船舶上部構造振動の分析評価及び予測法の構築

高見　朋希*，岡　正義*，村上　睦尚*，松井　貞興*，有馬　俊朗*，市川　泰久**，
平田　宏一**，上入佐　光***

Construction of Analysis, Assessment and Prediction Method for Ship Superstructure Vibration

by

Tomoki TAKAMI, Masayoshi OKA, Chikahisa MURAKAMI, Sadaoki MATSUI, Toshiro ARIMA,
Yasuhisa ICHIKAWA, Koichi HIRATA, and Hikaru KAMIIRISA

Abstract

To evaluate/predict the ship vibration is among the important problem for ship designers. Although the full scale finite element analysis has been widely adopted in practice, accurate prediction of the ship vibration is still recognized as difficult. To construct an efficient prediction method for ship vibration, in this paper, an investigation into the vibration of superstructure of ships in service is first made by collecting the onboard measured data from various ships. The root mean square (RMS) values are calculated from the measurement, then those are compared with two ISO standards, i.e. ISO6954:2000 and ISO20283-5:2016. It turned out that the rate of exceedance of the RMS values over the ISO standards significantly depends on the area division and ship type. Next, focusing on typical measurement points those have represented high RMS values, a series of spectrum analyses is made via FFT. Through this analysis, the decisive factors from which high RMS value is conduced are identified. Finally, utilizing the onboard measured data, a prediction method for RMS values based on a backpropagation based neural network technique is proposed. The area division, ship type, principal particulars, and engine information are used for input layer. Consequently, an effectiveness of the present prediction method is confirmed by comparing with the measured RMS values.

＊　構造安全評価系，＊＊ 環境・動力系，＊＊＊ 流体設計系
原稿受付　2019 年 5 月 7 日
審 査 日　2019 年 6 月 11 日

目　次

1. まえがき ····· 64
2. 就航船の振動計測データ ····· 65
2.1 振動許容値及び計測データ概要 ····· 65
2.1.1 振動許容値 ····· 65
2.1.2 就航船振動データ概要 ····· 66
2.2 データ解析 ····· 67
2.2.1 全体的な傾向 ····· 67
2.2.2 船種による整理・解析 ····· 69
3. スペクトル解析 ····· 70
3.1 概要 ····· 70
3.2 評価対象データ ····· 71
3.3 スペクトル解析結果と考察 ····· 71
4. ニューラルネットワークを用いた予測法 ····· 75
4.1 手法概要 ····· 75
4.2 予測結果と考察 ····· 76
5. まとめ ····· 77
謝辞 ····· 78
参考文献 ····· 78

1.　まえがき

近年 ISO の見直しが行われ，商船を含む船体振動の許容値が見直される見込みとされている．具体的には，例えば船体の居住区（Crew accommodation area）における振動の許容 RMS（root mean square）値は，従来の ISO6954:2000[1)]における 6mm/s から ISO20283-5:2016[2)]では 3.5mm/s に引き下げられた（図１）． そのため，実船データの計測箇所や船種に応じた傾向を捉え，ISO の振動許容値の実現性を評価する必要がある．

現在，各造船所における振動予測は全船 FE 解析が主流である．しかし FE 解析では上部構造単体レベルでは予測可能であると言われているが，実船を対象とすると特に減衰率の推定が困難なため，その予測精度が十分ではないとされている．そこで本研究では，まず，就航船における上部構造の振動計測データを様々な船種について収集し，振動 RMS 値と各種パラメータとの関係を調査した．次に，振動 RMS 値の高い計測データ数点を対象にスペクトル解析を実施し，その主要因を調べた．さらに，機械学習の一種であるニューラルネットワークを用いた振動 RMS 値の予測法を提案し，実測データとの比較による検証を行った．

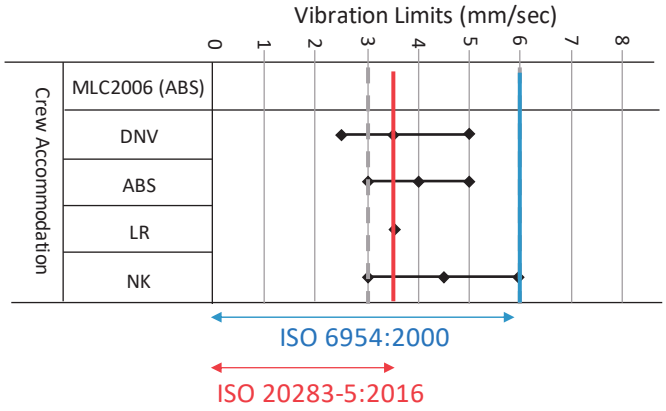


図 1　振動許容値（RMS 値）の比較

2.　就航船の振動計測データ

2.1 振動許容値及び計測データ概要

2.1.1　振動許容値

現行の ISO6954:2000 に規定されている基準値を図 2 に示す．ISO6954:2000 では，基準値として上限値(upper value)と下限値(lower value)を規定しており，許容値としては上限値を用いることが多い．ISO 20283-5:2016 に規定されている許容値を図 3 に示す．図 3 左図は，ISO20283-5:2016 で新しく定義された要件であり，図 3 右図の許容値を一部緩和する規定である．なお RMS 値の求め方は，ISO6954:2000 と ISO 20283-5:2016 で共通していおり，速度 $v(t)$の場合，RMS 値 v_{rms} は(2.1)式による．

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2\,dt} \tag{2.1}$$

なお本研究においては，エリア区分の略称は表 1 に従う．

	Area classification					
	A		B		C	
	mm/s²	mm/s	mm/s²	mm/s	mm/s²	mm/s
Values above which adverse comments are probable	143	4	214	6	286	8
Values below which adverse comments are probable	71.5	2	107	3	143	4

