

JSTRA 研究開発成果報告セミナー  
- 内航船の課題解決に向けて -

# トリプル連結バージの 運動性能評価

2024/3/6(水)

広島大学

大学院 先進理工系科学研究科

輸送・環境システムプログラム

佐野 将昭



# 研究背景

## ◆ プッシャー・バージ(PB)という輸送手法

- 海外の河川輸送で発達(欧州の運河でも活躍)
- 縦横にロープ連結した複数のバージ(浮体)をプッシャーで押航. 波による動揺の心配が無い為, 大量のバージを一括輸送.
- バージは無人の浮体であり複雑な構造様式を有さず, 一般に建造に要する初期投資を節約可.
- 到着後, プッシャーはバージを分離して直ちに次の輸送に取り掛かれる. 適切な運航計画を組めれば, 荷待ち時間が無く, 無駄を省ける(**Cyclic Operation**).

## ◆ PBを海で走らせる事の難しさ

- 波浪中の航行が避けられず, ロープ連結は不可.  
**機械式連結技術(2点 or 3点支持)**の採用が必須.
- 同じ理由から, これまでに, 1台のバージを1隻のプッシャーが押航する**シングル連結バージ**のみが実現.

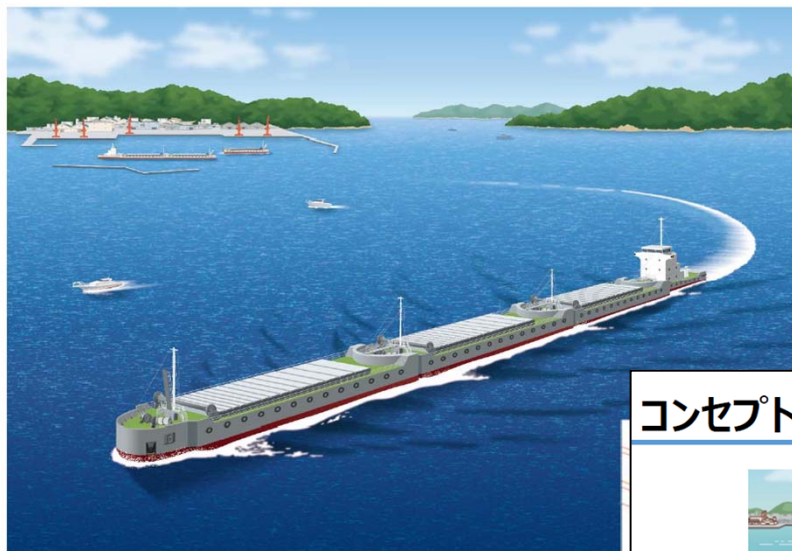
## ◆ 瀬戸内海への応用の可能性

- 瀬戸内海沿岸は, 比較的波が穏やかであり, 多連結バージを走らせるポテンシャルは高い. バージは幅広であり, 喫水が浅い点も有利に作用.
- 様々な規模の工場・港湾が立地しており, 混載も可能な多連結バージのCyclic Operationを展開出来る素地はある.



# 新コンセプト船：トリプル連結バージ

## 概念図と研究目的



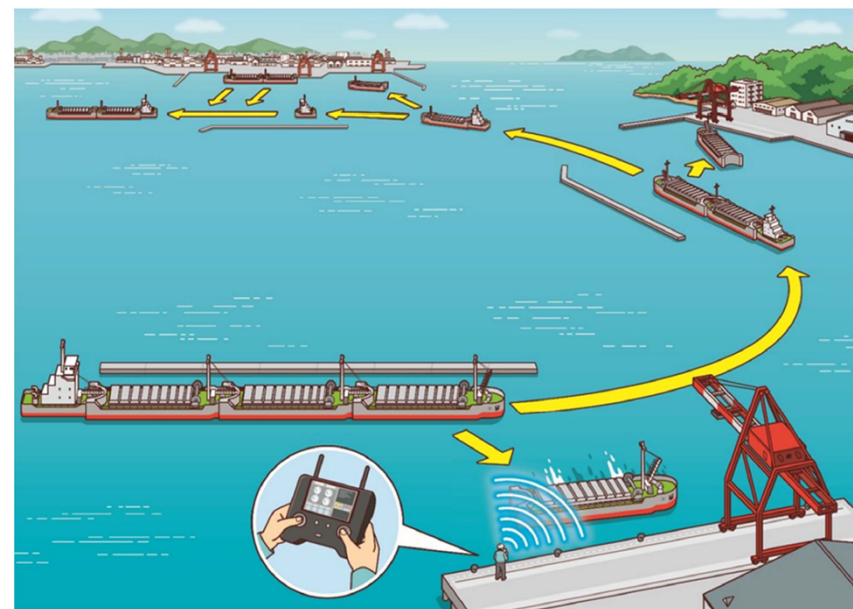
研究目的：内航船のGHG削減と船員不足への対応

- ◆ 最大3台のバージを縦列に連結
- ◆ 連結部には2点支持の機械式連結を採用（支持点回りでピッチング運動を許容）
- ◆ バージを岸壁へ自動着棧，または岸壁から沖合まで自動離棧できるような自動操船システム（もしくは遠隔操船システム）を装備。（自律運航バージ構想）

第3回 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会

資料3-2-2-1「トリプル連結バージ（二本船舶技術研究協会）より抜粋。

## コンセプト



# 事業計画

## 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築 トリプル連結バージ事業計画

### 代替設計の安全評価・概念設計

#### 2022年度

#### 2023年度

1/4半期

2/4半期

3/4半期

4/4半期

1/4半期

2/4半期

3/4半期

4/4半期

**全体**

◆コンセプト検討

◆適用規則整理

◆検査の方法

**トリプル連結バージ**

◆仕様検討・概念設計

◆完成要目・GA

◆連結強度(試算)

◆連結部詳細設計

◆速力・馬力(試算)

◆線図

◆速力・馬力

◆水槽試験(連結部外力等)・操縦性評価

**自律バージ**

◆仕様検討・概念設計

◆遠隔操縦システム詳細設計

内船  
トリ

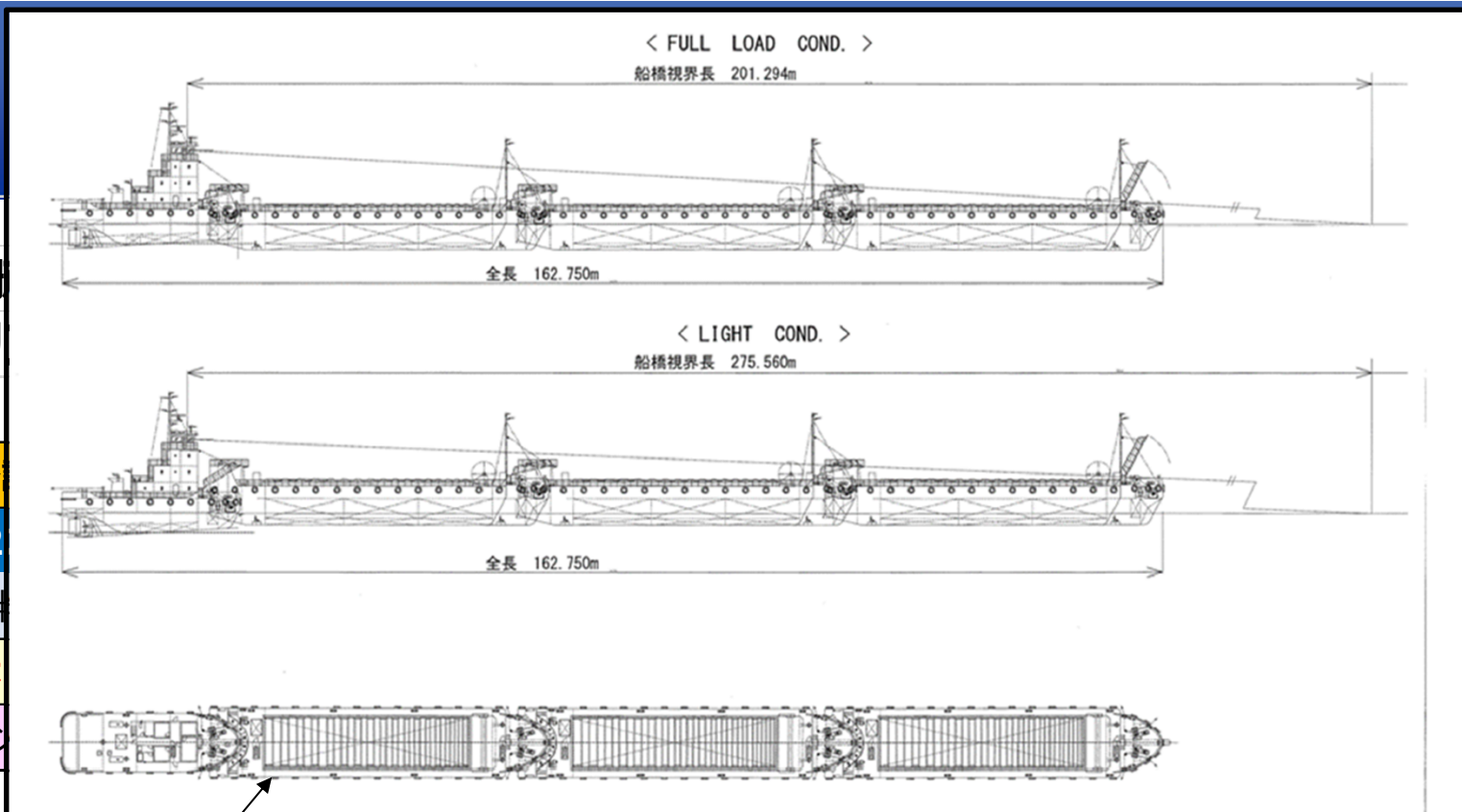
代替

202

1/4半

全体

◆コ



トリプル連結バージ

◆仕様検討・概念設計

◆完成要目・GA

◆連結強度(試計算)

◆連結部詳細設計

◆速力・馬力(試計算)

◆線図

◆速力・馬力



◆水槽試験(連結部外力等)・操縦性評価

自律バージ

◆仕様検討・概念設計

◆遠隔操縦システム詳細設計

# 本研究の目的と内容

## ◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験(抵抗試験)を実施.
- ◆ 全抵抗を計測し, 3次元外挿法により各抵抗成分(摩擦+粘性圧力+造波)を評価.
- ◆ 連結状態, 載荷状態毎に実船の有効馬力を推定.

## ◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施.
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動(前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ)及び連結部の荷重(前後方向および上下方向)を計測.
- ◆ 波長, 波高, 船速, 載荷状態の影響を系統的に評価.

## ◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体, プロペラ, 舵に作用する流体力をCFD計算により推定.
- ◆ 各種係数を同定し, プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算(旋回運動・Zigzag運動)を通じて, 操縦性能を評価.

# 供試船(船体)の主要目

◆ **連結状態**： バージ3連結, 2連結, 1連結

◆ **載荷状態**： 満載(F), 軽荷(L), 混載

- ✓ 満載排水量の**71%**を本実験時の軽荷状態に設定
- ✓ 計算に基づく操縦性能の評価では, 満載排水量の**42%** (仕様書の設定) も検討に追加
- ✓ 満載と軽荷(71%)の混載式トリプルバージも設定.

**1/36.17模型**



Item	Pusher	Barge (Full)	Barge (Light 71%)	Barge (Light 42%)	PFFF	PFFL (L: 71%)	PFLF (L: 71%)	PLLL (L: 71%)	PLLL (L: 42%)
$L_{pp}$	m	24	49.55	49.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55
$L_{wl}$	m	26	49.7	48.57	162.55	161.99	162.55	161.99	161.42
$B$	m	8.5	10	10	10	10	10	10	10
$d$	m	2.8	3.75	1.65	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
$V$	$m^3$	351	1575.28	655.95	5076.84	4612.87	4612.87	3684.93	2318.85
$C_B$	-	0.61	0.85	0.80	0.84	0.77	0.77	0.61	0.39
WSA	$m^2$	271.86	769.91	538.20	2581.58	2466.18	2466.18	2235.39	1886.45

※PB輸送船を構成するプッシャーと各バージの喫水は不揃いである為, 満載バージの喫水を統一的に入力した. また方形係数はそれを用いて計算した.

# 計測システム

- ◆ 波高, 流速, 船体抵抗
- ◆ 各連結部の前後荷重と上下荷重
- ◆ 各船体の上下揺れと縦揺れ

## ✓ 画像解析システム

- 船上に置いた画像解析キャリブレーションプレートビデオカメラで撮影し, 専用ソフトで運動解析
- 多点の6自由度運動を同時計測可能.
- 3連結の場合, プッシャーと3台の各バージにプレートを設置し, 直上の計4台のカメラで撮影.

## ✓ レーザー測距計

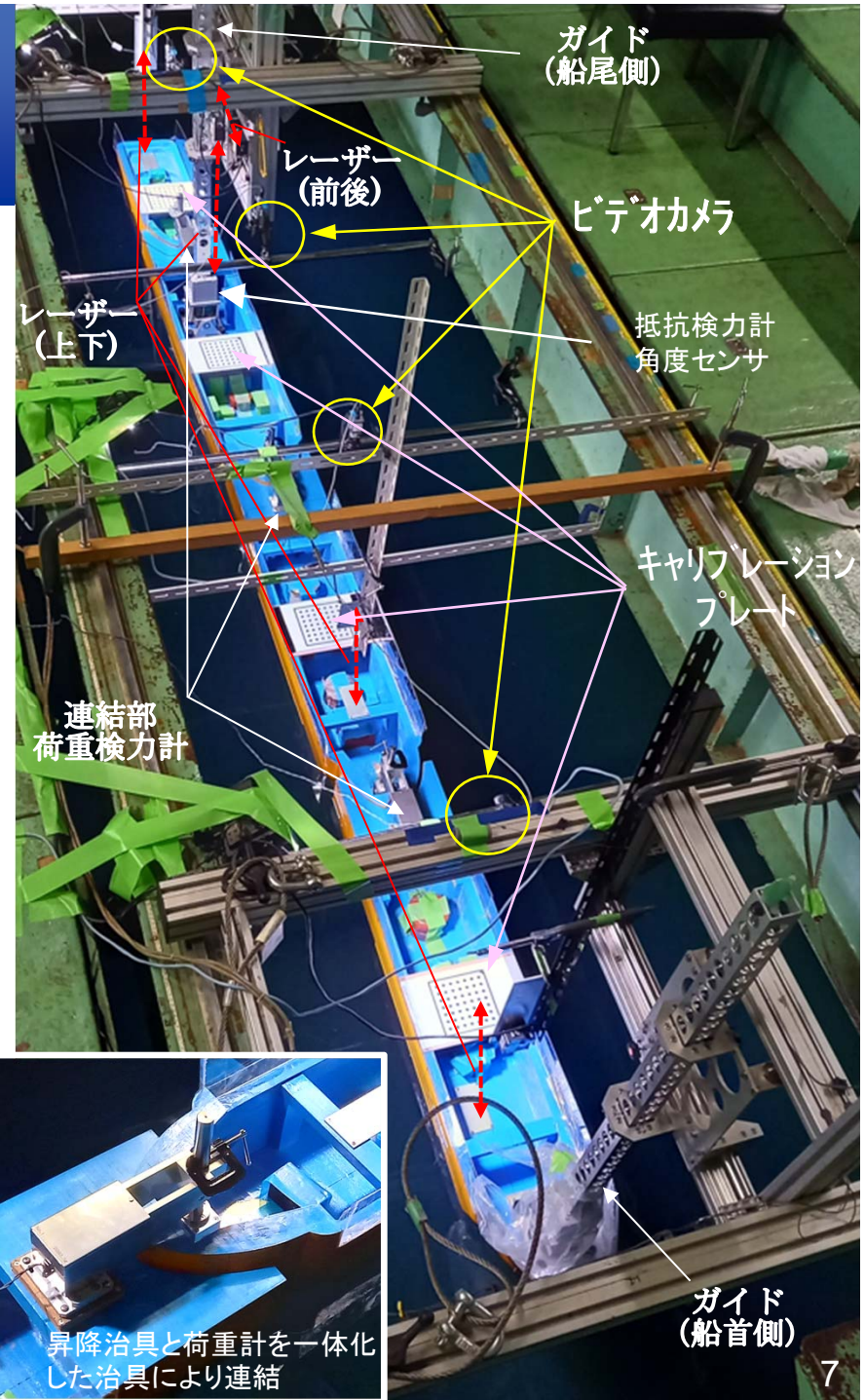
- 各船体の上下運動および最後尾のバージの前後運動を計測.
- 3連結の場合, 計5台のレーザー測距計を設置.

## ✓ 角度センサ

- 最後尾のバージの縦揺れ角を計測.

各レーザーの照射位置における上下運動の情報に基づき, 各船体の所定位置における上下揺れと縦揺れを推定可.

