The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	海水打ち込みにより甲板に作用する荷重の研究及び安全基準への適用
Author(s)	小川, 剛孝
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/590
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

海水打ち込みにより甲板に作用する荷重の研究及び安全基準への適用

平成14年10月

小　川　剛　孝

目 次

第1章　緒　論 **4**
1.1 緒　言 4
1.2 従来の研究 5
1.3 本論文の内容 7

第2章　海水打ち込みに関する模型実験 **9**
2.1 緒　言 9
2.2 波浪中模型実験の概要 9
2.2.1 供試模型 9
2.2.2 計測項目 10
2.2.3 内航タンカー模型による実験 11
2.2.4 内航貨物船模型による実験 12
2.2.5 不規則波中実験 12
2.3 実験結果と考察 13
2.3.1 船体運動 13
2.3.2 相対水位 13
2.3.3 海水打ち込みに対する波高及び船速の影響 14
2.3.4 船体運動に対する船首部水線面上形状の影響 15
2.3.5 打ち込み荷重に対する船首部水線面上形状の影響 15
2.3.6 不規則波中実験結果 16
2.4 船首部相対水位に関する検討 17
2.4.1 船首部相対水位に関する模型実験 18
2.4.2 波高の非線形影響 18
2.4.3 動的な水位変動の影響 20
2.4.4 考察 21
2.5 結　言 21

第3章　海水打ち込みの推定法 **23**
3.1 緒　言 23
3.2 甲板上水位分布の推定法 23
3.3 打ち込み荷重の推定法 28
3.4 甲板上構造物にはたらく水平方向の衝撃圧の推定法 29
3.5 推定法の検証及び考察 31

3.5.1 打ち込み水量 32
3.5.2 打ち込み荷重及び水圧 32
3.5.3 水平方向の衝撃圧 34
3.6 結　言 35

第4章　確率論的手法を用いた海水打ち込みの予測法　36
4.1 緒　言 36
4.2 打ち込み荷重の予測法 36
4.2.1 打ち込み荷重の確率密度関数 36
4.2.2 打ち込み荷重の短期予測計算 38
4.2.3 船首高さ及び波浪の影響 39
4.2.4 打ち込み荷重の長期予測計算 39
4.3 打ち込み水量の予測法 40
4.3.1 打ち込み水量の確率密度関数 40
4.3.2 打ち込み水量の長期予測計算 42
4.4 結　言 42

第5章　海水打ち込みの観点からの安全基準の検討（実際の問題への応用）　43
5.1 緒　言 43
5.2 限定近海船の満載喫水線の設定 44
5.2.1 満載喫水線の設定法 44
5.2.2 計算方法 45
5.2.3 限定近海船の乾舷 45
5.2.4 限定近海船の船首高さ 46
5.2.5 まとめ 48
5.3 バルクキャリアにはたらく打ち込み荷重 48
5.3.1 ハッチカバー強度の見直しの動向 48
5.3.2 模型実験 49
5.3.3 計測項目 49
5.3.4 船体運動及び船首相対水位 50
5.3.5 打ち込み荷重 50
5.3.6 実験結果の定量的な評価 51
5.3.7 現行基準等で規定する荷重との比較 53
5.4 結　言 53

第6章　結　論　55

謝辞　58

参考文献　59

記号一覧　62

第1章　緒　論

1.1　緒　言

船舶の波浪中での安全性に関して、荷物の積み過ぎによる事故を防止するために満載喫水が定められている。国際的には、満載喫水線条約として1966年に採択・成立し、国内規則は満載喫水線規則として条約に準ずる形で1968年に策定された。

現在、条約が採択された当時に比べて船型及び運航実態は変化しており、改正の機運が高まっている。これまでにも改正の議論は折にふれて行われてきたが、条約改正の発効の手続きの困難さからIMO(International Maritime Organization;国際海事機関)において改正案の決定はされても、発効されたものはない状態が続いていた。しかしながら、近年の発効手続きの改正により条約改正が容易になったため、俄然改正の機運が高まっており、具体的な見直し作業が行われているところである。この見直し作業では、少なくとも技術的な観点からは、全面的な見直しを指向している[1]。特に、現在の条約策定以後に目覚しい発達を遂げた耐航性理論をもとに工学的な観点から合理的に見直す事が求められている。

また、国内に関しても、国内規則策定当時に比べて船型及び運航実態が変化している。特に近年、国土交通省（当時運輸省）は内航海運の効率化を目的として、船舶安全法上、航行区域が主要内航航路を包含する区域に限定される限定近海船（概ね距岸100海里以内を航行する内航貨物船）という分類を新たに設けた。船舶設備規定等の設備に関する基準については限定近海船の設定と同時に基準の合理化がはかられた。しかしながら、現行の近海区域と沿海区域との間で気象海象条件の違いに基づき各々定めている満載喫水線規則のような船舶の機能を規定する基準に関しては、調査・研究が必要と考えられたため見直しについては先送りされている。

本研究では、これらの事を背景として、満載喫水線を設定するための手法の確立を目的とする。満載喫水線を設定するためには、満載喫水線を設けることで確保されている安全性を定量的に評価する必要がある。この安全性確保の主なものとして海水打ち込みの防止があげられる。海水打ち込みはよく知られているように、船体及び甲板上構造物への損傷や作業性の低下を引き起こす。このため、海水打ち込みを定量的に評価するためには、甲板上水位分布や打ち込み荷重を定量的に求める必要がある。しかしながら、甲板冠水の挙動は複雑であり、これに関連する諸量を精度よく求めることは容易ではない。従来から海水打ち込みに関する研究は多数実施されているものの、その多くが甲板と海水面の相対変位を海水打ち込みの有無と関連付けようとするものである。近年目覚しい発達を遂げている数値流体力学も現時点では海水打ち込み現象を説明するに至っていない。実験的研究に関しても、甲板冠水の挙動や打ち込み荷重を直接計測したものは多く

ない。よって現時点では、甲板上水位分布や打ち込み荷重の推定手法が確立されたとは言い難い。

船舶の耐航性能は、船舶の安全性及び経済性の双方に深く関連する。このような観点から、従来より多数の耐航性能に関する研究が精力的に行われている。その結果、ストリップ法をはじめとする多くの耐航性能推定法が生み出されている。しかしながら、これらの多くは波浪中船体運動、波浪荷重、波浪中抵抗増加に関するものであり、スラミングに代表される衝撃荷重、海水打ち込み、転覆といった分野に関しては、現時点では十分に推定法が確立しているとは言い難い。これらに関しては今後もさらに研究を進めて、研究成果を耐航性能の向上に反映させていく必要性がある。

また近年、これまで十分検討されなかった船舶の水線面上形状と耐航性能の関係についての研究が進められつつある。特に船首尾での水線面上形状は、波浪中抵抗増加、スラミング、海水打ち込みとの相関が強い。よって、水線面上形状と耐航性能を結びつけるためには、スラミングや海水打ち込みの合理的な推定手法の確立が必要不可欠となる。

本研究では、はじめに甲板上水位分布や打ち込み荷重を直接計測し、波高、波長及び船速が海水打ち込みに及ぼす影響について論じる。ここで得られた知見をもとに、甲板冠水の挙動をモデル化し、甲板上水位分布の推定法を提案する。さらに、甲板上水位分布を用いた打ち込み荷重の推定法について提案する。また、甲板冠水は甲板上を急激に流下するため甲板上構造物に損傷を及ぼす場合がある。そこで、甲板冠水により生じる水平方向の衝撃圧の推定法についても提案する。

また、海水打ち込みを考慮して満載喫水線を設定するためには、船舶の稼動期間における打ち込み荷重等を予測する必要がある。そこで本研究では、打ち込み荷重の超過確率を導き、予測法についても提案する。

さらに、これらの手法を用いた現行の満載喫水線基準の評価及び海水打ち込みを考慮した限定近海船の満載喫水線の設定について論じる。

1.2 従来の研究

従来から海水打込みに関しては、実験的研究を中心に数多くの研究が行われている。これらの多くが甲板と海水面の相対変位を海水打ち込みの有無と関連付ける研究であり、甲板上水位分布や打ち込み荷重を直接計測して検討した研究は少ない。

甲板と海水面の相対変位を海水打ち込みと関連付ける研究の主なものに、Newton[2]、田崎[3]、竹沢ら[4]、O'Dea et. al.[5]、Lloyd et. al.[6]、高木ら[7]の研究がある。これらの研究では、船首形状と海水打ち込みとの相関を調べている。研究結果を総括すると、船首形状が変化しても船体運動にはあまり影響を及ぼさない事は共通の結論として得られている。しかしながら、海水打ち込みの発生頻度という観点では共通した結論は得られていない。例えば、フレアーの大小やナックルの有無が海水打ち込みに及ぼす影響は研究毎に異なっており、現在も一般的な結論は得られていない。その要因として次に示すいくつかの事が考えられる。

海水打ち込み現象は、スプレーや波崩れなどの自由表面の非線形性の影響を受けやすい現象であり、船型、波高、波長及び船速によって打ち込み水の挙動が大きく異なってく

ると予想される。主な要因の一つは、これらの実験条件が研究毎にそれぞれ異なっており、結果の整理を困難にしている点である。また、船速が相対的に高速な場合には、船首甲板が水面に近づくとスプレーを発生して甲板上へ流入する[8]。一方、大波高で船首部を波の山に突入して水をすくいあげるために甲板上に水が流入する場合もある[9]。いわゆる"Shipping water"と"Green sea（青波）"の違いである。上記の研究で計測した海水打ち込みは両者が混在しているためその取り扱いを複雑にしている事も一因としてあげられる。

もう一つの主な要因は、打ち込みを判定する指標の違いである。例えばO'Dea et. al.[5]は甲板水位を指標とし、Lloyd et. al.[6]は、打ち込み水圧の有無を指標としているが、研究結果は必ずしも一致しない。打ち込み荷重及び水圧は甲板冠水が引き起こすため、これらの相関は強いことが予想される。しかしながら、甲板上水位分布と打ち込み荷重及び水圧を同時に計測して相関を調べた事例は少ない。このことも結果の整理を同じく困難にしている。

また、甲板上水位分布を詳細に計測した事例は少なく、打ち込み荷重との相関だけでなく船体運動及び相対水位との相関が明確にされていない。このことが、打ち込み荷重の推定法の確立を困難にしている要因の一つとしてあげられる。

本研究のような甲板冠水の挙動や打ち込み荷重の研究はこれまであまり行われていない。近年、FPSO（Floating Production Storage and Offloading）の作業時における海水打ち込みが問題となっている[10][11][12]。また、英国ダービシャー号の事故をはじめとするバルクキャリアの海難が相次いだ事に関連して、満載喫水線条約第16規則で規定されるハッチカバー強度が問題とされるようになっており、打ち込み荷重への関心が高まっている[49][14]。

甲板冠水の挙動については、郷田ら[15][16]、溝口[17][18]、Buchner[10][11]、Berhault et. al.[12]の研究などがある。これらのうち、郷田らは2次元模型を用いて強制上下揺実験を行い、船側部相対水位変動が船側部からの甲板への流入する際のモデル化をダムの崩壊モデル[19]を用いて行った。Buchner[10][11]やBerhault et. al.[12]はFPSOへの打ち込み水を計測して、数値計算を行っている。これらはすべて、停止した船舶の甲板上へ水が乗り上げるような現象であり、そのモデルには船速の影響が含まれていない。そのため先に述べたような前進する船舶が波に突入して水をすくい上げるような現象とは異なる。溝口[17]は、特性曲線法を用いて打ち込み水の挙動を計算している。その際、境界上での流速として船速を与えることで実験結果とよい一致を得た。船体運動による甲板上の傾斜や加速度の影響を考慮していない事や大波高中での計算の難しさ等の課題は残っているが、前進する船舶の船首部での打ち込みを考える際に船速の影響をとり入れる必要性を示唆している。スプレー現象については、Takagi et. al.[8]が、Wagner[20]により示された楔形物体回りの自己相似流の厳密解を導いたDobrovol'skaya[21]の手法を拡張して、甲板がある場合の流場を求めてフレア角の最適化を行った。

打ち込み水圧については、栖原ら[22]、川上ら[9][23]、竹沢ら[4]の研究などがある。また、甲板冠水が流下することで甲板上構造物に作用する水圧については、溝口[17][18]が高速コンテナ船型を用いてwater breakerに作用する水圧の計測を行った。しかしながら、これらの研究では実験式を用いて水圧を求めてはいるものの、理論的検討を十分に行っ

ていない。そのため、船型、波高、船速等の影響について明確に結論づけられているわけではない。近年、Buchner[10]は、FPSO上の甲板上水位分布を計測し、打ち込み水の運動量変化を考慮する事で打ち込み水圧を合理的に説明している。このことから、打ち込み荷重に関しても同様の検討を行う事や甲板上水位分布を正確に推定する必要性がある。

海水打ち込みが縦曲げモーメントに及ぼす影響については、川上ら[23]、郷田ら[24]、Wang et. al.[25]が行っている。川上ら[23]は、船首部における打ち込み水圧とそれにより発生するホイッピングについて検討を行っている。その結果、ホイッピングによる縦曲げモーメントが無視できない事を実験的に示している。しかしながら、打ち込み荷重の推定法が確立されていないため、定量的な議論をするまでには至っていない。

また、海水打ち込みを考慮して、満載喫水線の設定や現行基準の評価を行うためには、海水打ち込みに関する長期予測計算を行って船舶の稼動期間における最大値を推定し、検討する必要がある。これまでにも福田[26][27]、万ら[28]によって、船首部相対水位と乾舷の関係から海水打ち込みの発生頻度や甲板冠水持続時間についての長期予測法の提案が行われている。しかしながら、甲板の強度の観点からは打ち込み荷重、甲板上での作業性の観点からは甲板上水位分布を直接予測する必要がある。

このうち、打ち込み荷重については、福田ら[29]、川上ら[9]の研究などによって予測法の研究が行われてきた。これらの研究での打ち込み荷重は、相対水位が船首高さ及び乾舷を乗り越えた高さ（越波高さ）の極大値に比例する水頭で表せるとしている。このような打ち込み荷重の取り扱いについては、実験的に確かめられたわけではない。打ち込み水圧についての実験的研究[4]でもこれを裏付ける結論は導かれておらず、相対水位と打ち込み荷重の関係については実験、理論の双方からさらに検討を行う必要がある。

これらの事をまとめると、前進する船舶が波に突入する場合の海水打ち込み水について、甲板上水位分布や打ち込み荷重の推定法、さらにこれらを統計的に取り扱うための予測法の研究はあまり行われていない事がわかる。また、船体運動及び相対水位と海水打ち込みとの関連についても船首高さ及び乾舷と相対水位の大小関係から打ち込み発生の有無を判別できることを除けば十分に調べられているとは言い難い。そのため、甲板上水位分布や打ち込み荷重の直接計測を行うことでこれらの相関及び船体運動や相対水位との関係を把握する必要がある。このような実験データの取得及び推定法の開発は、満載喫水線の評価及び設定だけでなく耐航性能の向上のためにも必要である。

1.3 本論文の内容

本論文は次の6章から構成されている。

第1章は緒論である。

第2章では、海水打ち込み現象の把握を目的として、内航タンカー模型及び内航貨物船模型を用いた規則波及び不規則波中での自由航走実験を行っている。このうち、内航貨物船については、母船型と母船型からフレア形状及び船首高さを変えた3種類の模型船で実験を行っている。実験結果から、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧に対する波高や船速の影響について論じている。また、船首部水線面上形状の違いが船体運動、相対水位及び海水打ち込みに及ぼす影響についても論じている。さらに、甲板上水位分布や

打ち込み荷重との相関が強く、これらを推定する上で重要な要素となる船首部相対水位の精度の検証及び精度向上のための問題点についても論じている。

第3章では、第2章で得た結果を基に、洪水流の解析理論[31]を応用した甲板上水位分布の推定法を提案している。さらに、甲板上水位分布を用いた打ち込み荷重及び水圧、甲板上構造物にはたらく水平方向の衝撃圧の推定法についても提案している。打ち込み荷重及び水圧については、甲板冠水の運動量変化を考慮することで精度よい推定を可能にしている。水平方向の衝撃圧については、Wagner[20]の理論を応用することで合理的な推定を可能にしている。これらの計算結果を実験値と比較することで精度の検証を行っている。

第4章では、前章までに得た結果を基に、打ち込み荷重及び水量の予測法を提案している。規則波中実験での結果を用いて、船首部相対水位と打ち込み荷重及び水量の関係を論じている。この関係をもとにして超過確率を導き、打ち込み荷重及び水量の短期予測法を提案している。これらの計算結果を不規則波中実験の結果と比較することで精度の検証を行っている。さらに、長期予測計算を行い、従来の研究結果との比較及び検討を行っている。

第5章では、本研究で提案した推定法を実際の問題に適用している。はじめに、限定近海船の満載喫水線の設定を行っている。基準の考え方について整理を行った後、本研究で提案した予測法を用いることで、打ち込み荷重を考慮した満載喫水線の設定を行っている。つぎに、バルクキャリアにはたらく打ち込み荷重の評価を行っている。ここでは、本研究で提案した打ち込み荷重の推定法を拡張することで甲板だけでなくハッチカバー上にはたらく打ち込み荷重の推定を可能にしている。

第6章は、以上の研究により得られた成果を総括すると共に今後の課題について述べる。

第2章　海水打ち込みに関する模型実験

2.1　緒　言

前章でも述べたとおり、甲板冠水や打ち込み荷重を直接計測して調べた研究は少ない[9][4]。また、これらの研究では主に甲板上の任意の箇所における打ち込み水圧を計測しており、打ち込み荷重や甲板上水位分布を直接計測していないので甲板冠水と打ち込み荷重の関係について明確な結論が得られていない。そのため、これまでにも数多く海水打ち込みに関する研究が実施されているにもかかわらず、その成果は相対水位変動と乾舷及び船首高さの大小から海水打ち込み発生の有無を議論する程度にしか活用されていないのが現状である。

そこで本章では、模型実験により甲板上水位分布や打ち込み荷重を直接計測した。実験は、独立行政法人海上技術安全研究所第1水槽（80m角水槽、縦×横×水深：80×80×4.5m）において行った。波浪中で模型船を無線操縦により自由航行し、船体運動、相対水位、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧を計測した。実験は波高、波長及び船速を変えて行い、これらが甲板冠水や打ち込み荷重に及ぼす影響について論じた。さらに、母船型と母船型から船首フレア形状及び船首高さなどの船首部水線面上形状をそれぞれ変えた3種類の模型船を用いた実験も行った。これにより、船首部水線面上形状の違いが船体運動、相対水位及び海水打ち込みに及ぼす影響についても論じた。

また、甲板上水位分布や打ち込み荷重を評価するための重要な要素である船首部相対水位について、既存の実用的な推定手法であるストリップ法による計算値は、乾舷及び船首高さとの大小関係から海水打ち込み発生の有無を判別する上で十分な精度を有することは確認されている。しかしながら、海水打ち込みが生じるような荒天下での船首部相対水位の定量的な検証が十分なされているとは言い難い。そこで、これらの推定精度の検証及び精度向上のための問題点についても論じた。

2.2　波浪中模型実験の概要

2.2.1　供試模型

実験には、内航タンカー（749G/T型、船長L_{pp}=72m、縮率:1/18）及び内航貨物船（699G/T型、船長L_{pp}=78.5m、縮率:約1/19）の木製相似模型を用いた。現在航行する内航船においてタンカーと貨物船が最も多い船種で、全体の約6割をしめていること[32]を勘案してこれらの船種を決定した。船型は、実態を十分に調査した上で代表的な船型を決定した[32]。

また、海水打ち込みに対する船首部水線面形状と船首高さの影響を調べるために、貨

物船については母船型と母船型からフレア形状及び船首高さと乾舷を変えた3種類の模型を用いて実験を行った。このフレア形状の変化については、内航貨物船の実態の範囲内での変化にとどめた。

タンカーの主要目及び重心上メタセンタ高さGM等をTable2.1に、Body planをFig.2.1に示す。貨物船は、母船型（以下Type1)、母船型から船首高さと乾舷を低くした船型(以下Type2)、船首フレア形状をふくらませた船型(以下Type3)の3種類について、主要目及び重心上メタセンタ高さをTable2.2に、Body planをFig.2.2とFig.2.3に示す。

2.2.2 計測項目

実験では、船体運動、相対水位、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧を計測した。タンカー及び貨物船の計測装置の配置をFig.2.4及びFig.2.5に示す。船体運動については、光ファイバー式ジャイロを模型船に搭載し、縦揺、横揺、上下加速度、水平加速度及び前後加速度の計測を行った。船首揺については、自航式模型の方位を制御するために搭載している方位式ジャイロにより計測した。模型船の艤装の都合上、船体運動の重心位置と光ファイバー式ジャイロの重心位置は異なった。そのため、上下、水平及び前後の各加速度は、位置の違いによる加速度の補正を行った後に上下揺、左右揺及び前後揺の動揺変位にそれぞれ換算した。また、船体と波面の相対関係について調べるために、船首及び船側部に容量式波高計を取り付けて相対水位を計測した。タンカーについては、船首、S.S.6 1/2(右舷側)、S.S.4 1/2(右舷及び左舷側)、S.S.1 1/2(右舷側)の5ヶ所で計測した。貨物船は、船首部でのみ相対水位を計測した。

海水打ち込みと船首高さ及び乾舷の関係を考える場合、波による動的な波面の盛り上がりだけではなく船舶が航走することによる波面の盛り上がりも考慮する必要がある。そこで、波浪中実験に先立ち平水中での自由航走実験も行なった。これにより、平水中での定常航走による波面の盛り上がりを容量式波高計を用いて計測した。

海水打ち込みを定量的に把握するために、甲板上水位分布と打ち込み荷重及び水圧を計測した。船首部の計測装置の配置をFig.2.6に示す。甲板上水位分布は、櫛型の容量式水位計[33]を前部垂線(F.P.)からS.S.9までの船首楼甲板上に1/4断面毎に配置して計測した。この水位計は、Fig.2.6に示すように各断面毎に櫛型に容量線を取り付ける事で各S.S.での平均水位を計測するものである。打ち込み水量は、これらを船長方向に積分することで求めた。

打ち込み荷重は、Fig.2.6に示すように主船体から分離した船首楼甲板の下に検力計を取り付けて計測した。分離した甲板の面積は内航タンカーで$0.158m^2$(実船換算$51.19m^2$)、内航貨物船で$0.114m^2$(実船換算$41.79m^2$)である。分離した甲板の材質にはバルサ材を用いて強度を保ちつつ軽量なものとした。また、検力計と甲板をつなぐ治具も同様に軽量にした。これにより、船首楼甲板及び治具による慣性力の影響を極力押さえるよう留意した。検力計の計測波形に含まれるこれらの慣性力は、検力計と同じ位置で計測した加速度計の実験値と治具及び甲板の重量の積により求めた。打ち込み荷重の計測波形は、検力計の計測波形からこの慣性力を除くことで求めた。また、模型船内部への防水のために甲板と主船体の間にシリコンを注入したが、これが荷重の計測に影響を及ぼさないこ

とを確認した。船首楼甲板と検力計の固有振動数はタンカー及び貨物船共に100Hz強であった。実験結果から、打ち込み荷重の持続時間はおよそ0.1から0.2秒程度であった。これらの周波数帯は異なっており、計測装置の固有振動数が計測に影響を及ぼさないことを確認している。

局所的な水圧を把握するために、船首楼甲板上に受圧面が鉛直上向きとなるように水圧計を取付けて上下方向にはたらく打ち込み水圧を計測した。タンカーについては船首付近でセンターライン上の4点（前部垂線(F.P.）の前方120mmと70mm及び後方50mmと120mm、以下各々P_A〜P_Dと呼ぶ)、貨物船では、前部垂線(F.P.）の前方50mm（以下P_1）及び後方50mm（以下P_2）でセンターライン上の2点に取り付けた。また、甲板冠水は甲板上を流下する事により甲板上構造物等の損傷を引き起こす。そこで、貨物船については、S.S.9の後方10mmのセンターライン上に冶具を取り付け、水圧計の受圧面を船首方向に向けて船体横断面と平行となるよう取り付けた（以下P_3)。これにより、甲板冠水が流下する事で発生する水平方向の衝撃圧を計測した。水圧計は(株)三計エンジニアリング製の歪み式水圧計を用いた。これは、表面に半導体をコーティングすることで温度補正処理を施したものである。これにより船首楼甲板のような空気中に露出する場所での水圧の計測をサーマルショックを発生せずに計測することができた。これらの水圧計の取り付け位置をTable2.3に示す。

実験は、これらの計測装置を自航式模型に搭載して計測した。計測したデータは、同じく模型船上に搭載したテレメータ装置で計測室に送信してA/D変換を行った。甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧は、高い周波数応答が予想されたため、模型船上に搭載したA/D変換器で直接記録する方法を採用した。このA/D変換器のサンプリングタイムは1000Hzである。後述する打ち込み荷重及び水圧の解析には船上のA/D変換器のデータを用いた。さらに、模型船上にビデオカメラを取り付けて甲板冠水の挙動を観察した。

模型船の方位を一定にするために、オートパイロット装置を搭載して制御した。船速は、模型に搭載したモータの回転数を制御する事で波浪中での平均船速が所期の速度となるように設定した。

2.2.3　内航タンカー模型による実験

内航タンカーは船体中央部付近での上甲板の位置が低く、それほど荒れた海象でなくても頻繁に上甲板が冠水した状態で航行する。これまでの数多くの研究から、相対水位と乾舷及び船首高さの関係から海水打ち込み発生の有無が判別できることがわかっている。よって、乾舷や船首高さを規定するためには、船舶の運動及び相対水位を推定して定量的に評価する必要がある。しかしながら、このような内航船の波浪中での運動や相対水位の推定精度を検証した事例は多くない。

そこで、船速と波高波長比H/λをそれぞれフルード数F_n=0.1, H/λ=1/30で固定し、波向χと波長船長比λ/Lを変えて模型実験を行なった。波向は追波(χ=0 °)から正面向波(χ=180 °)まで30 °刻みで、波長船長比はλ/L=0.5〜2.0の範囲で設定した。つぎに、実用的な船体推定法であるストリップ法(New Strip method、以下NSM)により船体運動及び相対水位変動を計算し、実験値と比較することで精度を検証した。さらに、相対水位と乾舷及び船

首高さの大小関係と打ち込み発生の有無の相関について調べた。

これらの結果をもとに、海水打ち込みが激しくなる正面向波（χ=180 °）及び斜め向波中（χ=150 °）のλ/L=1.0, 1.25, 1.5で船速と波高を変えて実験を行った。実海域で海水打ち込みが発生するような状況では、波や風による自然減速や操船による意識的減速により船速が低下するが、ここでは船速及び波高の影響を調べる事が目的であるので、波浪中での平均船速が所期の速度となるように模型船のモーター回転数を制御した。

2.2.4 内航貨物船模型による実験

内航タンカーの実験結果から、海水打ち込みは向波中で縦運動が大きくなる時に激しくなる事がわかった。そこで、内航貨物船については正面向波(χ=180 °)及び斜向波中(χ=150 °)で模型実験を行った。波長船長比は向波での縦運動の同調点付近、すなわち相対水位が大きくなり、打ち込みが激しく発生するλ/L=1.0, 1.2について、船速はF_n=0.17で一定として、H/λ=1/23から1/38の範囲で計測した。実験は、貨物船の母船型（Type1)、母船型から船首高さと乾舷を低くした船型(Type2)、船首フレア形状をふくらませた船型(Type3)の3種類の船型を用いて行なった。これらの3船型の船体運動や打ち込み荷重を計測することで、打ち込みに対する波高及び船速の影響だけでなく船首部水線面上形状の違いが及ぼす影響についても調べた。

水平方向の衝撃圧（P_3）についてのみ、船速の影響を調べるために上記の実験条件に加えて、λ/L=1.0、H/λ=1/25及びλ/L=1.2、H/λ=1/35でそれぞれフルード数F_n=0.15, 0.17, 0.19の合計6状態について別途計測を行った。この条件では、打ち込み荷重及び水圧は計測していない。

2.2.5 不規則波中実験

海水打ち込みの統計的性質を把握するために、不規則波中での船体運動、相対水位、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧を計測した。波のスペクトルはISSCスペクトルを用いた。出会い波数は、それぞれ約400波で、信号は初めに400波の長さのものをつくり、それを約20分割して各航走で用いた。各航走時の信号は各々前後の信号と十分重複させることで連続した信号となるように留意した。

内航タンカーについては、平均船速をフルード数F_n=0.1とし、正面向波中において平均波周期T_{01}=1.459sec、有義波高$H_{1/3}$=0.174m（実船換算、T_{01}=6.19sec、$H_{1/3}$=3.13m）の条件で計測した。内航貨物船については、平均船速をフルード数F_n=0.17とし、正面向波中において平均波周期T_{01}=1.537sec、有義波高$H_{1/3}$=0.193m（実船換算、T_{01}=6.73sec、$H_{1/3}$=3.70m）の条件で母船型（Type1）及びフレア形状をふくらませた船型（Type3）について計測した。これらの波周期及び有義波高は、ともに波傾斜が約1/19となるように設定したものである。日本近海の詳細な波浪データ[32]を用いて調べたところ、日本近海での平均的な波高波長比は約1/25から1/35である。本研究では、海水打ち込みの統計的性質について検討を行うことが目的であるため、現実に発生しうる海象の中で厳しい条件を設定した。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 船体運動

船速（F_n=0.1)、波高波長比H/λ=1/30一定で波向χと波長船長比λ/Lを変えて計測した内航タンカーの船体運動について、Fig.2.7からFig.2.12に示す。実験値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会い周波数成分の振幅であり、縦揺θ_a、横揺ϕ_a、船首揺ψ_aの回転運動の振幅は最大波傾斜kζ_a、上下揺Z_a、左右揺Y_a、前後揺X_aの直線運動の振幅は波振幅ζ_aで各々無次元化した値である。ここでkは波数を表す。横軸にはλ/Lを示す。同じく図中には、ストリップ法（NSM）による計算値を実線で示す。このうち、前後揺については他の運動と連成しないとして独立して取り扱い、船体の質量と波浪強制力のみを考慮して計算を行っている。本研究ではこのようにして計算する前後揺も含めてストリップ法と定義する。ストリップ法の横揺減衰力係数は、自由横揺れ試験を実施して求めた減滅係数を用いた。

縦揺、上下揺及び前後揺の計算値は、実験値とよく一致している。向波のλ/L=1.0付近では海水打ち込みが発生した。また、船体中央部は、波向、波周期にかかわらず、上甲板の冠水がたびたび観察された。しかしながら、このように海水打ち込みが発生する状況下でも計算値と実験値の一致は定性的にも定量的にもよい。これらのことから、内航タンカーの船体運動に対する船体中央部の冠水の影響は小さいことがわかる。

横揺、船首揺及び左右揺も、斜向波中ではよく一致している。横波及び斜追波中での横揺、左右揺及び船首揺は他の状態と比べて定量的な差が大きい。自航式模型による実験では、方位を一定にするための操舵制御を行っているため計算の仮定とは異なる。そのためにこのような差が生じている。内航タンカーのように船体中央部の上甲板が低いため冠水しやすい船型についてもストリップ法のような線形理論にもとづいた計算法を用いて船体運動を推定することは実用上問題はない。斜波中での横運動の一層の精度向上を図る上では、操船の影響を合理的に取り入れる必要性はあるが、本研究の目的を勘案してここでは取り扱わない。

2.3.2 相対水位

船速（F_n=0.1)、波高波長比H/λ=1/30一定で波向χと波長船長比λ/Lをパラメタとした内航タンカーの相対水位について、Fig.2.13からFig.2.17に示す。実験値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会い周波数成分の振幅η_aを波振幅ζ_aで無次元化した値である。横軸にはλ/Lを示す。図中には、ストリップ法（NSM）による計算結果を実線で示す。海水打ち込み発生の有無と、相対水位の関係を調べるためには、船首部では船首高さ、船首部以外では乾舷高さと相対水位の大小関係を調べる必要がある。そこで比較のために、船首高さ及び乾舷高さを波振幅ζで無次元化した値も同じく図中に点線で示す。また、Fig.2.13の図中の船首高さは、静止時の船首高さから、平水中で計測した定常航走による船首部での波面の盛り上がりη_S（Static swell up成分）を除いた値も同じく図中に示す。ここでのη_sは、16mm（実船スケール約288mm）である。