図 2　ISO6954:2000 の基準値

Type of occupied space	Guideline value
Crew spaces	
Crew accommodation	3,5 mm/s 125 mm/s^2
Work spaces	6,0 mm/s 214 mm/s^2
Offices	4,5 mm/s 161 mm/s^2
Navigation bridge and engine control room	5,0 mm/s 179 mm/s^2
Open-deck recreation spaces	4,5 mm/s 161 mm/s^2
Passenger spaces	
Cabins and public spaces	3,5 mm/s 125 mm/s^2
Open-deck recreation spaces	4,5 mm/s 161 mm/s^2

Type of occupied space for which 10 or more exist on a deck	Maximum ratio of measured spaces with exceeding vibration	Maximum allowed exceedance
Crew spaces		
Crew accommodation	10 %	1,0 mm/s 36 mm/s^2
Work spaces		
Offices		
Open-deck crew recreation spaces		
Passenger spaces		
Cabins and public spaces	10 %	1,0 mm/s 36 mm/s^2
Open-deck recreation spaces		

図 3　ISO20283-5:2016 の許容値

表 1　エリア区分と略称

ISO20283-5:2016	abbreviation	ISO6954:2000
1.　Crew accommodation	CA	B (Crew accommodation areas)
2.　Workspace	WS	C (Working areas)
3.　Office	OFFICE	B (Crew accommodation areas)*
4.　Navigation Bridge	NB	C (Working areas)
5.　Engine control room	ECR	C (Working areas)*

2.1.2　就航船振動データ概要

就航船振動データの概要を表 2 に示す．振動データは X,Y,Z 方向に分離して収集した．また，サンプル船の船種の割合を，計測点数ベースで図 4 に示す．オイルタンカー(OT)に継いでバルクキャリア(BC)が多く，数は少ないが PCC，PSV や FERRY も含まれている．

表 2　就航船振動データの概要

隻数	162 隻
計測点数	2846 箇所（うち時系列あり 314 箇所） （ただし，X，Y，Z の方向によって数が異なる）
計測時期	2004 年～2016 年

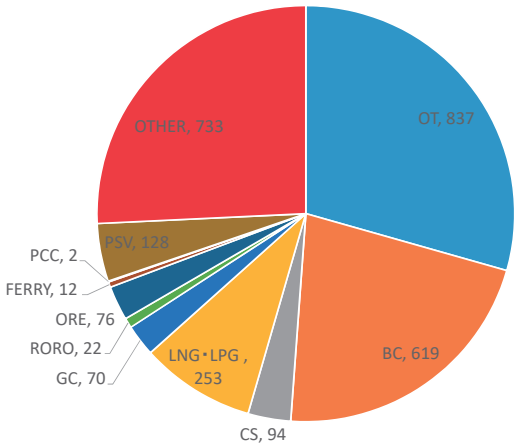


図 4　船種ごとの計測点数

2.2 データ解析

2.2.1　全体的な傾向

図 5 に X,Y,Z のうち最大（図中では MAX と記す．以下，特に断りをしない場合，「RMS 値」は「X,Y,Z のうち最大の RMS 値」を表すこととする）の RMS 値と各パラメータとの相関を示す．上甲板からの計測点の高さには相関が見られ，高い階層の方が厳しくなることが伺える．また，船のサイズが大きいほど，RMS 値が大きくなる傾向が現れているが，50m～100m の小型船においても高い RMS 値が計測される船が確認される．また，上部構造物の高さ/長さ比との相関を見ると，高さ/長さ比が大きいほど RMS 値が高くなる傾向が伺えた．なお，図 5(c) 中に上部構造物長さが 60m を超える点が数点あるが，これらは船種が RORO 船及び PCC のデータである．