□ 2点支持・縦揺れ運動フリー





# 本研究の目的

## ◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験（抵抗試験）を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し、3次元外挿法により各抵抗成分（摩擦＋粘性圧力＋造波）を評価。
- ◆ 連結状態、載荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

## ◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動（前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ）及び連結部の荷重（前後方向および上下方向）を計測。
- ◆ 波長、波高、船速、載荷状態の影響を系統的に評価。

## ◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体、プロペラ、舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し、プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算（旋回運動・Zigzag運動）を通じて、操縦性能を評価。

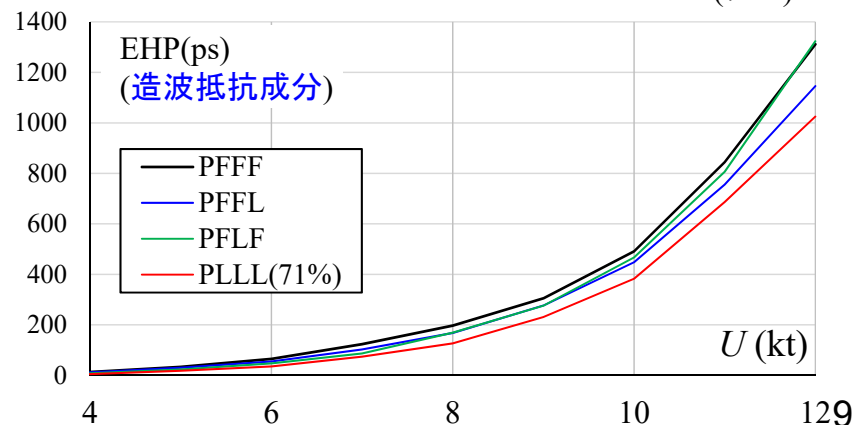
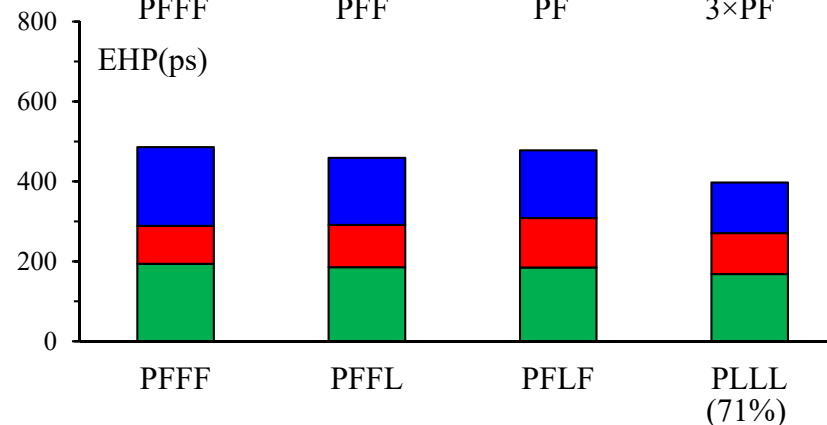
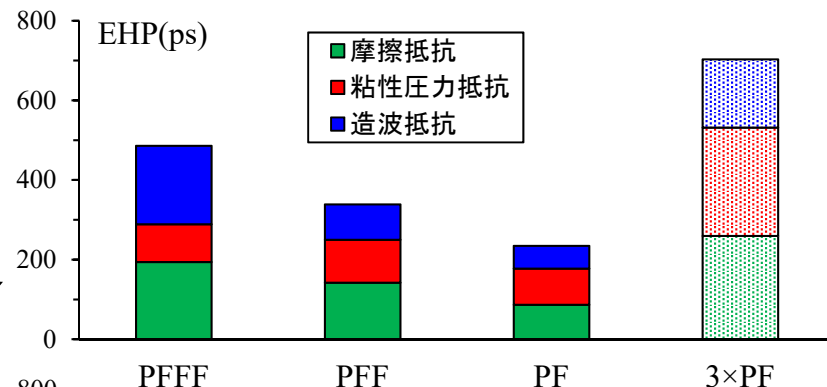
# 抵抗性能の評価(水槽試験結果)

## ◆ 実船の有効馬力を推定

- 長水槽で模型船を曳航し、全抵抗を計測。
- 3次元外挿法により、**摩擦抵抗**、**粘性圧力抵抗**、**造波抵抗**の各種抵抗成分を水底摩擦、圧力抵抗を実船レイノルズ数を考慮して換算し、実船の有効馬力を推定。

## ◆ バージの連結台数による比較

- バージの連台数数を増やす程、単位輸送量当たりの有効馬力は低減する。
- 多連結の場合は前方バージが流れ除けになる為、[PF]を3隻運航する場合と比較して、「PFFF」輸送では粘性圧力抵抗を低減できる。
- 水線長を用いたフルード数が十分に低くても、1台あたりのバージ長を用いたフルード数は大きく、バージ連結部(圧力変動部)での造波現象が無視できない。連結台数が多い程、造波抵抗の顕著な増加が見られる。



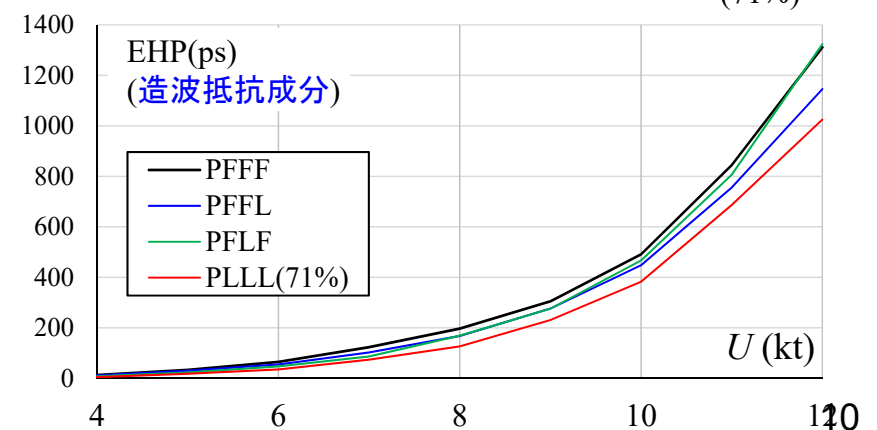
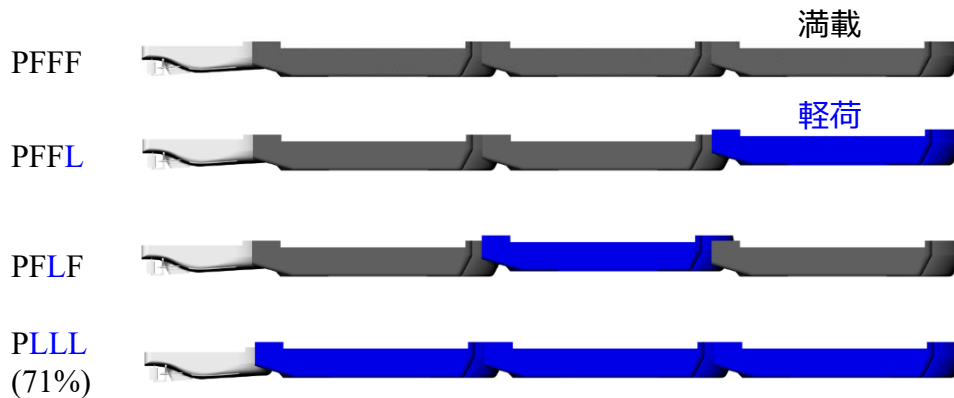
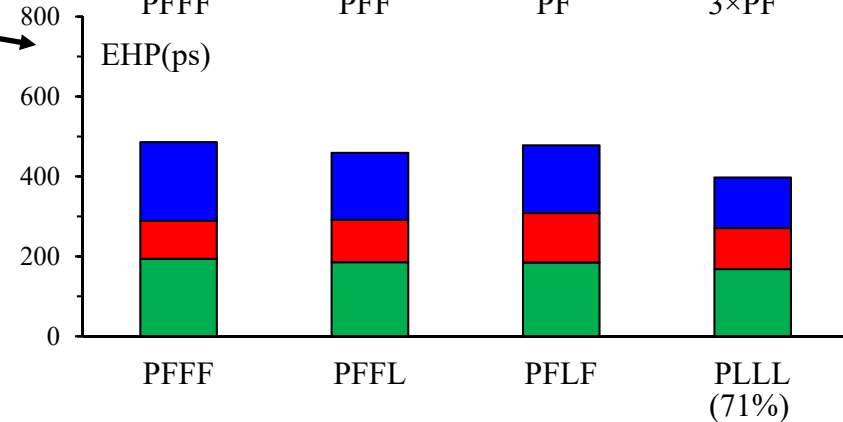
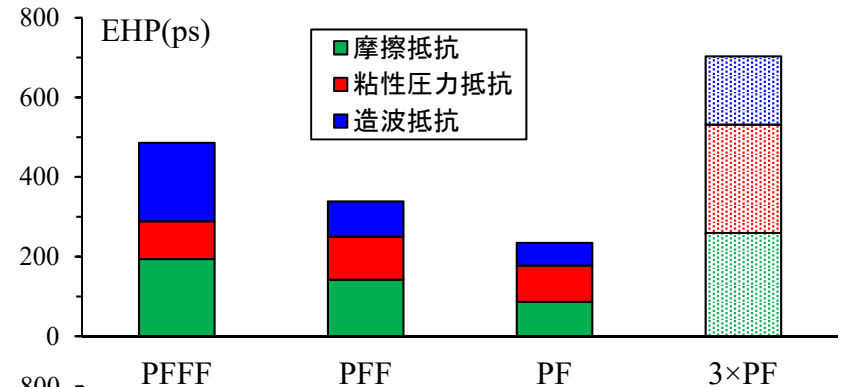
# 抵抗性能の評価(水槽試験結果)

## ◆ 実船の有効馬力を推定

- ・ 長水槽で模型船を曳航し、全抵抗を計測。
- ・ 3次元外挿法により、摩擦抵抗、粘性圧力抵抗、造波抵抗の各種抵抗成分を水底摩擦、圧力抵抗を実船レイノルズ数を考慮して換算し、実船の有効馬力を推定。

## ◆ バージの载荷状態による比較

- ・ 「PFFF」と「PLLL」の比較より、排水量が3割減っても有効馬力(抵抗)は然程減らない。Cyclic Operationにより満載バージを随時押せる配船とする事が有益と思われる。
- ・ 「PFLF」と「PFFL」を比較すると、後者の法が有効馬力(抵抗)が低い。バージ間の喫水が違う場合には、バージの並べ方も重要になり得る。
- ・ 造波抵抗は船速の4乗に比例する事から、造波抵抗が急増する船速域を避けた適切な船速設定が重要。



# 本研究の目的

## ◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験（抵抗試験）を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し、3次元外挿法により各抵抗成分（摩擦＋粘性圧力＋造波）を評価。
- ◆ 連結状態、載荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

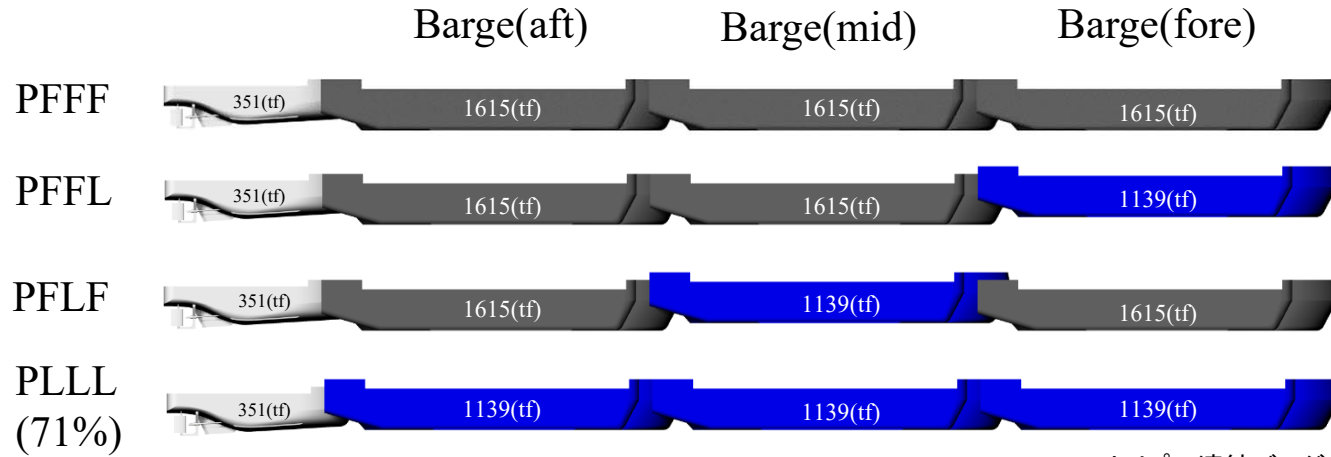
## ◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動（前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ）及び連結部の荷重（前後方向および上下方向）を計測。
- ◆ 波長、波高、船速、載荷状態の影響を系統的に評価。

## ◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体、プロペラ、舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し、プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算（旋回運動・Zigzag運動）を通じて、操縦性能を評価。

# 規則波(向波)中の直進試験



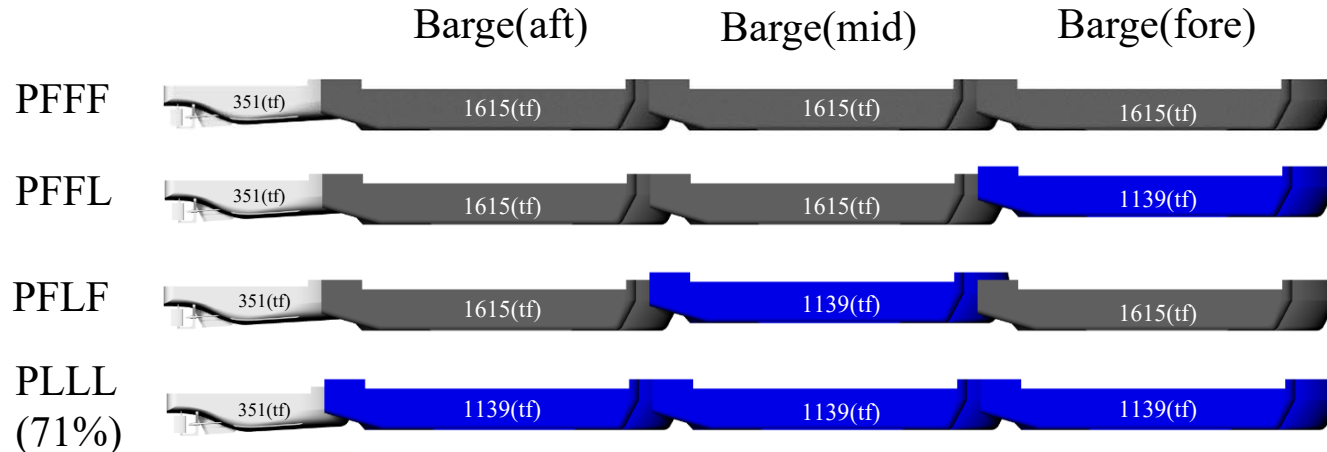
縦揺れの慣度半径 ( $/L_{pp}$ )

	Pusher	Barge		
		aft	mid	fore
PFFF	0.254	0.256	0.246	0.264
PFFL	0.254	0.251	0.246	0.312
PFLF	0.254	0.251	0.251	0.262
PLLL	0.254	0.355	0.251	0.312

トリプル連結バージの主な実験点(実船スケールへの換算値)

載荷状態	U (kt) 船速	H <sub>w</sub> (m) 波高	$\lambda / L_{pp}$ 波長船長比																
			0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2
			$\lambda$ (m) 波長																
			32.1	48.2	64.2	80.3	96.3	112.4	128.4	144.5	160.6	176.6	192.7	208.7	224.8	240.8	256.9	289.0	321.1
			T (s) 周期																
4.5	5.6	6.4	7.2	7.9	8.5	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	11.6	12.0	12.4	12.9	13.7	14.4			
PFFF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		1.45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	10	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.09		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
PFFL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
PFLF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
PLLL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	10	1.09			○	○	○	○	○		○		○	○	○	○	○		

# 規則波(向波)中の直進試験



縦揺れの慣度半径 ( $/L_{pp}$ )

	Pusher	Barge		
		aft	mid	fore
PFFF	0.254	0.256	0.246	0.264
PFFL	0.254	0.251	0.246	0.312
PFLF	0.254	0.251	0.251	0.262
PLLL	0.254	0.355	0.251	0.312

**有義波**

- ・波長: 19 m
- ・波高: 0.44 m

**遭遇し得る最大波**

- ・波長: 56 m
- ・波高: 2.5 m

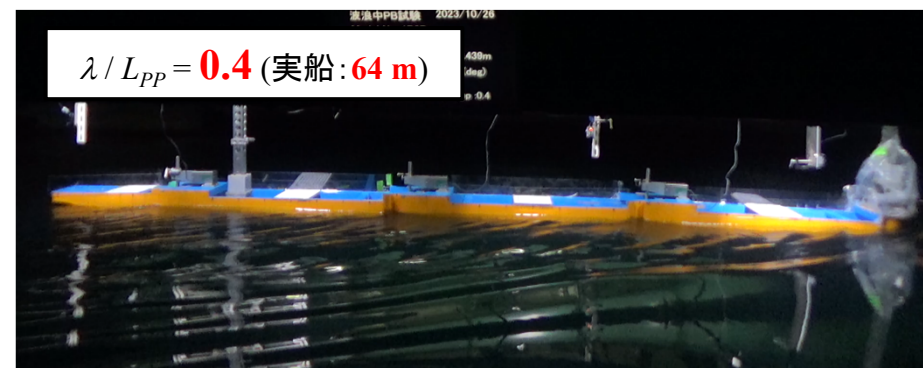
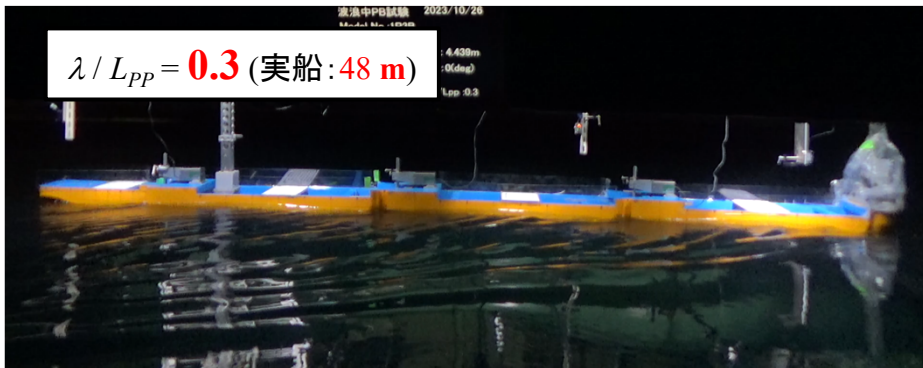
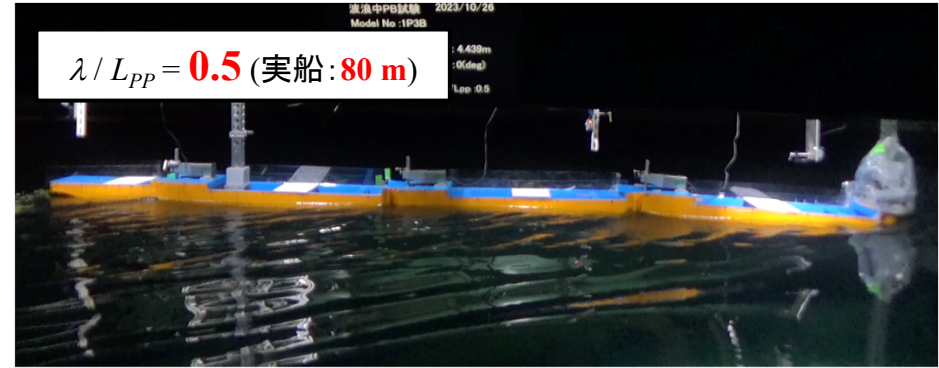
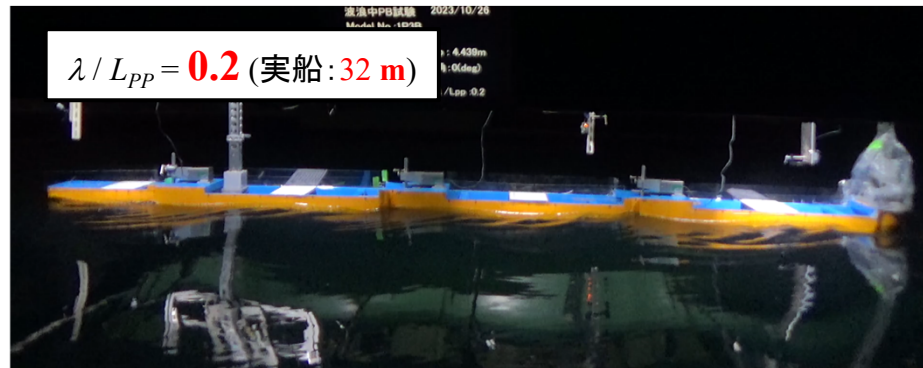
航行海域で主に遭遇する波条件