船首部相対水位について、Fig.2.13の実験値はストリップ法による計算値と波向、波周

期にかかわらず実験値とよく一致している。また、計算値と船首高さの大小関係から打ち込み発生の有無が判別できることをビデオカメラの観察結果より確認した。しかしながら、打ち込みが激しく発生する向波の波長船長比λ/L=1.0付近では、計算値と実験値の差は相対的に大きくなる。激しい打ち込みが発生するような大波高中では、船体運動に対する波高の非線形影響が相対的に大きくなる。また、ストリップ法のような線形理論にもとづく推定法では、船首方向の反射波の影響も考慮されていないためこのような差が生じている。

Fig.2.14からFig.2.17に示す船側部の相対水位も、船首部と同様に実験値とストリップ法(NSM)による計算値はよく一致している。これらの事から、内航船の相対水位についてもストリップ法のような線形理論にもとづいた計算法により十分な精度で推定できる事がわかる。また、船側部の相対水位についても計算値と乾舷高さの大小関係から打ち込み発生の有無が判別できることをビデオカメラの観察結果により確認した。しかしながら、船体中央部右舷側(S.S.4 1/2)の相対水位は斜向波及び横波中の波長船長比λ/L=1.0付近で実験値とストリップ法による計算値の差が大きくなる。模型船の艤装の都合上、Fig. 2.4に示すように、波除け板が船体中央部から船尾部にかけて取り付けられている。斜向波や横波中では、甲板冠水がこの波除け板によって反射し、この位置での波高計に影響を及ぼしていたことをビデオカメラによる観察や水位計の計測波形から確認した。同じS.S.4 1/2の左舷側や近傍にあるS.S.6 1/2の実験結果では計算値との一致もよいことからストリップ法の精度には問題がないことがわかる。

これらの結果から、ストリップ法(NSM)による計算値と船首高さ及び乾舷の大小関係から打ち込み発生の有無について判別できることを確認した。また、その際には定常航走による波面の盛り上がりも考慮する必要がある。しかしながら、打ち込みが激しく発生する波高、波周期の船首部相対水位の実験値はストリップ法(NSM)による計算値との差が相対的に大きくなることがわかった。船首を乗り越える波の高さが海水打ち込みを評価する上での重要な指標となるため、船首相対水位の精度を詳細に検証する必要がある。これについては2.4章で詳細な検討を行なう。

2.3.3 海水打ち込みに対する波高及び船速の影響

はじめに計測波形の一例をFig.2.18に示す。上から、各断面における甲板上水位、打ち込み荷重及び水圧(P_1)の時系列を表す。甲板上水位の時系列から、急激に水が流入していることや打ち込み荷重と水圧が衝撃波形になっていることがわかる。竹沢ら[4]は打ち込み水圧の波形を主に振動型と非振動型に分け、各々について推定法の検討を行なっている。そこでは、計測波形の6割が振動波形であることが報告されているが、今回計測を行った水圧は大部分が図に示すように非振動型であった。第1章でも述べたように、海水打ち込みは高速船で発生するようなスプレーが流入する場合と大波高中で波の山に突入して水をすくい上げることで流入する場合に大別できる。前者の場合、空気の巻き込みを伴いやすいため振動型の水圧が多く発生するが、後者の場合は非振動型の水圧が主となる。本研究で実施した模型実験では、ほとんどが後者のような海水打ち込みであったためこのような違いが生じた。このことから以下の検討では、打ち込み荷重及び水圧は非振動

型として取り扱う。

内航タンカーの打ち込み水量、荷重及び水圧の実験値の一例をFig.2.19からFig.2.24に示す。Fig.2.19及びFig.2.21には船速一定(F_n=0.1)としてH/λを変えて計測した結果を示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.25, 1.5の3種類である。横軸はH/λを表す。縦軸は打ち込み水量、荷重及び水圧の極大値をフルードの相似則にもとづいて実船換算した値で表す。ここで示す打ち込み水量は、各断面に取り付けた櫛型の容量式水位計の値を船長方向に積分した値であり、ある瞬間に甲板上に乗り上げている水の量を表す。打ち込み水量と荷重は主船体と分離した船首楼甲板の面積で割った平均水位$\bar{W}$と平均水圧$\bar{F}$として表す。

Fig.2.22からFig.2.24には、波高波長比一定(H/λ=1/30)として、船速を変えて計測した結果を示す。どの波長船長比λ/Lの場合も、波高及び船速が大きくなるにつれて水量や荷重は大きくなることがわかる。その傾向は打ち込みの激しいλ/L=1.25において顕著である。また、同じλ/Lの打ち込み水量と荷重は定性的に同様の傾向を示している。これらの事から、水量と荷重及び水圧に及ぼす波高と船速の影響が大きいことや、水量と荷重の相関は強いことがわかる。

2.3.4 船体運動に対する船首部水線面上形状の影響

正面向波(χ=180 °)及び斜向波中(χ=150 °)での内航貨物船の母船型(Type1)、乾舷及び船首高さを低くした船型(Type2)、フレア形状をふくらませた船型(Type3)の縦揺及び上下揺の実験値をそれぞれFig.2.25からFig.2.28に示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.2の2種類である。また、船首部相対水位の実験値をそれぞれFig.2.29及びFig.2.30に示す。実験値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会い周波数成分の振幅であり、縦揺の動揺振幅θ_aは波傾斜kζ_a、上下揺振幅Z_a及び船首部相対水位振幅η_aは波振幅ζ_aで各々無次元化した値である。横軸にはH/λを示す。これらの結果から、船首高さが低い船型(Type2)の実験値が他の船型に比べて若干小さくなる。しかしながら、斜向波中(χ=150 °)でのλ/L=1.0の上下揺を除けば船型の違いによる大きな差異はないといえ、Lloyd et. al.[6] 、高木ら[7]の研究と同様の結果が得られた。船が大振幅動揺した場合、水線面上の形状の違いにより船首が沈下した際の復原力は変わる。そのため、これらの違いは運動及び相対水位に影響を及ぼすはずであるが、今回の実験結果から、極端に形状を変えない限り船首部水線面上の違いは縦運動に影響を及ぼさない事がわかる。

波高波長比が大きくなるにつれて船体運動も相対水位も無次元値は小さくなる。これは、船体運動や相対水位に対する波高の非線形影響が相対的に大きくなるためである。前述したように、打ち込みには、船首部相対水位と船首高さの差が問題となる。従って、船首相対水位を正確に推定するためには波高の非線形影響も考慮する必要がある。

2.3.5 打ち込み荷重に対する船首部水線面上形状の影響

Fig.2.31からFig.2.46に正面向波及び斜向波中において船速一定(フルード数F_n=0.17)で波高波長比を変えて計測した打ち込み水量、荷重及び水圧(P_1及びP_2)の極大値を記号で示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.2の2種類である。縦軸は打ち込み水量、荷重及び水圧の極

大値を実船換算して表す。ここで示す打ち込み水量は、各断面に取り付けた櫛型の容量式水位計の値を船長方向に積分した値であり、ある瞬間に甲板上に乗り上げている水の量を表す。打ち込み水量と荷重は主船体と分離した船首楼甲板の面積で割った平均水位と平均水圧として表す。波傾斜の増加に伴い、打ち込み水量及び荷重も大きくなっており、内航タンカーの結果と同様に波高の影響が大きいことがわかる。

実験の制約上、船首高さを低くした船型(Type2)は母船型よりも模型船で30mmしか低くなっていないことから顕著には表れないが、他の2船型(Type1及びType3)に比べてType2の実験値が大きくなっている。船体運動や船首相対水位の実験値がType2では相対的に小さくなっていることも考慮すると、船首高さが打ち込み水量や荷重に及ぼす影響が大きいことがわかる。

フレア形状の異なる船型(Type3)と母船型(Type1)の結果を比較すると、形状の違いによる打ち込み荷重等の差異はあまり見られない。Type3の方がフレアをふくらませているため船首が波の中に突っ込んだ時に押し退ける水の量は母船型(Type1)に比べて多くなる。一方、Type3のフレア角は母船型(Type1)に比べて小さくなっており、相対的に船首甲板の外向きに波を飛散させる効果が大きくなる。今回の結果はこれらが相殺するため、打ち込み荷重に有意な差がなかった。フレアやナックルといった船型要素が打ち込みに及ぼす影響について調べたこれまでの研究[3][5][6][7]においても運動及び打ち込み水量には大きな影響を与えないといわれており、打ち込み荷重等を直接計測して比較した本研究の結果も同様のものとなった。実船においては、フレアスラミング等の制約からあまり極端にフレアをつけないとされており、内航船の実態を反映した程度のフレア形状ではその差異が海水打ち込みに大きな影響を及ぼさないことがわかる。

Fig.2.47に船速一定(F_n=0.17)でH/λを変えて計測した正面向波中での水平方向の衝撃圧(P_3)の極大値を記号で示す。こちらも打ち込み水圧と同様に波高の影響が大きいこと、他の2船型に比べて船首高さと乾舷を低くした船型(Type2)の実験値が大きくなっている事がわかる。船首部水線面上形状の違いについては、打ち込み荷重や水圧と同様に船首高さと乾舷を低くした船型(Type2)は他の2船型よりも衝撃圧が大きくなること、また母船型(Type1)とフレア形状を変えた船型(Type3)ではあまり差はないことがわかる。

これらの実験結果をまとめると、

(1) 本研究での実験に用いた程度の船首部形状の違いでは船体運動と船首部相対水位に大きな差は生じない。

(2) しかし、船首高さの違いにより甲板に乗り上げる水量とそれによる荷重は船首高さと乾舷を低くした船型(Type2)が他よりも大きくなる。

という事がわかる。

2.3.6 不規則波中実験結果

Fig.2.48からFig.2.50に内航タンカーの不規則波中実験で計測した船首相対水位、打ち込み荷重及び水圧の超過確率を示す。船首部相対水位、打ち込み荷重及び水圧の時系列から船首相対水位の極大値、打ち込み荷重及び水圧の極大値のヒストグラムを求め、これから超過確率を求めた。横軸には船首部相対水位の極大値、打ち込み荷重及び水圧の

極大値を実船換算して示す。縦軸には出会い波数に対する超過確率を対数軸で表す。

Fig.2.48には、実験で計測した船首相対水位のスペクトラムから求めた分散値により計算されるレーリー分布の超過確率を比較のために同じく図中に示す。船首部相対水位の振幅が非常に大きくなると非線形性が現れるため外れてくるもののレーリー分布に従うことがわかる。また、内航タンカーの船首高さが2.45mであることから、最大約4mの高さで波が船首を乗り上げていることがわかる。

Fig.2.49の打ち込み荷重は、主船体から分離した船首楼甲板の面積で割った平均水圧で表す。図から、最大で約2m水頭の荷重が甲板全体に作用していることがわかる。Fig.2.50の打ち込み水圧は、船首楼甲板のセンターライン上の4点（F.P.の前方120mmと70mm及び後方50mmと120mm、以下P_A〜P_Dと呼ぶ）に取り付けた水圧計で計測した結果を各々表す。船首を乗り上げた波の高さが4m程度にもかかわらず、それよりも4〜5倍大きな水頭の水圧が発生していることがわかる。Fig.2.49に示す打ち込み荷重は最大で約2m水頭であるので、甲板全面ではそれほど大きくないが局所的には大きな圧力が作用することがわかる。ビデオカメラでの観察結果によると、甲板水は主として船首近傍から流入し、船幅方向に広がりながら船体後方に流れていく。そのため、P_AからP_Dに行くに従って甲板水圧の値は小さくなっていくと考えられるが、P_DではP_Cよりも大きい値が計測されている。かなり激しい打ち込みの発生時には、船首部だけでなくブルワーク端となるS.S. 9 1/2以降の舷側からも流入がある。そのため、S.S. 9 1/2近傍ではその前方に比べて水位が高くなる場合があり、P_DがP_Cより大きくなる原因になっている。

Fig.2.51からFig.2.54には内航貨物船の不規則波中実験で計測した船首相対水位、打ち込み荷重及び水圧(P_1及びP_2)の超過確率を示す。Fig.2.51には、実験で計測した船首相対水位のスペクトラムから求めた分散値により計算されるレーリー分布の超過確率を比較のために示す。船首相対水位の振幅が非常に大きくなると非線形性が現れるため外れてくるものの、レーリー分布に従うことがわかる。また、この船の船首高さが3.78mであることから、最大約3.5mの高さで波が船首を乗り上げていることがわかる。Fig.2.52の打ち込み荷重は、主船体から分離した船首楼甲板の面積で割った平均水圧で表す。図から、最大で約3.5m水頭の荷重が甲板に作用していることがわかる。また、Fig.2.53及びFig.2.54の打ち込み水圧の実験値から内航タンカーの結果と同様に、船首を乗り上げた波の高さの4倍程度の水頭の水圧が発生していることがわかる。

また、打ち込み荷重及び水圧の結果から、母船型(Type1)とフレアをふくらませたもの(Type3)で有意な差は見られない。規則波実験結果と同様に、極端に形状を変えない限りフレア形状の違いは打ち込み荷重にあまり影響を及ぼさないことがわかる。

2.4 船首部相対水位に関する検討

前節でも述べたとおり、海水打ち込みが問題となる大波高中での船首部相対水位を考える場合、波高による船体運動の非線形性や船首部における反射波の影響を考慮する必要がある。しかしながら、船首部相対水位に及ぼすこれらの影響を定量的に検討した事例は多くない。このような検討は、海水打ち込みに限らずスラミング等の大波高中での耐航性を正しく評価する上で大変重要である。

大波高中での船体運動については、浸水面形状の時間的変化による非線形性を考慮した船体応答推定法[34]等が提案されており、実用的に波高の非線形影響をとり入れることが可能である。

船首部における反射波の影響については、ストリップ法等の既存の実用的な推定手法では前後揺及び波の粒子速度の前後方向成分による動的な水位変動は無視されている。しかしながら、船首及び船尾部では相対的に三次元影響も大きくなるので、必ずしも無視できるような微小量とは限らない。これについても、実験及び理論の双方から検討を行う必要性があるが、行われていないのが実状である[35]。

一方、これらを厳密に解くためには近年発達を続けている数値流体力学による取り扱いが考えられるが、現状では海水打ち込みが発生するような非線形な自由表面の形状を数理的に表現することは容易でない。

そこで、船首部相対水位の推定精度の検証及びその精度向上のための問題点を明らかにする事を目的として、前節で示した内航貨物船模型を用いた波浪中実験を別途行なった。実験は縦運動の同調点付近である波長船長比λ/L=1.0付近で波高を変えて行なった。正面向波(χ=180 °)において、船体運動、船首部相対水位を計測し、波高の非線形影響と船首部における反射波の影響を調べることで、精度向上のための問題点を整理したので以下に示す。

2.4.1 船首部相対水位に関する模型実験

前節で示した内航貨物船 (699G/T型, 船長L_{pp}=78.5m)の母船型(Type1)を用いて波浪中を自由航走し、船体運動、船首部相対水位を計測した。船体運動については、光ファイバー式ジャイロを模型船に搭載し、縦揺、横揺、上下加速度、水平加速度及び前後加速度の計測を行った。船首揺については、自航式模型の方位を制御するために搭載している方位式ジャイロにより計測した。模型船の艤装の都合上、船体運動の重心位置と光ファイバー式ジャイロの重心位置は異なった。そのため、上下、水平及び前後の各加速度は、位置の違いによる加速度の補正を行った後に上下揺、左右揺及び前後揺の動揺変位にそれぞれ換算した。また、容量式波高計を船首に取り付けて相対水位を計測した。

実験は、はじめに波高波長比H/λ=1/30及び1/50について波長船長比λ/Lを変えて行った。つぎに、波高の非線形影響を詳しく調べるために海水打ち込みが生じるλ/L=1.0及び1.2についてH/λを変えて計測した。船速は全ての計測でF_n=0.17で一定とした。

2.4.2 波高の非線形影響

相対水位ηは次式のように考えることができる。

$$\eta = \eta_S + \eta_a = \eta_S + \eta_m + \eta_D \tag{2.1}$$

ここで、η_Sは定常航走による平均水位の変化、η_aは変動成分を表す。この変動成分のうち、η_mは波と船体運動による相対変位、η_Dは動的な水位変動を表す。このうち、相対変位と動的な水位変動が動揺振幅を構成する。ここでは、相対変位に対する波高の非線形影響と動的な水位変動について検討する。

はじめに船体運動の実験結果について述べる。波高波長比H/λ=1/30及び1/50で船速一定（F_n=0.17）としてλ/Lを変化した縦揺及び上下揺の実験値をFig.2.55及びFig.2.56にそれぞれ示す。縦軸は動揺振幅を最大波傾斜kζ_a及び波振幅ζ_aでそれぞれ無次元化した値で表す。ここで、kは波数である。既存の実用的な推定法の一つであるストリップ法（NSM）による計算結果を同じく図中に実線で示す。ストリップ法による計算値はH/λ=1/50の計測結果とよい一致を示す。また、H/λ=1/30ではH/λ=1/50に比べて実験値は小さくなっており、縦運動の同調点付近でその差は顕著となる。このことから、船体運動に対して波高の非線形影響があることがわかる。

また、向波中で波と船体の相対運動を考える際、縦揺と上下揺の位相差が推定精度に影響を及ぼすと考えられる。そこで、縦揺と上下揺の位相差$\varepsilon_{z\theta}$をFig.2.57に示す。この位相差は、縦揺の正の極大値を原点として、上下揺の正の極大値の位相遅れを表す。縦揺は船首上げを正、上下揺は鉛直上向きを正とした。ストリップ法(NSM)による計算値を同じく図中に実線で示す。位相差は振幅に比べて波高の非線形影響は小さく、短波長域での精度が落ちるもののストリップ法による計算値とよく一致する事がわかる。

船首部相対水位の推定に前後揺及び波の粒子速度の前後方向成分による動的な水位変動の影響を考慮する場合、これらの推定精度が問題となる。そこで、前後揺についても同様の比較を行った。

Fig.2.58に前後揺の実験値及び計算値を波振幅ζで無次元化した値を示す。波高の非線形影響については、縦揺及び上下揺と同様の傾向を示すものの、縦揺及び上下揺に比べて計算値との定量的な差が大きくなっている。前後揺については、これまでにも中村ら[36]や田才ら[37]により検証されており、定性的にはよい精度で推定可能であることが示されている。本研究での知見は、Fig. 2.9に示すようにタンカーの前後揺は計算値と実験値はよく一致するものの、比較的高速な貨物船では一致度は相対的によくない。

Fig.2.59には縦揺と前後揺の位相差$\varepsilon_{x\theta}$を示す。この位相差は、縦揺の正の極大値を原点として、前後揺の正の極大値の位相遅れを表す。前後揺は船首方向を正とした。振幅成分と同様に計算値と実験値との一致度は上下揺に比べてよくないことがわかる。船首部相対水位の推定に前後方向の動的な水位変動を考慮するためには、前後揺の推定精度向上が必要となる。そのためには、前進速度の影響や他の運動との連成について更に検討する必要がある。

つぎに、船首部相対水位の計測結果について示す。波高波長比H/λ=1/30及び1/50で船速一定（F_n=0.17）としてλ/Lを変化した場合の船首相対水位の変動振幅η_aの実験値をFig.2.60に示す。縦軸は波振幅ζ_aで無次元化した値を表す。ストリップ法(NSM)による計算値を実線で、計算値から動的な水位変動成分を除いた相対変位の成分を破線で同じく図中に示す。ストリップ法で推定する動的な水位変動とは、二次元理論による船側での水面の盛り上がりを表す。定量的にはストリップ法による計算値では相対変位が大部分を占めていることがわかる。ストリップ法(NSM）による計算値はH/λ=1/50の計測結果とよい一致を示す。しかしながら、H/λ=1/30ではH/λ=1/50に比べて実験値は小さくなっており、縦運動の同調点付近でその差は顕著となる。これらのことから、船体運動と同様に船首部相対水位にも波高の非線形影響がある。

また、縦揺と船首部相対水位の位相差$\varepsilon_{\eta\theta}$をFig.2.61に示す。この位相差は、縦揺の正の

極大値を原点として、船首部相対水位の正の極大値の位相遅れを表す。縦揺は船首上げを正、船首部相対水位は水位の上昇を正とした。ストリップ法(NSM)による計算値を同じく図中に実線で示す。位相は振幅に比べて波高の影響は小さく、ストリップ法(NSM)による計算値とよく一致する事がわかる。

2.4.3 動的な水位変動の影響

船首部相対水位に対する相対変位以外の成分について検討を行う。はじめに、縦揺及び上下揺の計測波形を用いて船首部における波と船体の相対変位を求めた。実験は自由航走模型を用いて実施したため、相対変位を求める際の入射波と船体運動の位相は直接計測ができない。そこで、入射波と縦揺及び上下揺の位相差はストリップ法(NSM)による計算値を用いた。船首部相対水位の計測波形と推定した相対変位の比較をFig.2.62及びFig.2.63に示す。図中の実線は容量式波高計で直接計測した船首部相対水位の計測波形、破線は縦揺及び上下揺の計測波形から推定した相対変位の波形を表す。縦軸は水位の上昇を正とし、静止時の水位をゼロとした。

波高が大きくなるにつれ水位が下降する場合の船首相対水位と相対変位との違いが大きくなる。これは、船首部が船底近くまで水面上に露出するような場合、バルバスバウによる攪乱が生じるためである。また、水位が上昇する場合は、波高の大小にかかわらず相対運動だけでは定量的に差があることがわかる。Fig.2.60に示すストリップ法の計算値では動的な水位変動はFig.2.62及びFig.2.63に示す実験結果ほど大きくない。ストリップ法で計算している動的な水位変動は、前述したように二次元理論による船側での水面の盛り上がりを表しており、船首の波面への突入によって幅が広くなった船首楼の前面で波を反射することで波面が盛り上がるような反射波の影響が考慮されているわけではない。

高石ら[35]はコンテナ船模型を用いて相対水位の計測を行い、ストリップ法（Ordinary Strip Method、以下OSM）による計算値と実験値の比較を行った。その結果、船首部相対水位は全ての出会い角に対して動的な水位変動を含まない計算値が実験値とよく一致することや正面向波中での船首相対水位はストリップ法では過小評価になることを示した。本研究の結果及び高石らの結果から船首部における反射波の影響を考慮する必要性を確認した。

また、船首部相対水位を問題にする場合、スプレーや波崩れによる影響も考えられる。しかしながら、本研究の実験では得られた計測波形やビデオの観察結果から、激しく波崩れをおこしているとは考えにくい。本研究で対象とした船速では、船首部の動的な水位変動に対してこれらが支配的になることはない。一方、高速船のように明らかにスプレーが支配的な現象になってくる場合には、これらについても検討を行う必要があるが、本研究で対象としている船舶は高速船でないことから、ここではこれ以上触れない事とする。

2.4.4 考察

実験結果から、船体運動、船首部相対水位に波高の非線形影響があることや動的な水位変動が無視できないことがわかった。これらについて、理論的な観点から考察を行う。

ストリップ法(OSM)をベースに浸水面形状の時間的変化による非線形性を考慮した船体応答推定法[48]（SRSLAM）により船体運動及び波と船体の相対変位の推定を行った。推定に弾性応答の影響は考慮せず、船体は剛体として計算を行った。重量分布は実験時の模型船での分布を用いている。

Fig.2.64及びFig.2.65にλ/L=1.0及び1.2でH/λを変えて計測した縦揺及び上下揺と計算値の比較を示す。計算値は波高の非線形影響をよく説明しており、これまでの研究[34]で得られた知見と同様に、浸水面形状の時間的変化による非線形性を考慮することで大波高中の船体運動を精度よく推定できることを確認した。

同じくH/λを変えて計測した船首相対水位の実験値とSRSLAMにより計算した船首部での相対変位との比較をFig.2.66に示す。両者の定量的な違いは大きく、船体運動の推定誤差を考慮しても決して無視できない。このことからも、前後方向の動的な水位変動を考慮する必要性を確認した。

この動的な影響を考慮するために、田崎の式[3]を用いて計算値の補正を行なう。田崎は複数の模型船を用いた強制動揺実験の結果をもとに、船首部における船長方向への波面の盛り上がりを考慮する船首部相対水位の変動成分η_aの補正式を提案している。

$$
\begin{aligned}
\eta_a' &= \eta_D + \eta_m = (1 + C_d\omega_e)\,\eta_m \\
C_d &= \frac{(C_B - 0.45)}{3}\sqrt{\frac{L_{pp}}{g}}
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

ここで、η_a'は補正後の船首部相対水位の変動成分、ω_eは出会い角周波数、C_Bは方形係数、L_{pp}は垂線間長、gは重力加速度を表す。

この式を用いて補正した船首部相対水位の計算値も同じくFig.2.66に示す。多少のばらつきはあるものの補正を行うことで実験値を説明できていることがわかる。Fig.2.64及びFig.2.65に示した船体運動の計算値は前後揺を相対的に小さいとして計算を行なっており、そのことが運動の誤差となるだけでなく、船首部相対水位における相対変位の誤差ともなっている。将来的には、波高による非線形影響及び船首部の反射波の影響を考慮した三次元手法の開発が望まれるが、実用的な観点からは浸水面形状の時間的変化を考慮した船体運動計算法を用いた相対水位の計算値を田崎の式で補正することで十分な精度が得られる。

2.5 結　言

これまでにも数多く海水打ち込みに関する研究が実施されているにもかかわらず、現状では相対水位と乾舷及び船首高さの大小関係から打ち込み発生の有無を議論するにとどまっている。そこで、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧の直接計測を目的とし

て、内航タンカー及び内航貨物船模型を用いた波浪中実験を実施した。規則波及び不規則波中での船体運動、相対水位、甲板上水位分布、打ち込み荷重及び水圧を計測することで以下の知見を得た。

(1) 内航タンカーのように船体中央部の上甲板が低く冠水しやすい船型について、ストリップ法(NSM)による船体運動の計算値と実験値はよく一致しており、これらの推定にストリップ法を用いても実用上問題はない。

(2) 相対水位についても、船体運動と同様にストリップ法による計算値と実験値はよく一致しており、推定にストリップ法を用いても実用上問題ない。また、計算値と船首高さ及び乾舷の大小関係から打ち込み発生の有無が判別できることを確認した。しかしながら、打ち込みが発生する向波中の縦運動の同調的付近(λ/L=1.0付近)では、実験値と計算値の間に定量的な差がある。これは、打ち込みが発生するような大波高中では、船体運動に対する波高の非線形影響が相対的に大きくなることや、ストリップ法のような線形計算で考慮されていない船首方向の反射波の影響による。

(3) 打ち込み水量、荷重及び水圧は波長に関わらず、波高及び船速が大きくなるにつれて大きくなる。その傾向は打ち込みが激しくなる波長で顕著になる。また、同じ波長の打ち込み水量と打ち込み荷重は波高や船速に対して定性的に同様の傾向を示しており、その相関は強い。

(4) 船が大振幅動揺した場合、水線面上の形状の違いにより船首が沈下した際の復原力が変わるため、これらの違いは運動及び相対水位変動に影響を及ぼすが、極端に形状を変えない限り、影響は大きくない。

(5) 打ち込み水量や荷重に及ぼす船首高さの影響は大きい。フレア形状は本研究での実験のように極端に形状を変化させない限りはフレア形状の差異が海水打ち込みに与える影響は小さい。このことから、フレア形状の影響は船首高さに比べて相対的に小さい。

(6) 不規則波中実験の結果から、船首部相対水位の振幅が非常に大きくなると非線形性が現れるためレーリー分布から外れてくるものの、その確率分布はレーリー分布に従う。また、船首を乗り越えた波の高さの4〜5倍程度の水頭の水圧が局所的に発生する。

(7) 計測波形を用いた検討により、船首部相対水位が上昇する場合、動的な水位変動が無視できないことが実験的に確認された。よって、正面向波中での船首部相対水位変動を精度良く推定するには船体運動に対する波高の非線形影響と船首部での反射波の影響を考慮する必要がある。

(8) 船速が比較的速い内航貨物船の前後揺は、縦揺及び上下揺に比べると、振幅及び位相ともに計算値と実験値の一致度はよくない。船首部相対水位変動の推定に前後揺及び波の粒子速度の前後方向成分による動的な水位変動を考慮するためには、さらに推定精度の向上を図る必要がある。

(9) 実用的な観点からは、浸水面形状の時間的変化を考慮した船体運動計算法を用いた計算値を動的な影響を考慮した田崎の式で補正することで船首部相対水位を精度よく推定することができる。

第3章　海水打ち込みの推定法

3.1　緒　言

前章で示した実験結果やFig. 3.1に示すようなビデオカメラによる観察結果から、船首から打ち込んだ水は甲板上を急激に流下する様相を呈していることがわかった。このような甲板冠水の挙動は複雑であり、解析的に厳密な形で表現することは容易でない。一方、近年急速な発達を遂げている数値流体力学をもってしても、現状では海水打ち込みが発生するような非線形な自由表面の形状を数理的に表現することは容易でない。そこで、本研究では、甲板冠水の挙動をモデル化することで、実用的な甲板上水位分布の推定法を提案する。また、甲板上水位分布から打ち込み荷重及び水圧と流下した甲板冠水が甲板上構造物に衝突することで発生する水平方向の衝撃圧を合理的に推定する手法も提案する。また、前章で示した実験結果と比較することで本推定法の妥当性を論じる。

3.2　甲板上水位分布の推定法

これまでに提案された甲板冠水のモデルにダムの崩壊モデル[15][16]がある。これはFig. 3.2に示すように、静止した水壁がある瞬間から崩れて起きる流れを表現したモデルである[19]。決壊前のダムの水位をh_0とすると、決壊後t時間後のダム壁面よりx_pの位置にある水深h_x及び粒子速度uは、それぞれ

$$u = \frac{2}{3}\left(\frac{x_p}{t} + \sqrt{gh_0}\right) \tag{3.1}$$

$$\sqrt{gh_x} = \frac{1}{3}\left(2\sqrt{gh_0} - \frac{x_p}{t}\right) \tag{3.2}$$

で表すことができる。

郷田ら[15][16]は、横波をうける船体中央部の海水打ち込みについてダムの崩壊モデルを適用した。甲板上水位を推定して2次元模型を用いた実験結果と比較した結果、よく一致することを示している。しかしながら、今回模型船に搭載したビデオカメラによる船首部の観察結果によると、激しい打込みが生じる場合には、大きな水壁が急激に流入しており、波が甲板に乗り上げるのではなく波の山に船首部が突入する様相を呈していることが確認できた。この様な観察結果は、本研究だけでなく溝口[17][18]によっても確認されている。また、本研究の予備的検討としてダムの崩壊モデルを用いて甲板上水位分布の推定を行ったが、Fig. 2.18に示すように甲板上を急激に流下していく船首部での甲板冠水の挙動を適切に表現できないことを確認した。

これらのことから船速による動的な影響を取り入れる必要があると予想された。そこで、洪水流の解析理論[31]を用いて甲板冠水の挙動をモデル化した。これは、先に示したダムの崩壊モデルと理論的背景は同じであるが、船速による動的な影響を考慮しているという点で異なる。ここでは、この理論を応用した甲板上水位分布の推定手法を示す。これにより甲板上水位分布を計算し、先に示した実験値との比較による精度の検証を行ったので以下に示す。

はじめに、理論的背景について説明する。開水路における1次元非定常流の連続式及び運動方程式は、Fig. 3.3に示す座標系で、時間をt、水底を鉛直方向の原点にとり、水平方向の座標をxとすると、次のように表せる[40]。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial v_a q}{\partial x} + g\xi\frac{\partial \xi}{\partial x} \;=\; g\xi(i_0 - i_f) \tag{3.4}$$

ここで、ξは水深、qは流量、v_aは平均流速$(= q/\xi)$、i_0は水路床勾配、i_fは摩擦勾配を表す。i_fは、等流公式を適用してマニング則を用いるのであれば$i_f = n^2q^2/\xi^{10/3}$（nはマニングの粗度係数）で表される。

いま、一様流中（水深$\xi = \xi_0$,流速$v_a = v_{a0}$ ）の上流端$x = 0$において撹乱が加えられた際の波形の伝播を考える。撹乱の時間スケールT_0、空間スケールL_0、一様流の水深ξ_0及び流速v_{a0}を用いて次のような無次元量を定義する。

$$t' \;=\; \frac{t}{T_0}\ ,\ x' = \frac{x}{L_0}\ ,\ \xi' = \frac{\xi}{\xi_0}\ ,\ q' = \frac{q}{\xi_0 v_{a0}} \tag{3.5}$$

