
「大型コンテナ船実船計測」に関する調査研究

【最終報告】

目次

1. 事業の目的
2. 事業の目標
3. 期待される効果
4. 研究概要
5. 計測対象
6. 計測項目
7. 計測機器
8. 航路
9. Sea Condition
10. 海象データ
11. 操船影響
12. 船長方向応力
13. 加速度
14. ホイッピング
15. ねじりモーメント
16. 船首部衝撃圧
17. 固有値振動計算
18. 過渡応答計算
19. まとめ

1. 事業の目的

近年のコンテナ船は、大型化が著しく進んでいる。

一方、大型コンテナ船の強度評価は、過去のパナマックスクラスの実績をベースとした設計手法の延長線上で行われていることから、その妥当性について、検証が必要と考えられる。

本事業の目的は、大型のコンテナ船（8,600TEU）を対象とした実船計測を実施し、船体応答に関するデータの充実を図るとともに、計測データの分析、評価を通し、船体強度の健全性を確認することである。

また、得られた知見は、構造設計や関連規則の合理化に反映させることを図る。

2. 事業の目標

- (1) 設計手法の妥当性検証に必要なデータの取得
- (2) ホイッピングが船体強度に及ぼす影響についての知見の取得
- (3) 操船がバウフレア衝撃圧に及ぼす影響についての知見の取得
- (4) ねじりモーメント分布についての知見の取得

3. 期待される効果

- (1) ホイッピングが船体強度に及ぼす影響について知見を取得し、これを設計に反映する事で、船体構造を一層合理的かつ安全なものとする。
また、関連する規則やガイドライン等での議論を合理的な方向に導くことに資することができると思う。
- (2) 操船がバウフレア衝撃圧に及ぼす影響について知見を取得し、これを活用することで操船制限やあるべきプラクティスを確立する。
- (3) 各船級協会規則によって異なる捩りモーメント分布を一層合理的な値とする。

4. 研究概要

(1) 研究題目

「大型コンテナ船実船計測」に関する調査研究

(2) 研究体制

共同研究者

川崎汽船株式会社

一般財団法人日本海事協会

ジャパン マリンユナイテッド 株式会社

(3) 研究期間

2010年12月1日 ~ 2017年3月31日

(計測期間 2012年5月~2017年3月)

5. 計測対象

船名： HELSINKI BRIDGE

船主： 川崎汽船株式会社

建造： JMU 呉工場

起工： 2011年7月

引渡： 2012年4月

Moulded L × B × D (m):

319.500m × 45.600m × 19.380m

Tonnage Gross: 約 97,000 ton

Cargo Capacity: 約 8,600 TEU

Class: NK



6. 計測項目

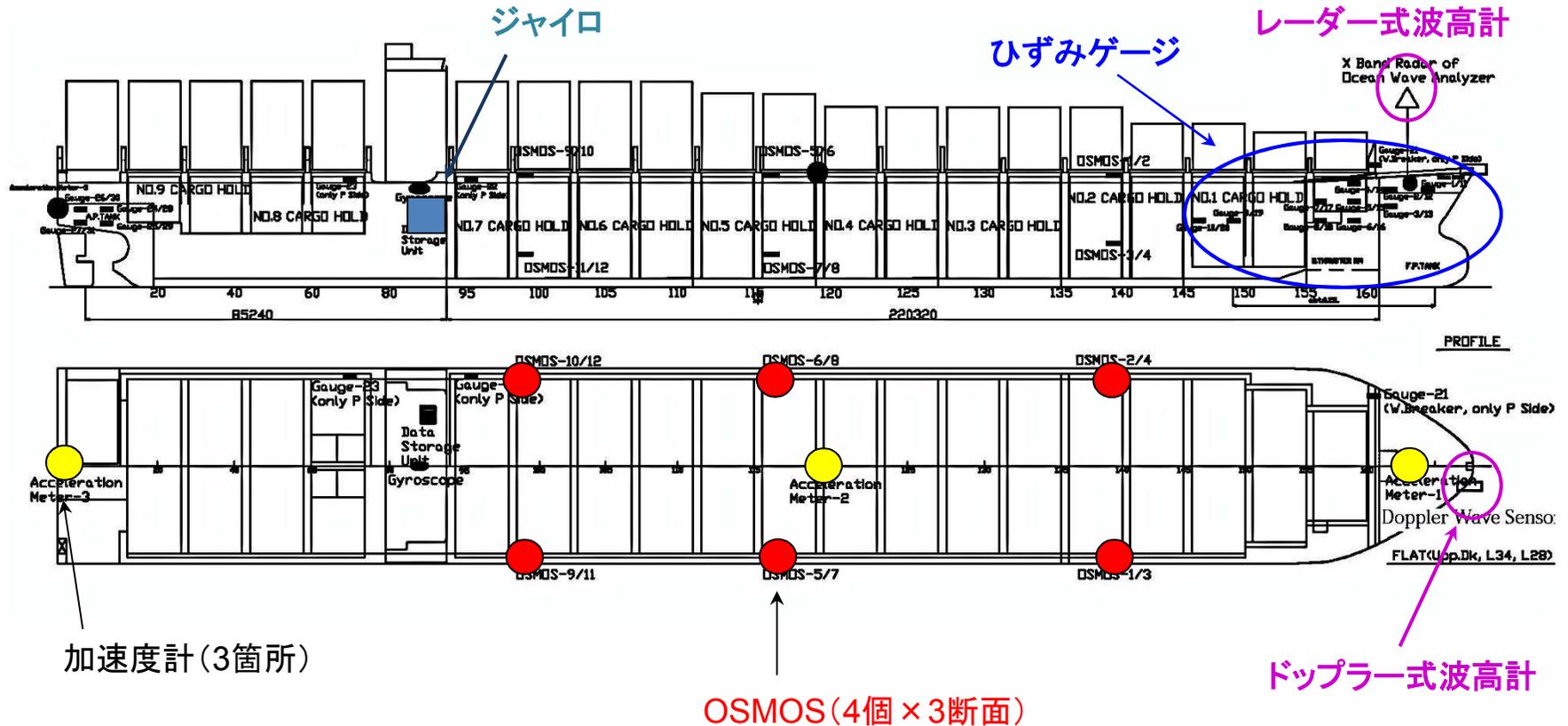
計測項目と計測場所を以下に示す。

計測項目	計測場所
バウ衝撃圧により発生する応力	船首部外板ロンジ
	船尾部外板ロンジ
船長方向応力	ホールド部 3断面
加速度	船首部、中央部、船尾部
船体運動	機関室
海象データ	船首部レーダー
波高データ	船首部(ドップラー式波高計)
船速、船位、主機回転数、主機馬力、 風向、風速、ログブック	本船側から提供

- ・船長方向応力は、前部、中央部、後部ホールドの3断面に、それぞれ4個の光ファイバーセンサー OSMOS (Optical Strand Monitoring System) を設置して計測
- ・ドップラー式波高計は、就航後3年経過した時点で追加

7. 計測機器

計測機器の配置を以下に示す。



8. 航路

本船は、以下 3つの航路に投入されている。

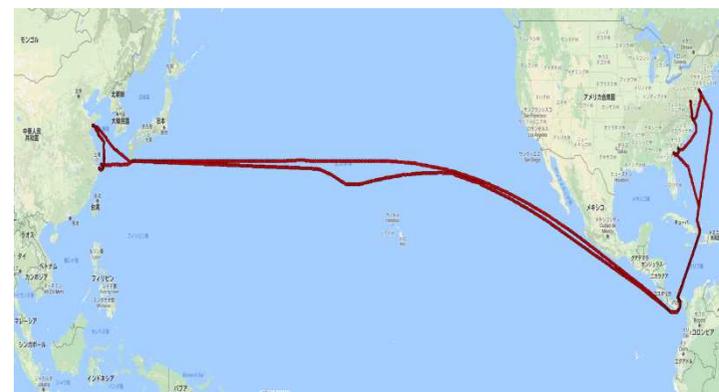
2012.05～2015.05
東南アジア～欧州
(Suez経由)



2015.06～2016.07
東南アジア～北米
(Suez / CapeTown 経由)



2016.08～2017.03
東南アジア～北米
(Panama経由)



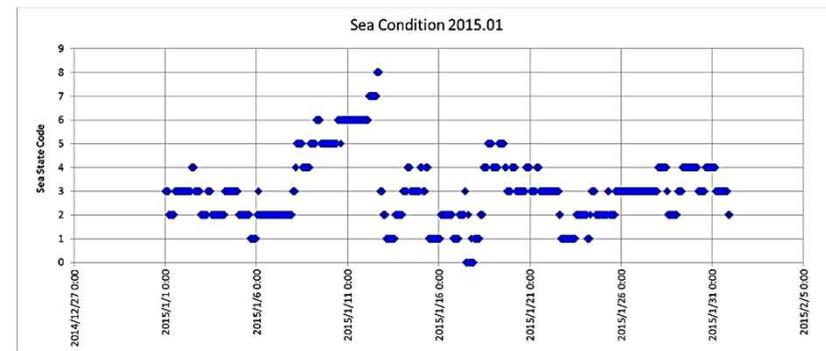
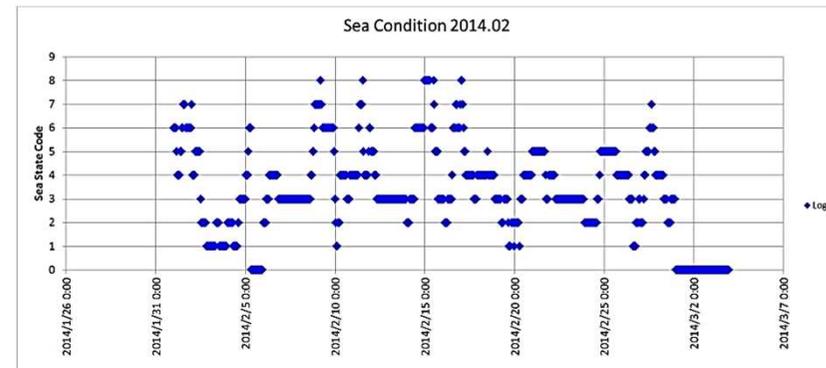
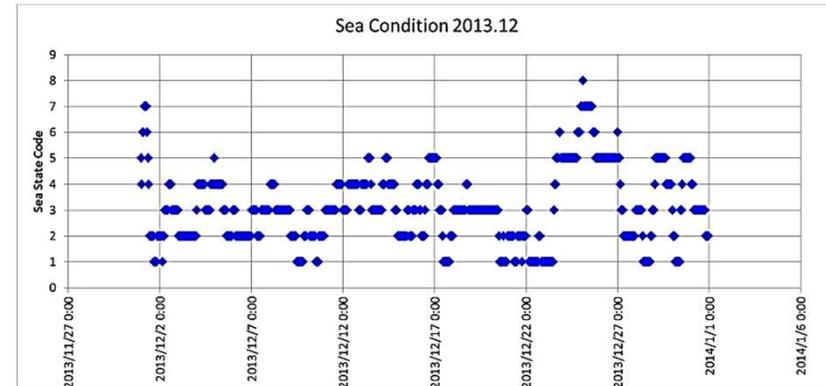
9. SEA CONDITION (1)