トリプル連結バージの主な実験点(実船スケールへの換算値)

		$\lambda / L_{pp}$ 波長船長比																	
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2	
		$\lambda$ (m) 波長																	
		32.1	48.2	64.2	80.3	96.3	112.4	128.4	144.5	160.6	176.6	192.7	208.7	224.8	240.8	256.9	289.0	321.1	
		T (s) 周期																	
		4.5	5.6	6.4	7.2	7.9	8.5	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	11.6	12.0	12.4	12.9	13.7	14.4	
PFFF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		1.45	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.09		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
PFFL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
PFLF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
PLLL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	10	1.09			○	○	○	○		○		○		○	○	○	○	○	

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)

# 船体運動に及ぼす波長影響

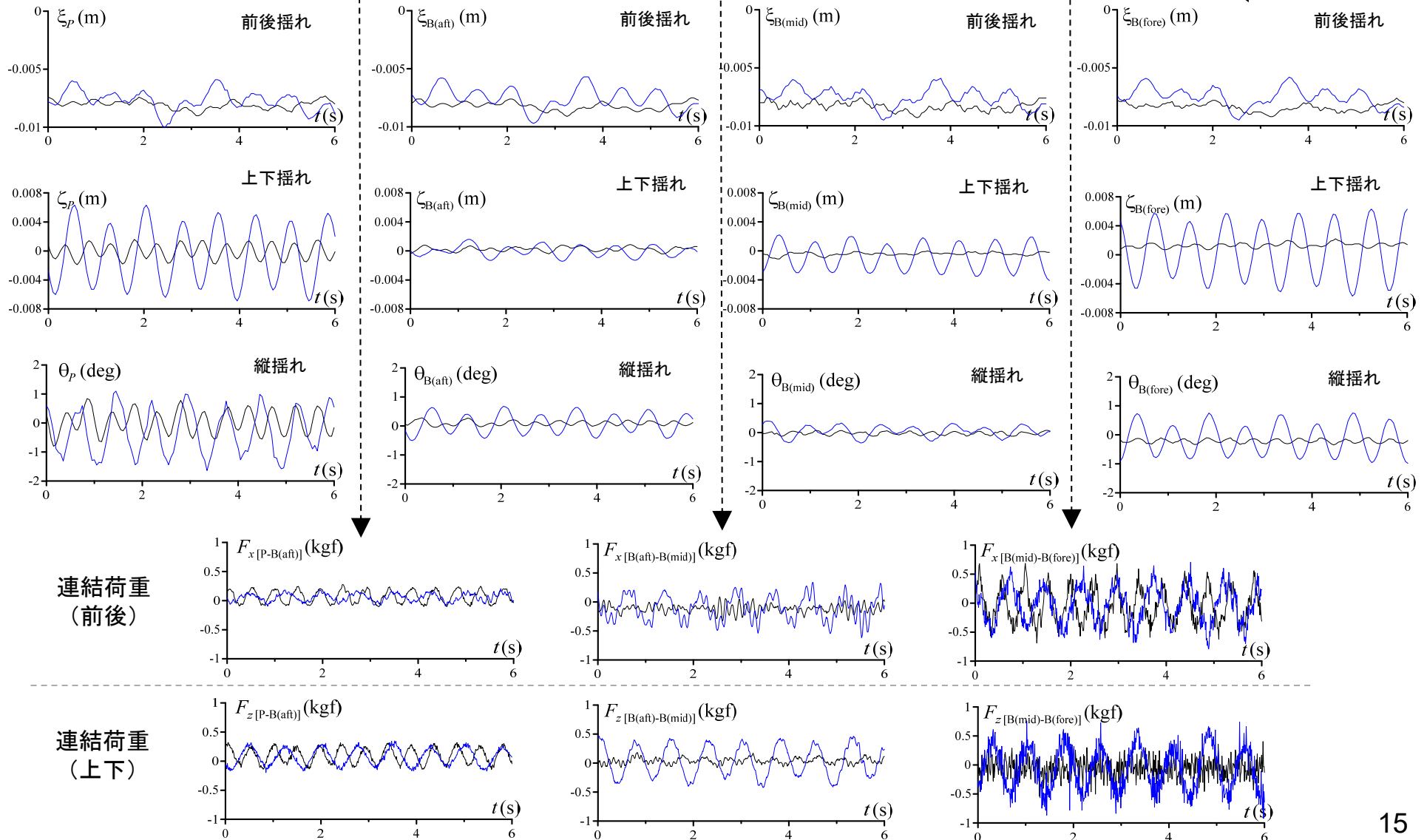


【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)

# 船体運動と連結部荷重の時系列



—  $\lambda/L_{pp} = 0.2$  ( $\lambda=32\text{m}$ )  
 —  $\lambda/L_{pp} = 0.4$  ( $\lambda=64\text{m}$ )



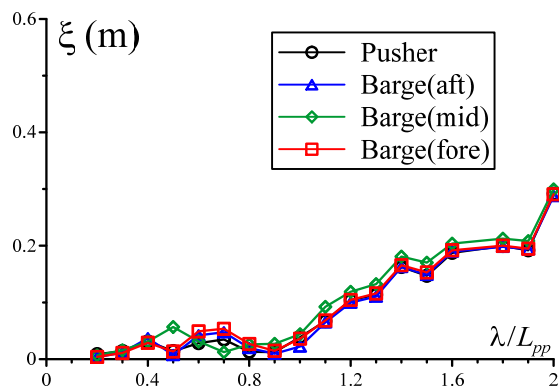


# 船体運動と連結部荷重の変動振幅 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

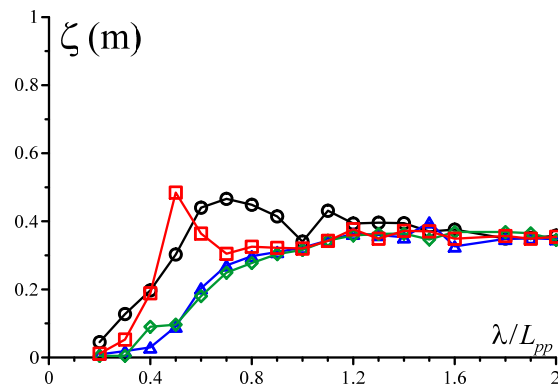
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)



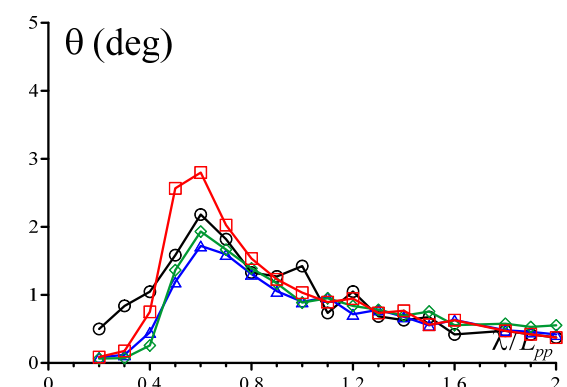
前後揺れ振幅



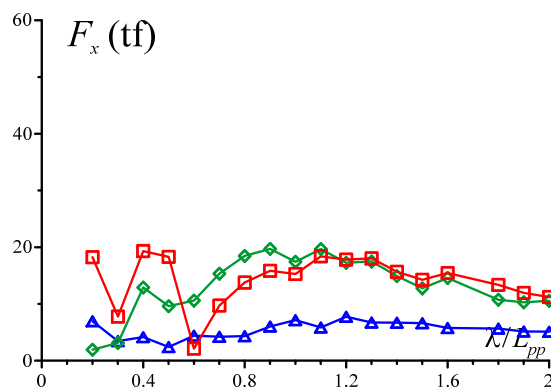
上下揺れ振幅



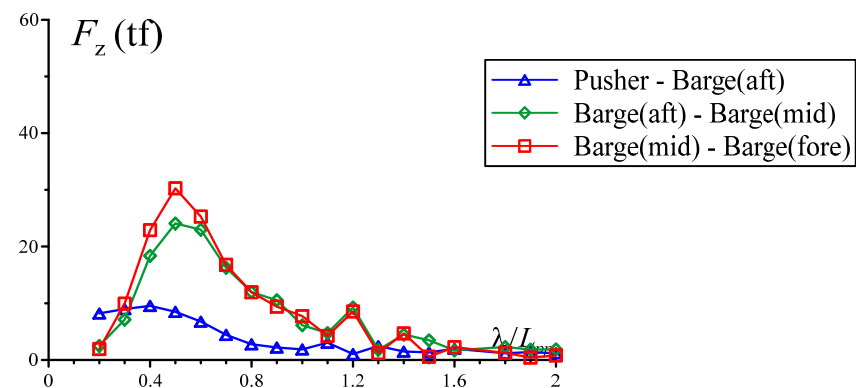
縦揺れ振幅



連結荷重(前後)の振幅



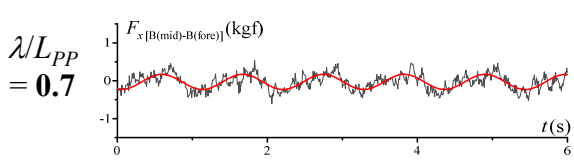
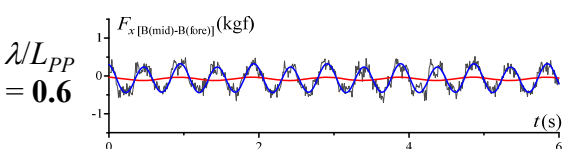
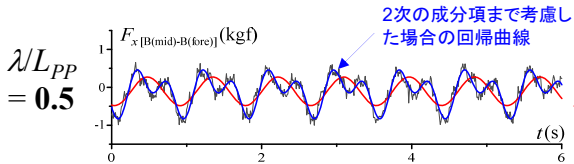
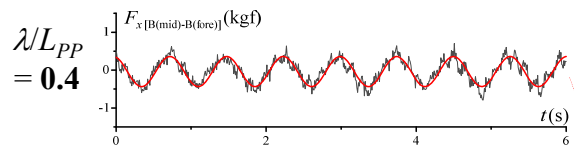
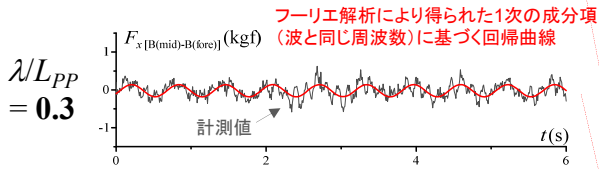
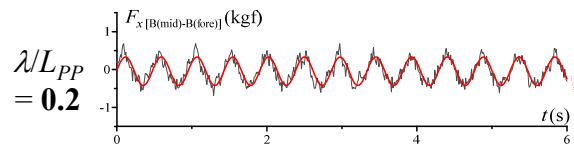
連結荷重(上下)の振幅



# 船体運動と連結部荷重の変動振幅

## 波長比で変動する1次成分, 実船換算

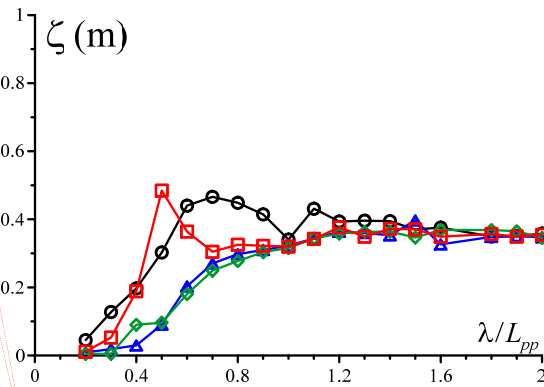
時刻歴結果(模型船スケール)



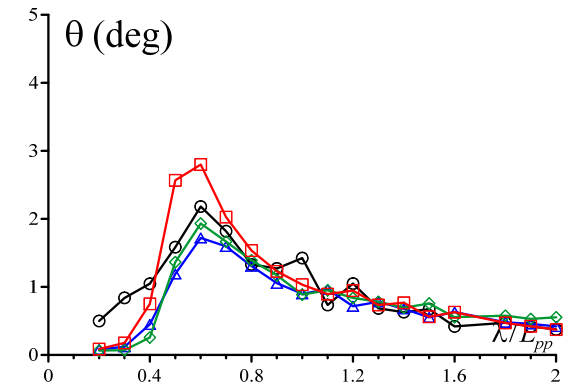
kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)



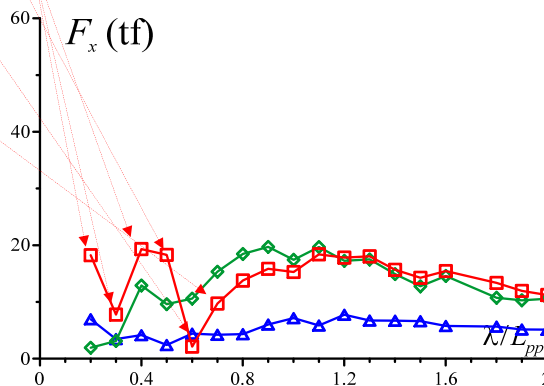
上下揺れ振幅



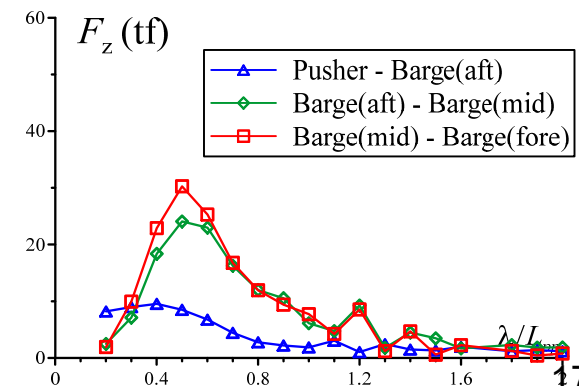
縦揺れ振幅



連結荷重(前後)の振幅



連結荷重(上下)の振幅



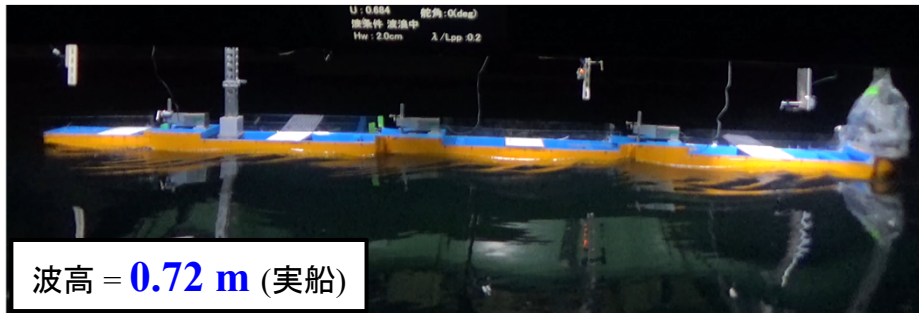
短波長域において, 先頭連結部における前後荷重の複雑な変動が観察された. 特に波長船長比0.5, 0.6では, 出会い波周波数より高次の変動成分が混入している事が分かる. 連結部を挟んだバージの船体運動の位相差(干渉)が一因とも思われる.

