

内航革新技術セミナー

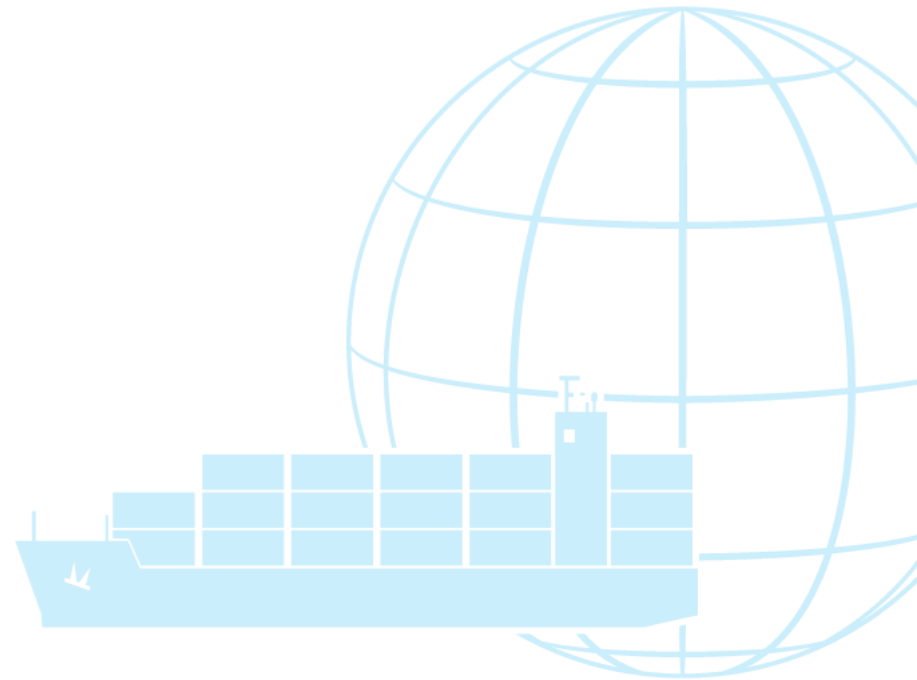


斜波中における多連結モジュールの連結部に作用する波浪荷重について

2026年3月12日

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

海上技術安全研究所 海洋開発系 渡邊充史



1.はじめに



- 世界的な脱炭素化が進む中、内航海運は検討が始まったばかりであり、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定。
- 一般財団法人 日本船舶技術研究協会は、公益財団法人日本財団からの助成を受けて2023年度からコンセプト船の一つである多連結バージを対象に、その運動性能や連結部に作用する荷重等の評価を行ってきた。
- 本講演では2024年度と2025年度に海上技術安全研究所が実施した多連結バージの連結部荷重評価等に関する研究結果を紹介する。

講演内容

- 1.はじめに
- 2.多連結バージコンセプトとこれまでの研究
- 3.プッシャー固定時における多連結バージの波浪中動揺試験
- 4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験
- 5.多連結バージの数値計算モデルの開発
- 6.数値計算モデルによるシステム構成の検討
- 7.まとめ

2.多連結バージコンセプトとこれまでの研究

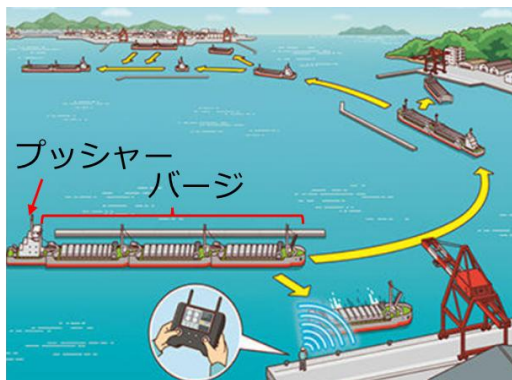


- 河川における輸送手段としてプッシャー・バージが発展。海洋での利用はシングルバージが一般的。瀬戸内海のような穏やかな海域であれば、多連結バージが適用できる可能性がある。
- 2022年度からスタートし最初の2年間（フェーズ1）では標準安全評価手法の開発・検証を実施。
- 2023年には広島大学にて水槽試験を実施し向かい波中の運動性能、連結部荷重の評価、CFD計算による平水中操縦性能の評価を実施。斜波中における連結部荷重の評価が課題として残る。



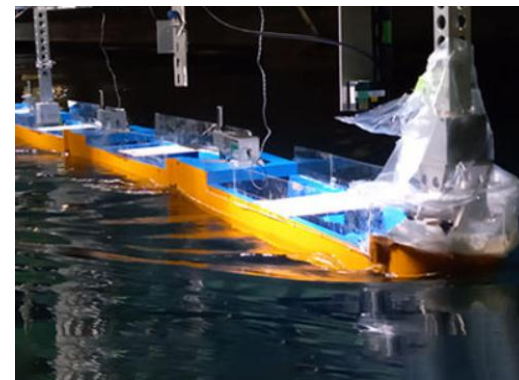
航洋型プッシャー・バージ

出典：<https://drone.create-j.com/?p=1871>



多連結バージのコンセプト

出典：<https://www.jstra.jp/a4b02/a3b04/>



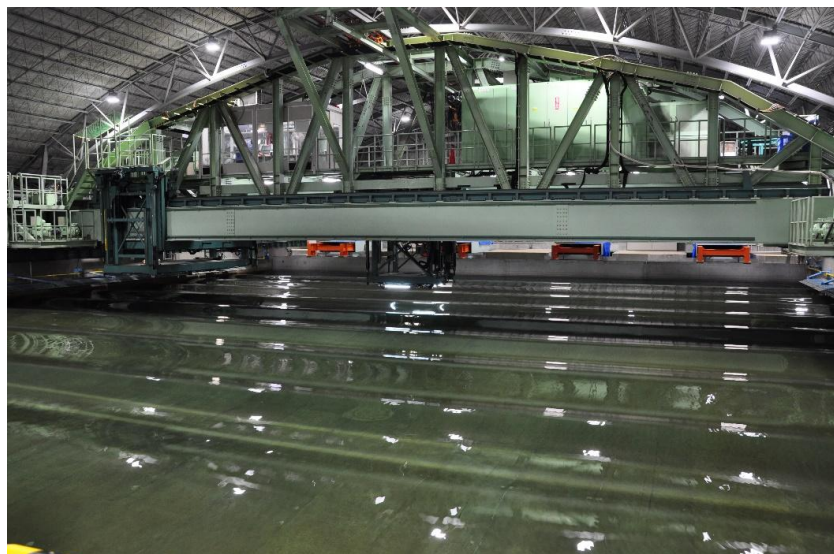
向かい波中における
波浪中動揺試験

出典：<https://www.jstra.jp/a4b02/a3b04/>

3.プッシャー固定時における多連結バージの波浪中動揺試験



- 海上技術安全研究所にて2024年度に水槽試験および数値計算モデルの構築を実施。
- 斜波中における連結部荷重及び運動性能の評価を目的とした。
- 水槽試験は海洋構造物試験水槽にて実施。



海洋構造物試験水槽

水槽	長さ	44.5 m
	幅	27.1 m
	水深	0~2.0 m(可変) ※ 試験時の水深は1.00 m
曳引台車	速度	最大0.7 m/s
曳引台車	速度	最大0.5 m/s
造波装置	形式	分割式ピストン型 規則波, 不規則波
	性能	最大波高0.6 m, 波周期0.7~3.0 s
風発生装置	速度	最大12.0 m/s (水平配置式送風機使用時)
潮流発生装置	速度	最大0.3 m/s

