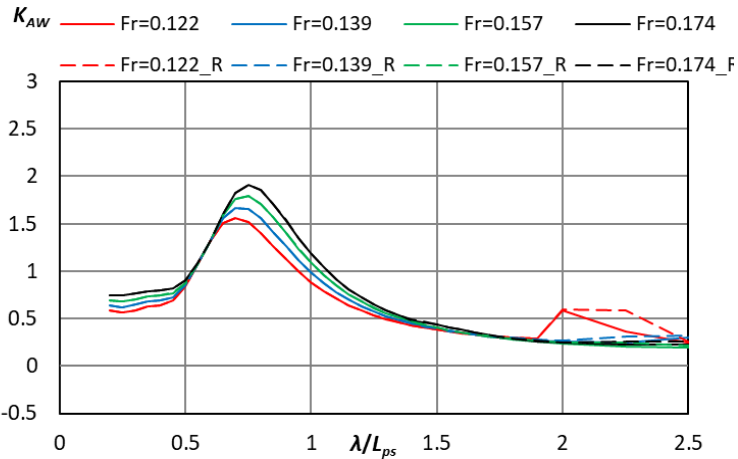
気象海象条件

| <i>BF</i> | $U_{wind}[m/s]$ | $H[m]$ | $T[s]$ |
|-----------|-----------------|--------|--------|
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 4.4 | 0.6 | 3.0 |
| 4 | 6.9 | 1.0 | 3.9 |
| 5 | 9.8 | 2.0 | 5.5 |
| 6 | 12.6 | 3.0 | 6.7 |
| 7 | 15.7 | 4.0 | 7.7 |

