

実船データによる PCC の横揺推定法の検証

黒田麻利子*, 辻本 勝*, 櫻田 顕子*, 杢原 直人*, 肥後崎 愛**

Validation for the evaluation method of roll motion for pure car carrier with onboard monitoring data

by

Mariko KURODA, Masaru TSUJIMOTO, Akiko SAKURADA, Naoto SOGIHARA
and Ai HIGOSAKI

Abstract

In order to confirm the accuracy of the evaluation method of roll motion, calculated results of standard deviation are compared with onboard monitoring data for a pure car carrier. On the calculation, the roll damping force is estimated by the method with tank test results of free roll tests for the similar type ship or by the method of estimating components of roll damping force. The parameters related to the center of gravity are estimated or obtained by the actual loading condition. For the object ship, the calculated results well agree with measured data in case of the roll damping force estimated by tank test results of the similar type ship and the parameters related to the center of gravity determined from actual values. It is also found that calculated results with averaged values for parameters related to the center of gravity express the tendency of monitoring data. For more accurate evaluation, the actual data for the center of gravity should be used since the center of gravity would be different according to the loading condition of cargoes even in the similar condition of the draught.

* 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 流体設計系, ** 株式会社 MTI

原稿受付 平成30年10月26日

審査日 平成31年 1月 9日

目 次

1. はじめに	76
2. 横揺減衰力の評価	77
2.1 自由横揺試験による横揺減衰力係数の評価	77
2.2 成分推定法による横揺減衰力係数の推定	77
3. 実船データによる横揺推定法の検証	78
3.1 横揺応答の推定	78
3.2 運航中の実船横揺評価	81
4. 結言	86
謝辞	86
参考文献	86
附録	87

1. はじめに

実海域を航行する船は、波などの外力を受けて6自由度の運動を生じる。船体運動は、抵抗増加の一因となり航海中の燃費に影響を及ぼし、また、荒天下での大振幅の揺れなどについては、安全性にも関わるため、正確な評価が求められている。特に、横揺については、復原性にも関わりが大きく、船舶の設計段階において精度よく推定することは重要である。

横揺については、粘性や前進速度の影響が大きいため、これらの影響を考慮した横揺減衰力により推定する必要がある。横揺減衰力は、模型船を用い、水槽で自由横揺試験を行って得られる横揺振幅の減減曲線から導かれる¹⁾。また、推定法として、池田の方法^{2),3),4)}による成分推定法があり、これは、横揺減衰力を成分(摩擦、造波、造渦、揚力、ビルジキール)に分けて、それらを足し合わせる方法で、各成分は理論に基づく定式化と実験に基づく修正係数で構成されている。

実船データモニタリングシステム^{例えば5),6)}の普及により、リアルタイムで船の性能データが陸上に配信されるようになり、燃料消費量の予測やウェザールーティングに役立てられている。船体運動についても、計測器が設置され、船上での解析から得られる平均、分散、最大、最小等の統計値が陸上に配信される場合もある。これら実船の性能が詳細に把握できるようになったことから、推定法においても高い精度が望まれている。

今回、モニタリングシステムを搭載している自動車運搬船を対象に、実船データを用いて船体運動の評価を行い、推定結果との比較を行った。また、船体運動の推定で必要となる横揺減衰力や重心位置などの影響を調査し、影響の大きいパラメータについて調査した。

2. 横揺減衰力の評価

横揺減衰力 $B_{\phi}(\dot{\phi})$ は、非線形成分を含むことから、線形の運動方程式として解析的に解くため、等価線形減衰係数 B_{44} を用いて表されることが多い。

$$B_{\phi}(\dot{\phi}) = B_{44}\dot{\phi} \quad (2.1)$$

ここで、 ϕ は横揺角であり、 $\dot{\phi}$ はその時間微分を表す。等価線形減衰係数 B_{44} を求める方法として用いられている、水槽で自由横揺試験を行い求める方法と、池田による成分推定方法について以下に示す。

2.1 自由横揺試験による横揺減衰力係数の導出

自由横揺試験では、一定速度で曳航している模型船をある角度傾けてから、他のモードの動揺が生じないように静かに放し、その時の減衰していく横揺角を計測する。計測結果から得られる横揺減衰曲線から、連続する2つの横揺振幅 $|\phi_n|$ 、 $|\phi_{n+1}|$ の差 $\Delta\phi_m$ 、平均 ϕ_m を用いて減減曲線を(2.4)式に示す通り、 a 、 b 係数を用いて2次式で表現する。

$$\Delta\phi_m = |\phi_n| - |\phi_{n+1}| \quad (2.2)$$

$$\phi_m = \frac{|\phi_n| + |\phi_{n+1}|}{2} \quad (2.3)$$

$$\Delta\phi_m = a\phi_m + b\phi_m^2 \quad (2.4)$$

この時の1自由度横揺方程式は、等価線形減衰係数 B_{44} を用い、(2.5)式で表される。ここで、 I_{xx} 、 A_{44} は横揺軸周りの慣性モーメント、付加慣性モーメントであり、 C_{44} は横揺復原モーメント係数であり、傾斜角が大きい範囲では $\rho g \nabla \text{GM}$ で与えられる。 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 ∇ は排水容積、 GM はメタセンタ高さである。

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = 0 \quad (2.5)$$

(2.5)式について、横揺振幅が $|\phi_n|$ から $|\phi_{n+1}|$ になるまでの半周期間について、横揺角 ϕ についての積分を行い、それぞれの項を仕事に換算すると、横揺減衰力が半周期間に為した仕事が、位置エネルギーの変化に等しいという式が得られ、連続する2つの横揺振幅 $|\phi_n|$ 、 $|\phi_{n+1}|$ の差 $\Delta\phi_m$ について(2.6)式が求められる。ここで、 ω_ϕ は横揺固有角周波数である。

$$\Delta\phi_m = \frac{\pi}{2} \frac{\omega_\phi}{C_{44}} \phi_m B_{44} \quad (2.6)$$

(2.6)式と(2.4)式から、減減曲線の係数 a 、 b と等価線形減衰係数 B_{44} の関係が得られる。(2.4)式についてはdeg.の単位で、(2.6)式はradの単位で表現されることが多いため、両者の関係は(2.7)式の通り表される。

$$B_{44} = \frac{2}{\pi} \frac{C_{44}}{\omega_\phi} (a + b\phi_m) = \frac{2}{\pi} \frac{\rho g \nabla \text{GM}}{\omega_\phi} \left(a + \frac{180}{\pi} b\phi_m \right) \quad (2.7)$$

