

第80回実海域推進性能研究会
2020/9/17

風圧力の無次元化に用いる高さ平均 風速の有効性について

久米 健一（海上技術安全研究所）



目次

1. はじめに
 - 風圧力の無次元化に必要な代表風速
2. 風速分布に影響されない無次元化
 - 高さ平均風速の利用
3. 風洞試験による風圧力計測結果
 - 同一風洞で異なる風速分布の場合
 - 異なる風洞で異なる風速分布の場合(持ち回り試験)
4. CFDによる風圧力計算結果
 - 異なるソルバーで異なる風速分布の場合
5. まとめ

1. はじめに

■ 船体に働く風圧力の推定

- 回帰式(藤原の式)
- データセット(ITTC-RPなど)
- CFD
- 風洞試験

いずれも、無次元値で利用される。

無次元化のためには空気密度、投影面積と代表風速が用いられている。

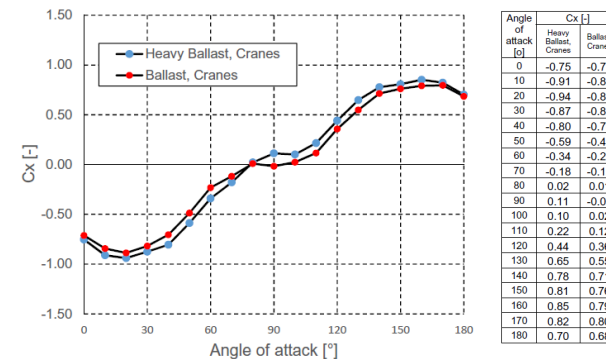
$$C_X = F_X / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_T \right)$$

→ 代表風速をどう決めるか

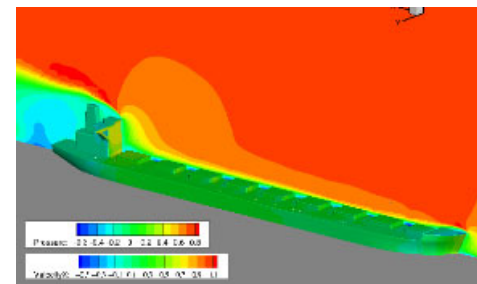
実海域実船性能評価プロジェクト(OCTARVIA)で、風洞試験法に加え、解析法の標準化を検討した。

$$C_{DA} = C_{LF} \cos \psi_{WR} + C_{XLI} \left(\sin \psi_{WR} - \frac{1}{2} \sin \psi_{WR} \cos^2 \psi_{WR} \right) \sin \psi_{WR} \cos \psi_{WR} + C_{ALF} \sin \psi_{WR} \cos^3 \psi_{WR}$$