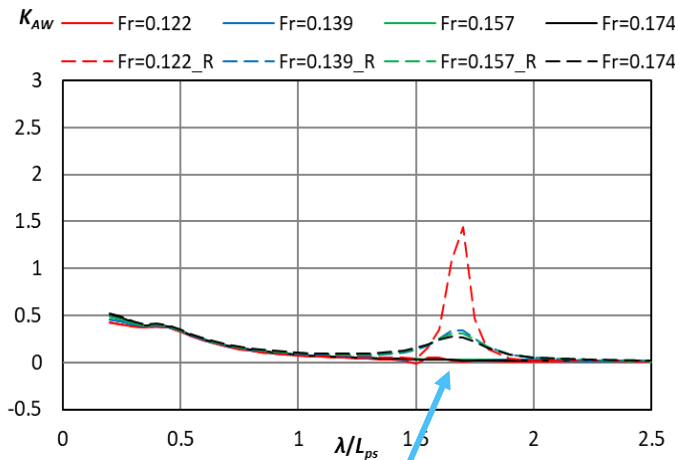
各速度の波浪中抵抗増加推定①～DTC～

感度解析に使用する各速度での規則波中抵抗増加

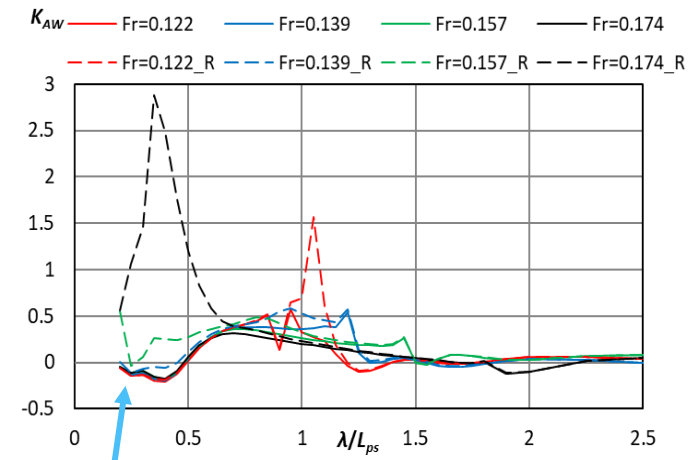
➤ DTC



(a)斜向波



(b)横波



(c)斜追波

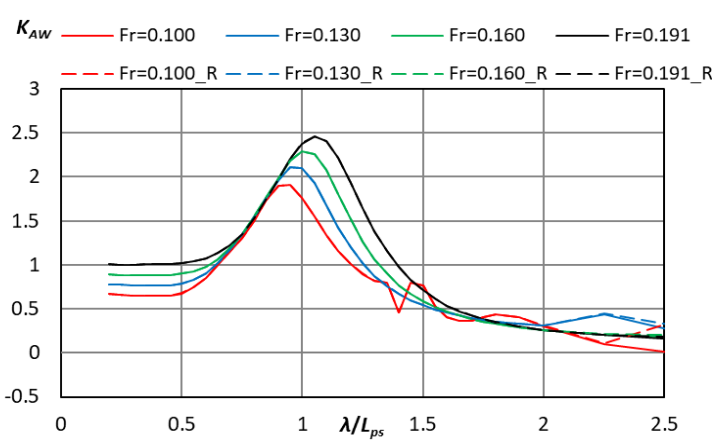
速度が遅くなると影響
がより大きくなる

速い速度で短波長側で
影響が大きい

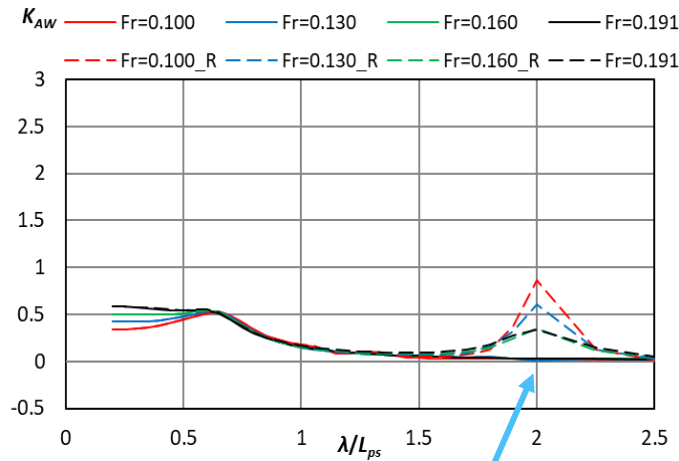
各速度の波浪中抵抗増加推定②～33CT～

感度解析に使用する各速度での規則波中抵抗増加

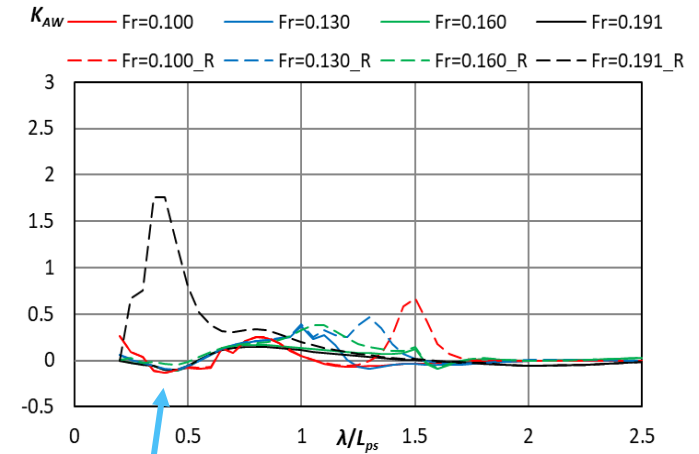
➤ 33CT



(a)斜向波



(b)横波



(c)斜追波

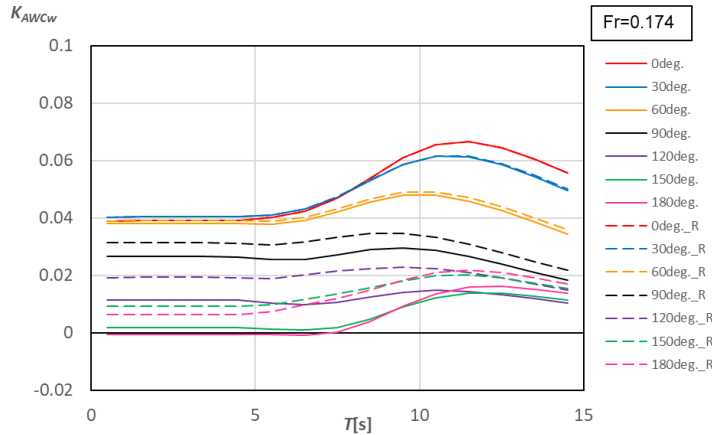
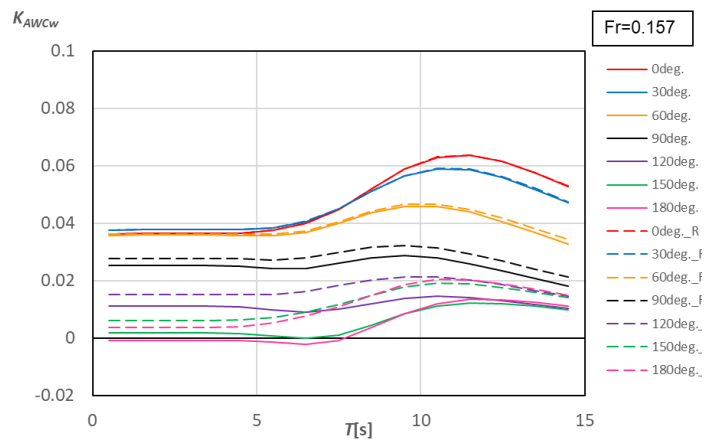
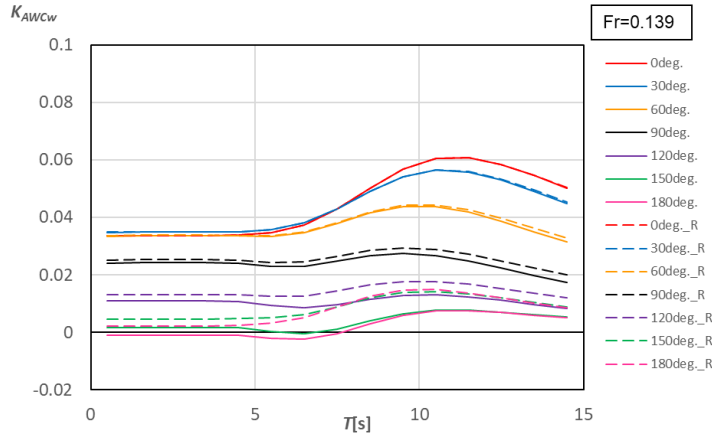
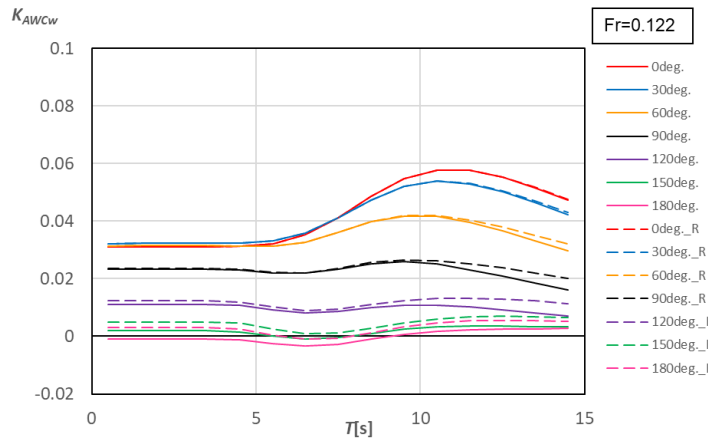
速度が遅くなると影響がより大きくなる