2.2 成分推定法による横揺減衰力係数の推定

横揺減衰力を成分(摩擦、造波、造渦、揚力、ビルジキール)に分けて推定する方法として、池田の方法があり、これは、各成分を理論式をベースに実験に基づく係数を加えて表し、それらを足し合わせる組立式推定法である。ここで、等価線形減衰係数は(2.8)式により表され、 B_F は摩擦成分、 B_W は造波成分、 B_E は造渦成分、 B_L は揚力成分、 B_{BK} はビルジキール成分である。

$$B_{44} = B_F + B_W + B_E + B_L + B_{BK} \quad (2.8)$$

各成分は理論に基づく定式化と実験に基づく修正係数で構成されている。摩擦成分 B_F 、造波成分 B_W 、揚力成分 B_L については、参考文献 2) に従って算出し、ビルジキール成分 B_{BK} については参考文献 3) に従い算出し、造渦成分 B_E については参考文献 4) をベースに、定式化を行い求めた。造渦成分についての定式化の詳細は附録 A に示す。ここで、自由横揺試験で求められる模型船の a, b 係数から横揺減衰力を評価する場合、尺度影響は考慮されないが、成分推定法では、横揺減衰力の摩擦成分の推定においてレイノルズ数に関する摩擦抵抗係数を含むため、尺度影響が考慮される。

3. 実船データによる横揺推定法の検証

一般的な要目（垂線間長：190 m、幅：32.26 m）の自動車運搬船を対象に実船データと推定法の比較を行い、推定法の検証を行った。

3.1 横揺応答の推定

2 章に示した推定法を用い、規則波中横揺運動の周波数応答を推定した。ここで、計算には海上技術安全研究所にて開発を行っている実運航性能シミュレータ VESTA⁷⁾を用いた。VESTA では、ストリップ法 (NSM) により船体運動の計算を行う。VESTA による計算に必要な船体断面パラメータ（幅、喫水、断面積）、重心高さ、横揺固有周期については、簡易船体形状推定プログラム UNITAS⁷⁾を用いて推定した。船体断面パラメータについてはオフセット等を用いて UNITAS により推定した。重心高さについては、実運航時の値が得られない場合を想定し、垂線間長 L_{pp} 及び船幅 B_{max} により構成される井上らの式⁹⁾をベースとした UNITAS⁷⁾を用いて推定した場合と、実測値（ローディングコンピュータによる計算結果）を用いる場合で計算を行い、結果を比較した。重心高さを UNITAS により推定する場合、横揺固有周期 T_ϕ については、横慣動半径を一般的な値である $k_{xx}/B_{max}=0.35$ と想定し、(3.1)式⁸⁾により横揺固有周期に変換して計算に用いた。重心高さに実測値を用いる場合は、類似の自動車運搬船の水槽試験結果から設定した横揺固有周期 T_ϕ を計算に用いた。

$$T_\phi = 2\pi k_{xx} / \sqrt{g GM} \quad (3.1)$$

横揺減衰力係数については、2 章に示した方法でそれぞれ推定した。対象船については、模型船による自由横揺試験データがないため、横揺固有周期についてと同じ類似船の模型実験結果から得た a, b 係数を用いた。成分推定法による横揺減衰力係数の推定で必要となる船体断面形状については、UNITAS によりオフセット等から推定した。ビルジキールについては、横揺減衰力を発生する装置であることから、成分推定法による横揺減衰力係数の推定への影響が大きいと見られるため、実際のビルジキールの寸法（長さ及び幅）を用いて横揺減衰力係数のビルジキール成分を推定した。以上の計算条件を表 1 に示す。

表 1 横揺周波数応答推定のパラメータ設定条件

パラメータ	評価方法	
	模型実験値	成分推定法
横揺減衰力	模型実験値	成分推定法
船体断面パラメータ	オフセット等から UNITAS により推定	
重心位置、横揺固有周期	A) 重心位置及び横揺固有周期を UNITAS により推定 B) 重心位置に実測値を用い、横揺固有周期を類似船の模型実験結果より設定	
ビルジキール	模型船に付加	実寸を用いて成分推定

推定結果の一例として、運航喫水の計画満載喫水に対する比 $r_d = 0.93$ の航海番号 voyage4 の状態を対象に周波数応答を計算した結果を図1～図4に示す。また、図1、図3の条件に対応する横揺減衰力係数を図5に示す。ここで、 ϕ_a は横揺振幅、 k は入射波の角波数、 ζ_a は入射波の振幅、 λ は波長、 B_{max} は船幅、 L_{ps} は船長(船首水切り位置とA.P.もしくは船尾水切り位置間の長さ)で対象船の場合は垂線間長と同じである。 F_r は(3.2)式から算出されるフルード数、 B_{44}' は(3.3)式で表現される横揺減衰力係数の無次元値であり、系列名は入射波の波向(向波0 deg.)を表している。また、計算に使用した重心高さの計画満載喫水に対する比 r_{OG} 、メタセンタ高さの計画満載喫水に対する比 r_{GM} 、横揺固有周期 $T\phi$ の値を表2に示す。ここで、A)、B)は表1における重心位置・横揺固有周期の設定に関するA)、B)に対応する。メタセンタ高さがA)とB)で倍程度異なるが、A)の場合は、ベースとしている推定式が導かれた当時の実船と現在運航中の今回の対象船の設計の差により、実測値と推定値で差が生じていることが考えられる。一方、水槽試験を行った類似船の重心高さが、A)の推定値に近いので、横揺固有周期におけるA)とB)の差は小さい。

$$F_r = V_s / \sqrt{gL_{ps}} \tag{3.2}$$

$$B_{44}' = \frac{B_{44}}{\rho \nabla B_{max}^2} \sqrt{\frac{B_{max}}{2g}} \tag{3.3}$$

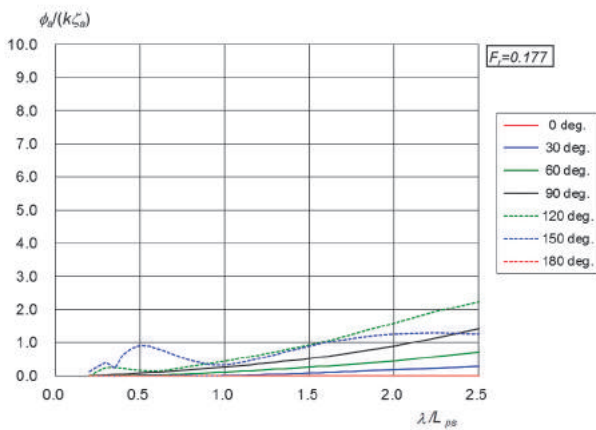


図1 横揺振幅周波数応答 (voyage4; 模型実験値, GM 実測値)

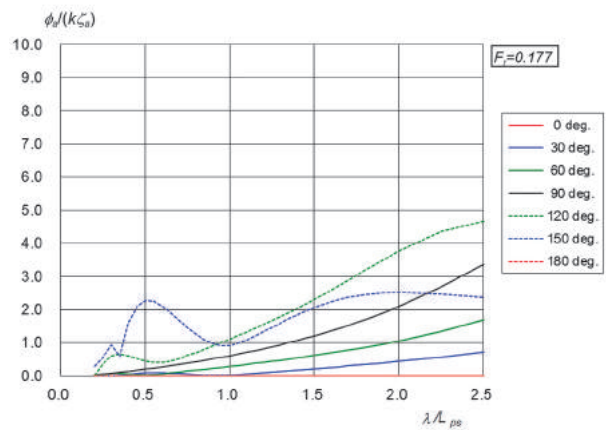


図2 横揺振幅周波数応答 (voyage4; 模型実験値, GM 推定値)

