短期海象における波浪抵抗増加の波高非線形性の影響

今治造船株式会社　井戸本勇
大阪大学　箕浦宗彦、寺田 蒼

研究内容

- 短期海象における波浪中抵抗増加は、波高（波岨度）に対する非線形性を考えた場合、どの程度減少するか（あるいは増加するか）を明らかにする。
- 波高（波岨度）に対する非線形性は、CFDを用いて、線形に対する「修正係数」として経験的に数式化する。線形領域の波浪中抵抗増加はポテンシャルベースの計算手法（RIOS-EUT）により求める。
- 短期海象における波浪中抵抗増加は、規則波中の抵抗増加の重ね合わせで求めるが、スペクトラム法ではなく、確率密度関数法を用いる。これは、不規則波中で船が出会う「波谷」と「波頂」のひとつの組み合わせを規則波の1波と考え、これによる抵抗増加を確率的に足しあわせて平均をとる方法である。

対象船型

対象船型はKRISO Container Ship (以下KCS)とした

要目は以下の通りで、状態はDES.FULLである

KCS 要目	Full scale	Model scale
Length between parpendiculars L_{PP} [m]	230.000	3.2000
Length at load water line L_{WL} [m]	232.500	3.2348
Breadth B [m]	32.200	0.4480
Draft d [m]	10.800	0.1503
Displacement Volume ∇ [m^3]※1	52030.0	0.1401
Watted Surface Area S_0 [m^2] ※1	9424.0	1.8242
Trim [m]	0.000	
Longitudinal center of buoyancy LCB [%Lpp] Aft+	1.480	
KG from Keel [m]	14.330	0.1994
Kxx/B	0.400	
Kyy/L_{PP}, kzz/L_{PP}	0.250	

※1：裸殻状態

CFDによる計算条件

- 計算条件は λ/L_{PP}を4条件、Fnを3条件、波高(実船スケール$=H_{WS}$)を5条件とした。
- 波向きは正面向波のみとし、向波中の抵抗計算では流場は左右対称であると見做せるため、片舷（左舷側）のみで計算した。
- 前進速度を与え、船体運動はHeave, Pitchを自由にし、Surge, Sway, Roll, Yawを固定した。
- 短波長域（λ/L_{PP}=0.5, 0.6）では、波高が10m以上で波崩れが発生し、計算が発散するため除外した。
- なおλ/L_{PP}=0.6の計算は、λ/L_{PP}=0.5の計算の精度確認のために実施した。

CFDによる計算条件

No.	λ/L_{PP}	F_n	H_{WS} [m]
1	0.5	0.14	2.0
2		0.20	
3		0.26	
4		0.14	5.0
5		0.20	
6		0.26	
7		0.14	8.0
8		0.20	
9		0.26	

No.	λ/L_{PP}	F_n	H_{WS} [m]
A	0.6	0.20	2.0
B			5.0

No.	λ/L_{PP}	F_n	H_{WS} [m]
10	1.0	0.14	2.0
11		0.20	
12		0.26	
13		0.14	5.0
14		0.20	
15		0.26	
16		0.14	8.0
17		0.20	
18		0.26	
19		0.14	10.0
20		0.20	
21		0.26	
22		0.14	15.0
23		0.20	
24		0.26	

No.	λ/L_{PP}	F_n	H_{WS} [m]
25	1.5	0.14	2.0
26		0.20	
27		0.26	
28		0.14	5.0
29		0.20	
30		0.26	
31		0.14	8.0
32		0.20	
33		0.26	
34		0.14	10.0
35		0.20	
36		0.26	
37		0.14	15.0
38		0.20	
39		0.26	

CFD計算について

- CFDソフトウェアはNUMECA社提供の [Fine/marine]を使用
- NSソルバーは[Fine/marine]に搭載されている、仏国ナント工科大学によって開発された[ISIS-CFD]を使用
- 乱流モデルは2方程式モデルであるMenterの[k-ωSST(share-stress transport)]モデルを採用
- 格子生成には非構造格子作成ツールである[HEPRESS]を使用し、計算付加の少ないスライディングメッシュ法にて格子を作成

座標系・計算領域・境界条件

座標系

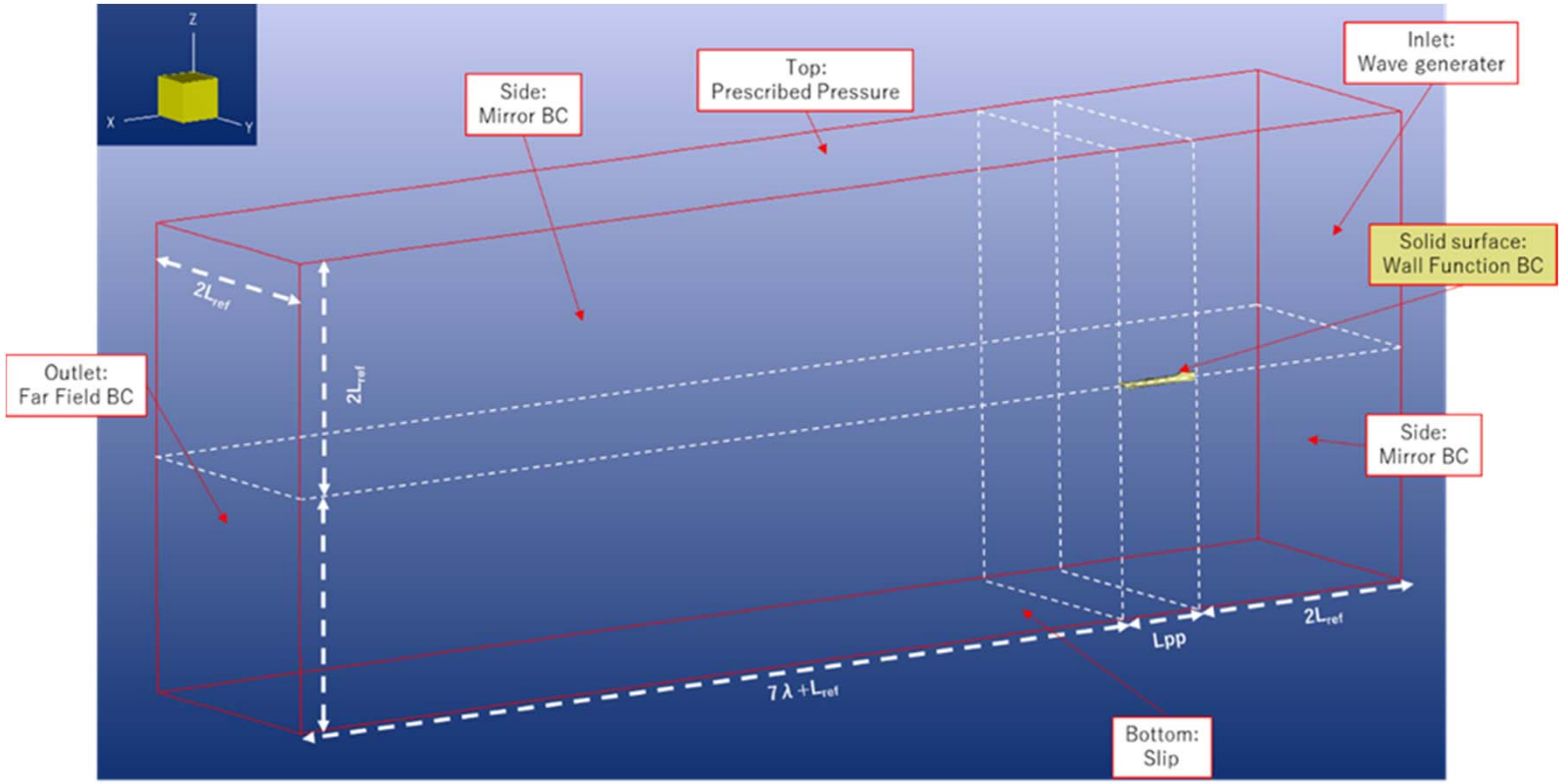
原点を船体中心線、及び喫水線上のミッドシップとし、船尾方向にx軸、右舷方向にy軸、鉛直下方にz軸をとる。

境界条件

入口境界面より2次の非線形項まで考慮したストークス波を発生。船体表面の境界条件に壁関数を用いるが、空気領域は粘性影響を無視してデッキ部のみ境界条件をSlip(zero shear stress)とした