本船上ではログブックに1時間毎の Sea Condition (Sea State Code) が記録されている。

計測期間中にログブックに記録された Sea Condition の最大値は、Sea State Code 8 (非常に荒れている Very high) であり、2013年12月、2014年2月、2015年1月に発生している。

右図にそれぞれの月毎の分布を示す。2013年12月と2015年1月は、南シナ海、2014年2月はイギリス沿岸を航行していた。

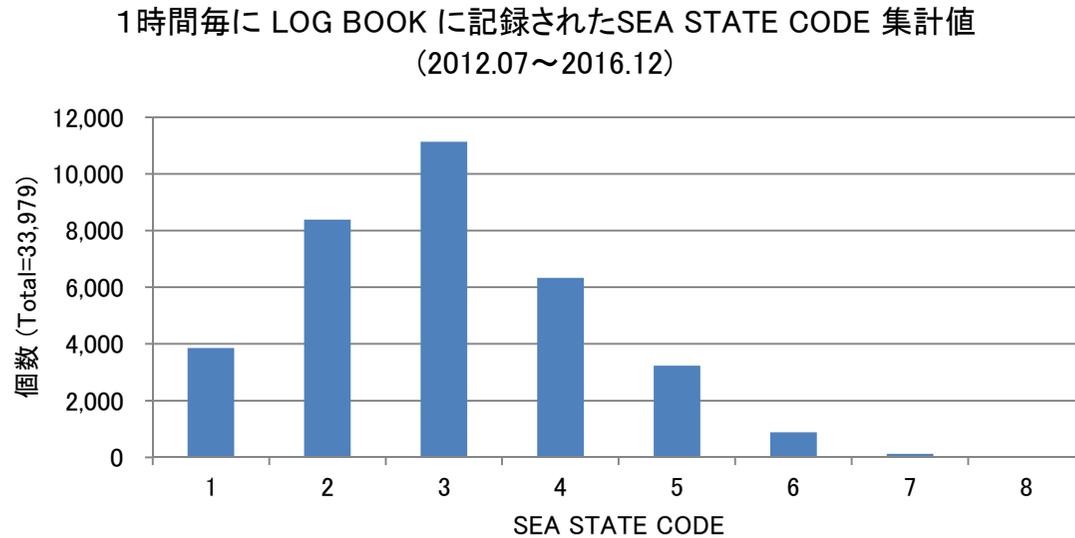
この周辺の海域が冬の時期、厳しくなることがわかる。



9. SEA CONDITION (2)

下図は、ログブックに記録された Sea State Code の頻度を集計した結果である。

Sea State Code 3 が、一番多い。この時、海象は、「やや波がある(Slight)」に相当し、波高にして0.5m～1.25m となる。



波高1.5m (HELSINKI BRIDGEにて)

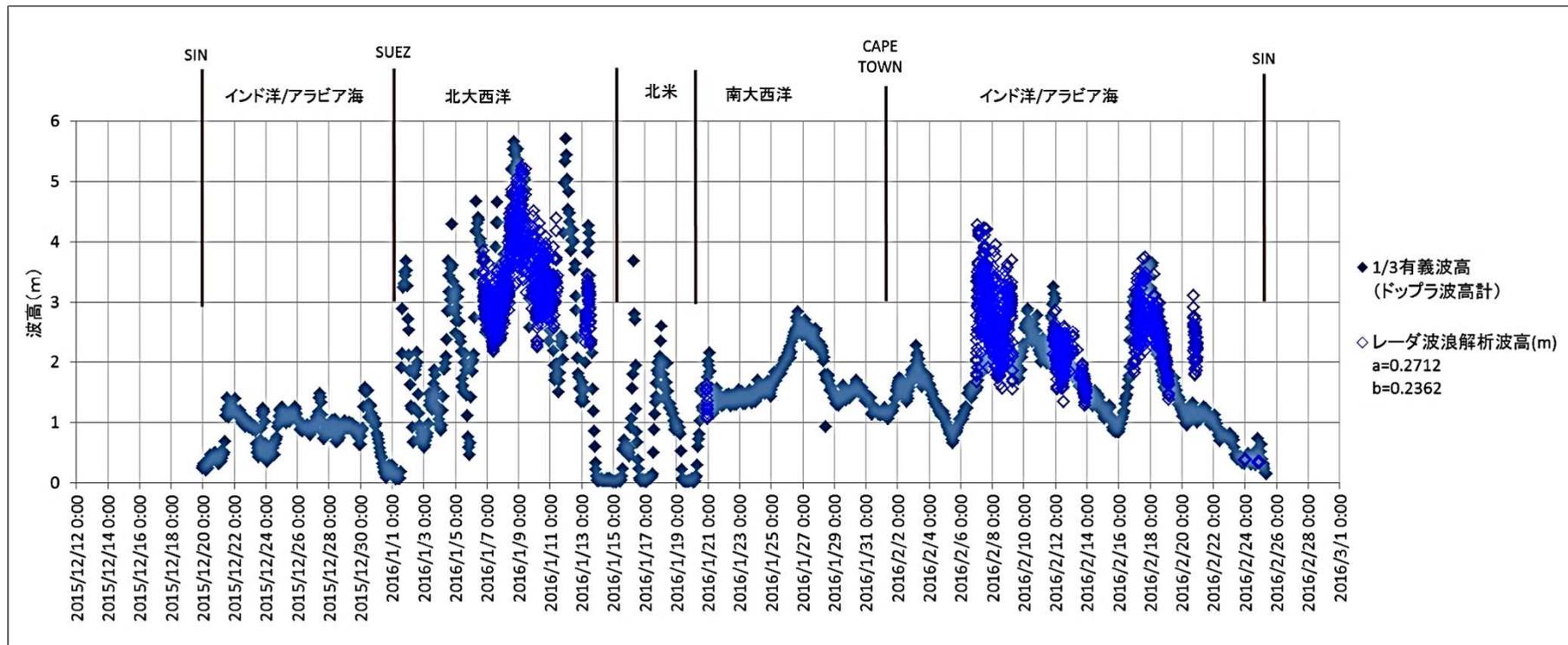
10. 海象データ (1)

下図は、2015年12月～2016年2月 のシンガポール→北米→シンガポールの航路で計測された波高データ(1時間毎の有義値)である。

ドップラー式波高計のデータとレーダー式波高計のデータを示す。

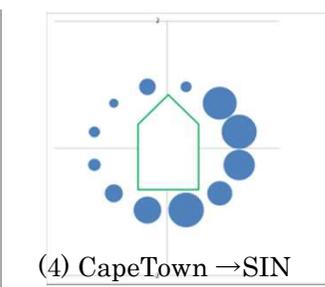
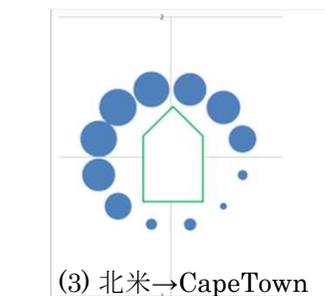
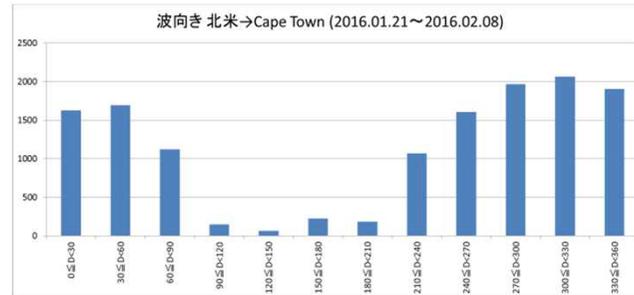
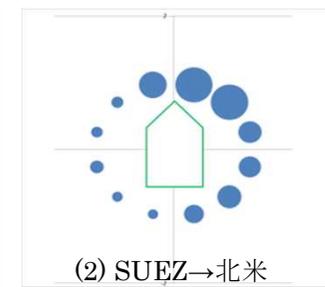
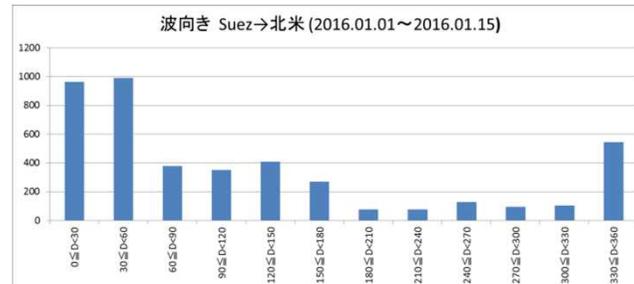
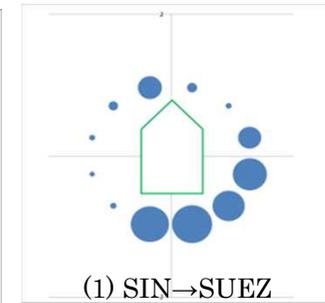
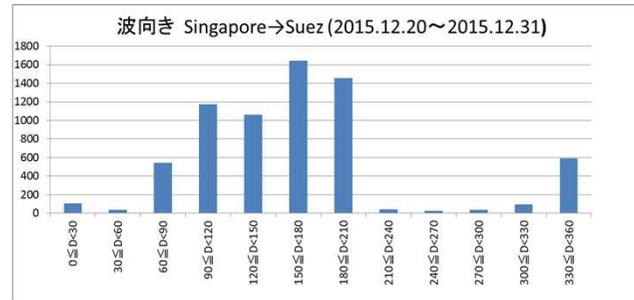
レーダー式波高計のデータは、計測値を修正した結果である。