空間スケールL_0を$L_0 \equiv T_0 v_{a0}$と定義して、これらの無次元量から(3.3)及び(3.4)式を無次元化すると以下のようになる。

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t'} + \frac{\partial q'}{\partial x'} = 0 \tag{3.6}$$

$$\alpha_s F_r^2\left(\frac{\partial q'}{\partial t'} + 2\frac{q'}{\xi'}\frac{\partial q'}{\partial x'} - \frac{q'^2}{\xi'^2}\frac{\partial \xi'}{\partial x'} + \frac{\xi'}{F_r^2}\frac{\partial \xi'}{\partial x'}\right) \;=\; \xi'\left(1 - \frac{q'^2}{\xi'^{10/3}}\right) \tag{3.7}$$

ここで、$\alpha_s = \xi_0/L_0 i_0, F_r = v_{a0}/\sqrt{g\xi_0}$(フルード数)である。水理学の分野では、$\alpha_s \ll 1$で(3.7)式の左辺を無視した支配方程式で表される波をキネマティックウェーブ、$\alpha_s \gg 1$で

(3.7)式の右辺を無視した支配方程式で表される波をダイナミックウェーブと呼ぶ[40]。先に示したダムの崩壊モデルは、キネマティックウェーブの一種である。ただし、(3.7)の摩擦勾配i_fは、マニング則ではなくシェジー則$i_f = q^2/(C\xi^3)$ （Cはシェジー係数）を用いて求める。

これらの支配方程式をもとに、F_r^2が0.1程度で、α_sが1のオーダーに近くなる場合を考える。船体の上甲板をここで定義する静水面とし、船速を流速、船首高さを水深と仮定すると、本研究で対象としている条件はこの場合に相当する。この時、(3.7)式の左辺第4項（水面勾配項）は左辺の他の項と比べて無視できなくなる。速水[31]は、洪水流の解析において水面勾配項を考慮する必要性を指摘し、(3.7)の左辺第4項を考慮した以下の式を洪水流解析の支配方程式とした。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{3.8}$$

$$g\frac{\partial \xi}{\partial x} = g\left(i_0 - i_f\right) \tag{3.9}$$

等流公式にマニング則を用いるのであれば、(3.9)は、

$$q = \frac{1}{n} i_0^{1/2} \xi^{5/3} \left(1 - \frac{1}{i_0}\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)^{1/2} \tag{3.10}$$

と表す事ができる。これは、(3.7)式においてF_r^2を摂動パラメターとした近似式の1次近似解に従う方程式と等価である。運動方程式(3.9)あるいは(3.10)式を連続の式(3.8)に代入すると

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{5}{3}\frac{q}{\xi}\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{q}{2\left(i_0 - \dfrac{\partial \xi}{\partial x}\right)}\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{3.11}$$

となる。速水[31]は、この解を求めるために一様流の水深ξ_0を基準スケールにとり、逆数のべき級数展開で水深ξを次のように表した。

$$\xi = \xi_0 \left(1 + \frac{\bar{\phi}_1}{\xi_0} + \frac{\bar{\phi}_2}{\xi_0^2} + \cdots\right) \tag{3.12}$$

これを(3.11)式に代入し、$(1/\xi_0)$についてまとめた一次近似解の従う支配方程式は、

$$\frac{\partial \bar{\phi}_1}{\partial t} + \frac{5v_{a0}}{3}\frac{\partial \bar{\phi}_1}{\partial x} = \frac{v_{a0}\xi_0}{2i_0}\frac{\partial^2 \bar{\phi}_1}{\partial x^2} \tag{3.13}$$

となる。これを、初期条件、境界条件

$$
\begin{array}{lll}
x=0, t\geq 0 & ; & \bar{\phi_1}(0,t)=f(t)-\xi_0=F(t) \\
x\geq 0, t=0 & ; & \bar{\phi_1}(0,t)=0
\end{array}
\tag{3.14}
$$

のもとで(3.13)式を解けば、$\bar{\phi_1}$ は、

$$
\bar{\phi_1}(x,t) \;=\; \frac{x}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{F(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}}\times\exp\frac{-(x-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau \tag{3.15}
$$

となる。ここで、$D_0=v_{a0}\xi_0/2i_0, \omega_0=5v_{a0}/3$である。これを洪水流の理論式という。

この式を用いて、Fig.3.4に示すような座標系を考え、船首を$x=0$とし、船尾方向に向ってx軸を正にとり、一様流の水深ξ_0及び流速v_0を各々船首高さF_b及び船速U、また、上流端での攪乱$F(t)$を、$F(t)=f(t)-\xi_0=f(t)-F_b$として$f(t)$を船首部相対水位と置き換えれば海水打ち込みにも適用することができる。船首が波に突入するような海水打ち込みでは、水はある高さと幅をもって流入する。流入した水は、船幅にそって広がりながら流下していく。ここで、船幅方向に均一に広がると仮定すると、流入時の幅（有効幅）と船幅との比に反比例する形で水位が小さくなると考えることができる。そこで、一様幅の水路の流れについて導かれた洪水流の理論式である(3.15)式に、このような補正を施す。これにより船首からx_1の位置での甲板上水位$\bar{\phi_1}$は、

$$
\begin{aligned}
\bar{\phi_1}(x_1,t) &= \frac{x_1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{F(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}}\times\exp\frac{-(x_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau : B_0>B(x_1) \\
\bar{\phi_1}(x_1,t) &= \frac{B_0}{B(x_1)}\frac{x_1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{F(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}}\times\exp\frac{-(x_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau : B_0<B(x_1)
\end{aligned}
\tag{3.16}
$$

で表すこととする。ここで、B_0は打ち込みの有効幅、$B(x_1)$は船首からの位置x_1での船幅を表す。$B(x_1)$がB_0よりも小さくなる位置では$B(x_1)=B_0$とする。田崎[3]は、船首と水面との上下方向の相対速度を考慮して、甲板冠水による一周期あたりの流入量Qを次式で定義した。

$$
Q \;=\; \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}B_0UT_e\delta_{max}\sqrt{\frac{\delta_{max}}{(\delta_{max}+F_b)}} \tag{3.17}
$$

ここで、T_eは出会い周期、δ_{max}は船首部相対水位が船首を越える高さの極大値（越波高さ）$\delta_{max} = \eta_{max} - F_b$、$\eta_{max}$は船首相対水位の極大値、$F_b$は船首高さをそれぞれ表す。田崎は、有効幅$B_0$は$\delta_{max}$に比例するとして、$B_0 = k_3\delta_{max} = 0.8\delta_{max}$と定義した。ここで$k_3$は比例定数を表す。このことから流入量$Q$が$\delta_{max}$の2乗に比例するものとしてモデル化を行い、実験結果をうまく説明できることを示した。本実験でも同様の解析を行い有効幅の比例係数k_3を決定した。本研究で計測した打ち込み水量の時系列では流入量は把握できない。しかしながら、ビデオによる観察結果から打ち込み水は船首から流入して急速に流下していくため甲板上にはあまり滞留しないことを確認した。そのため、打ち込み水量の極大値が流入量と等価とみなして同様の解析を行なった。(3.17)式からQ/k_3を計算し、実験で計測した打ち込み水量の極大値と比較した。Fig.3.5及びFig.3.6に比較した結果を示す。横軸には計算したQ/k_3、縦軸には実験値を示す。また、この結果をもとに最小二乗法で比例定数を決定した。これにより、タンカーの定数は$k_3 = 1.1$、貨物船は母船型(Type1)、乾舷及び船首高さを低くした船型(Type2)、フレア形状をふくらませた船型(Type3)でそれぞれ$k_3 = 1.05, 1.1, 0.9$となった。本研究での甲板上水位分布の推定にはこの値を用いた。この係数の差はフレアなど船首形状の違い等によるものと考えられる。より詳細に検討を行なうためには、さらに多種の船首形状を持つ船舶について同様の計測を行い比較する必要があるが、本論ではこれ以上取り扱わない。

船首部相対水位について、ここでは本手法の妥当性を評価することが目的であるので、実験で計測した相対水位の時系列を用いた。また、水路床勾配i_0については、溝口[17][18]と同様に縦揺の最大角θ_{max}（船首上げ）を用いて$\sin\theta_{max}$とした。さらに、本研究や竹沢ら[4]の実験結果から打込みは船首相対水位が極大値に達した直後から始まることが確かめられているので、船首相対水位が極大値に達した時間を$t = 0$とした。また、入力としての船首高さF_bは、ここでは船首高さにブルワーク高さを加えた値を用いた。

Fig.3.7及びFig.3.8に内航タンカーの実験値と計算値の時系列による比較を示す。図中には洪水流理論を用いた推定法により計算した甲板上水位分布の時系列を実線、実験値を点線で示す。Fig.3.7に示すように波高波長比H/λの小さい場合では、各横断面とも計算値と実験値はよく一致しており、本推定法の有効性を示している。しかし、Fig.3.8に示すようにH/λがより大きく、打ち込みが激しくなる場合では、F.P.やS.S.9 3/4ではよく一致しているものの、ブルワーク端であるS.S.9 1/2より後方の一致度は良くない。特に水位が上昇を開始する時間に大きな違いがあることがわかる。F.P.での計算値と実験値の一致はよいことから洪水流理論を用いたモデル化は妥当であることがわかる。しかしながらブルワーク端をまわり込むような流入は考慮していないためにこのような違いが生じた。このような舷側からの水の流入は、Fig. 3.9に示すようにビデオカメラによる観察でも確認された。

一方、Fig.3.10には内航貨物船の甲板上水位分布の時系列の一例を示す。図中には本推定法で計算した甲板上水位分布の時系列を実線、実験値を点線で示す。内航タンカーの結果と同様に、波面の高さ及び傾斜についてもよく一致していることがわかる。また、貨物船についてはブルワークが船首楼甲板の端まで続いていたため、内航タンカーのように船側部から水が回り込むことがなかったことをビデオカメラによる観察で確認した。そのためFig.3.10に示すように相対的に船速が早い場合（フルード数F_n=0.19）でも、船首

楼甲板の端であるS.S.9の計算値は実験値とよい一致を示す。

ビデオカメラの観察結果から、波高や船速の大小にかかわらず、船首楼甲板に海水打ち込みが発生する場合は、船首からの流入が支配的となる事が確認できた。これらの検討から、ブルワーク端からの流入が無視できない場合もあるものの、船速による動的な影響を考慮して船首からの流入をモデル化することで、甲板上水位分布を定量的に精度よく推定できることがわかる。

3.3 打ち込み荷重の推定法

つぎに甲板上水位分布を入力とした打ち込み荷重及び水圧の推定法について示す。打ち込み水圧と甲板上水位分布との相関については、これまでにも川上ら[9]や竹沢ら[4]により実験的研究が行われている。しかしながら、これらの研究では打ち込み水圧は相対水位が船首を乗り越えた高さ（越波高さ）に比例するものとして実験結果を整理しており、甲板上水位分布から打ち込み荷重や水圧を定量的に推定したわけではない。

近年、Buchner[10]は打ち込み水圧P_dを

$$
\begin{aligned}
P_d &= \frac{d(\rho\bar{\phi}_1 V_v)}{dt} + \rho g\bar{\phi}_1 cos\theta_d \\
&= \rho V_v \frac{\partial\bar{\phi}_1}{\partial t} + \rho g\bar{\phi}_1 \cos\theta_d + \rho\bar{\phi}_1 \frac{\partial V_v}{\partial t} \qquad (3.18)
\end{aligned}
$$

で推定できることを示した。ここでρは流体の密度、$\bar{\phi}_1$は甲板上水位、V_vは鉛直方向速度、gは重力加速度、θ_dは甲板の傾斜角を表す。この式は甲板冠水のもつ運動量変化による動的な水圧も含めて推定するもので、(3.18)式2行目の第1項は甲板冠水の水位変化にともなう運動量変化、第2項は甲板冠水の自重、第3項は慣性力をそれぞれ表す。Buchnerは(3.18)式を用いて甲板上水位の実験値から求めた打ち込み水圧が直接計測した値とよく一致する事を示した[10]。

本研究では、同様の考え方で打ち込み水量と打ち込み荷重の関係について調べるとともに、波高や船速が異なる場合でも同様の関係が成り立つかどうかについても調べる。(3.18)式において、甲板上水位$\bar{\phi}_1$を打ち込み水量Wにおきかえると、(3.18)式は打ち込み荷重の推定式とみなすことができる。そこで打ち込み水量の時系列から(3.18)式を用いて打ち込み荷重を計算した。結果の一例をFig. 3.11及びFig.3.12に直接計測した打ち込み荷重の時系列との比較で示す。図中には(3.18)式2行目の各成分についても同様に示す。これらの比較から、打ち込み水量から推定した打ち込み荷重は実験値とよく一致している事がわかる。荷重全体に占める各成分の割合は、(3.18)式2行目の第2項、すなわち甲板冠水の自重による静的な成分が最も大きいことがわかる。しかし、打ち込み荷重の発生から極大値にかけては、第1項すなわち甲板冠水の水位変化にともなう運動量変化の成分が支配的である事がわかる。また、打ち込み荷重の継続時間についても、打ち込み荷重の発生から極大値までの時間と甲板冠水の自重が最大になる時間とは異なるため、自重を考慮するだけでは違いを生じることがわかる。

よって、甲板冠水の自重を考慮するだけでは、荷重の極大値や継続時間に誤差を生じるため、正しく推定するためには甲板冠水の水位変化にともなう運動量変化の影響が無視できないことがわかる。このような関係は波高や船速が異なる場合でも同様に成り立つ事を確認した。

これらのことから、甲板上水位分布が推定できれば波高や船速にかかわらず(3.18)式で打ち込み荷重や水圧を推定できることがわかった。また、これらを精度よく推定するためには、甲板上水位$\bar{\phi}_1$の時間変化を精度よく推定する必要があり、先に示した洪水流理論のように動的な影響を取り入れた推定が必要となることがわかる。

3.4 甲板上構造物にはたらく水平方向の衝撃圧の推定法

甲板冠水により発生する荷重を考える場合、甲板に上下方向にはたらく荷重だけでなく甲板冠水が甲板上を流下して甲板上構造物等にぶつかる事により生じる水平方向の衝撃圧についても検討する必要がある。このような水平方向の衝撃圧について、溝口[17]はSR108模型を用いて甲板上水位分布及びWater breakerに作用する衝撃圧の計測を行った。これによると衝撃圧の極大値は甲板上水位の極大値の5倍以上の水頭となり、無視できないものであることがわかる。しかしながら、現在までのところ水平方向の荷重を対象とした研究は少なく、これを推定する手法として確立されたものは存在しない。よって水平方向の衝撃圧を合理的に推定するためには、衝撃圧の入力となる甲板上水位分布の推定法もあわせて開発する必要がある。

このうち、甲板上水位分布の推定は、前節までに示したとおり洪水流の理論に基づいた推定法により水位やその時間変化を精度よく推定できている事を確認した。衝撃圧(P_3)の計測位置の近傍であるS.S. 9での水位の極大値についての実験値と計算値を比較した結果をFig.3.13に示す。図中に実験値を印で、洪水流モデルによる計算値を線で示す。横軸に波高波長比H/λ、縦軸には水位の極大値をフルード則に基づいて実船スケールに換算した値で表す。このように衝撃圧を計測したS.S. 9での実験値と本推定法による計算値はよく一致しており、衝撃圧推定の入力として用いることができる。

また，甲板上水位と衝撃圧の水頭を比較するため，Fig.2.47で示した衝撃圧の実験値とFig.3.13に示す水位の極大値の比較を行った。これによると、船首高さを低くした場合(Type2)の波高波長比H/λ=1/23では、衝撃圧の極大値は水位の約10倍程度の水頭となり、溝口の計測結果[17]よりもさらに大きい。このことからも甲板水による水平方向の荷重も衝撃圧の性質を示し、甲板上構造物にとって重要なことがわかる。

これらのことから、これまでに示した甲板上水位分布の推定法とWagnerによる衝撃水圧の推定法[20]を組み合わせることで、水平方向の衝撃圧を推定する。

ビデオカメラによる観察結果から、船首部を乗り越えた水は急激に後方へ流下していく。そのため、甲板上構造物に衝撃圧が発生する事がわかった。このような衝撃圧が発生する現象は、短い時間スケールの現象であるので、流下した水が甲板上構造物に衝突する際の衝突速度を一定とみなして、重力加速度の影響を無視したモデルにより現象を表現する。

これと同様の取り扱いとして、高橋ら[42]は防波堤にはたらく砕波圧の推定にWagner

の衝撃理論を適用した。高橋らはFig.3.14に示すように波面と壁面のなす角度から衝撃波圧をWagner型、Wagner+Bagnold型、Bagnold型と分類し、それぞれについて推定法を提案している。ここでは、高橋ら[42]が砕波圧の推定に用いた手法にならい水平方向の衝撃圧を推定する。このように、傾斜をもった波面が垂直壁に衝突するモデルを考える。このモデルでは、波面の高さ及び傾斜角が入力となる。

波面の傾斜角について、甲板上水位の空間形状を明確にするために船首からの距離を横軸にとり、時々刻々の甲板上水位分布を洪水流モデルによる計算結果を0.03秒刻みでFig.3.15に示す。船首付近では、波面の先端の傾斜は急になっており、後方に行くに従って緩やかになっていくことがわかる。

本実験で計測した水平方向の衝撃圧の時系列をFig.3.16に示す。時系列からわかるように立ち上がりが急で極大値付近が鋭い形状の波形になっておりWagner型の波形となっている。またビデオカメラによる観察から空気を巻き込んだ形では壁面に衝突していないことがわかった。これらのことから本研究では、甲板冠水による水平方向の衝撃圧をWagner型で取り扱うこととする。さらに、船首から船尾方向にd_1の位置での波面と鉛直軸とのなす角度βは、洪水流モデルを用いて(3.16)式から解析的に

$$
\begin{aligned}
\cot\beta &= \tan\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) = -\frac{d\bar{\phi}_1(x_1,t_1)}{dx_1}\Big|_{x_1=d_1} \\
&= -\frac{B_0}{B(d_1)}\frac{1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{F(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \times \exp\frac{-(d_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau \\
&+ \frac{B_0}{B(d_1)}\frac{d_1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{-2\{d_1-\omega_0(t-\tau)\}F(\tau)}{4D_0(t-\tau)^{5/2}}\exp\frac{-(d_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau \\
&\quad : B_0 > B(x_1) \\
&= \left\{-1+\frac{dB(d_1)}{dx_1}\cdot\frac{d_1}{B(d_1)}\right\}\frac{B_0}{B(d_1)}\frac{1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{F(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \times \exp\frac{-(d_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau \\
&+ \frac{B_0}{B(d_1)}\frac{d_1}{\sqrt{\pi D_0}}\int_0^t \frac{-2\{d_1-\omega_0(t-\tau)\}F(\tau)}{4D_0(t-\tau)^{5/2}}\exp\frac{-(d_1-\omega_0(t-\tau))^2}{4D_0(t-\tau)}d\tau \\
&\quad : B_0 < B(x_1)
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

として求めることができる。ここでt_1は波面の先端がd_1に到達した時間を表す。これによりβを推定したところ、今回行ったすべての実験状態について$\beta > 0$となった。

Wagner[20]はFig.3.17に示す幅$2l$の楔型物体が速度Vで静水面に落下した場合の流場を速度Vの一様流中に置かれた拡大する平板周りの流場で近似することにより、自由表面の盛り上がりを考慮した理論を導いた。この理論によると楔形に作用する圧力は

$$p(x,t) = \frac{1}{2}\rho V \left\{ \frac{\pi \cot\beta}{\sqrt{1-x^2/b^2}} - \frac{x^2/b^2}{1-x^2/b^2} \right\} \tag{3.20}$$

で表される。ここでρは流体の密度、tは楔形物体の先端が静水面に接したときからの時刻、bは楔形物体に接する水面の先端の位置で$b(t) = \frac{\pi}{2} V t \cot\beta$で表される。

いまFig.3.18に示すようにz軸を鉛直上向きを正にとり、速度V、甲板上水位$\bar{\phi}_1$及び傾斜角βで壁面に衝突するとして同様の取り扱いをすると、壁面に作用する圧力$p_i(z_1,t)$、極大値p_{p1}及び持続時間τ_1は

$$p_i(z_1,t) = \frac{1}{2}\rho V^2 \kappa_m^2 \left\{ \frac{\pi \cot\beta}{\sqrt{1-z_1^2/b^2}} - \frac{z_1^2/b^2}{1-z_1^2/b^2} \right\} \tag{3.21}$$

$$p_{p1} = \frac{1}{2}\rho V^2 \kappa_m^2 \left(\frac{\pi^2}{4} \cot^2\beta + 1 \right) \tag{3.22}$$

$$\tau_1 = \frac{\kappa_l h}{\left(\frac{\pi}{2} V \cot\beta \right)} \tag{3.23}$$

となる。ここでκ_mは付加質量の補正係数、κ_lは壁面に衝突する水塊の高さl_1と甲板上水位$\bar{\phi}_1$との比を示す作用高さ係数を表す。合田ら[43]の実験によりκ_l =0.83としている。高橋ら[42]はピストン型造波機がごく短周期で運動したときの見掛け質量から求められる値κ_m =0.83としている。本推定法においても、これらと同じ値を用いた。

速度Vは、前節までの結果から洪水流の波速$(U+\sqrt{gF_b})$で表す。ここでUは船の前進速度、F_bは船首高さ、gは重力加速度を表す。甲板上水位$\bar{\phi}_1$は、水圧計の取り付け位置での甲板水位の極大値を用いた。実験値と比較を行う際の衝撃圧は、水圧計の受圧面が直径6mmの円形であることを考慮して受圧面全面での圧力を(3.23)式から計算し、受圧面の面積で平均して求めた。

3.5 推定法の検証及び考察

前節までに示した洪水流理論にもとづく推定法により甲板上水位分布を計算し、その値を用いて打ち込み水量、荷重及び水圧を推定した。

はじめに、Fig.3.19に打ち込み水量の時系列の一例を示す。計算値を実線、実験値を点線でそれぞれ表す。縦軸は打ち込み水量を船首楼甲板の面積で割った平均水位として、フ

ルード則にもとづき実船スケールに換算した値で表す。実験値と計算値は極大値だけでなく全体的によく一致していることがわかる。

同様に、Fig.3.20に打ち込み水圧の時系列の一例を示す。計算値を実線、実験値を点線でそれぞれ表す。縦軸は打ち込み水圧をフルード則に基づき実船スケールに換算した値で表す。こちらも計算値と実験値は極大値だけでなく全体的によく一致している。これらのことから、本研究で提案した推定法は、甲板上水位分布や打ち込み荷重、さらに打ち込み水圧のような局所的な圧力についてもよい精度で推定できることがわかる。

これらの計算結果を、波高や船速で整理してFig.3.21からFig.3.49に示す。

3.5.1 打ち込み水量

Fig.3.21からFig.3.24には船速一定(=0.17)で波高波長比H/λを変えて計測した正面向波及び斜向波中での内航貨物船の打ち込み水量の結果について示す。縦軸は打ち込み水量の極大値を船首楼甲板の面積で割った平均水位として、フルードの相似則に基づき実船スケールに換算した値で表す。実験値と計算値はよく一致しており、打ち込みによる海水の流入量をδ_{max}の2乗に比例するものとしてモデル化を行うことで打ち込み水量を精度良く推定できることがわかる。船首高さ及び乾舷を低くしたType2と他の2船型の船首高さは30mmしか違わないため、その差が顕著ではないものの、全体的に他の2船型に比べてT ype2の実験値が大きくなっており、打ち込み荷重等が船首高さに影響を受けやすいことがわかる。ただし、斜め向波中のH/λが大きい場合にType2の実験値が他の2船型よりも小さい値を取る場合がある。Fig.2.30にも示すように、これらの場合には船首相対水位変動の実験値はType2の方が他の2船型よりも小さくなっている。そのため、船首相対水位の差異が船首高さが低いことよりも大きく影響した。

3.5.2 打ち込み荷重及び水圧

内航タンカーの打ち込み荷重及び水圧の計算結果についてFig.3.25からFig.3.32に示す。Fig.3.25からFig.3.28に正面向波(χ=180 °)中で、波高波長比及び船速を変えた場合の打ち込み荷重及び水圧の計算結果を実線及び破線で示す。Fig.3.25及びFig.3.26には船速一定(フルード数F_n=0.1)として波高波長比H/λを変えて計測した結果を示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.25, 1.5の3種類である。横軸は波高波長比H/λを表す。縦軸は打ち込み荷重及び水圧の極大値を平均した値を実船スケールに換算して表す。ここで示す打ち込み荷重は計測した荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧として表す。実験値と定性的にも定量的にもよく一致しており、本手法により打ち込み荷重をかなり正確に推定できる事がわかる。

Fig.3.27及びFig.3.28には、波高波長比を一定として(H/λ=1/30)、船速を変えて計測した結果を示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.25の2種類である。計算値は実験値と定性的にも定量的にもよく一致しており、本推定法が、波高や船速の影響を合理的にとり入れている事がわかる。

波高波長比や船速が大きい場合には、打ち込み荷重は実験値との差が相対的に大きく

なるが、これは、前述したとおり舷側からの水の流入によるものである。しかし、近年まとめられた日本近海の波浪データ[32]によると、本論で用いた内航タンカーでλ/L=1.25, H/λ=1/25に相当する波浪の発現頻度は約5パーセント以下と低いことや、実際の荒天中での波、風による抵抗増加による自然減速や操船による意識的減速の影響を勘案すると、船舶が実際に航行する海象条件では本手法は実用的に十分な精度を有する。

Fig.3.29からFig.3.32に斜向波(χ=150 °)中で、波高波長比及び船速を変えた場合の打ち込み荷重及び水圧の計算結果を実線及び破線で示す。Fig.3.29及びFig.3.30には船速一定(フルード数F_n=0.1)として波高波長比H/λを変えて計測した結果を示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.25, 1.5の3種類である。縦軸はそれぞれの極大値を実船スケールに換算して表す。ここで示す打ち込み荷重は計測した荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧として表す。Fig.3.31及びFig.3.32には、波高波長比を一定として(H/λ=1/30)、船速を変えて計測した結果を示す。波長船長比はλ/L=1.0, 1.25の2種類である。

計算値は実験値と定性的にも定量的にもよく一致しており、正面向波だけでなく斜向波の場合でも本推定法が有効である事がわかる。また、斜向波中では、波高波長比や船速が大きい場合でも、打ち込み荷重の計算値は実験値と良く一致している。Fig. 3.33に示すようにビデオカメラの観察結果によると、斜向波中においても船首部からの波の流入が支配的であることを確認した。波高や船速が大きくなるにつれて波上側の船側部からの流入も発生するが、船首部に回り込むことなく流下している事が確認できた。本研究での観察結果は、北川ら[41]が行なった斜向波中での海水打ち込みについての模型実験と同じ結果となった。これらのことから、船首部から波の流入を波高や船速の影響をとり入れて解析することで、甲板上水位分布や打ち込み荷重を精度良く推定できる。

内航貨物船の打ち込み荷重及び水圧の計算結果についてFig.3.34からFig.3.45に示す。母船型(Type1)、乾舷及び船首高さを低くした船型(Type2)、フレア形状をふくらませた船型(Type3)の3船型についての結果をパラメタ毎に同じ図で示す。

Fig.3.34からFig.3.37には船速一定(フルード数F_n=0.17)で波高波長比を変化させて計測した正面向波及び斜向波中での打ち込み荷重の結果について示す。縦軸は打ち込み荷重の極大値を実船スケールに換算して表す。ここで示す打ち込み荷重は計測した荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧として表す。

Fig.3.38からFig.3.45には船速一定(F_n=0.17)で波高波長比を変化させて計測した正面向波及び斜め向波中での打ち込み水圧（P_1及びP_2）の結果について示す。縦軸は打ち込み水圧の極大値を平均した値を実船スケールに換算して表す。

乾舷を低くしたType2と他の2船型の船首高さは30mmしか違わないため、その差が顕著ではないものの、全体的に他の2船型に比べてT ype2の実験値が大きくなっており、打ち込み荷重及び水圧が船首高さに影響を受けやすいことがわかる。ただし、斜向波中の波高波長比が大きい場合にType2の実験値が他の2船型よりも小さい値を取る場合がある。Fig.2.30にも示すように、これらの場合には船首相対水位変動の実験値はType2の方が他の2船型よりも小さくなっている。そのため、船首相対水位の差異が船首高さが低いことよりも大きく影響した。

一方、高速船のようにスプレーによる打ち込みが支配的になる場合の推定法については、(3.7)式からもわかるように、明らかに現象が異なるため別途モデル化が必要である

が、今回対象とした内航船の打ち込み現象とは異なるため、ここでは触れない。また、打ち込み荷重等が小さい値をとる場合すなわち海水打ち込みが小さい場合、計算値が実験値より過大な場合がある。本推定法では、船首相対水位が船首高さを越えた場合に打ち込みが発生すると定義している。ビデオカメラでの観察結果によると、船首相対水位が船首高さを超える量が微小な場合打ち込みが発生しないこともあり、厳密には打ち込み発生の閾値が船首高さよりも若干高いところにあると考えられる。これらのことから、推定を行う際の冠水持続時間に若干の差異を生じている。

しかしながら、洪水流理論を用いた計算値と実験値は一致しており、本手法は十分な精度を有している。このことから、本研究で提案した推定法は有効である。また、本推定法はストリップ法等の既存の船体運動計算法で計算が可能である船首相対水位、船首上下速度及び縦揺れの時系列を用いて甲板水位や荷重の推定を行うことができることから実用的な推定法である。

3.5.3 水平方向の衝撃圧

正面向波(χ=180 °)での母船型(Type1)、船首高さを低くした船型(Type2)、フレアをふくらませた船型(Type3)の衝撃圧の極大値の計算値と実験値の比較を示す。水平方向の衝撃圧は、船首楼甲板の端であるS.S.9の後方10mmのセンターライン上に水圧計を取り付けて計測している。Fig.3.46及びFig.3.47にそれぞれλ/L=1.0, 1.2で船速一定(フルード数F_n=0.17)として波高波長比H/λを変化した場合の結果を示す。また、Fig.3.48及びFig.3.49にはそれぞれλ/L=1.0, 1.2でH/λを一定として船速を変化した場合の比較を示す。図中に実験値を印で、各実験での船首相対水位の時系列をもとに水平方向の衝撃圧を推定した結果を線と印で示す。縦軸は、衝撃圧をフルードの相似則に基づき実船スケールに換算した値を表す。

洪水流理論を用いた甲板冠水のモデルとWagnerの衝撃理論を組み合わせた本手法は波高及び船速にかかわらず定性的かつ定量的にも実験結果をよく説明できていることがわかる。

しかし、Fig.3.46及びFig.3.47に示すようにλ/L=1.0のType2の場合や、λ/L=1.2の波高波長比が大きい場合に実験値と定量的に差を生じる場合がある。(3.22)式からもわかるように、甲板上水位の極大値及び波面の傾斜の推定誤差は衝撃圧の推定精度に大きく影響を及ぼす。このうち甲板上水位の極大値はFig.3.14に示すように実験値と計算値はよく一致しており、精度よく推定できている。一方、波面の傾斜については、本手法で推定した甲板上水位は船幅方向の平均水位であるが、ビデオカメラによる観察から船幅方向になだらかな分布があることを確認した。このことが、波面の傾斜角の誤差が衝撃圧の推定誤差の主な要因になっている。(3.22)式の衝撃圧の推定においては、波面の傾斜の精度がもっとも大きく影響を及ぼす。より一層精度を向上するためには三次元的な流場を解く必要があると考えられるが、実験値と計算値の一致はよく、十分に有用である。

また、Wagner理論は、物体の突入角βを小さいとして線形化することで導かれた理論であることから、その適用限界はβ=0 °から45 °といわれている[44]。今回水圧を計測したS.S. 9付近では波面の傾斜はWagner理論の適用限界から若干小さい値となっていた。し

かしながら、そのような場合においても本手法により精度よい推定が可能であることがわかった。

3.6 結　言

甲板冠水の挙動をモデル化することで、実用的な甲板上水位分布の推定法を提案した。さらに甲板上水位分布を入力として打ち込み荷重及び水圧と甲板上構造物に及ぼす水平方向の衝撃圧の推定法についても提案した。これらの推定法による計算値と前章で示した実験値を比較することで推定法の妥当性を論じた結果、以下の結論を得た。

(1) 船首楼甲板上での打ち込みは船首部からの流入が支配的である。打ち込みによる海水の流入量を越波高さδ_{max}の2乗に比例するものとし、流入後の流れを船速の影響を考慮することができる洪水流理論を用いてモデル化することで甲板上水位分布及びその時間変化を精度よく推定できる。