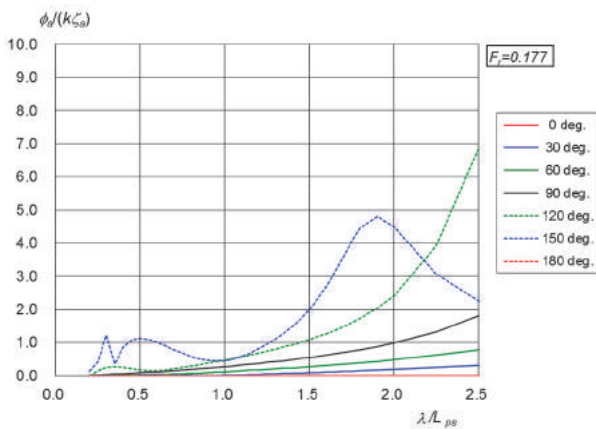


図3 横揺振幅周波数応答 (voyage4; 成分推定法, GM 実測値)

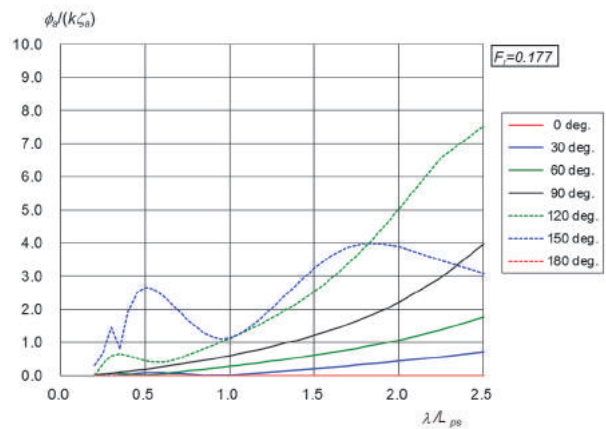


図4 横揺振幅周波数応答 (voyage4; 成分推定法, GM 推定値)

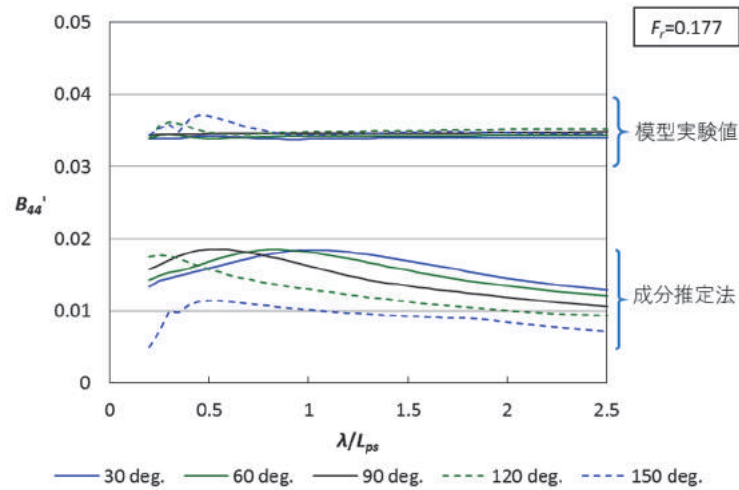


図5 横揺減衰力係数の比較 (voyage4, GM 実測値)

表2 横揺計算パラメータ設定値 (voyage4)

パラメータ	A)	B)
メタセンタ高さ比 r_{GM}	0.13	0.28
重心高さ比 r_{OG}	0.58	0.56
横揺固有周期 T_{ϕ} [s]	20.2	21.0

図1~4から、重心高さや横揺固有周期の値により、横揺運動の周波数応答計算結果が異なることが分かる。図5より、模型実験値と成分推定法の横揺減衰力に倍半分程度の差があり、成分推定法の場合、模型実験値に比べて周波数や波向による変化があり、特に斜追波で横揺減衰力係数を小さく評価する傾向があることが分かる。このため、横揺振幅の周波数応答において、斜追波中の計算結果に特に差がみられる。横波(90 deg.)の場合、横揺振幅は波長船長比が大きくなるに従い増加しているが、 $\lambda/L_{ps}=2.5$ の値は、横揺減衰力の推定に模型実験値を用い、GMに実測値を用いた場合が最も小さく、横揺減衰力の推定に池田による成分推定法を用い、GMに推定値を用いた場合が最も大きく、2.8倍程度となる。

次に、短波頂不規則波中横揺応答の分散値 σ_{ϕ}^2 の比較を図6~図9に示す。横揺分散値は、VESTAを用い(3.4)式により算出される。ここで、 $E(\omega, \alpha)$ は波の方向スペクトラムであり、(3.5)式に示す通り、周波数スペクトラム $S(\omega, H, T)$ と方向分布関数 $D(\alpha, \theta)$ の変数分離型で表現する。ここで、 ω は角周波数、 α は規則波の波向、 H は有義波高、 T は平均波周期、 θ は不規則波の主波向である。今回は、周波数スペクトラムに(3.6)式~(3.9)式に示す修正ピアソン・モスコヴィッツ型のIACS式¹⁰⁾を用い、方向分布関数は(3.10)式に示すコサイン二乗型として計算を行った。ここで、 Γ はガンマ関数である。図6~図9から、短波頂不規則波中分散値においても横揺減衰力の推定法、重心高さや横揺固有周期の設定値による影響があることが分かる。波向によらず、GMに推定値を用いると、実測値を用いるより分散値が大きく算定され、横揺減衰力を成分推定法により評価すると、模型実験値を用いて評価するよりも分散値が大きく算定されることが分かる。また、分散値への影響は横揺減衰力の評価法よりも、GMの設定方法による影響の方が大きい。

$$\frac{\sigma_{\phi}^2}{H^2} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{\phi_a}{k\zeta_a} \right|^2 k^2 E(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (3.4)$$

$$E(\omega, \alpha) = S(\omega; H, T) D(\alpha; \theta) \quad (3.5)$$

$$S(\omega; H, T) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad (3.6)$$

$$A = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_{02}} \right)^4 H^2 \tag{3.7}$$

$$B = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_{02}} \right)^4 \tag{3.8}$$

$$T_{02} = \frac{\Gamma(3/4)}{\pi^{1/4}} T \cong 0.9204T \tag{3.9}$$

$$D(\alpha; \theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\alpha - \theta) \quad \text{for } (-\pi/2 \leq (\alpha - \theta) \leq \pi/2) \tag{3.10}$$