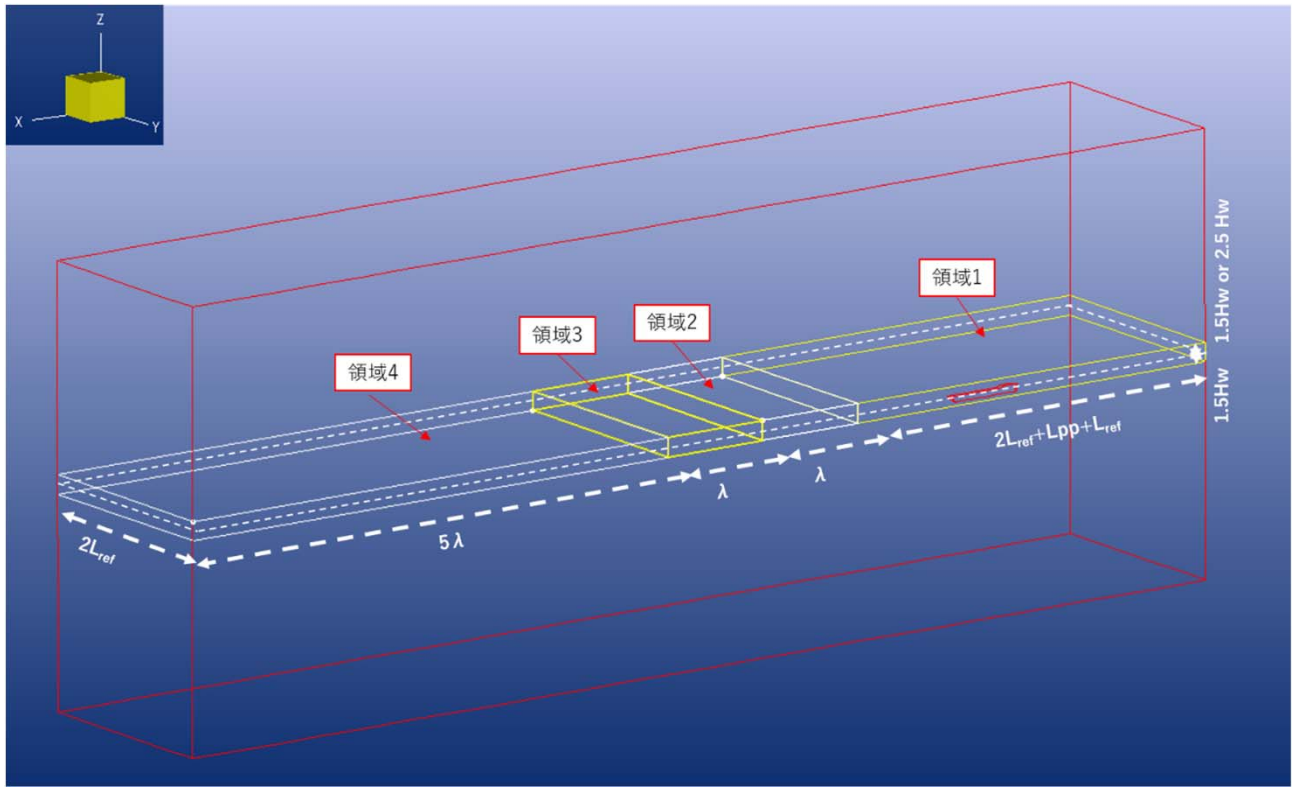
	領域長さ	備考
X軸方向	$L_{PP}+7\lambda+3L_{ref}$	FPより前方に$2L_{ref}$分、及びAPより後方に$7\lambda+L_{ref}$分
Y軸方向	$2L_{ref}$	-
Z軸方向	$4L_{ref}$	喫水線より上方に$2L_{ref}$分、下方に$2L_{ref}$分

ここでL_{ref}はλ, L_{PP}の内大きい値である



自由表面近傍の格子細密化

- 規則波を精度良く表現するため、自由表面近傍に格子細密化領域を設定した。
- 船体近傍の領域1は、規則波が減衰しないように細かい格子としたが、それ以外の領域は計算の都合上、波を減衰させる必要があるため、領域2, 3, 4と徐々に格子を荒くした。



自由表面近傍の格子細密化

z軸方向領域については、基本は喫水線を中心に上下に1.5Hw分としたが、大波高時（Hw=8m以上）の場合、波がデッキ上を跳ね上がり細密化領域を超える場合があるため、上方向のみ2.5Hw分とした

格子細密化領域

	x軸方向	y軸方向	z軸方向
領域1	$2L_{ref}$ +Lpp+ L_{ref}	$2L_{ref}$	1.5Hw+1.5Hw or 2.5Hw
領域2	λ	$2L_{ref}$	1.5Hw+1.5Hw or 2.5Hw
領域3	λ	$2L_{ref}$	1.5Hw+1.5Hw or 2.5Hw
領域4	5λ	$2L_{ref}$	1.5Hw+1.5Hw or 2.5Hw

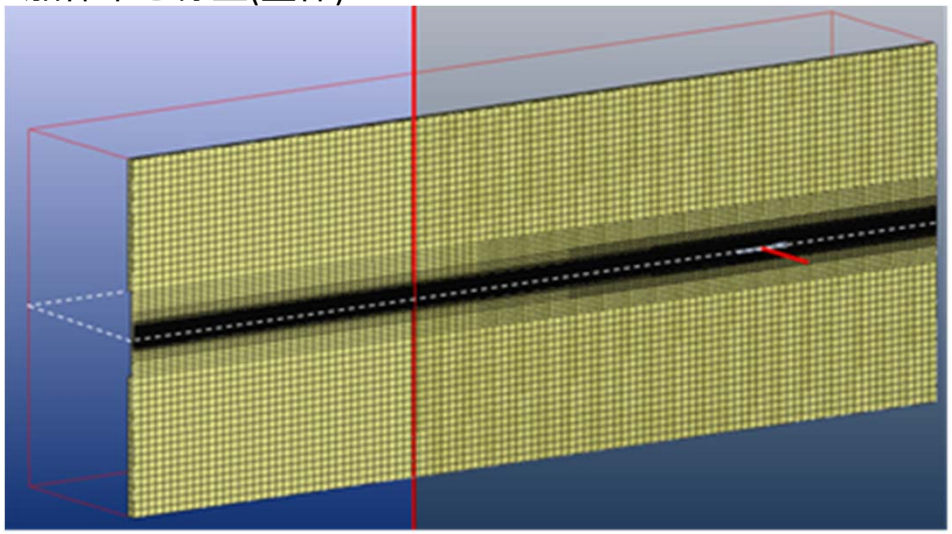
格子細密化領域での格子サイズ

	x軸方向	y軸方向	z軸方向
領域1	dx_{ref}	$4dx_{ref}$	Hw/16
領域2	$2dx_{ref}$	$4dx_{ref}$	Hw/16
領域3	$4dx_{ref}$	$4dx_{ref}$	Hw/16
領域4	$8dx_{ref}$	$4dx_{ref}$	Hw/16

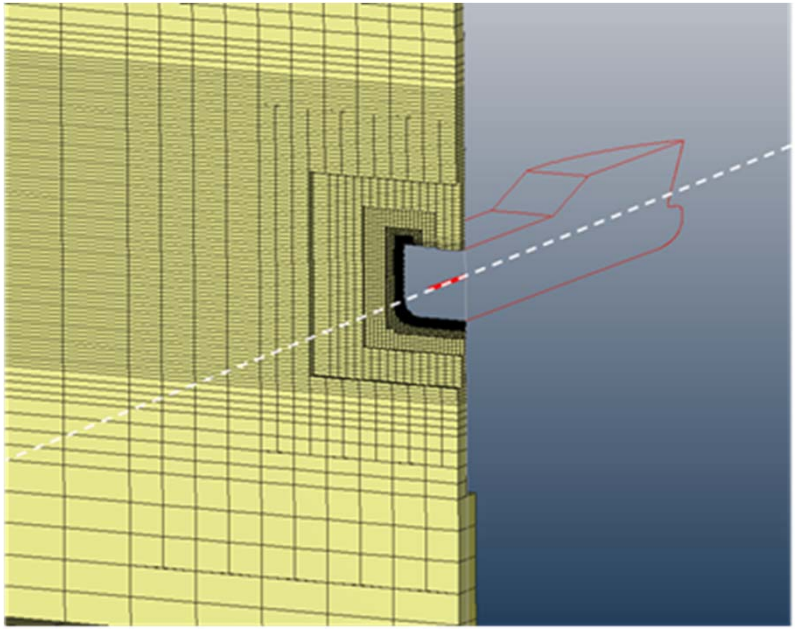
dx_{ref}=λ/80とした

格子外観(λ/Lpp=1.5, Fn=0.26, Hw=15m)

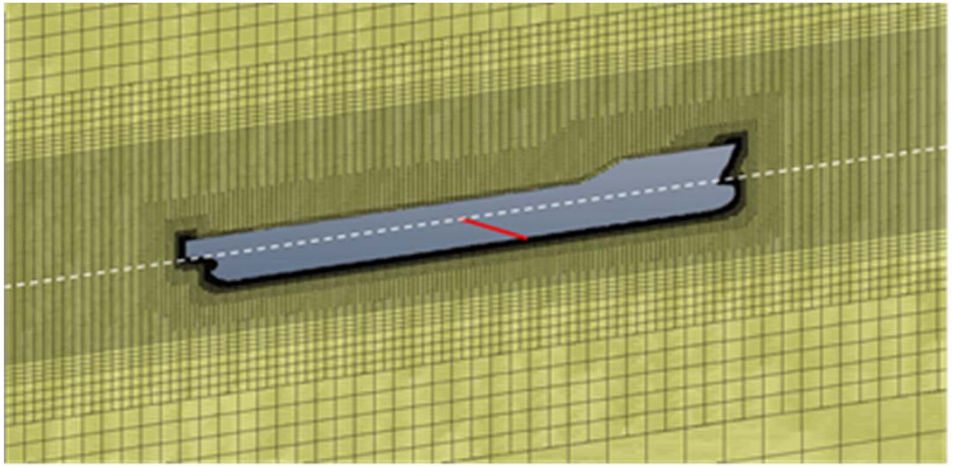
船体中心線上(全体)