(2) 打ち込み荷重及び水圧は甲板冠水の運動量変化を考慮することでその極大値を精度よく推定できる。

(3) 水平方向の衝撃圧の極大値は甲板上水位分布の約10倍以上の水頭となる場合もあり、甲板水による水平方向の荷重が無視できない。これについては、洪水流理論とWagner理論を組み合わせることで精度よく推定できる。

(4) 今回示した手法によりストリップ法などで計算した船首相対水位、船首上下速度及び縦揺の時系列を用いて、甲板水位や荷重の推定を行うことができる。

(5) フレア形状の違いが水平方向の衝撃圧に及ぼす影響は，形状を極端に変化させない限り余り大きくないが、船首高さの違いは甲板冠水に直接影響を及ぼすため、相対的に海水打ち込みに及ぼす影響は比較的大きい。これら前章で実験的に示した結果は、本推定法による計算結果でも同様に確認された。

第4章　確率論的手法を用いた海水打ち込みの予測法

4.1　緒　言

海水打ち込みを考慮して満載喫水線の設定を行うためには、満載喫水線を設定することで確保される安全性を定量的に推定する必要がある。そのためには、海水打ち込みに関する長期予測計算を行って船舶の稼動期間における最大値を推定する必要がある。この場合、甲板の強度の観点からは打ち込み荷重、甲板上での作業性の観点からは甲板上水位分布あるいは打ち込み水量を直接予測する事が求められる。

しかしながら、打ち込み荷重や水量を定量的に推定する手法が確立されていないこともあり、これらの長期予測計算法についての研究は、福田ら[29]、川上ら[9]の研究以降あまり行われていない。

本研究では、前章までの結果にあるように洪水流理論に基づく推定法を用いることで打ち込み荷重及び水量を精度よく推定できることを示した。これにより打ち込み荷重及び水量と船体運動及び船首部相対水位との定量的な関係が明らかになった。

そこで本章では、これらの結果をもとにして船首部相対水位と打ち込み荷重及び水量の極大値との相関を表すモデルを考えることで、打ち込み荷重及び水量の確率密度関数を導く。また、この確率密度関数から超過確率を求めて、不規則波中実験の結果と比較することで推定精度を検証した。さらに、長期予測計算を行い、得られた長期予測値を定量的に論じた。なお、この際の理論的な取り扱いは、以下の仮定のもとに行う。

○船体運動、船首部相対水位のスペクトルは、狭帯域スペクトルである。

○海水打ち込みは、船首部相対水位が船首高さを越えた時に発生する。

また、以下に示す計算結果はすべて正面向波(χ=180 °)で行った結果である。

4.2　打ち込み荷重の予測法

4.2.1　打ち込み荷重の確率密度関数

はじめに、船首部相対水位の極大値の確率分布を既知として、不規則波中における打ち込み荷重の確率密度関数を導く。長期予測計算を行うためには、確率密度関数を実用的な形で導く必要がある。そこで、模型実験の解析結果から船首部相対水位と打ち込み荷重の関係をモデル化し、その関係を用いて打ち込み荷重の確率密度関数を解析的に導いた。前章までに示した規則波中実験の解析結果から、船首部での打ち込み水の流入は、船首部相対水位が船首を越える高さ（越波高さ）の極大値δ_{max}に等しい高さを持ち、δ_{max}

に比例する有効幅をもって甲板上に流入するとモデル化することで精度よく解析できることを示した。このことは、荷重や水量を越波高さに関連づけるためには、越波高さの極大値δ_{max}の2乗に比例するモデルを用いる必要性を示している。よって、打ち込み荷重の極大値F_{max}を次式で表すこととする。

$$F_{max} = \alpha\rho g B(\eta_{max} - F_b)^2 = \alpha\rho g B\delta_{max}^2 \tag{4.1}$$

ここで、αは比例定数、ρは水の密度、gは重力加速度、Bは船幅、η_{max}は船首部相対水位ηの極大値、F_bは船首高さを表す。

(4.1)式のαは内航タンカー及び内航貨物船の規則波中実験結果からそれぞれ決定した。Fig.4.1及びFig.4.2に越波高さの極大値δ_{max}と打ち込み荷重の極大値F_{max}との関係を示す。実験値を印で、それを(4.1)式で最小二乗近似した結果を線で示す。この結果、内航タンカーについてはα=0.57、内航貨物船については母船型(Type1)及びフレア形状を変えた船型(Type3)でそれぞれα=0.4、0.34となった。以下に示す計算ではこれらの値をαとして用いた。

このように、打ち込み荷重の極大値F_{max}が船首部相対水位の極大値η_{max}の関数で表されるとすると、F_{max}の確率密度関数$p_F(F_{max})$は船首相対水位の極大値の確率密度関数$p_\eta(\eta_{max})$を用いて

$$p_F(F_{max})dF_{max} = p_\eta(\eta_{max})d\eta_{max} \tag{4.2}$$

と表すことができる。

Fig.2.48、Fig.2.51に示したように、振幅が大きくなると波高の非線形影響が無視できなくなるものの、船首部相対水位の極大値の確率密度関数はレーレー分布で表せる。よって、船首部相対水位の極大値の確率密度関数$p_\eta(\eta_{max})$は次式のように与えられる。

$$p_\eta(\eta_{max}) = \frac{\eta_{max}}{\sigma_\eta^2}\exp\left\{\frac{-\eta_{max}^2}{2\sigma_\eta^2}\right\} \tag{4.3}$$

ここでσ_ηは船首部相対水位の標準偏差を表す。よって、(4.1)、(4.2)及び(4.3)式を用いて変数変換を行えば、打ち込み荷重の極大値F_{max}の確率密度関数$p_F(F_{max})$は、

$$p_F(F_{max}) = p_\eta(\eta_{max})\frac{d\eta_{max}}{dF_{max}}$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{1}{2\alpha\rho g B\left(\eta_{max}-F_b\right)}\frac{\eta_{max}}{\sigma_\eta^2}\exp\left\{\frac{-\eta_{max}^2}{2\sigma_\eta^2}\right\} \\
&= \frac{F_b\sqrt{\alpha\rho g B}+\sqrt{F_{max}}}{2\alpha\rho g B\sigma_\eta^2\sqrt{F_{max}}}\exp\left\{\frac{-\left(F_b\sqrt{\alpha\rho g B}+\sqrt{F_{max}}\right)^2}{2\sigma_\eta^2\alpha\rho g B}\right\} \qquad (4.4)
\end{aligned}
$$

となる。また、これを積分することによりF_0よりも大きな打ち込み荷重の極大値F_{max}が発生する確率（超過確率）$P(F_{max}>F_0)$は、

$$
P(F_{max}>F_0) = \int_{F_0}^{\infty} p_F(F_{max})dF_{max} = \exp\left\{\frac{-\left(F_b\sqrt{\alpha\rho g B}+\sqrt{F_0}\right)^2}{2\sigma_\eta^2\alpha\rho g B}\right\} : F_0>0 \qquad (4.5)
$$

となる。

4.2.2 打ち込み荷重の短期予測計算

導いた打ち込み荷重の超過確率を用いた短期予測計算を行い、前章までに示した不規則波中実験結果と比較した。Fig.4.3に内航タンカーの不規則波中実験（T_{01}=1.495sec、$H_{1/3}$=0.174m、F_n=0.1、χ=180 °）で得られた超過確率との比較を示す。また、Fig.4.4には内航貨物船の不規則波中実験（T_{01}=1.537sec、$H_{1/3}$=0.193m、F_n=0.17、χ=180 °）で得られた超過確率との比較を示す。縦軸は出会い波数に対する超過確率を対数軸で表す。横軸は打ち込み荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧として実船スケールに換算した値で表す。計算に用いた船首部相対水位の標準偏差は、不規則波中実験で得た値を用いた。その標準偏差σ_ηは、内航タンカーでは実船スケール換算で2.5(m)、内航貨物船の母船型(Type1)及びフレア形状を変えた船型(Type3)では実船スケールでそれぞれ2.8及び2.9(m)である。実験値と計算値は定性的かつ定量的にもよく一致しており、打ち込み荷重を(4.1)式に示すように越波高さの極大値δ_{max}の2乗と関連づけることで打ち込み荷重の超過確率を精度よく推定することができる。

内航貨物船の母船型(Type1)とフレア形状を変えた船型(Type3)では実験値には有意な差はないが、比例定数α及び船首相対水位の標準偏差σ_ηはそれぞれ異なる。これは、フレア形状を変化した船型(Type3)はフレアをふくらませている分だけ船体が波面に突入したときに押しのける水の量が母船型(Type1)に比べて多くなり、その影響が船首部相対水位の標準偏差σ_ηに現われた。一方、比例定数αについては、フレア形状を変化した船型(Type3)は押しのけた水を外向きに飛散させる効果が母船型(Type1)に比べて大きくなるので甲板上に水が打ち込みにくくなる影響が比例定数αに現われた。

4.2.3 船首高さ及び波浪の影響

船首高さF_bをパラメターとした打ち込み荷重の短期予測計算を行った。内航タンカー及び内航貨物船についての結果をFig.4.5及びFig.4.6にそれぞれ示す。出会い方位は正面向波(χ=180 °)で一定とした。船速は、内航タンカー及び内航貨物船でフルード数F_n=0.1及び0.17でそれぞれ一定とした。縦軸には超過確率を対数軸で表す。横軸には打ち込み荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧として実船スケールに換算した値で表す。また、内航タンカー及び内航貨物船の実際の船首高さを入力とした結果についても同じく図中に太実線で表す。海象の設定は平均波周期T_{01}=5.56(sec)、有義波高$H_{1/3}$=5(m)とした。これは、日本近海の波浪推算データより作成した沿海航行区域の波浪頻度表より求めた日本海側での通年の平均波周期及びその周期での最大波高[32]である。図から、例えば内航タンカーについて、船首高さが5mの場合10000波中に一回は84.7(k N/m^2)を超える打ち込み荷重が発生することがわかる。また、船首高さが大きくなるにつれて超過確率は小さくなっており、船首高さが打ち込み荷重の発生確率に及ぼす影響が大きいこともわかる。このように、これまで主に打ち込みの発生確率からしか評価できなかった海水打ち込みを、本手法を用いることで荷重とその発現確率の観点から定量的に評価することができる。

海水打ち込みが発生するような荒れた海象では、自然及び人為的減速により船速はかなり低下している。また、危険な状態を回避するため人為的に変針が行われる。ここでの計算結果は、厳しい海象設定だけでなく、船速低下や操船の影響を考慮しないかなり厳しい条件での計算結果である。そのため、実際の船舶に発生する打ち込み荷重は定量的にはここで示した値よりも小さくなると予想される。原理的には、荒天時の操船データをさらに蓄積して操船影響や船速低下を定量化することで、これらの影響を考慮することが可能である。ここでは、開発した打ち込み荷重の予測法の検証が主目的であるので、これらについての定量的な検討は行わない。

同様に有義波高$H_{1/3}$をパラメターとした打ち込み荷重の短期予測計算を行った。内航タンカー及び内航貨物船についての結果をFig.4.7及びFig.4.8にそれぞれ示す。船首高さは実際の船首高さとし、平均波周期はT_{01}=5.56(sec)で一定とした。有義波高が小さくなるにつれて、打ち込み荷重の発生確率は急激に小さくなっており、波高が打ち込み荷重の発生確率に及ぼす影響も大きい事がわかる。船首高さをパラメターとした場合と同様に、これまで主に打ち込みの発生確率の観点からしか得られなかった知見を、本手法を用いることで荷重とその発現確率の観点から定量的に確認することができた。

4.2.4 打ち込み荷重の長期予測計算

ここで導いた打ち込み荷重の極大値の超過確率を用いることで、打ち込み荷重の極大値F_{max}の長期の発現頻度$q(F_{max} > F_0)$を次式で表すことができる。

$$q(F_{max} > F_0) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty} P(F_{max} > F_0|H,T)P(H,T)P(\theta_N)dHdTd\theta_N \tag{4.6}$$

ここで、$P(F > F_0|H,T)$は打ち込み荷重の極大値の超過確率、$P(H,T)$は波浪の発現頻度、$P(\theta_N)$は船舶の進路と不規則波の主方向（波向）とのなす角θ_Nの発現頻度を表す。一般的には、さらに上式に船速低下、載貨状態及び操船の影響を考慮する必要がある［45][46]。特に海水打ち込みが発生するような荒れた海象では、先に述べたように、自然及び人為的減速により船速はかなり低下しており、人為的に変針が行われるが、ここでは取り扱わないものとする。

また出会い方位については、最も海水打ち込みが厳しい正面向波(χ=180 °)のみを考慮したので$P(\theta_N)$=1とした。打ち込み荷重の極大値の超過確率$P(F > F_0|H,T)$を（4.6）式により計算する際の入力である船首部相対水位の標準偏差σ_ηは各波高及び周期毎にストリップ法(NSM)を用いて計算した。内航タンカー及び内航貨物船の船速は、フルード数F_n=0.1及び0.17でそれぞれ一定とした。Fig.4.9に内航タンカー及び内航貨物船の長期予測計算の結果を示す。図の縦軸は打ち込み荷重を船首楼甲板の面積で割った平均水圧を実船スケールに換算した値で表す。横軸は発現頻度を常用対数で表す。計算に用いた波浪は、日本近海の波浪データより作成した沿海航行区域の波浪頻度分布表[32]を用いた。

比較のために福田の手法[29]を用いた打ち込み荷重の長期予測値についても同じくFig.4.9に示す（図中conventionalと称する）。この手法では、打ち込み荷重の極大値F_{max}は越波高さの極大値δ_{max}に比例するものとして予測計算を行っている。両者を比較すると、予測値の定量的な差が大きいことがわかる。設計便覧[47]では、船首楼甲板の設計水圧は垂線間長L_{pp}=150m以下の船に対しては、垂線間長L_{pp}の関数として、$0.98L_{pp}(kN/m^2)$と定義されている。これによると、本研究で計算対象とした内航タンカーでは$70.6(kN/m^2)$、内航貨物船では$76.9(kN/m^2)$となる。これらの打ち込み荷重が発生する確率を両手法で比較した場合、福田の手法ではかなり高い発生確率となるため、打ち込み荷重を過大評価している。このことから、合理的に打ち込み荷重の予測を行なうためには、本研究で示したようにδ_{max}の2乗でモデル化した超過確率を用いて予測を行なう必要がある。

4.3 打ち込み水量の予測法

4.3.1 打ち込み水量の確率密度関数

打ち込み荷重と同様に打ち込み水量の極大値確率密度関数を導くことができる。はじめに、打ち込み水量の極大値W_{max}を越波高さの極大値δ_{max}の2乗に比例するものとして次式で定義する。

$$W_{max} = \alpha_W B(\eta_{max} - F_b)^2 \quad = \quad \alpha_W B \delta_{max}^2 \tag{4.7}$$

ここで、α_Wは比例定数を表す。内航貨物船の母船型(Type1)及びフレア形状を変えた船型(Type3)について、Fig.4.10に示すように規則波中実験の結果からそれぞれα_W=0.31及び0.18とした。

このように、打ち込み水量の極大値W_{max}が船首部相対水位の極大値η_{max}の関数で表せるとすると、打ち込み水量の確率密度関数$p_W(W_{max})$は船首相対水位の確率密度関数$p_\eta(\eta_{max})$を用いて

$$p_W(W_{max})dW_{max} \quad = \quad p_\eta(\eta_{max})d\eta_{max} \tag{4.8}$$

と表すことができる。

よって、(4.3)、(4.7)及び(4.8)式を用いると、W_0よりも大きな打ち込み水量の極大値W_{max}が発生する確率（超過確率）$P(W_{max} > W_0)$は、

$$P(W_{max} > W_0) \quad = \quad \exp\left\{\frac{-\left(F_b\sqrt{\alpha_W B} + \sqrt{W_0}\right)^2}{2\sigma_\eta^2 \alpha_W B}\right\} : W_0 > 0 \tag{4.9}$$

となる。Fig.4.11に打ち込み水量の短期予測計算と不規則波中実験（T_{01} =1.537sec、$H_{1/3}$ =0.193m、F_n=0.17、χ=180 °）結果の比較を示す。縦軸は出会い波数に対する超過確率を対数軸で表す。横軸は打ち込み水量を船首楼甲板の面積で割った平均水位として実船スケールに換算した値で表す。計算に用いた船首部相対水位の標準偏差は、不規則波中実験で得た値を用いた。計算値と実験値は定性的かつ定量的にもよく一致しており、打ち込み荷重と同様に、越波高さの極大値δ_{max}の2乗に比例するモデルを用いることで超過確率を精度よく求めることができる。

この確率密度関数を用いて、船首高さF_bをパラメターとした打ち込み水量の短期予測計算を行った。内航貨物船についての結果をFig.4.12に示す。出会い方位及び船速は、正面向波(χ=180 °)及びフルード数F_n=0.17で一定とした。図の横軸は打ち込み水量を甲板面積で割った平均水位として実船スケールに換算した値で表す。また、内航貨物船の実際の船首高さの結果についても同じく太実線で図中に示す。海象の設定は打ち込み荷重の計算と同様に平均波周期T_{01}=5.56(sec)、有義波高$H_{1/3}$=5(m)とした。計算結果から、例えば内航タンカーについて、船首高さが5mの場合10000波に１回は4.3mを超える水位が発生することがわかる。また、船首高さが大きくなるにつれて超過確率は小さくなっており、船首高さが打ち込み水量に及ぼす影響が大きいこともわかる。

同様に有義波高$H_{1/3}$をパラメターとした打ち込み水量の短期予測計算結果をFig.4.13に示す。この場合の平均波周期も同じく5.56(sec)として計算した。こちらも有義波高が小さくなるにつれて打ち込み水量の発生確率は急激に小さくなっており、波高が打ち込み水量に及ぼす影響も大きい事がわかる。打ち込み荷重の場合と同様に、これまで主に打ち込みの発生確率の観点からしか得られていなかった知見を、本手法を用いることで打ち込み水量とその発現確率の観点から定量的に確認することができた。

4.3.2 打ち込み水量の長期予測計算

(4.6)式の$P(F_{max} > F_0|H,T)$を(4.9)式の$P(W_{max} > W_0)$でおきかえることで、打ち込み水量の長期発現頻度を求めることができる。Fig.4.14に内航貨物船について打ち込み水量の長期予測計算を行った結果を示す。船速は、フルード数F_n=0.17で一定とした。図の縦軸は打ち込み水量を甲板面積で割った平均水位を実船スケールに換算した値で表す。横軸は発現頻度を常用対数で表す。

また、比較のために福田の手法[26]を用いた長期予測値を同じくFig.4.14に示す（図中conventionalと称する）。この手法では、甲板上水位の極大値は越波高さの極大値δ_{max}に比例するものとして予測計算を行っている。甲板上水位の発生確率を両手法で比較すると、福田の手法ではかなり高い発生確率となるため、打ち込み水量を過大評価している。このことから、打ち込み荷重と同様に、合理的に打ち込み水量の極大値の予測を行なうためには、本研究で示したようにδ_{max}の2乗でモデル化した超過確率を用いて予測を行なう必要がある。

4.4 結　言

規則波中実験の結果をもとに船首部相対水位と打ち込み荷重及び水量の極大値との相関をモデル化することで、打ち込み荷重及び水量の極大値の確率密度関数を導いた。さらに、これらの確率密度関数を用いて短期予測計算及び長期予測計算を行い、本手法の妥当性を論じたところ以下の結論を得た。

(1) 打ち込み荷重及び水量の極大値を越波高さの極大値δ_{max}の2乗と関連づけてモデル化する事で、これらの確率密度関数を導いた。これを用いて短期予測計算を行い、前章までに示した不規則波中実験の結果と比較したところ定性的かつ定量的にもよく一致することがわかった。

(2) 打ち込み荷重及び水量の発生確率は船首高さ及び波高により大きく変化する。このように、これまでにも主に打ち込みの発生確率の観点からしか得られていなかった知見を、本手法を用いることで荷重及び水量とその発現確率の観点から定量的に確認することができた。

(3) 長期予測計算を行ない、甲板上水位の極大値は越波高さの極大値δ_{max}に比例するものとする従来の方法と比較した結果、発生確率に大きな差があることを明らかにした。このことから、合理的に打ち込み荷重及び水量の長期予測計算を行なうためには本研究で導いたようにδ_{max}の2乗でモデル化した確率密度関数を用いる必要がある。

第5章　海水打ち込みの観点からの安全基準の検討（実際の問題への応用）

5.1　緒　言

前章までに、打ち込み荷重の推定法及び予測法の開発を行なった。これにより打ち込み荷重を定量的に評価することが可能となった。本章では、これらの開発した手法を用いて安全基準の検討を行う。

はじめに、内航海運の効率化を目的として、近年設定された航行区分である限定近海船の満載喫水線の設定を行なう。第1章でも述べたとおり、船舶設備規定等の設備に関する基準については、限定近海船の設定と同時に合理的な基準が策定された。しかしながら、満載喫水線規則のような船舶の機能を規定する基準に関しては、調査・研究が必要と考えられたため見直しについては先送りされている。この時に懸案とされていた技術的問題の一つは、日本の沿海及び近海の詳細な波浪情報を収集・解析してその波浪特性を明らかにする事であった。もう一つの技術的問題は、満載喫水線が確保している安全性の主要なものである海水打ち込みの防止に関する定量的な検討であった。

このうち前者について、著者らは(財)日本気象協会が1994年から提供を開始した日本沿近海の局所波浪データを用いて解析を行い、海域毎の波浪の特性について調べた[32]。これにより、日本周辺では距岸20〜30海里程度までは波高が急に高くなるが、それ以遠では変化の度合いが小さくなっていること等の知見を得た。後者については、本研究で開発した手法を用いることで定量的に検討することが可能である。そこで、満載喫水線の設定法を整理した後、打ち込み荷重を考慮した満載喫水線の設定を行なった。

次に、バルクキャリアのハッチカバーにはたらく打ち込み荷重について検討した。近年、満載喫水線に関する国際条約である満載喫水線条約の見直し作業がIMO（国際海事機関）において行われている。この見直し作業は、少なくとも技術的な観点からは全面的な見直しを指向している[50]。見直し作業は段階的に行われており、最小船首高さの式やハッチカバー強度の見直しに係る作業等が行われているところである。これらの見直し作業のうち、ハッチカバー強度については、海水打ち込みによる甲板上への影響を評価する事も含めて議論の的となっている項目の一つである。

なかでも、強度を規定するための設定荷重の妥当性については、これまでにもたびたび議論の的となっている。ハッチカバーの損傷が原因ではないものの、近年にバルクキャリアの海難事故が多数発生した事でこれまで以上に関心が高まっている。さらに、船級協会の国際組織であるIACS (International Association of Classification Society)が統一要件UR-S21により新造のバルクキャリアのハッチカバー強度の基準を強化した事も議論に拍車をかけている。

これらについて検討を進めていく上で海水打ち込みによる荷重の定量的な評価が必要になると考えられる。しかしながら、第1章でも述べたとおり、打ち込み水の挙動は複雑であり、その複雑さから荷重の直接計測及び定量的な評価はこれまでにあまり行われていなかった。そこで、バルクキャリア模型を用いた波浪中実験を行ない、バルクキャリアの上甲板及びハッチカバーにはたらく打ち込み荷重の計測を行った。この結果の妥当性について、本研究で開発した手法を用いて、この実験の結果を定量的に検討した。更に、現行基準で規定されているハッチカバーの荷重との比較、検討を行った。

5.2 限定近海船の満載喫水線の設定

ここでは打ち込み荷重を考慮した限定近海船の満載喫水線の設定を行う。はじめに満載喫水線により確保されている安全性及び設定法についてまとめる。この考え方に基づき、海水打ち込みに関する長期予測計算を実施して限定近海船の乾舷及び船首高さを設定する。

5.2.1 満載喫水線の設定法

満載喫水線条約及び国内規則である満載喫水線規則では、一定以上の水密性や船員の保護設備等を備えた船舶において、乾舷及び船首高さを規定することにより、満載喫水線より上部の水密区画の容積（予備浮力）や乾舷甲板等の海面からの高さが安全上適切なものとなるように定めている。その結果、復原力の重要な要素である予備浮力が確保されるとともに、甲板上への海水打ち込みが制限され、転覆の防止、開口部からの浸水の防止（ひいては沈没防止）や暴露甲板上で作業する船員の保護等の安全性が確保されることになる。

このうち海水打ち込みに対しては、乾舷甲板等の海面からの適切な高さによる甲板冠水の制限、船員保護設備の設置による暴露甲板上での安全性確保及び出入り口やハッチの保護による船内へ浸水の防止、更に、船内に浸水した場合に予備浮力による安全性確保（沈下・沈没防止）といった多段階の状況が満載喫水線基準で考慮されていることになる。また、海水打ち込みの制限は復原性や暴露甲板上の構造設備の強度等に関する基準の前提となっている。これらのことから、海水打ち込みの制限は満載喫水線基準が果たす船の安全性確保のうちの主要な機能である。

このことから、海水打ち込みの制限を最大の課題として乾舷及び船首高さを設定する。この場合、打ち込みが全く発生しないような高さに乾舷を設定するのは航行の実態を勘案すると現実的ではない。そこで、現行の船舶が沿海及び近海を航行した場合の打ち込み確率や打ち込み荷重の発生確率を計算し、限定近海を航行した場合の発生確率がこれらと同じになるような乾舷及び船首高さを推定する。

この際、乾舷と船首高さは個別に取り扱うこととする。満載喫水線規則における乾舷の取り扱いとして、遠洋・近海規定では船首高さと船体中央部の乾舷を区別して規則を定めているのに対し、沿海規定では区別せず扱っている。海水打ち込みと乾舷及び船首高さとの関連を考えると船体中央部は打ち込み水による衝撃荷重の発生はあまりない事

はこれまでの数多くの研究からも明らかになっている。このことより、船首については打ち込み荷重を考慮した設定を行う必要があるが、船体中央部の乾舷については打ち込み荷重ではなく主に水没性や予備浮力の観点から検討を行うのが妥当であると考えられる。ただし、その場合に復原性は他の規則で確保されているので、要求基準の設定においては復原力そのものの確保を考慮しないこととする。このような考え方に基づき、乾舷については打ち込み確率の観点から、船首高さについては打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の観点から長期予測計算を行い、その結果から限定近海船の乾舷及び船種高さを各々設定する。

5.2.2 計算方法

実際に航行している内航船舶（1998年当時）で代表的な船型である貨物船、油送船、土砂運搬船及びケミカルタンカーについて代表的な船型を選び出して計算対象とした。これらの船種は内航船全体の約87%を占める。船体運動及び相対水位の計算にはストリップ法(NSM)を用いた。打ち込み確率については、船体中央部及び船首部における相対水位が乾舷及び船首高さを越えた時に打ち込みが発生すると定義して、その発生確率をそれぞれ求めた。打ち込み確率の出会い方位は、全方位で計算した。この際の波の方向分布は、$cos^2\chi$分布とした。また、打ち込み荷重については、本研究で開発した予測法を用いて計算を行った。この場合の出会い方位は正面向波のみとした。

長期予測計算の入力となる波浪発現頻度表のうち沿海及び限定近海については、(財)日本気象協会作成の局所波浪データを元に著者らが作成した波浪頻度表を用いた[32]。このデータは1日2回気象庁から配信されている風の現況データを基に気象協会で波浪推算を行ったデータである。現況データは6分格子で配信されるが、地形による遮蔽と局所的な風波を考慮した2分格子の値で推算を行なっている。著者らがこのデータをもとに陸岸からの距離と波高の関係を調べた結果、日本海側及び太平洋側の双方で距岸20〜30海里程度までは波高が急に高くなるが、それ以遠では変化の度合いが小さくなっていること等が知見として得られた[32]。また、近海については海上技術安全研究所で定期的に取り纏められている北太平洋の海象データベースをもとに近海区域のデータを抽出して波浪発現頻度表を作成した[48]。

5.2.3 限定近海船の乾舷

満載喫水線規則では、はじめに、船長により基本となる乾舷を規定している。さらにこれらに、各船の構造配置に応じた各船固有の修正を施すことで各船毎の乾舷を規定する。沿海船及び遠洋・近海船についての基本となる乾舷を、それぞれ基本乾舷（満載喫水線規則第70条）及び基準乾舷（満載喫水線規則第51条）という。

よって、個船の特徴に関わらず確保されている基本乾舷及び基準乾舷を定量的に評価することで、基本乾舷や基準乾舷が確保している安全性を評価する。そして、これらと同じ安全性（ここでは打ち込みの長期発生確率）を確保するために限定近海で必要となる乾舷を推定する。

(1)沿海船の規定を用いた乾舷の推定

沿海船に係る満載喫水線規則をもとに限定近海船の乾舷を推定する。はじめに、各船舶が満載喫水線規則第70条で定められる基本乾舷で沿海を航行したときの船体中央部の打ち込み確率を求めた。次に、これと同じ確率で限定近海を航行するための乾舷を推定した。推定した乾舷と基本乾舷の比をFig.5.1に示す。横軸には垂線間長Lppを表す。図から船長にかかわらずその比はほぼ一定となり、平均すると1.06となった。

(2)遠洋・近海船の規定を用いた乾舷の推定

遠洋・近海船に係る満載喫水線規則をもとに限定近海船の乾舷を推定する。はじめに、各船舶が満載喫水線規則第51条で定められる基準乾舷で近海を航行した場合の船体中央部の打ち込み確率を求めた。次に、これと同じ確率で限定近海を航行するための乾舷を推定した。このようにして求めた各船の乾舷と基準乾舷の比をFig.5.2に示す。こちらも船長にかかわらず比はほぼ一定となり、平均で0.84となった。

(3)限定近海船の乾舷の設定

これらのことから、打ち込み確率をもとに推定した限定近海船の乾舷は、基本乾舷及び基準乾舷と船長に関わらず一定の比率にあることがわかった。

著者らが日本沿近海の波浪特性について調べた結果[32]によると、限定近海の海象は相対的に近海より沿海でのそれにかなり近い事がわかっている。また、陸上からの迅速な支援に頼ることが出来ず、付近を航行する船舶も比較的まばらであるため自力対処が第一に求められる近海区域に対して、限定近海においては陸上からの支援がある程度期待できる。また、基本乾舷から求めた限定近海船の乾舷に沿海船に係る諸修正（満載喫水線規則第71条～第74条）を施した乾舷で、限定近海を航行した場合の各船の打ち込み確率は、各船舶が実際の乾舷で沿海を航行した場合の打ち込み確率を下回る事を確認した。

これらのことを勘案すると、限定近海で必要となる乾舷の設定及び諸修正は沿海船に係る満載喫水線規則をもとに設定しても差し支えない。よって、限定近海船の乾舷は、沿海船に係る満載喫水線規則（満載喫水線規則第70条）で定められる基本乾舷に修正係数として1.06を乗じた値に諸修正（満載喫水線規則第71条～第74条）を施すことで設定可能である。この方法で定められる限定近海船の基本的な乾舷の一例（C_B=0.68）をFig.5.3に示す。

5.2.4　限定近海船の船首高さ

満載喫水線に係る国内規則の満載喫水線規則では、沿海船については船首高さに関する規則は定められておらず、遠洋・近海船についてのみ最小船首高さが定められている（満載喫水線規則第58条）。

よって、ここでは打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の双方から遠洋・近海船に定められている最小船首高さを定量的に評価する。これにより、同じ安全性を確保するために限定近海で必要となる船首高さを推定する。

(1)打ち込み確率からの船首高さの推定

打ち込み確率をもとに限定近海船の船首高さを推定する。はじめに、各船が満載喫水線

規則第58条で定められる最小船首高さで近海を航行した場合の打ち込み確率を求めた。次に、これと同じ確率で限定近海を航行するために必要となる船首高さを推定した。Fig.5.4に、このようにして求めた各船の推定値と満載喫水線規則第58条で定められる最小船首高さとの比を示す。横軸は垂線間長Lppを表す。沿海船についても同様に、近海を航行した場合の打ち込み確率と同じ確率で沿海を航行するために必要となる船首高さを推定した。求めた各船の推定値と満載喫水線規則第58条で定められる各船の最小船首高さとの比をFig.5.5に示す。Fig.5.4及びFig.5.5には、これらの結果を直線近似した結果を同じく示すが、これについては後述する。限定近海及び沿海の船首高さの比は、共に船長が短くなるにしたがって比が大きくなっていることがわかる。この結果から、船長の短い船舶ほど海象の違いが長期予測値に及ぼす影響が相対的に小さくなる。