藤原の式



データセット



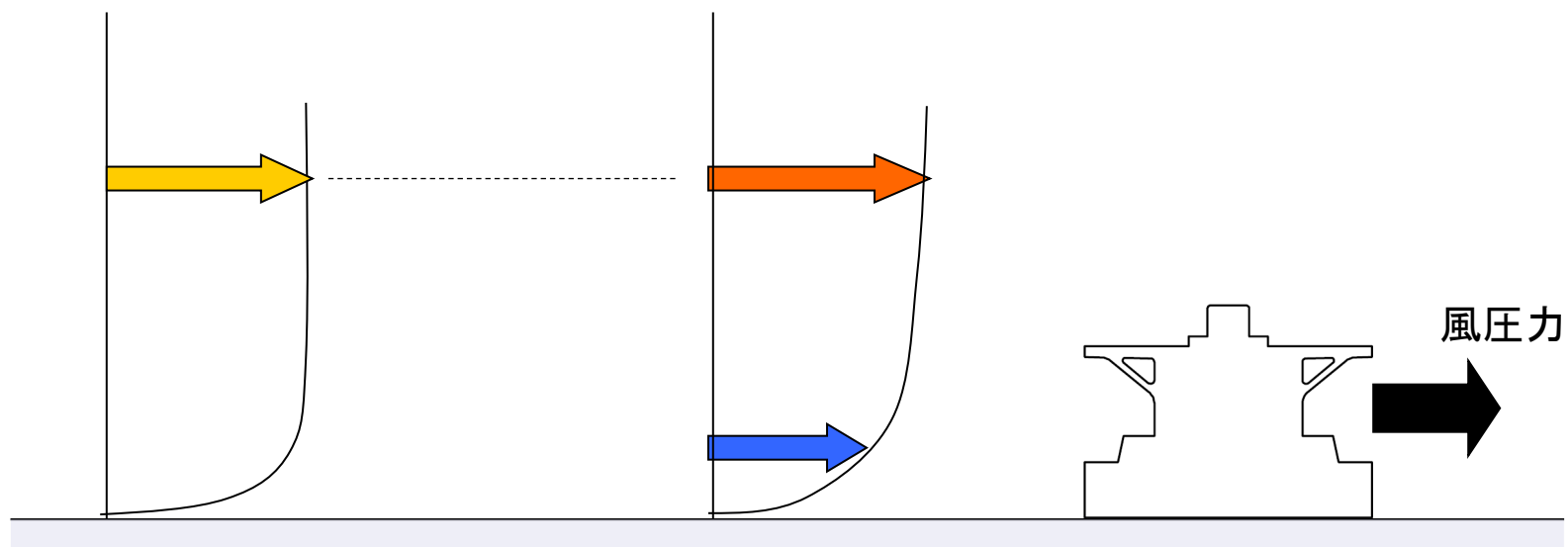
CFD



風洞試験

代表風速

- 風洞内の風速分布は一様ではない

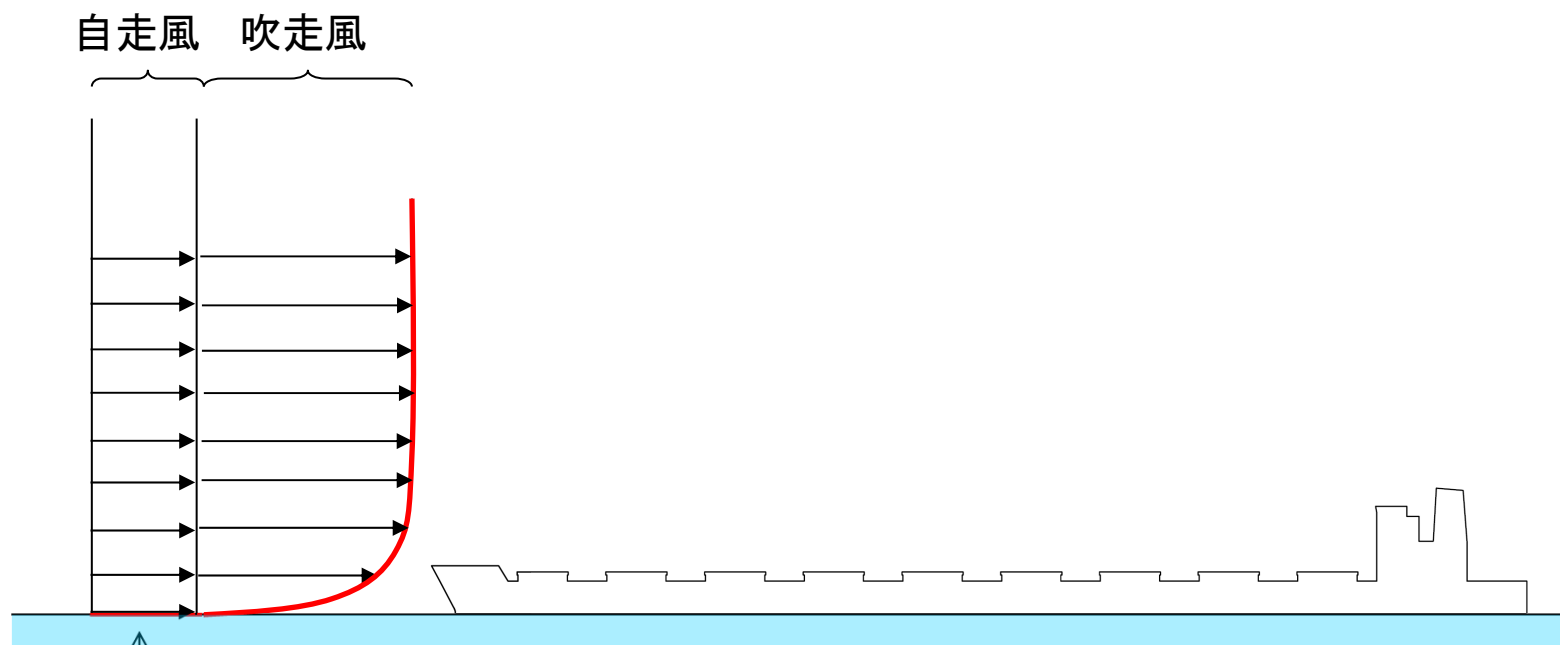


風洞内は高さ方向だけでなく長さ方向にも風速分布が異なる

- 船体に働く流体力が同じであっても、用いる代表風速によって無次元値は異なる。

航海中の遭遇風分布

■ 吹走風(速度勾配あり)と自走風(完全一様)の合成



海面位置(風洞床面)でも風速が存在する

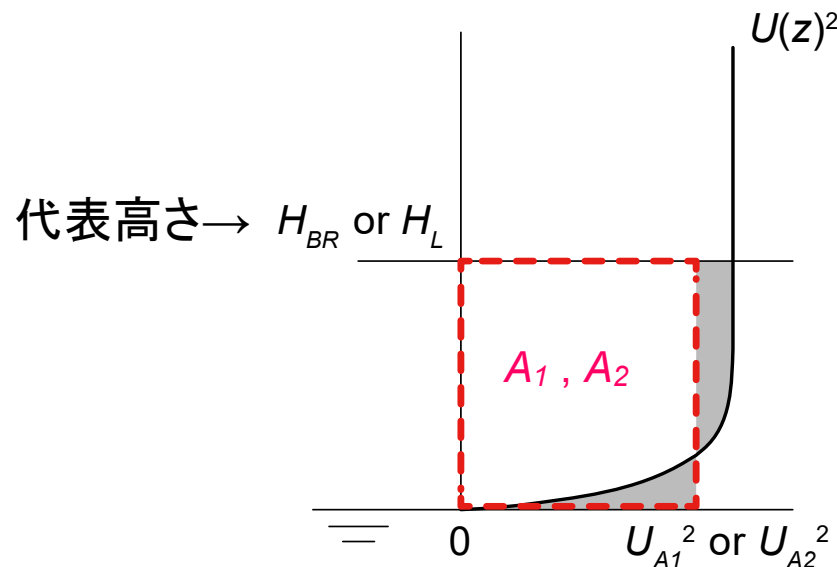
→ このような分布の風洞での再現は困難

そもそも船速は一定ではなく、遭遇風の分布は一つに定まらない。
任意の一点の風速で代表させる方法には限界がある。

2. 風速分布に影響されない無次元化

■ 「高さ平均風速」の利用

- 風速分布に影響されない無次元化の方法として、過去にBlendermannや藤原らが、船体に働く平均動圧と実験定数を用いた方法を提案
- 本研究では、同じ思想に基づき、船体に流入する風速分布の2乗値の積分を利用する高さ平均風速を提案し、その有効性を検証した。