横断面

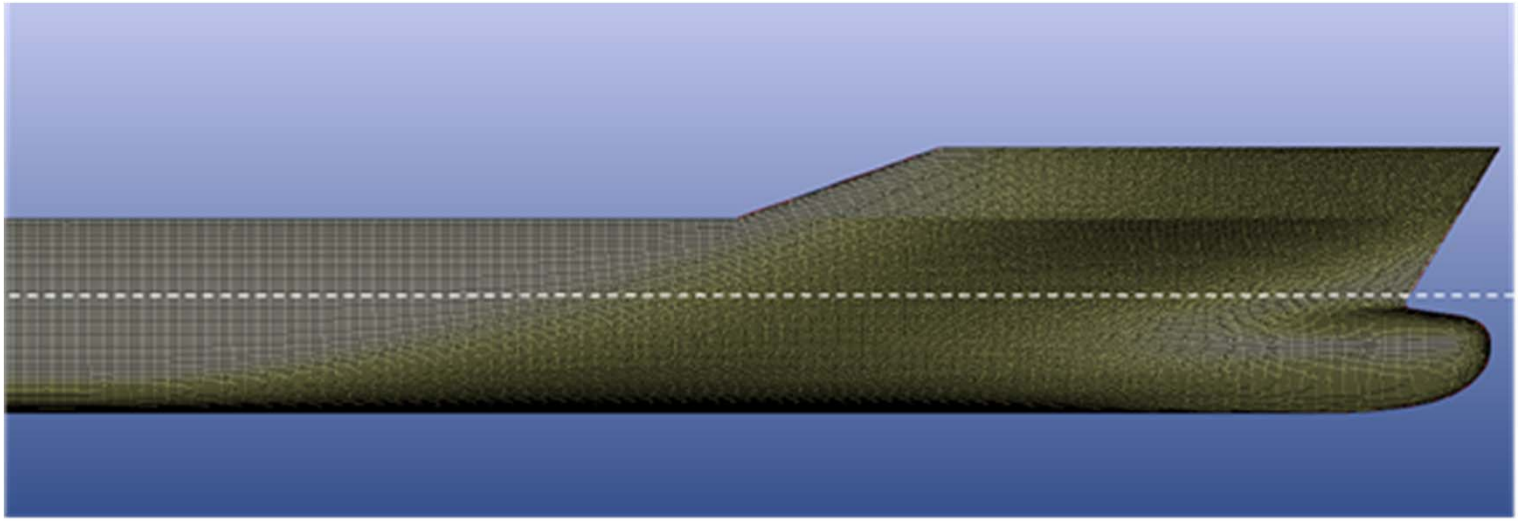


船体中心線上(船体近傍拡大)

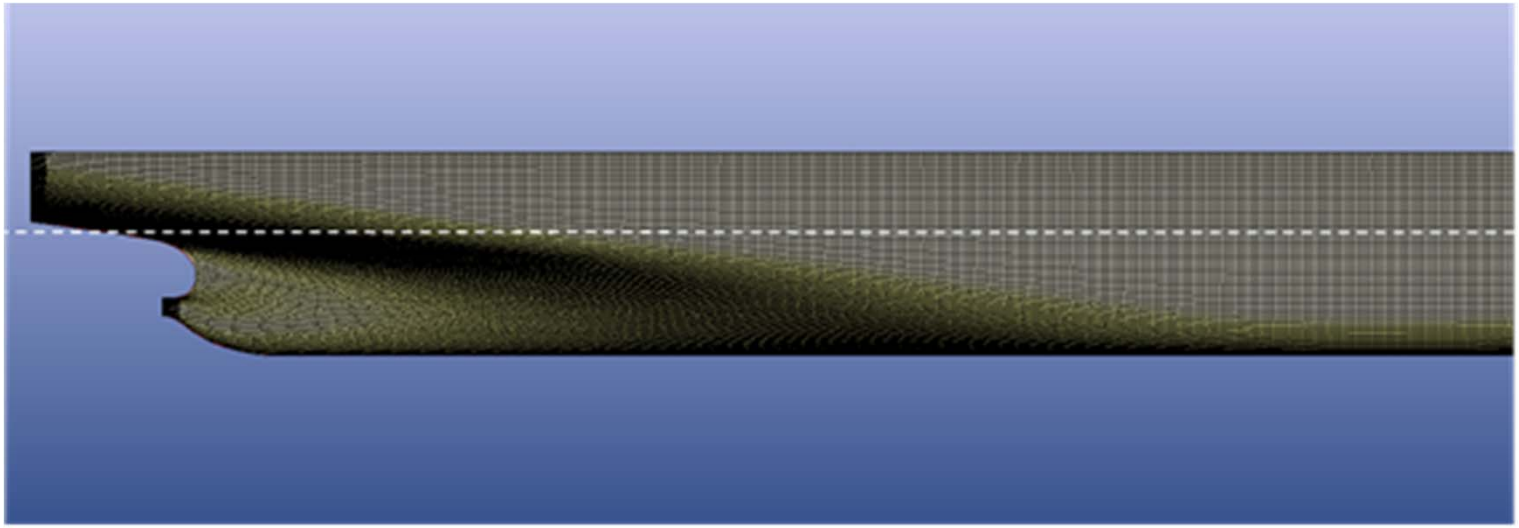


格子外観(λ/Lpp=1.5, Fn=0.26, Hws=15m)