北大西洋航行時に波高 5mを越える結果が計測された。一方、南大西洋では、波高 3m程度となった。



10. 海象データ (2)

右図は、2015年12月～2016年2月のシンガポール→北米→シンガポール航路での海象データについて、波向きの頻度を集計した結果である。
航路によって、波向きの傾向が異なることがわかる。



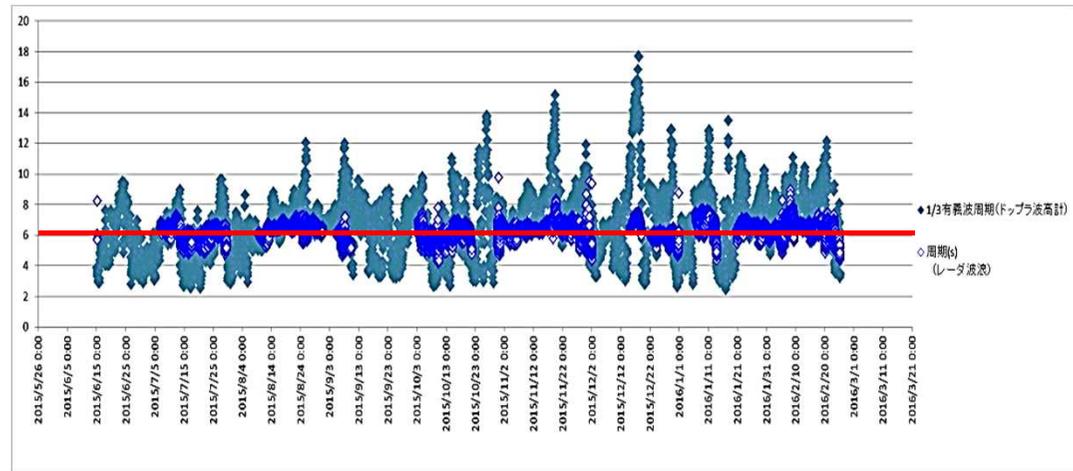
10. 海象データ (3)

右図は、2015年6月～2016年2月に計測された波周期と波長の結果である。この期間の波周期は、右図(上)から、平均で約 6.3 秒、波長は、右図(下)から、平均で約 62m である。

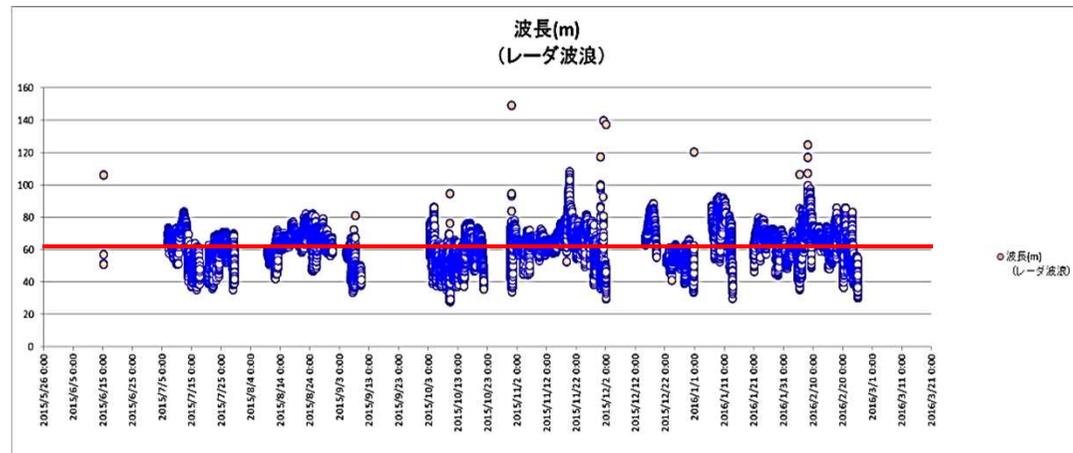
簡易算式

- ・波速 = $\sqrt{g \times \text{波長} / 2\pi}$
- ・波周期 = 波長 / 波速

から、
波長 62m の場合、
波周期 6.3 秒 となり、
計測データは、簡易算式と大
凡一致する。



波周期 (2015.6.15-2016.02.25)



波長 (2015.6.15-2016.02.25)

11. 操船影響 (1)

右図は、海象が比較的厳しかった2016年1月4日 14時～21時の短時間における、波高、船速、主機回転数、進行方向の分布である。

波高が高くなる時間帯に、船速が2ノット程度低下している。この時、主機の回転数も若干下がっていることから、減速運転された可能性がある。

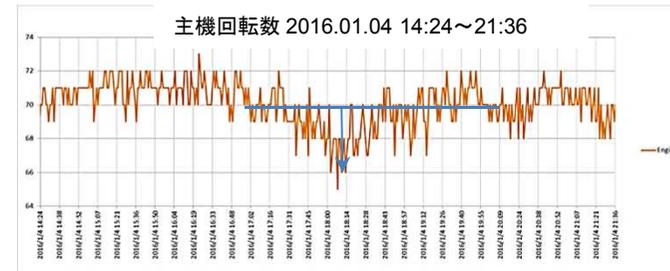
この時の波高は、4.0m程度であった。



波高



船速



主機回転数

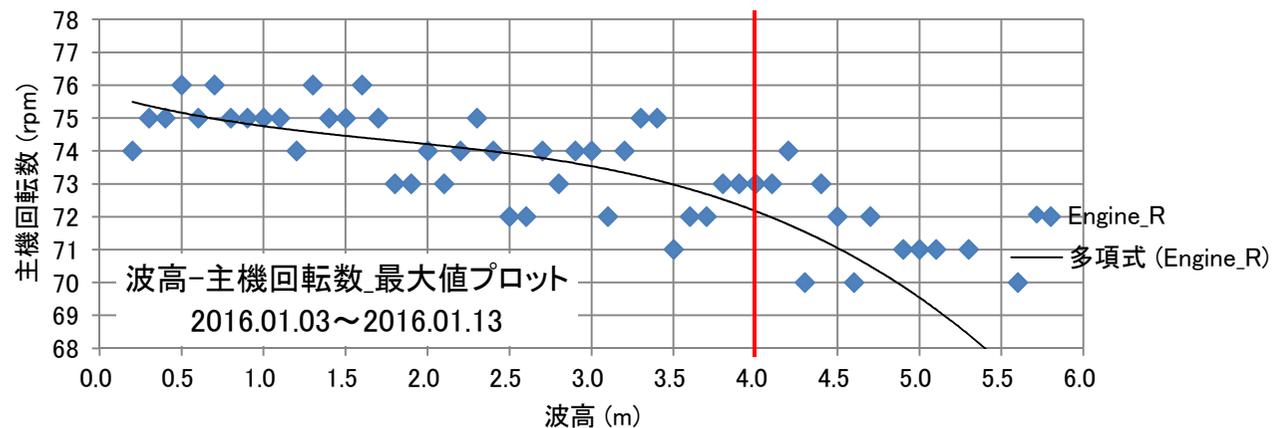
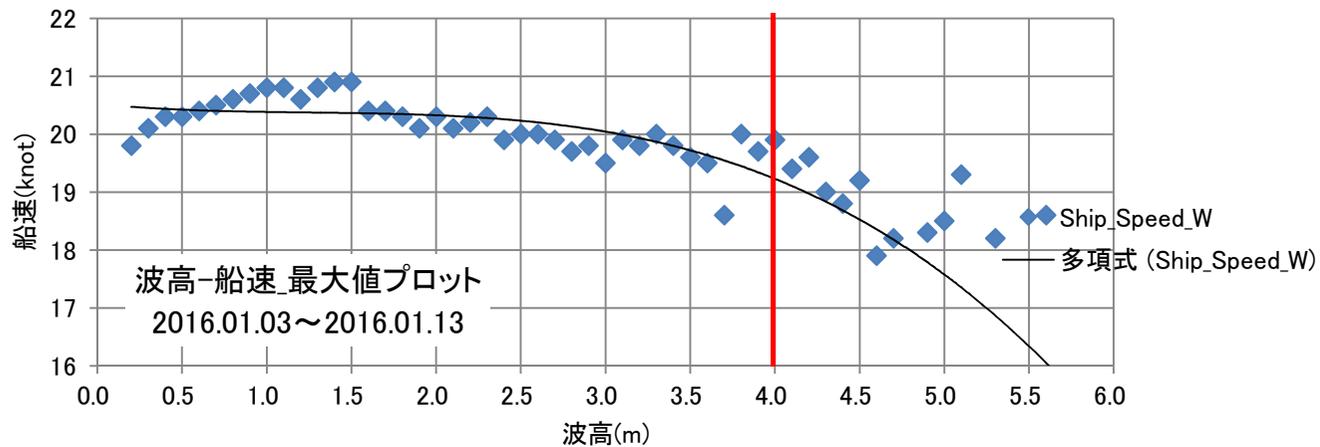


進行方向

11. 操船影響 (2)

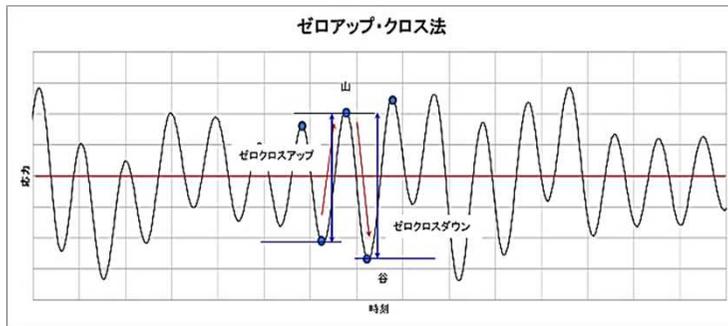
下図は、2016年1月3日から1月13日の波高と船速、波高と主機回転数のそれぞれ最大値をプロットした結果である。