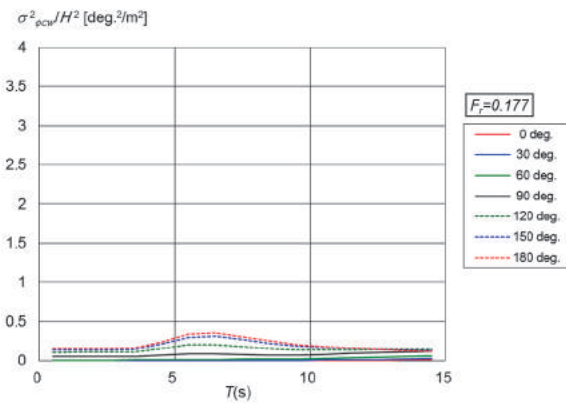


図6 短波頂不規則波中横揺分散 (voyage4; 模型実験値, GM 実測値)

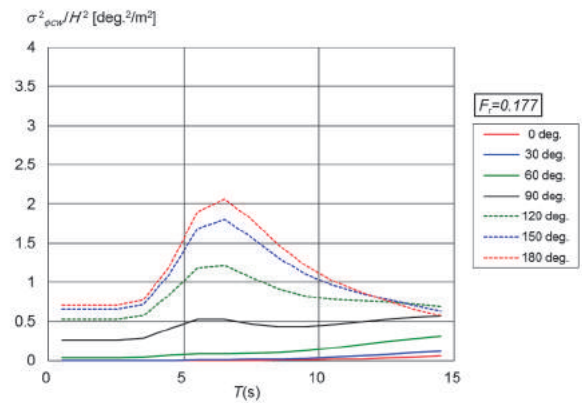


図7 短波頂不規則波中横揺分散 (voyage4; 模型実験値, GM 推定値)

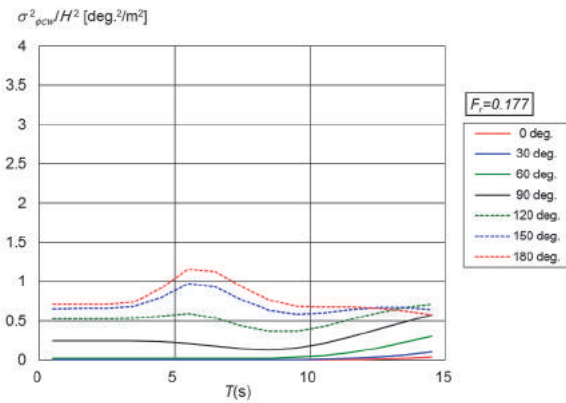


図8 短波頂不規則波中横揺分散 (voyage4; 成分推定法, GM 実測値)

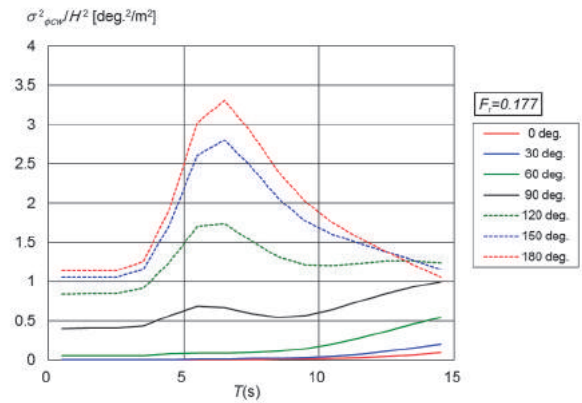


図9 短波頂不規則波中横揺分散 (voyage4; 成分推定法, GM 推定値)

3.2 運航中の実船横揺評価

対象船の自動車運搬船について、実運航中の重心高さが得られた航海について VESTA による実運航シミュレーションを行い、実船計測で得られた横揺標準偏差と計算値を比較した。実船計測による横揺標準偏差は、時系列データを1時間ごとに統計処理して得られているものである。ここで、シミュレーションに用いるベースカーブ（平水中性能）については、実船データから平水中データを抽出して推定したカーブを用い、風圧力を計算するための上部構造物パラメータについては、主要目から UNITAS⁷⁾により推定した。波浪については推算値を用い、風については風向風速計の計測値を一樣風の仮定の下、高さ修正して用いた¹¹⁾。VESTA による実運航中の船体

運動の推定では、実運航シミュレーション¹²⁾により求めた船速から、斜航による影響を速度変化として考慮して、計算海象条件の平均波周期及び主波向、有義波高に対応する短波頂不規則波中の船体運動の分散を求める。これを標準偏差に変換して、実船計測から得られたデータと比較した。評価対象の波浪状態（有義波高、平均波周期、主波向）、船速、横揺標準偏差についての時系列の比較を図10～図12に示す。また、対象とした航海の喫水状態と重心高さ等の計算条件を表3に示す。ここで、A)、B)は表1における重心位置・横揺固有周期の設定に関するA)、B)に対応する。

表3 評価対象航海と計算パラメータ

Voyage No.	喫水比 r_d	A)			B)		
		r_{GM}	r_{OG}	T_ϕ [s]	r_{GM}	r_{OG}	T_ϕ [s]
4	0.93	0.13	0.58	20.2	0.28	0.56	21.0
8	0.90	0.13	0.61	20.2	0.39	0.43	21.0
9	0.94	0.13	0.57	20.2	0.30	0.52	21.0
16	0.93	0.13	0.58	20.2	0.28	0.55	21.0