(2)打ち込み荷重からの船首高さの推定

打ち込み荷重の発生確率をもとに限定近海船の船首高さを推定する。はじめに、各船が満載喫水線規則第58条で定められる最小船首高さで近海を航行した場合の打ち込み荷重の発生確率を求めた。この計算での波との出会い方位は、正面向波のみを考えた。打ち込み荷重の閾値として設計水圧[47]、IACSが定めたバルクキャリアの統一要件のうちハッチカバー強度についての規定(UR-S21、1997)、NK鋼船規則CS編第17条で規定される打ち込み荷重の3つを用いた。次に、これと同じ確率で限定近海を航行するために必要となる船首高さを推定した。このように推定した船首高さと満載喫水線規則第58条で定められる最小船首高さとの比をFig.5.6に示す。横軸は垂線間長Lppを表す。打ち込み確率からの推定結果と同様に、船長が短くなるにしたがって比が大きくなっていることがわかる。また、推定値と最小船首高さとの比は打ち込み確率からの推定に比べて小さくなっており、海域の違いが打ち込み荷重の発生確率に及ぼす影響は打ち込み確率よりも顕著である。本研究の結果から、打ち込み荷重は船首を乗り越えた船首部相対水位の高さ（越波高さ）に大きく影響を受けることがわかっている。このことから、海域の違いによる影響が顕著に現れる。

(3)限定近海船の最小船首高さの設定

これらの結果から、打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の双方を満足するためには打ち込み確率を基にして船首高さの設定を行うべきである。

よって、Fig.5.4に示す実線のように推定結果を直線で近似した。これは、船長100m以上の船舶については船長100mでの係数0.78で一定とし、それより短い船舶については、$-0.0022\times\mathrm{Lpp}+1.0$となる事を意味する。図からもわかるように、この近似は推定結果をうまく説明しており、近海規則で定められる最小船首高さにこれを修正係数として乗ずることで限定近海船の最小船首高さを設定することが可能である。

さらに、Fig.5.4及びFig.5.5からもわかるように、沿海と限定近海で各々必要となる船首高さを比較したところ、沿海と限定近海での船首高さの比は船長にかかわらずほぼ一定となった。結果をFig.5.7に示す。これらの比は平均すると0.945となる。このことから沿海船の最小船首高さについても、Fig.5.4に示した近似式に沿海用の修正係数として0.945を乗じた係数を用いることで設定することが可能である。こちらについてもFig.5.5に実線で示す。この設定法で定められる限定近海船及び沿海船の最小船首高さの一例（C_B=0.68）

をFig.5.8に示す。

5.2.5 まとめ

現行の内航船を用いて、打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の長期予測計算を行い、沿海船及び遠洋・近海船に係る満載喫水線規則の定量的な評価を行った。その結果から、限定近海を想定した海象で必要となる乾舷及び最小船首高さは以下の様に設定できることがわかった。

本検討で用いた船舶について、満載喫水線規則で定められる船の長さL_d（最小の型深さの85%の位置における計画喫水線に平行な喫水線の全長の96%又はその喫水線上の船首材の前端からだ頭材の中心までの距離のうちいずれか大きいものをいう。）と垂線間長が同じであることを確認している。よって、現行の満載喫水線規則にならい船の長さで修正係数を表すこととする。

(1) 限定近海船の基本となる乾舷は、満載喫水線規則第70条で規定される沿海船の基本乾舷に修正係数として1.06を乗じた値とする。
(2) 限定近海船の乾舷に係る諸修正は、沿海船に係る諸修正（満載喫水線規則第条71～第74条）を用いる。
(3) 限定近海船の最小船首高さは、満載喫水線規則第58条で規定される最小船首高さに、以下に示す修正係数を乗じた値とする。
修正係数：（L_dは船の長さ）
L_dが100m未満の船舶：$1.0 - 0.0022 \times L_d$
L_dが100m以上の船舶：0.78
(4) 沿海船の最小船首高さを設定する場合は、上記により定めた限定近海船の最小船首高さに修正係数として0.945を乗じた値とする。

5.3 バルクキャリアにはたらく打ち込み荷重

次に、バルクキャリア模型を用いた波浪中実験を行ない、バルクキャリアの上甲板及びハッチカバーにはたらく打ち込み荷重の計測を行った。本研究で開発した打ち込み荷重の推定法を用いて実験結果を定量的に論じた。更に、現行基準で規定されているハッチカバーの荷重との比較、検討を行った。

5.3.1 ハッチカバー強度の見直しの動向

はじめに現行基準及び見直し作業の動向について説明する。現行の満載喫水線条約（以下ICLL66）第16規則では、第1位置（暴露したフリーボード甲板及び低船尾楼甲板上並びに船首垂線から船舶の長さの4分の1の点より前方に位置する暴露した船楼甲板上）のハッチカバーについては$1.75ton/m^2$以上、第2位置（船首垂線から船舶の長さの4分の1の点より後方に位置する暴露した船楼甲板上）のハッチカバーについては$1.30ton/m^2$以上の荷重で最大応力を計算し、これと係数4.25の相乗積が材料の最小極限強さを越えてはならな

いと規定されている。しかし、これらの設定荷重が十分妥当な大きさかどうかという事については、以前より多方面で何度も問い掛けられてきたところである。特に近年、緒言で述べた理由により設定荷重を強化すべきであるとの議論に拍車がかかっている。

これに関して、英国では見直しのための実験を積極的に進めており、その結果がIMO（国際海事機関）に逐次報告されている[51][52]。ここで示されている実験結果によると、ICLL66の設定荷重よりもはるかに大きな打ち込み荷重が計測されている。この結果をもとに、英国はICLL66の設定荷重の強化を提案している。一方、日本の調査によると、ハッチカバーが崩壊した事による損傷事例は多くないことがわかっている[53]。さらに技術的には、実験で最大荷重が発生した波の統計的な位置付けが明確でない事や試験水槽と実海域における長波頂波と短波頂波の違い等の問題点がある。これらの事から、日本及びIACSは、ハッチカバー強度について荷重の大きさだけで議論するのは適切ではない事及び荷重を定量的に評価するためには詳細な検討を行う必要がある等の意見を述べている。これらに対しIMOでは、何らかの改善は必要であることは認めるものの、具体的な対応策については慎重な検討、研究成果の集積が必要であろうとの見解を下している。このような背景から、ハッチカバー強度を見なおす上で、打ち込み荷重を定量的に評価することが重要な検討事項となっている。

5.3.2 模型実験

海上技術安全研究所80m角水槽において、大型のバルクキャリア模型（Lpp×B×d=4.5×0.793×0.285m、実船Lpp =307mを想定、方形係数：C_B=0.806）を用いて規則波及び不規則波中で自由航走試験を行った。模型船の主要目及び想定するバルクキャリアの寸法をTable5.1に示す。船首高さ（型深さから喫水をひいた値）は、ICLL66で規定される最小船首高さと同じ値になるように設定した。また、上甲板はフラットなものとし、舷弧は取り付けていない。

実験は正面向波（χ=180 °）及び横波（χ=90 °）の不規則波中で計測を行った。スペクトラムには、ISSCスペクトラムを用いた。有義波高及び平均波周期は実船スケールでそれぞれ10.6m及び14秒、出会い波数は約500波である。船速は、正面向波については約14knot（フルード数F_n=0.131）及び約1.4 knot（フルード数F_n=0.014）の2状態、横波については平均船速約14 knotの1状態について計測を行った。また、船首相対水位と打ち込み荷重の関係を把握するために正面向波規則波中でにおいても実験を行った。この際の船速は不規則波中実験と同じ船速で、波高と波周期を変えて実験を行った。

5.3.3 計測項目

打ち込み荷重を計測するために、パネルに歪ゲージを貼りつけたセンサー（以下、パネルゲージ）を上甲板にパネルの中心がセンターラインと一致するように取り付けた。これにより、パネル全体にはたらく打ち込み荷重を平均水圧の形で計測した。受圧面寸法及び船長方向の取付け位置をFig.5.9に示す。取付け位置はFore deck（以下PG-1）、No.1Hold（以下PG-2）、No.4 Hold（以下PG-3）を想定している。PG-1は上甲板と面一となるように

取付け、PG-2及びPG-3はハッチカバーを模擬した治具の上に取り付けた。これらの上甲板からの高さは、実船スケールで約2mとなるように設定した。PG-1及びPG-2は船幅方向に2分割（以下これらを右舷側からPG1-1、PG1-2及びPG2-1、PG2-2とする）、PG-3については船幅方向に4分割（以下右舷側からPG3-1、PG3-2、PG3-3、PG3-4）して、それぞれの面で独立して計測を行った。較正値を求めるための検定は、パネルの受圧面に均等に水頭（最大1mAq）を作用するようにして複数回行った。これにより、線形性及び再現性があることを確認している。また、パネルゲージ自身の自重による慣性力の影響はほとんど無視できることも同時に確認した。さらに、甲板冠水の挙動を観察するために船上にビデオカメラを取り付けた。

打ち込み荷重以外に、船体運動、上下加速度及び相対水位変動の計測も行った。船体運動については、光ファイバージャイロを用いて回転運動を計測した。軸方向の運動については、ジャイロアクセロメーターにより加速度を計測し、変位に換算した。上下加速度は、パネルゲージの真下に取り付けたサーボ式加速度計により計測した。また、相対水位変動は、容量式波高計を船首に取り付けて計測した。

5.3.4　船体運動及び船首相対水位

打ち込み荷重の入力となる船体運動及び船首相対水位変動の結果について示す。はじめに、入射波及び縦揺の時系列から極値のヒストグラムを求め、これから超過確率を求めた。さらに、スペクトラムから求めた分散値より計算されるレーリー分布の超過確率と比較した。結果の一例をFig.5.10及びFig.5.11に示す。横軸は入射波及び縦揺の極大値を実船スケールに換算して表す。また、縦軸は出会い波の数に対する超過確率を対数軸で表す。入射波及び縦揺ともに振幅が小さな範囲では、レーリー分布に従う事がわかる。また、振幅が大きくなるとは非線形性が表れるためレーリー分布から外れてくるが、あまり大きなずれではない事がわかる。同様に、船首相対水位変動の超過確率を求めたので、その一例をFig.5.12及びFig.5.13に示す。スペクトラムから求めた分散値より計算されるレーリー分布の超過確率も同じく図中に示す。横軸は相対水位変動の鉛直上向きの極大値を実船スケールに換算して表す。縦軸は出会い波の数に対する超過確率を対数軸で表す。また、比較のために供試船の船首高さを同じく図中に点線で示す。振幅が大きな部分、特に船首を越える高さ以上になると非線形性が強く現れるためレーリー分布から大きくはずれる。この事から、海水打ち込みが発生すると非線形性が相対的に顕著にあらわれる事がわかる。

5.3.5　打ち込み荷重

打ち込み荷重の結果について示す。不規則波中での時系列から打ち込み荷重の極大値を読み取り、超過確率を求めた。これらをFig.5.14からFig.5.16に示す。縦軸は出会い波の数に対する超過確率を対数軸で表す。横軸は打ち込み荷重（平均水圧）の極大値をフルード則にもとづき実船スケールに換算した値を示す。PG2-1については、データの欠落があったため結果には示していない。また、第4章で示した打ち込み荷重の予測法を用いて

推定した超過確率をFig.5.14に同じく点線で示すが、こちらについては後述する。さらに、本実験結果により得られた分布形状の妥当性を確認するために、英国のストラスクライド大学復原性研究センター（以下、SSRC）によるバルクキャリア模型を用いた海水打ち込み実験の結果[49]をFig.5.16に同じく実線で示す。模型船及び不規則波のパラメータは異なるので、直接の比較はできない。また、この実験では船首高さの影響を調べるために船首高さを基準で規定する船首高さよりも低くしているため、打ち込み発生確率は本実験よりもかなり大きくなっている。しかしながら、分布形状は同様の形状を有していることがわかる。

(1)相対水位変動との関係

Fig.5.14から船速14knot、正面向波の状態で計測した荷重の値は、PG-1で最大約40m水頭とかなり大きなものとなる。Fig.5.12に示すように船首相対水位が船首部に乗り上げる波の高さ（越波高さ）は実船換算で最大13m程度となる。前章までに示した実験結果においても打ち込み荷重は最大で越波高さの3〜4倍程度となっていることから、同様の結果を得たことがわかる。

(2)出会い方位の影響

Fig.5.14及びFig.5.15の比較から、出会い方位が横波の場合、PG-1(Fore deck)及びPG-2(No.1 hold)のような船首部付近の打ち込み荷重は正面向波に比べて小さくなることがわかる。横波中では、船首相対水位が小さくなるため、船首部からの打ち込みは減少し、船側部からの打ち込みが増加する。よって、PG-3(No.4 hold)のように船体中心部に近い位置では、船首部ほど出会い方位によって荷重は変化しない。

(3)船速の影響

Fig.5.14及びFig.5.16の比較から、船速が小さくなると、打ち込み荷重も小さくなることがわかる。船速1.4knotのPG-3では、打ち込み荷重の発生はなかった。しかしながら、PG-2(No.1 hold)はPG-1(Fore deck)やPG-3(No.4 hold)ほど顕著に速度の影響をうけていない。ビデオによる観察結果から、船首先端から流入した水は、速い速度で船尾方向へまっすぐ流下しており、これが打ち込み水の主要な流れであると考えられる。しかしながら、厳密には船側部からも流入しており、これらの水は甲板上の一点に集中し、大きな水塊となって流下する。このため、打ち込み荷重が局所的に大きくなる場所が発生すると考えられる。これらの流入量や水が集中する位置は船速や波高によって異なっている。ビデオカメラの観察結果から、船速1.4knotの場合PG-2(No.1 hold)前方で集中し、PG-2に乗り上げるように打ち込んでいる事を確認した。そのため船首部を越える波の高さは、船速がある場合に比べて小さくなっているにもかかわらず、PG-2での荷重はさほど顕著に変化しなかった。これについては、本研究で開発した打ち込み荷重の推定法を用いてさらに検討を行う。

5.3.6 実験結果の定量的な評価

実験結果の妥当性を検証するために、本研究において開発した打ち込み荷重の推定法及び予測法を用いて打ち込み荷重及びその超過確率を推定した。

計測した荷重の大きさを検証するために第3章で示した手法により打ち込み荷重の推定を行なった。この際の打ち込みの有効幅B_0は、$B_0 = 1.1\delta$(δは越波高さ)とした。この実験では、打ち込み水量の計測を行なっていないが、第3章で示したタンカー及び貨物船の実験結果から船型によって極端に変化していない事を勘案してタンカーの値1.1を用いた。

ここでは、ハッチカバーにはたらく打ち込み荷重を推定するために、荷重を推定する際のハッチカバー上の水位$\bar{\phi}_1'$を

$$\bar{\phi}_1' = \bar{\phi}_1 - H_{hc} \tag{5.1}$$

とした。ここで、$\bar{\phi}_1$は洪水流モデルを用いて推定した打ち込み水位、H_{hc}はハッチコーミング高さを表す。Fig.5.17及びFig.5.18に、正面向波、船速14knotでのPG-1(Fore Deck)及びPG-2(No.1 Hatch)の時系列の一例を示す。横軸には時間、縦軸にはパネルゲージにより計測した打ち込み荷重（平均水圧）を実船スケールに換算して示す。実験値を実線、計算値を点線で表す。水位を計算するための入力である船首相対水位、荷重を計算するための入力である上下加速度及び縦揺は、実験により計測した時系列を用いた。No.1 hatchのハッチコーミングで反射する水の影響で、Fig.5.17のPG-1の実験値にはパネル上に滞留している水の影響が見うけられるものの、極大値は本手法で精度よく推定できている。また、Fig.5.18に示すPG-2についても同様によい一致を示している。これらの事から、ハッチコーミング高さを考慮する事で、洪水流の理論によるモデルから、ハッチカバーにはたらく打ち込み荷重も精度よく推定できる事がわかる。

正面向波、船速1.4knotの検討結果も、Fig.5.19及びFig.5.20に示す。Fig.5.19のPG-1については、14knotの場合と同様に極大値は精度よく推定できている。しかしながら、Fig.5.20に示すPG-2の場合、実験では荷重が計測されているにもかかわらず、計算では打ち込み水の水位がハッチコーミング高さを越える事が無かったため荷重は発生しない場合があった。ビデオカメラによる観察結果では、船側部から流入した水がNo.1ハッチの手前で集中してハッチカバーに乗り上げる挙動を見せた。洪水流モデルは、船首先端からの流入のみを考えており、前述した船側部からの流入が考慮されていないためこの様な違いを生じたと考えられる。近似的には船首からの流入が支配的であるため、洪水流モデルを用いる事で打ち込み荷重の推定は可能であると考えられるが、さらにこれらの影響についても合理的に考慮していく必要性があると考えられる。しかしながら、このような事例を除けば、本手法によりハッチカバーにはたらく打ち込み荷重を精度よく推定できる。

つぎに、計測した打ち込み荷重の超過確率を検証するためにPG-1(Fore deck)における打ち込み荷重の超過確率を第4章で示した手法により計算した。(4.5)式を用いて推定した結果を、Fig.5.14に点線で示す。(4.5)式のαはこれまでと同様に規則波中実験での打ち込み荷重と船首相対水位の結果から0.3とした。近似した結果をFig.5.21に示す。また、船首相対水位の標準偏差は、不規則波中実験の結果から実船スケールで約8.8(m)であった。推定した超過確率は定性的にも定量的にも精度よく推定できている事がわかる。これらの結果から本実験の結果は、理論による推定とよく一致しており、定量的に合理的な結果

である。

5.3.7 現行基準等で規定する荷重との比較

ハッチカバー強度を考える場合、最終的には強度の観点から議論する必要がある。そこで、強度を考える際の入力である荷重についての比較を行う。IACSによる統一要件UR-S21で規定される荷重P_sは

$$
\begin{aligned}
P_s &= 16.9\sqrt{H_s} \\
H_s &= 0.14A_i\sqrt{\frac{V_s L_{pp}}{C_B}} - d_f
\end{aligned}
\tag{5.2}
$$

で表される。ここで、A_iは荷重の船長方向の変化を表すための定数で、F.P.で2.7、S.S.7 1/2で1.0となる。V(knot)は船速（ただし、14knot以下の船速については14knotとして扱う）、L_{pp}(m)は船長、C_Bは方形係数、d_f(m)は、夏季満載喫水とハッチコーミングの先端との鉛直方向距離を表す。通常、大きな打ち込み荷重が発生する荒天時では自然及び人為的減速によって船速はかなり低下している。よって、本実験の結果を用いて荷重の大きさのレベルを比較する場合、正面向波1.4knotの結果を用いるのが妥当である。ICLL66及びUR-S21で規定する荷重と比較した結果を船長方向の分布でFig.5.21に示す。横軸には、F.P.を10とした船長方向の位置を船長との無次元値で表す。縦軸は、計測した打ち込み荷重の1/10有義値、1/3有義値、平均値を表す。実験値は全てフルード則にもとづき実船スケールに換算して表す。ICLL66で規定される打ち込み荷重と比較した場合、本実験の結果はこれを大きく上回る結果となった。このことは、荷重を見直す必要性があることを示唆している。また、UR-S21で設定する荷重は、本実験結果の1/10有義値あるいは1/3有義値と同じレベルとなった。さらに定量的な議論のためには、実験データを蓄積して統計的な位置付けを明確にする必要性がある。

先に述べたとおり、日本の調査[53]によると、ハッチカバーが崩壊した事による損傷事例はほとんどないことがわかっている。このことから、満載喫水線条約では設定荷重が実態を下まわっていたとしても、安全係数で補っていたために強度的には十分であったことが予想される。そのため、現行規則の設定荷重を検討する際には、荷重の大きさだけでなく安全係数を含めて検討する必要がある。

5.4 結　言

ここでは、海水打ち込みに関連する2つの技術的問題について検討を行なった。

はじめに、打ち込み荷重を考慮した満載喫水線の設定法について検討を行った。現行の内航船を用いて、打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の長期予測計算を行い、沿海船及び遠洋・近海船に係る満載喫水線規則の定量的な評価を行った。その結果から、

限定近海を想定した海象で必要となる乾舷及び最小船首高さは以下の様に設定できることがわかった。

(1) 限定近海船の基本となる乾舷は、満載喫水線規則第70条で規定される沿海船の基本乾舷に修正係数として1.06を乗じた値とする。
(2) 限定近海船の乾舷に係る諸修正は、沿海船に係る諸修正（満載喫水線規則第条71～第74条）を用いる。
(3) 限定近海船の最小船首高さは、満載喫水線規則第58条で規定される最小船首高さに、以下に示す修正係数を乗じた値とする。
修正係数：（L_dは満載喫水線規則で規定する船の長さ）
L_dが100m未満の船舶：$1.0 - 0.0022 \times L_d$
L_dが100m以上の船舶：0.78
(4) 沿海船の最小船首高さを設定する場合は、上記により定めた限定近海船の最小船首高さに修正係数として0.945を乗じた値とする。

次に、バルクキャリアのハッチカバーにはたらく打ち込み荷重について検討を行なった。バルクキャリア模型を用いた波浪中実験を行ない、バルクキャリアの上甲板及びハッチカバーにはたらく打ち込み荷重の計測を行った。また、この結果の妥当性について、前章までに開発した打ち込み荷重の推定法を用いて定量的に論じた。更に、現行基準で規定されているハッチカバーの荷重との比較、検討を行った結果、以下の事がわかった。

(5) 打ち込み荷重は、船速の低下や出会い方位が向波から横波になるにつれて一般的に小さくなるといわれている。本研究で行ったバルクキャリア模型を用いた実験についても同様の結果を得た。
(6) 本研究で開発された打ち込み荷重の推定法及び予測法による推定結果は、実験結果と一致した。この事から、推定法はハッチカバー上の打ち込み荷重推定にも有用である事及び本実験結果は定性的かつ定量的にも合理的なものである事がわかった。
(7) 計測された打ち込み荷重は、満載喫水線条約で設定する荷重を大きく上回る結果となった。このことは、基準で規定する荷重の値を見直す必要性を示唆している。その場合、荷重の大きさだけでなく強度の観点から、安全係数を含めて検討する必要がある。

第6章　結　論

本論文は、海水打ち込みにより発生する甲板冠水の甲板上水位分布や打ち込み荷重を定量的に推定するための手法の開発を目的として研究を行ったものである。本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる。

第1章においては、本研究の背景となった満載喫水線に係る基準の見直し作業について概説した。また、海水打ち込みに関するこれまでの研究を総括することで問題点の抽出及び本研究の目的を明確にした。その結果、満載喫水線の合理的な評価及び船舶の耐航性能の一層の向上のためには、甲板上水位分布や打ち込み荷重を定量的に推定するための手法の開発が必要であることを確認した。

第2章においては、海水打ち込み現象を把握するために内航タンカー及び内航貨物船模型を用いた波浪中実験を実施して、甲板上水位分布や打ち込み荷重の直接計測を行った。この結果をもとに波、船速及び船首部水線面上形状が海水打ち込みに及ぼす影響について検討を行った。

規則波中実験の結果から、打ち込み水量及び荷重は、波高及び船速が大きくなるにつれて大きくなり、その傾向は海水打込みが激しい縦運動の同調点付近で顕著になる。また、打ち込み水量と打ち込み荷重の波高や波周期に対する定性的な傾向は似ており、その相関は強いとの知見を得た。さらに、不規則波中実験の結果から、船首を乗り越えた波の高さの4〜5倍程度の水頭の水圧が局所的に発生する場合があるとの知見を得た。

船首部水線面上形状の影響については、打ち込み水量や荷重に及ぼす船首高さの影響は大きいが、フレア形状は形状を極端に変化させない限りその差異が海水打ち込みに与える影響は小さいとの知見を得た。

打ち込み水量及び荷重だけでなく、海水打ち込みと相関の強い船首部相対水位について、ストリップ法による推定精度の検証を行った。その結果、船首部相対水位変動を精度良く推定するには船体運動に対する波高の非線形影響と船首部での反射波の影響を考慮する必要があることを確認した。実用的な観点からは、浸水面形状の時間的変化を考慮した船体運動計算法を用いた相対変位の計算値を、動的な影響を考慮した田崎の式で補正することで精度よく推定できることを示した。

第3章では、実験結果をもとに、甲板冠水の挙動をモデル化することで、実用的な甲板上水位分布の推定法を提案した。さらに甲板上水位分布を入力として打ち込み荷重と甲板上構造物に及ぼす水平方向の衝撃圧の推定法についても提案した。

その結果、船首楼甲板上での打ち込みは船首部からの流入が支配的であるため、打ち込みによる海水の流入量を越波高さδ_{max}の2乗に比例するものとし、流入後の流れを船速の影響を考慮することができる洪水流理論を用いてモデル化することで甲板上水位分布及びその時間変化を精度よく推定できることを示した。また、打ち込み荷重は洪水流理

論を用いて求めた甲板冠水の運動量変化を考慮することで、水平方向の衝撃圧については洪水流理論とWagner理論を組み合わせることでその極大値を精度よく推定できることを示した。これらの手法は、船体運動計算法であるストリップ法等で計算した船首相対水位、船首上下速度及び縦揺の時系列を用いて推定することができる実用的な計算手法である。

第4章では、規則波中実験の結果をもとに船首部相対水位と打ち込み荷重及び水量の極大値を越波高さδ_{max}の2乗に比例するとしたモデルにより、打ち込み水量及び荷重の極大値の確率密度関数を提案した。これらの確率密度関数を用いて短期予測計算を行い不規則波中実験結果との比較した。さらに、長期予測計算を行って、甲板上水位の極大値は越波高さδ_{max}に比例するものとする従来の方法と比較した。

その結果、本手法による推定値は不規則波中実験の結果と定性的かつ定量的にもよく一致しており実験結果をうまく説明できている事を示した。また、打ち込み水量及び荷重の発生確率は船首高さ及び波高により大きく変化するという知見は、これまでの研究では主に打ち込みの発生確率の観点からしか得られていなかった。本研究では打ち込み水量及び荷重を直接計算することで同じ知見を定量的に示した。

さらに、長期予測計算を行い、甲板上水位の極大値は越波高さの極大値δ_{max}に比例するものとする従来の方法と比較した結果、発生確率に大きな差があることを示した。このことから、合理的に打ち込み荷重及び水量の長期予測計算を行なうためには本手法が有用であることを示した。

第5章では、本研究で開発した手法を用いて、安全基準に関連する2つの問題について技術的検討を行った。はじめに、打ち込み荷重を考慮した満載喫水線の設定を行った。現行の内航船を用いて、打ち込み確率及び打ち込み荷重の発生確率の長期予測計算を行い、沿海船及び遠洋・近海船に係る満載喫水線規則の定量に評価した。その結果から、限定近海を想定した海象で必要となる乾舷及び最小船首高さは以下の様に設定できることを示した。

(1) 限定近海船の基本となる乾舷は、満載喫水線規則第70条で規定される沿海船の基本乾舷に修正係数として1.06を乗じた値とする。

(2) 限定近海船の乾舷に係る諸修正は、沿海船に係る諸修正（満載喫水線規則第条71～第74条）を用いる。

(3) 限定近海船の最小船首高さは、満載喫水線規則第58条で規定される最小船首高さに、以下に示す修正係数を乗じた値とする。

修正係数：（L_dは満載喫水線規則で規定する船の長さ）

L_dが100m未満の船舶：$1.0 - 0.0022 \times L_d$

L_dが100m以上の船舶：0.78

(4) 沿海船の最小船首高さを設定する場合は、上記により定めた限定近海船の最小船首高さに修正係数として0.945を乗じた値とする。

つぎに、バルクキャリアのハッチカバーにはたらく打ち込み荷重について検討を行なった。バルクキャリア模型を用いた波浪中実験を行ない、バルクキャリアの上甲板及びハッ

チカバーにはたらく打ち込み荷重の計測を行った。また、本研究で提案した打ち込み荷重の推定法を拡張してハッチカバー上にはたらく打ち込み荷重の推定法を提案した。これにより、現行基準で規定されているハッチカバーの荷重との比較及び検討を行った。その結果、打ち込み荷重の推定値は、実験結果と一致することを示した。この事から、推定法はハッチカバー上の打ち込み荷重の推定にも有用である事及び本実験結果は定性的かつ定量的にも合理的なものである事を確認した。計測した打ち込み荷重は、満載喫水線条約で設定する荷重を大きく上回ることを確認した。このことは、基準で規定する荷重の値を見直す必要性を示唆しており、荷重の大きさだけでなく強度の観点から、安全係数を含めて検討する必要があるとの知見を得た。

以上の事から、所期の目的である甲板上水位分布や打ち込み荷重を定量的に推定するための手法の開発を行い、これらを用いた満載喫水線に関する検討により安全基準への適用を行った。今後の課題としては、船首尾での反射波の影響をより合理的に考慮できる船体運動推定法の開発及び船舶の水線面上形状と耐航性能の関係、とりわけ荒天中での船体運動、波浪荷重に関する研究があげられる。これらについては今後さらに鋭意研究を進めていく所存である。

なお、限定近海を航行する船舶の乾舷及び最小船首高さに関する満載喫水線規則は、本研究の結果にもとづき平成13年10月23日に改正された事を付記する。

謝辞

本論文を終えるに当り、懇切なる御指導と御教示並びに貴重な御意見を賜りました次の方々に対しまして著者の深甚なる感謝の意を表します。

本論文は、著者が独立行政法人海上技術安全研究所（旧運輸省船舶技術研究所）において平成8年から始まった内航船の満載喫水線規則の見直し作業の中で行った研究を中心に現在までの研究を取り纏めたものです。

著者の大阪大学大学院前期課程在学中の指導教官であった大阪大学大学院工学研究科教授内藤　林先生には終始温かい激励と懇切なる御指導を賜りました。同じく大阪大学大学院工学研究科助教授高木　健先生には本論文に関連した研究の要所において、温かい激励と御教示を賜りました。

本論文の取り纏めにおいて大阪大学大学院工学研究科教授鈴木敏夫先生には懇切なる御指導と御助言を賜りました。

広島大学大学院工学研究科教授高木幹雄先生並びに横浜国立大学大学院工学研究科教授平山次清先生には本論文の取り纏め並びに満載喫水線規則の見直し作業において懇切なる御指導と御助言を賜りました。

満載喫水線規則の見直し作業において東京大学大学院新領域創成科学研究科教授藤野正隆先生には懇切なる御教示と御助言を賜りました。

第5章のうちバルクキャリアにはたらく打ち込み荷重の研究は、財団法人日本海事協会並びに東京大学との共同研究の一部として実施したものであり、財団法人日本海事協会研究センター次長熊野　厚氏並びに東京大学大学院新領域創成科学研究科教授影本　浩先生をはじめとする本共同研究の関係各位には御助力と御助言を賜りました。

著者が勤務する独立行政法人海上技術安全研究所（旧運輸省船舶技術研究所）の諸先輩からも多大な御支援を賜りました。本研究の遂行において船舶技術研究所元所長（当時運動性能部長）足達宏之博士には温かい激励と懇切なる御指導を賜りました。同じく海上技術安全研究所理事（当時運動性能部長）渡辺　巌博士には満載喫水線規則の見直し作業並びに本論文に関連した研究の要所において、温かい激励と御教示を賜りました。本研究の遂行全般において海上安全研究領域石田茂資博士並びに海上安全研究領域田口晴邦主任研究員には懇切なる御教示と御助言を賜りました。海上安全研究領域谷澤克治博士には衝撃圧の推定法に関して貴重な御意見と御討論を賜りました。また模型実験の実施においてスーパーエコシッププロジェクト企画調整グループ辻本　勝博士並びに海上安全研究領域南　真紀子研究員には御助力を賜りました。

以上の方々に対しまして、あらためて心から御礼申し上げます。

また、最後に本研究の遂行に際しまして著者の精神的支えとなりました妻　実千里に感謝いたします。

参考文献

1. Alman, P. et al. :The International Load Line Convention: Crossroad to the Future, Marine Technology 29, 1992, pp.233-249.
2. R.N. Newton :Wetness Related to Freeboard and Flare, Transaction R.I.N.A., vol.102, 1960, pp.49-81.
3. 田崎 亮：船舶の波浪中における甲板上への海水打ち込みについて、運輸技術研究所報告、第11巻，第8号，1961，pp.1-32.
4. 竹沢誠二，小林顕太郎，萩野 功，沢田和男：大波高不規則正面向波中におけるDeck Wetnessおよび甲板衝撃水圧について，日本造船学会論文集，第141号，1976，pp.86-96.
5. J.F.O'Dea and D.A. Walden : The effect of Bow Shape and Nonlinearities on Prediction of Large Amplitude Motions and Deck Wetness, Proc. 15th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1984, pp.163-176.
6. Lloyd, A.R.J.M., Salsich, J.O. and Zseleczky, J.J.: The Effect of Bow shape on Deck Wetnss in Head Seas, Transaction R.I.N.A., vol.128, 1986, pp.9-25.
7. 高木　健，内藤　林：海水打ち込みと船首形状の影響について，関西造船協会誌220号，1993，pp.111-120.
8. K. Takagi, A. Niimi：A Teoretical Approach to Bow Deck Wetness of a High-Speed Ship, Journal of Ship Research, Vol.34, No.3, 1990, pp.163-170.
9. 川上益男：船体の青波衝撃について－規則波中の船体模型の曳航試験－，日本造船学会論文集，第125号，1969，pp.99-106.
10. Buchner, B.: On the impact on green water loading on ship and offshore unit design, Practical design of ship and mobile units (PRADS'95), 1995, pp.1430-1440.
11. Buchner, B.: An investigation in the numerical simulation of green water, International Conference on Behaviour of Offshore Structures(BOSS), 1997, pp.1-13.
12. Berhault, C. and Guerin, P.: Experimental and numerical investigations on the green water effects on FPSOs, 8th International offshore and polar engineering conference, 1998, pp.284-290.
13. Vassalos、D., Guarin, L. and Jasionowski: Seakeeping and Seaworthness of Bulk Carriers in Extreme weather conditions, Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000, pp.375-383.
14. Kapsenberg、G.K. and de Kat, J.O.: Effect of Freeboard and Bow Height on Green Water Loads for a General Purpose Cargo Ships, Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000, pp.69-78.
15. 郷田国夫，宮本 武：二次元模型実験の大振幅動揺試験による変動水圧および甲板水圧の計測，西部造船学会会報，第49号，1975，pp.17-27.
16. 郷田国夫，宮本 武：二次元模型実験による甲板水圧の研究，日本造船学会論文集，第140号，1976，pp.16-22.
17. 溝口純敏：デッキ打ち込み水の挙動について，日本造船学会論文集163，1988，pp.150-159.