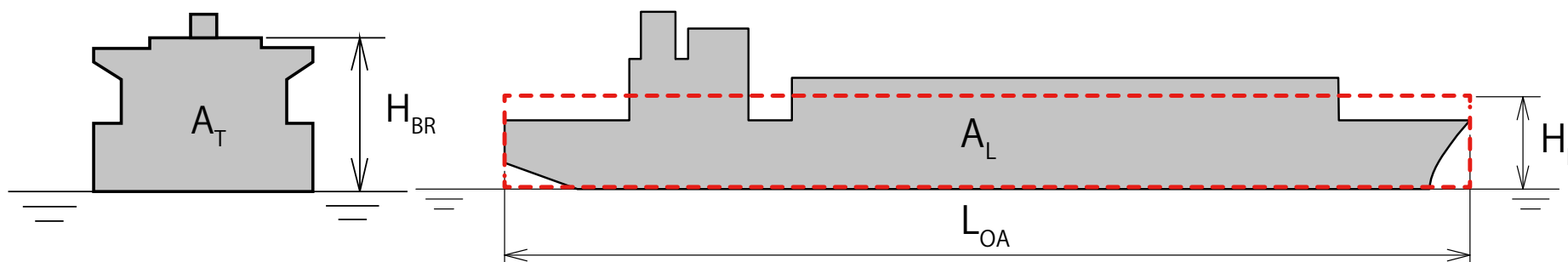
高さ平均風速の計算

$$U_{A1}^2 = A_1 / H_{BR}$$

$$U_{A2}^2 = A_2 / H_L$$

代表高さ

- H_{BR} と H_L は風速分布の積分の上限値として利用する。



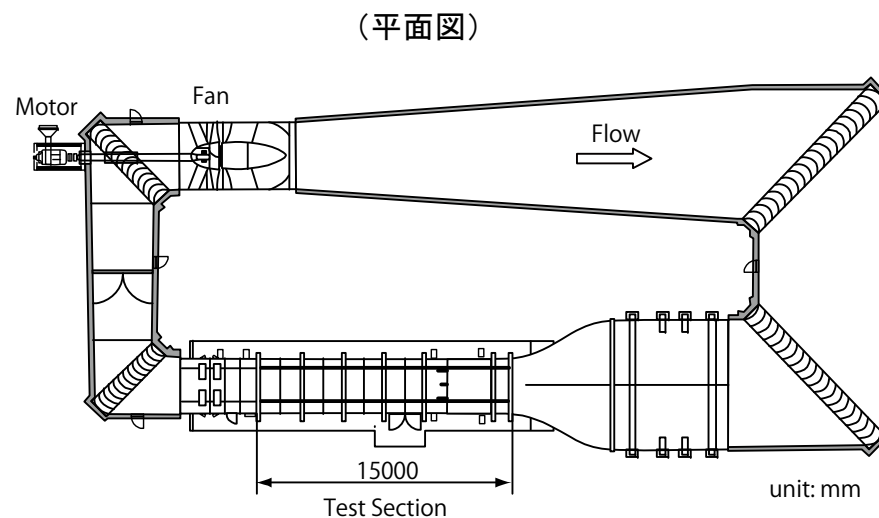
H_{BR} : ブリッジトップの高さ

H_L : 側面投影面積の平均高さ

3. 風洞試験による風圧力計測結果

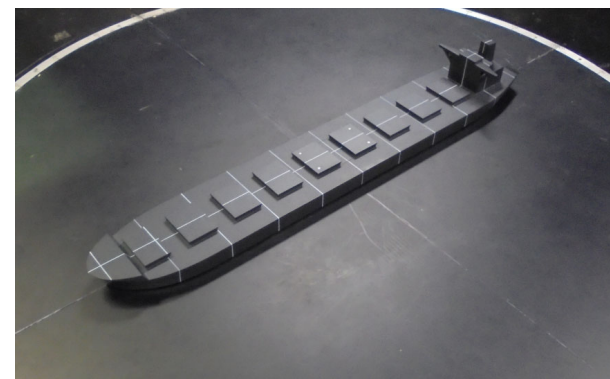
■ 風洞

- 海技研変動風水洞
 - ゲッチンゲン型水平回流式
 - 計測部: 密閉型
幅3m × 高さ2m × 長さ15m
 - 最大風速30m/s



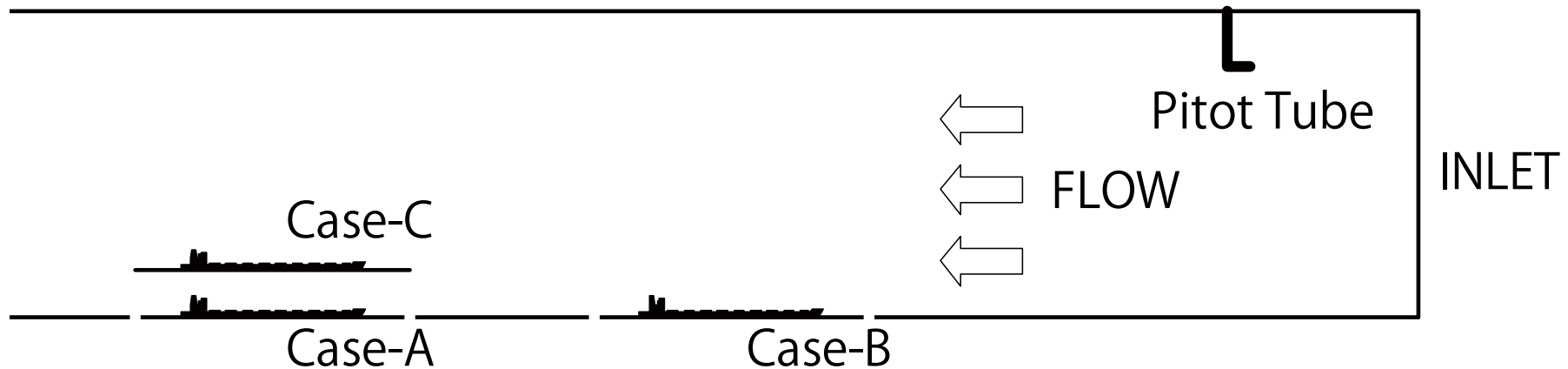
■ 模型船

- ケープサイズ・バルクキャリア ($L_{PP}=280\text{m}$)
 - 満載状態
 - 模型船長は1.200m
 - 閉塞率: 約1.0%

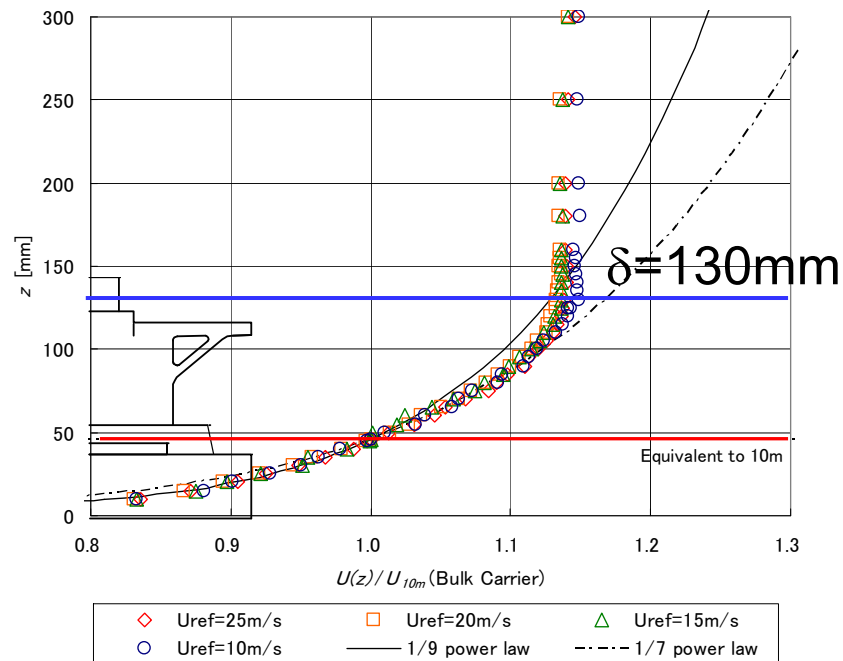


同一風洞で風速分布を変更する方法

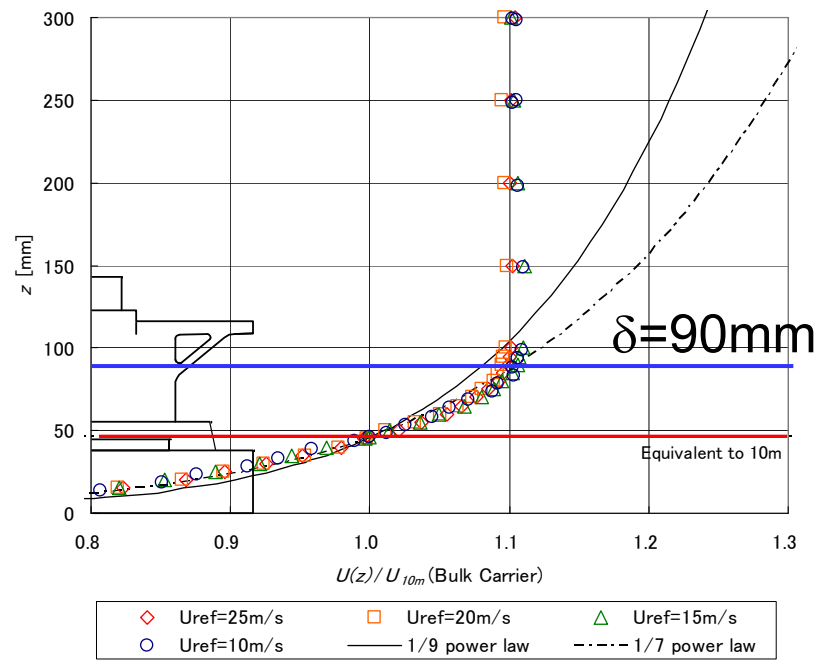
- 風洞内での模型設置位置を変更
 - 3ケースの風速分布



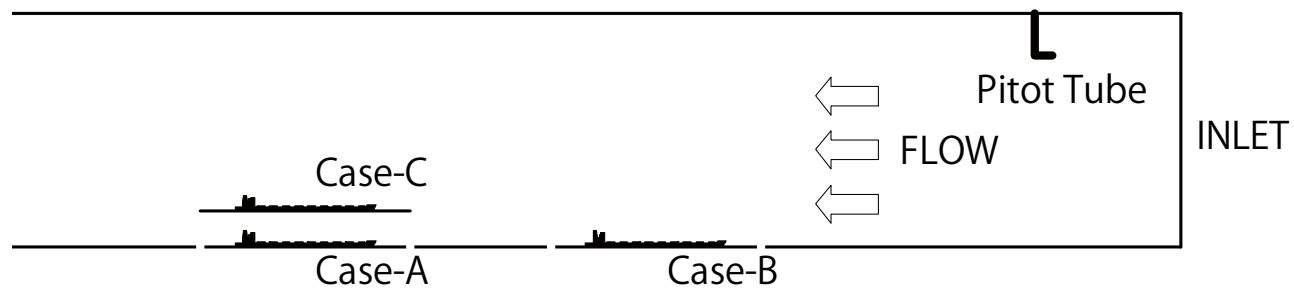
風洞内風速分布



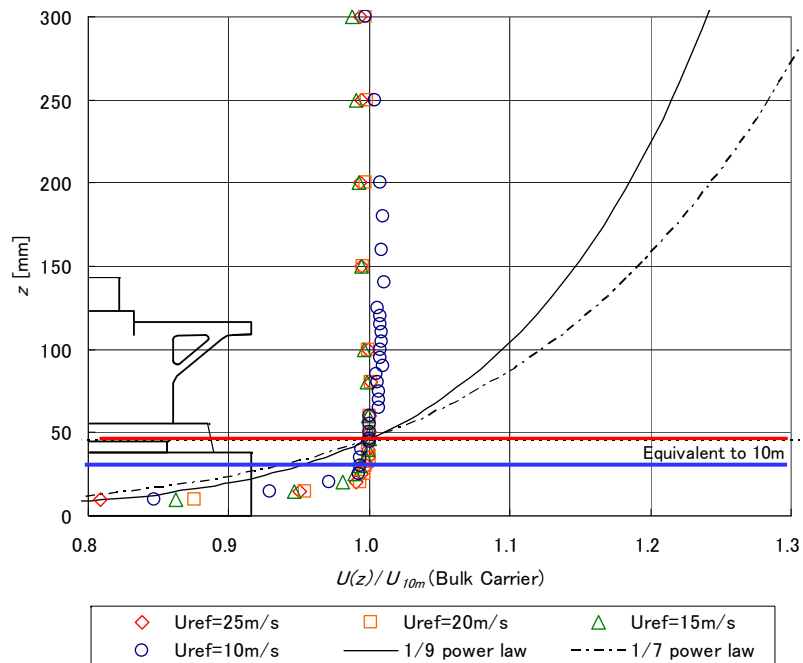