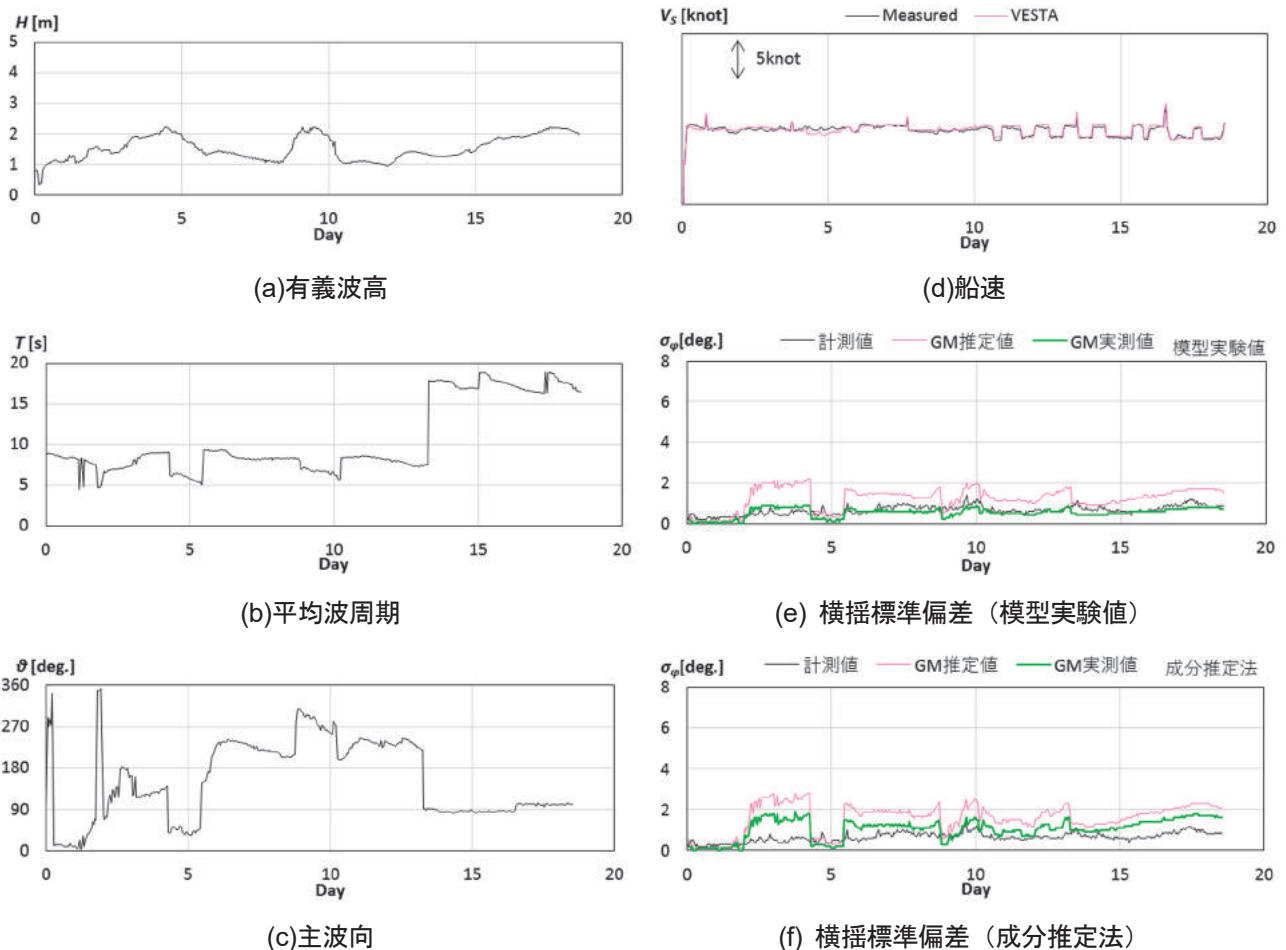


図10 時系列 (voyage 4)

図10~図12の(d)より、船速が十分な精度で評価できていることが分かる。また、図10~図12の(e),(f)より、いずれの航海においても、模型実験から得た横揺減衰力, GM 実測値を用いた場合の推定が最も実船データに近く、他の場合は、実船データより大きく推定する傾向にあることが分かる。時系列で、横揺標準偏差が比較的大きくなる場合は、例えば voyage8,9 の20~25Day や、voyage12 の3~6Day 等の有義波高が2m 以上で主波向が180 deg. (追波)に近い場合で、追波や斜追波で横揺が大きくなることについては、周波数応答の計算結果の傾向と一致する。時系列の一致度を平均平方二乗誤差で評価し、表4に示す。平均平方二乗誤差 $RMSE$ は、(3.11)式により、航海ごとの実船計測値の横揺標準偏差の平均値で無次元化して $RMSE'$ として示す。ここで、 $\sigma_{\phi_{mes}}$ は横揺標準偏差の計測値、 $\sigma_{\phi_{est}}$ は横揺標準偏差の推定値である。表4からも、最も実船データとの一致度が高い計算は、横揺減衰力の評価を模型実験により行い、実測値のGMを用いる場合であることが分かる。また、推定値のGMを用いると、横揺減衰力を成分推定法により評価する場合と同程度推定結果と実船データの差は大きくなり、どちらも推定値を用いるとさらに実船データとの差は大きくなること分かる。

$$RMSE' = \frac{RMSE}{\sigma_{\phi_{mes}}} = \frac{\sqrt{(\sigma_{\phi_{est}} - \sigma_{\phi_{mes}})^2}}{\sigma_{\phi_{mes}}} \tag{3.11}$$

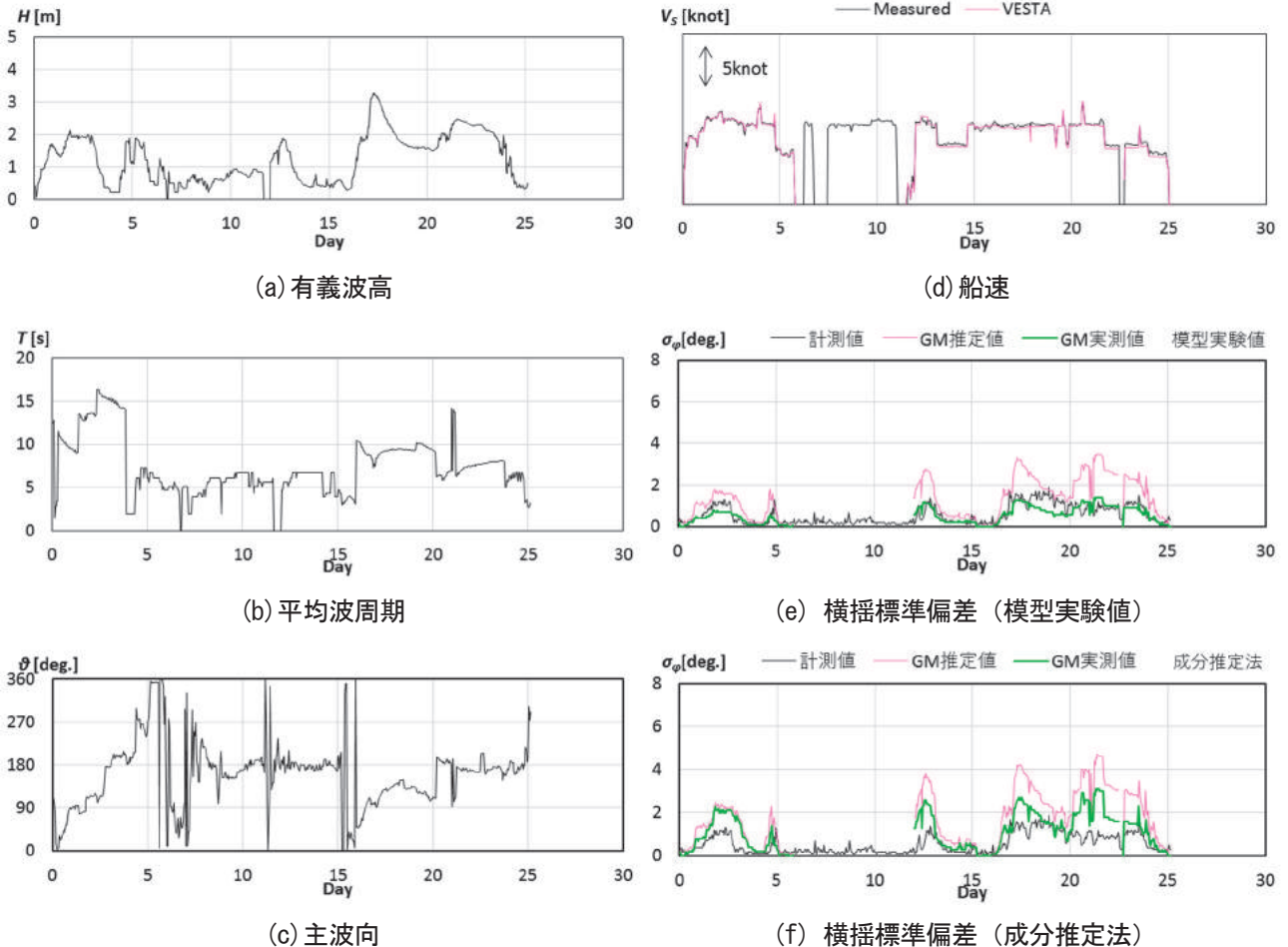


図11 時系列 (voyage 8,9)