# 船体運動に及ぼす波高影響

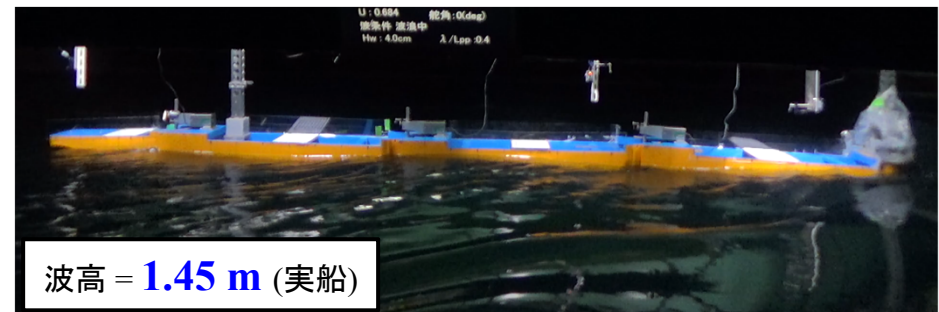
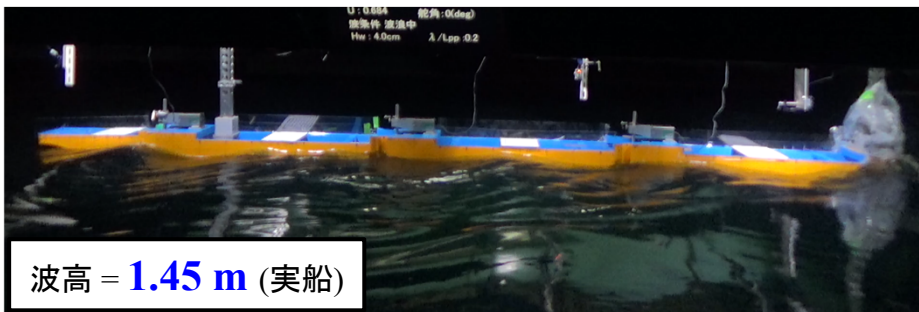
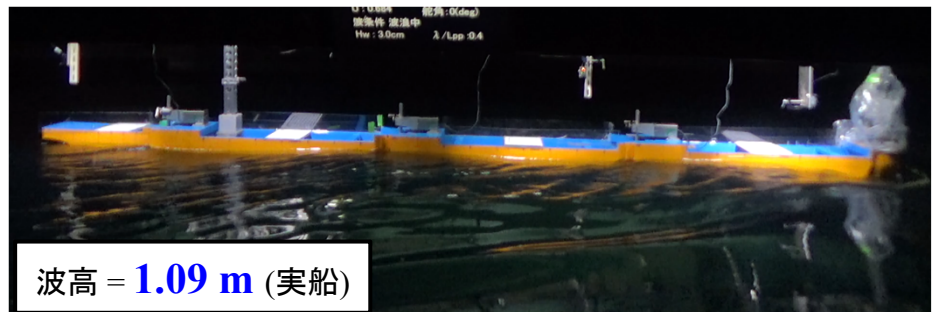
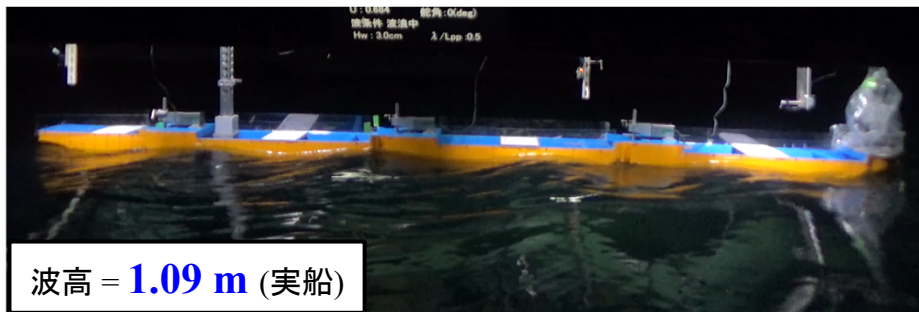
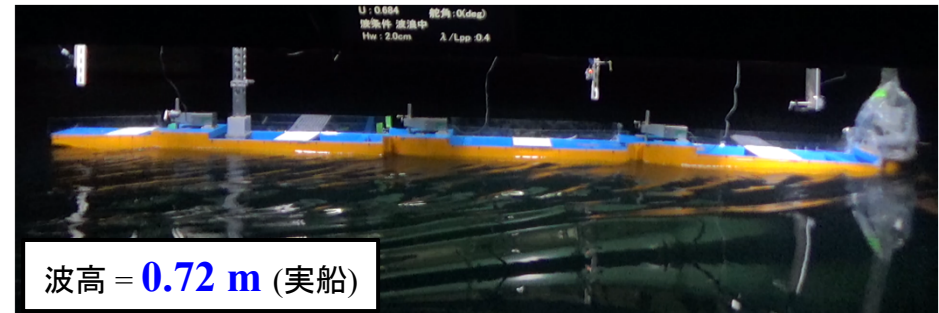
有義波  
波長: 19 m  
波高: 0.44 m

遭遇し得る最大波  
波長: 56 m  
波高: 2.5 m

$$\lambda / L_{PP} = 0.2 \text{ (波長: 32 m)}$$



$$\lambda / L_{PP} = 0.4 \text{ (波長: 64 m)}$$

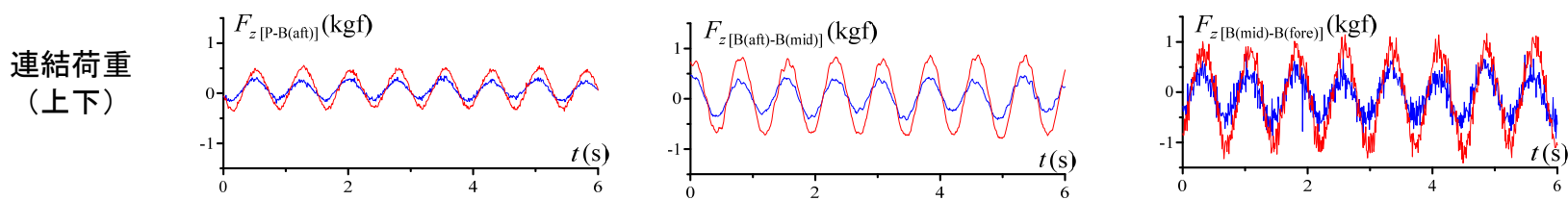
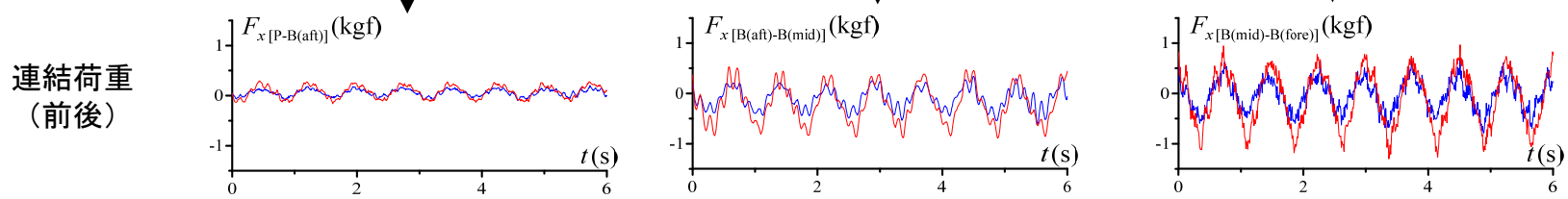
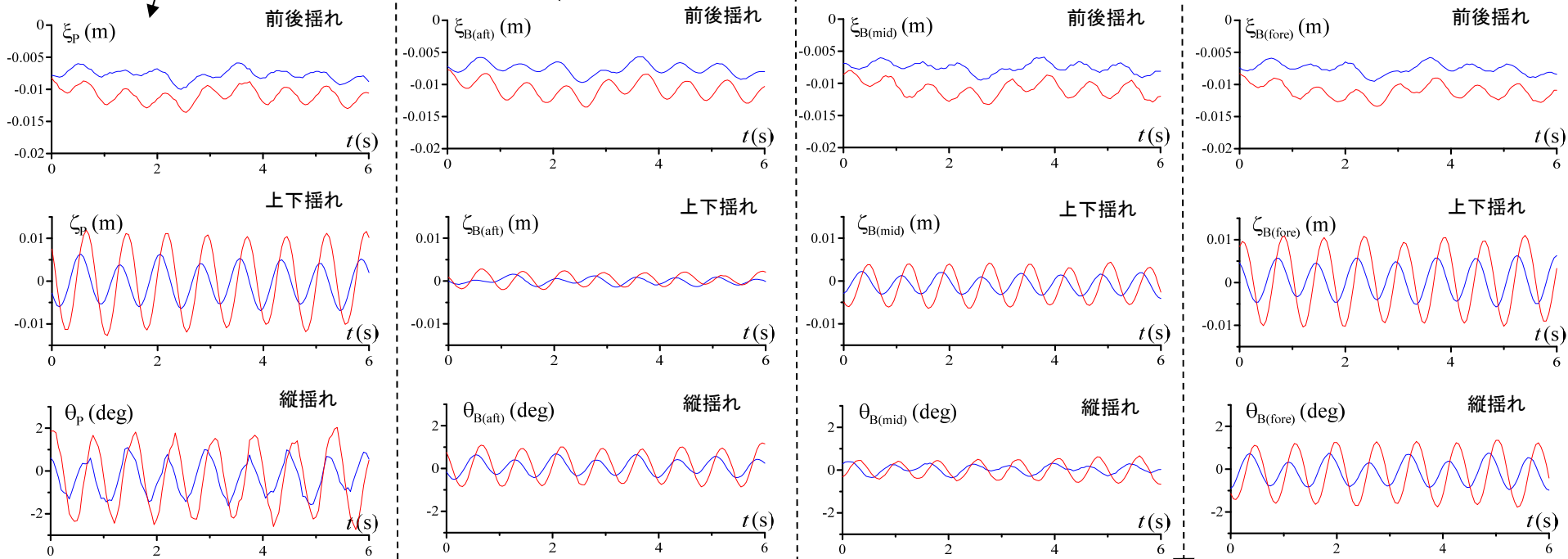


【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s),  $\lambda / L_{PP} = 0.4$  (波長:64 m)

# 船体運動と連結部荷重の時系列



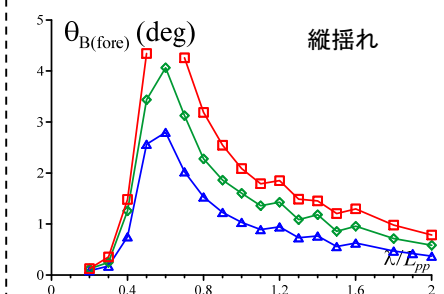
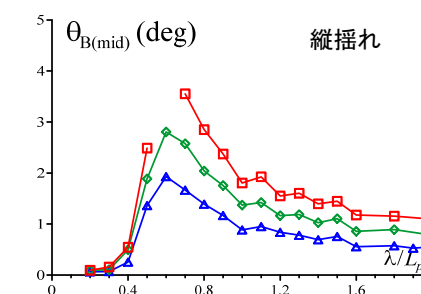
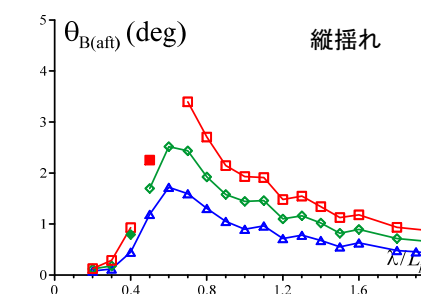
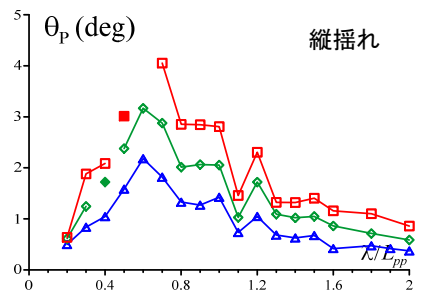
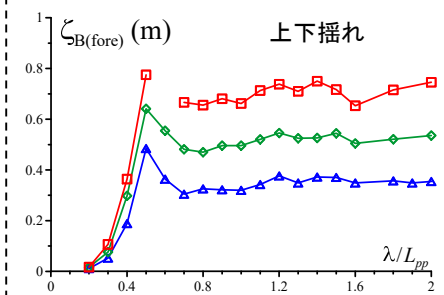
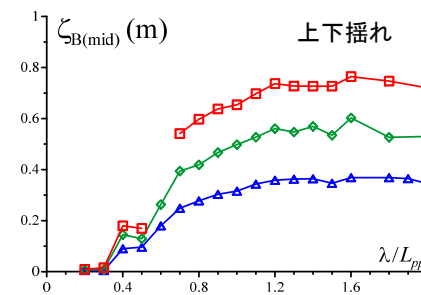
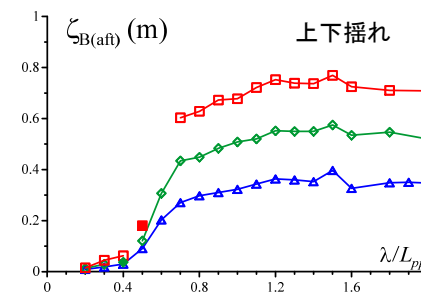
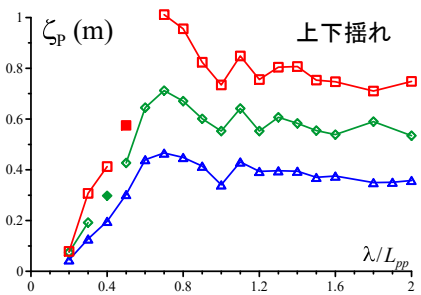
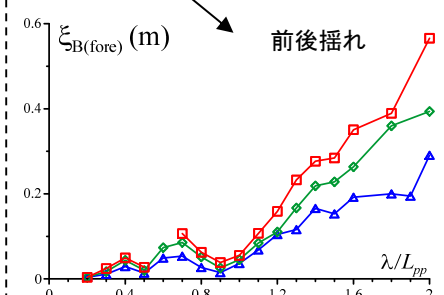
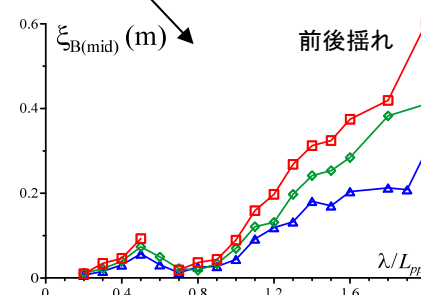
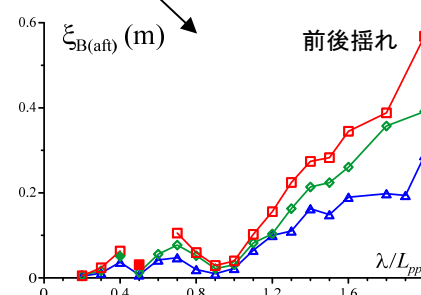
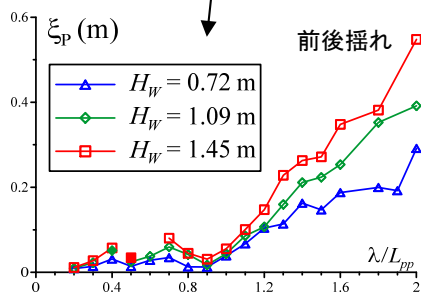
—  $H_w = 0.72$  m (model: 20 mm)  
 —  $H_w = 1.45$  m (model: 40mm)



# 船体運動の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

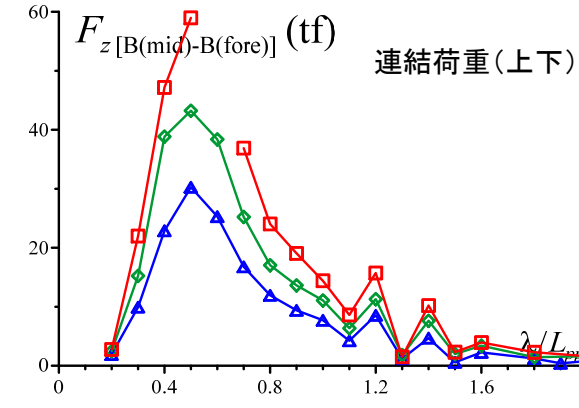
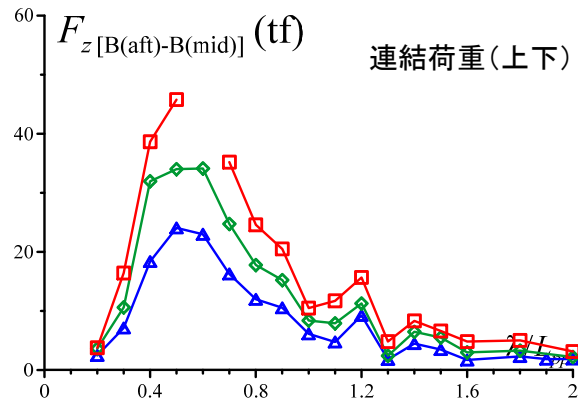
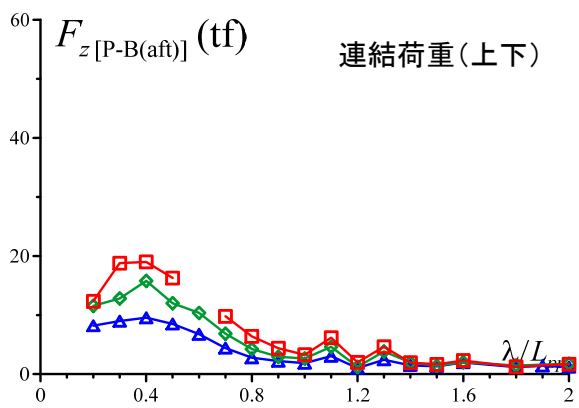
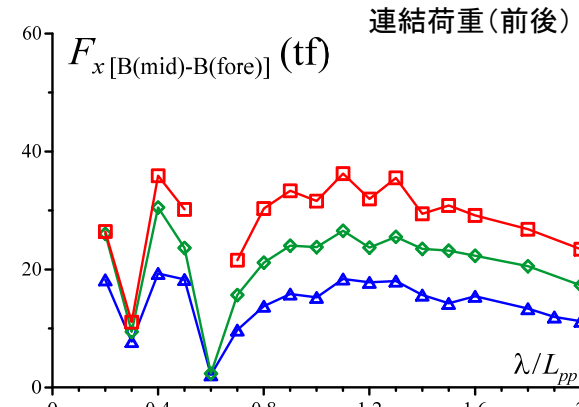
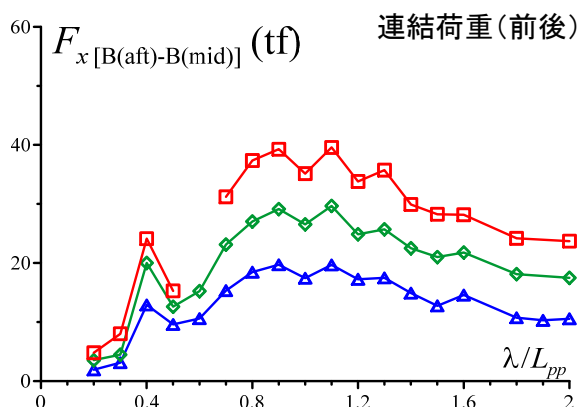
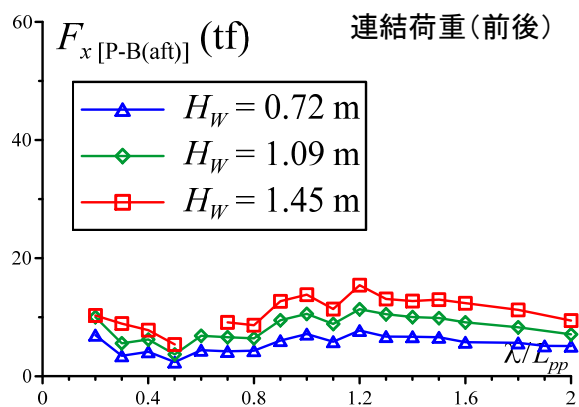
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)