18. S. Mizoguchi : Design of Freeboard Height with the Numerical Simulation on the Shipping Water, Practical design of ship and mobile units (PRADS'89), 1989, pp.103, 1-8.
19. Stoker, J.J.: Water Waves, The Mathematical Theory with applications, Interscience Publishers Inc., New York, U.S.A., 1957.
20. Wagner, H.: Uber Stoss-und Gleitvorgange an der oberflache von flussigkeiten, Z. angew. math. 12, 1932, pp.193-215.
21. Dobrovol'skaya, H.N.: On some problem of similarity flow of fluid with a free surface, Journal of Fluid Mechanics, Vol.36., 1969, pp.805-829.
22. 栖原寿郎，肥山 央，古賀洋治：水塊の衝突圧力と弾性板の応答，西部造船学会会報，第46号，1973，pp.151-161.
23. 川上益男，田中一雅：肥大船の青波衝撃と過渡振動について，西部造船学会会報，第50号，1975，pp.181-195.
24. 郷田国夫，宮本 武，山本善之：二次元模型実験による甲板水圧の研究（第2報）－船体縦曲げモーメント及び船体横強度に対する影響について－，日本造船学会論文集，第143号，1978，pp.188-195.
25. Wang, Z., Jensen, J. and Xia, J.: On the effect of green water on deck on the wave bending moment, Practical design of ship and mobile units(PRADS'98), 1998, pp.239-246.
26. 福田淳一: 波浪中の船のDeck Wetnessに関する長期予測，日本造船学会論文集第124号，1968，pp.141-158.
27. 福田淳一: Deck Wetnessの長期予測に基ずく乾舷の検討，日本造船学会論文集第128号，1970，pp.191-203.
28. 万順濤，新開明二:甲板冠水時間の推定に基づく乾舷規則の評価，日本造船学会論文集第181号，1997，pp.161-168.
29. 福田淳一，池上国広，森俊哲: Shipping Waterによる甲板荷重の予測，西部造船会会報第45号，1973，pp.95-114.
30. 川上益男，田中一雅: 船首甲板の青波衝撃圧力の統計予測，西部造船会会報第53号，1976，pp.1-20.
31. S. Hayami：On the Propagation of Flood Waves, Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 1, 1951, pp.1-16.
32. 小川剛孝，田口晴邦，石田茂資，渡辺巌，沢田博史，辻本勝，南真紀子：合理的な乾舷設定法に関する研究，船舶技術研究所報告第37巻第6号，2000，pp.19-98.
33. 村重淳，石田茂資，渡辺巌，小川剛孝：Ro-Ro船車両甲板の浸水と波浪の関係についての模型実験，第66回船舶技術研究所研究発表会講演集，1995，pp.9-14.
34. 渡辺巌，沢田博史：二方向不規則波中の船体縦曲げモーメントにおよぼす弾性応答の影響，日本造船学会論文集第158号，1985，pp.280-290.
35. 高石敬史，雁野昌明，吉野泰平，松元尚義，猿田俊彦：斜め波中における船側の相対水位変動について，日本造船学会論文集第132号，1972，pp.147-158.
36. 中村彰一，細田龍介，新谷厚：波浪中の推進性能に関する研究，関西造船協会誌134号，1969，pp.23-32.
37. 田才福造，高木又男，雁野昌明，荒川広行，栗原真人：一軸高速コンテナ船の縦波中

の耐航性能に関する研究，西部造船会会報第41号，1970，pp.45-76.
38. 深沢塔一：スラミングを考慮した波浪中船舶の動的応答，東京大学博士論文，1980.
39. I.Watanabe, M.Ueno and H.Sawada：Effect of Bow Flare Shape to the Wave Load of a Container Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.166, 1989, pp.259-266.
40. 岩佐義朗，金丸昭治：水理学２，朝倉書店，1993，pp.26-54.
41. 北川弘光，角川明：海水打ち込みに関する実験的研究－斜波中の海水打ち込みについて，日本造船学会論文集第143号，1978，pp.126-135.
42. 高橋重雄，谷本勝利，鈴木諭司:直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察，港湾技術研究所報告第22巻4号，1983，pp.3-31.
43. 合田良実，原中祐人:衝撃砕波圧に関する一実験，港湾技術研究所資料No.32，1967，pp.1-18.
44. 溝口純敏，谷澤克治:「耐航性理論の設計への応用」第4章波浪衝撃荷重，運動性能研究委員会第11回シンポジウム，1994，pp.293-336.
45. 小川剛孝，渡辺　巌：航海実績を加味した波浪荷重等の長期予測について，関西造船協会誌224号，1995，pp.43-52.
46. 内藤　林，辻本　勝，濱中誠司，瀬川　進，柴田憲一：実海域における船体応答の長期予測法に関する研究，関西造船協会誌230号，1998，pp.197-203.
47. 関西造船協会編：造船設計便覧第4版、海文堂，1983
48. 渡辺巌，谷澤克治，冨田宏：北太平洋の波と風(1974-1988)，船舶技術研究所報告別冊No.14，1992
49. Vasalos，D., Guarin, L. and Jasionowski:Seakeeping and Seaworthness of Bulk Carriers in Extreme weather conditions, Proc. 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000, pp.375-383
50. 渡辺巌，小川剛孝:満載喫水線基準とその改正の動向，日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム第7章，2000, pp.7-1-7-25
51. Green sea loads on hatch covers and deck wetness derived from seakeeping model tests on a range of bulk carriers, submitted by United Kingdom, MSC/72/4/1/, IMO, Feburuary,2000
52. Further green sea loads results of seakeeping model tests on a range of bulk carriers, submitted by United Kingdom, MSC/72/4/1/add.1, IMO, March,2000
53. Green sea loads on hatch cover and deck wetness derived from seakeeping test on bulk carrier, submitted by Japan, SLF44/4/10, IMO, July,2001

記号一覧

第2章

G/T	総トン数（グロストン）
L_{pp}	船の垂線間長
GM	重心上メタセンタ高さ
$F.P.$	前部垂線
P_A	タンカーの上甲板の前部垂線前方120mmに取り付けた水圧計
P_B	タンカーの上甲板の前部垂線前方70mmに取り付けた水圧計
P_C	タンカーの上甲板の前部垂線後方50mmに取り付けた水圧計
P_D	タンカーの上甲板の前部垂線後方120mmに取り付けた水圧計
P_1	貨物船の上甲板の前部垂線前方50mmに取り付けた水圧計
P_2	貨物船の上甲板の前部垂線後方50mmに取り付けた水圧計
P_3	貨物船の上甲板のS.S.9後方10mmに取り付けた水圧計
F_n	フルード数
H/λ	波高波長比
χ	出会い方位
λ/L	波長船長比
T_{01}	平均波周期
$H_{1/3}$	有義波高
θ_a	縦揺振幅
ϕ_a	横揺振幅
ψ_a	船首揺振幅
ζ_a	波振幅
z_a	上下揺振幅
y_a	左右揺振幅
x_a	前後揺振幅
k	波数
η_a	相対水位の変動振幅
η_s	相対水位のStatic swell up成分
$\bar{W}$	単位面積あたりの打ち込み水量（平均水位）
$\bar{F}$	単位面積あたりの打ち込み荷重（平均水圧）
η	相対水位
η_m	相対水位の変動振幅のうち波と船の相対変位
η_D	相対水位の変動振幅のうち動的な水位変動
$\varepsilon_{z\theta}$	上下揺と縦揺の位相差
$\varepsilon_{x\theta}$	前後揺と縦揺の位相差
$\varepsilon_{\eta\theta}$	相対水位変動と縦揺の位相差
$\eta_a^{'}$	田崎の式により補正を施した船首部相対水位の変動振幅
ω_e	出会い角周波数
C_B	方形係数
g	重力加速度

h_0	決壊後のダムの水位
t	時間
x_p	ダム壁面からの距離
h_x	x_pの位置での水深
u	x_pの位置での粒子速度
ξ	1次元非定常流中の水深
q	1次元非定常流中の流量
v_a	1次元非定常流の平均流速
i_0	1次元非定常流の水路床勾配
i_f	1次元非定常流の摩擦勾配
n	マニングの粗度係数
T_0	撹乱の時間スケール
L_0	撹乱の空間スケール
ξ_0	1様流の水深
v_{a0}	1様流の流速
α_s	1次元非定常流の連続式及び運動方程式の無次元化パラメタ
F_r	1次元非定常流の連続式及び運動方程式の無次元化パラメタ（フルード数）
C	シェジー係数
$\bar{\phi}_1, \bar{\phi}_2$	洪水流の支配方程式の一次近似解及び二次近似解
$F(t), f(t)$	1次元非定常流の上流端での撹乱
D_0, ω_0	洪水流の一次近似解中の変数
B_0	打ち込みの有効幅
$B(x_1)$	船首からの距離x_1における上甲板の幅
Q	甲板冠水の一周期あたりの流入量
T_e	出会い周期
δ_{max}	船首部相対水位の極大値が船首を越えた高さ
η_{max}	船首部相対水位の極大値
F_b	船首高さ
k_3	有効幅の比例定数
θ_{max}	縦揺の最大角
P_d	打ち込み水圧
ρ	流体の密度
V_v	甲板冠水の鉛直方向速度
θ_d	甲板の水平面に対する傾斜角
d_1	船首からの距離
β	波面と鉛直軸とのなす角度
$2l$	楔形物体の幅
V	楔形物体の落下速度
$p(x,t)$	Wagner理論による楔形作用する圧力
b	楔形物体に接する水面の先端の位置
p_i	鉛直壁に作用する水塊の圧力
p_{p1}	鉛直壁に作用する水塊の圧力の極大値

τ_1	鉛直壁に作用する水塊の圧力の持続時間
κ_m	付加質量の補正係数
z_1	壁面における地面からの距離
κ_l	壁面に作用する水塊の高さと甲板上水位との比
l_1	壁面に作用する水塊の高さ

第4章

F_{max}	打ち込み荷重の極大値
B	船幅
α	越波高さの2乗と打ち込み荷重の関係を表す比例乗数
$p_F(F_{max})$	打ち込み荷重の極大値の確率密度関数
$p_\eta(\eta_{max})$	船首相対水位の極大値の確率密度関数
σ_η	船首部相対水位の標準偏差
$P(F_{max} > F_0)$	打ち込み荷重の極大値の超過確率
$q(F_{max} > F_0)$	打ち込み荷重の極大値の長期の発現頻度
$P(F_{max} > F_0 \| H, T)$	有義波高H、平均波周期Tでの打ち込み荷重の極大値の超過確率
$P(H, T)$	波浪の発現頻度
θ_N	船舶の進路と不規則波の主方向（波向）とのなす角
$p(\theta_N)$	θ_Nの発現頻度
W_{max}	打ち込み水量の極大値
α_W	越波高さの2乗と打ち込み水量の関係を表す比例乗数
$p_W(W_{max})$	打ち込み水量の極大値の確率密度関数
$P(W_{max} > W_0)$	打ち込み水量の極大値の超過確率

第5章

$cos^2\chi$	波の方向分布
L_d	満載喫水線規則第4条で規定される船の長さ
$\bar{\phi}_1'$	海水打ち込みによるハッチカバー上での水位
H_{hc}	ハッチコーミング高さ
P_s	IACS-URS21で規定されるハッチカバー荷重
A_i	船長方向の変化を表す係数
V_s	船速(knot)
d_f	夏季満載喫水とハッチコーミングの先端との鉛直方向距離

図表一覧

Figure 2.1 Body plan (Tanker)

Figure 2.2 Body plan (Cargo ship, Type1 and Type2)

Figure 2.3 Body plan (Cargo ship, Type1 and Type3)

Figure 2.4 Setup of measuring instruments (Tanker)

Figure 2.5 Setup of measuring instruments (Cargo ship)

Figure 2.6 Setup of measuring instruments at fore deck

Figure 2.7 Pitch amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.8 Heave amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.9 Surge amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.10 Roll amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.11 Sway amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.12 Yaw amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.13 Amplitude ratio of relative water height at stem (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.14 Amplitude ratio of relative water height at S.S. 6 1/2
(Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.15 Amplitude ratio of relative water height at S.S. 4 1/2
(Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.16 Amplitude ratio of relative water height at S.S. 4 1/2
(Tanker, Lee side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.17 Amplitude ratio of relative water height at S.S. 1 1/2
(Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

Figure 2.18 Time histories of green water height, load and pressure
(Tanker, F_n = 0.1, λ /L = 1.0, H/λ = 1/25, χ = 180 °)

Figure 2.19 Effect of wave height on green water volume (mean green water height)
(Tanker, F_n=0.1, χ = 180 °)

Figure 2.20 Effect of wave height on green water load (mean green water pressure)
(Tanker, F_n=0.1, χ = 180 °)

Figure 2.21 Effect of wave height on green water pressure
(Tanker, 50mm fore from F.P., F_n=0.1, χ = 180 °)

Figure 2.22 Effect of ship speed on green water volume (mean green water height)
(Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

Figure 2.23 Effect of ship speed on green water load (mean green water pressure)
(Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

Figure 2.24 Effect of ship speed on green water pressure
(Tanker, 50mm fore from F.P., H/λ=1/30, χ = 180 °)

Figure 2.25 Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.26 Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.27 Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.28 Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.29 Effect of wave height on relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.30 Effect of wave height on relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.31 Effect of wave height on green water load (mean green water pressure)
(Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.32 Effect of wave height on green water load (mean green water pressure)
(Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.33 Effect of wave height on green water load (mean green water pressure)
(Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.34 Effect of wave height on green water load (mean green water pressure)
(Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.35 Effect of wave height on green water volume (mean green water height)
(Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.36 Effect of wave height on green water volume (mean green water height)
(Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.37 Effect of wave height on green water volume (mean green water height)

(Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.38 Effect of wave height on green water volume (mean green water height)

(Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.39 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.40 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.41 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.42 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.43 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.44 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.45 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.46 Effect of wave height on green water pressure

(Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 2.47 Efffect of wave height on horizontal impact pressure

(Cargo ship, S.S.9, F_n = 0.17, λ /L = 1.0, χ = 180 °)

Figure 2.48 Probability of exceedance of relative water height at stem

(Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 2.49 Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)

(Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 2.50 Probability of exceedance of green water pressure

(Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 2.51 Probability of exceedance of relative water height at stem
(Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.52 Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)
(Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.53 Probability of exceedance of green water pressure
(Cargo ship, 50mm fore from F.P., $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.54 Probability of exceedance of green water pressure
(Cargo ship, 50mm aft from F.P., $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.55 Pitch amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.56 Heave amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.57 Phase angle between pitch and heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.58 Surge amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.59 Phase angle between pitch and surge (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.60 Amplitude ratio of relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.61 Phase angle between pitch and relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.62 Example of time histories of relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °, λ/L=1.0, H/λ=1/50)

Figure 2.63 Example of time histories of relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °, λ/L=1.0, H/λ=1/25)

Figure 2.64 Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.65 Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 2.66 Effect of wave height on relative water height at stem
(Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.1 Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=180 °, H/λ=1/35)

Figure 3.2 Coordinate system for dam break model

Figure 3.3 Coordinate system for channel flow

Figure 3.4 Model of flooded waves

Figure 3.5 Relation between relative water height at stem and green water volume (Tanker)

Figure 3.6 Relation between relative water height at stem and green water volume (Cargo ship)

Figure 3.7 Time history of green water height

(Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.5$, H/$\lambda = 1/35$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.8 Time history of green water height

(Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.5$, H/$\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.9 Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=180 $^\circ$, H/λ=1/25)

Figure 3.10 Time histories of green water height

(Cargo ship, $F_n = 0.19$, $\lambda\ /L = 1.2$, H/$\lambda = 1/35$, $\chi = 180\ ^\circ$

Figure 3.11 Relation between green water load and volume

(Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.0$, H/$\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.12 Relation between green water load and volume

(Tanker, $F_n = 0.12$, $\lambda\ /L = 1.0$, H/$\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.13 Comparison between measured and estimated green water height at S.S.9

(λ/L=1.0, F_n=0.17, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.14 Classification of wave impact models

((a)Wagner type, (b)Bagnold+Wagner Type, (c)Bagnold Type)

Figure 3.15 Water height distribution on deck

(Cargo ship, Δt=0.03sec, λ/L =1.2, H/λ=1/30, F_n=0.17, χ=180 $^\circ$)

Figure 3.16 Time history of horizontal impact pressure

(Cargo ship, S.S.9, λ/L =1.2, H/λ=1/35, F_n=0.19, χ=180 $^\circ$)

Figure 3.17 Water impact mopdel of Wagner

Figure 3.18 Model of green water impact

Figure 3.19 Time history of green water volume (mean green water height)

(Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.0$, H/$\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.20 Time history of green water pressure

(Tanker, 120mm fore from F.P., $F_n = 0.12$, $\lambda\ /L = 1.25$, H/$\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

Figure 3.21 Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 $^\circ$)

Figure 3.22 Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.23 Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.24 Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.25 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, F_n = 0.1, χ = 180 °)

Figure 3.26 Comparison between measured and estimated green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., F_n = 0.1, χ = 180 °)

Figure 3.27 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

Figure 3.28 Comparison between measured and estimated green water pressure

(Tanker, 120mm fore from F.P., H/λ=1/30, χ = 180 °)

Figure 3.29 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, F_n = 0.1, χ = 150 °)

Figure 3.30 Comparison between measured and estimated green water pressure

(Tanker, 120mm fore from F.P., F_n= 0.1, χ = 150 °)

Figure 3.31 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 150 °)

Figure 3.32 Comparison between measured and estimated green water pressure

(Tanker, 120mm fore from F.P., H/λ=1/30, χ = 150 °)

Figure 3.33 Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=150 °, H/λ=1/35)

Figure 3.34 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.35 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.36 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.37 Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.38 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.39 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.40 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.41 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.42 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.43 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 3.44 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.45 Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

Figure 3.46 Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, F_n = 0.17, λ /L = 1.0, χ = 180 °)

Figure 3.47 Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, F_n = 0.17, λ /L = 1.2, χ = 180 °)

Figure 3.48 Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, λ /L = 1.0, H/λ = 1/25, χ = 180 °)

Figure 3.49 Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, λ /L = 1.2, H/λ = 1/35, χ = 180 °)

Figure 4.1 Relation between green water load and relative water height at stem (Tanker, F_n=0.1)

Figure 4.2 Relation between green water load and relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17)

Figure 4.3 Estimation of probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 4.4 Estimation of probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.5 Effect of bow height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 4.6 Effect of bow height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.7 Effect of wave height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, T_{01}=5.56sec, F_n=0.1, χ=180 °)

Figure 4.8 Effect of wave height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.9 Comparison between conventional and present method for long term prediction of green water load (mean green water pressure)

Figure 4.10 Relation between green water volume and relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17)

Figure 4.11 Estimation of probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.12 Effect of bow height on probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.13 Effect of wave height on probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

Figure 4.14 Comparison between conventional and present method for long term prediction of green water volume (mean green water height)

Figure 5.1 Estimation of freeboard in the limited greater coastal area based on the rule for the coastal area

Figure 5.2 Estimation of freeboard in the limited greater coastal area based on the rule for the greater coastal area

Figure 5.3 Freeboard in the limited greater coastal area (C_B=0.68)

Figure 5.4 Estimation of minimum bow height in the limited greater coastal area based on the rule for the greater coastal area

Figure 5.5 Estimation of minimum bow height in the coastal area based on the rule for the greater coastal area

Figure 5.6 Estimation of minimum bow height in the limited greater coastal area based on the rule of green water load for the gerater coastal area

Figure 5.7 Relation of minimum bow height between the coastal and the limited greater coastal area

Figure 5.8 Minimum bow height in the limited greater coastal area (C_B=0.68)

Figure 5.9 Location of measurement of green water load

Figure 5.10 Probability of exceedance of incident wave ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec)

Figure 5.11 Probability of exceedance of pitch ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

Figure 5.12 Probability of exceedance ofrelative water height at stem
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

Figure 5.13 Probability of exceedance of relative water height at stem
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

Figure 5.14 Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

Figure 5.15 Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=90 °, U=14kt)

Figure 5.16 Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

Figure 5.17 Time histries of green water load (mean green water pressure) on fore deck
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

Figure 5.18 Time histries of green water load (mean green water pressure) on No.1 deck
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

Figure 5.19 Time histries of green water load (mean green water pressure) on fore deck
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

Figure 5.20 Time histries of green water load (mean green water pressure) on No.1 deck
($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

Figure 5.21 Relation between green water load (mean green water pressure) and relative water height at stem (Bulk carrier, U=14kt)

Figure 5.22 Longitudinal distribution of green water load (mean green water pressure) ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

Table 2.1 Principal Particulars of tanker

Table 2.2 Principal Particulars of cargo ship

Table 2.3 Location of pressure gauge (distance from F.P.)

Table 5.1 Principal Particulars of bulk carrier

Table 2.1: Principal Particulars of tanker

	Ship	Model
L_{pp}(m)	72.0	4.0
Breadth(m)	11.5	0.638
Depth(m)	5.3	0.292
draft(m)	4.7	0.263
Displacement(ton)	2720	0.466
Block coefficient C_B	0.68	0.68
Bow top height(m)	2.45	0.136
GM(m)	1.4	0.076
Longitudinal gyration (κ_{yy} / L_{pp})	–	0.250

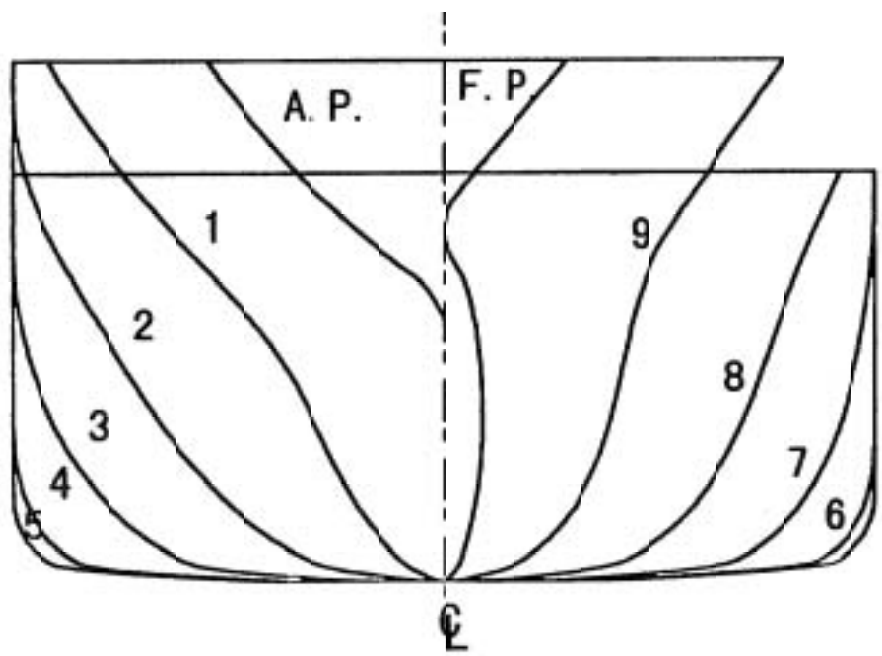

Figure 2.1: Body plan (Tanker)

Table 2.2: Principal Particulars of cargo ship

	Ship	Model (Type1 and 3)	Model (Type2)
L_{pp}(m)	78.5	4.1	4.1
Breadth(m)	12.8	0.669	0.669
Depth(m)	7.8	0.407	0.278
draft(m)	4.52	0.236	0.236
Displacement(ton)	3136	0.447	0.447
Block coefficient C_B	0.671	0.671	0.671
Bow top height(m)	3.78	0.198	0.168
GM(m)	1.97	0.086	0.096
Longitudinal gyration (κ_{yy} / L_{pp})	–	0.274	0.274

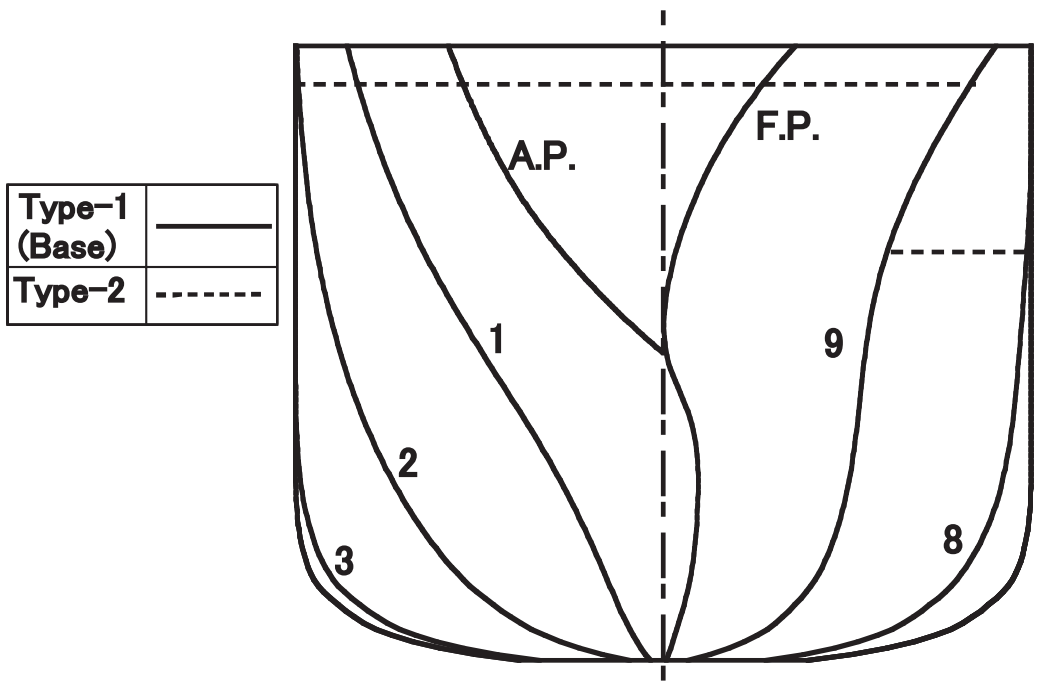

Figure 2.2: Body plan (Cargo ship, Type1 and Type2)

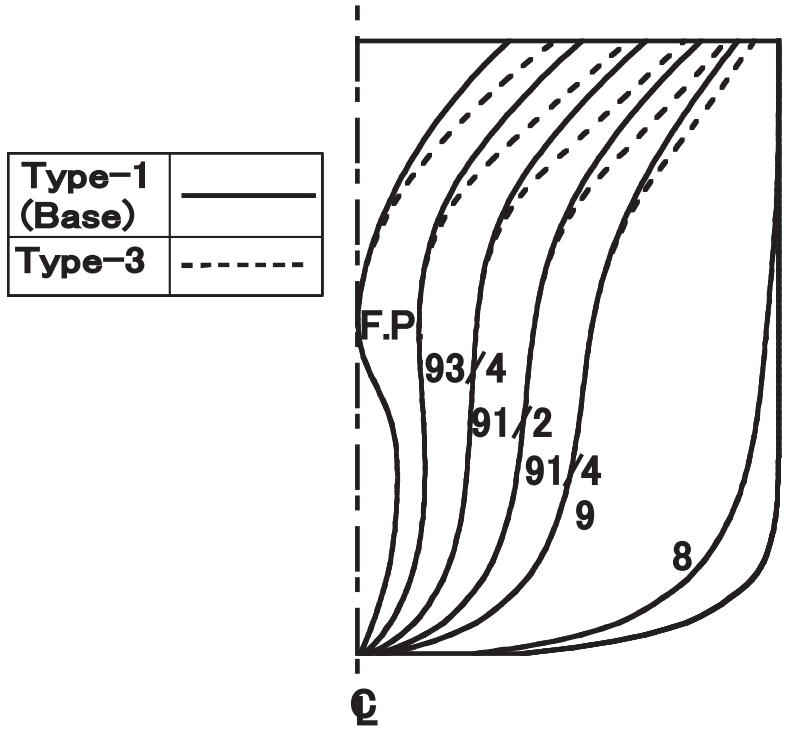

Figure 2.3: Body plan (Cargo ship, Type1 and Type3)

Table 2.3: Location of pressure gauge (distance from F.P.)