今回の評価で、横揺に関連するパラメータとして、横揺減衰力、GM等の重心情報、横揺固有周期について検討し、横揺減衰力と横揺固有周期に類似船の模型実験値を用い、GM等の重心情報に実測値を用いた推定結果が、実船データを説明できる妥当な結果であることを示した。横揺減衰力に成分推定法を用いたり、GM等の重心情報に推定法を用いたりすると、推定精度は悪化する傾向が見られたことから、重心情報が横揺の評価精度に与える影響は大きいことが確認された。推定式⁹⁾では、垂線間長 L_{pp} 及び船幅 B_{max} からGMの値を推定するため、喫水の影響は考慮されないが、ここから類推して、今回重心情報を得た4つの航海時のGMの平均を用いて他の航海についても横揺の評価を行い、推定式によるGMを用いた場合と比較した。横揺運動の比較結果を図13に示す。また、 $RMSE'$ で評価した結果を表5及び図14に示す。なお、ここでは横揺減衰力と横揺固有周期は類似船の模型実験値を用い、GMによる影響のみ比較した。図13、14及び表5から、GMに実測値の平均を用いた場合も、表4に示した実測値そのものを用いた場合より精度は落ちるが、喫水に依らず近い一致度で安定した精度で横揺標準偏差が評価されていることが分かる。対象船の場合、横揺に関する計算パラメータのうち、横揺減衰力の推定に用いる a, b 係数、横揺固有周期について、類似船の実験データを用い、GMの値を実測値に近いデータを用いれば妥当な横揺標準偏差が得られる。なお、表3に示した今回調査した実測値の重心情報から、喫水が同程度であっても、GMやOGが異なる場合があることが分かる。そのため、運航中の重心情報は、喫水が同程度であっても貨物の状況により変化するため、要目や排水量等から推定することが難しく、正確な評価を行うためには、実際の重心情報を用いる必要がある。

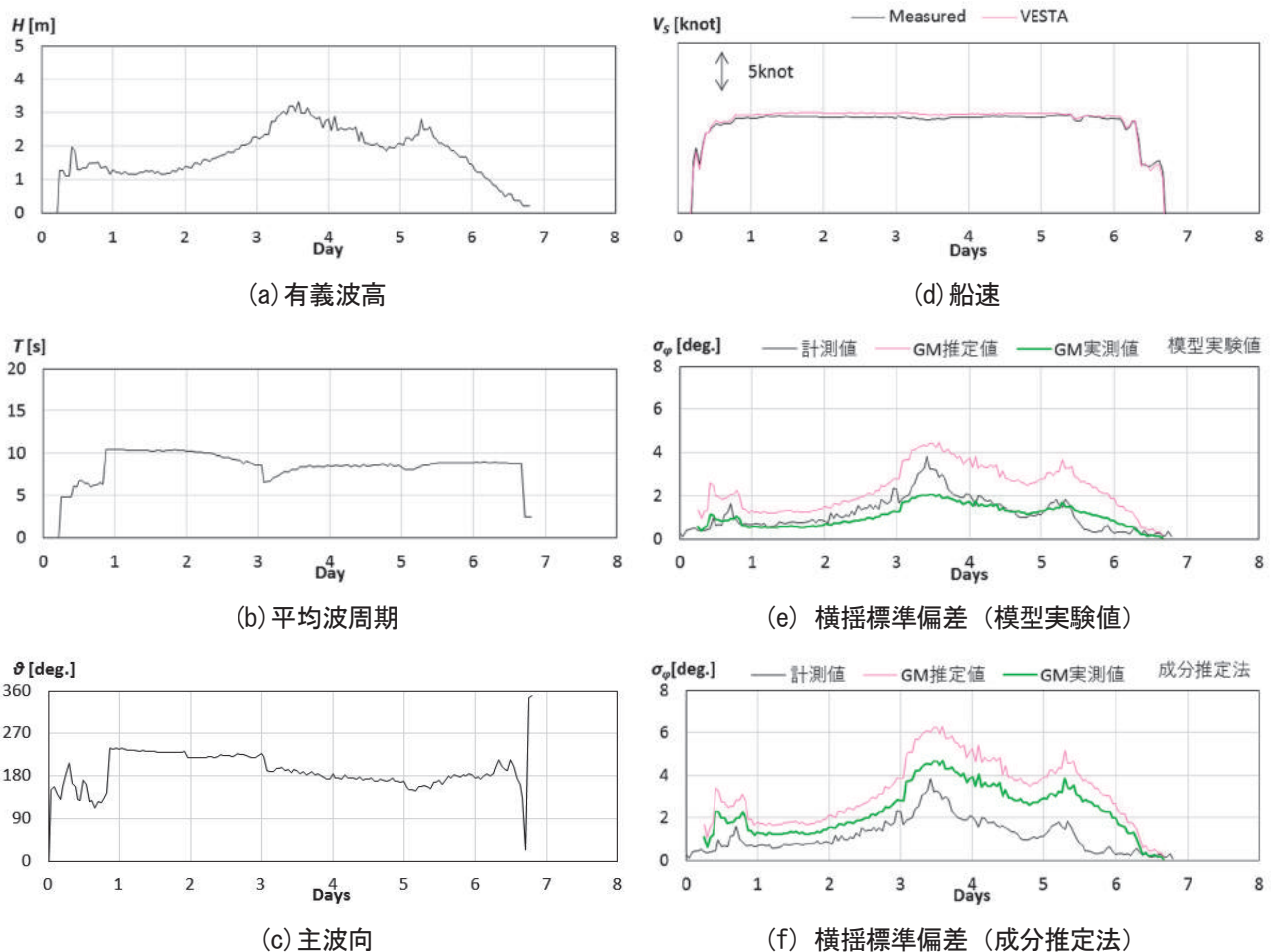


図12 時系列 (voyage 16)

表4 実船データとの一致度の比較

\overline{RMSE}^1	a,b 係数 GM 実測値	a,b 係数 GM 推定値	成分推定法 GM 実測値	成分推定法 GM 推定値
voyage4	0.37	1.10	0.89	1.69
voyage8	0.55	1.13	1.40	1.83
voyage9	0.48	1.48	1.09	2.20
voyage16	0.38	1.00	1.08	1.80
平均	0.44	1.18	1.12	1.88