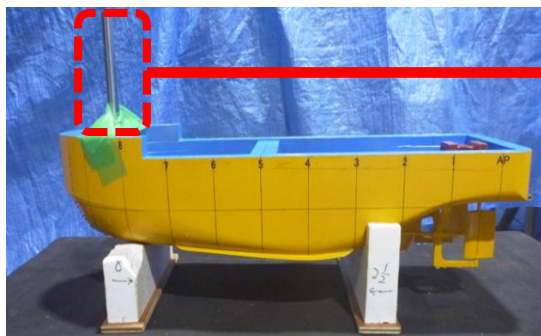
海洋構造物試験水槽の仕様

3.プッシャー固定時における多連結バージの波浪中動揺試験



- 縮尺1/36.17のプッシャー模型1隻とバージ模型3隻を使用。
- 多連結バージの航走状態を再現するためプッシャーを台車に完全固定し、プッシャーを曳航。
- 模型船間は縦揺れ方向のみ許容するヒンジ付きの連結装置で連結。

- 台車に装備されたターンテーブルで模型全体を回転させて波向きを調整。



プッシャー模型



曳航方向



バージ模型



プッシャー バージ1

バージ2

バージ3

模型船配置状況

3.プッシャー固定時における多連結バージの波浪中動揺試験



- プッシャーについては排水量のみを想定実機と同じになるよう調整。
- バージについては排水量、重心高さ、メタセンター高さを想定実機と同じになるよう調整。
- バージの運動（Pitch）を非接触モーションキャプチャーにより計測、連結部の荷重・モーメントを6分力計にて計測。

プッシャーの主要目

項目	実船スケール	模型スケール (1/36.17)
垂線間長 L_{pp}	24.00 m	664 mm
全幅 B	8.50 m	235 mm
喫水 d	2.80 m	77 mm
排水量 W ($\rho:1025 \text{ kg/m}^3$)	359.78 ton	7.59 kg
KG	3.62 m	100 mm
KMt	4.75 m	131 mm
KMI	29.42 m	813 mm
GMt	1.13 m	31 mm
GMI	25.80 m	713 mm
乾舷	2.20 m	61 mm

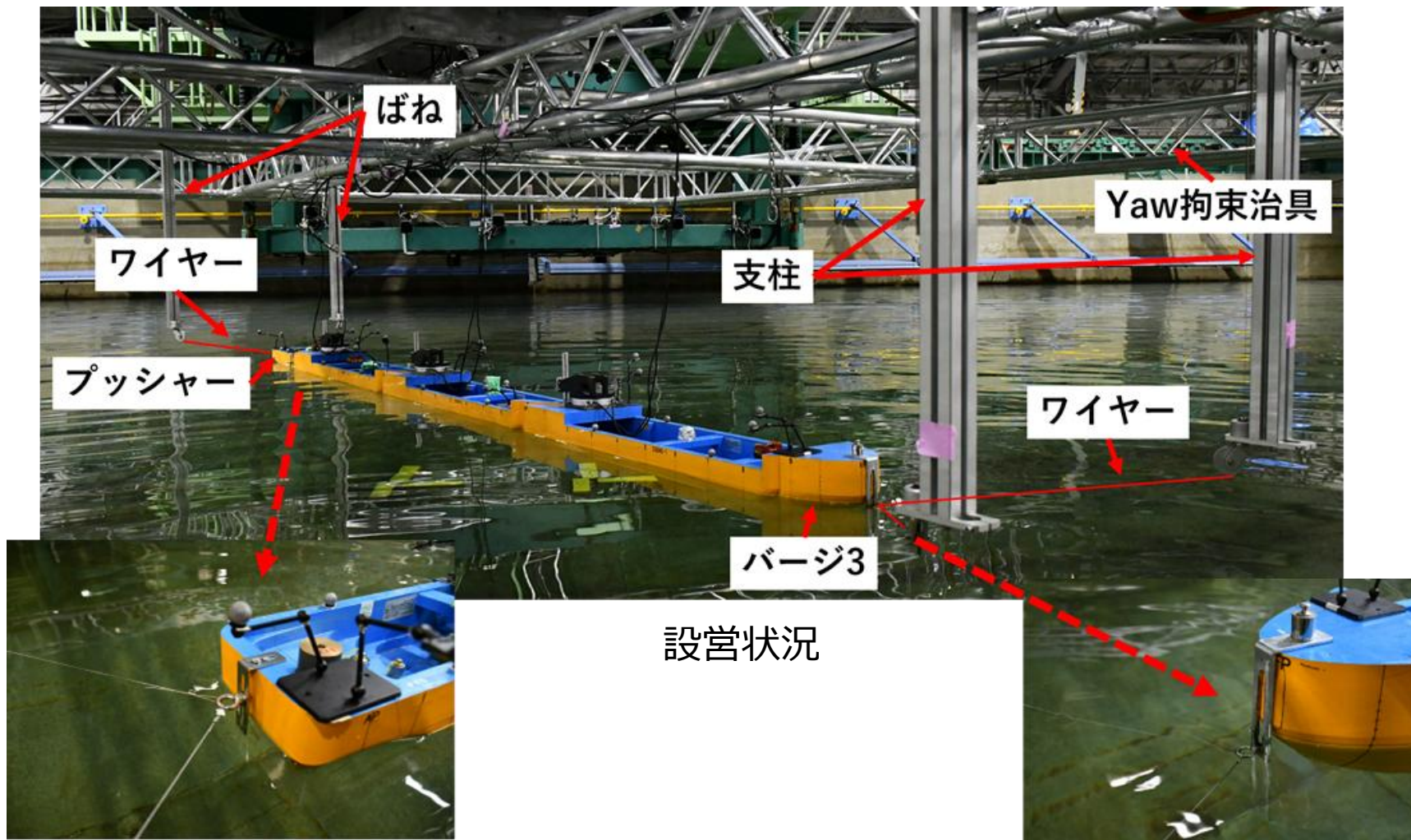
バージの主要目

項目	実船スケール	模型スケール (1/36.17)
垂線間長 L_{pp}	49.55 m	1370 mm
全幅 B	10.00 m	276 mm
喫水 d	3.75 m	104 mm
排水量 W ($\rho:1025 \text{ kg/m}^3$)	1614.66 ton	34.13 kg
Pitch慣動半径	12.39 m	343 mm
KG	2.29 m	63 mm
KMt	4.26 m	118 mm
KMI	49.69 m	1374 mm
GMt	1.97 m	54 mm
GMI	47.40 m	1310 mm
乾舷	2.05 m	57 mm