Case-A



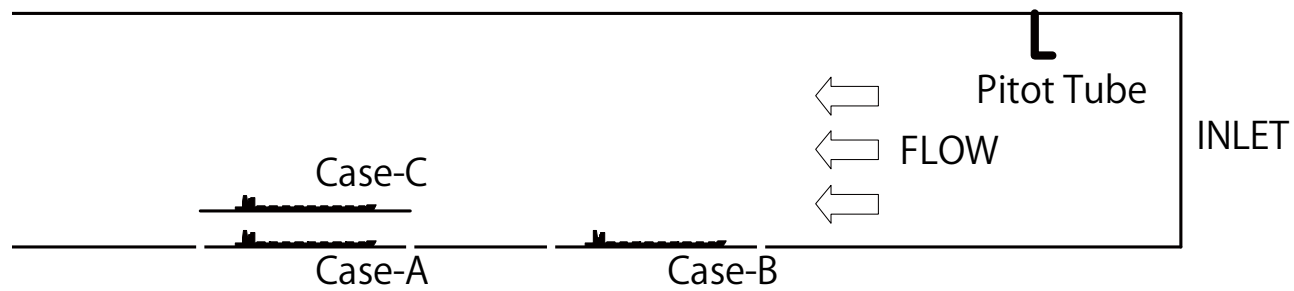
Case-B



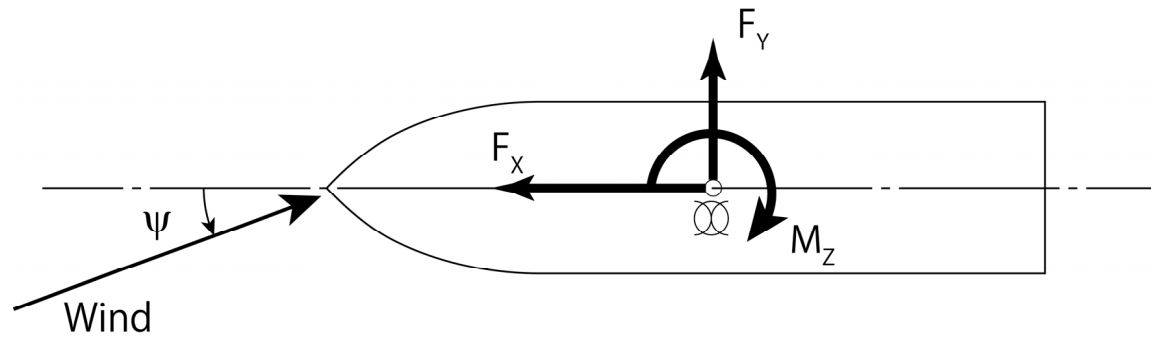
風洞内風速分布



Case-C



座標系、無次元化



$$C_X = F_X / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_T \right)$$

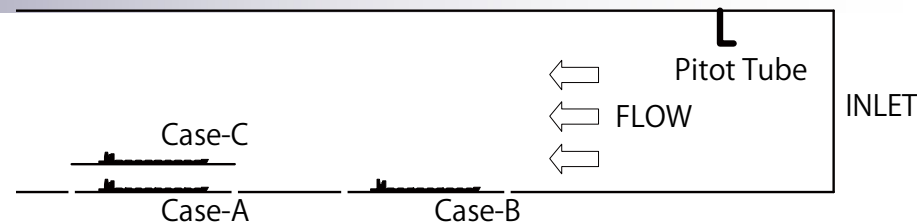
$$C_Y = F_Y / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_L \right)$$

$$C_N = M_Z / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A_L \cdot L_{OA} \right)$$

代表風速

■ 3ケース

- U_{ref} : 風洞入口のピトー管で計測された基準風速
- U_{10m} : 模型位置での10m相当高さの風速
- U_{A1}, U_{A2} : 高さ平均風速(正面、側面)



$$U_{ref} = 25\text{m/s}$$

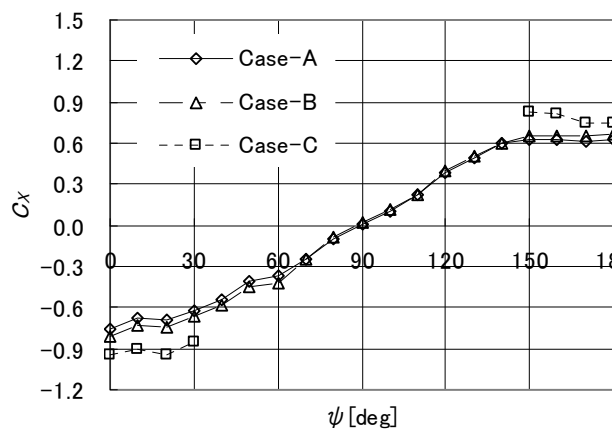
Case	U_{10m}	U_{A1}	U_{A2}
A	22.29	22.98	20.64
B	22.78	23.19	20.59
C	25.71	25.10	24.20