速い速度で短波長側で影響が大きい

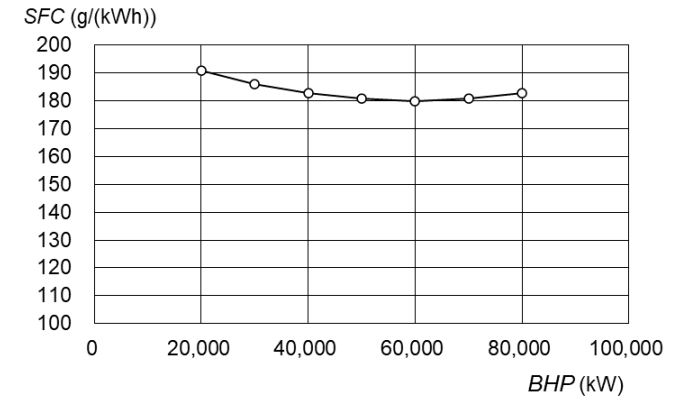
実海域シミュレーション①

➤ DTC

短波頂不規則波中抵抗増加



SFCカーブ



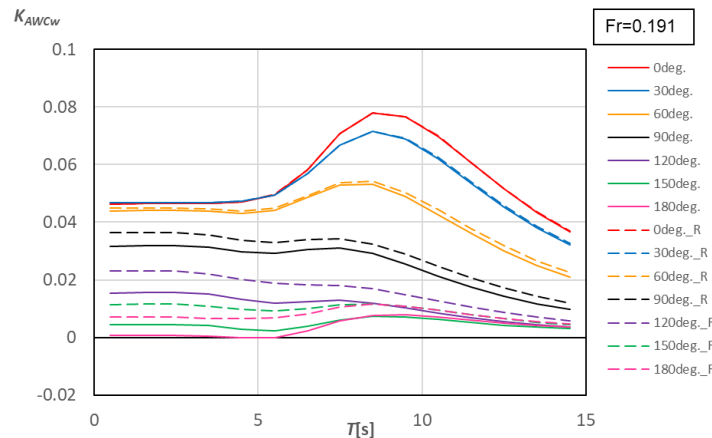
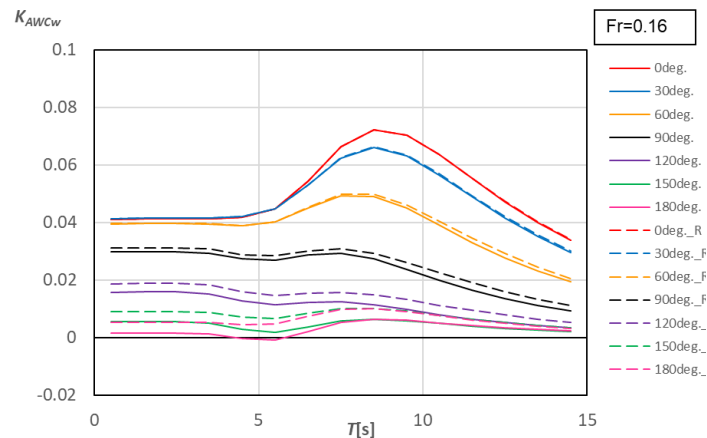
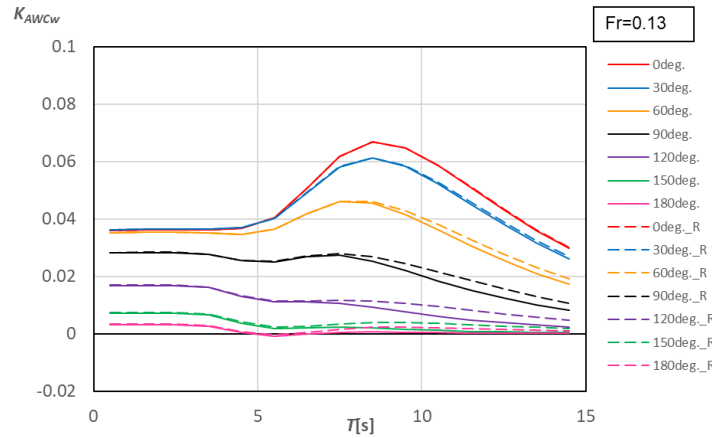
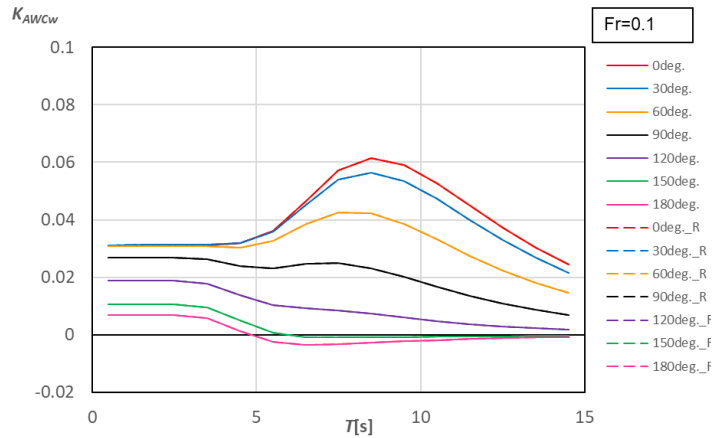
波スペクトル