波高が 2.0m を越えた辺りから船速、主機回転数とも少しずつ低下し、波高が 4.0m を越えた辺りから低下が鮮明になる。

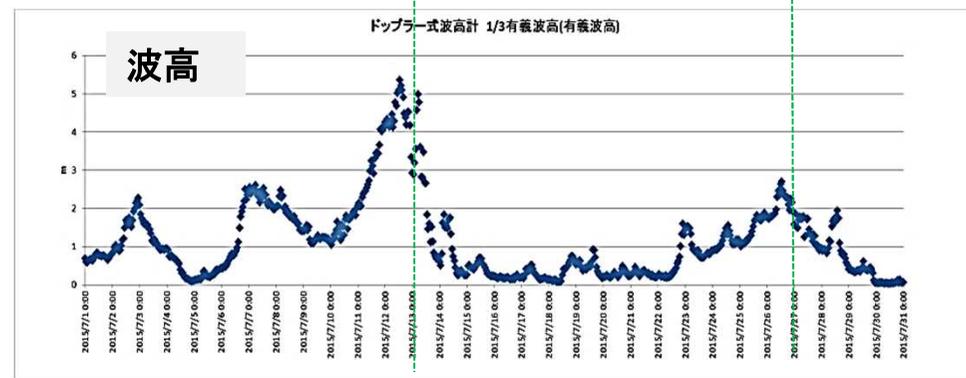
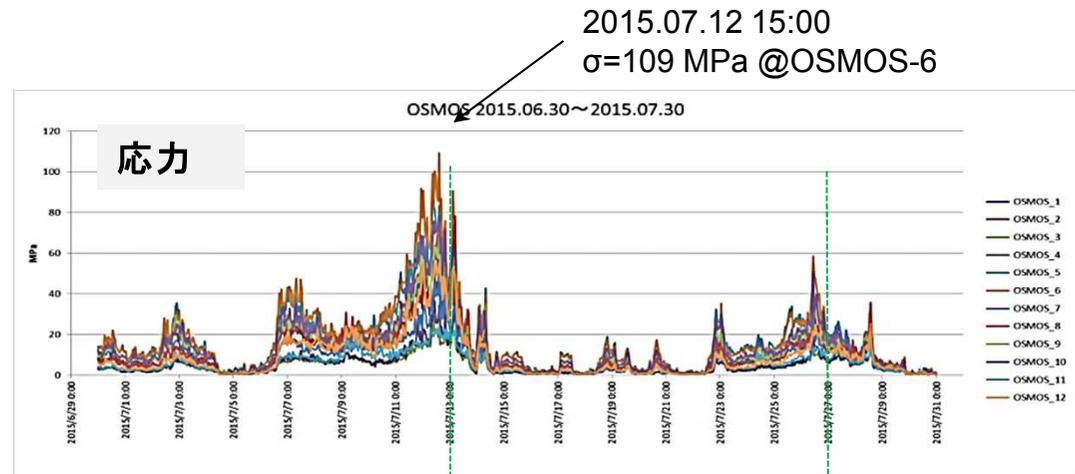


12. 船長方向応力 (1)

OSMOSで計測された船長方向応力について、ゼロアップ・クロス法で応力レンジと波高を計算した結果を下に示す。図は、2015年7月の約1ヶ月間の応力レンジと波高データの分布である。応力値は、1時間毎の最大値、波高は有義値である。波高が大きい日時では、応力値も大きくなり、双方に相関があることがわかる。



ゼロアップ・クロス法による計算



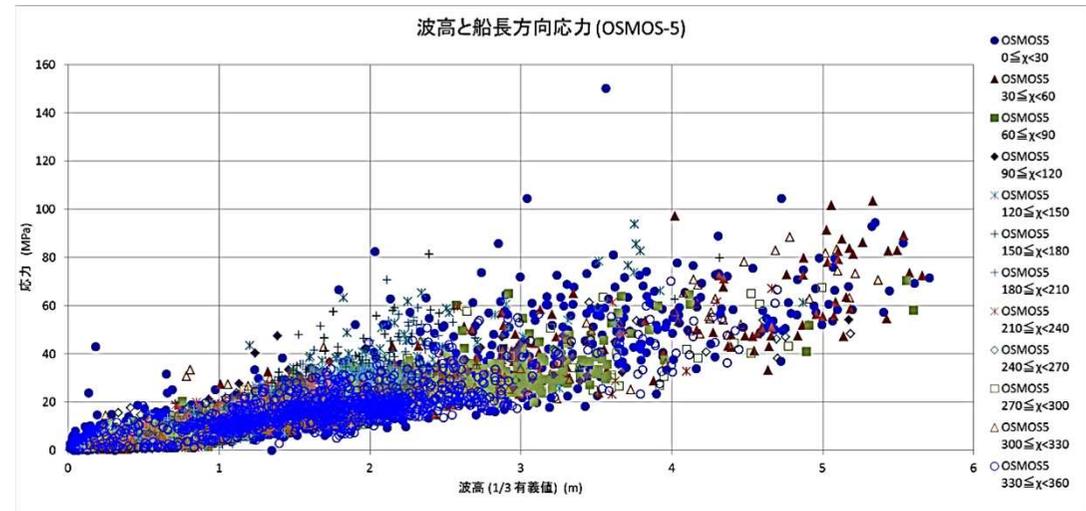
12. 船長方向応力 (2)

右図は、2015年7月～2016年5月の期間における船体中央部デッキ側で計測された船長方向応力の結果である。

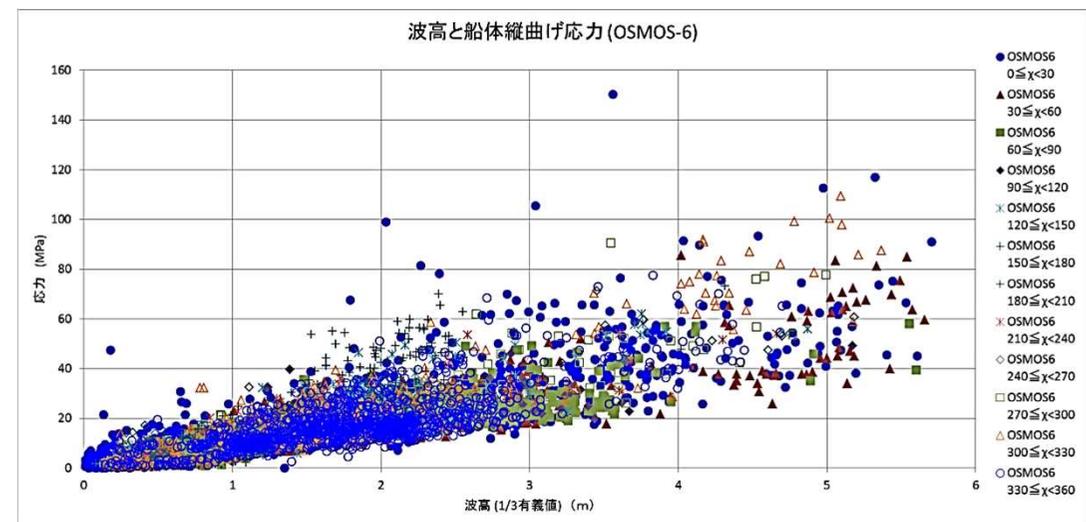
横軸は波高、縦軸は応力として、波向き毎にプロットした。

波高が大きくなるにつれ、応力が上昇する。

数点、離れて大きな応力が発生しているのは、主に波向き 0～30 度の向波状態の時である。



中央部デッキ右舷 船長方向応力と波高 (2015.7-2016.05)



中央部デッキ左舷 船長方向応力と波高 (2015.7-2016.05)

12. 船長方向応力 (3)

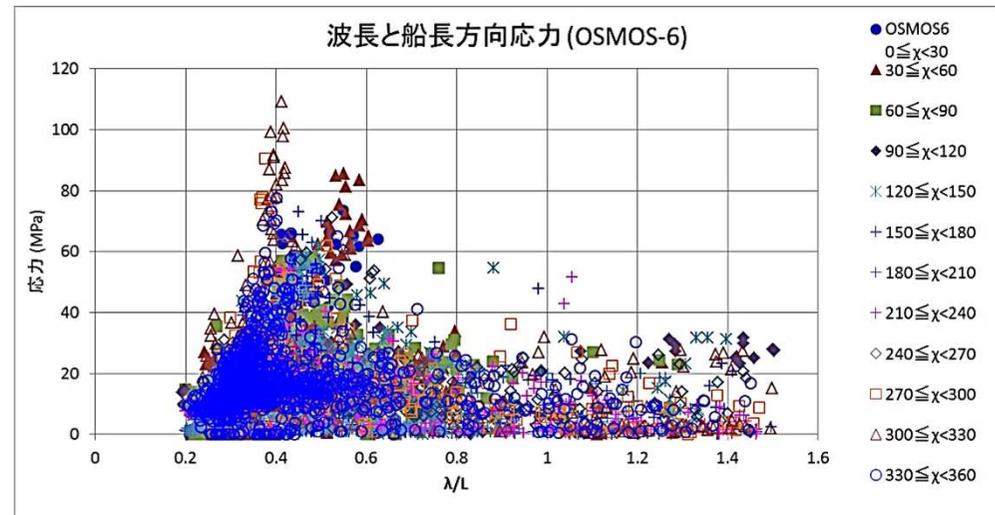
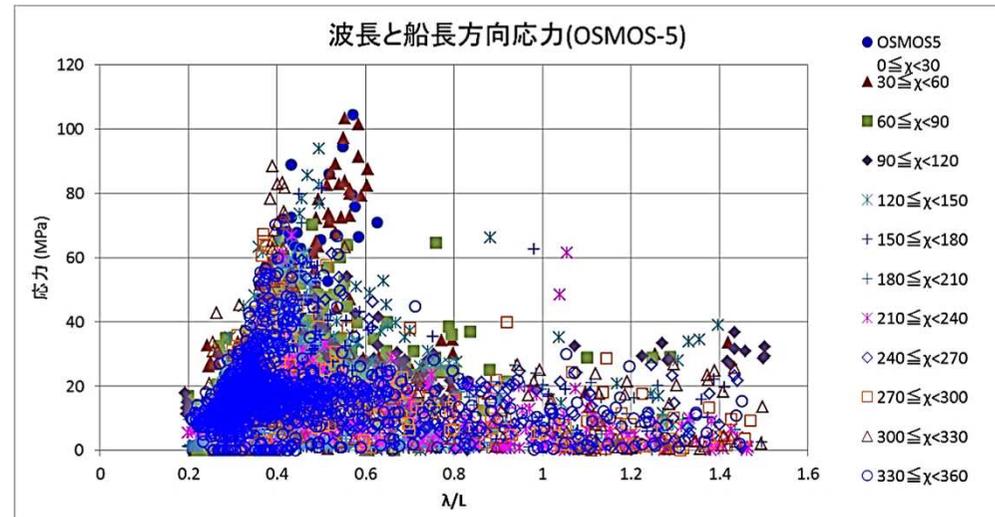
右図は、2015年7月～2016年5月に計測された船体中央部の船長方向応力と波長の関係を波向き毎にプロットした結果である。