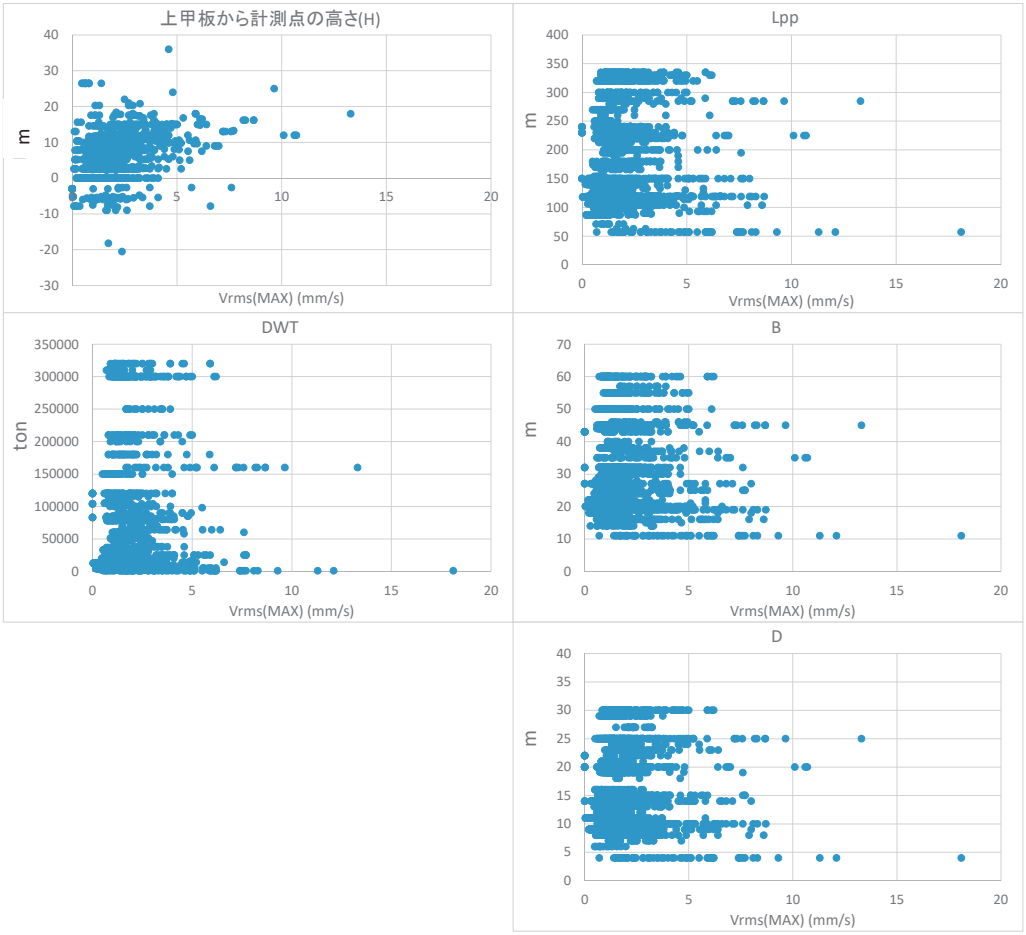


図 5(a)　RMS 値と各計測パラメータとの相関（その１）

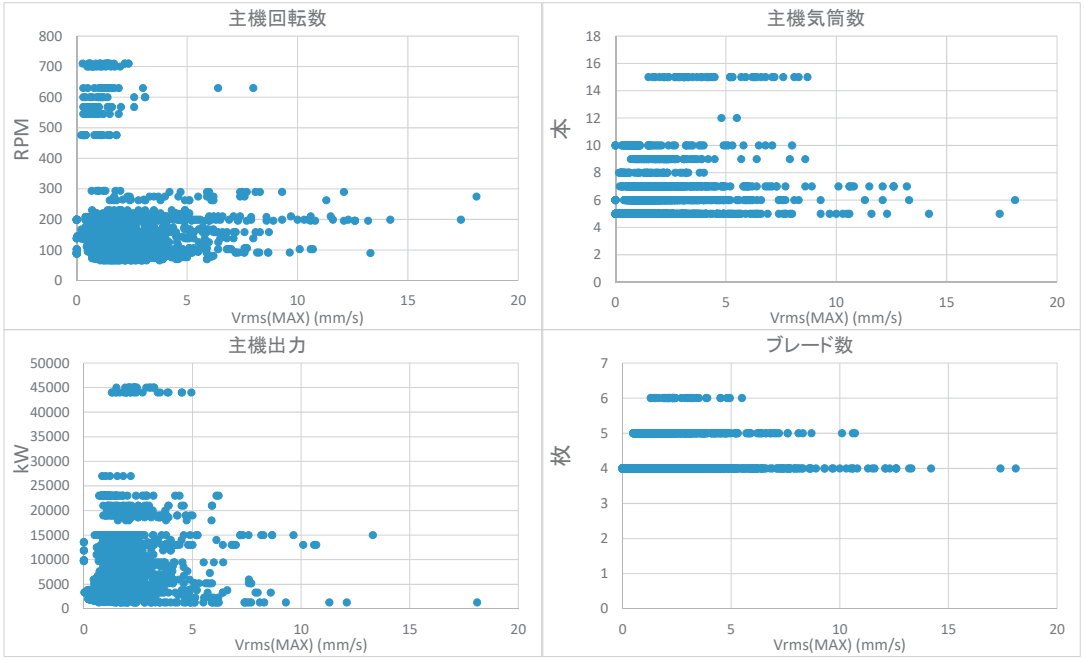


図 5(b)　RMS 値と各計測パラメータとの相関（その２）

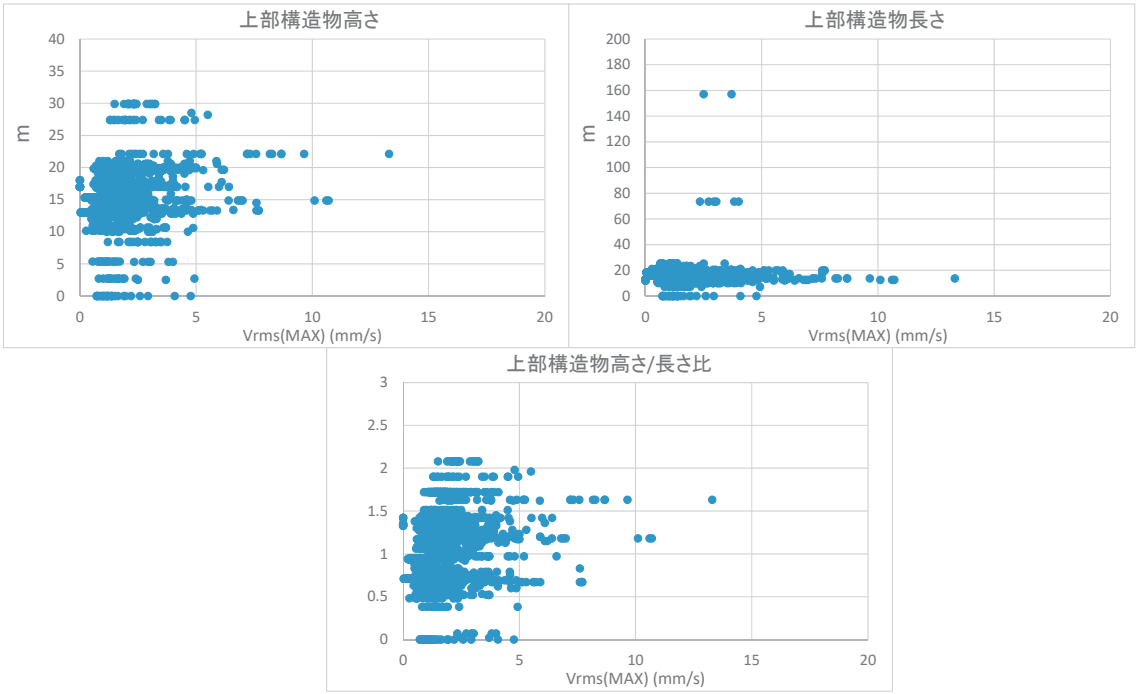


図 5(c)　RMS 値と各計測パラメータとの相関（その３）

2.2.2　船種による整理・解析

個船の各エリア区分における計測点のうち最大の RMS 値（以下，個船最大 RMS 値）と各基準値との関係を表 3 に示す．これによって何割の船が基準値を満たすかが分かる．ISO20283-5:2016 の許容値を適用した場合，CA において最も厳しくなり，19.0%の船が基準を満たさないという結果が得られた．次に船種ごとの傾向を調べた．全船種及び LNG・LPG 船，バルクキャリア（BC）それぞれについて，ISO20283-5:2016 の CA の振動許容値 3.5mm/s 及び NB の振動許容値 5.0mm/s の超過確率を整理して表 4 に示す．LNG・LPG の計測点数ベースでの評価結果の超過確率が最も高い値となっている．個船最大 RMS 値ベースでも LNG・LPG 船の超過確率は高い値を示している．さらに，BC の CA における個船最大 RMS 値での評価結果も，高い超過確率を示していることが確認できる．一方で，例えば LNG・LPG 船の個船最大 RMS 値ベースの場合，評価点数は CA で 11 点，NB で 8 点であった．厳密な超過確率のためには，より多くの評価点が必要であると考えられる．

表 3　個船最大 RMS 値と各基準値との関係

Area	隻数	ISO20283-5:2016		ISO6954:2000（上限値）		ISO6954:2000（下限値）	
		許容値	左を超える確率	許容値	左を超える確率	許容値	左を超える確率
CA	147	3.5	19.0%	6	3.4%	3	28.6%
WS	94	6	8.5%	8	6.4%	4	21.3%
OFFICE	75	4.5	6.7%	6	1.3%	3	12.0%
NB	140	5	11.4%	8	3.6%	4	22.9%
ECR	85	5	3.5%	8	1.2%	4	8.2%

表 4　ISO20283-5:2016 許容値に対する各船種の超過確率

		CA	NB
LNG・LPG	計測点数ベース	14.1%	52.2%
	個船最大 RMS 値	33.3%	33.3%