✓ IACSSpectrum

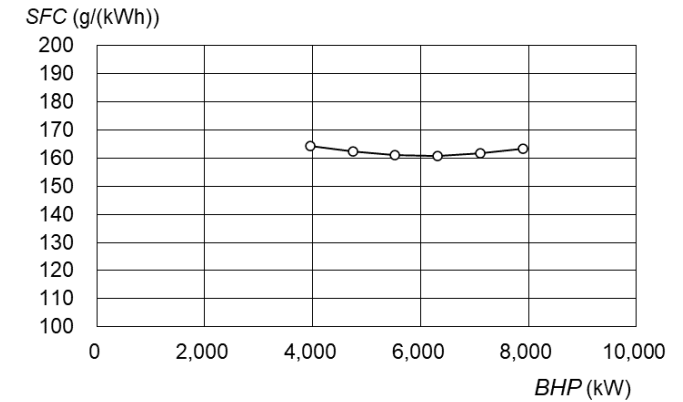
実海域シミュレーション②

➤ 33CT

短波頂不規則波中抵抗増加



SFCカーブ



波スペクトル

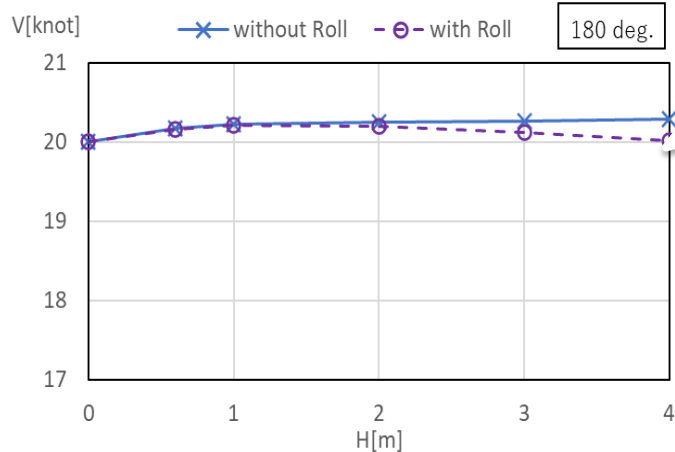
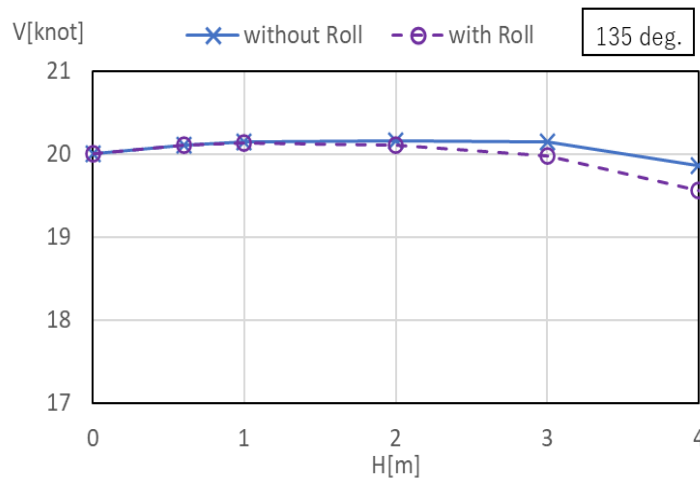
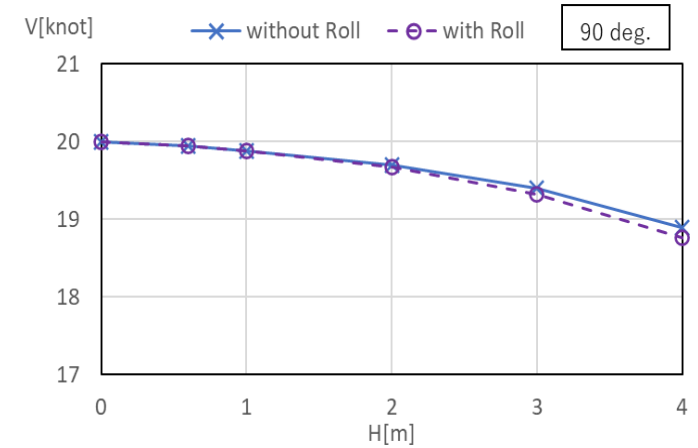
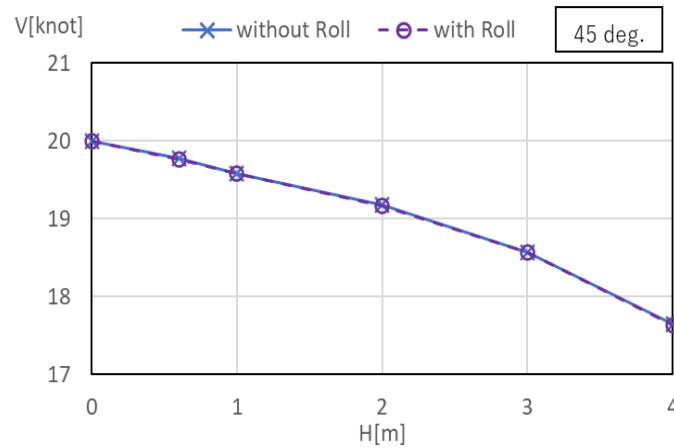
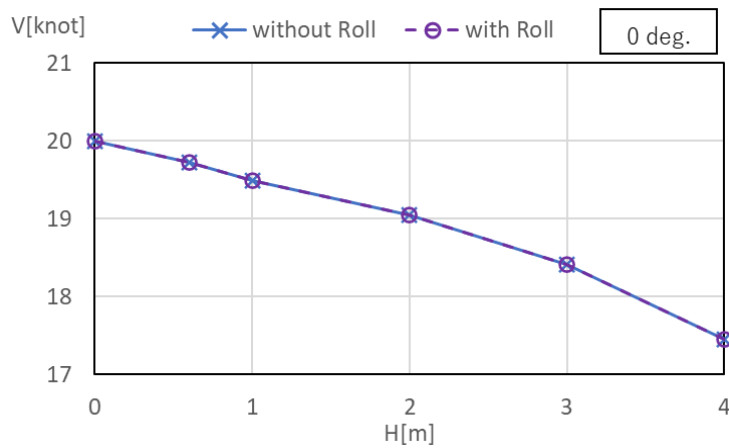
✓ IACSSpectrum

実海域性能の比較

船速低下

向波～斜向波では船速低下に差はない(0knot差)