4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



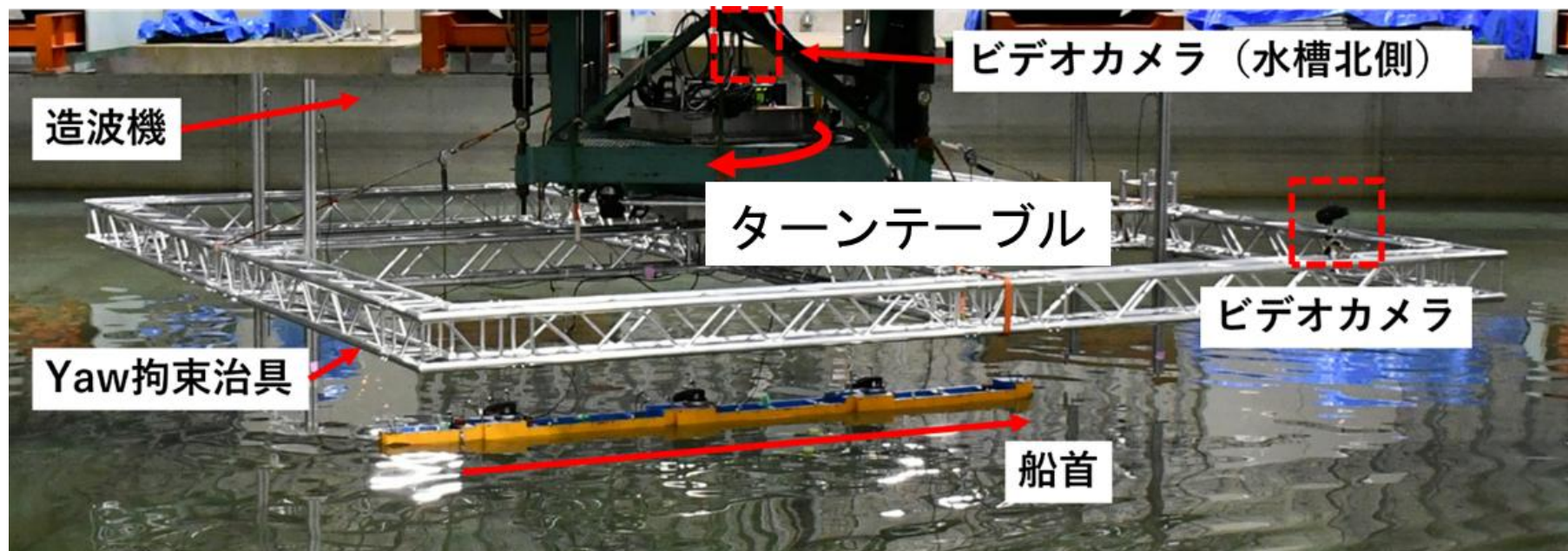
- プッシャー船尾とバージ3の船首を弱いばねで係留し、漂流を防止。



4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



- バージの運動（Pitch）を非接触モーションキャプチャーにより計測、連結部の荷重・モーメントを6分力計にて計測。



試験中の様子

4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



- 波周期、波高はプッシャー固定時の条件を基に決定。
- 波向きは連結部の回頭モーメント (M_z) が最大となる 120 deg を含んだ数ケースを設定。

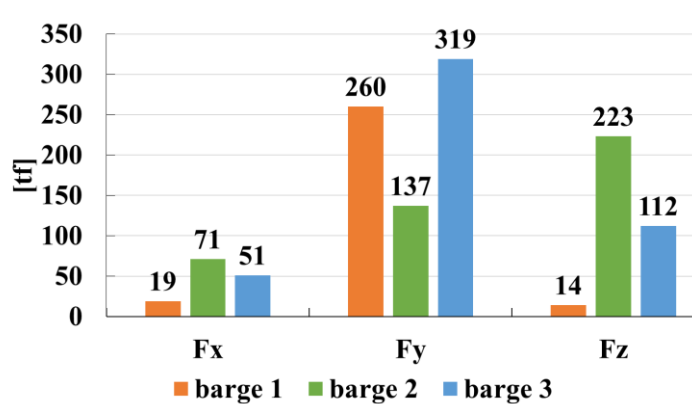
試験条件

計測項目	実船スケール	模型スケール
曳航速度	0.00 m/s	0.00 m/s
波周期	4.54, 5.53, 6.42, 7.17, 7.85 sec	0.75, 0.92, 1.07, 1.19, 1.31 sec
λ/L_{pp}	0.19, 0.28, 0.37, 0.46, 0.56	
波高	0.36, 0.72 m	10, 20 mm
波向き	0, 60, 120, 180 deg	
試験数	1 × 5 × 2 × 4 = 40 cases	
水深	36.17 m	1.00 m

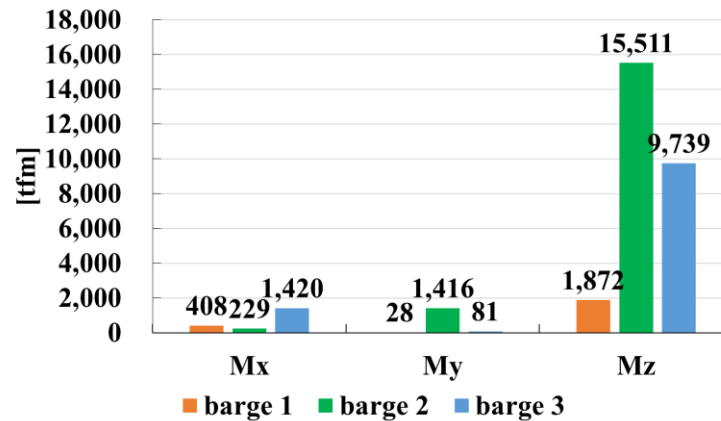
4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



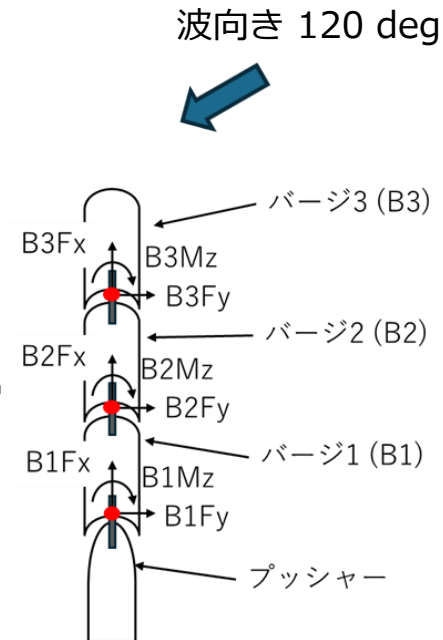
- 波高に対する線形性が確認されたため、線形外挿により瀬戸内海における海象条件（有義波高2.5 m, 有義波周期6.00 秒）を規則波として扱い、連結部の荷重を推定。
- 周期6.00 秒は λ/L_{pp} に換算すると0.35であるが、計測値が無いため0.37時の値を使用。波向き120 deg時の値を表記。