BC	計測点数ベース	6.9%	6.8%
	個船最大 RMS 値	24.0%	10.4%
All ships	計測点数ベース	6.0%	12.0%
	個船最大 RMS 値	19.0%	11.4%

3.　スペクトル解析

3.1 概要

振動実測データに高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform，FFT）を適用し，スペクトル解析を行った．本スペクトル解析の理論及び手順については参考文献 3)を参照した．FFT ではデータ点数 N として 2 のべき乗を選ぶ．本研究ではデータ点数 N=1024 を基本とし，1024 個より少ない時系列データに関しては最大となる 2 のべき乗数を選び，1024 個より多い時系列データについては図 6 に示すようなオーバーラップサンプリングを行った．図 6 に示す通り, オーバーラップ領域を指定する必要があるが, 本研究では推奨値として広く使用されているオーバーラップ率 50%を使用した．また，時系列データをブロック区分することにより不連続部が生じ，FFT の結果実際には存在しない高次の成分が現れることがある．そこで，リークを防ぐために，時系列データにアンチリーケイジウィンドウをかけることが広く行われている．本研究では，その中でも比較的多く利用されている，(1)式で表されるハニングウィンドウを適用した．

$$w(t) = 1 - \cos(2\pi\Delta f \cdot t) \qquad , 0 \le t \le Ts \tag{1}$$

ここで Δf=1/Ts，Ts はブロック長さである．FFT により算出した各ブロックにおけるスペクトルの平均化方法として，リニアスペクトルに関しては，各ライン周波数の成分を N 個のブロックで RMS 方式で評価した．

$$a_{AVE} = \sqrt{(a_1{}^2 + a_2{}^2 + \cdots + a_N{}^2)/N} \tag{2}$$

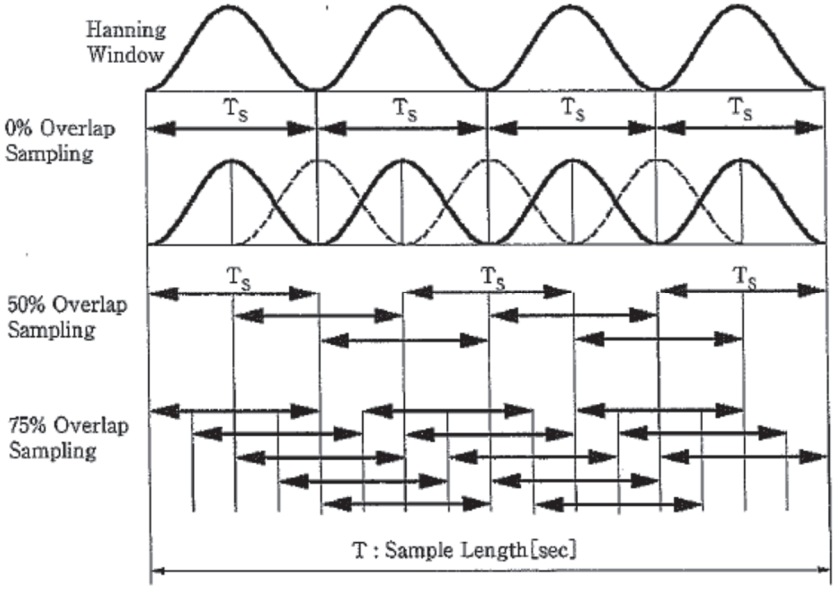


図 6　オーバーラップサンプリング

3.2 評価対象データ

本章でスペクトル解析の対象とした評価対象データをそれぞれ CA1～CA4 及び NB1～NB4 と呼ぶ. CA1～CA4 及び NB1～NB4 の船舶の主パラメータを表 5 に示す．CA2 と NB2，及び CA4 と NB4 は同一船舶である．表 5 より，評価対象船として抽出したデータは全て水平方向の振動成分を対象となっている．