➤ DTC



横波BF=6にて約0.07knotの差
 斜追波BF=6にて約0.16knotの差
 追波 BF=6にて約0.15knotの差

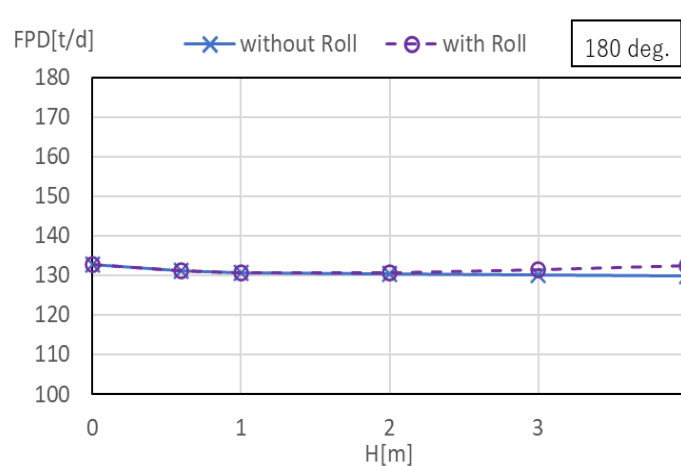
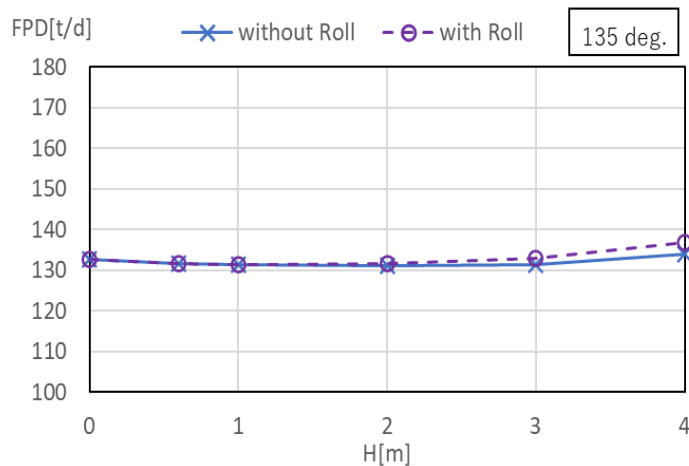
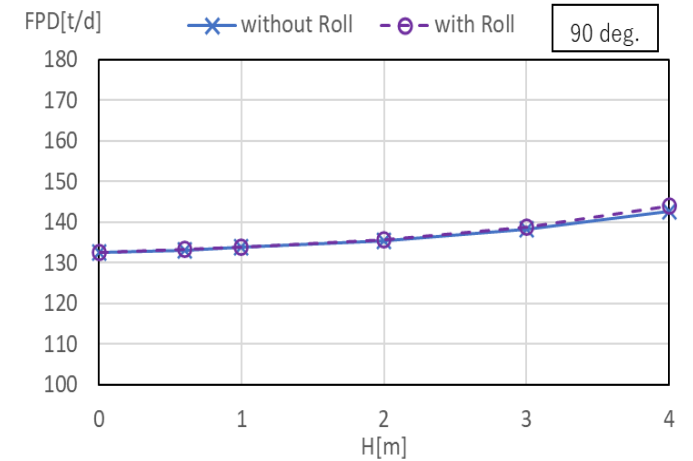
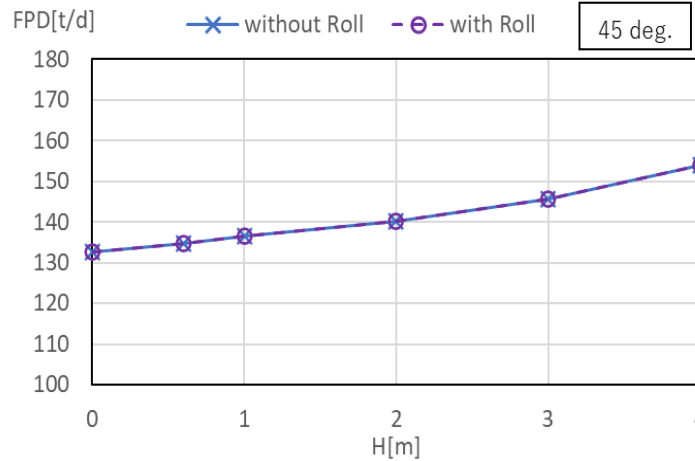
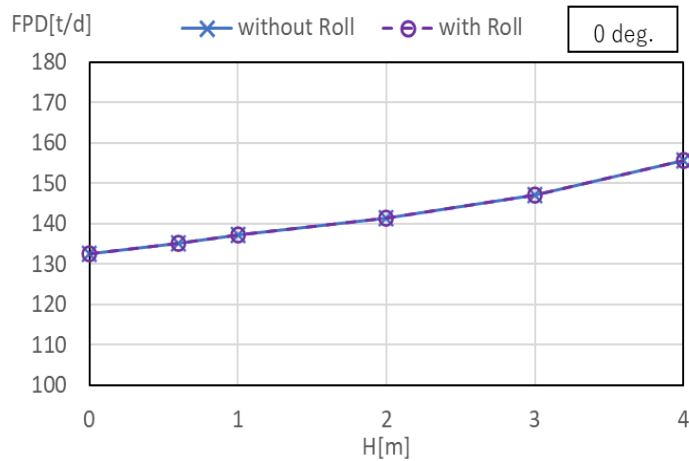
波浪中抵抗増加：短波頂不規則波中
 風圧抵抗：考慮

実海域性能の比較

燃料消費量

向波～斜向波では燃料消費量に差はない(0%差)