荷重推定値



モーメント推定値

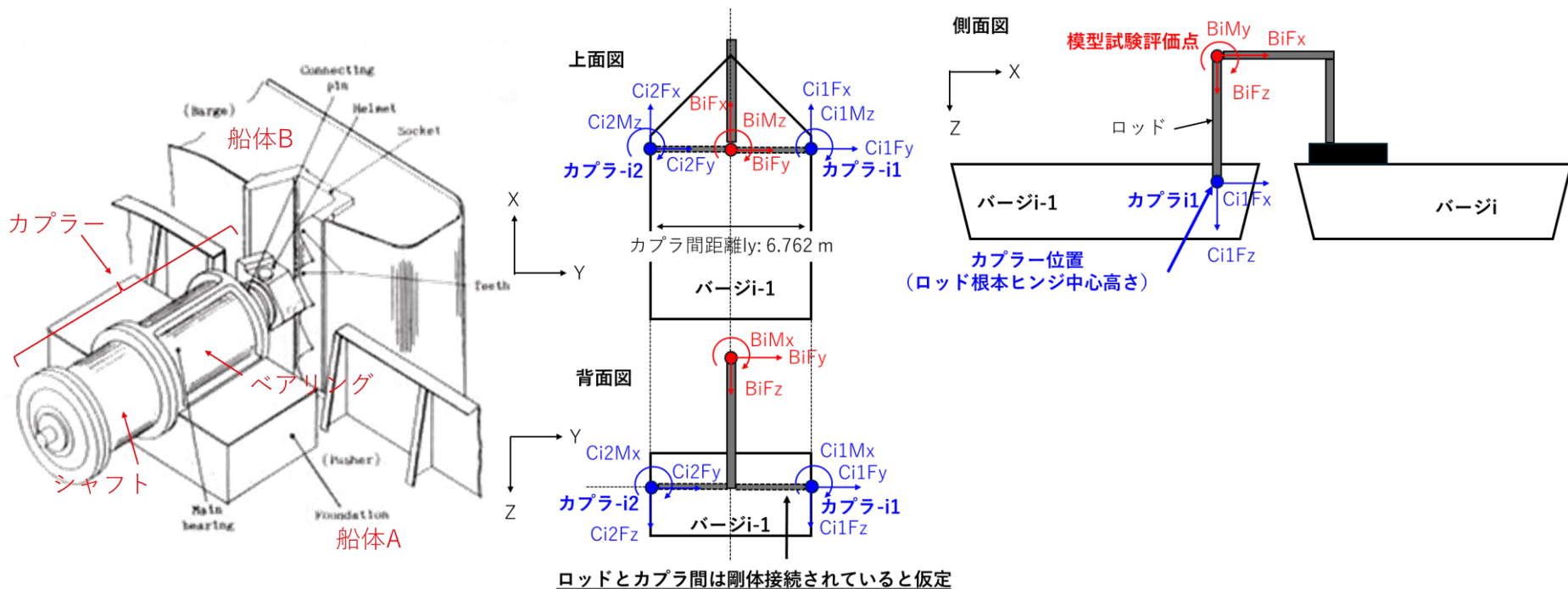


- ✓ バージ2の回頭モーメント (Mz) の値が特に大きい (15,500 tfm 程度)。同じ波向きにおけるプッシャー固定時のバージ2Mz (9,800 tfm程度) に対して1.6倍増加。

4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



- 力とモーメントの釣り合い式を構築し、カプラー取り付け位置における荷重に変換して評価。



カプラー

出典：Articouple K, Taisei Engineering Constructions, Ltd., http://www.articouple.com/3-articouple_k.html

既存の評価点とカプラー位置の関係
(赤点：モデル試験評価点、青点：カプラー位置)

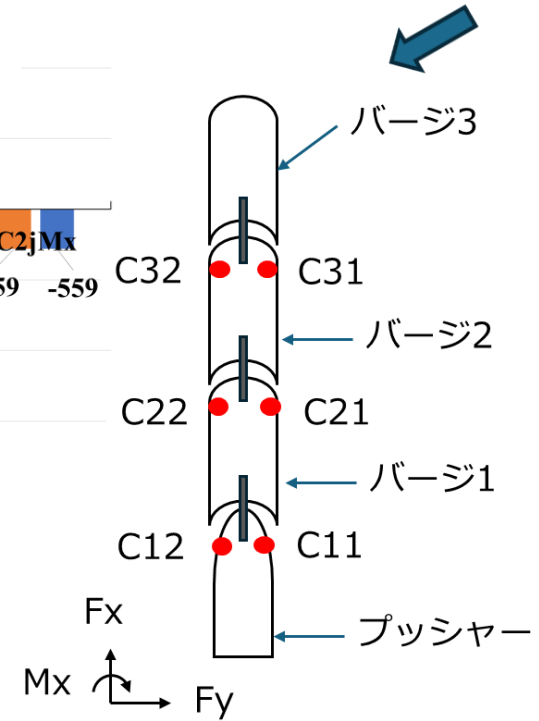
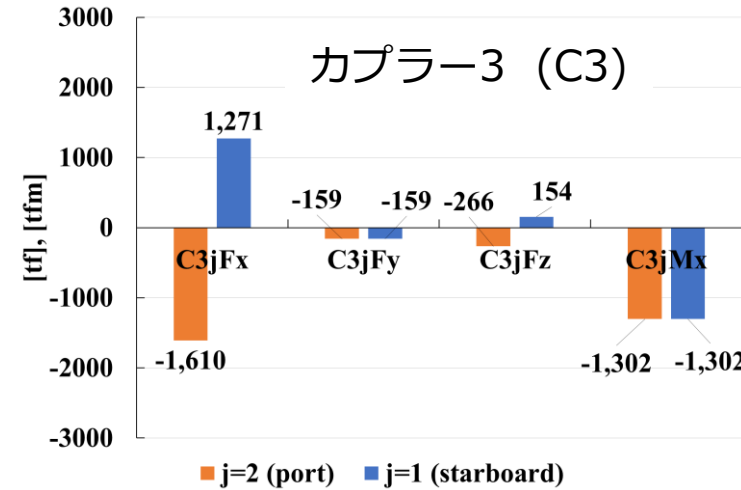
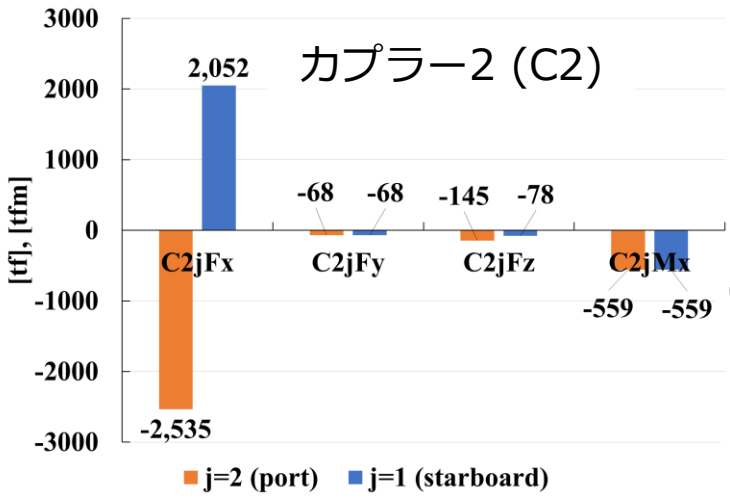
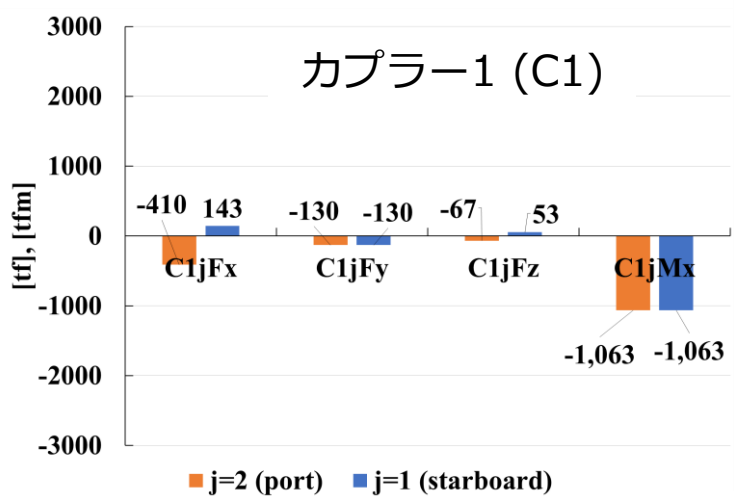
- 各荷重とモーメントの位相関係は考慮されていないため、参考値として考える必要がある。