Tanker	Cargo ship
P_A: 120 mm fore	P_1: 50 mm fore
P_B: 70 mm fore	P_2: 50 mm aft
P_C: 50 mm aft	P_3: 410 mm aft
P_D: 120 mm aft	

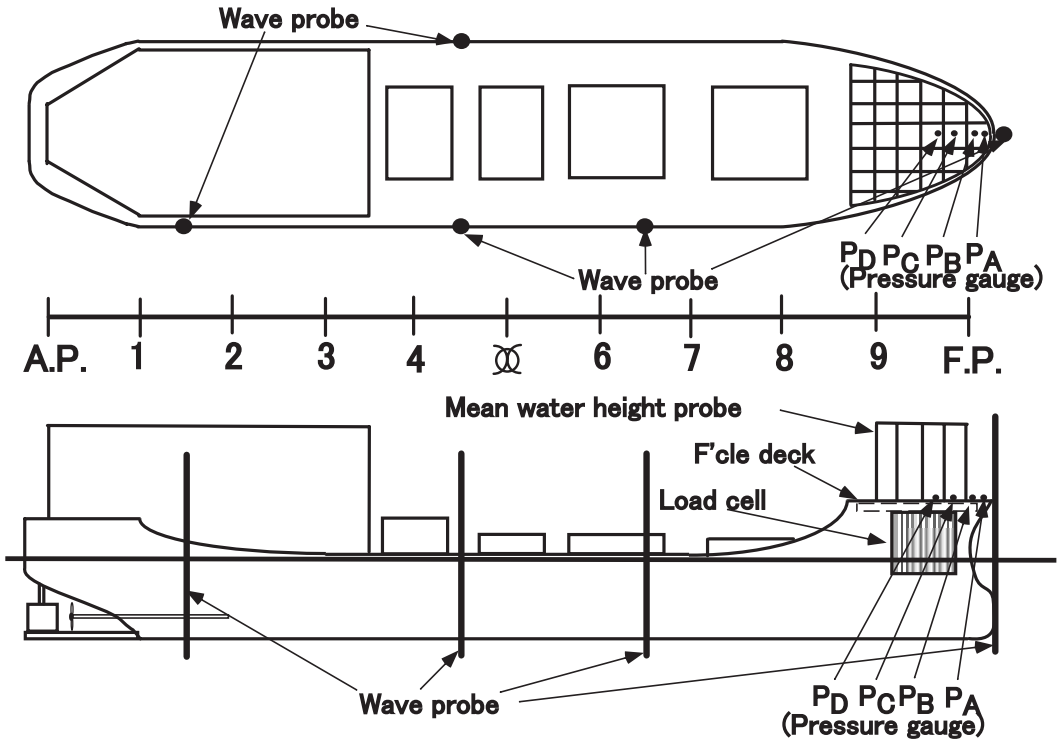

Figure 2.4: Setup of measuring instruments (Tanker)

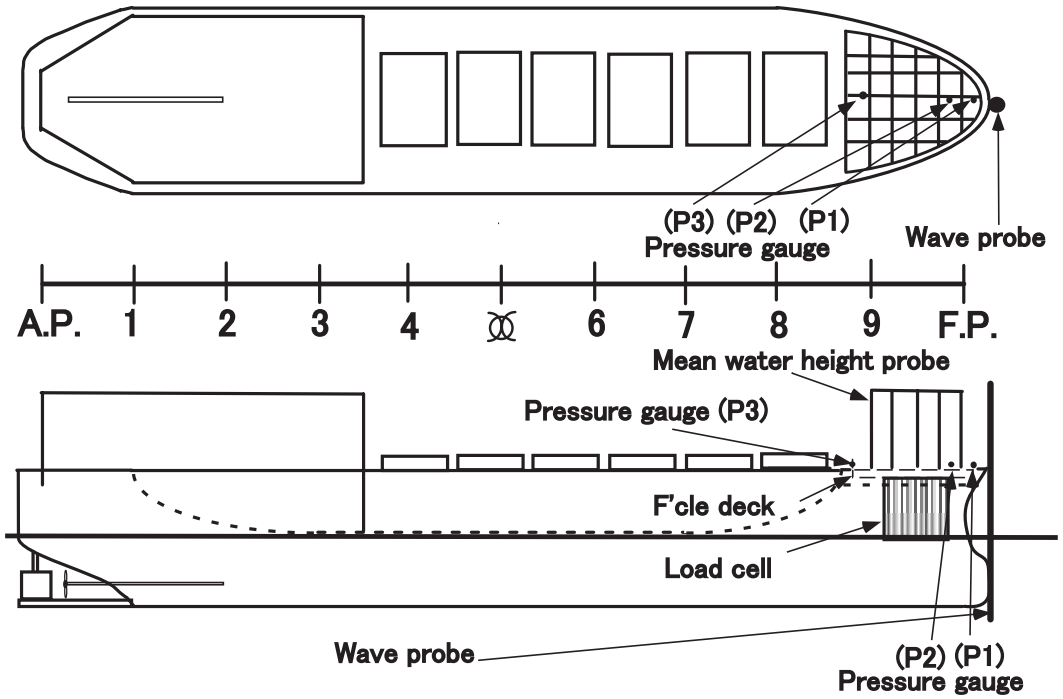

Figure 2.5: Setup of measuring instruments (Cargo ship)

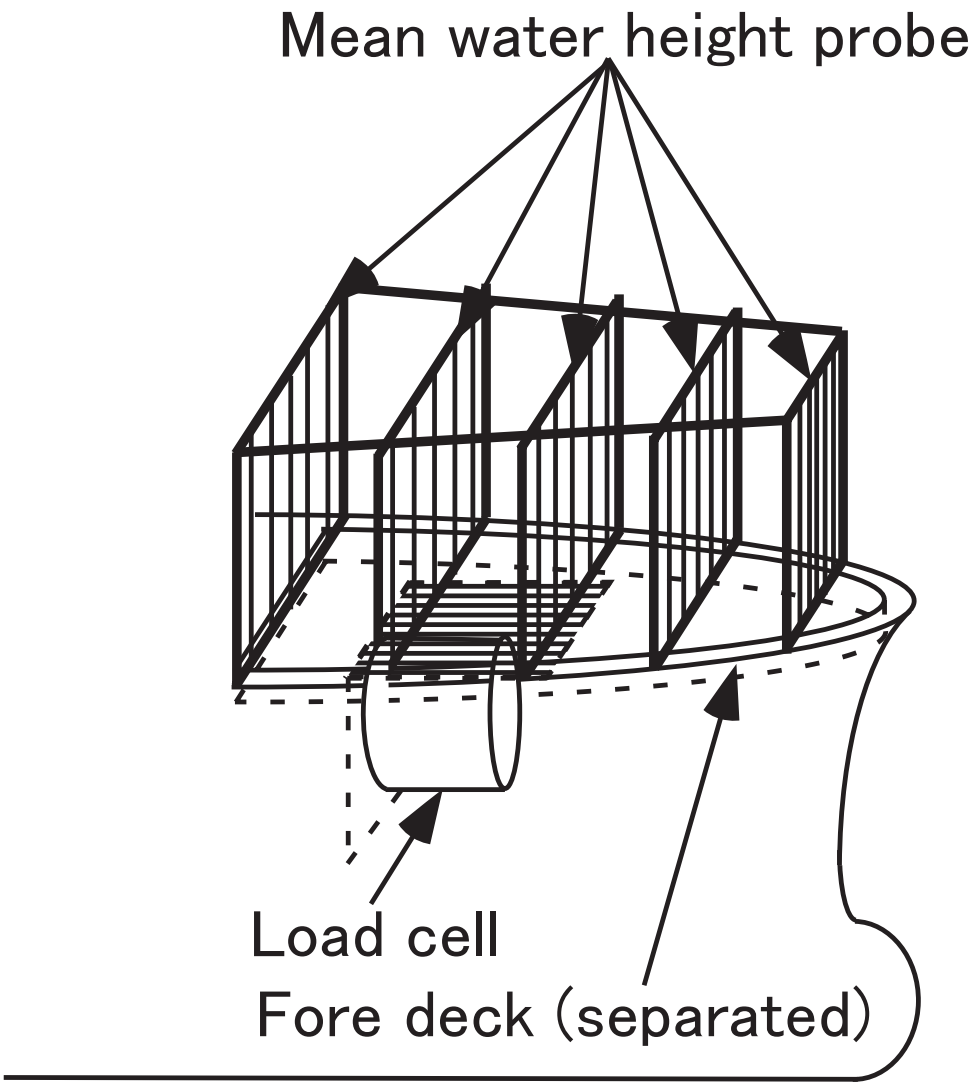

Figure 2.6: Setup of measuring instruments at fore deck

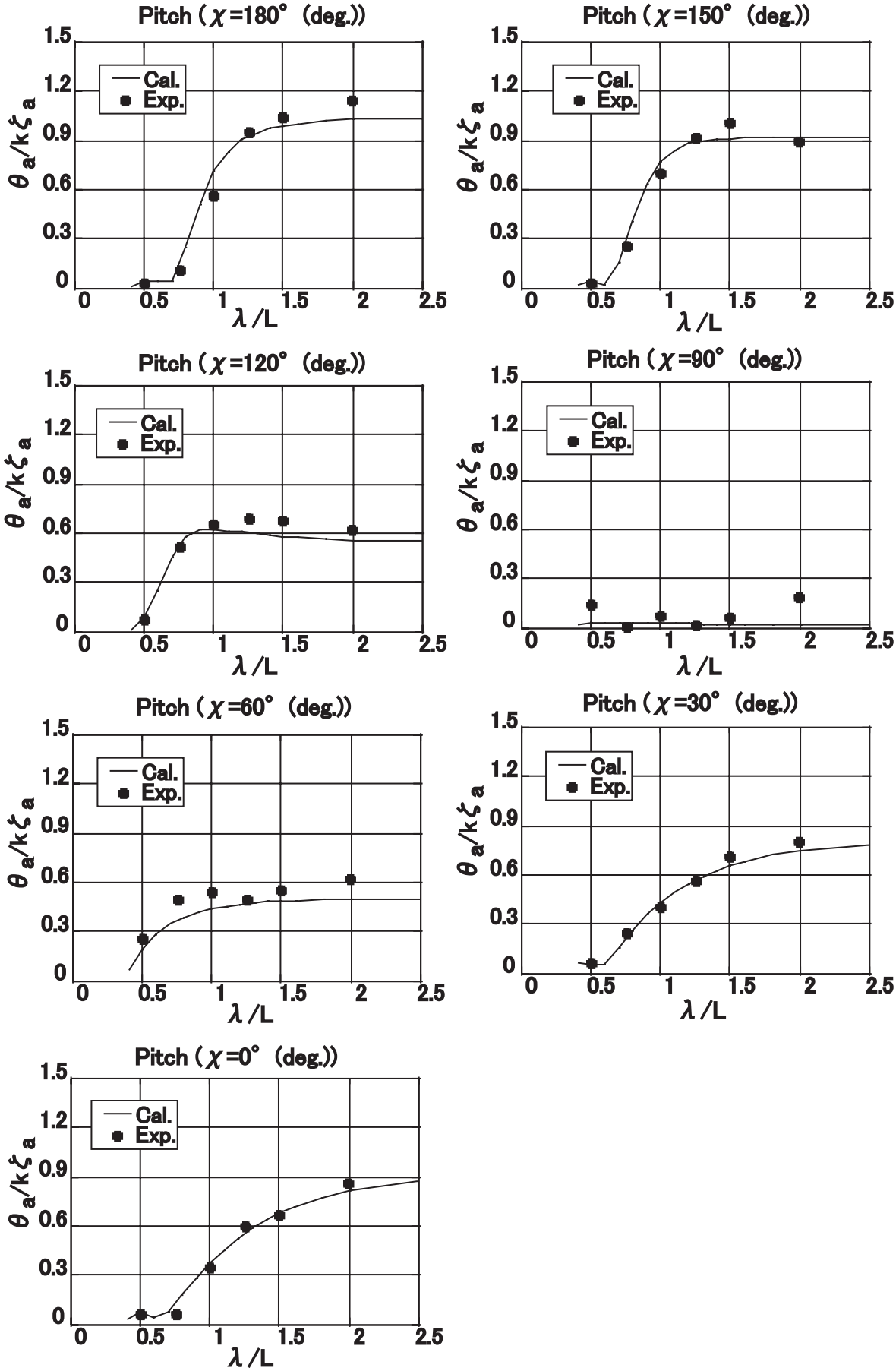

Figure 2.7: Pitch amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

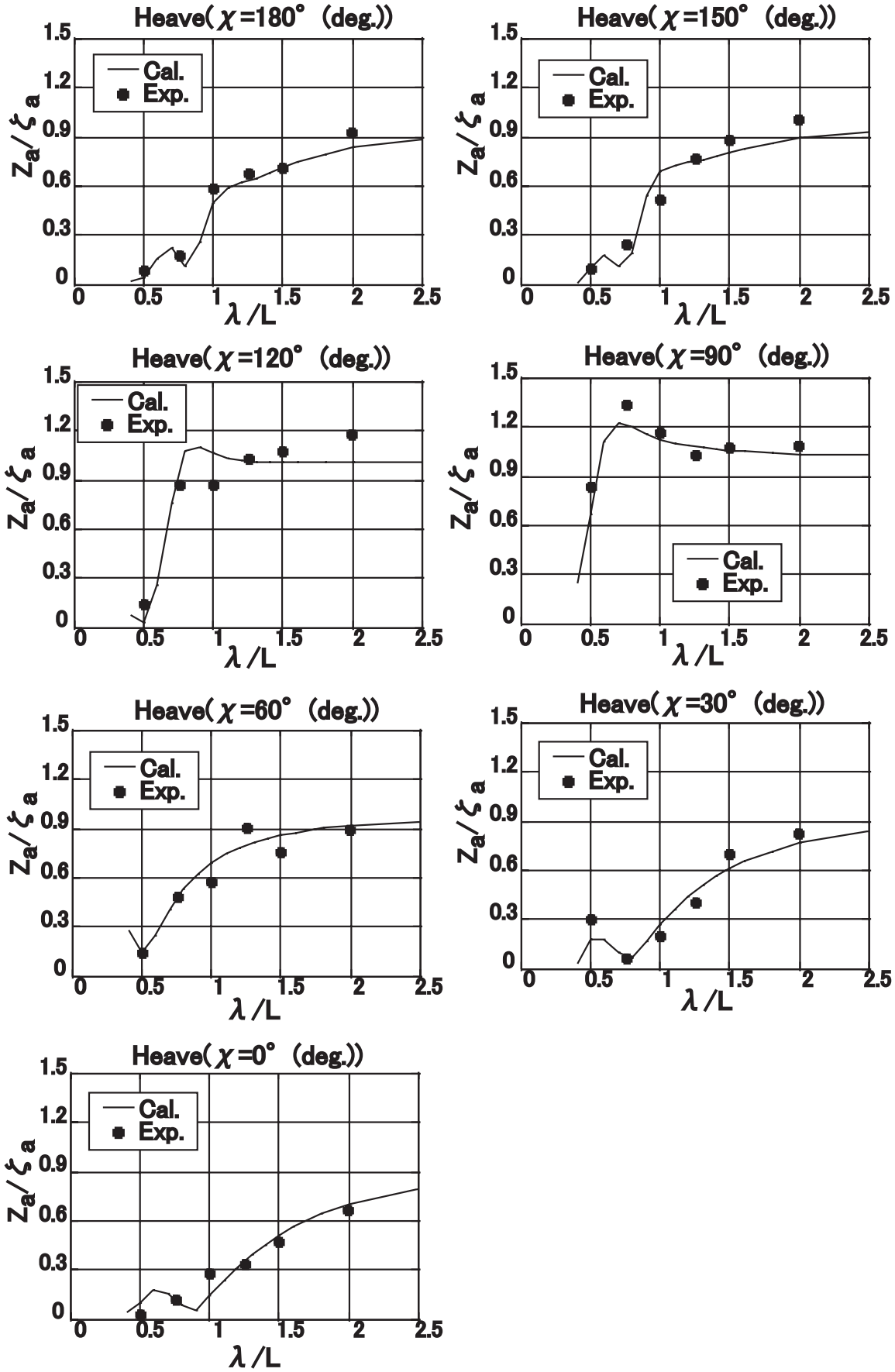

Figure 2.8: Heave amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

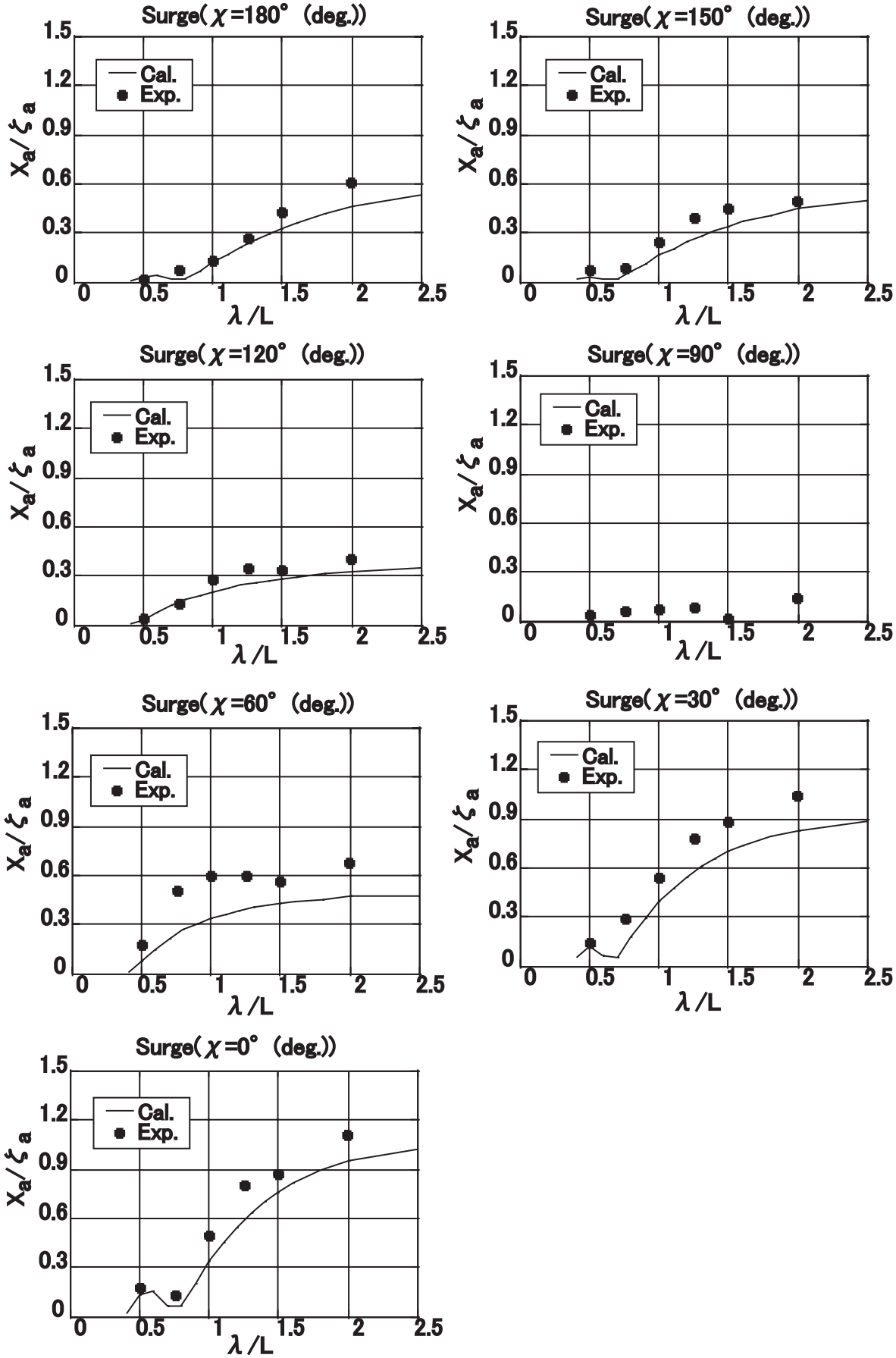

Figure 2.9: Surge amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

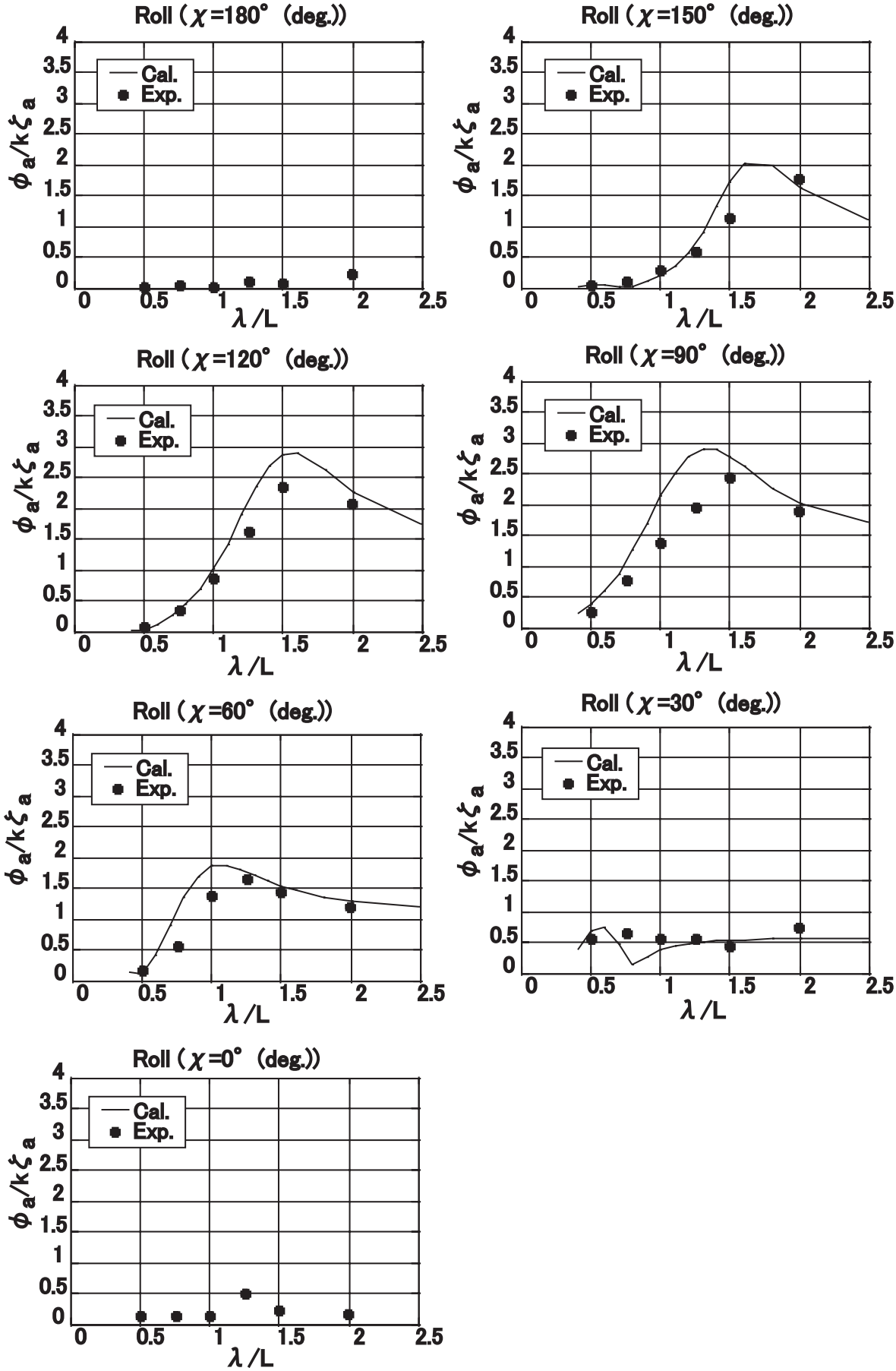

Figure 2.10: Roll amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

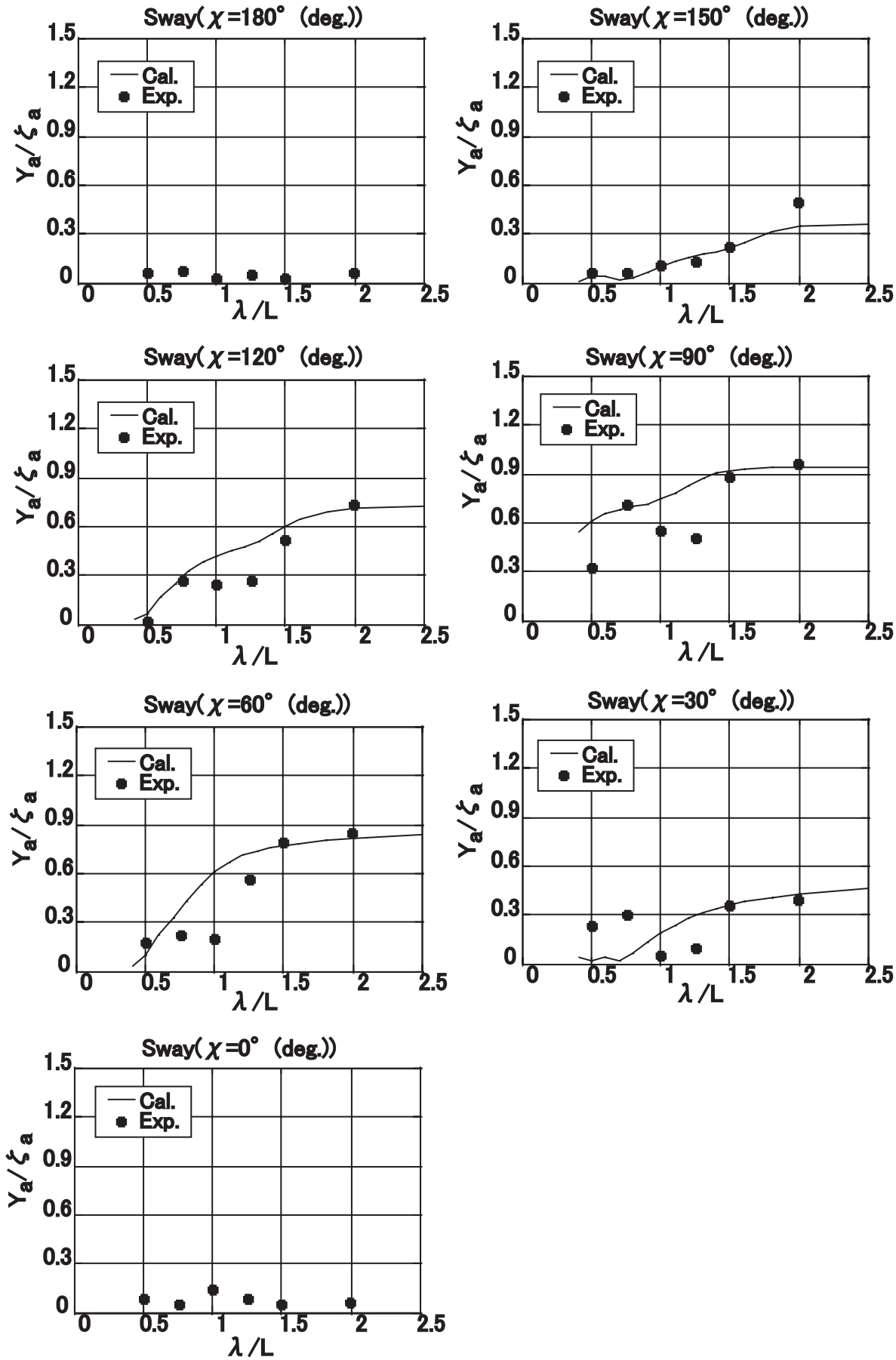

Figure 2.11: Sway amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

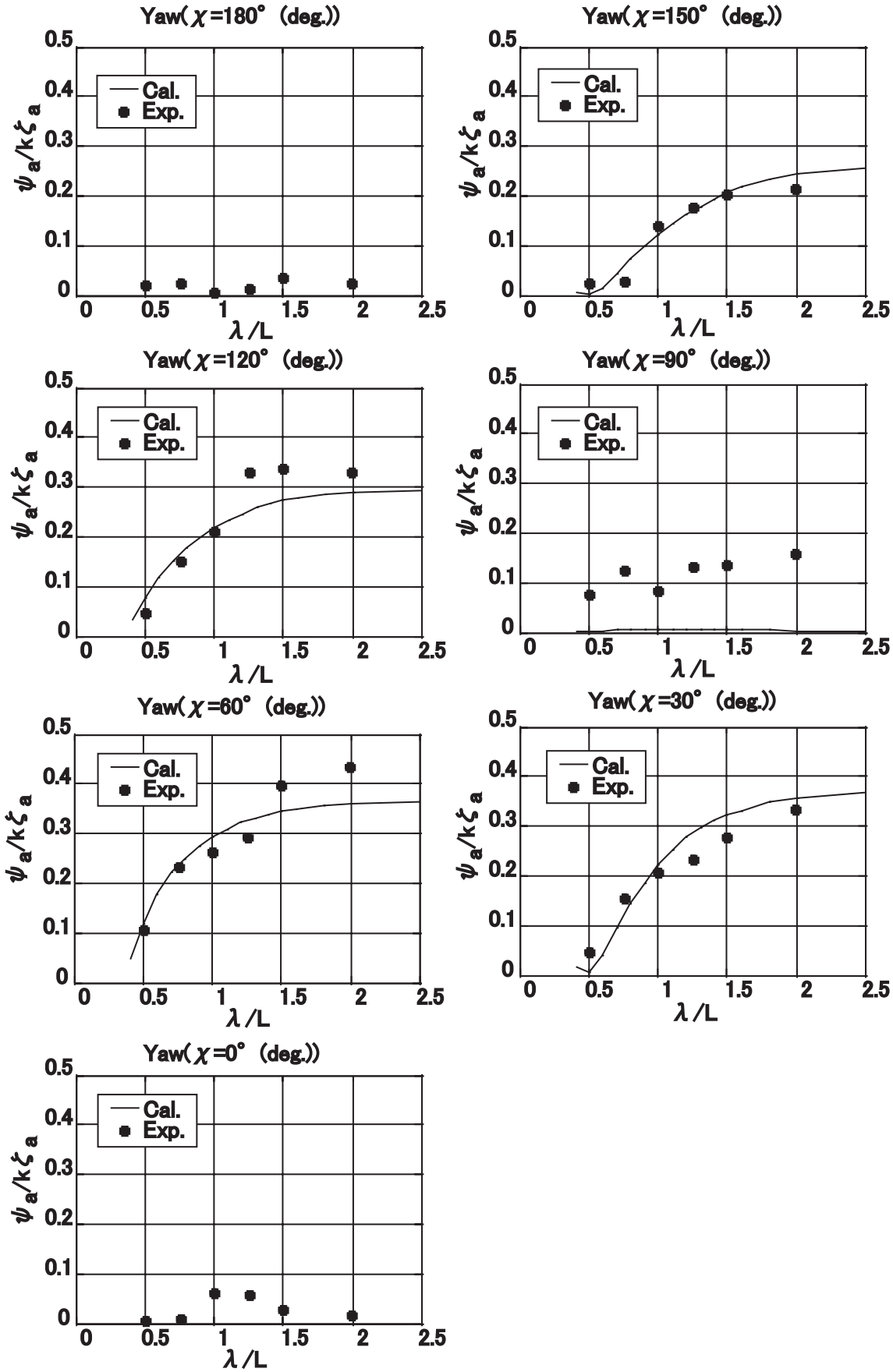

Figure 2.12: Yaw amplitude ratio (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

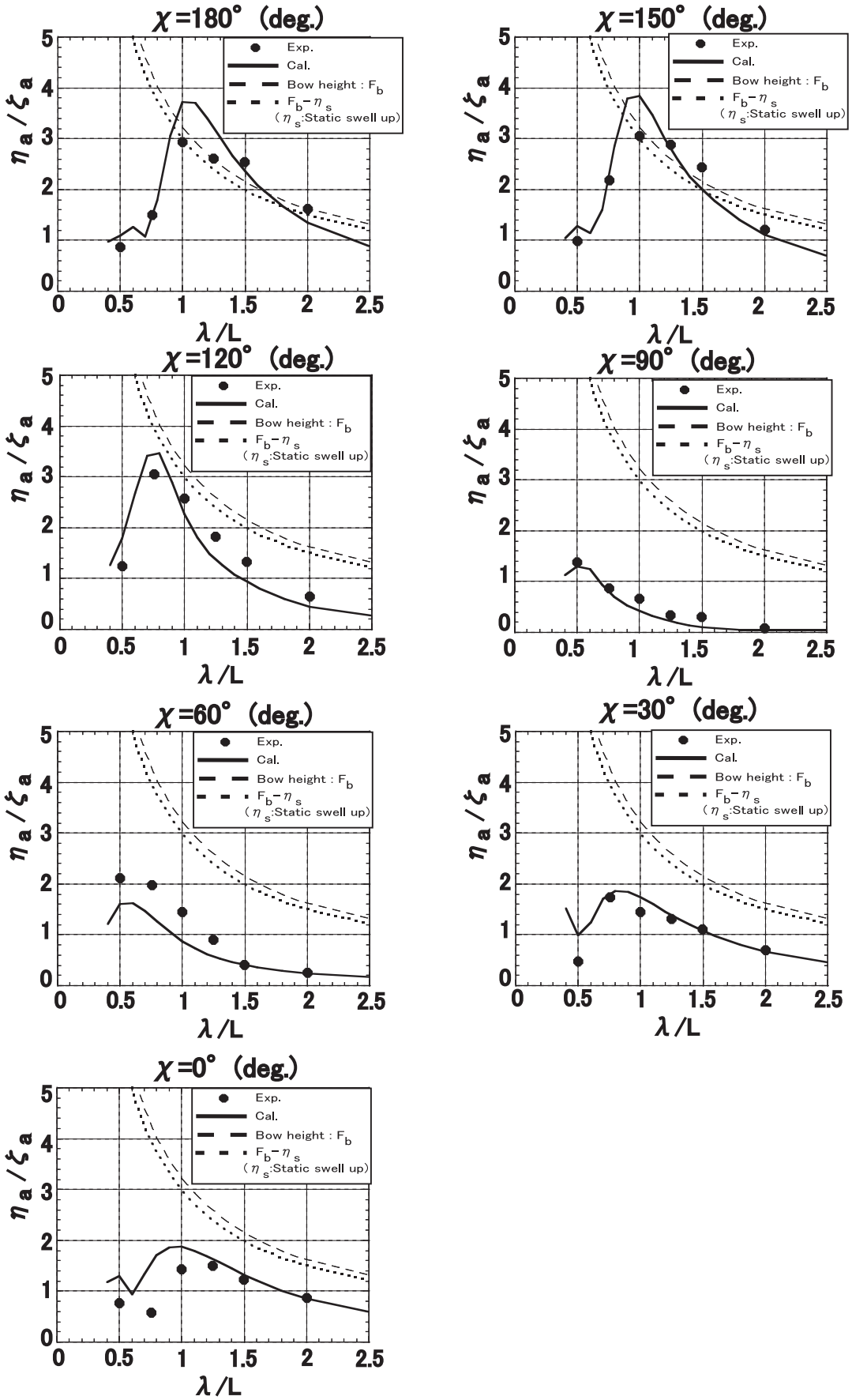

Figure 2.13: Amplitude ratio of relative water height at stem (Tanker, F_n=0.1, H/λ=1/30)