➤ DTC



横波BF=6で約0.5%の差
 斜追波BF=6で約1.1%の差
 追波BF=6で約1.1%の差

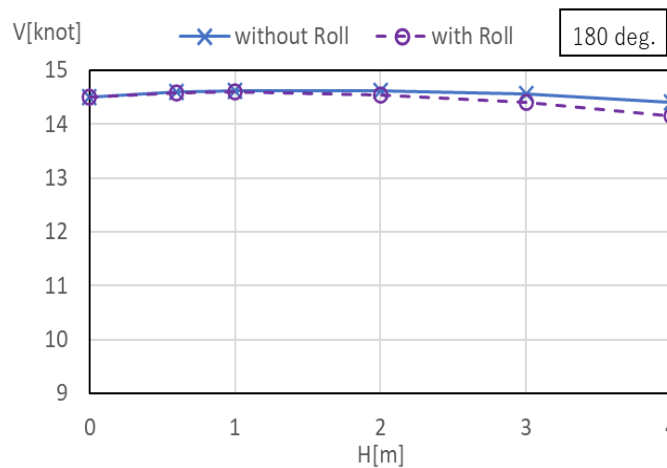
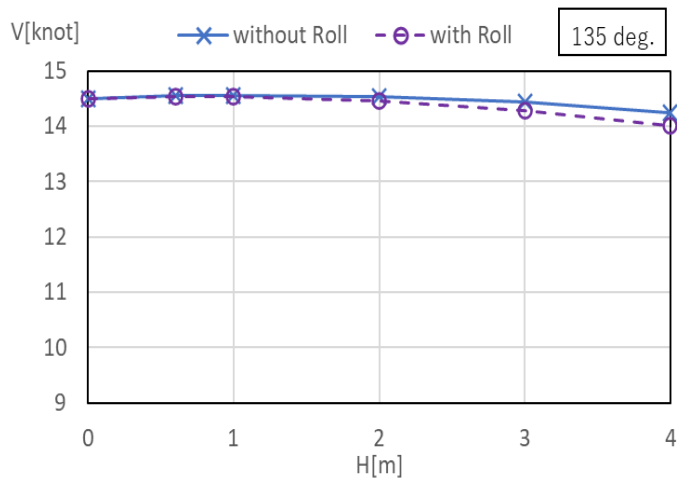
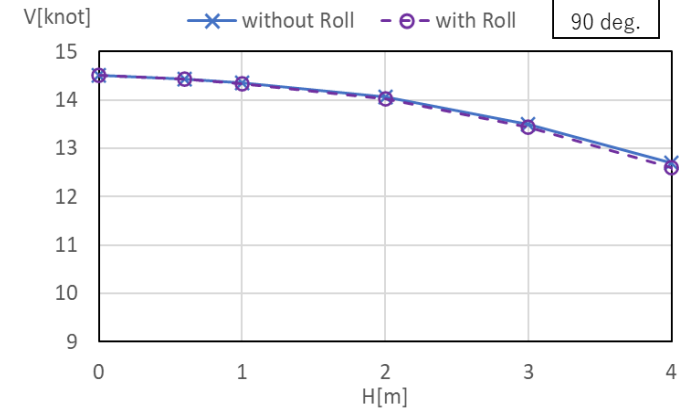
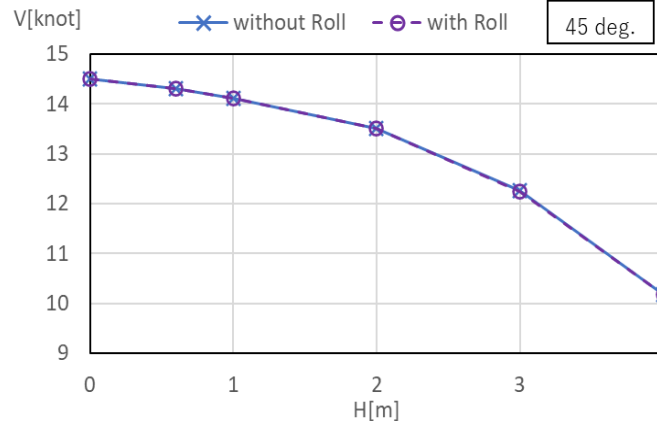
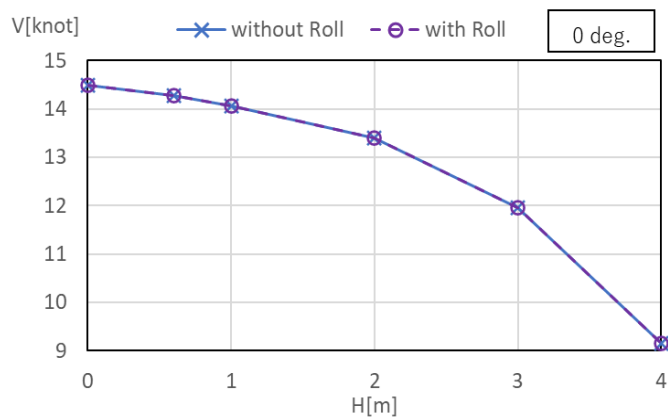
波浪中抵抗増加：短波頂不規則波中
 風圧抵抗：考慮

実海域性能の比較

船速低下

向波～斜向波では船速低下に差はない(0knot差)