表 5 評価対象船の主パラメータ

評価船	L (m)	船種	計測点高さ (m)	主機回転数 (RPM)	主機気筒数	プロペラブレード数	振動の方向
CA1	290	BC	15.0	91	6	5	Y
CA2	225	LPG	9.0	103	7	5	X
CA3	335	OT	15.0	70	7	4	X
CA4	330	OT	13.2	81	7	4	Y
NB1	285	BC	18.0	90	6	4	Y
NB2	225	LPG	12.0	103	7	5	X
NB3	195	BC	-	92	6	5	X
NB4	330	OT	16.5	81	7	4	Y

3.3 スペクトル解析結果と考察

CA1～CA4 及び NB1～NB4 に関して，スペクトル解析によって得られたリニアスペクトルを図 7～図 14 に示す．加速度データは単位 mm/s^2，速度データは単位 mm/s で統一している．各図にはリニアスペクトルの極値が現れる周波数を赤字で記している．図 7～図 14 より，リニアスペクトルの極値が発生する周波数は全てにおいて 1Hz～15Hz の低周波数帯になっていることが分かる．

一般的に，船体振動の共振現象は起振力あるいは船体構造の固有振動数との共振によるとされている [3]．このため，CA1～CA4 及び NB1～NB4 の共振現象の原因を分析するために，起振力の周波数を調べた．表 6 には CA1～CA4 及び NB1～NB4 の主な起振力の種類と周波数を示す．振動の方向が左右振動（Y 方向）の CA1，CA4，NB1，NB4 について見てみると，機関架構振動（H 型振動）の周波数とスペクトル解析結果のピーク周波数がほぼ一致していることが分かる．また，振動の方向が左右振動（X 方向）の CA2，NB2 に着目すると，プロペラ 1

次起振力とほぼ同等の周波数でピークが発生していることが確認できる．一方で，CA3，NB3 については，主な起振力による共振と伺うことが出来ない．上部構造物の前後振動は主船体と上部構造物の連成振動の影響が大きくなることも原因と考えられ，今回の実測データでは主船体の固有振動数を知ることは出来ないが，この連成振動の影響が大きいと推測される．

また，図 15 には CA3 船の ECR におけるスペクトル解析結果（Y 方向成分）を示している．図 15 より，ECR においては特に周波数 4.6Hz と 8.2Hz の成分が高くなっているが，これは表 3.2 よりプロペラ 1 次起振力と H 型振動の起振力周波数とほぼ一致する．機関室においては，主機起振力の影響が振動波形に高く現れていることが確認できた．

表 6 評価対象船の起振力と周波数及びスペクトル解析結果のピーク周波数

単位：Hz	プロペラ 1 次起振力	プロペラ 2 次起振力	機関架構振動（H 型振動）	ピーク周波数（最大値）
	主機回転数×ブレード数×1	主機回転数×ブレード数×2	主機回転数×気筒数	
CA1	7.6	15.2	9.1	8.8
CA2	8.6	17.2	12.0	8.6
CA3	4.7	9.3	8.2	7.0
CA4	5.4	10.8	9.45	9.4
NB1	6.0	12.0	9.0	10.0
NB2	8.6	17.2	12.0	8.6
NB3	7.7	15.3	9.2	2.5
NB4	5.4	10.8	9.45	9.4