船首周辺の船体表面上格子

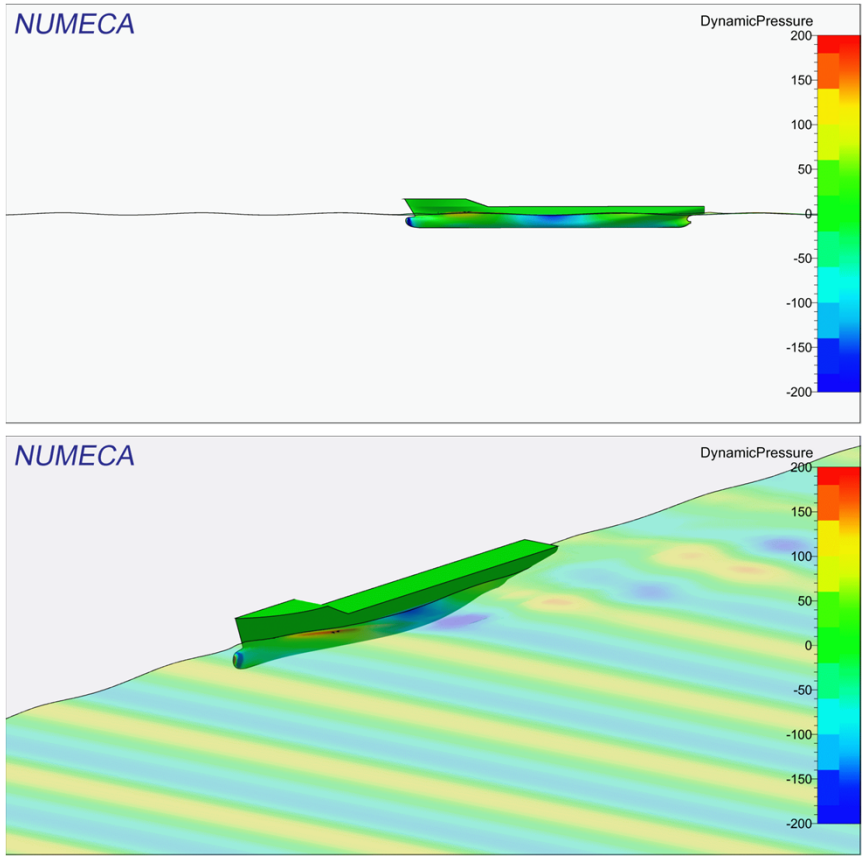


船尾周辺の船体表面上格子

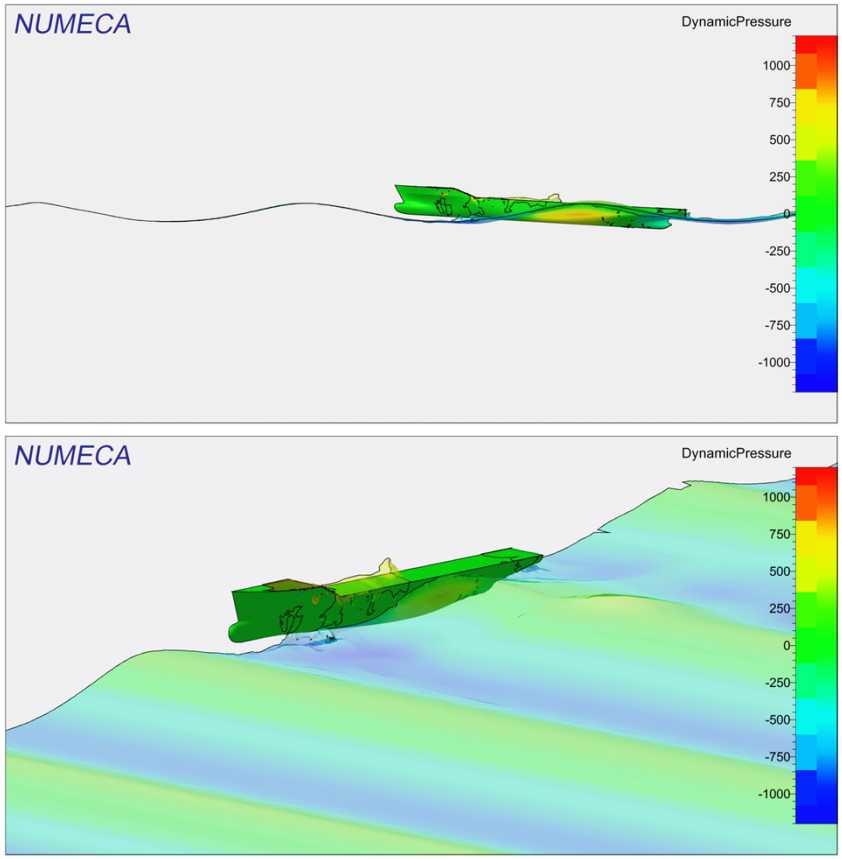


CFD計算例

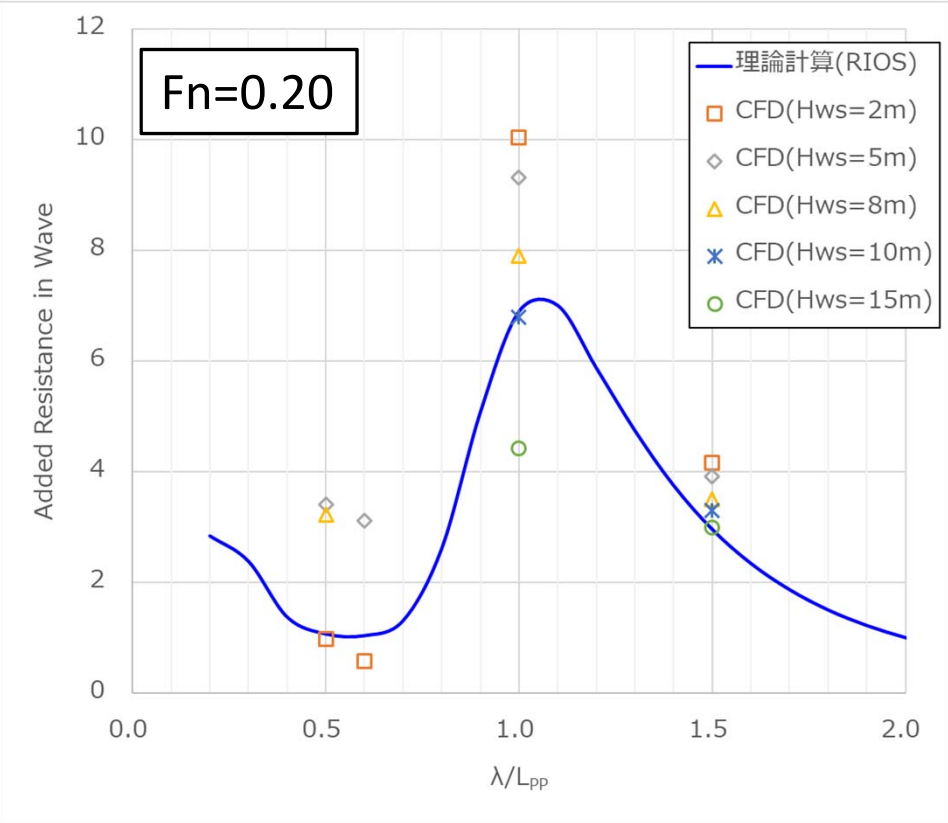
Fn=0.20,Hws=2m,λ/Lpp=0.5



Fn=0.20,Hws=15m,λ/Lpp=1.0



理論計算とCFD計算結果の比較(抵抗増加)



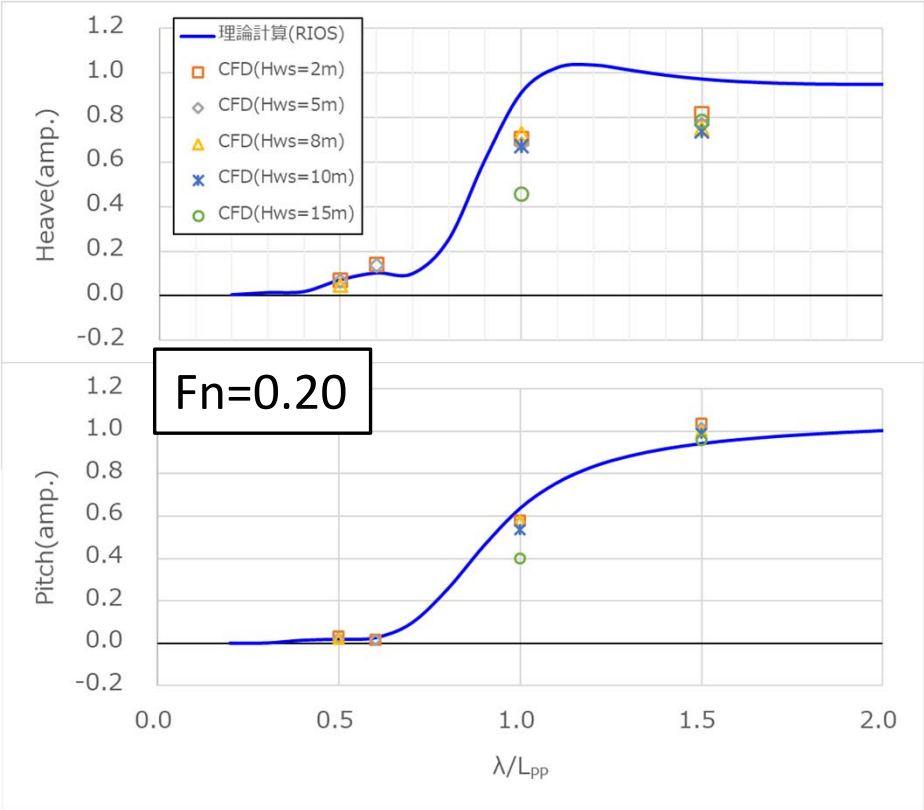
- 理論計算(RIOS)及びCFD計算による波浪中抵抗増加無次元値の一部を示す。
- $\lambda/L_{PP} \geqq 1.0$では波高が大きくなるに従って抵抗増加係数が減少、$\lambda/L_{pp}=0.5$では波高が大きくなるに従って抵抗増加係数が減少するという非線形影響が確認できる。
- その他のF_nでも同様の傾向が確認できた。

波浪中抵抗増加無次元化式

$$R_{AW} = \frac{R_{AW calculated}}{\rho g \zeta_a^2 B^2 / L_{PP}}$$

ζ_a:波振幅

理論計算とCFD計算結果の比較(船体運動)



- 理論計算(RIOS)及びCFD計算による船体運動無次元値の一部を示す。
- λ/L_{PP}=1.0, H_{WS}=15mで船体運動が減少しているが、これはDeckに被った波により船体運動が抑えられたためだと考えられる。
- その他の条件では船体運動については波高による線形性はほとんど確認できず。
- その他のF_nでも同様の傾向が確認できた。

船体運動無次元化式

$$\mathrm{H}eave(amp.) = \frac{Heave(amp.)_{calculated}}{\zeta_a}$$

$$Pitch(amp.) = \frac{Heave(amp.)_{calculated}}{k\zeta_a}$$

k ：波数
ζ_a :波振幅

波浪中抵抗増加の修正式

- CFD計算により波浪中抵抗増加の非線形影響が確認できた。しかし、運航シミュレーターにCFD計算結果を用いるには、全ての海象条件を網羅する必要があるが、計算時間が莫大となり現実的ではない。
- そこで、CFD計算結果より波高による非線形性の修正係数を抽出し、線形仮定に基づいた理論計算結果（RIOS）に加味することで、波高による非線形性を考慮した波浪中抵抗増加を求める。