境界層厚さが薄くなるにつれて各代表風速が増加している

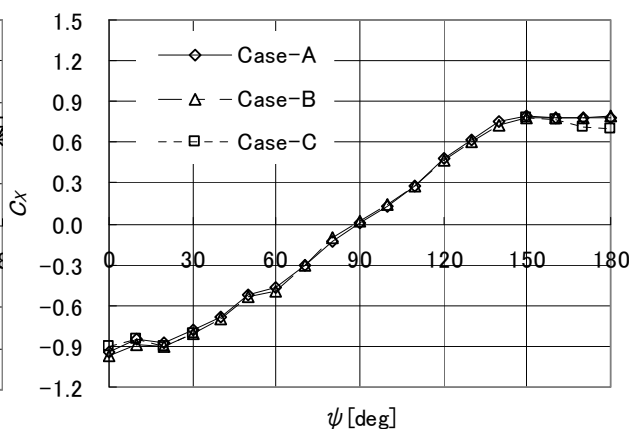
風圧力係数

- 同一風洞で異なる風速分布の場合
- C_x

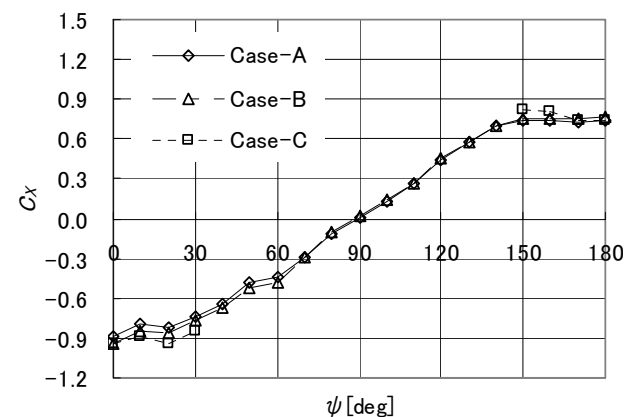
Case-Cのデータは $\psi=0\sim30$ 度および $150\sim180$ 度のみ



U_{ref} で無次元化



U_{10m} で無次元化

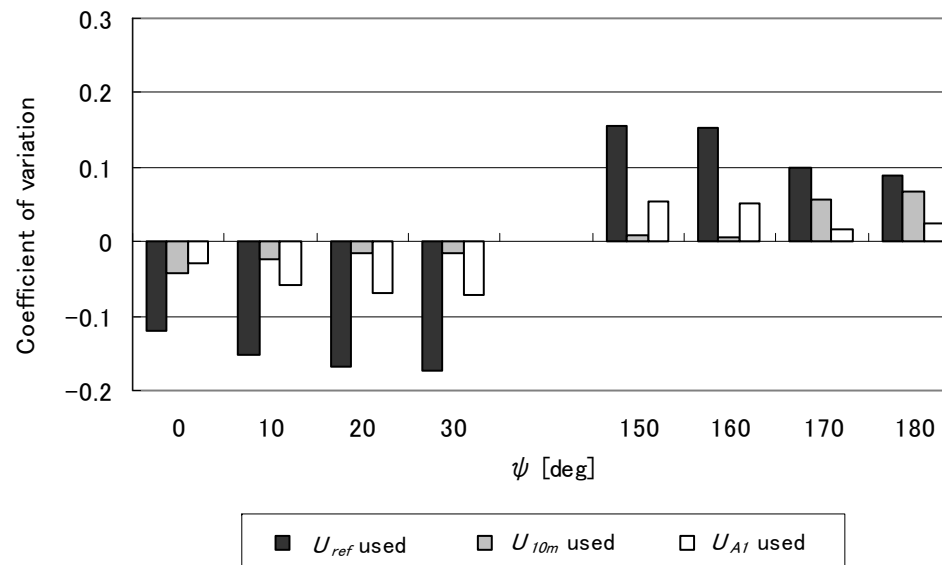


高さ平均風速 U_{A1} で無次元化

U_{10m} または U_{A1} を用いた場合に無次元値のまとまりが良い

風圧力係数

- 同一風洞で異なる風速分布の場合
- C_x の変動係数
 - Case-A, B, Cのまとまりの程度を表す



高さ平均風速 U_{A1} を用いた場合に風速分布の違いによる影響が軽減している。
 U_{10m} を用いた場合にも軽減しているが、今回の試験時の風速分布における U_{10m} は床面で自然発達した境界層中で計測され、 U_{A1} との相関が高かったためである。

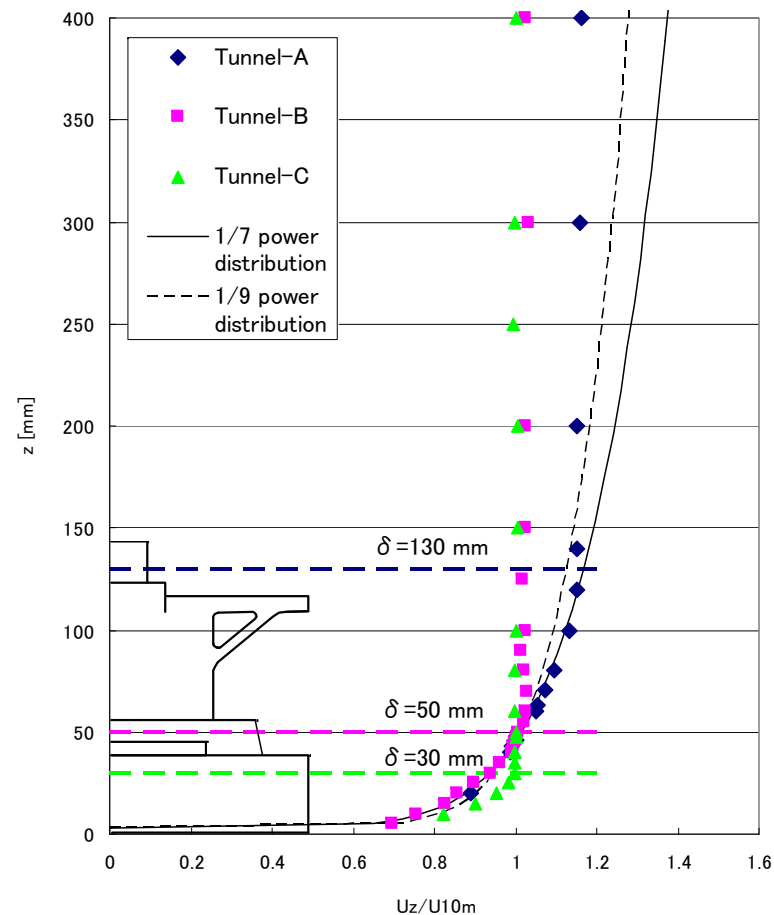
持ち回り試験

- 国内3つの風洞で同一模型を用いた試験を実施

	計測部寸法	境界層厚さ
Tunnel-A (海技研)	15 × 3 × 2 m	約 130 mm
Tunnel-B, C (海技研以外)	24 × 6 × 3 m	約 30 mm
	30 × 6 × 5 m	約 50 mm