➤ 33CT



横波BF=6にて約0.06knotの差
 斜追波BF=6にて約0.15knotの差
 追波 BF=6にて約0.17knotの差

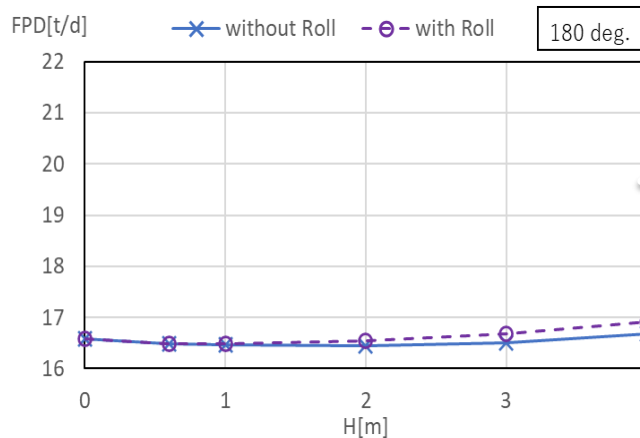
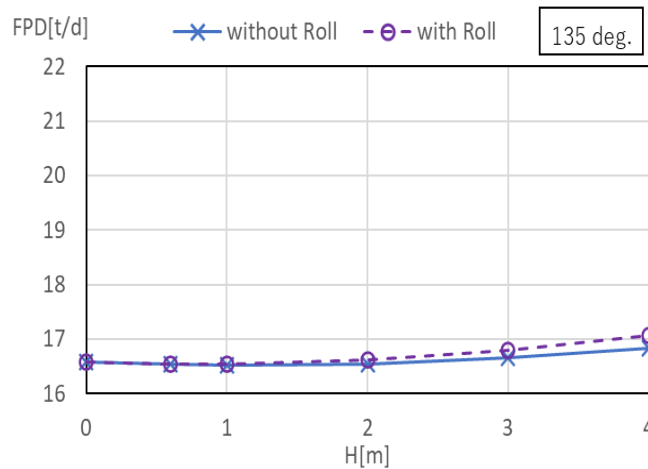
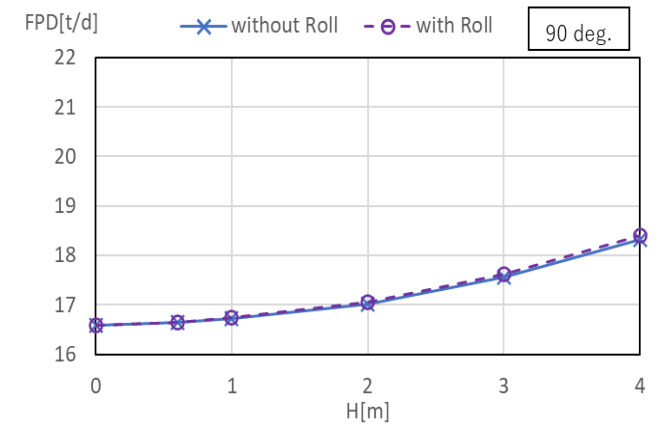
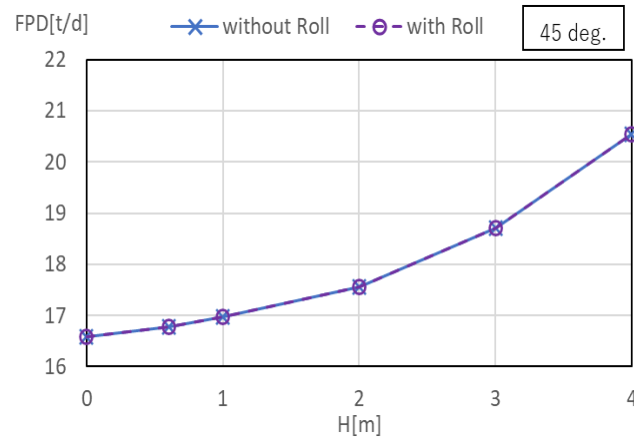
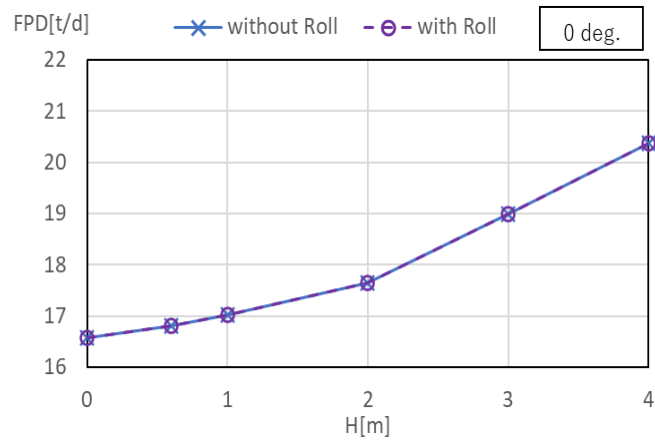
波浪中抵抗増加：短波頂不規則波中
 風圧抵抗：考慮

実海域性能の比較

燃料消費量

向波～斜向波では燃料消費量に差はない(0%差)