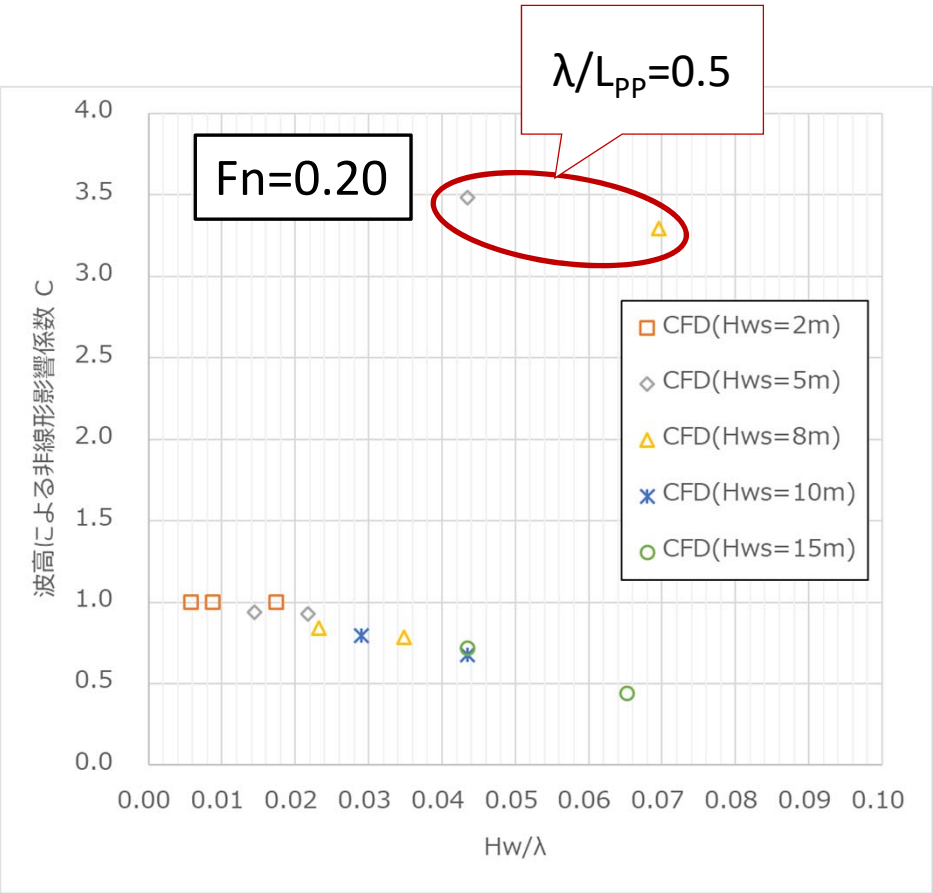
波浪中抵抗増加の修正式

$$R_{WN}(\omega, \theta, V, \zeta_a, s)$$

$$\zeta_a{}^2 C(s, V) R_{WU}(\omega, \theta, V)$$

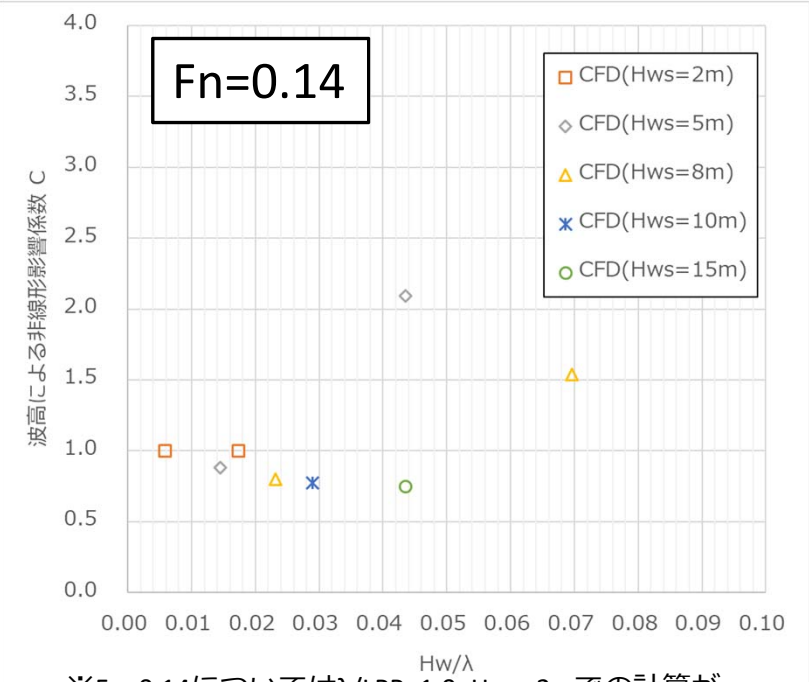
R_{WN}:	波高による非線形性を考慮した波浪中抵抗増加
R_{WU}:	線形仮定における単位波振幅あたりの波浪中抵抗増加
C:	波高による非線形性の修正係数
ζ_a:	波振幅
s:	波岨度（$= H/\lambda$）
ω:	波の角周波数
V:	船速
θ:	波向と船の進行方向の相対角

波高による非線形性影響修正係数

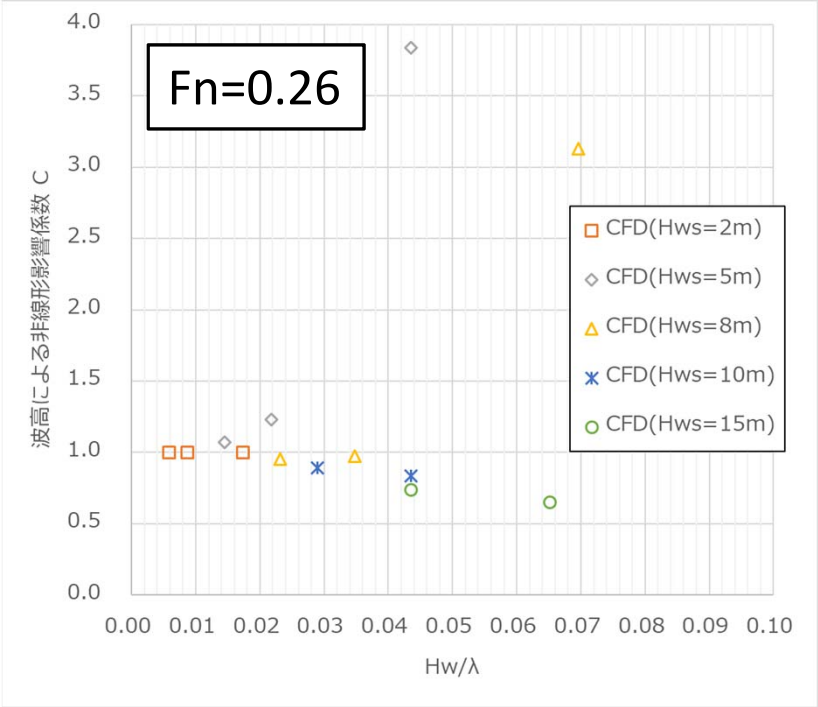


- 波高（波岨度）による非線形性を定性的にみるために、各F_nにおけるH_W=2mでの波浪中抵抗増加係数を基準にし、その他の波高の抵抗増加係数との比を求め、波岨度H_W/λで整理した。
- 一部の結果(λ/L_{PP}=0.5)を除いて、H_W/λで波高による非線形性を整理できる。
- λ/L_{PP}=0.5の結果については短波長域におけるディフラクション力の優位性の影響等が原因と考えられるが、明確な原因は不明。