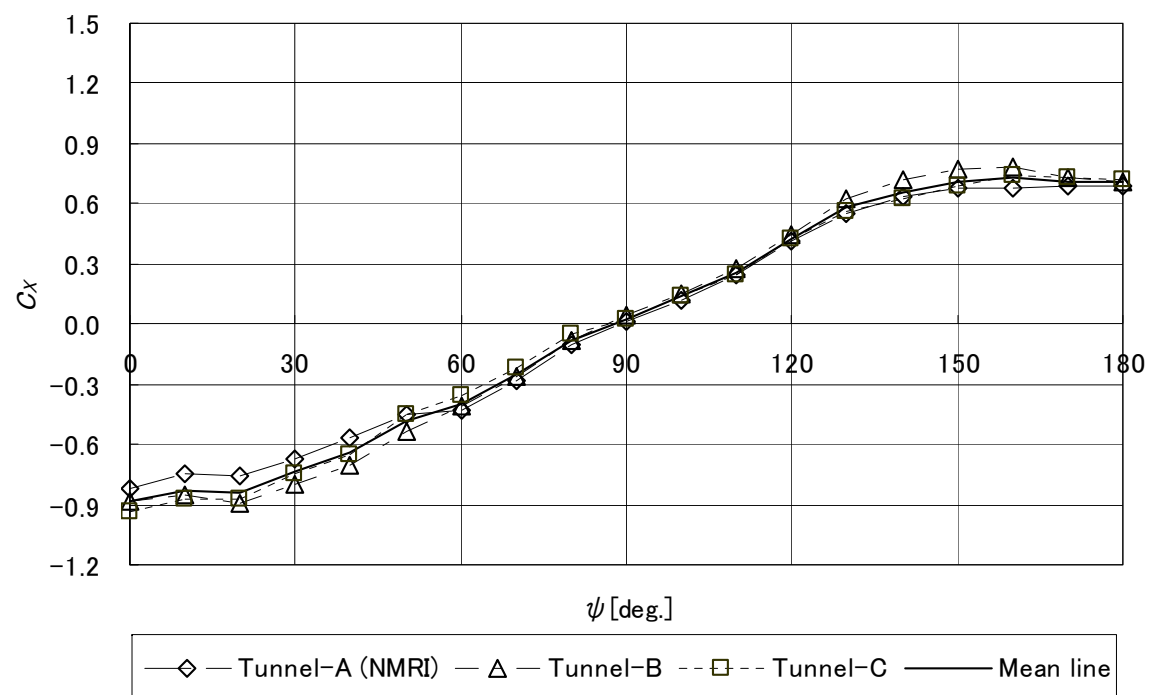
境界層厚さはそれぞれ異なる。

風速分布



風圧力係数

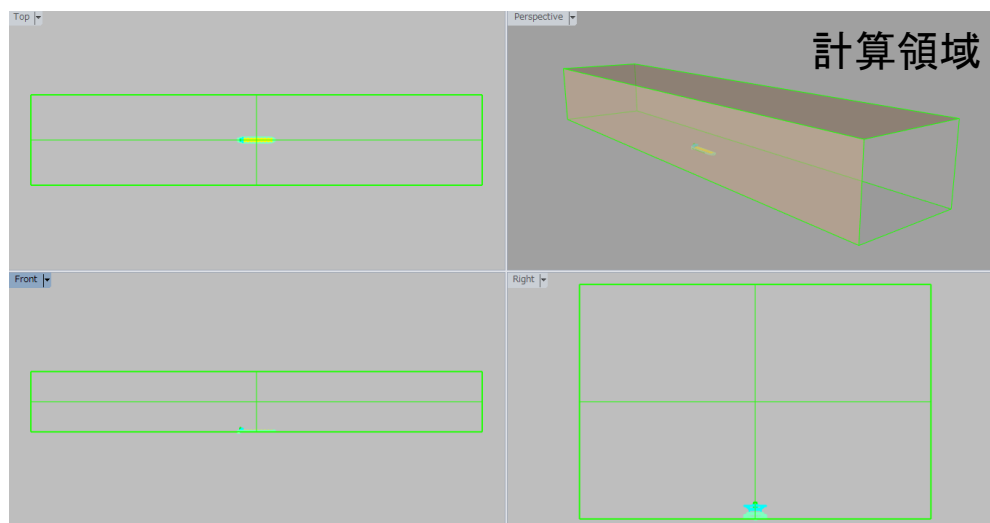
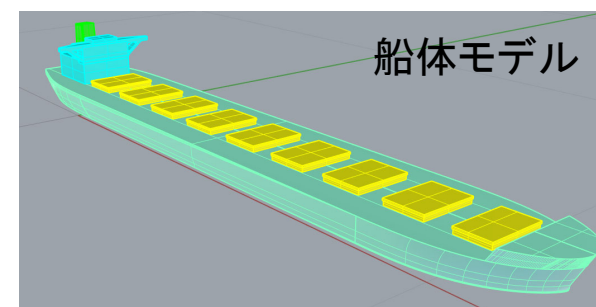
- 異なる風洞での異なる風速分布の場合 (3社持ち回り試験)
- C_x
 - 高さ平均風速 U_{A1} で無次元化



平均線に対し±約6%の範囲にまとまる

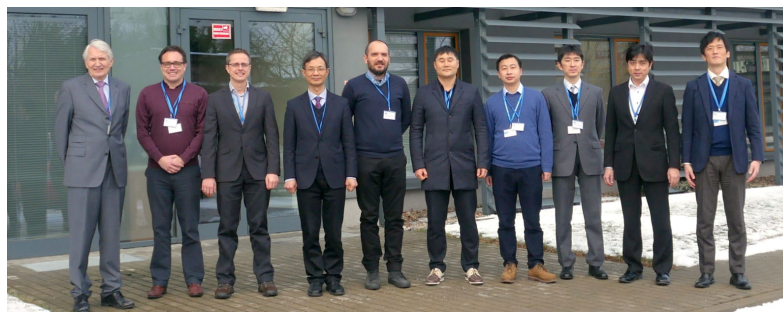
4. CFDによる風圧力計算結果

- 模型船相当のレイノルズ数
- 風速は風洞試験と同じ25m/sを想定
- 計算領域の形状は風洞を再現



4. CFDによる風圧力計算結果

- 第29期ITTC SOS委員会でも同様の風圧力推定法の議論が行われてきた
 - CFDで風圧力計算を実施する際に必要な格子生成(構造/非構造)、境界条件(外部境界形状、壁関数、風速分布)、計算条件(定常/非定常、乱流モデル)について議論が行われた。
 - 風圧力の無次元化に用いる代表風速として「高さ平均風速」の利用を提案し、風CFD計算法のITTC-RP案に採用された。
 - ケープサイズBCの他にハンディサイズBCも対象に、ITTCからベンチマーク計算の要請がなされた。
- ケープサイズBCのベンチマーク計算結果を報告する。