※画像解析システムの計測不具合があった試験点は、レーザー測距計に基づく解析結果をプロット(色塗りシンボル)。



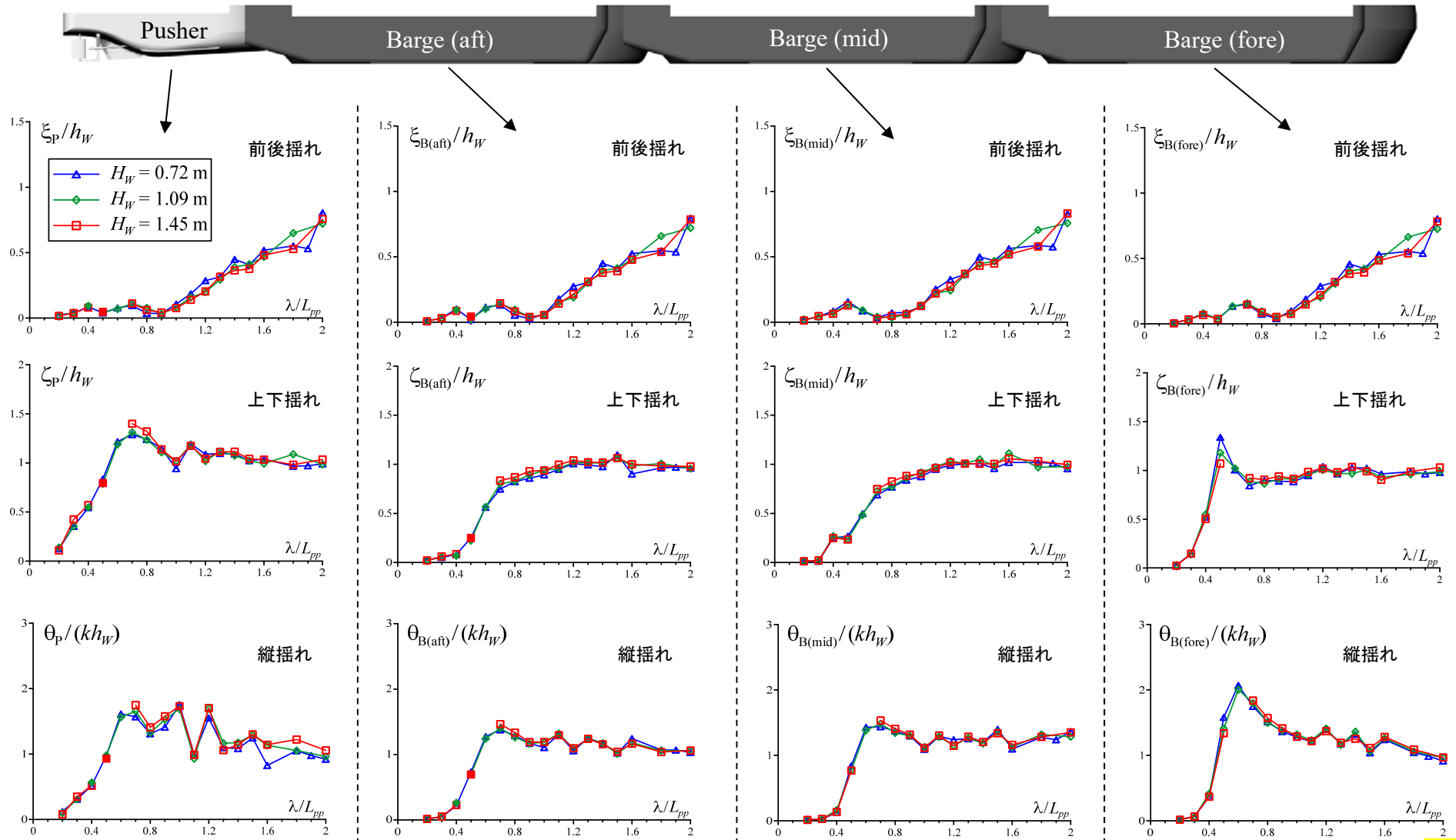
# 連結部荷重の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



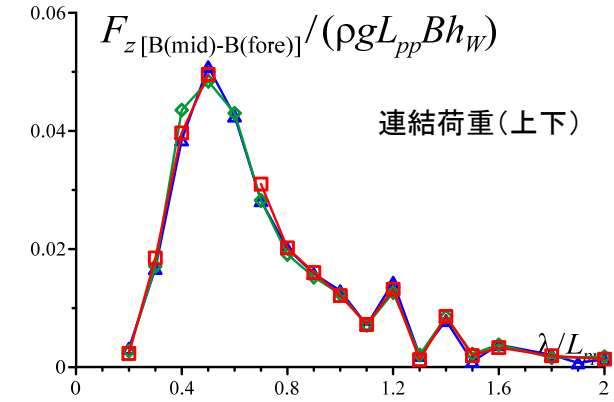
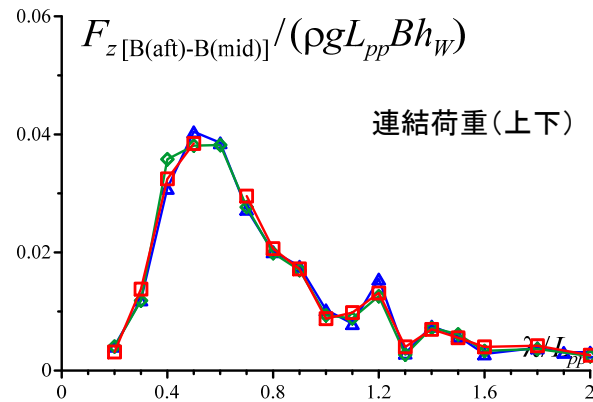
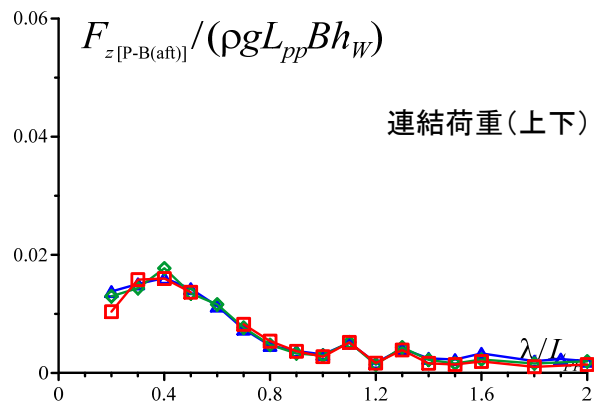
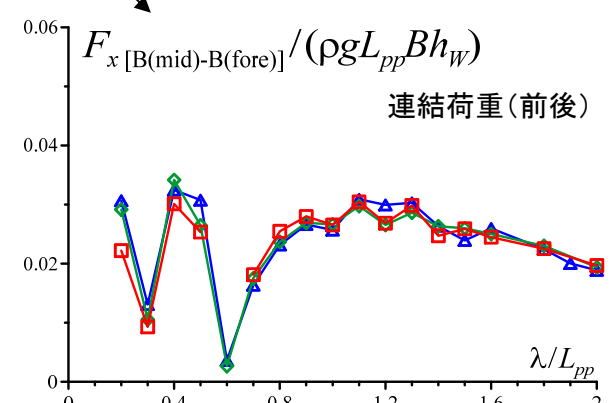
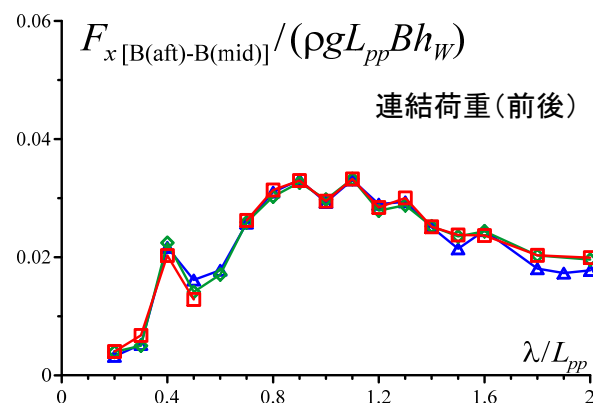
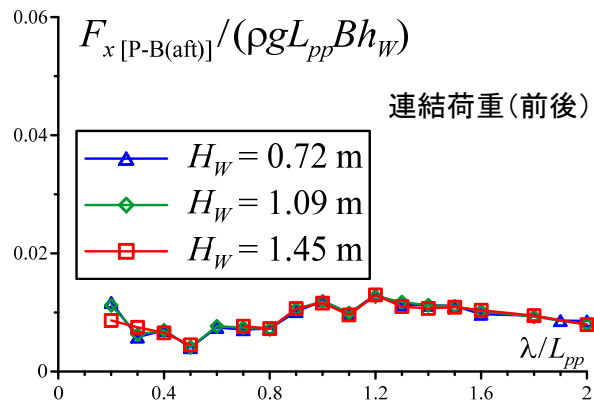
# 船体運動の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 無次元値)

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



# 連結部荷重の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 無次元値)

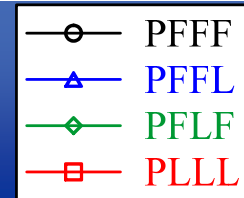
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



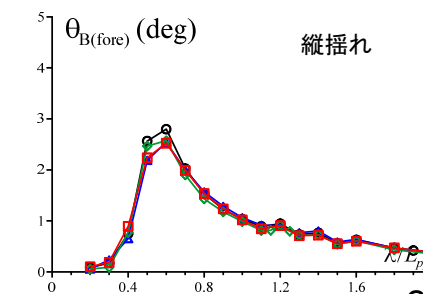
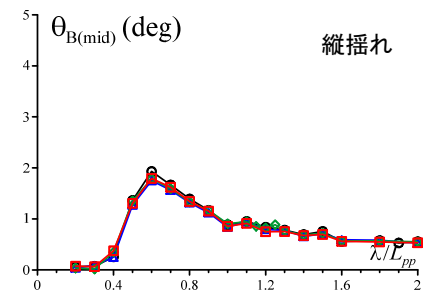
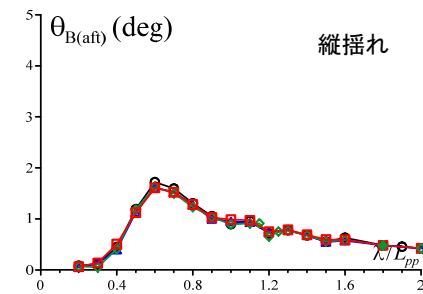
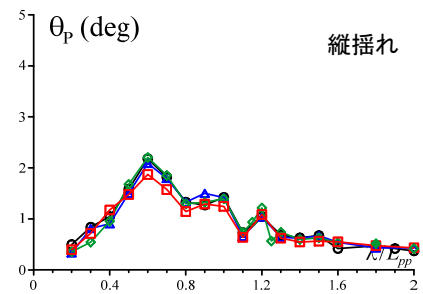
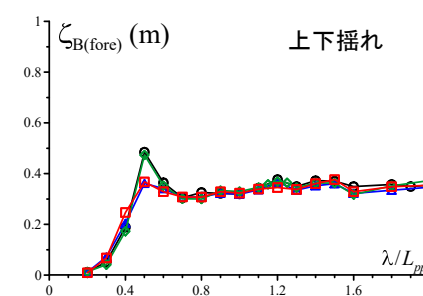
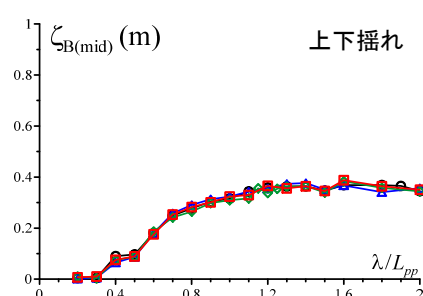
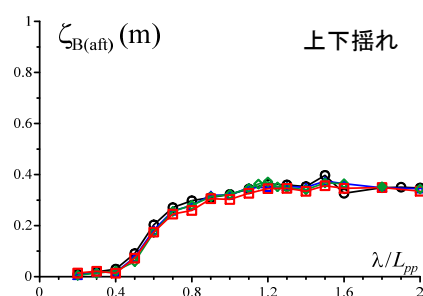
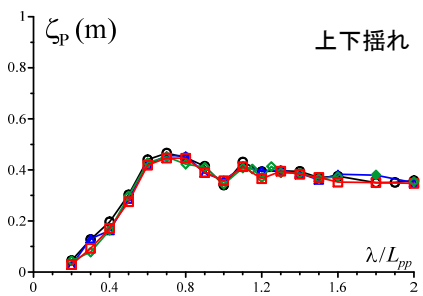
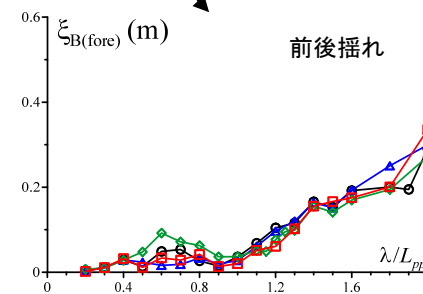
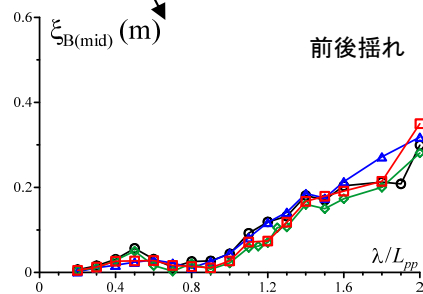
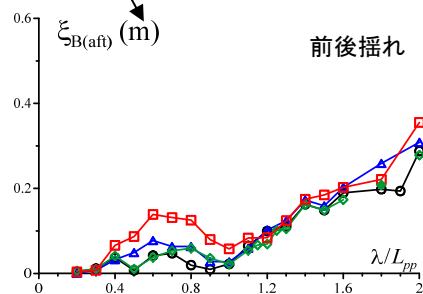
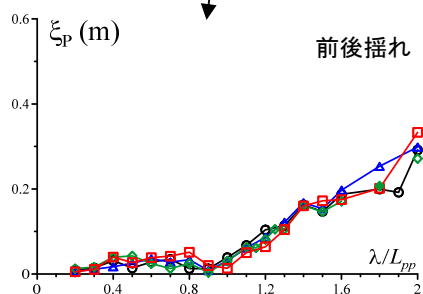
◆ プッシャーと各バージの船体運動ならびに各連結部荷重の1次の変動振幅の無次元値は、波高によらず一致しており、それらは波高(波振幅)に比例する事がうかがえる。異なる波高における連結部荷重を推定する上で有用な知見と思われる。



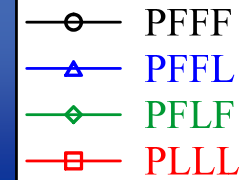
# 船体運動の振幅に及ぼす载荷状態の影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)