波高による非線形性影響修正係数

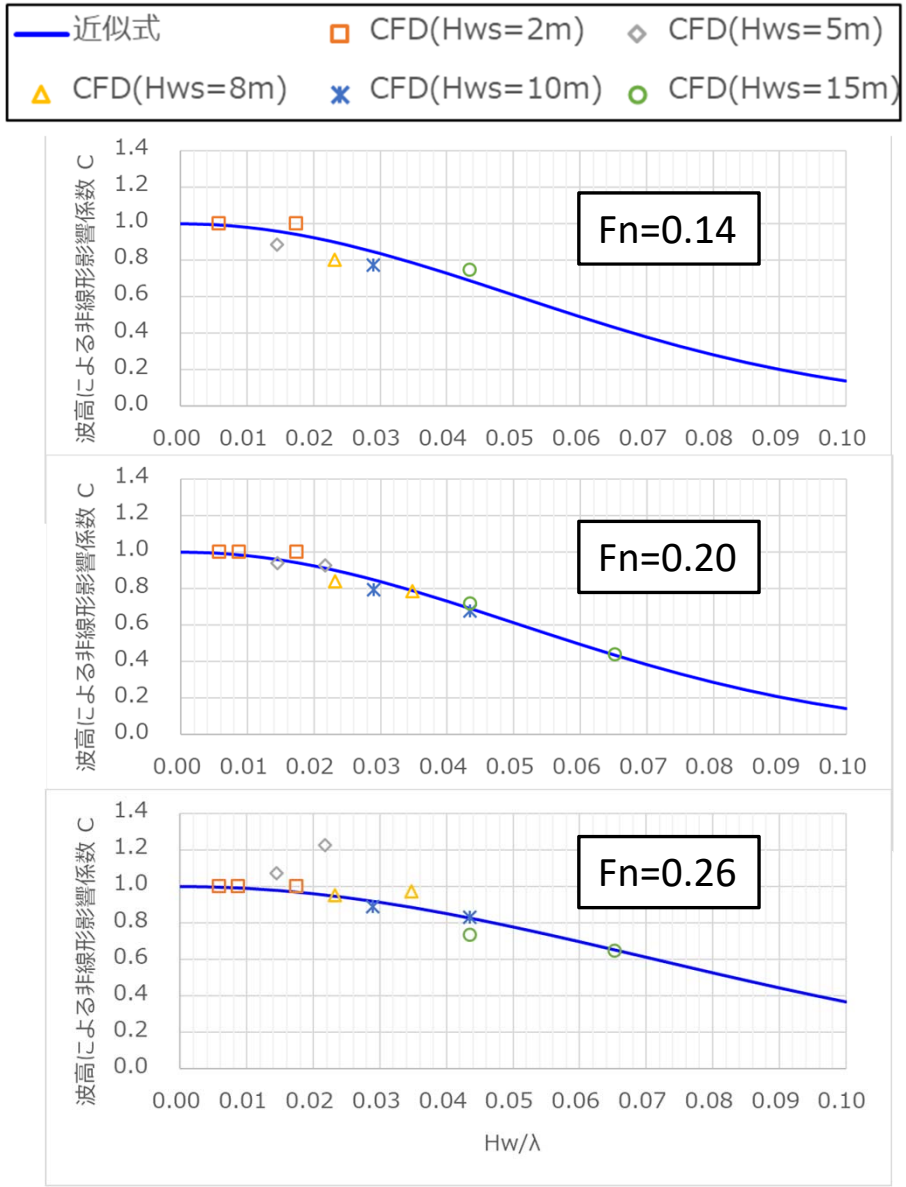


※Fn=0.14についてはλ/LPP=1.0, Hws=2mでの計算が発散したため、プロットが少なくなっている



- 他のF_nにおいても同様の傾向が見られる。
- 短波長域λ/L_{PP}=0.5の非線形影響を除外して、近似式を求めた。

波高による非線形性影響修正係数



波岨度H_W/λで非線形性影響修正係数の近似式を整理する。

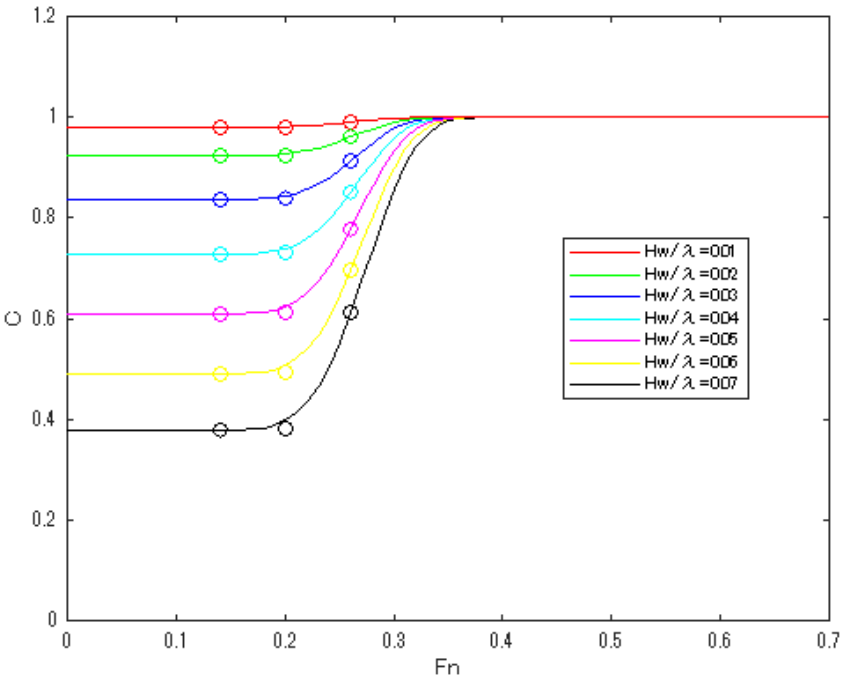
$F_n = 0.14$の場合
$\mathrm{C}(s) = \exp(-197.4299s^2)$

$F_n = 0.20$の場合
$\mathrm{C}(s) = \exp(-196.0343s^2)$

$F_n = 0.26$の場合
$\mathrm{C}(s) = \exp(-100.1616s^2)$

$s = H_W/\lambda$

非線形性影響修正係数とF_nの関係



- 波岨度H_W/λに対する非線形性影響修正式をF_nごとに整理する。
- 低速域ではCFD計算していないためFn=0.14での係数をそのまま低速域まで延長し、対象船KCSはFn=0.4以上での運航は考慮されていないためFn=0.4で係数が1に漸近させる。

＜修正係数＞

1)$s \leq 0.13$

$$C(s,V) = C(s,F_n) = \begin{cases} 1-(1-C_0)\exp\{\alpha(F_n-0.14)^4\} & ,F_n \geq 0.14 \\ C_0 & ,F_n < 0.14 \end{cases}$$