4.プッシャー自由時における多連結バージの波浪中動揺試験



- 力と釣り合い式を構築し、カプラー取り付け位置における荷重に変換して評価。

波向き 120 deg

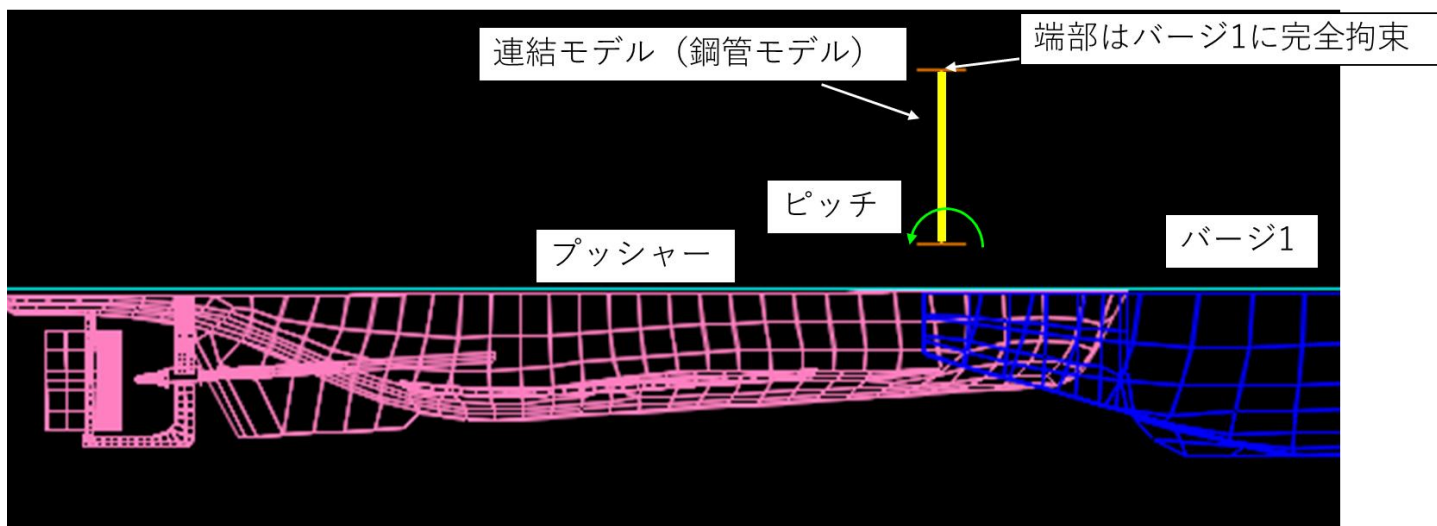


➤ マイナス値は荷重・モーメントが作用する方向を示す。

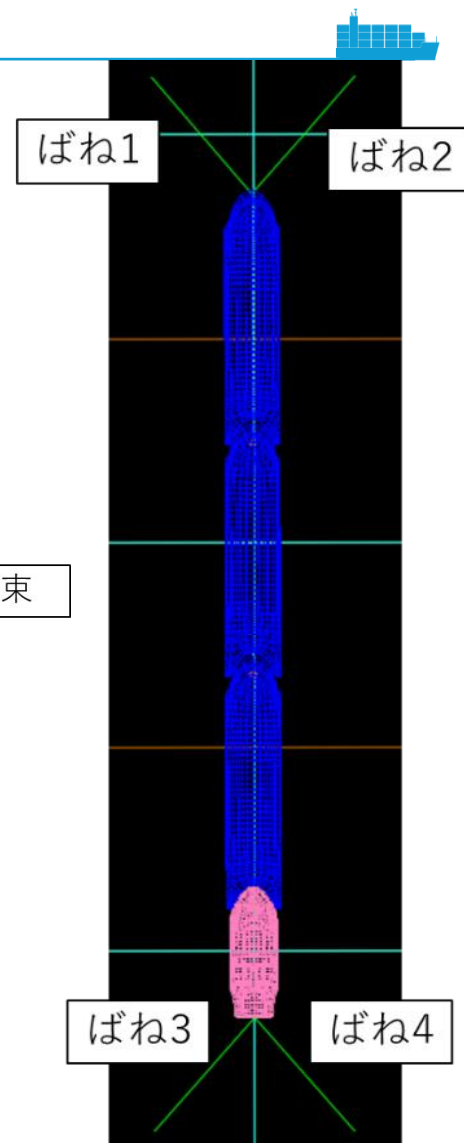
✓ 回頭モーメント (Mz) の影響により、C2におけるFxで2,500 tf 程度の荷重が発生。

5.多連結バージの数値計算モデルの開発

- 浮体運動計算、係留系計算に関する商用ソフトウェア OrcaFlex (11.4d) を利用。
- 連結部は鋼管モデルを構築し使用。
- 停船中、プッシャー自由時を想定しモデルを構築。
- ばねモデルで漂流を防止。

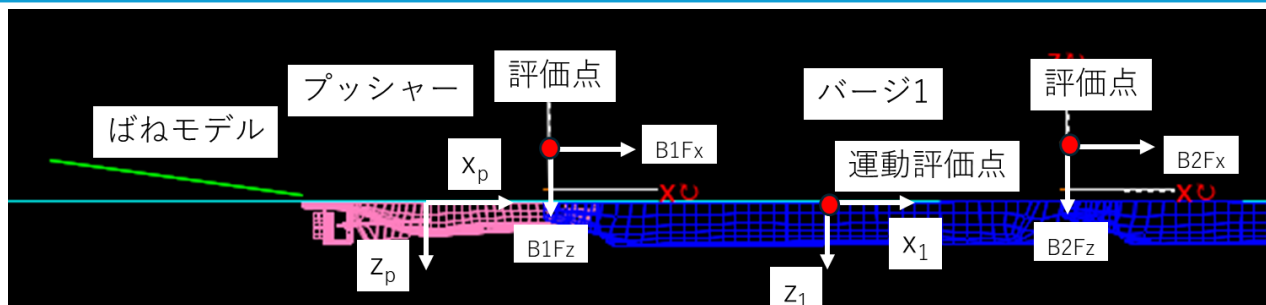


連結モデル

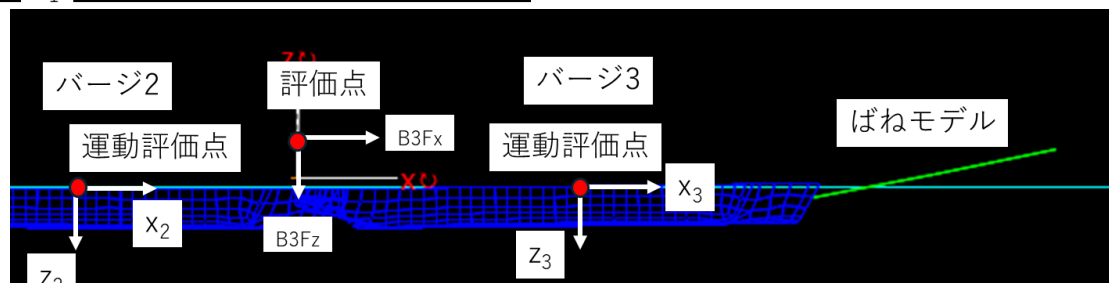


上面図

5.多連結バージの数値計算モデルの開発



側面図 (プッシャー・バージ1)



側面図 (バージ2・バージ3)