それぞれのピーク値を下表に示す。

本船の船体運動計算によると、船体中央部の縦曲げ応力のピークは、波向き0度、波周期約14秒となる。

斜め波(30度)のピークは、波周期約13秒の時である。

波周期に関しては、計測値より計算値の方が若干大きめとなっている。



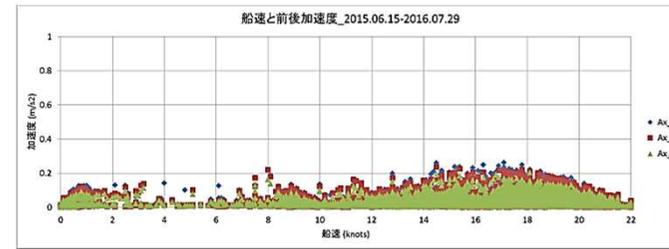
	λ/L 計測値	波周期(簡易式)	波向き
OSMOS-5	0.6 程度(波長 192m)	11 秒	0 ~ 30 度と 30 ~ 60 度
OSMOS-6	0.4 程度(波長 128m)	9 秒	300 ~ 330 度

13. 加速度 (1)

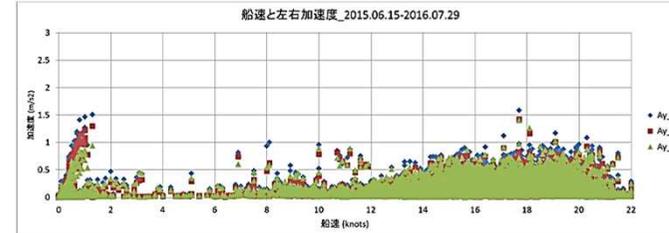
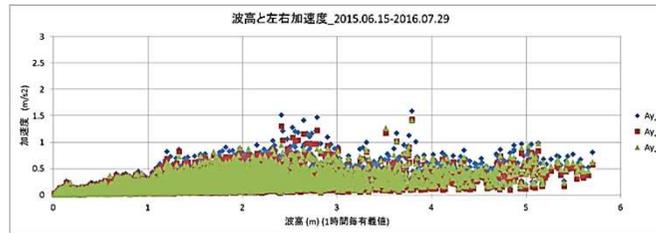
下図は、波高と加速度(左図)、船速と加速度(右図)についてプロットした結果である。上下加速度については、波高が高くなるに従い、加速度も同様に上昇する。

船速と加速度の関係を見ると、上下加速度は、船速が 18 ノット 付近で最大となり、これを越えると加速度が減少している。船速18 ノット以上で航行する場合は、穏やかな海象に限定しているなどの理由が考えられる。

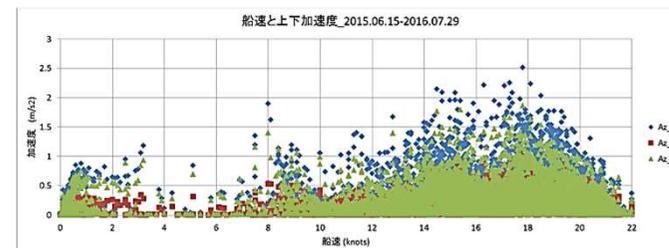
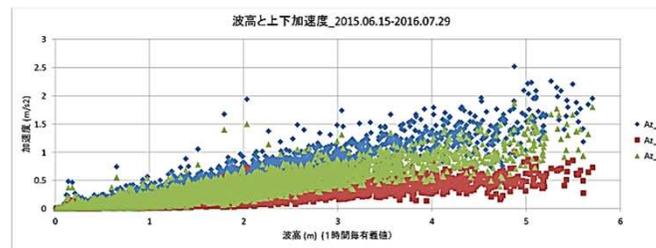
前後加速度



左右加速度

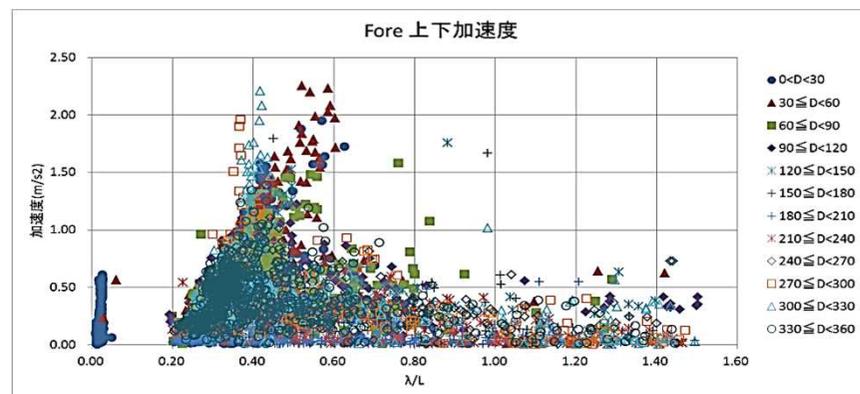
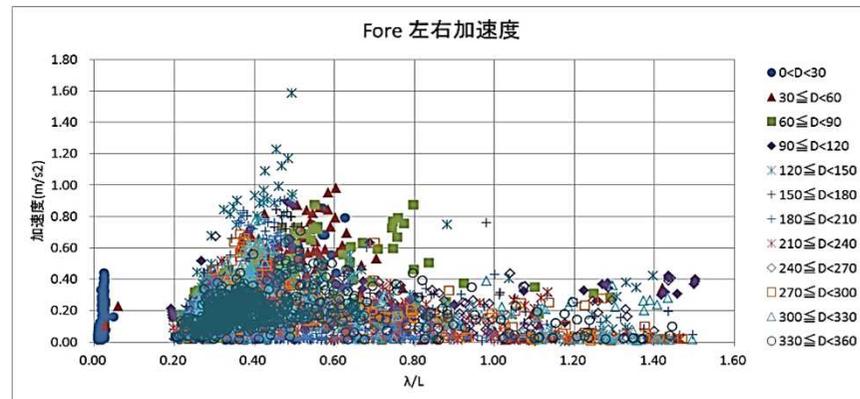
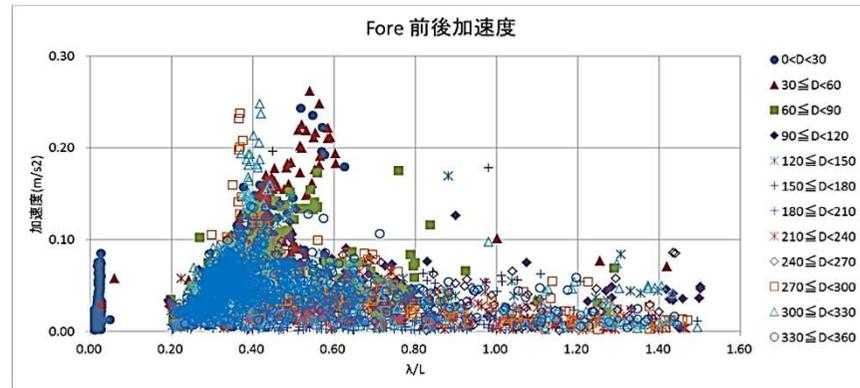


上下加速度



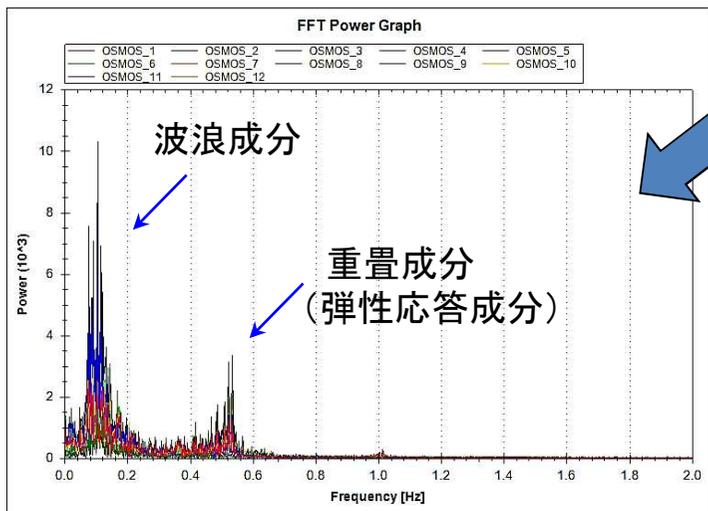
13. 加速度 (2)

右図は、2015年7月～2016年7月の期間における、船首部の加速度(前後、左右、上下)をプロットした結果である。横軸は、波長(λ/L)として、波向き毎に整理した図である。それぞれ、 λ/L が0.4～0.6の時、最大値が生じている。また、前後、上下加速度については、波向きが30～60度、または300～330度の時が最大。左右加速度については、波向き120～150度の時が最大となる。

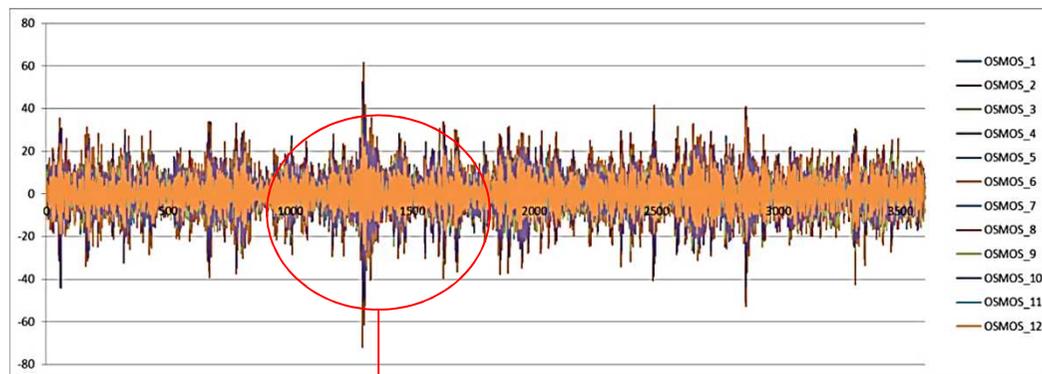


14. ホイッピング(1)