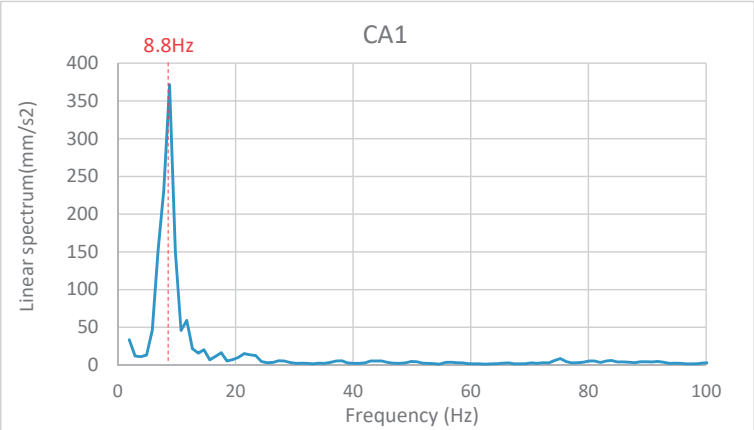


図 7　FFT スペクトル解析結果（CA1）

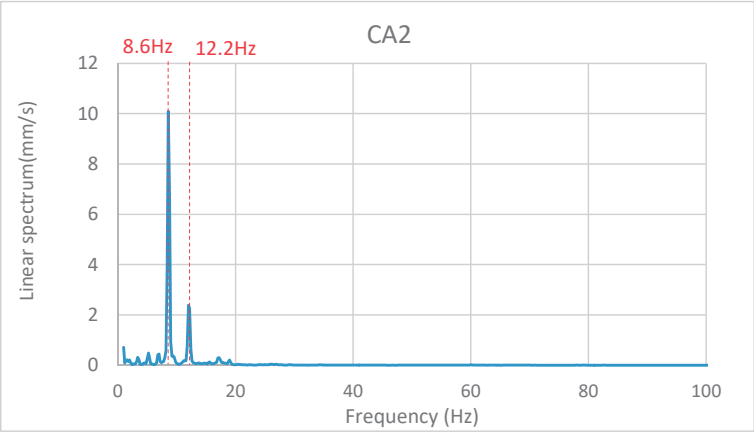


図 8　FFT スペクトル解析結果（CA2）

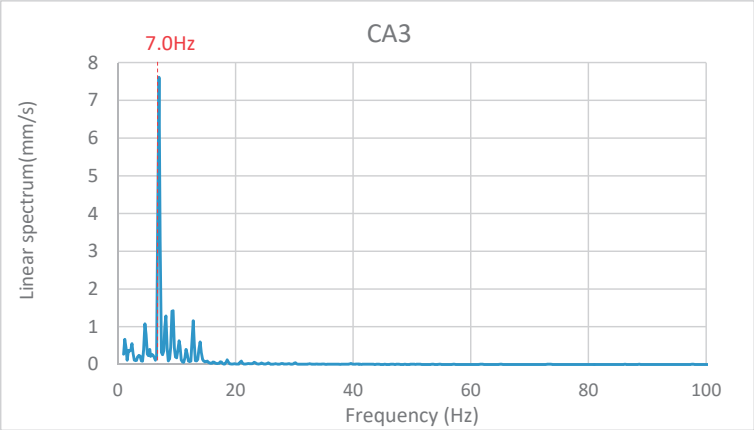


図 9　FFT スペクトル解析結果（CA3）

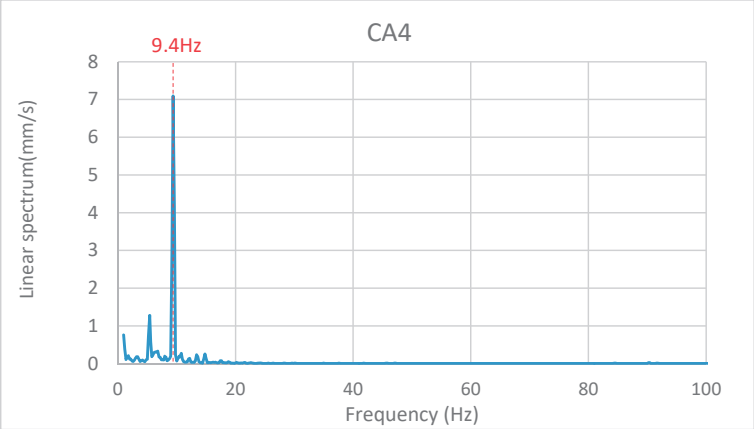


図 10　FFT スペクトル解析結果（CA4）

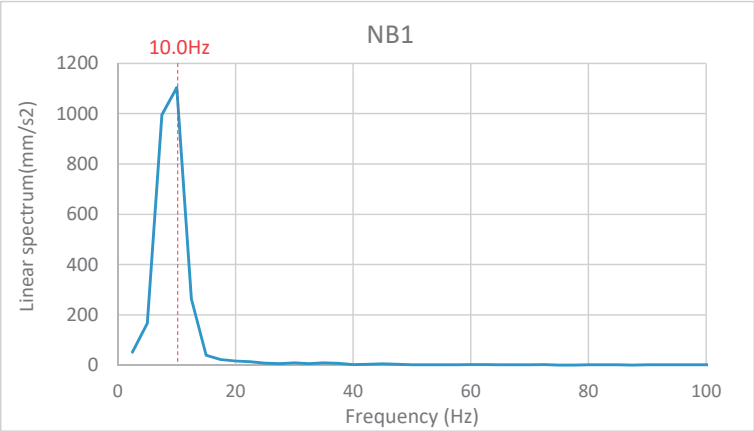


図 11　FFT スペクトル解析結果（NB1）

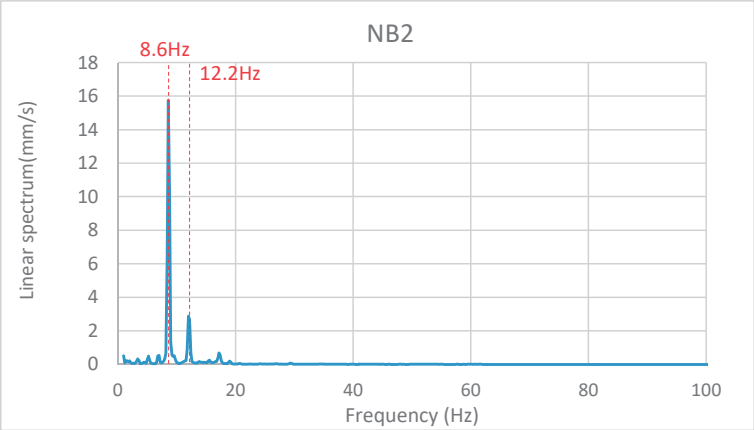


図 12　FFT スペクトル解析結果（NB2）

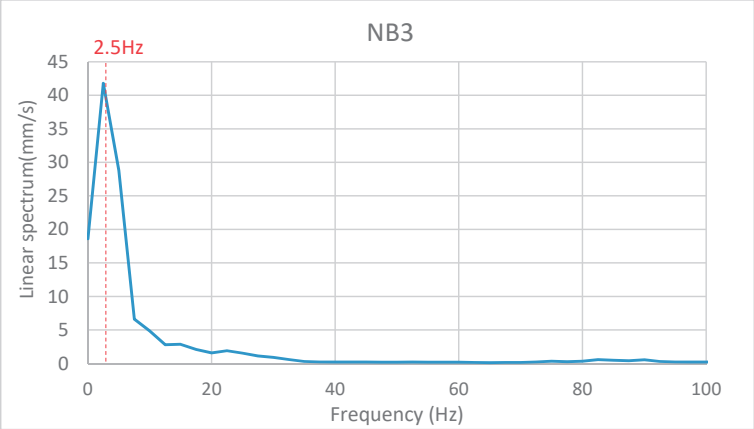


図 13　FFT スペクトル解析結果（NB3）

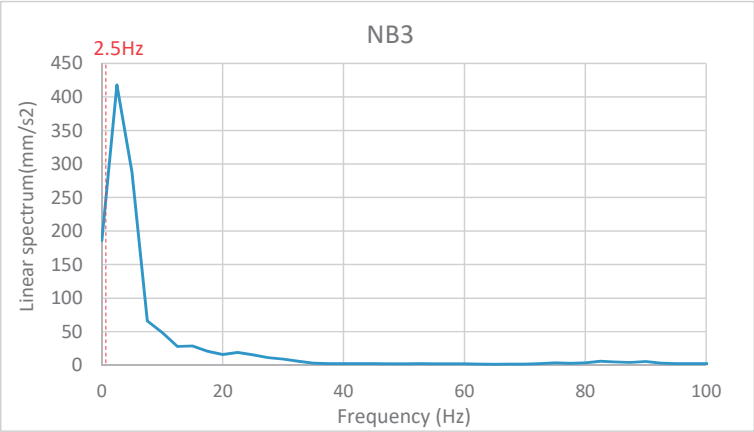


図 14　FFT スペクトル解析結果（NB3）