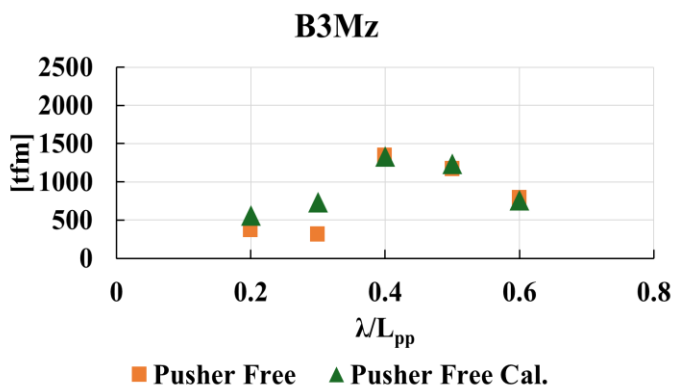
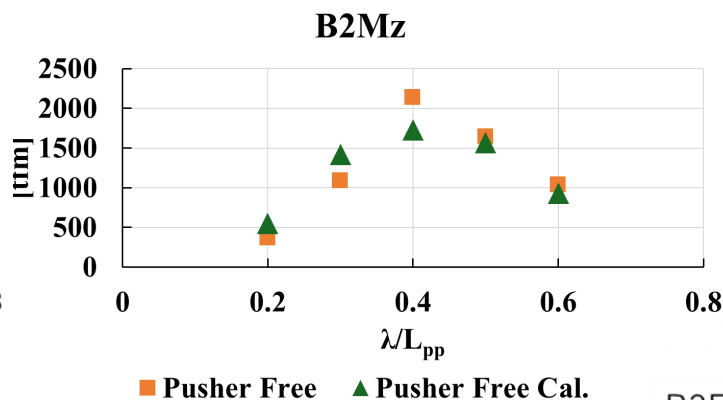
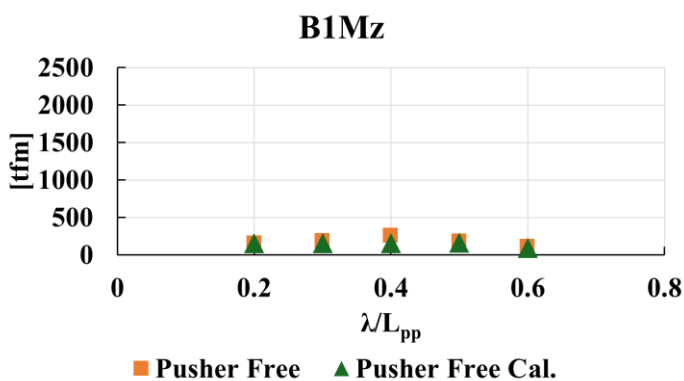
計算モデル仕様

項目	値
考慮した外力	波強制力のみ (周波数依存)
流体力や波強制力の相互干渉影響	考慮あり
船体の自由度	プッシャー、バージは6自由度運動自由
前進速度	停船時のみ
時間刻み	0.1 秒
ばね定数	10.902 kN/m

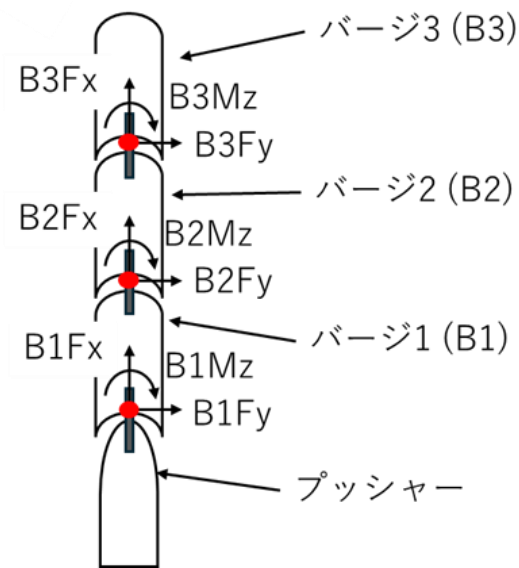
連結 (鋼管) モデル仕様

項目	値
外径	1.05 m
内径	0.00 m
密度	7.85 t/m ³ (鋼材)
長さ	4.0605 m (プッシャー ~ バージ1間)、4.1685 m (バージ1 ~ 2, バージ2 ~ 3間)
端部拘束条件	下端: Pitchのみ自由 上端: 前方の船体に完全拘束