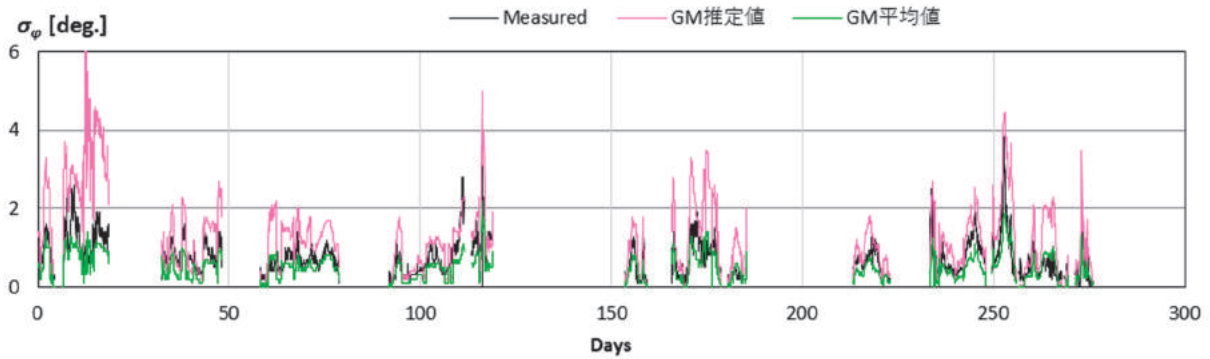


図13 横揺標準偏差の時系列 (模型実験値)

表5 平均平方二乗誤差の比較

Voyage No.	喫水比 r_d	\overline{RMSE}^1	
		GM 推定値	GM 平均値
1	0.78	1.07	0.37
2	0.87	1.86	0.42
3	0.76	0.68	0.49
4	0.93	1.10	0.37
6	0.77	0.66	0.63
7	0.77	0.69	0.50
8	0.90	1.13	0.54
9	0.94	1.48	0.48
10	0.90	2.52	0.73
14	0.95	0.70	0.48
15	0.77	0.65	0.56
16	0.93	1.00	0.42
17	0.94	1.83	0.59
18	0.93	1.44	0.77
20	0.93	0.88	0.52
21	0.94	1.11	0.50
平均		1.18	0.52

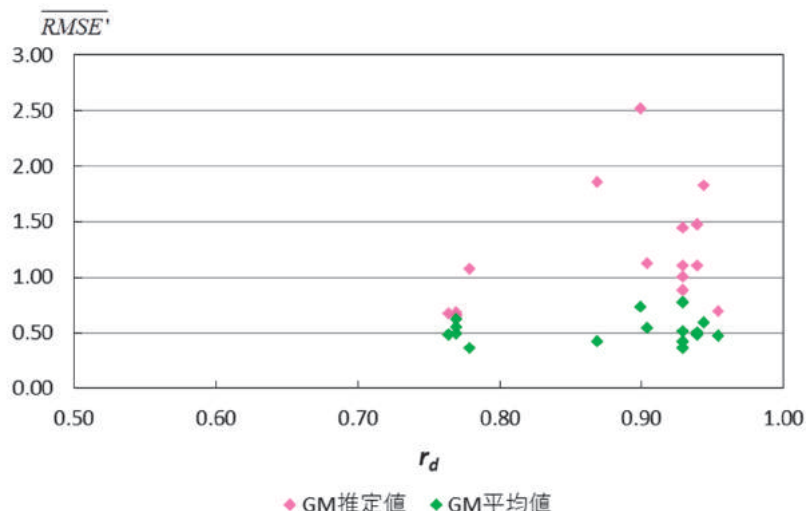


図 14 喫水と平均平方二乗誤差の関係

4. 結言

横揺運動推定法の検証のため、自動車運搬船を対象に横揺標準偏差を推定し、実船データとの比較を行った。横揺推定関連パラメータのうち、横揺減衰力については、類似船の自由横揺試験結果を用いる評価法と各成分の横揺減衰力を推定する方法を用い、メタセンタ高さなどの重心情報については、既存の推定法と実測データを用いた。今回の対象船については、横揺減衰力の評価に類似船の自由横揺試験結果を用い、メタセンタ高さを実測値を用いた場合の推定結果が実船データとの一致が最も良いことを示した。一方、メタセンタ高さに推定値を用い、横揺減衰力を成分推定法により求めた場合は、横揺を過大に推定する傾向があり、適用には注意が必要であることが分かった。重心情報については、抽出した航海データの実測値の平均値を用いても、実船データに近い傾向の推定結果が得られることが分かった。また、重心情報については喫水が同程度であっても貨物の状況により変化するため、正確な評価を行うためには、実際の重心情報を用いる必要があることを示した。

謝 辞

本研究は当所の重点研究に関連し、株式会社MTI及び日本郵船株式会社との共同研究「実海域性能評価技術に関する研究」において実施した。

参考文献

- 1) 日本船舶海洋工学会：4.2 横揺れ減衰力，船舶海洋工学シリーズ 5 船体運動 耐航性能 初級編（2013），pp.108-121.
- 2) 池田良穂：横揺れ減衰力，運動性能研究委員会・第1回シンポジウム（1984），pp.241-250.
- 3) 池田良穂，小松清，姫野洋司，田中紀男：横揺れ減衰力についてービルジキールによる船体表面圧力効果ー，関西造船協会誌，第165号（1977），pp.31-40.
- 4) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男：裸設の横揺れ造渦減衰力について，日本造船学会論文集，第142号（1977），pp.54-64.

- 5) 吉田尚史, 折原秀夫, 山崎啓市: 運航支援システム「Sea-Navi®」, JFE 技報, No.32 (2013), pp.87-90.
- 6) 安藤英幸: 環境負荷低減のための運航モニタリング, 計測と制御, 第50巻第6号 (2011), pp.1-7.
- 7) 辻本勝, 粉原直人, 黒田麻利子, 櫻田顕子: 実運航シミュレータ VESTA, 海上技術安全研究所報告, 第15巻第4号特集号 (2015), pp.449-459.
- 8) 関西造船協会: 7.1.3(1)横揺周期, 造船設計便覧第4版 (2004), pp.414.
- 9) 井上義行, 奥住恵子, 板津さち子, 林哲也, 日笠則明: 各種貨物船の船型要素と波浪中動揺性能, 関西造船協会誌, 第208号 (1988), pp.11-25.
- 10) International Association of Classification Societies: Standard Wave Data, IACS Rec. No. 34 (Rec. 2000/Corr. 2001).
- 11) 櫻田顕子, 粉原直人, 黒田麻利子, 辻本勝, 杉本義彦, 長谷川健: 実運航シミュレーションによる実船データ解析—排水量修正と波風修正の適用—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第25号 (2017), pp.33-38.
- 12) M. Tsujimoto, M. Kuroda, N. Sogihara: Development of a Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance Evaluation, Proc. of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013-11297(2013).