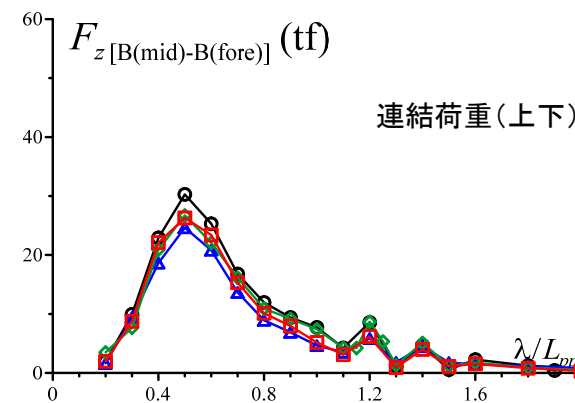
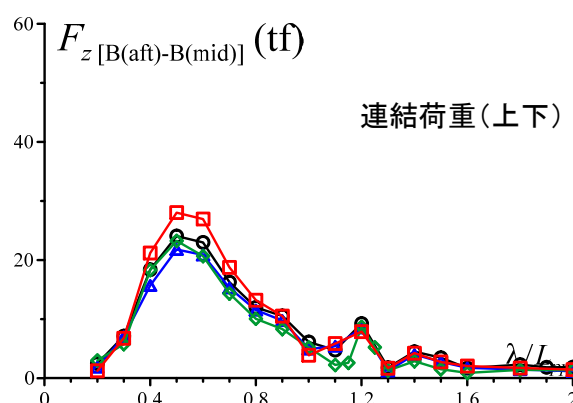
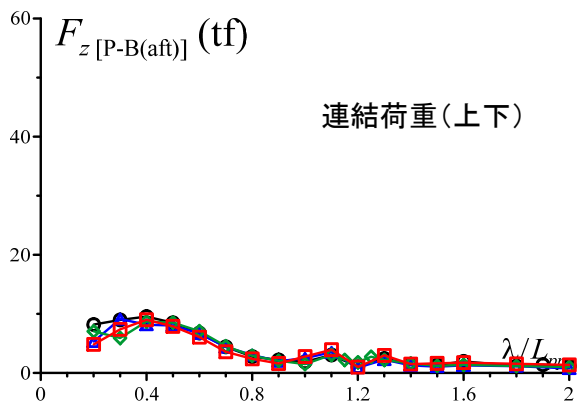
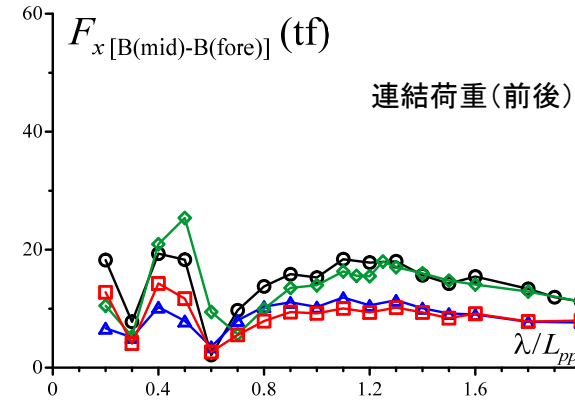
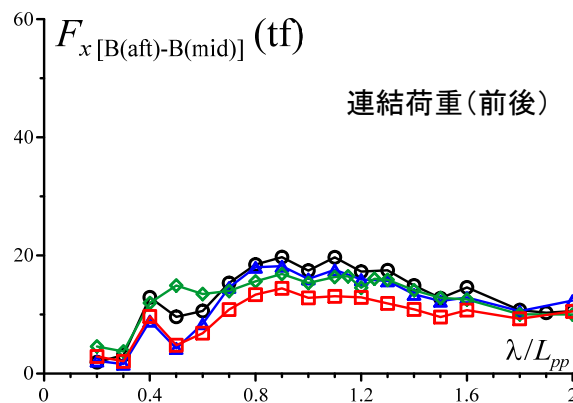
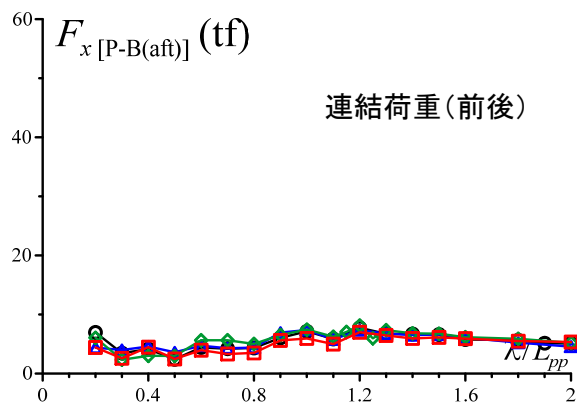
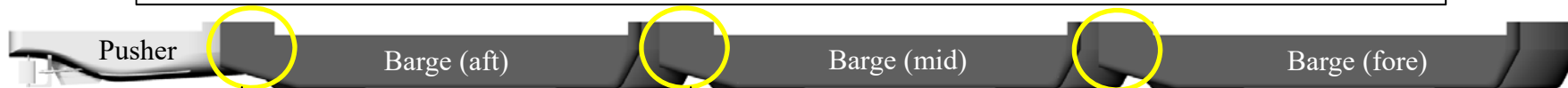
【PFFF】 vs 【PFFL】 vs 【PFLF】 vs 【PLLL】 船速: 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高: 0.72 m (模型:20 mm)



# 連結部荷重の振幅に及ぼす载荷状態の影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)



【PFFF】 vs 【PFFL】 vs 【PFLF】 vs 【PLLL】 船速: 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高: 0.72 m (模型:20 mm)



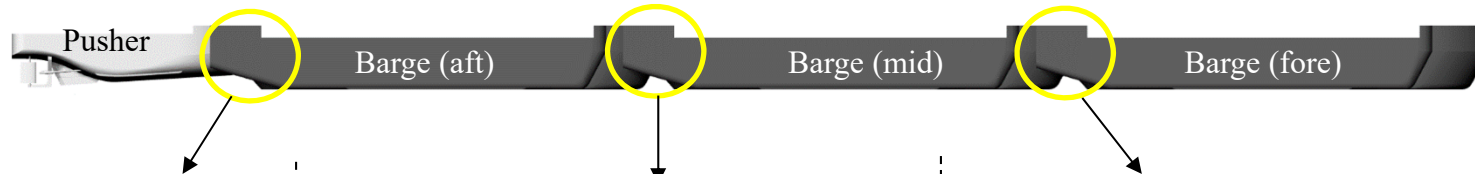
◆ 载荷状態の影響は、前後揺れ、延いては前後方向の連結荷重に強く現れる結果となった。前方に配置されるバージの载荷状態に応じた伴流域の形成により、後方に配置されるバージの流入速度が影響を受ける事も一因に考えられる。

# 8ktで直進する時の連結部における最大荷重の概算

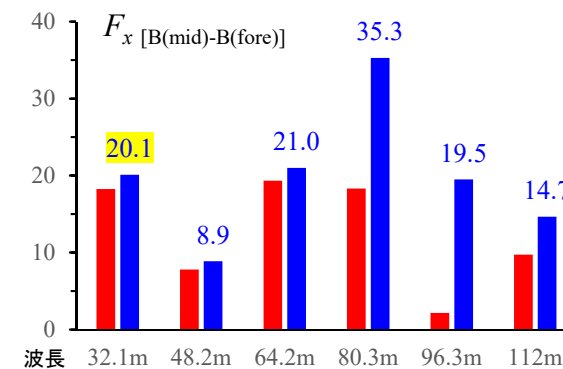
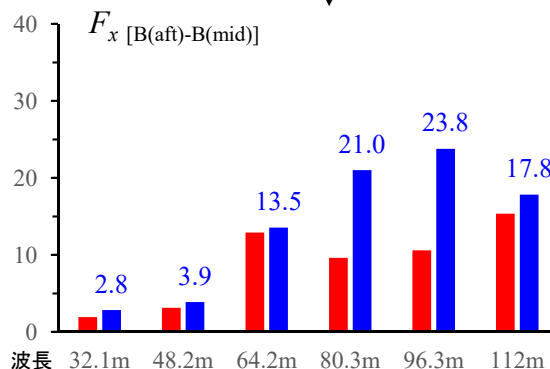
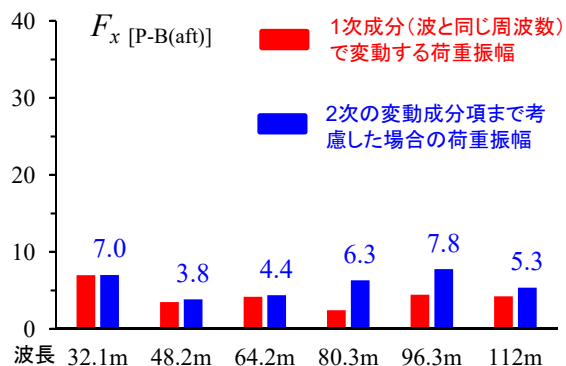
有義波  
波長: 19 m  
波高: 0.44 m

遭遇し得る最大波  
波長: 56 m  
波高: 2.5 m

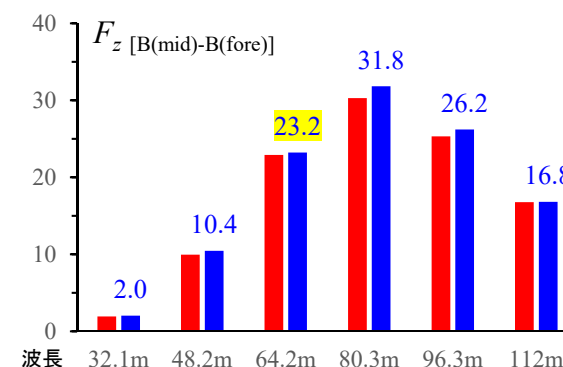
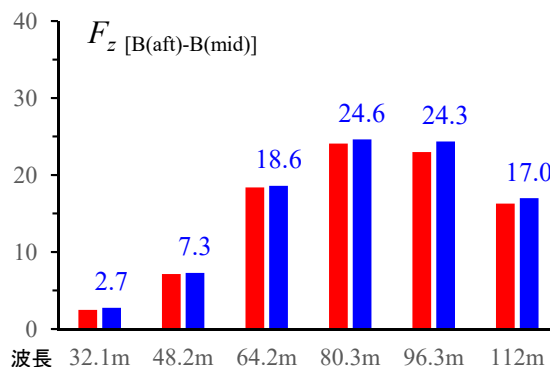
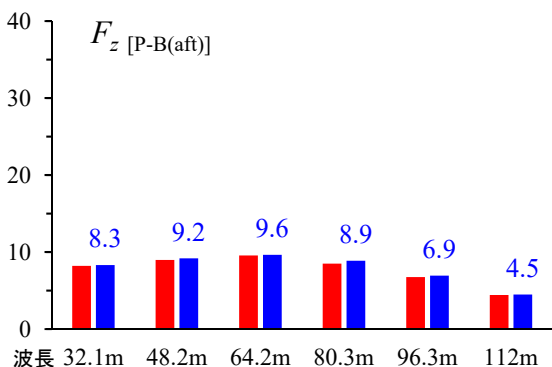
【PFFF】  
船速: 8 kt  
波高: 0.72 m



連結荷重(前後)の振幅



連結荷重(上下)の振幅



◆ 有義波(波長19m, 波高0.44m)中で動揺する時の連結部荷重を, 最も波長が短い実験データ(波長32.1 m, 2次の変動成分まで考慮した荷重振幅)の結果に波高倍率(0.61倍)を掛けて概算すると, 先頭連結部で前後方向に最大『12 tf』程度の振幅で荷重が振動する。(上下荷重振幅は『1 tf』程)

◆ 遭遇し得る最大波(波長56m, 波高2.5m)中で動揺する時の連結部荷重を, 実験データ(波長64.2 m, 2次の変動成分まで考慮した荷重振幅)の結果に波高倍率(3.47倍)を掛けて概算すると, 先頭連結部で上下方向に最大『81 tf』程度の振幅で荷重が振動する。(前後荷重振幅は『73 tf』程)

# 本研究の目的

## ◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験（抵抗試験）を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し、3次元外挿法により各抵抗成分（摩擦＋粘性圧力＋造波）を評価。
- ◆ 連結状態、載荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

## ◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動（前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ）及び連結部の荷重（前後方向および上下方向）を計測。
- ◆ 波長、波高、船速、載荷状態の影響を系統的に評価。

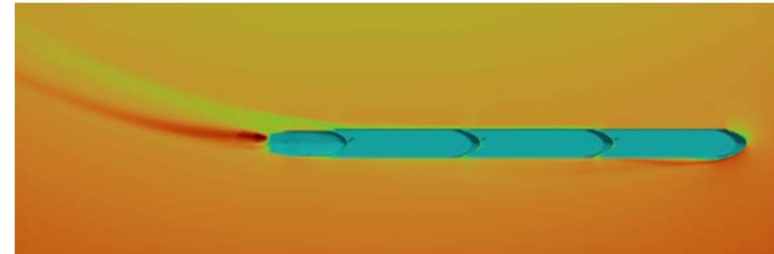
## ◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体、プロペラ、舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し、プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算（旋回運動・Zigzag運動）を通じて、操縦性能を評価。

# PB輸送船の操縦性能の推定方法 (1)

## ① CFD(数値流体力学)計算により, 自航 / 運動状態の定常流体力を推定

- フリーソースCFDツール『OpenFOAM』を活用
- 定常乱流解析 / 单相流(自由表面影響は考慮せず)
- 乱流モデル:  $k-\omega$ SST (Menter et al. 2003)



### ◆ CFD計算の概要

- 実験と同じ模型船スケールで実施
- 船体, 舵の実形状を考慮. プロペラは, 単独特性試験の推力曲線に基づく推力とトルクを体積力として, 直径相当の円盤領域に与える方法で考慮.
- 船速は 実船8 kt 相当の0.684 m/s
- 回転数は模型自航点 (実験の造波抵抗を外部入力して, 計算時の自航回転数を同定)
- 3連結PB輸送船は5つの载荷状態を計算: PFFF, PFFL, PFLF, PLLL(71%), PLLL(42%)
- バージの連結台数を変更したケースも計算: PFF(2台連結), PF(1台連結)
- 4種類の拘束模型試験:
  - 自航試験 (自航要素の推定)
  - 舵角試験 (直進時, 舵に流入するプロペラ後流速の推定)
  - 整流試験 (操縦運動時, 舵に流入する流れの角度の推定)
  - 斜航・旋回試験 (操縦運動時の船体流体力の推定)

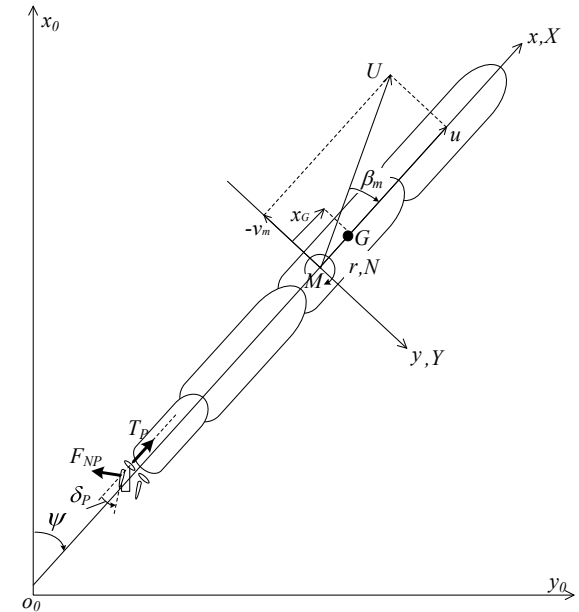
# PB輸送船の操縦性能の推定方法 (2)

## ② PBの航走状態毎に操縦運動を表す力学モデルを構築・シミュレーション

- 船舶の操縦運動数学モデル『MMGモデル』に則り定式化
- モデル内の各種係数は、CFDの流体力データに基づき同定  
(粘性影響を受ける摩擦抵抗と伴流係数は実船換算)
- 35° 舵角試験, 10° Z試験, 20° Z試験をシミュレーション.

### ◆ 3自由度 (前後, 左右, 回頭) の運動方程式 (モデル)

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v_m r - x_G m r^2 = X \\ (m + m_y)\dot{v}_m + (m + m_x)ur + x_G m \dot{r} = Y = Y_H + Y_R \\ (I_{zG} + x_G^2 m + J_z)\dot{r} + x_G m(\dot{v}_m + ur) = N_m \end{cases}$$



船体流体力:  $Y_H = 1/2 \rho L_{PP} d U^2 \{ Y'_v v_m' + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{vvv} v_m'^3 + Y'_{rrr} r'^3 + Y'_{vvr} v_m'^2 r' + Y'_{vrr} v_m' r'^2 \}$

舵力:  $Y_R = -(1 + a_H)(F_{NP} + F_{NS}) \cos \alpha_R$

舵直圧力:  $F_{Ni} = \frac{1}{2} \rho A_R (u_{Ri}^2 + v_{Ri}^2) f_\alpha \sin \left( \delta - \frac{v_{Ri}}{u_{Ri}} \right)$

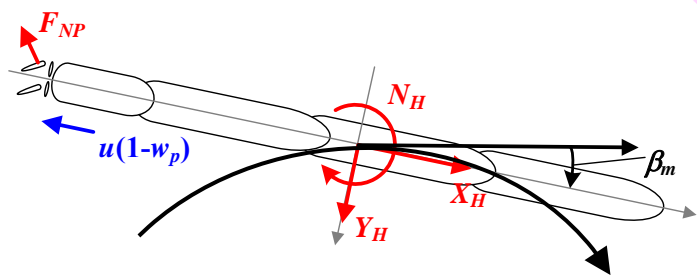
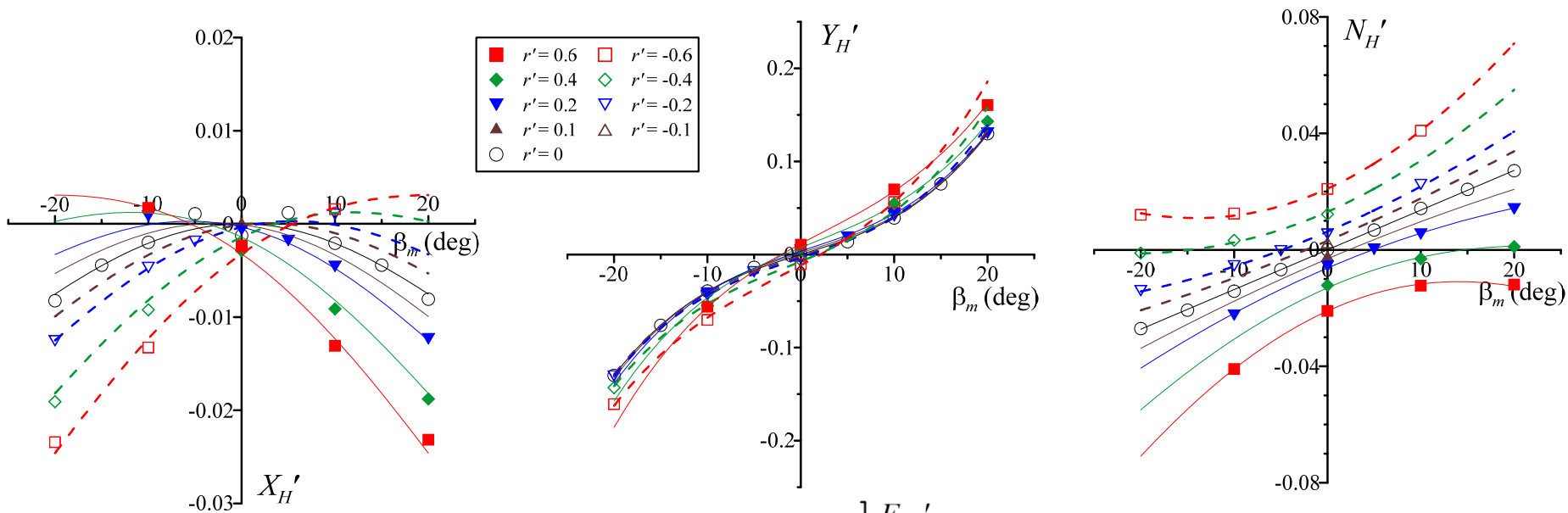
舵流入速 (前後):  $u_{Ri} = \varepsilon u (1 - w_{Pi}) \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left( \sqrt{1 + \frac{8K_{Ti}}{\pi J_i^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)}$