5.多連結バージの数値計算モデルの開発



波向き 120 deg



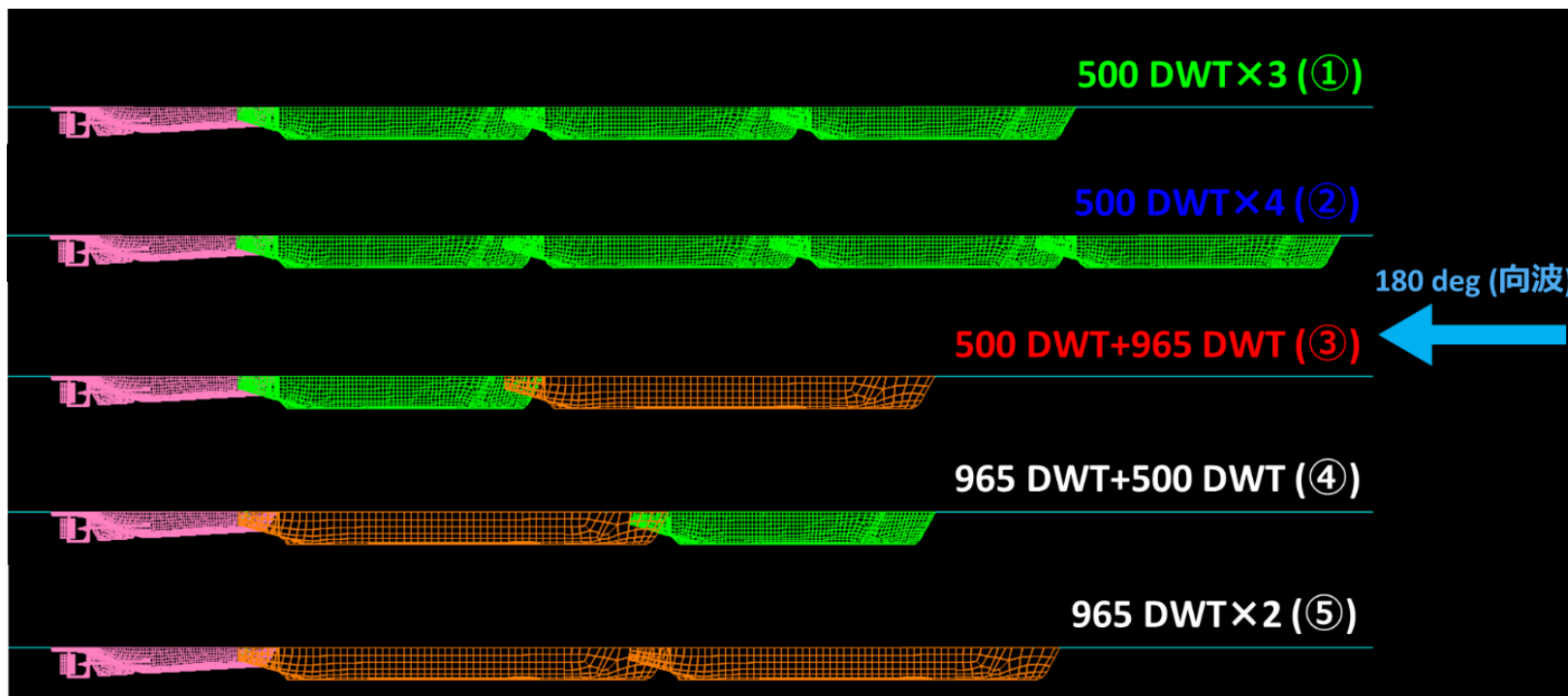
連結部の回頭モーメント

✓カプラー設計時に重要な指標となる連結部の回頭モーメント (Mz) について数値計算により傾向を捉えられている。

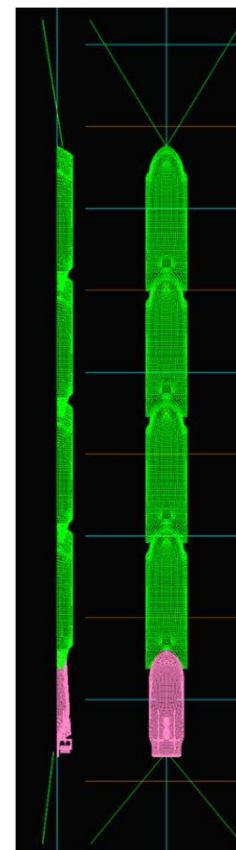
6.数値計算モデルによるシステム構成の検討



- 連結数を変化させた時（ケース1）と载荷状態を変化させた時（ケース2）で連結部の荷重等の変化を調査し、荷重を低減可能なシステム構成を検討。
- ケース1：500 DWT バージ3、4連結時、並びに965 DWT バージを併用する場合（5パターン）



ケース1

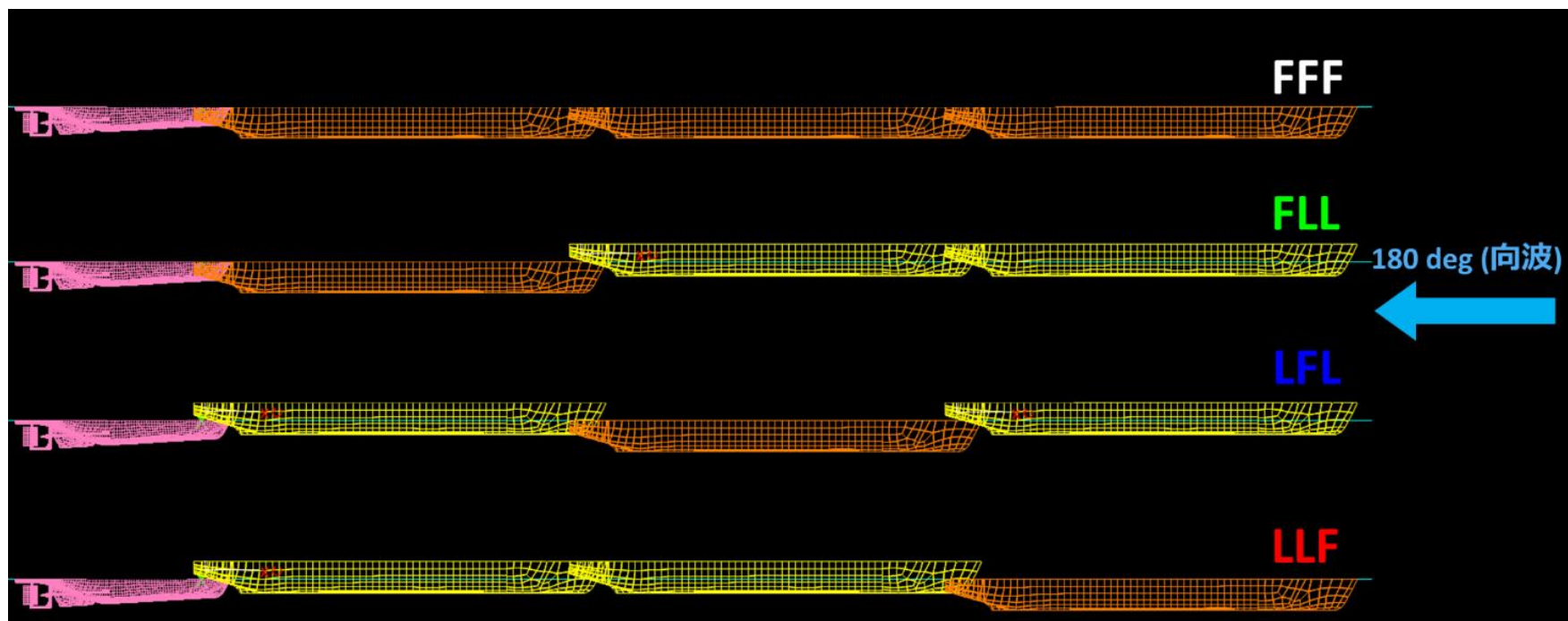


配置状況

6.数値計算モデルによるシステム構成の検討



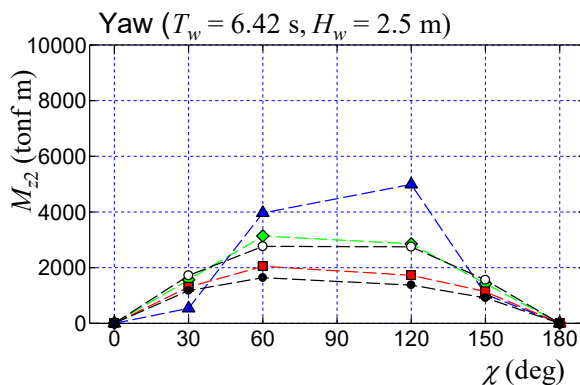
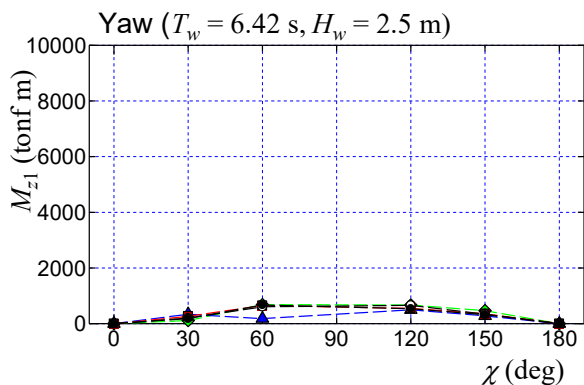
- ケース2：965 DWT バージ3連結時において、異なる载荷状態のバージが混在する場合 (4パターン)



ケース2 (F : 満載、L : 軽荷)

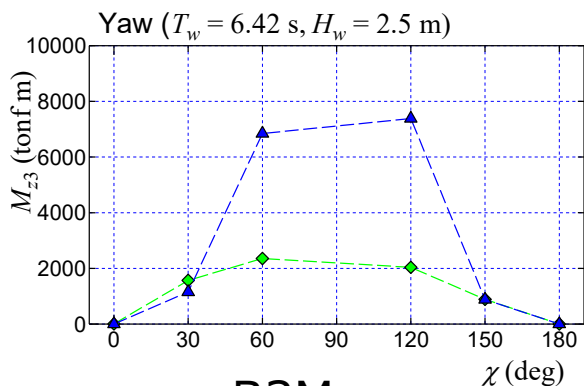
- 停船中、規則波、波高2.5m、波周期5.53s、6.42s (λ/L_{pp} 0.28、0.37) の条件にて時間領域計算を実施。