SOS委員+AC議長

Grid Parameters

Participant Code	Shape and Dimensions of computational domain	Type of Elements	Total Number of Elements
J-1	Cuboid, Length= $\pm 6.25 L_{PP}$, Width= $\pm 1.25 L_{PP}$, Height= $1.67 L_{PP}$ (Same as the wind tunnel)	Structured	9.6E+06
J-2		Hexahedral	21E+06
J-3.2		Hexahedral	10.0E+06 ~11.7E+06
J-3.3			
J-3.4		Polyhedral	11.2E+06
J-5			
J-6.1		Polihedral	1.5E+06 ~2.0E+06
J-6.2	Cylindrical	Hexahedral	4.1E+06

(↑ 整数部分が計算者番号、小数部分が同一計算者による計算の区別)

計算者J-6.2だけは計算領域が異なる

計算者J-1のみが構造格子、他は非構造格子を選択

Computational Parameters

- ・床面の摩擦を考慮しないケースもあり
- ・乱流モデルは様々
- ・壁関数を利用したケースもある
- ・定常計算、非定常計算の選択は同数

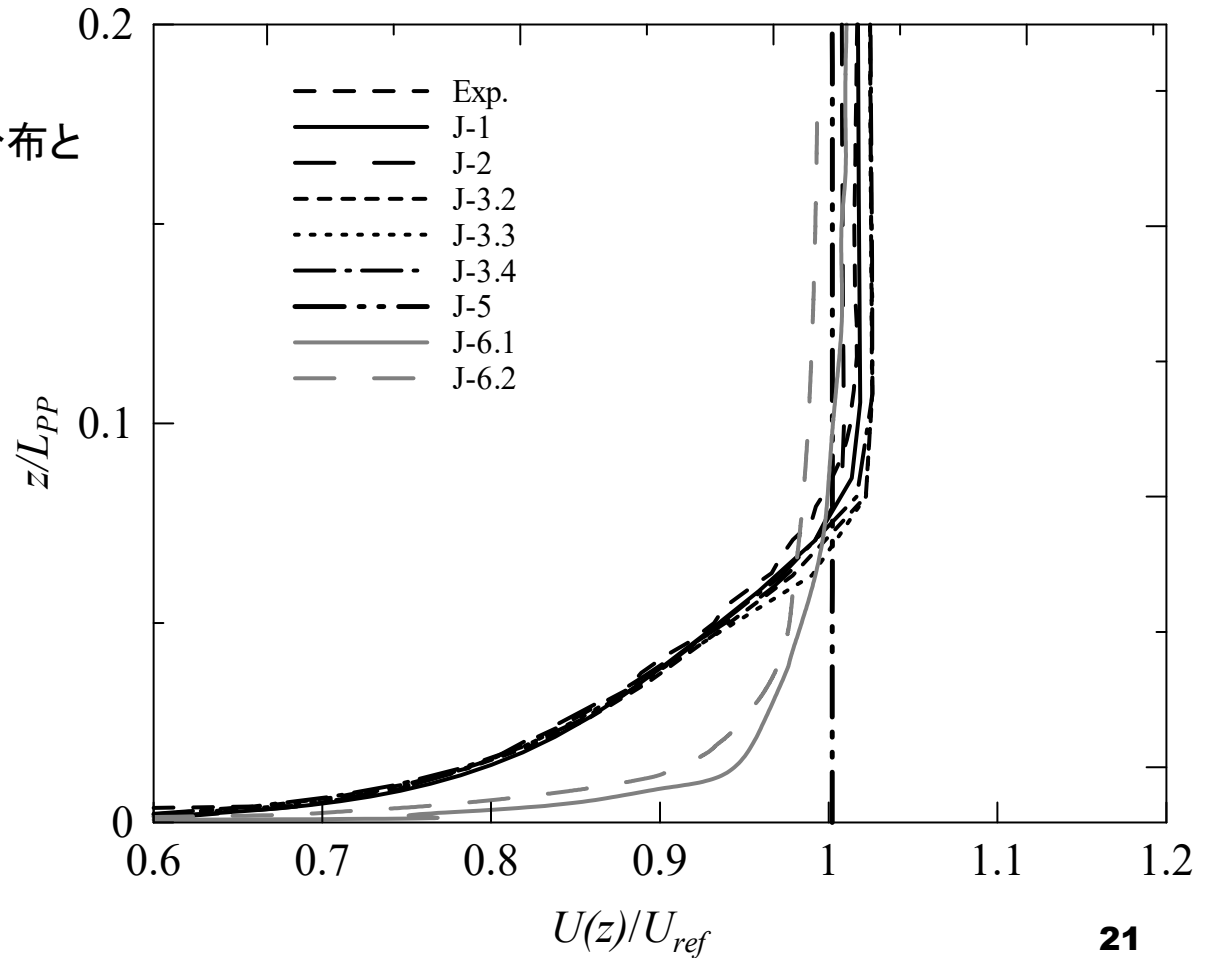
Participant Code	Boundary Condition	Turbulence Model	Time Step [s]
J-1	Inlet: Velocity inflow Top, Sides: Symmetry Bottom: No-slip	EASM	Steady State
J-2	Inlet: Velocity inflow Top, Sides: Symmetry Bottom: No-slip	$k-\omega$ SST	Steady State
J-3.2	Inlet: Uniform inflow Top, Sides: Symmetry Bottom: No-slip	$k-\varepsilon$ realizable, Wall function	Unsteady, 0.01
J-3.3		$k-\omega$ SST, Wall function	
J-3.4		RSM QPS, Wall function	
J-5	Inlet: Velocity inflow Top, Sides, Bottom: Freeslip	$k-\omega$ SST, Wall function	Unsteady, 0.0002
J-6.1	Inlet: Velocity inflow Top, Sides, Bottom: Freeslip	RSM	Steady State
J-6.2	Top: Freeslip Sides: Velocity Bottom: No-Slip	$k-\omega$ SST	Steady State