(左右):  $v_{Ri} = v_{R0i} - U Y_{Ri} (v_{mi} + l_{Ri} r)$  ( $i=P$ : port,  $i=S$ : starboard)

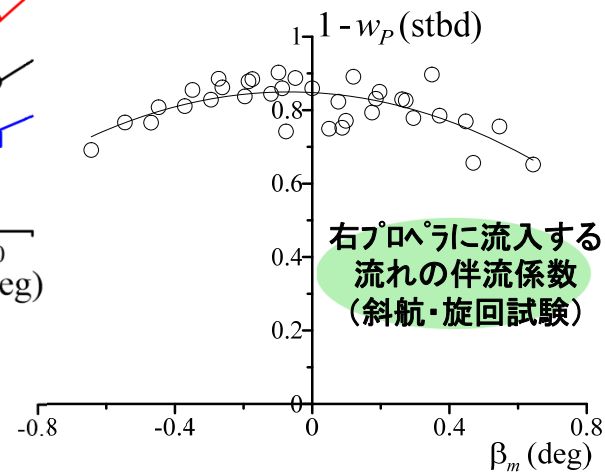
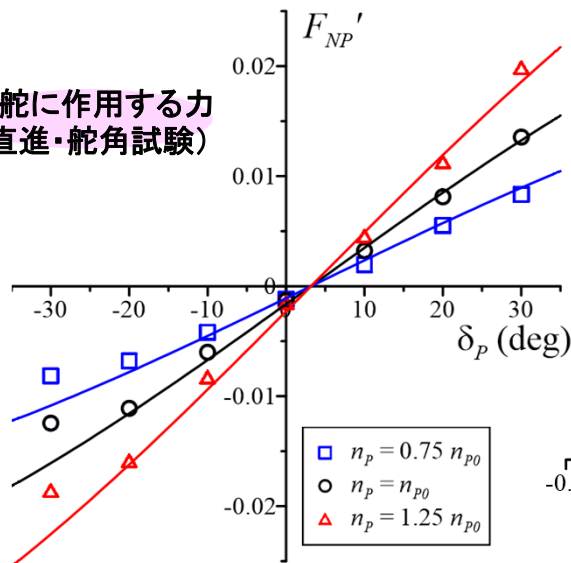
赤字が力学モデル内に現れる実験係数であり、水槽試験やCFD計算の流体力データから同定する必要がある。

# PFFFの流体力の計算結果(一例)

主船体に作用する力(斜航・旋回試験)



左舵に作用する力(直進・舵角試験)



# 操縦運動数学モデルの実験係数の同定

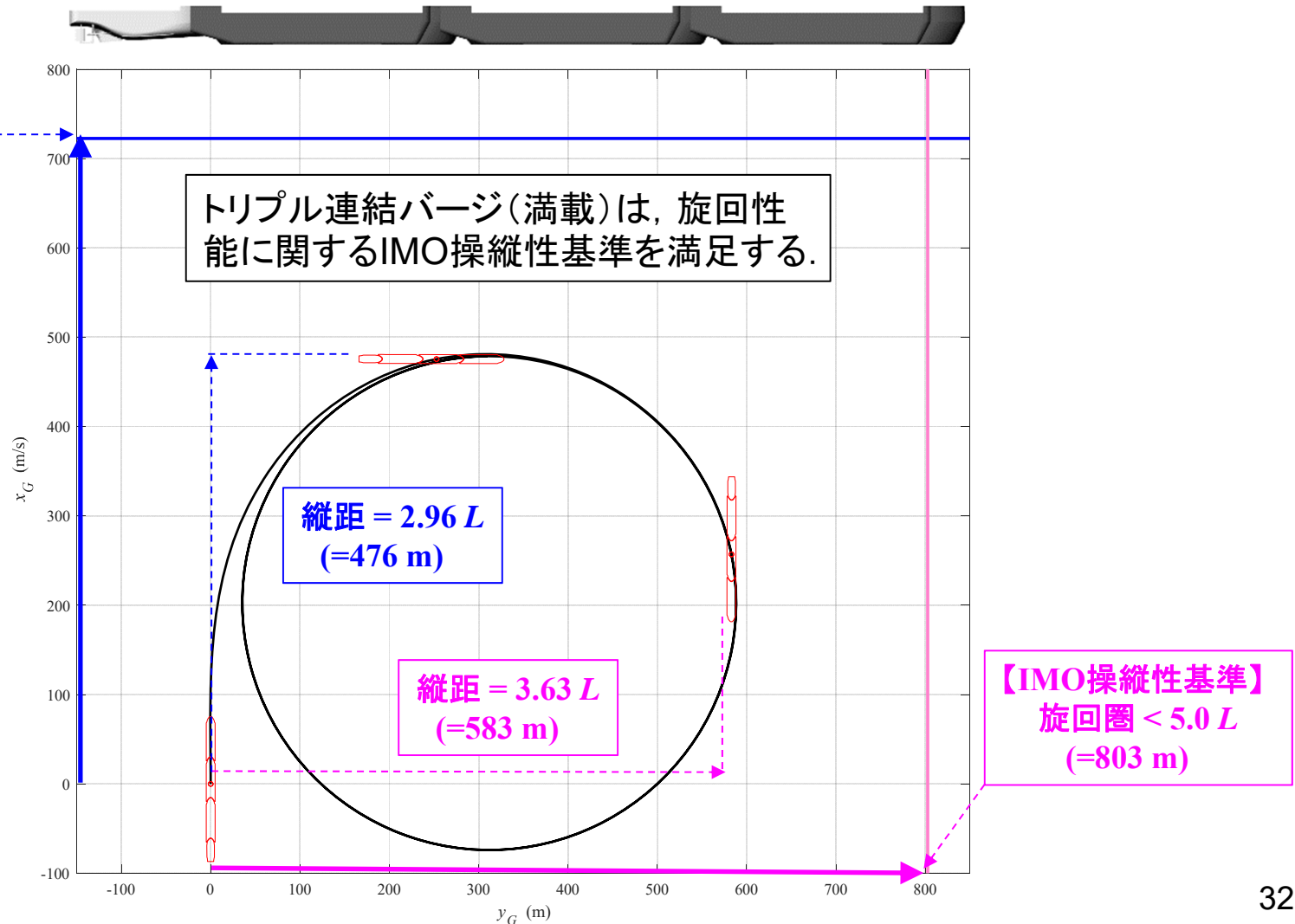
	PF	PFF	PFFF	PFFL	PFLF	PLLL(71%)	PLLL(42%)
$(C_0, C_1, C_2)$	(0.256, -0.296, -0.138)						
$K$	1.050	0.760	0.490	0.570	0.670	0.610	1.088
$t_P$	0.137	0.101	0.122	0.128	0.122	0.125	0.131
$w_{P0}$	0.268	0.263	0.151	0.181	0.174	0.168	0.163
$C_{wake0}$	0.731	0.725	0.839	0.809	0.815	0.816	0.833
$C_{wake1}$	0.068	0.159	0.141	0.138	0.145	0.221	0.142
$C_{wake2}$	-0.666	-0.518	-0.397	-0.380	-0.424	-0.628	-0.817
$\beta_{P0}$	-0.023	-0.119	-0.101	-0.098	-0.103	-0.110	-0.033
$t_R$	0.031	0.101	0.019	-0.055	-0.082	-0.012	-0.057
$a_H$	0.105	0.085	0.073	0.069	0.067	0.091	0.096
$x'_H$	-0.338	-0.380	-0.402	-0.402	-0.400	-0.409	-0.443
$\varepsilon$	0.990	0.990	1.000	0.990	0.990	0.990	0.990
$\kappa$	0.410	0.460	0.450	0.410	0.410	0.420	0.440
$\gamma_{+P}, \gamma_{-S}$	0.458	0.641	0.636	0.613	0.645	0.663	0.771
$\gamma_{-P}, \gamma_{+S}$	0.432	0.287	0.288	0.293	0.329	0.472	0.475
$l'_R$	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
$\delta_{0P}, -\delta_{0S}$	4.261	3.287	3.183	3.251	3.222	3.321	3.366
$X'_{vv}$	-0.037	-0.057	-0.070	-0.105	-0.072	-0.074	-0.097
$X'_{vr}+m'_y$	0.162	0.100	0.067	0.058	0.067	0.047	0.027
$X'_{rr}$	0.002	-0.006	-0.009	-0.011	-0.007	-0.009	-0.005
$X'_{vvvv}$	0.221	0.068	0.052	0.322	0.142	0.137	0.311
$Y'_v$	-0.258	-0.201	-0.177	-0.167	-0.165	-0.138	-0.107
$Y'_r - m'_x$	0.022	0.022	0.018	0.025	0.022	0.022	0.025
$Y'_{vvv}$	-1.854	-1.812	-1.729	-1.411	-1.678	-1.139	-0.589
$Y'_{vvr}$	-0.427	-0.444	-0.332	-0.019	-0.401	-0.158	0.015
$Y'_{vrr}$	-0.348	-0.401	-0.360	-0.263	-0.387	-0.241	-0.139
$Y'_{rrr}$	-0.002	-0.005	0.004	0.006	-0.008	-0.004	-0.003
$N'_v$	-0.133	-0.101	-0.078	-0.058	-0.064	-0.039	-0.004
$N'_r$	-0.047	-0.036	-0.031	-0.023	-0.030	-0.025	-0.020
$N'_{vvv}$	0.028	-0.004	-0.014	0.061	-0.038	0.028	0.032
$N'_{vvr}$	-0.159	-0.285	-0.295	-0.211	-0.326	-0.193	-0.118
$N'_{vrr}$	0.032	-0.005	-0.015	0.013	-0.032	-0.004	0.014
$N'_{rrr}$	-0.006	-0.007	-0.012	-0.009	-0.015	-0.007	-0.003
$m'_x$	0.0072	0.0038	0.0023	0.0023	0.0023	0.0019	0.0006
$m'_y$	0.181	0.118	0.091	0.077	0.077	0.052	0.023
$J'_z$	0.0078	0.0057	0.0048	0.0041	0.0041	0.0030	0.0015



# PFFFの舵角 $35^\circ$ 旋回運動シミュレーション

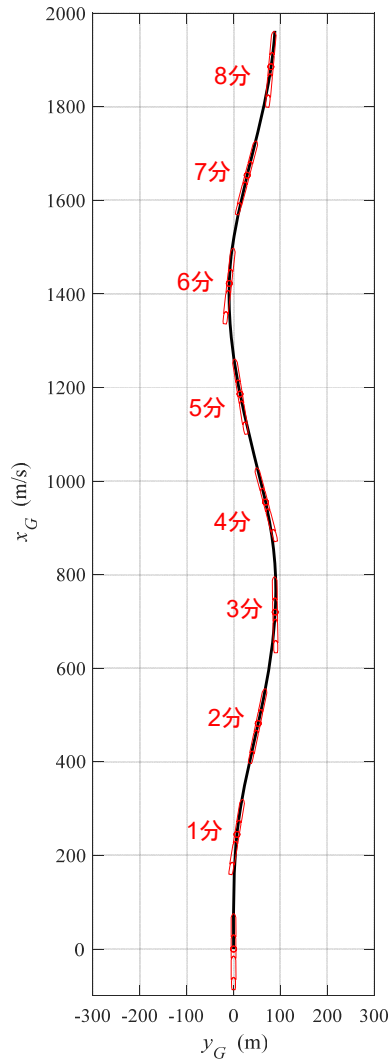
IMO MSC 76/23, Resolution MSC.137(76), Standards for Ship Manoeuvrability, Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, (2002)

- ◆ 100 m 以上の船舶あるいはケミカル運搬船に適用
- ◆ 深水域, 平水中, 満載状態, 等喫水, およその常用速力の90%以上 ※今回は『8 kt』で評価

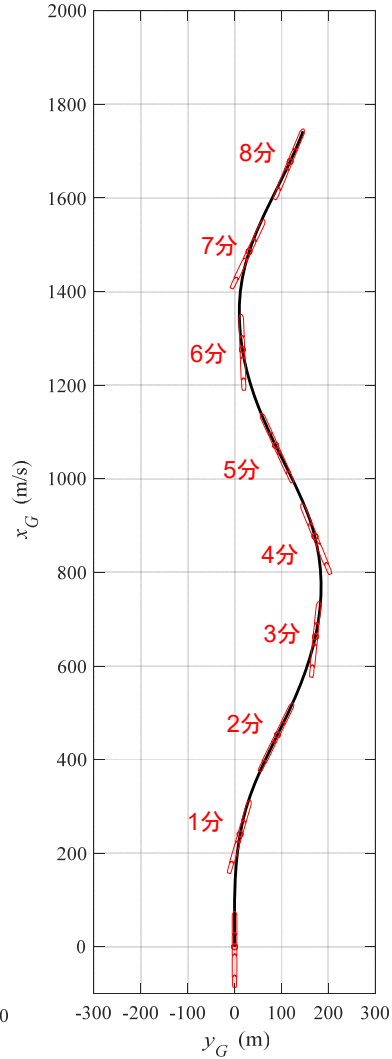


# PFFFのZigzag運動シミュレーション

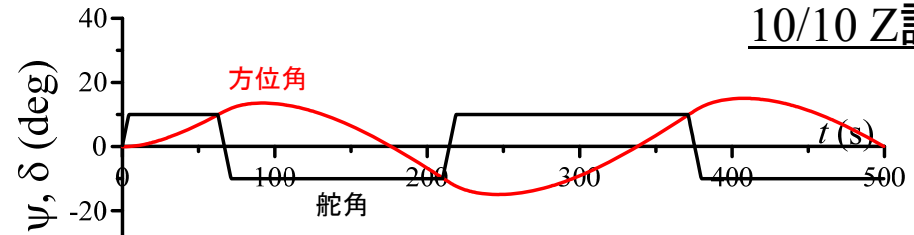
10/10 Z試験  
500秒間



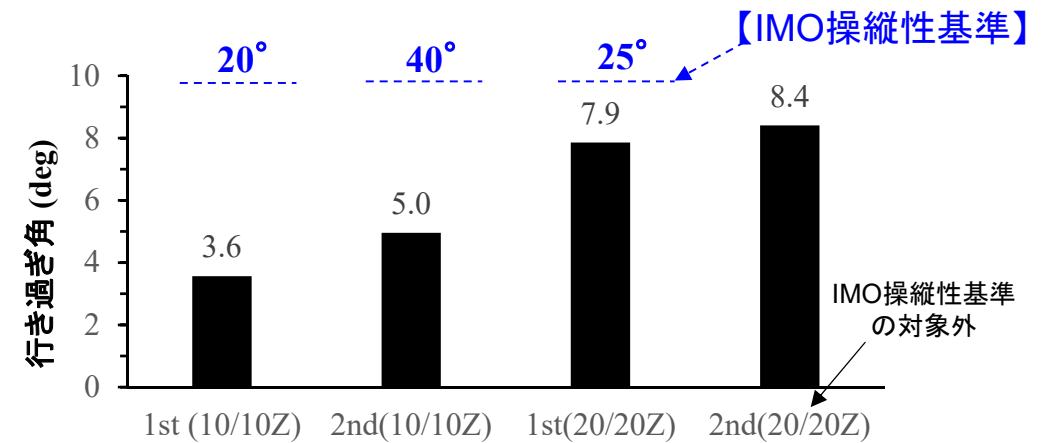
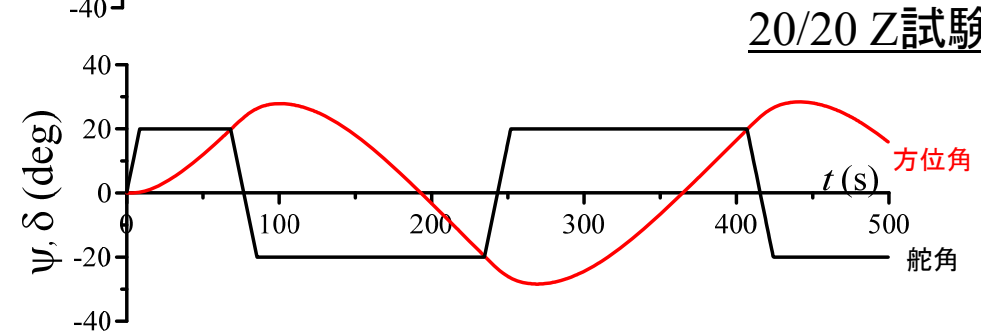
20/20 Z試験  
500秒間