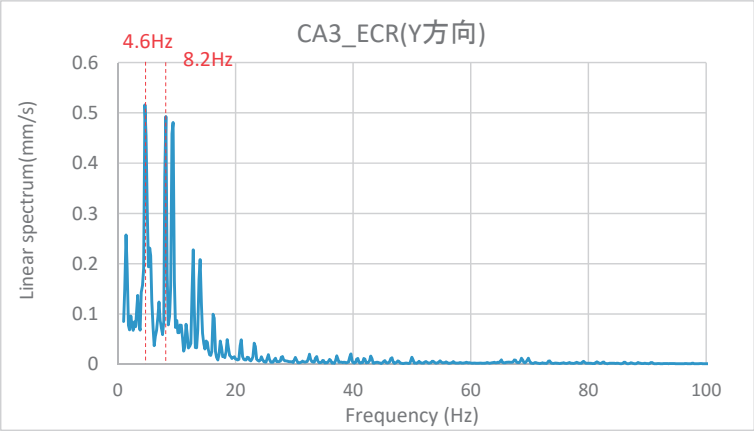


図 15　ECR の FFT スペクトル解析結果（CA3，Y 方向成分）

4.　ニューラルネットワークを用いた予測法

4.1 手法概要

振動 RMS 値の予測法として，本研究ではニューラルネットを用いた手法を適用した．本研究で適用したニューラルネットに基づく手法の詳細については文献 4)を参照されたい．機械学習には 1 層パーセプトロンモデルを用いた．入力層に必要な入力パラメータには表 7 に示す船体振動に関連すると考えられるパラメータを選択した．機械学習の際の入力値としては全てのパラメータを整数または実数値で与える必要がある．このため，エリア区分についてはそれぞれのエリアについて，また各船種についても ID 番号を割り当て，入力値とした．学習・予測する値は X,Y,Z 方向振動の RMS 値とする．

表 7　機械学習のための入力パラメータ

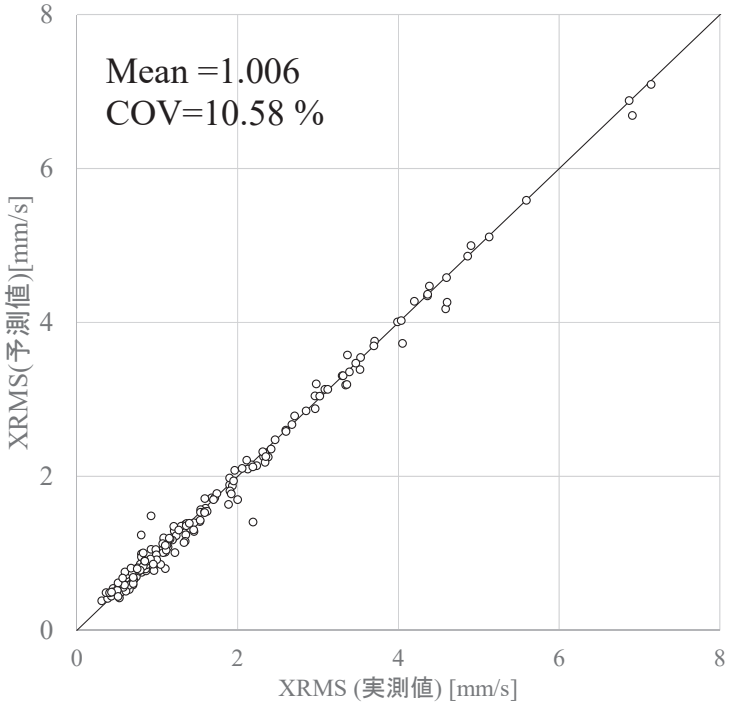
入力パラメータ	単位
エリア区分	-
船種	-
L,B,D	m
DWT	ton
上部構造物高さ/長さ比	-