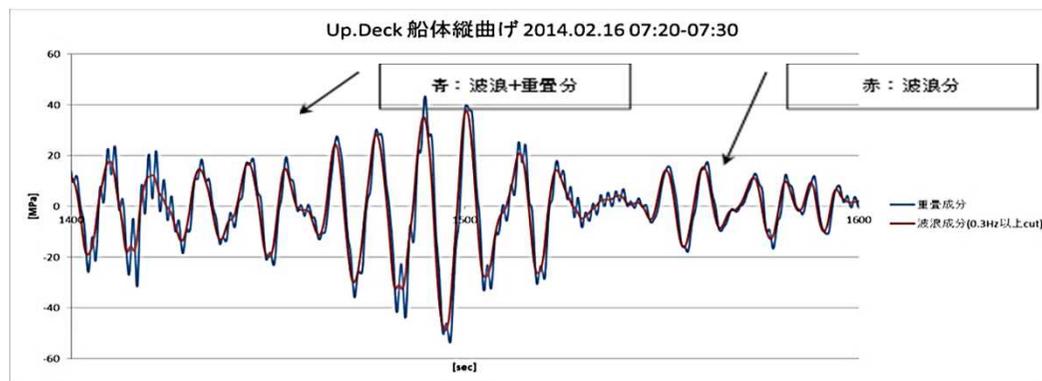
下図(左)はOSMOSで計測された船長方向応力を高速フーリエ変換 (FFT)した結果である。波浪成分(0.1Hz前後)と重畳成分(0.5Hz前後)に明確に分離できる。この重畳成分が、ホイッピング現象に相当するものと考えられる。下図(右)は、OSMOSの応力波形を周波数(0.3Hz)で分けてプロットした図である。波浪成分とは別に細かな波形が発生しており、これがホイッピングによる波形と考えられる。



OSMOS計測値のFFT計算結果



OSMOSによる応力値 (1時間)



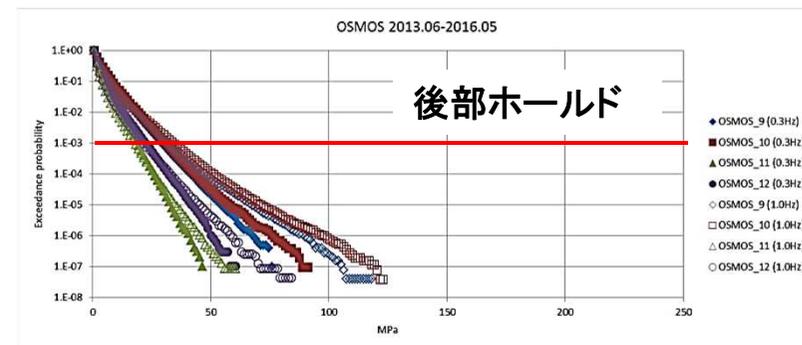
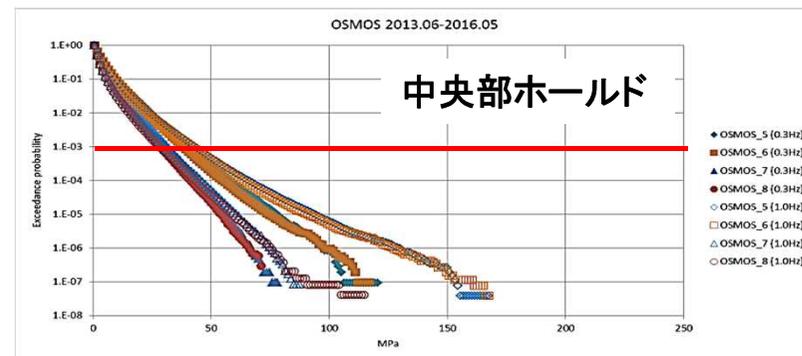
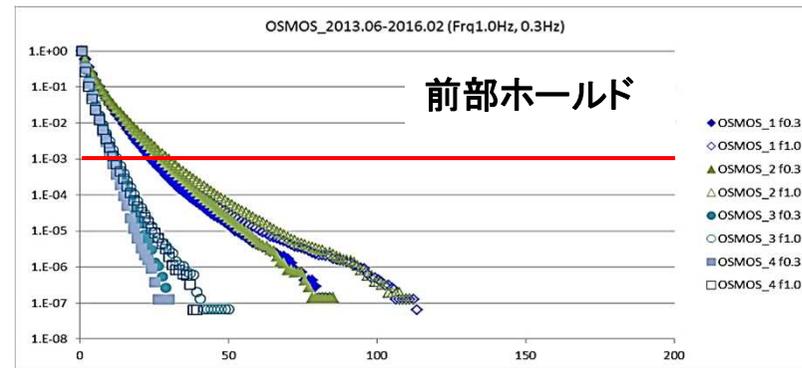
波浪成分(0.1Hz) と重畳成分 (0.5Hz) に分離した結果

14. ホイッピング(2)

波浪成分(Freq. 0.3Hz以下)と重畳成分(波浪+船体振動成分(Freq.1.0Hz))の2ケースについて船長方向応力の累積頻度を算出した結果を右図に示す。この図から、発現確率が 10^{-3} を越える辺りから両者に差が出てくることわかる。つまり 10^{-3} 辺りからホイッピングによる縦曲げ応力影響が出てくると考えられる。

下表は、 10^{-7} レベルの応力値である。波浪成分と重畳成分の比は、1.3~1.4程度となった。

	0.3Hz	1.0Hz	1.0Hz/0.3Hz
OSMOS-1	84	112	1.33
OSMOS-2	85	111	1.31
OSMOS-3	28	40	1.43
OSMOS-4	29	37	1.28
OSMOS-5	105	153	1.46
OSMOS-6	111	153	1.38
OSMOS-7	74	84	1.14
OSMOS-8	71	90	1.27
OSMOS-9	75	103	1.37
OSMOS-10	87	118	1.36
OSMOS-11	46	54	1.17
OSMOS-12	58	70	1.21

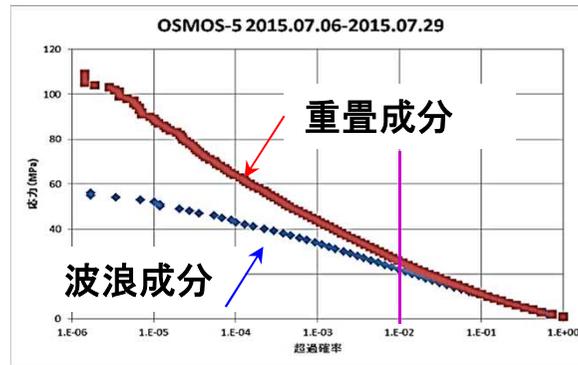


船長方向応力値の累積頻度

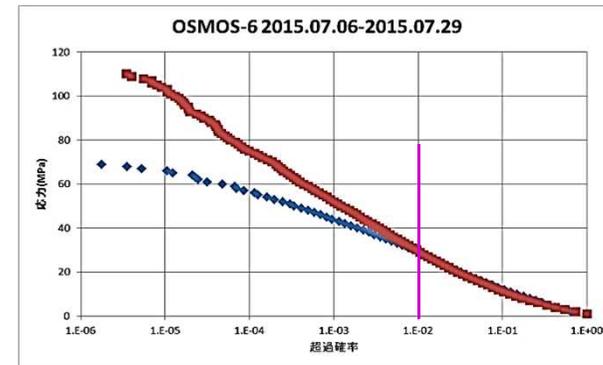
14. ホイッピング(3)

下図は、航路別に周波数 0.3Hz で分離して、累積頻度をプロットした結果である。10⁻³ 辺りから重畳成分と波浪成分に乖離が生じる。また、航路によって傾向が異なることがわかる。

西向き航路
(東南アジア→北米)

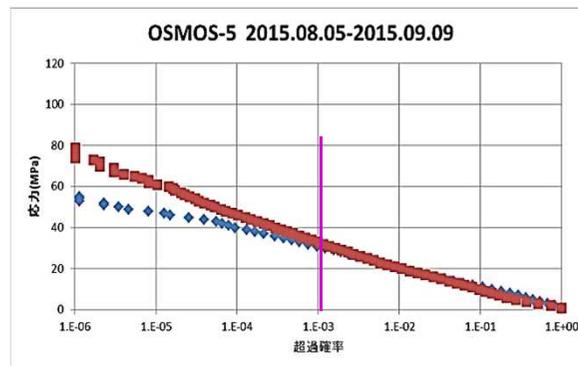


2015.07.06~2015.07.29
(重畳成分 N=1,046,823、波浪成分 N=291,062)

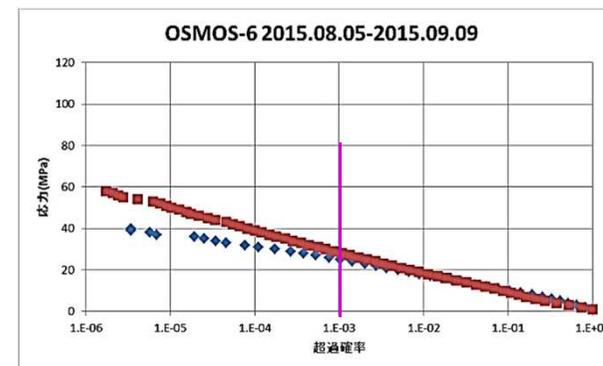


2015.07.06~2015.07.29
(重畳成分 N=997,048、波浪成分 N=283,110)

東向き航路
(北米→東南アジア)



2015.08.05~2015.09.09
(重畳成分 N=1,474,962、波浪成分 N=433,417)



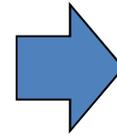
2015.08.05~2015.09.09
(重畳成分 N=1,451,129、波浪成分 N=436,282)