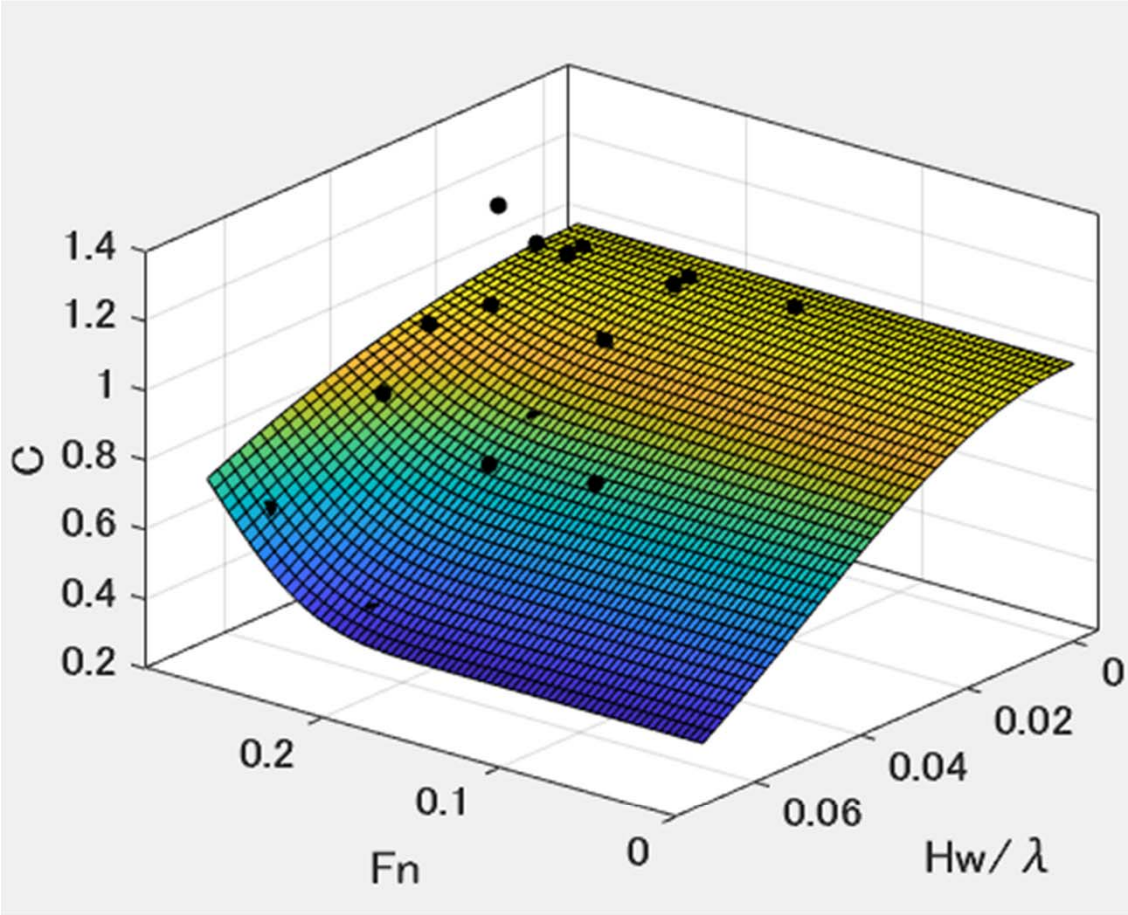
2)$s > 0.13$

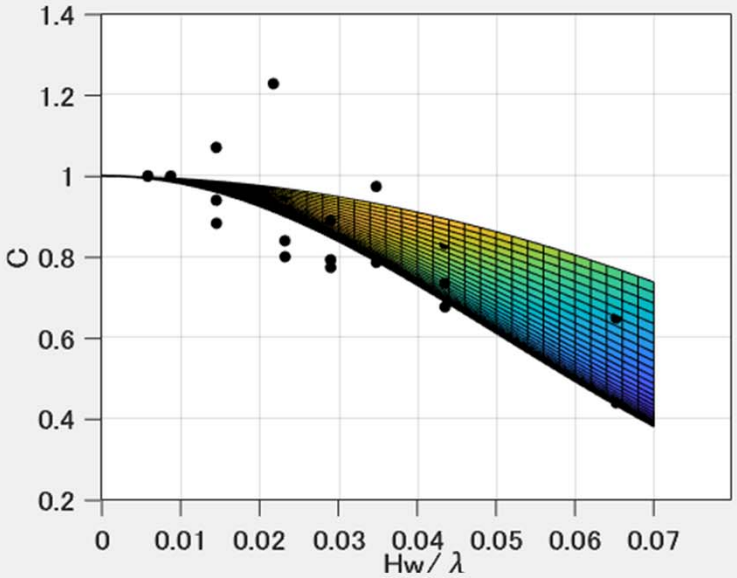
$$C(s,V) = C(s,F_n) = C_0$$

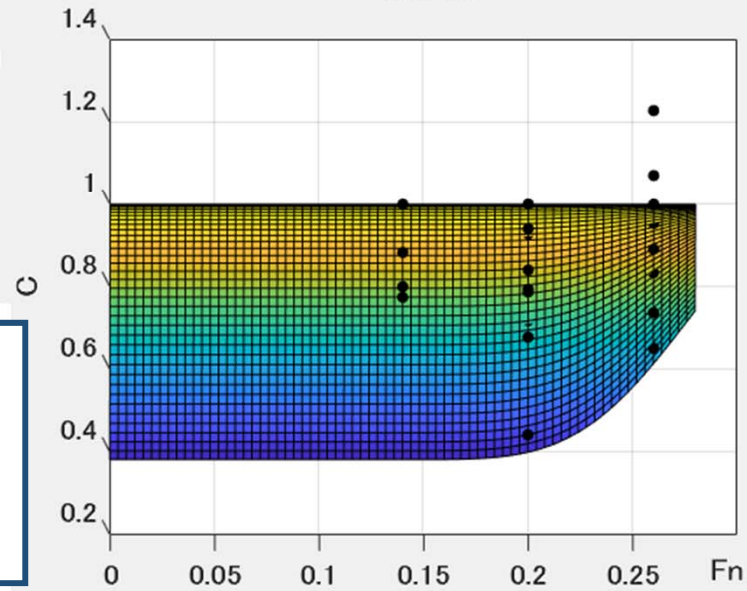
$$\alpha = 10^5(1.7385s^2 + 0.0273s - 0.0330)$$

$$C_0 = \exp(-197.4229s^2)$$

修正係数の概観とCFD計算との比較







1) $s \leq 0.13$

$$C(s,V) = C(s,F_n) = \begin{cases} 1-(1-C_0)\exp\{\alpha(F_n-0.14)^4\} & ,F_n \geq 0.14 \\ C_0 & ,F_n < 0.14 \end{cases}$$

2) $s > 0.13$

$$C(s,V) = C(s,F_n) = C_0$$

$$\alpha = 10^5(1.7385s^2 + 0.0273s - 0.0330)$$

$$C_0 = \exp(-197.4229s^2)$$

短期海象中の波浪中平均抵抗増加

波の発現密度関数

$$\bar{R}_{WN}(V, H_{1/3}, T_{01}, \chi) = \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty}\int_{0}^{\infty} R_{WN}(\omega, \theta, V, \zeta_a, s)\, p(H, T, \theta | H_{1/3}, T_{01}, \chi)\, dH dT d\theta$$

波高による非線形性を考慮した
波浪中抵抗増加

V: 船速
θ: 波向と船の進行方向の相対角
s: 波岨度（$= H/\lambda$）
χ: 波の主方向
$H_{1/3}$: 有義波高
T_{01}: 平均波周期

H: 波高($= 2\zeta_a$)
T: 波周期($=2\pi/\omega$)

短期海象中の波の発現密度関数

波高と周期の同時発現確率

$$p\left(H,T|H_{1/3},T_{01}\right)$$

×

方向分布関数D(θ)

$$G^{-1}(s)=\int_{-\pi}^{\pi}\cos^{2s}\frac{1}{2}(\theta-\chi)d\theta$$

$$D(\theta|\chi)=G(s)\cos^{2s}\frac{1}{2}(\theta-\chi)$$

$$f\left(\zeta,\eta|H_{1/3},T_{01}\right)=\frac{1}{8\sqrt{2\pi}\nu}\left(1+\frac{\nu^2}{4}\right)\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)^2 exp\left\{-\frac{\zeta^2}{8}\left[1+\left(1-\frac{1}{\eta}\right)^2\frac{1}{\nu^2}\right]\right\}$$

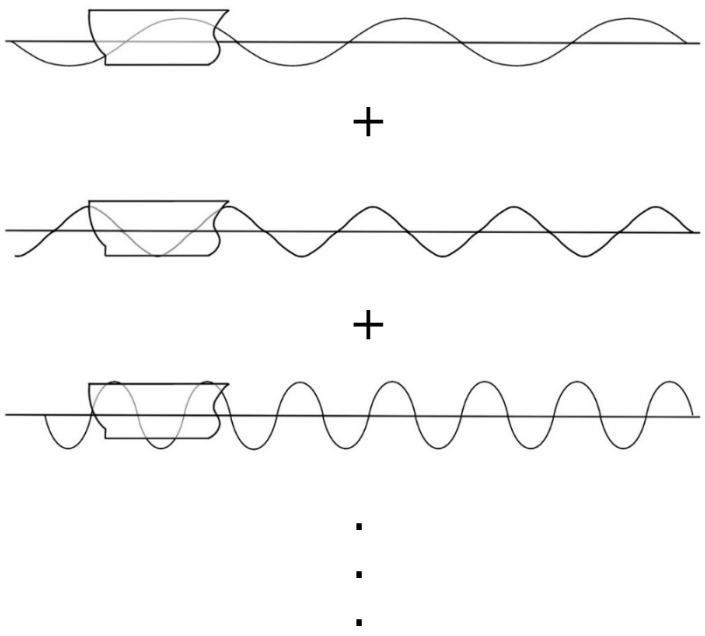
Longuet-Higgins(1975)

無次元化 $\zeta=4\frac{H}{H_{1/3}},\quad \eta=\frac{T}{T_{01}}$

$$p\left(H,T,\theta|H_{1/3},T_{01},\chi\right)=p\left(H,T|H_{1/3},T_{01}\right)D(\theta|\chi)$$

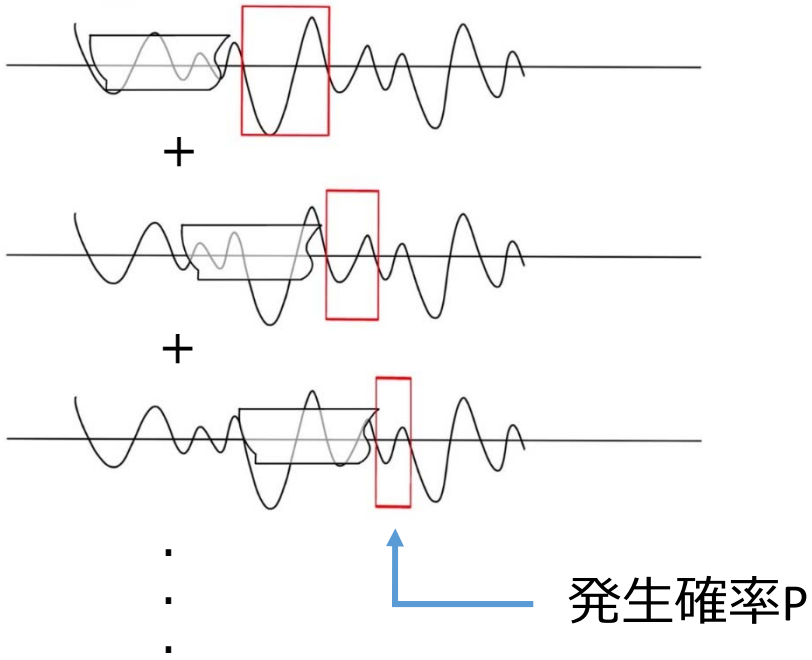
短期海象中の平均抵抗増加量の計算手法法の比較

<スペクトラム法>



成分波の重ね合わせとして扱う

<確率密度関数法>



個々の波成分を統計的に扱う
（Suの方法）

比較項目

＜spec＞　波スペクトラムを用いた方法（線形）
＜pdf_L＞　波の確率密度関数を用いた方法（線形）
＜pdf_NL＞ 波の確率密度関数を用いた方法（非線形）

＜spec＞

$$R_{AW1}(H_{1/3}, T_{01}, \chi) = 2\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty} \frac{R_{WU}(\omega, \theta, V)}{{\zeta_a}^2} S(\omega, \theta | H_{1/3}, T_{01}, \chi) d\omega\, d\theta$$