10/10 Z試験

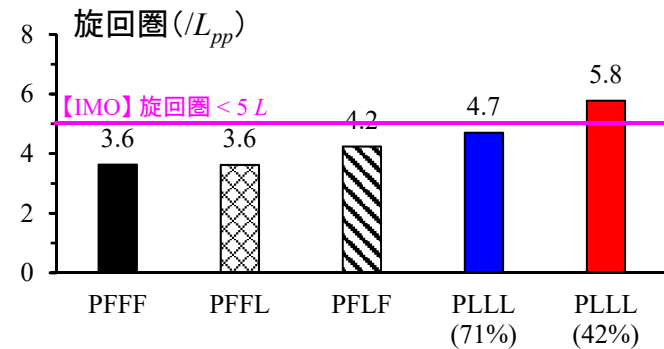
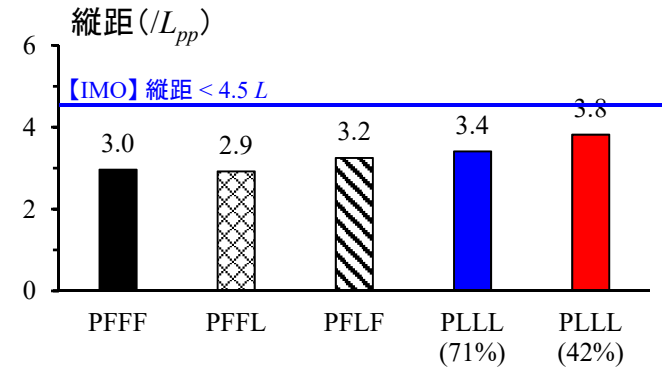
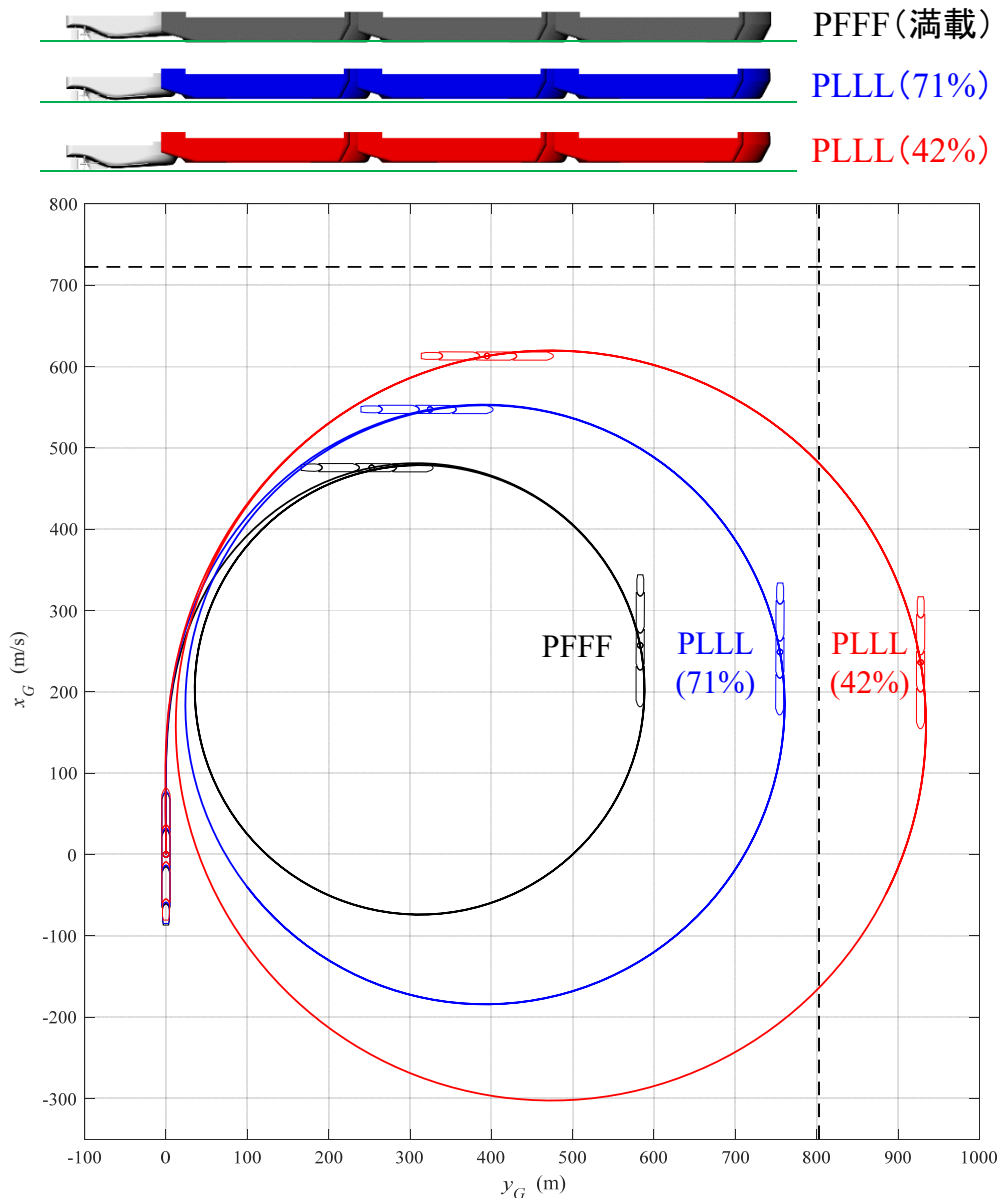


20/20 Z試験



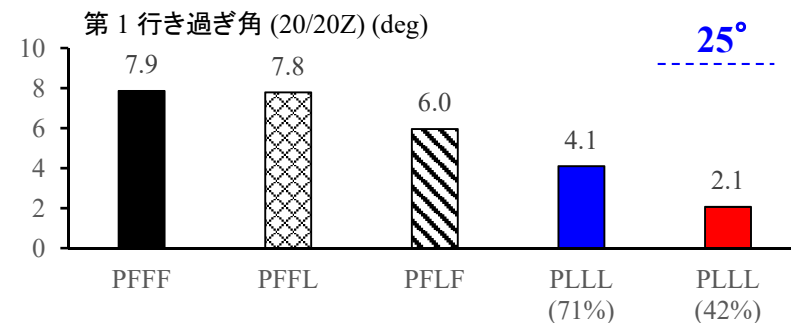
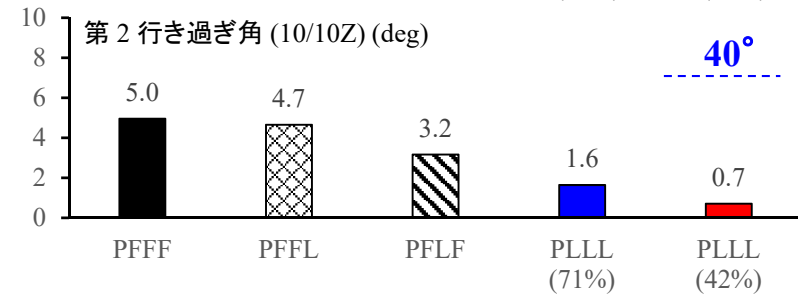
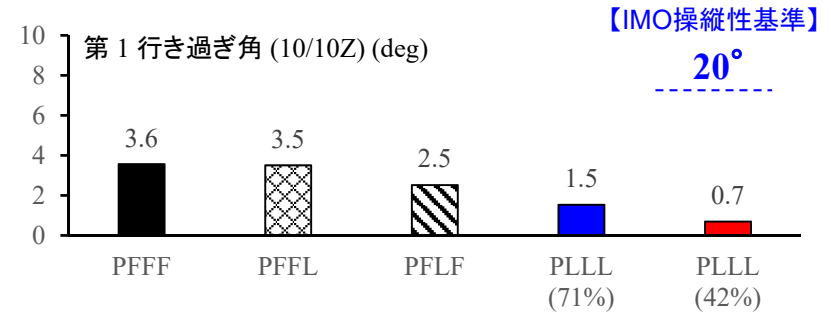
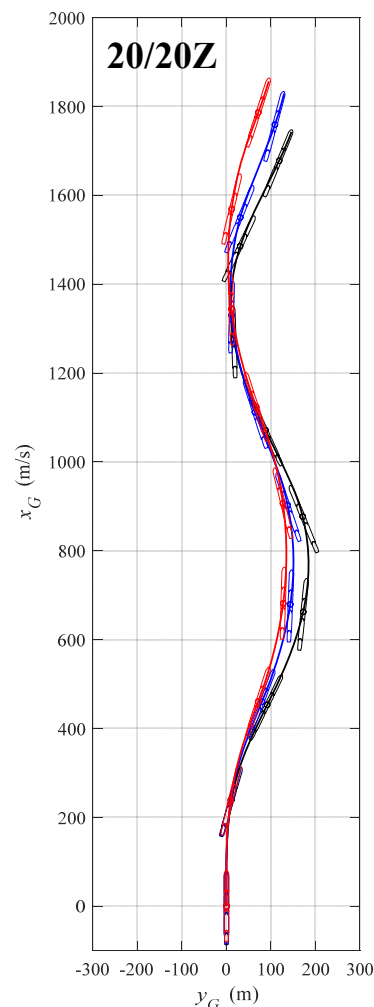
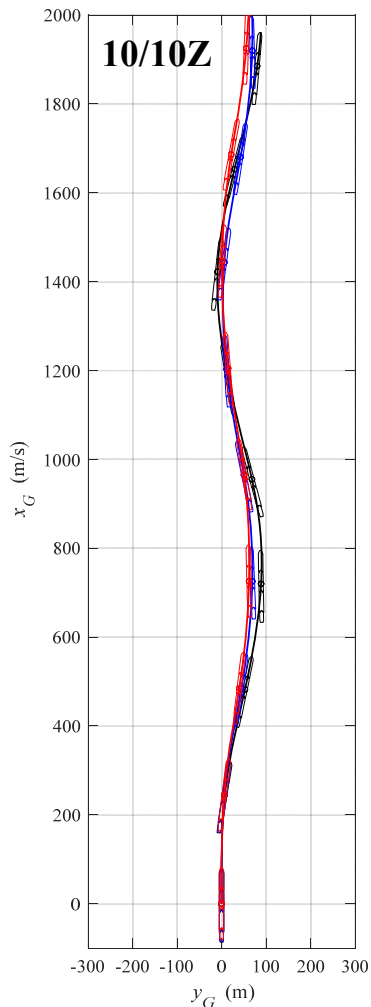
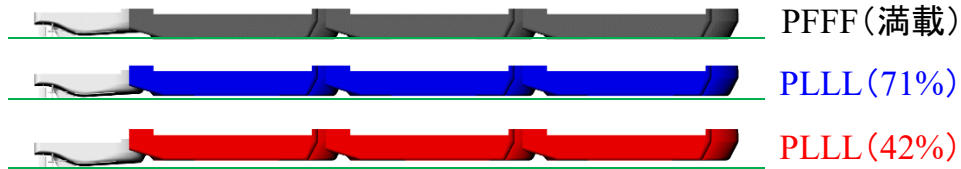
◆ トリプル連結バージ(満載)は, 針路安定性(保針性)に関するIMO操縦性基準を満足する。

# 旋回性能に及ぼす载荷状態の影響



- ◆ 軽荷状態になる程，旋回径が大きく旋回性能は劣る。
- ◆ 3つのバージのいずれも，満載排水量の42%しか貨物を積載しない場合 (PLLL42%)，旋回圏がIMO操縦性基準を超える恐れがある (そもそも満載状態を対象とした基準な為，あくまで参考指標)。
- ◆ 軽荷状態でバージの喫水が浅くなるほど，PB輸送船の船底からプッシャーが突き出る様相となる為，尾翼効果が強まり運動が発達し辛いからと解釈できる。
- ◆ 混載時，軽荷バージの位置により旋回性能に差がある。

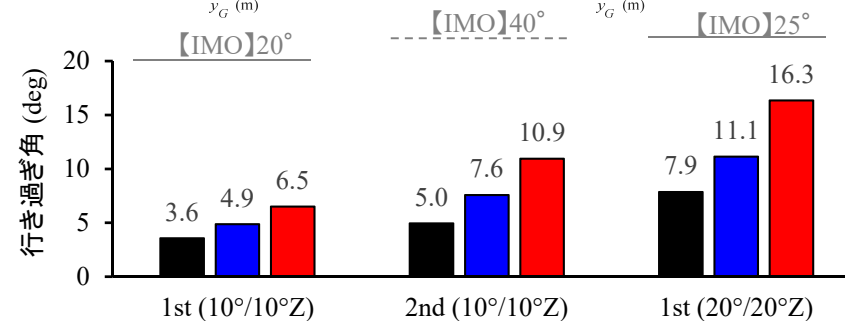
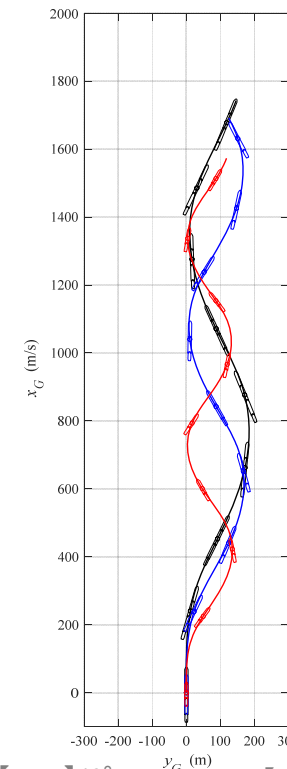
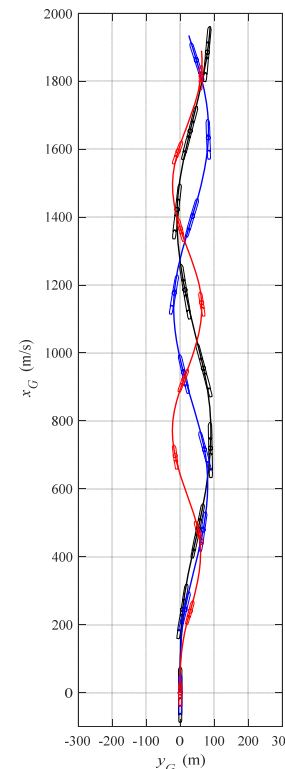
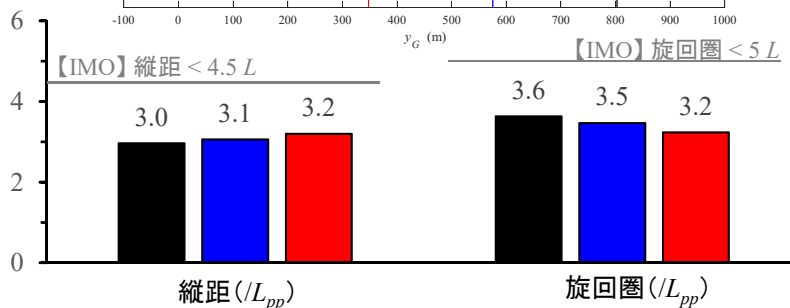
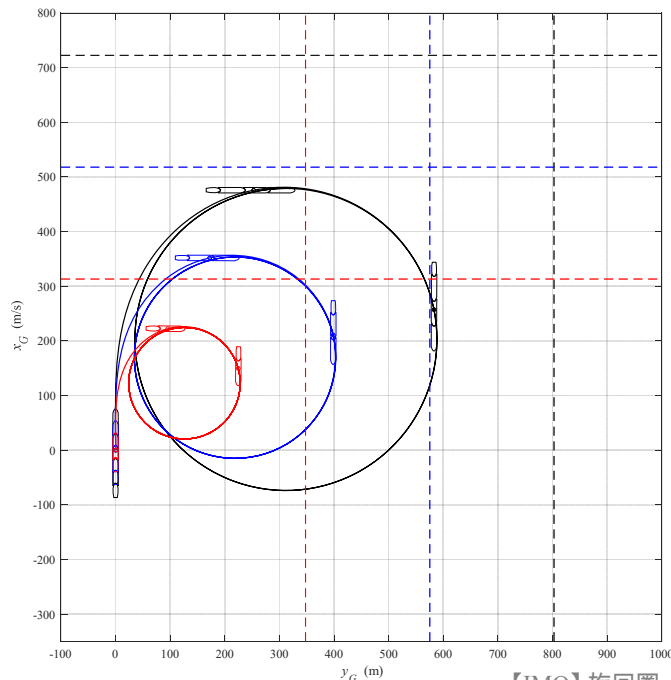
# 針路安定性(保針性能)に及ぼす载荷状態の影響



◆ 操舵時の方位角の行き過ぎ角(オーバーシュート角)は、満載、軽荷、混載状態のいずれも行き過ぎ角に対するIMO操縦性基準は満足している。針路安定性に問題は認められない。

◆ 行き過ぎ角は軽荷状態においてより小さい傾向にあり、針路安定性能に優れる事が分かる。同性能は、運動の発達のし易さという点から、旋回性能と一般にはトレードオフの関係にある。

# 操縦性能に及ぼす連結バージ数の影響



- ◆ トリプル連結バージ(PFFF)に対して、バージを2台連結(PFF), 1台連結(PF)にした場合, 旋回径(次元値)は大幅に小さくなる. 船長により縦距, 旋回圏の無次元値は, 然程大きな差はない.
- ◆ PFFFに対して, PFF, PFの行き過ぎ角は大きくなり針路安定性は劣るが, IMO操縦性基準は満足する.

# 本研究成果のまとめ

- ◆ 抵抗試験を実施し、PB輸送船の船体抵抗を計測した。
  - ✓ 粘性圧力抵抗の観点から、バージの連結台数を増やす方が単位輸送量当たりの有効馬力は低減する。しかし多連結にするほど連結部が増える為、そこで圧力変動が生じて造波、延いては造波抵抗が増大し易い点には留意が必要である。
- ◆ 規則波中直進試験により、船体運動ならびに連結部加重を計測した。
  - ✓ 今回の想定海域の波浪条件(有義波)は、トリプル連結バージの長さに対しては短波長域に当たり、瀬戸内海の有義波高は高くない為、船体動揺は然程顕著ではない。トリプル連結バージの場合、端部のプッシャーと先頭バージが相対的に揺れ易い。
  - ✓ 連結部の荷重は、連結部を挟んだ船体の重量と船体運動と相関がある。特に重たいバージが動揺する先頭の連結部において、大きな荷重が作用し易い。
  - ✓ 大きな波高の中では船体運動の増大に比例して連結部荷重の変動振幅も増大する。但し波高により無次元化した荷重振幅は、波高によらずほぼ一致する。
- ◆ CFDにより操縦運動時の流体力を推定し、力学モデルに基づき、旋回・Zigzag運動シミュレーション計算を実施した。
  - ✓ トリプル連結バージ(満載)の旋回性能および針路安定性(保針性能)は、IMOの操縦性基準を満足する。満載のまま連結台数を減らした場合も一連の操縦性能は問題ない。
  - ✓ 軽荷状態になるほど針路安定性が顕著に良くなる傾向にあり、裏を返すと運動が発達し難い状態である事から、旋回性能は悪化する傾向にある。特にバージの排水量を満載状態の42%まで減少させた場合、満載時と比較して旋回航跡が大分大きくなる恐れがあり、操船にあたり注意を要する。

# 今後の課題

- ◆ 連結部機構はPB輸送船を成り立たせる核心技術である為、強度設計に必要な連結部荷重のデータの蓄積が重要である。不規則波中や斜波中、更には波浪中の操縦運動時など、複雑な連成運動が起こるより厳しい状況下での検討が望まれる。（左右荷重や捻り荷重の評価を含む）
- ◆ PB輸送船は、各船体間の相対横揺れは許容されていない為、一体となって横揺れが生じる。バージの連結台数を増やすと、船幅は変わらず長さだけが伸びるが、一般に縦に細長い形状は横メタセンタ半径が小さい事から、横波中の横揺れの復原性の評価も望ましい。



ご清聴ありがとうございました。