➤ 33CT



横波BF=6で約0.3%の差
斜追波BF=6で約0.9%の差
追波BF=6で約1.0%の差

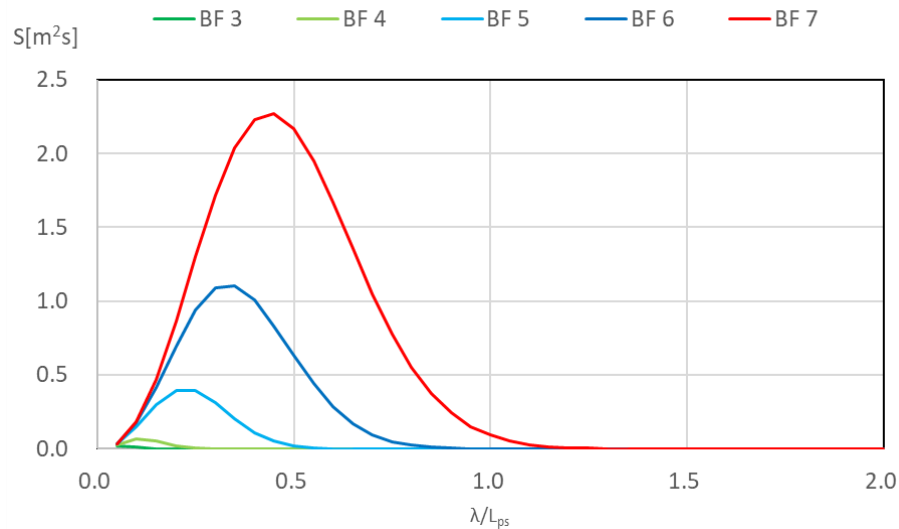
波浪中抵抗増加：短波頂不規則波中
風圧抵抗：考慮

考察

DTC,33CTどちらも向～斜向では影響はみえず、横～追波で影響がみえた

DTC

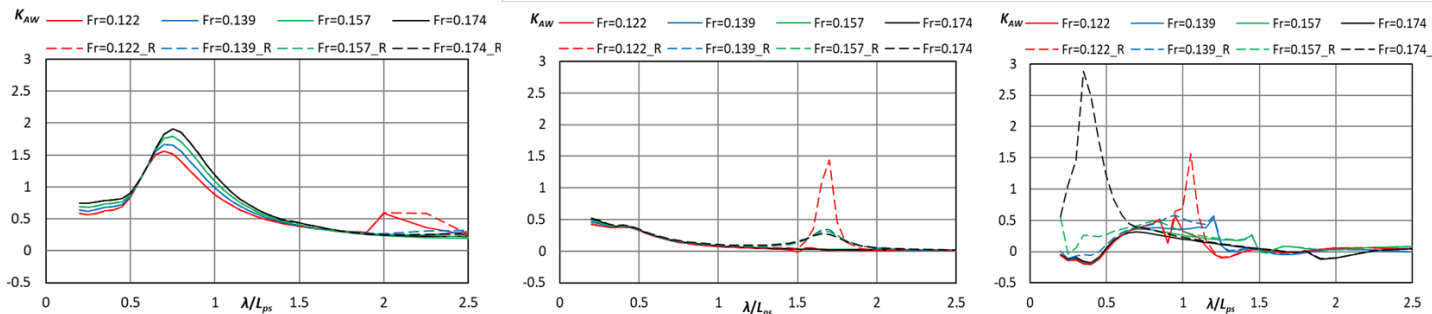
波スペクトラム



- ✓ 短波長の影響が大きい
- ✓ 長波長側は影響がない

波浪中抵抗増加のピーク
 斜向波: $\lambda/L=2.0\sim 2.5$
 横波: $\lambda/L=1.5\sim 2.0$
 斜追波: $\lambda/L=0.3\sim 0.5$

➤ DTC



(a)斜向波

(b)横波

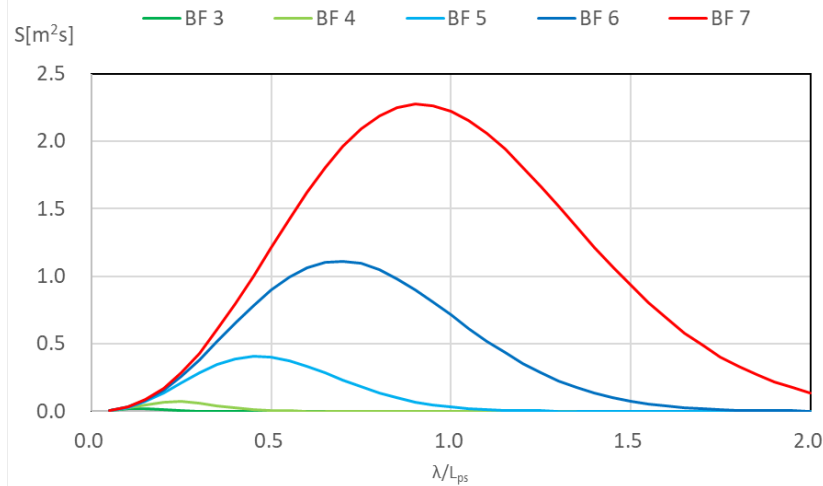
(c)斜追波

考察

DTC,33CTどちらも向～斜向では影響はみえず、横～追波で影響がみえた

33CT

波スペクトラム



✓ 横波・斜向波の影響は小さい

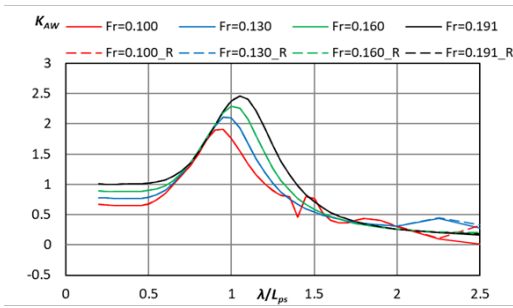
波浪中抵抗増加のピーク

斜向波: $\lambda/L=2.0\sim 2.5$

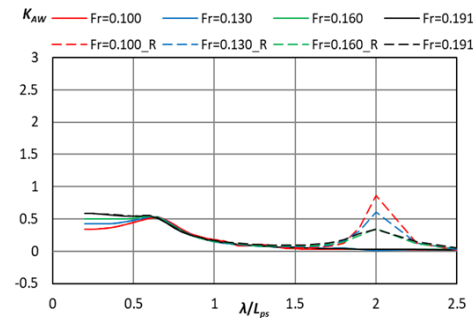
横波: $\lambda/L=2.0$

斜追波: $\lambda/L=0.3\sim 0.5$

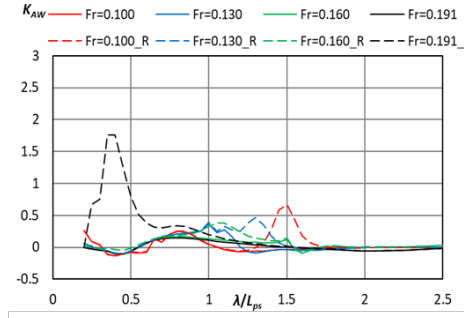
➤ 33CT



(a)斜向波



(b)横波



(c)斜追波

DTC,33CTの場合では横～追波で影響が見えた

結 言

- 斜波中抵抗増加推定の精度を向上させるため、横揺影響を考慮した波浪中抵抗増加の簡易推定式を検討し、検証を実施した。
- 横揺影響を考慮することによって、波浪中抵抗増加周波数応答の推定結果が水槽試験結果に近づき、改善が見られた。
- 横揺振幅の周波数応答と波浪中抵抗増加の周波数応答で関連性が見られ、斜追波の横揺振幅の推定精度を向上させることで、より斜波中抵抗増加の推定精度の向上が期待できる。
- 横揺影響を考慮することで、横～追波において実海域性能に影響が見られた。斜向波は横揺ピークの周波数が斜追波や横波に比べて長波長にあるため、影響は小さかった。

横揺を用いた波浪中抵抗増加の簡易推定は、海事クラスタ共同研究実海域性能評価プロジェクト(OCTARVIAプロジェクト)によって実施されました。