＜pdf_L＞

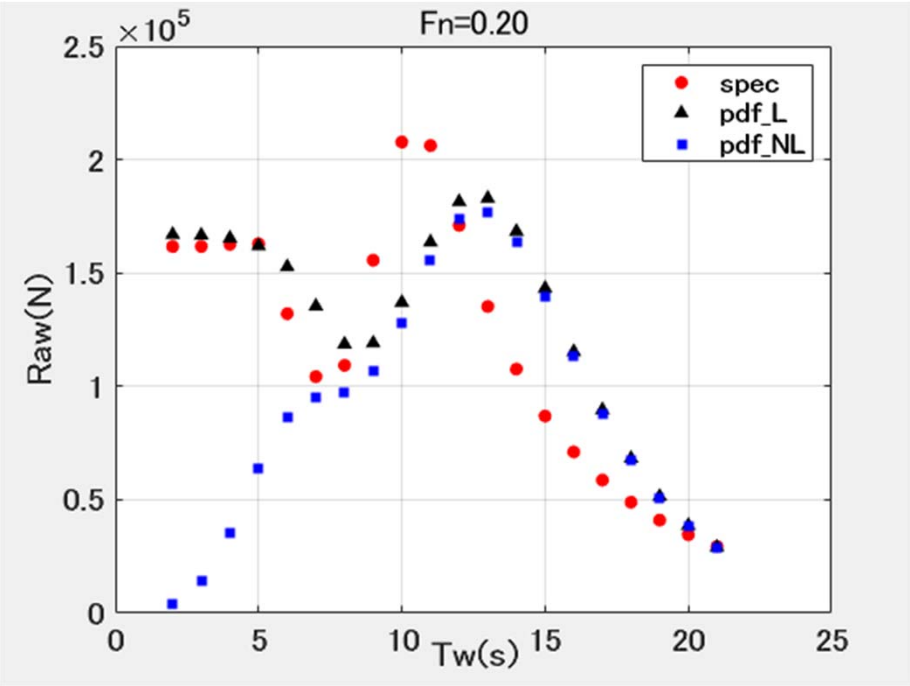
$$R_{AW2}(H_{1/3}, T_{01}, \chi) = \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty}\int_{0}^{\infty} {\zeta_a}^2 R_{WU}(\omega, \theta, V) p(H, T, \theta | H_{1/3}, T_{01}, \chi)\, dHdTd\theta$$

＜pdf_NL＞

$$R_{AW3}(H_{1/3}, T_{01}, \chi) = \int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty}\int_{0}^{\infty} R_{WN}(\omega, \theta, V, \zeta_a, s) p(H, T, \theta | H_{1/3}, T_{01}, \chi)\, dHdTd\theta$$

計算結果（１）

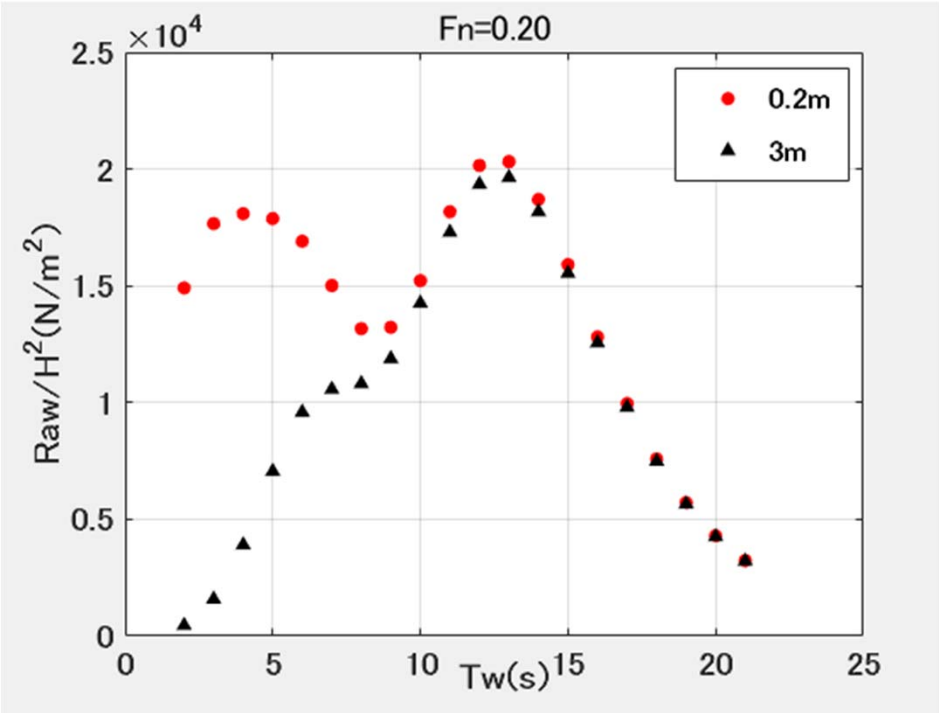
Fn=0.20,有義波高3mにおける3種計算法での波浪中平均抵抗増加の比較



- スペクトラム法（●）と線形の確率密度関数法（▲）は、ピーク位置に違いがあるが、平均波周期（Tw）が5s以下の小さい領域ではほぼ一致し、大きい領域でも定性的には同じであり、本質的には同じである。これにより、スペクトラム法を正とすれば、確率密度関数法の妥当性が示される。
- 非線形の確率密度関数法（■）は、Twが5s以下の小さい領域、すなわち、波岨度が大きい領域で顕著に違いが現れる。この領域では、波浪中抵抗増加が線形計算よりも大幅に小さくなる。

計算結果（2）

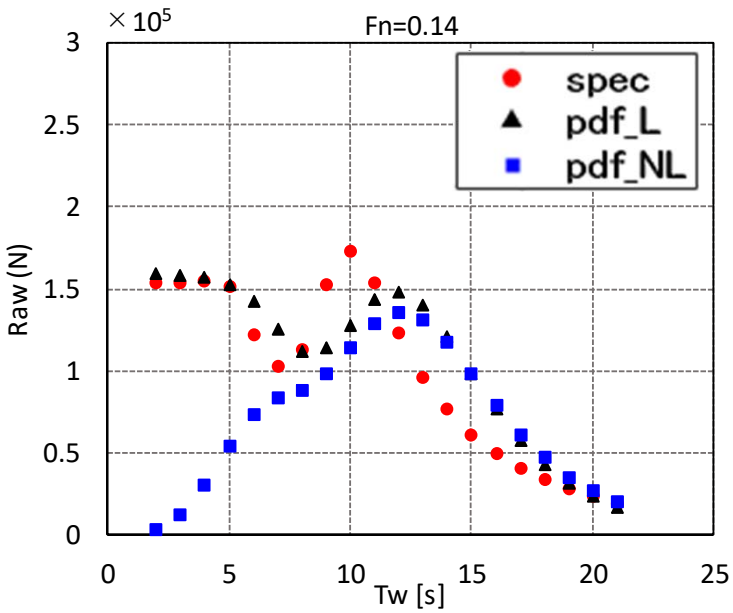
計算法Pdf_NLにおける有義波高0.2m,3mの波浪中平均抵抗増加の比較

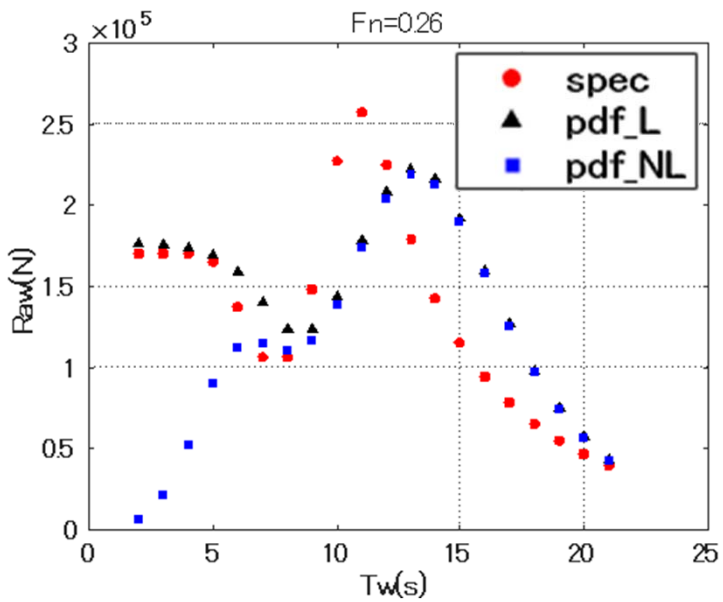


■ 非線形の確率密度関数法は、小波高（●）と大波高（▲）では、波岨度の違いにより、小波高では（すなわち波岨度が小さい場合は）、線形計算と同じ結果が得られる。これにより、確率密度関数法は、線形領域の計算も妥当であることがわかる。

計算結果（3）

Fn=0.14,0.26における波浪中平均抵抗増加の比較





- 非線形の確率密度関数法（■）は、船速が異なっても、 Twの領域に応じて（波岨度の大きさに応じて）、非線形性が修正された抵抗増加を与える。線形領域では、線形計算（●と▲）とほぼ同じ結果を与えることから、計算手法に矛盾はない。
- 実際の海象において、平均波周期5s以下の海象が出現する確率は小さいため、この非線形影響が燃料消費量などの航海性能に影響するかどうかは、さらなる調査が必要である。

まとめ

- KCS船型を用いて、短期海象における波浪中抵抗増加の波高（波岨度）に対する非線形性を、CFD計算と確率密度関数法による平均抵抗計算手法により示した。
- 波高（波岨度）に対する非線形性は、CFDを用いて、線形に対する「修正係数」として経験的に数式化した。線形領域の波浪中抵抗増加はポテンシャルベースの計算手法（RIOS-EUT）により求めた。
- 平均波周期が5s以下の領域（波岨度が大きい領域）で非線形性が顕著に現れ、線形計算よりも波浪中抵抗増加は小さくなる。船速が異なっても傾向は同じであり、提案の計算手法は妥当である。
- 実際の海象において、平均波周期5s以下の海象が出現する確率は小さいため、この非線形影響が燃料消費量などの航海性能に影響するかどうかは、さらなる調査が必要である。