計測点高さ	m
主機回転数	rpm
主機気筒数	本
プロペラブレード数	枚
主機出力	kW

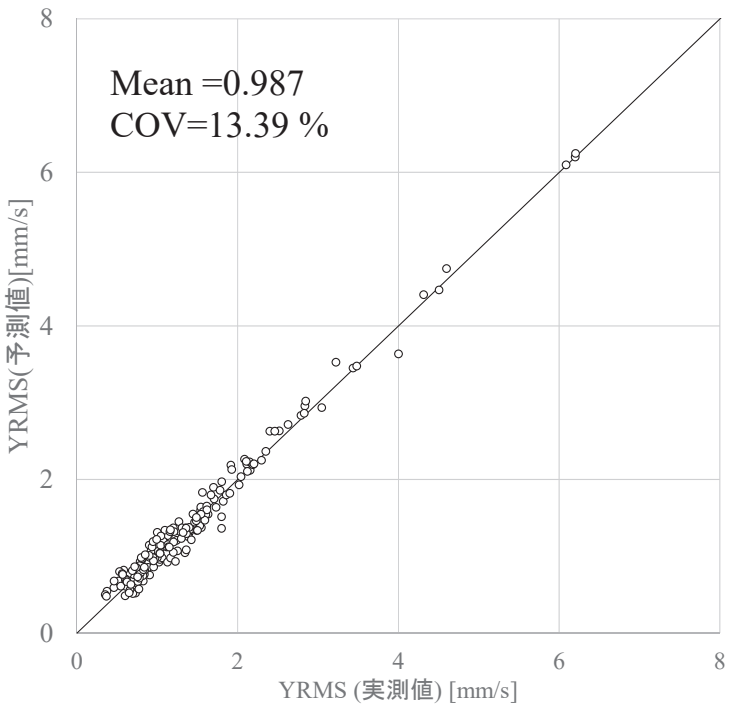
4.2 予測結果と考察

図 16 には X,Y,Z 方向振動の RMS 値をニューラルネットによって予測した結果と実測値との比較を示す．各図で横軸は実測値，縦軸は予測値を表している．同図内には実測値÷予測値の平均値及び共分散（COV）を示している．図 16 から，本研究で用いたニューラルネットによる予測法が実測値を良好な精度で捉えていることが確認できる．COV は 13%の範囲で予測が可能となっており，また高い RMS 値が計測された計測点についても良好な精度が保てていることがわかる．今後さらにデータベースを拡張し，本研究で用いたニューラルネットに基づく予測法をより強化していくことが望まれる．

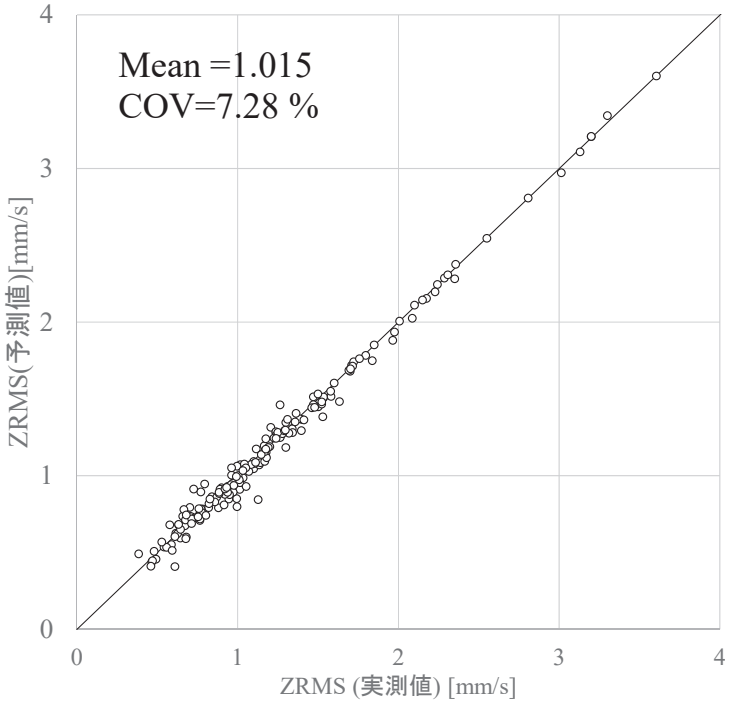
なお，今回のニューラルネットワークによる学習では主機出力と DWT などある程度相関性を持ったパラメータを入力としたが，過学習が起こるような現象は見られなかった．今後データベースを拡張した場合には，過学習に対する注意及び対策が必要と考えられる．



(a)　XRMS



(b)　YRMS



(c)　ZRMS

図 16　振動 RMS 値の予測結果

5.　まとめ

本研究では，　船舶上部構造振動の予測及び評価を目的として，第一に就航船の実測データを収集してISO規格との比較による傾向分析を実施した．また，スペクトル解析を用いて過大な振動の発生する場合の原因を推測す

ることができた．さらに，実測データを用いてニューラルネットを用いた予測法を適用し，振動RMS値が良好な精度で予測可能であることを確認した．今後さらにデータベースを拡張し，本研究で用いたニューラルネットに基づく予測法をより強化していくことが望まれる．

謝　辞

本研究では日本財団の助成を受けて実施された，（一財）日本船舶技術研究協会の「船舶の振動による居住性の評価に関する調査研究」成果の一部を活用した．関係者に深く御礼を申し上げる．

参考文献

1) International Organization for Standardization : ISO 6954:2000　Mechanical vibration -- Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships, 2000.
2) International Organization for Standardization：ISO 20283-5:2016　Mechanical vibration -- Measurement of vibration on ships -- Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships, 2016.
3) 日本船舶海洋工学会：船舶海洋工学シリーズ⑧，船体構造　振動編，成山堂書店, 2012.
4) 平方勝，馬沖：ニューラルネットワークによる騒音予測，　日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 25 号, 2017.