附 録

A. 横揺減衰力造渦成分の計算方法

本論文において, 池田法に基づいた横揺減衰力係数の造渦成分 B_E については参考文献 4) をベースに, 以下の定式化を行って求めた. ここで, L_{ps} は船長 (船首水切り位置と A.P. もしくは船尾水切り位置間の長さ) であり, U は前進速度, x は船長方向座標, d_{mid} は中央喫水, ϕ_a は横揺振幅, ω_e は横揺角周波数, \overline{OG} は水線面から重心までの距離 (水線面から上方を正), $B(x)$, $d(x)$, $S(x)$: x 断面における船幅, 喫水, 横断面積, a_1' , a_3' は H_0' , σ' から求められるルイスフォームの係数である.

$$B_E = \int_{L_{ps}} B_E(x) dx \tag{A.1}$$

$$B_E(x) = \begin{cases} \frac{(0.04K_E)^2}{(0.04K_E)^2 + 1} B_{E0}(x; \varphi_1) & (r_{max1} > r_{max2}, B_{E0}(x; \varphi_1) > 0) \\ \frac{(0.04K_E)^2}{(0.04K_E)^2 + 1} B_{E0}(x; \varphi_2) & (r_{max1} \leq r_{max2}, B_{E0}(x; \varphi_2) > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{A.2}$$

$$K_E = L_{ps} \omega_e / U \tag{A.3}$$

$$B_{E0}(x; \varphi) = \frac{4}{3\pi} \rho d_{mid}^2 r_{max}(x; \varphi)^2 \phi_a \omega_e \left\{ \left(1 - f_1(x) \frac{R(x)}{d(x)} \right) \left(1 + \frac{\overline{OG}}{d(x)} - f_1(x) \frac{R(x)}{d(x)} \right) + f_2(x) \left(H_0(x) - f_1(x) \frac{R(x)}{d(x)} \right)^2 \right\} C_p(x) \tag{A.4}$$

$$H_0(x) = B(x) / (2d(x)) \tag{A.5}$$

$$\sigma(x) = S(x) / (B(x)d(x)) \tag{A.6}$$

$$f_1(x) = \frac{1}{2} [1 + \tanh\{20(\sigma(x) - 0.7)\}] \tag{A.7}$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0.5\{1 - \cos(\pi\sigma(x))\} - 1.5\{1 - e^{-5(1-\sigma(x))}\}\sin^2(\pi\sigma(x)) & (0 \leq \sigma(x) \leq 1) \\ 0 & (\sigma(x) < 0) \\ 1 & (1 < \sigma(x)) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

$$R_0(x) = \begin{cases} \text{Min}[d(x), B(x)/2] & (\sigma(x) > 1) \\ 2d(x)\sqrt{\frac{H_0(x)(1-\sigma(x))}{4-\pi}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

$$R(x) = \begin{cases} R_0(x) & R_0(x) \leq d(x), R_0(x) \leq \frac{B(x)}{2} \\ d(x) & \frac{B(x)}{2} \geq d(x), R_0(x) > d(x) \\ \frac{B(x)}{2} & \frac{B(x)}{2} \leq d(x), R_0(x) > \frac{B(x)}{2} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

$$C_p(x) = \begin{cases} 1.5 & (\sigma'(x) \leq 0 \text{ or } H_0'(x) \leq 0 \text{ or } d(x) + \overline{OG} = 0 \text{ or } \sigma'(x) \geq \sigma_U'(x)) \\ \frac{1}{2}(0.87e^{-\gamma(x)} - 4e^{-0.187\gamma(x)} + 3) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

$$\gamma(x) = \begin{cases} \gamma'(x; \varphi_2) & (r_{\max 1} \leq r_{\max 2}, |q(x)| \leq 1) \\ \gamma'(x; \varphi_1) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma'(x; \varphi) = \frac{\sqrt{\pi} f_3(x)}{2d(x) \left(1 + \frac{\overline{OG}}{d(x)}\right) \sqrt{H_0'(x)\sigma'(x)}} \left(r_{\max}(x; \varphi) + \frac{2M'(x; \varphi)}{H'(x; \varphi)} \sqrt{A'(x; \varphi)^2 + B'(x; \varphi)^2} \right) \quad (\text{A.13})$$

$$f_3(x) = 1 \quad (\text{A.14})$$

$$H_0'(x) = \frac{B(x)}{2(d(x) + \overline{OG})} = \frac{1 + a_1'(x) + a_3'(x)}{1 - a_1'(x) + a_3'(x)} \quad (\text{A.15})$$

$$\sigma'(x) = \frac{S(x) + \overline{OG} \cdot B(x)}{B(x)(d(x) + \overline{OG})} = \frac{\pi}{4} \frac{1 - a_1'(x)^2 - 3a_3'(x)^2}{(1 + a_1'(x) + a_3'(x))(1 - a_1'(x) + a_3'(x))} \quad (\text{A.16})$$

$$\sigma_U'(x) = \frac{\pi}{32} \left(H_0'(x) + \frac{1}{H_0'(x)} + 10 \right) \quad (\text{A.17})$$

$$r_{\max}(x; \varphi) = \begin{cases} d(x) & (\sigma'(x) \leq 0 \text{ or } H_0'(x) \leq 0 \text{ or } d(x) + \overline{OG} = 0 \text{ or } \sigma'(x) \geq \sigma_U'(x)) \\ M'(x; \varphi) \sqrt{\{(1 + a_1'(x))\sin\varphi - a_3'(x)\sin(3\varphi)\}^2 + \{(1 - a_1'(x))\cos\varphi + a_3'(x)\cos(3\varphi)\}^2} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

$$M'(x; \varphi) = \frac{B(x)}{2(1 + a_1'(x) + a_3'(x))} \quad (\text{A.19})$$

$$H'(x; \varphi) = 1 + a_1'(x)^2 + 9a_3'(x)^2 + 2a_1'(x)(1 - 3a_3'(x))\cos(2\varphi) - 6a_3'(x)\cos(4\varphi) \quad (\text{A.20})$$

$$A'(x; \varphi) = -2a_3'(x)\cos(5\varphi) + a_1'(x)(1 - a_3'(x))\cos(3\varphi) + \{(6 - 3a_1'(x))a_3'(x)^2 + (a_1'(x)^2 - 3a_1'(x))a_3'(x) + a_1'(x)^2\}\cos\varphi \quad (\text{A.21})$$

$$B'(x; \varphi) = -2a_3'(x)\sin(5\varphi) + a_1'(x)(1 - a_3'(x))\sin(3\varphi) + \{(6 - 3a_1'(x))a_3'(x)^2 + (3a_1'(x) + a_1'(x)^2)a_3'(x) + a_1'(x)^2\}\sin\varphi \quad (\text{A.22})$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_1 & (r_{max1} > r_{max2}) \\ \varphi_2 & (r_{max1} \leq r_{max2}) \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

$$\varphi_1 = 0 \quad (\text{A.24})$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} \text{Cos}^{-1} q(x) & (|q(x)| \leq 1) \\ \text{Tan}^{-1} H_0'(x) & (|q(x)| > 1) \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

$$q(x) = \frac{a_1'(x)(1+a_3'(x))}{4a_3'(x)} \quad (\text{A.26})$$

$$r_{max1} = r_{max}(x; \varphi_1) \quad (\text{A.27})$$

$$r_{max2} = r_{max}(x; \varphi_2) \quad (\text{A.28})$$