6.数値計算モデルによるシステム構成の検討

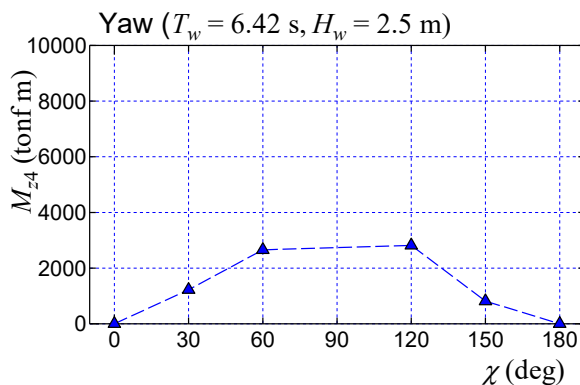


◆ 500 DWT × 3	○ 965 DWT × 2
▲ 500 DWT × 4	● 965 DWT + 500 DWT
■ 500 DWT + 965 DWT	

B1Mz

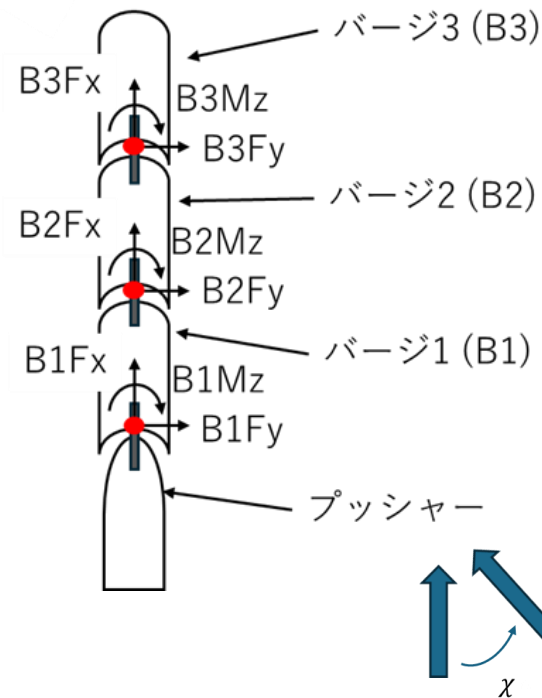


B2Mz



B3Mz

B4Mz

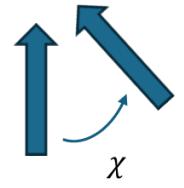
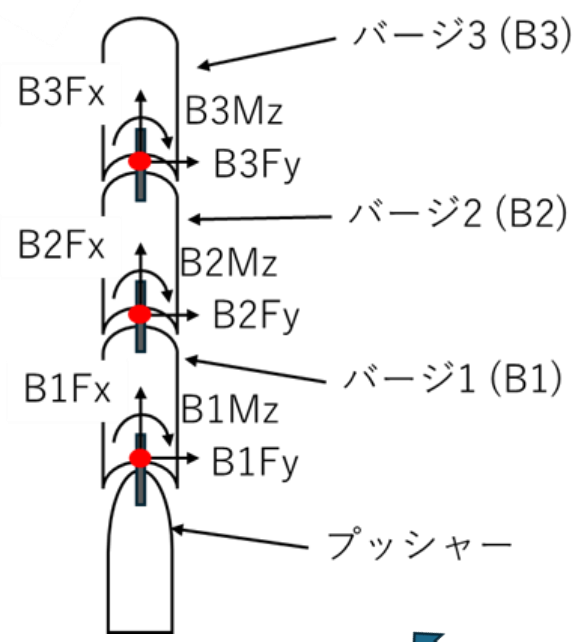
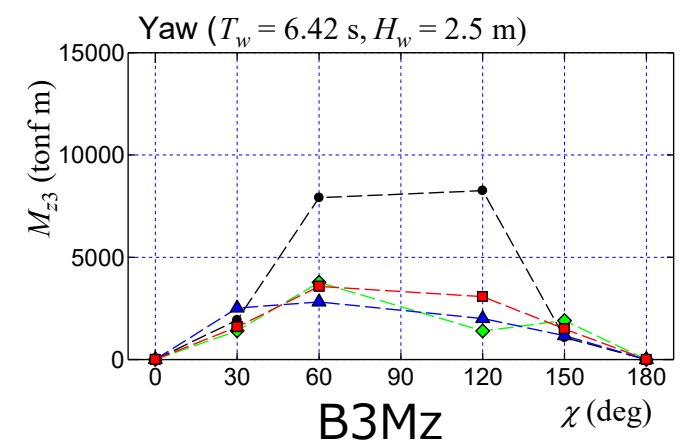
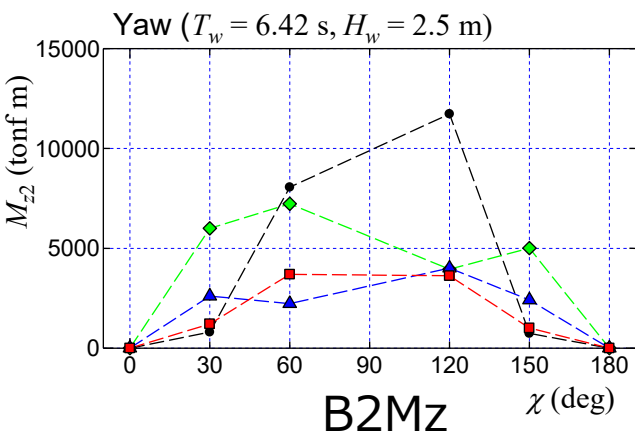
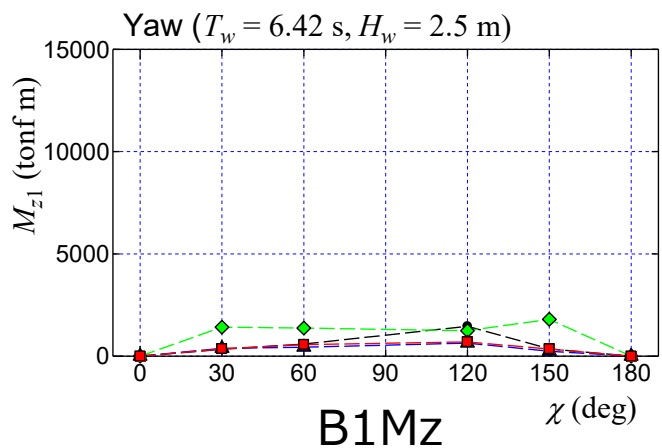


ケース1 各連結部における回頭モーメントの値

✓回頭モーメントは500DWT × 4 の時に最大となる。

✓システム全体の長さが回頭モーメントの値に影響している。

6.数値計算モデルによるシステム構成の検討



ケース2 各連結部における回頭モーメントの値

- ✓ 回頭モーメントはバージが全て満載の時に最大となる。
- ✓ 軽荷状態のバージを組み込む事によってモーメントを低減出来る。

7.まとめ



2024年度と2025年度に海上技術安全研究所が実施した多連結バージの連結部荷重評価等に関する研究結果を紹介した。得られた主な結果について示す。

- ✓ **瀬戸内海における海象条件**を用いて連結部の回頭モーメントを推定した結果、最大で**15,500 tfm** のモーメントが発生する（プッシャー自由時）。
- ✓ **カプラー位置**には最大で**2,500 tf** の荷重が作用すると推定される。
- ✓ 回頭モーメント等の値を推定する**数値計算モデルを構築し**、推定精度の妥当性を確認。
- ✓ 全体システム最適化に関して、**全体長を短くすることで、連結部の回頭モーメントを抑えられること**を確認。また、**全バージが満載喫水状態**における連結部荷重・モーメント最大値を評価しておけば**安全側に評価可能**である事を確認。

 **今後は、バージ連結数や仕様を変更しながら、運用ニーズと連結部強度を共に満足出来るシステムを検討する必要がある。**

ご清聴ありがとうございました