風速プロファイル

■ 境界条件により異なる

- ・計算者J-5は一様流、他は床面での境界層発達あり
- ・ただし計算者J-6は流入境界で任意の風速分布を与えている

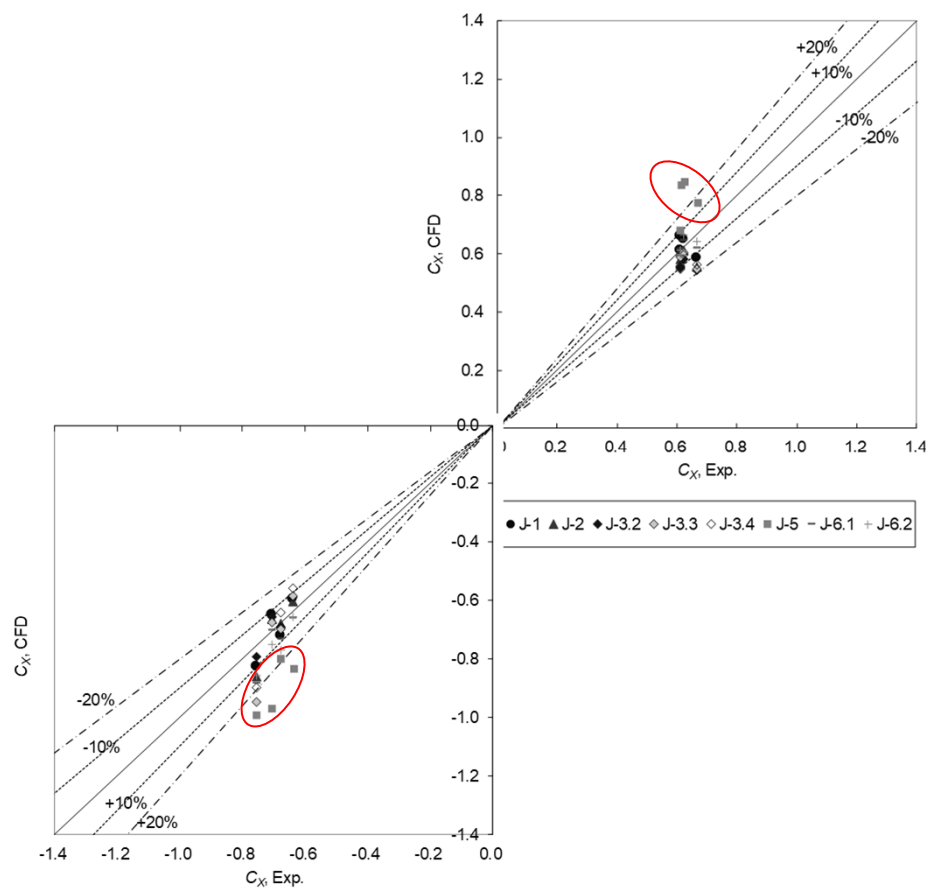
・J-5、J-6以外の参加者は
床面で自然発達した境界層分布と
なっている



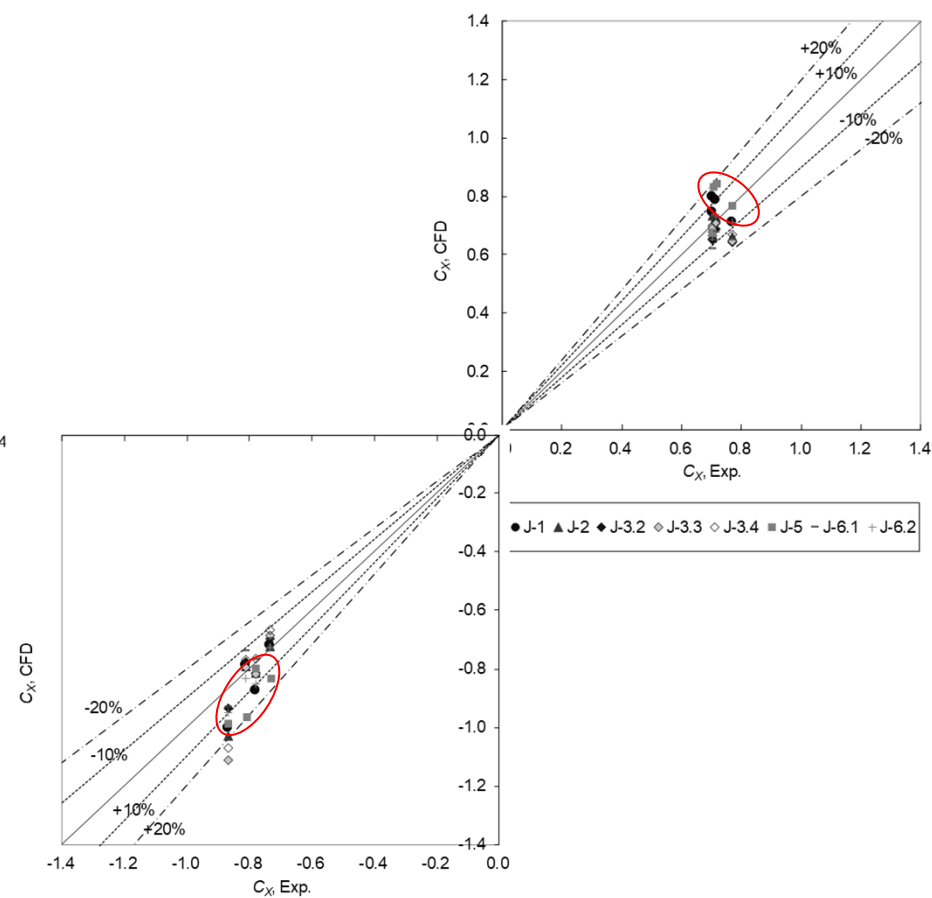
風圧力係数

- 異なるソルバーで異なる風速分布の場合

U_{ref} で無次元化



高さ平均風速 U_{A1} で無次元化

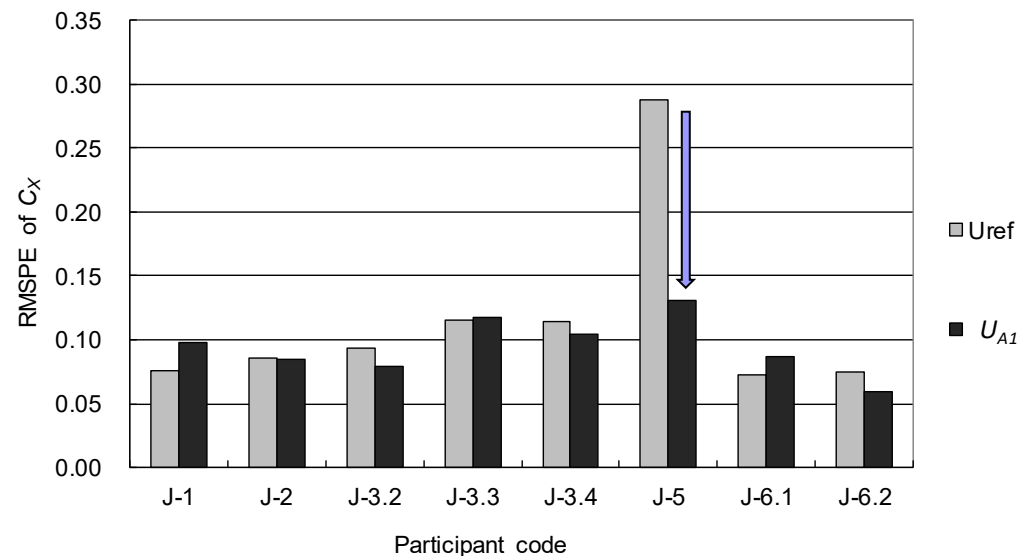


風洞試験と異なる風速プロファイルだったJ-5の相関が改善

風圧力係数

- 異なるソルバーで異なる風速分布の場合
- 平均平方二乗誤差率 ($RMSPE$) で C_x の相関を定量評価

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y(\text{CFD})_i - y(\text{Exp})_i}{y(\text{Exp})_i} \right)^2}$$



高さ平均風速の利用により、風洞試験と異なる風速プロファイルだったJ-5の相関が改善

5. まとめ

- 風速の2乗値の積分により算出する高さ平均風速を代表速度に用いて風圧力を無次元化することで、風圧力係数に対する風速分布の違いによる影響を軽減できることを示した。
- 風圧力の無次元化に高さ平均風速を用いる限りは、風洞試験及びCFD計算において一様流もしくは風洞床面で自然に発達した境界層流れを用いることに妥当性があることを示した。

この研究は、海事クラスタ共同研究 実海域実船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。