15. ねじりモーメント

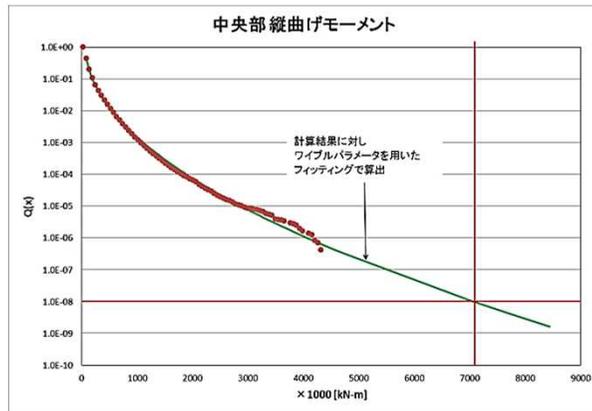
限定的な範囲であるが、船体中央部断面
で計測した応力値から

- ・波浪中縦曲げモーメント M_V
- ・波浪中水平曲げモーメント M_H
- ・波浪中ねじりモーメント M_W
- ・波浪中軸力 F_A

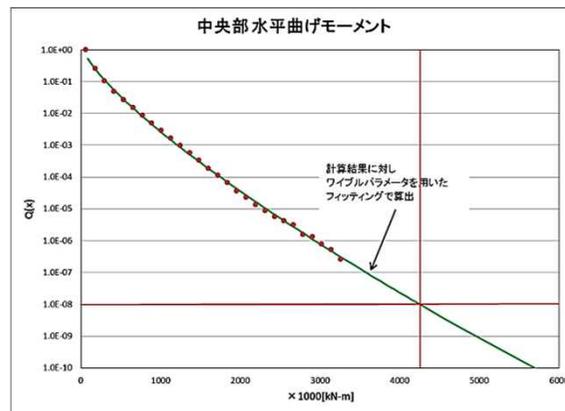
の4成分外力に分離して、その
長期予測値(10^{-8})を計算した。
下図に3成分の結果を示す。



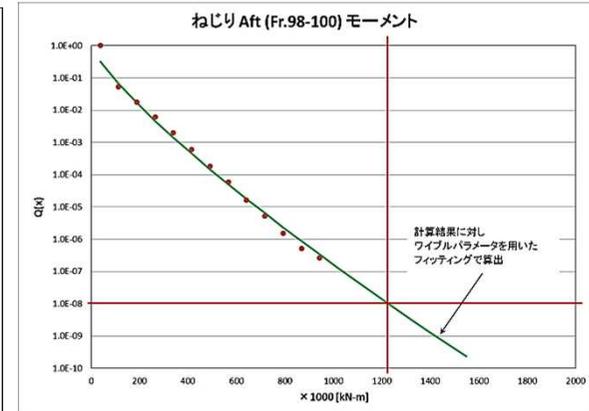
ストリップ法による船体運
動計算結果の長期予測値
に対し、それぞれ60~70%
程度となった



波浪中縦曲げモーメント
(純粋な縦曲げ成分)



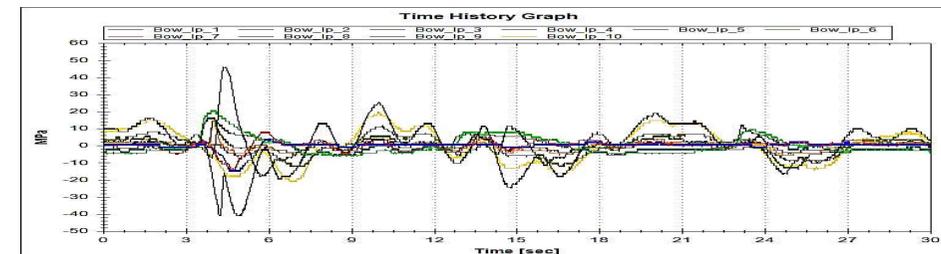
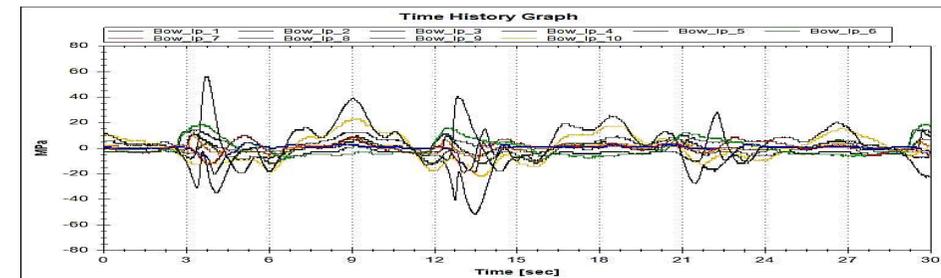
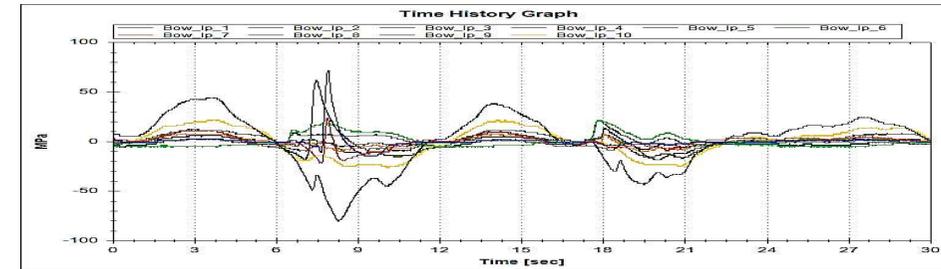
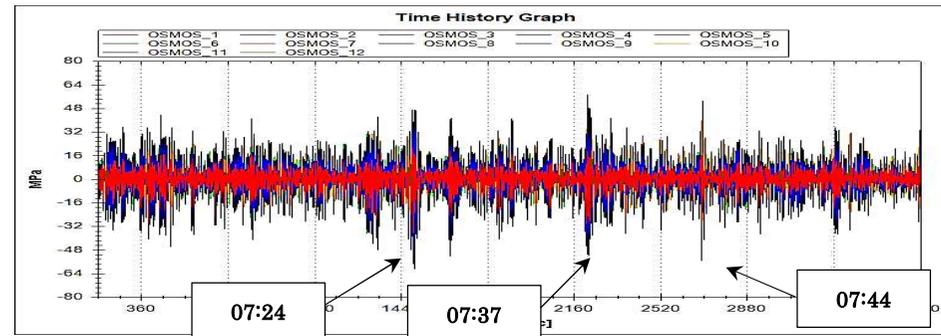
波浪中水平曲げモーメント



後部(0.32L)ねじりモーメント

16. 船首部衝撃圧 (1)

右図は、海象が厳しかった 2014 年 2月16日の 07:00~08:00に計測された船長方向応力のグラフである。幾つかのピークが見られる。同時刻にバウで計測された応力応答のグラフが下3つの図である。バウの衝撃圧が船体応答に影響すると推測できる。



①衝撃圧による応力
2014.02.16 07:24:48~07:25:18

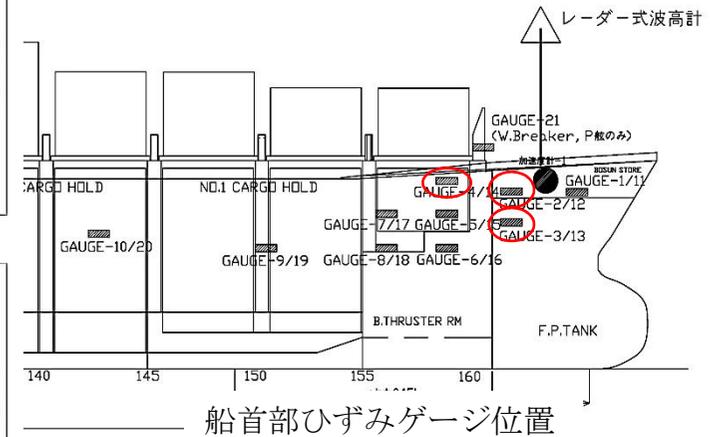
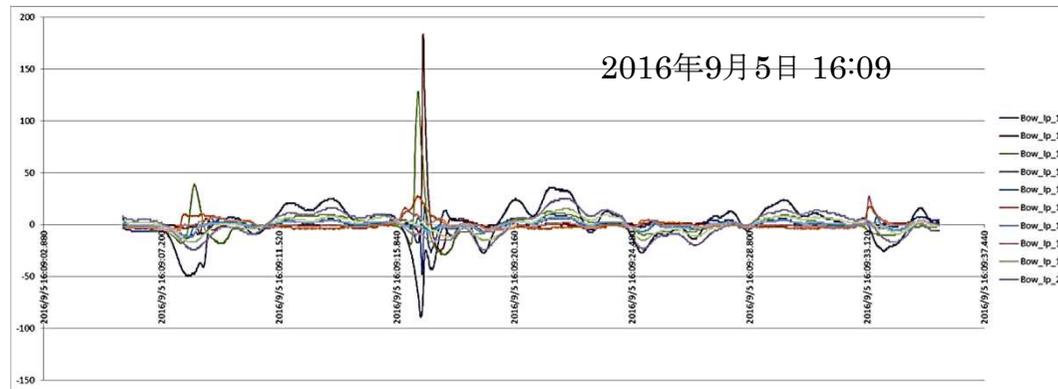
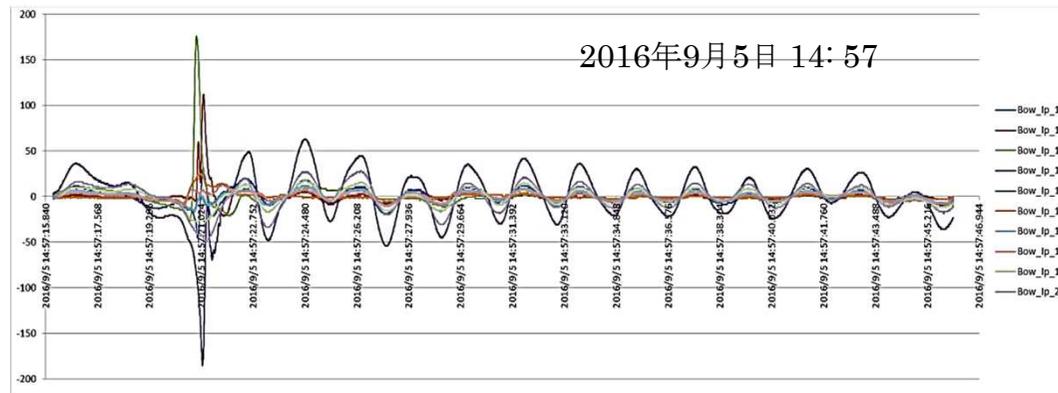
②衝撃圧による応力
2014.02.16 07:36:49~07:37:19

③衝撃圧による応力
2014.02.16 07:44:49~07:45:19

16. 船首部衝撃圧 (2)

下図は、2016年9月5日に計測されたバウ衝撃圧による応力値である。それぞれ、ゲージ番号IP-12, IP-13 で突出した引張り応力が発生している。

右図のゲージ位置から見て、衝撃圧が比較的狭い範囲に集中して発生した事が推測できる。

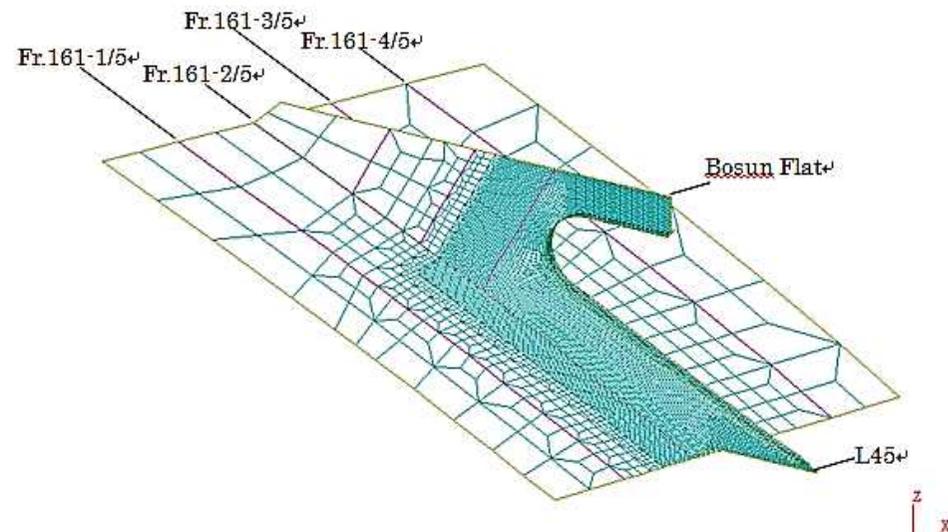


16. 船首部衝撃圧 (3)

今回の計測で、衝撃圧によって発生する応力は計測することができた。しかし、荷重の位置、範囲を特定できていないため、衝撃荷重の特定には至っていない。

あくまでも推定であるが、例えばIP-13におけるFEM計算では、単位圧力 10 ton/m^2 を負荷した時、計測点であるフェース面に発生する応力は 37 MPa となる。

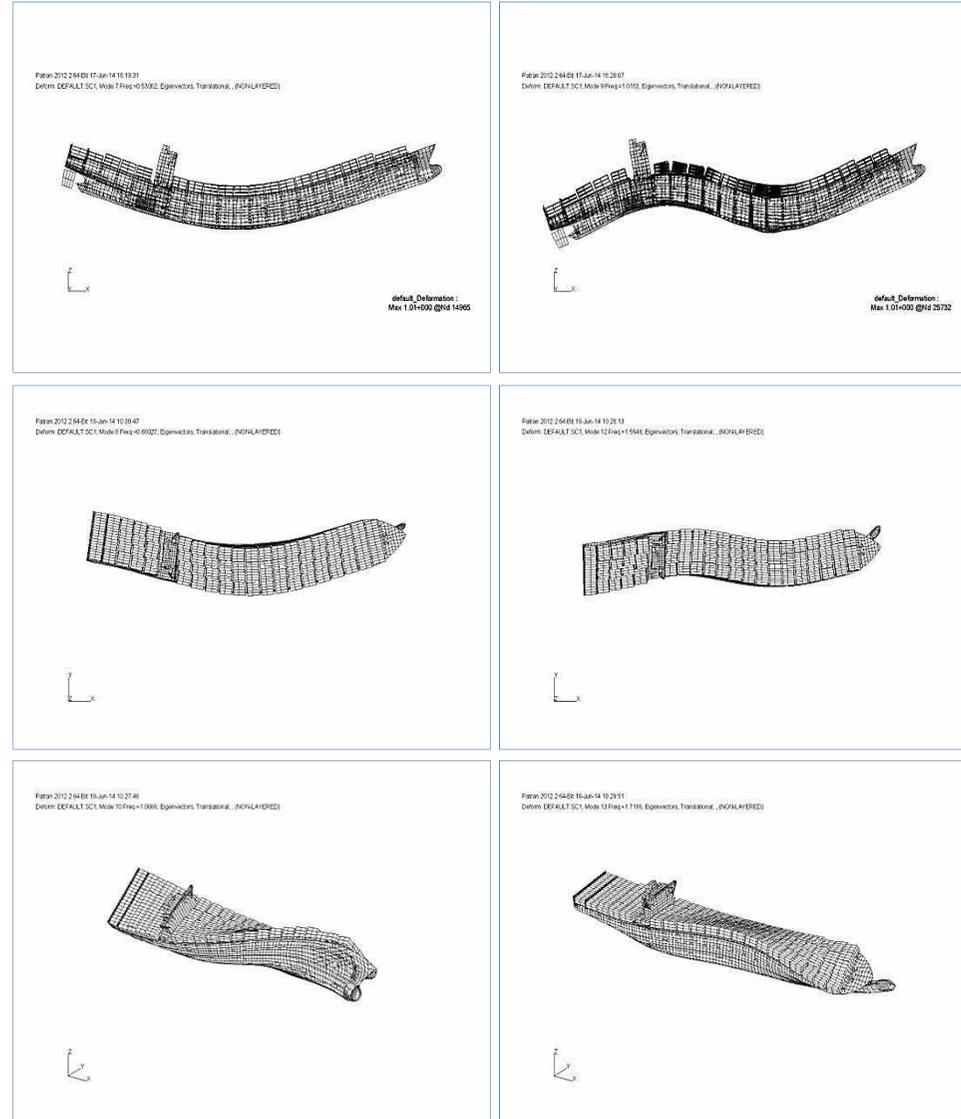
計測された応力値が 170 MPa の場合、約 46 ton/m^2 の圧力が生じた計算になる。



17. 固有値振動計算

全船FEMモデルを用いた固有値振動計算を実施した。計算コンディションは満載状態である。結果を右図に示す。

船体縦曲げ2節振動は、0.5Hzであり、応力計測値のFFTピーク値とほぼ一致する。計算結果の妥当性を確認した。

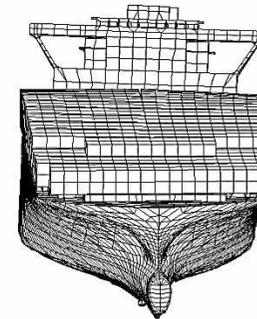


18. 過渡応答計算

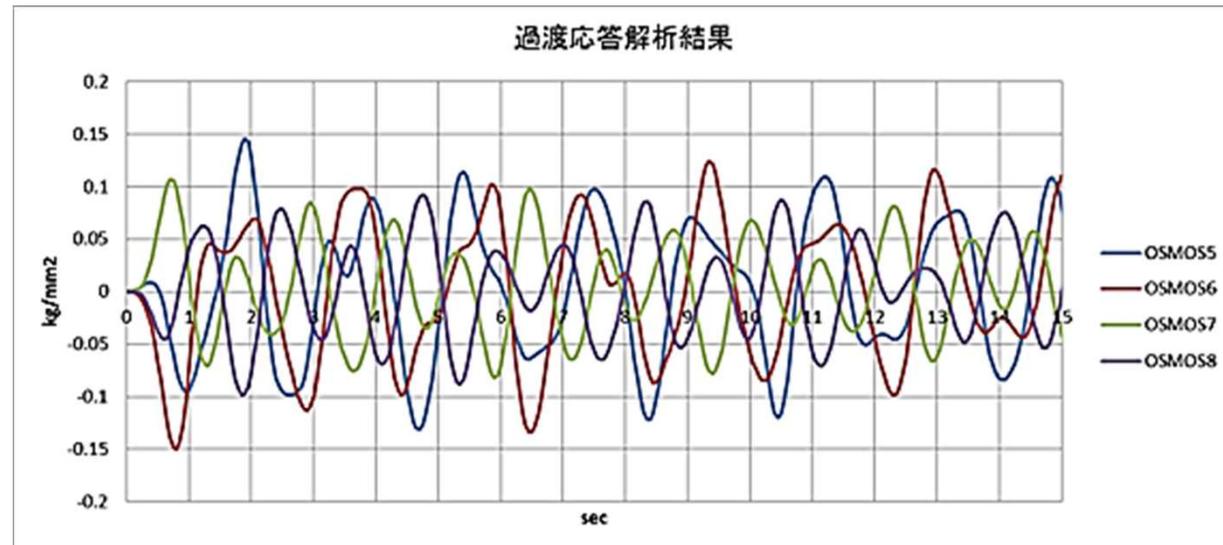
全船FEMモデルを用いて過渡応答計算を実施した。荷重は、バウの適当な位置に単位荷重を負荷。下のグラフは、船体中央部 応力計測位置の応力応答である。

計測結果と同様、左右舷で位相差が見られ、バウ衝撃圧負荷時の船体応答が過渡応答計算でシミュレーションできる可能性を確認した。

Deform: harou, A1:Time = 1.9, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



default_Deformation :
Max: 1.21+001 @Nd 3472



船体中央部 応力計算結果

19. まとめ

(1) 全般

- ① 約5年間の計測を通し、船長方向応力など繰り返し数が 10^7 回を越えるデータが取得できた。
- ② ログブックのSea Condition、船体応力、加速度の計測結果から見て、本船は、全体的に比較的穏やかな海象で運航されていたと考えられる。

(2) ホイッピング

船体縦曲げ応力の波浪成分と重畳成分(ホイッピング含む)の割合が航路により異なることがわかった。また、 10^{-7} レベルにおける船長方向応力比は、重畳成分が波浪成分の1.3~1.4倍となった。

(3) 操船影響

波高 4mを越えた辺りから、減速運転されている可能性がある。操船の影響とバウ衝撃圧の相関については、さらに詳細な検討が必要である。

(4) ねじりモーメント

OSMOSの計測値から、船体縦曲げモーメント、水平曲げモーメント、ねじりモーメント、軸力の成分に分離した。その長期予測の結果は、それぞれ設計値の6割~7割程度となった。分布については、さらに検討が必要である。

以上