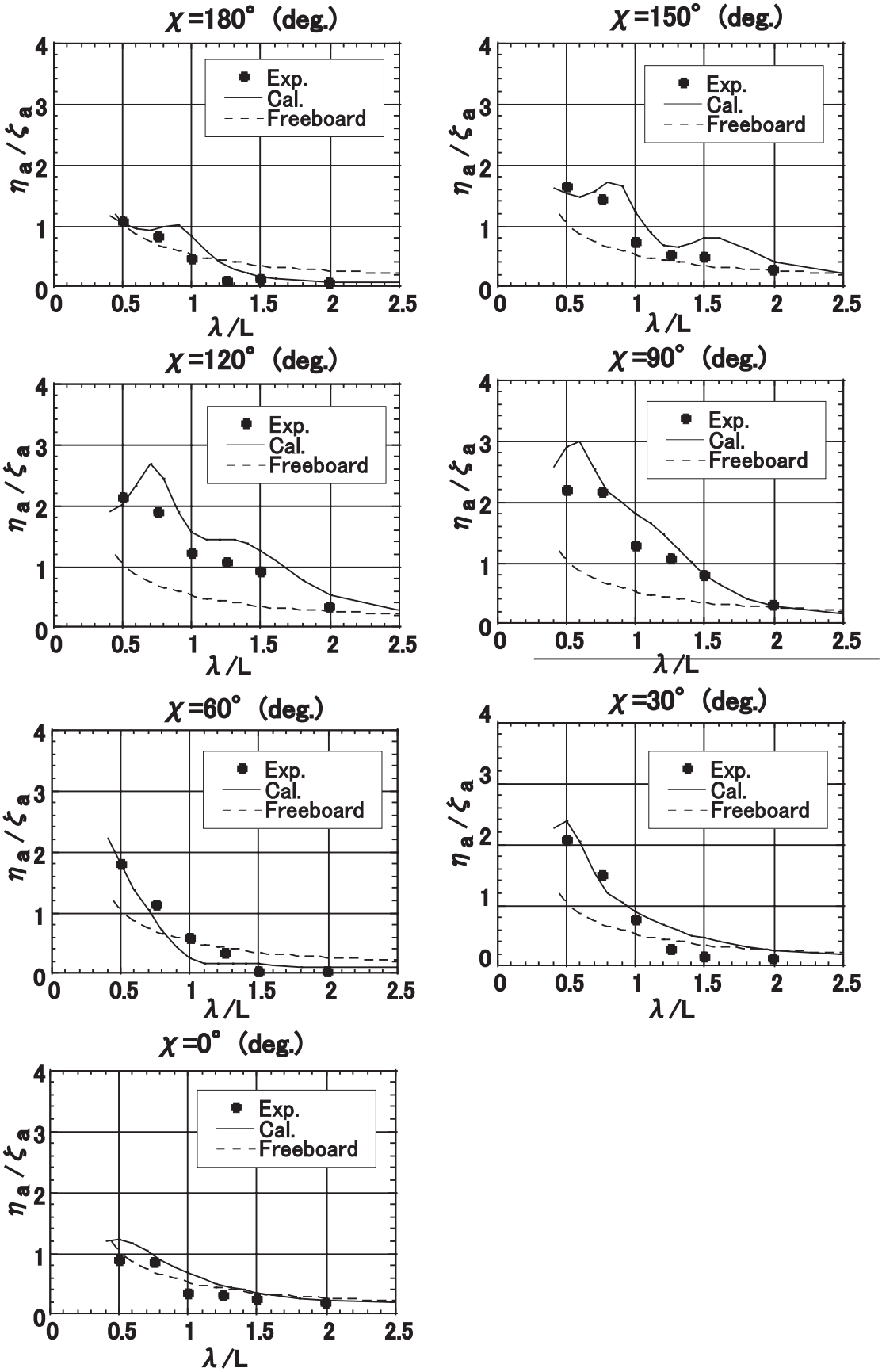

Figure 2.14: Amplitude ratio of relative water height at S.S. 6 1/2 (Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

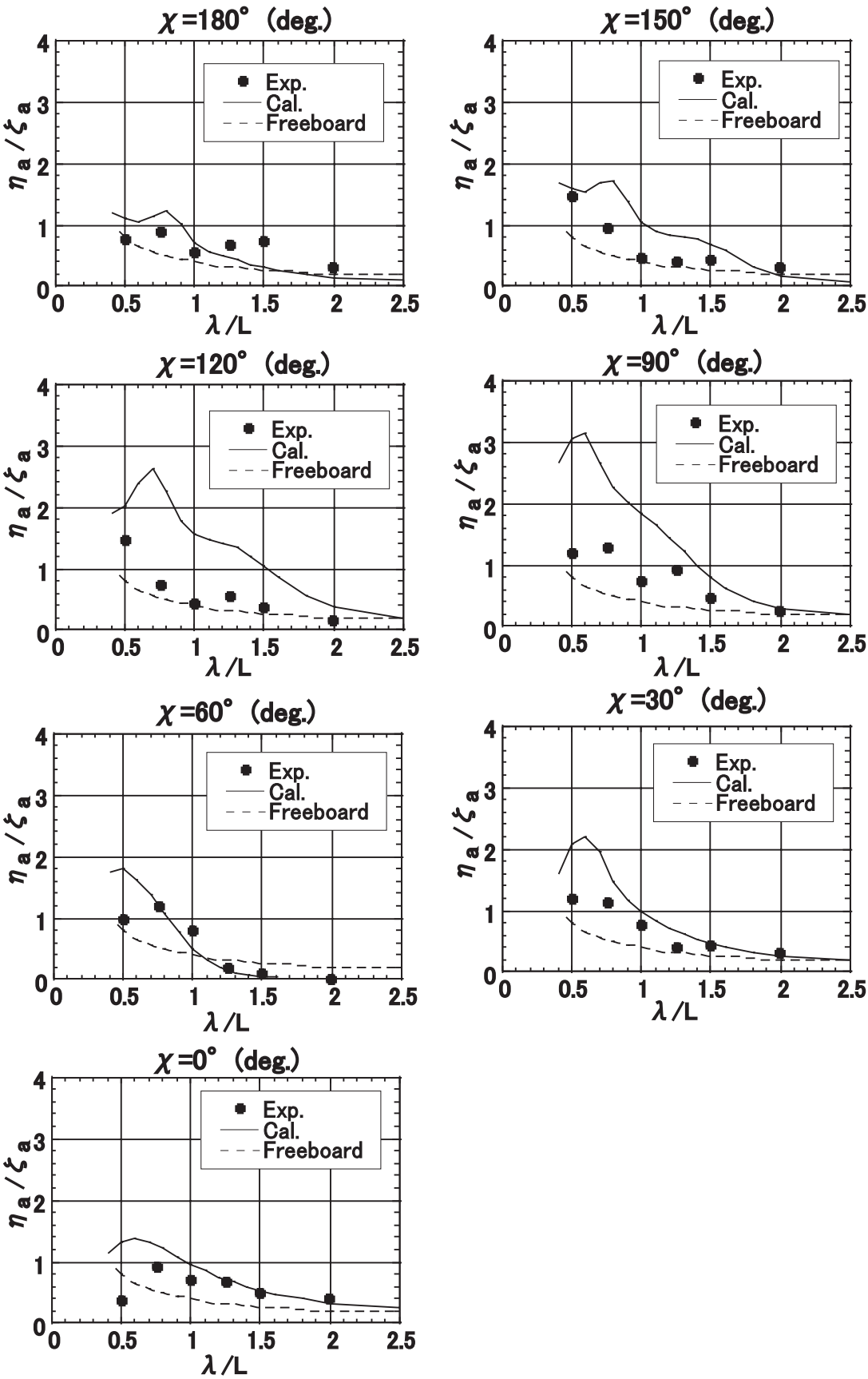

Figure 2.15: Amplitude ratio of relative water height at S.S. 4 1/2 (Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

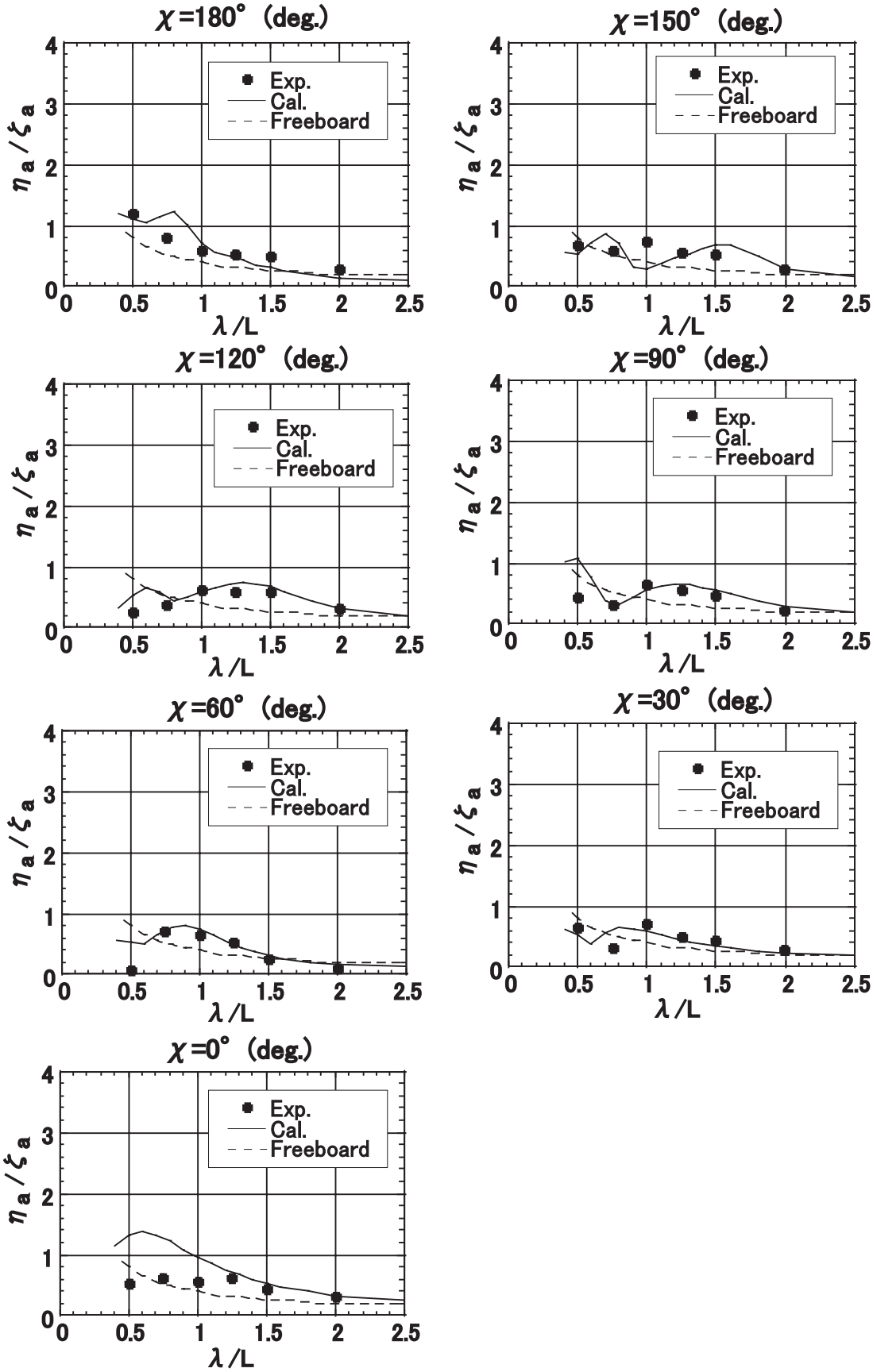

Figure 2.16: Amplitude ratio of relative water height at S.S. 4 1/2 (Tanker, Lee side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

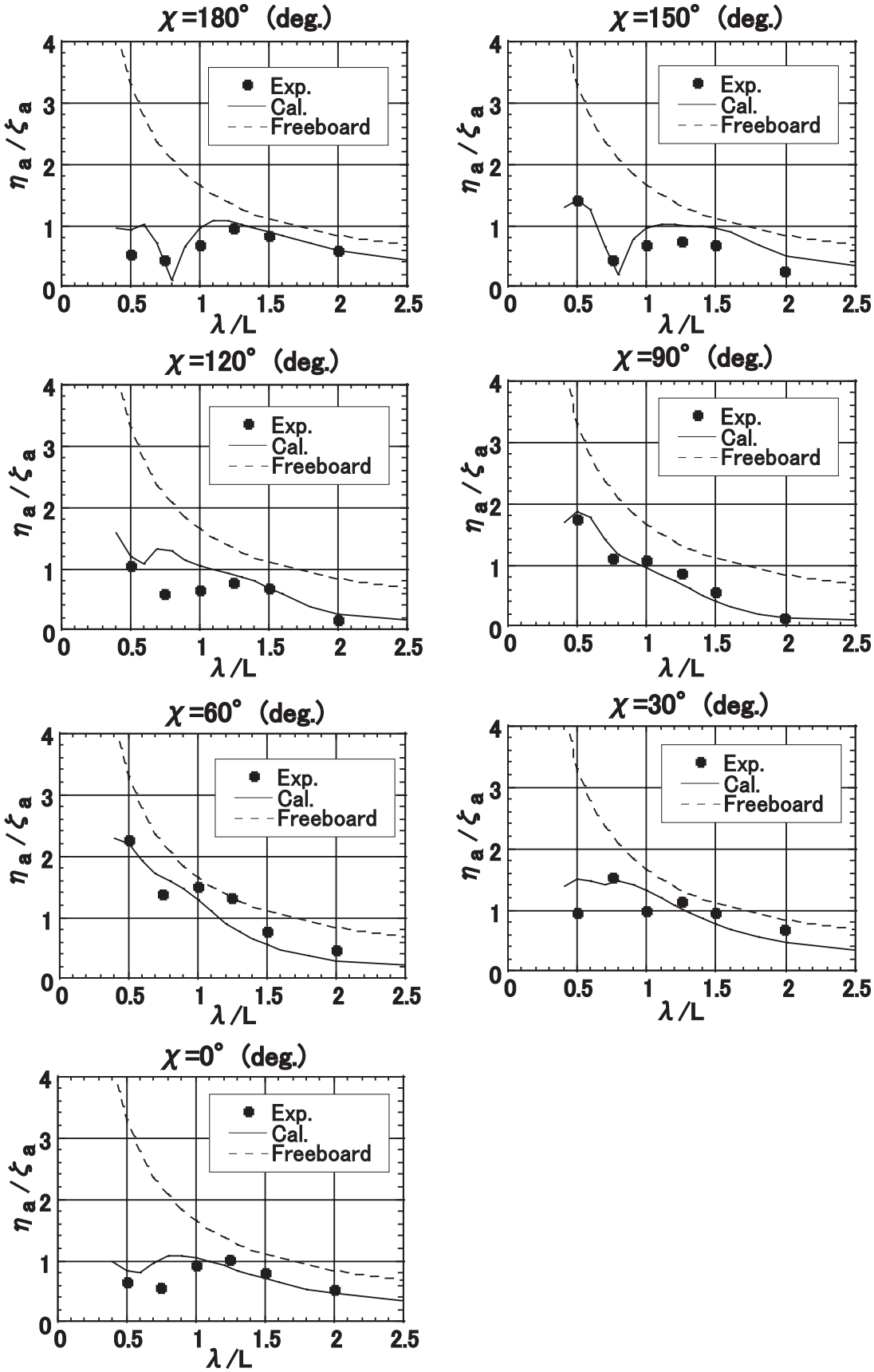

Figure 2.17: Amplitude ratio of relative water height at S.S. 1 1/2(Tanker, Weather side, F_n=0.1, H/λ=1/30)

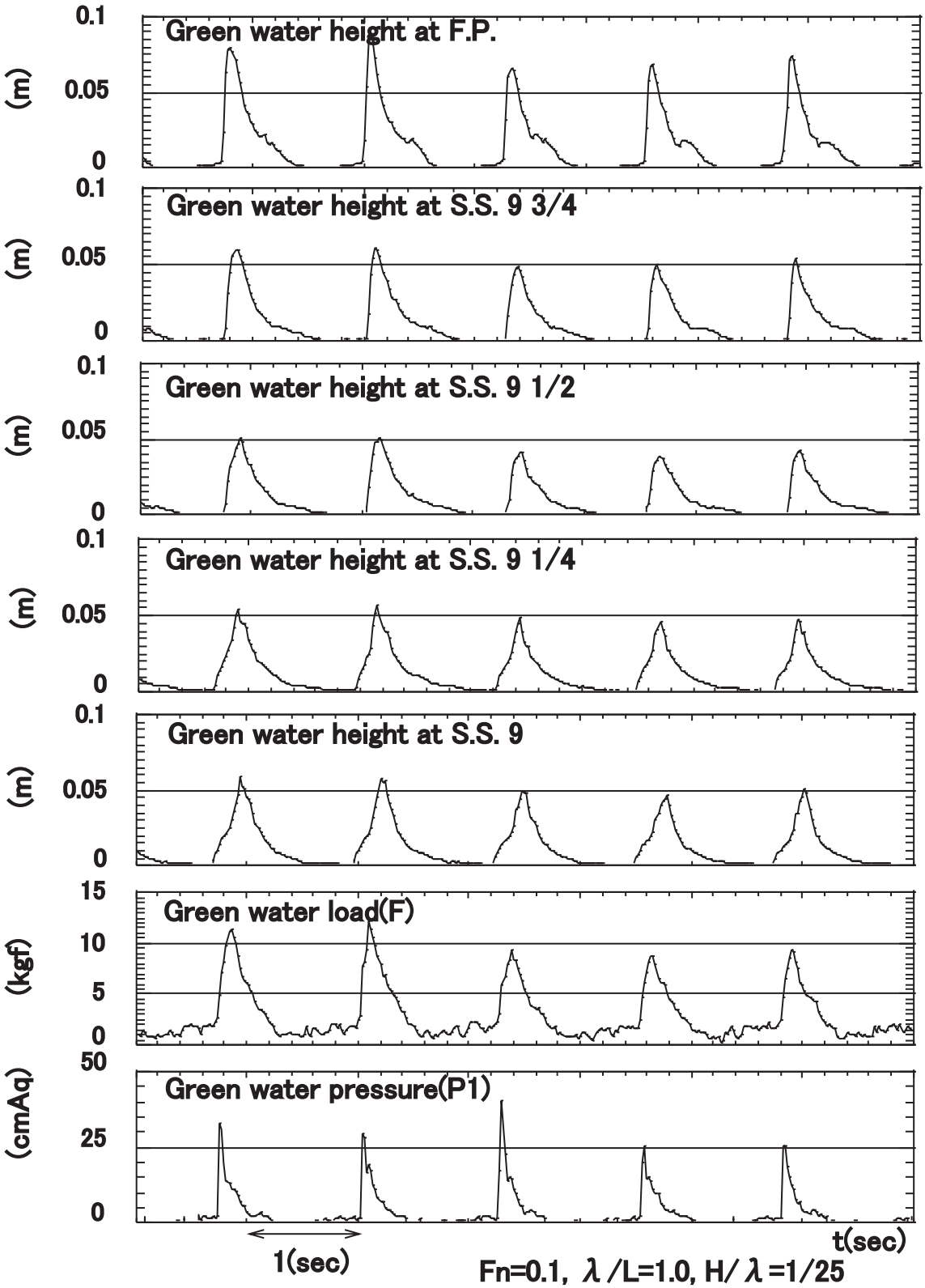

Figure 2.18: Time histories of green water height, load and pressure (Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda / L = 1.0$, $H/\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$)

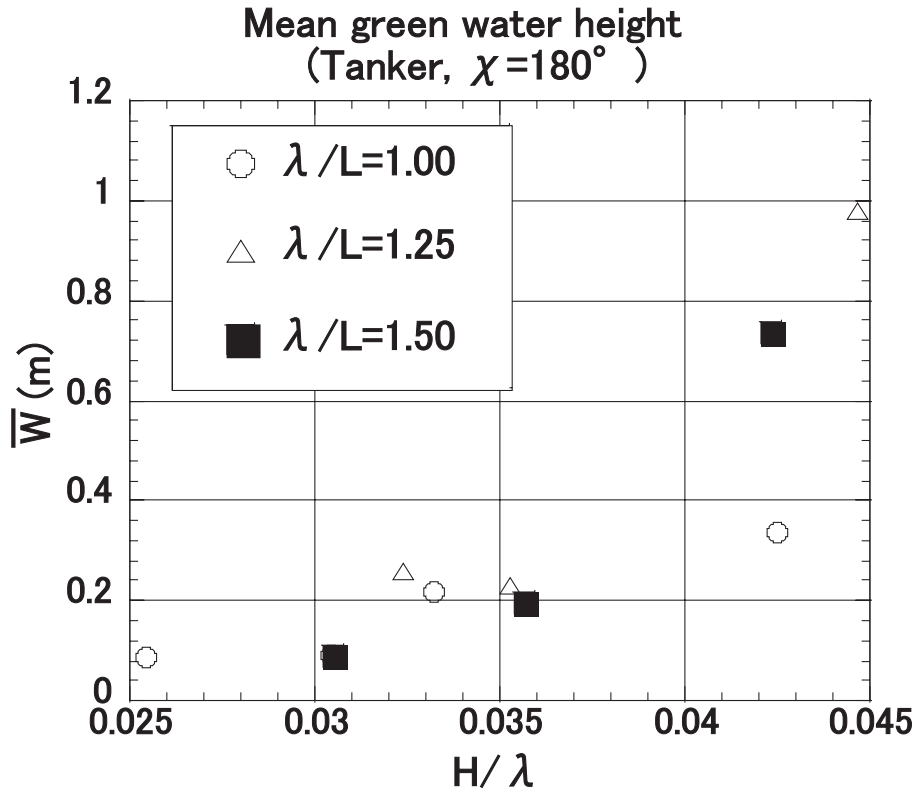

Figure 2.19: Effect of wave height on green water volume (mean green water height) (Tanker, F_n=0.1, χ = 180 °)

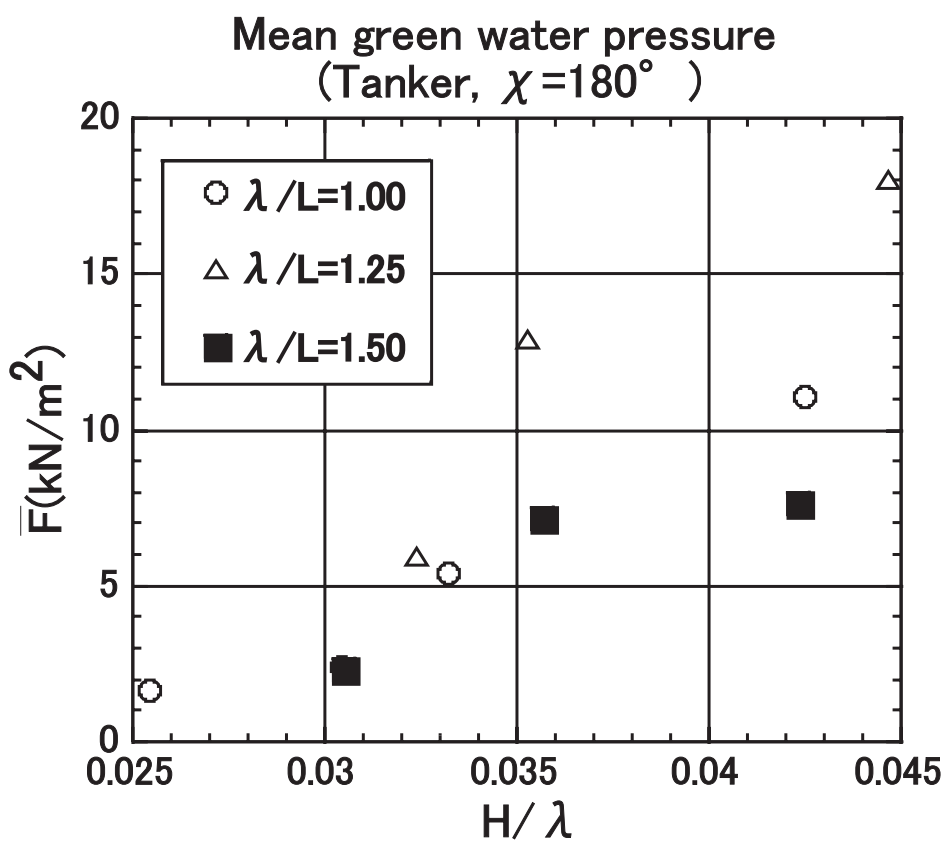

Figure 2.20: Effect of wave height on green water load (mean green water pressure) (Tanker, F_n=0.1, χ = 180 °)

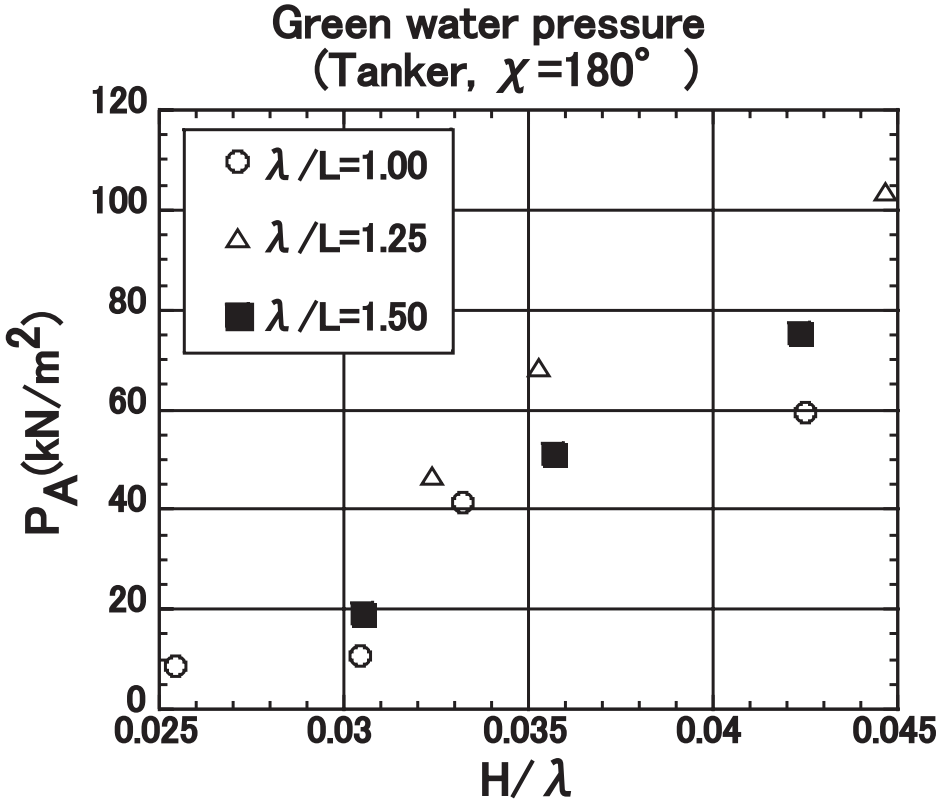

Figure 2.21: Effect of wave height on green water pressure (Tanker, 50mm fore from F.P., F_n=0.1, χ = 180 °)

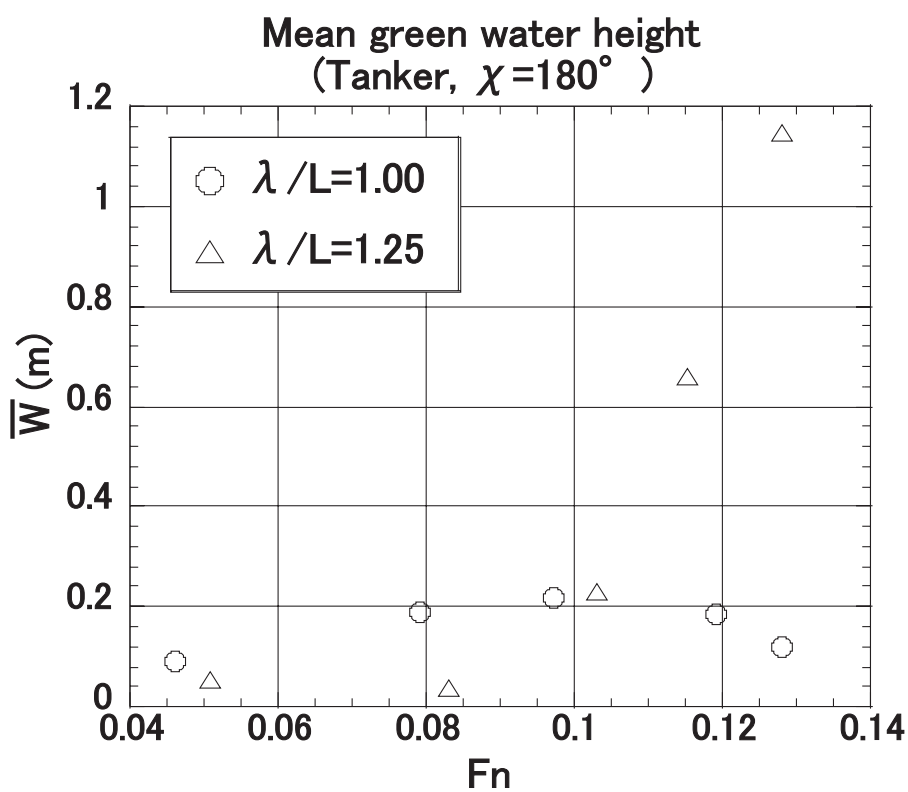

Figure 2.22: Effect of ship speed on green water volume (mean green water height) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

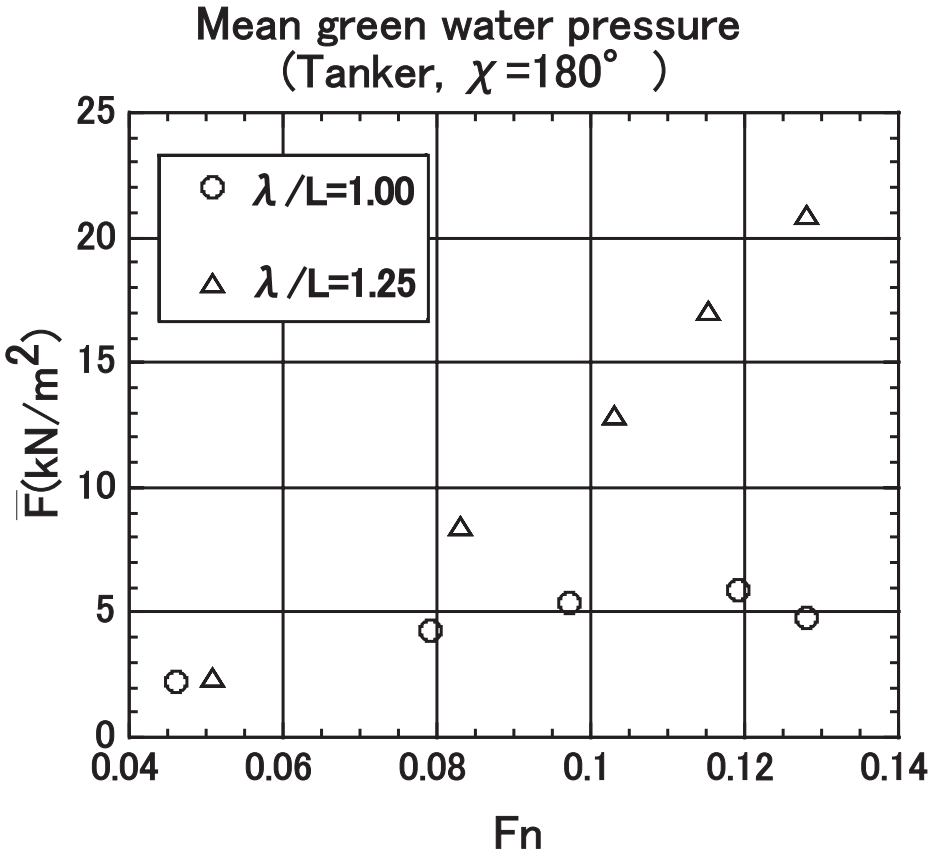

Figure 2.23: Effect of ship speed on green water load (mean green water pressure) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

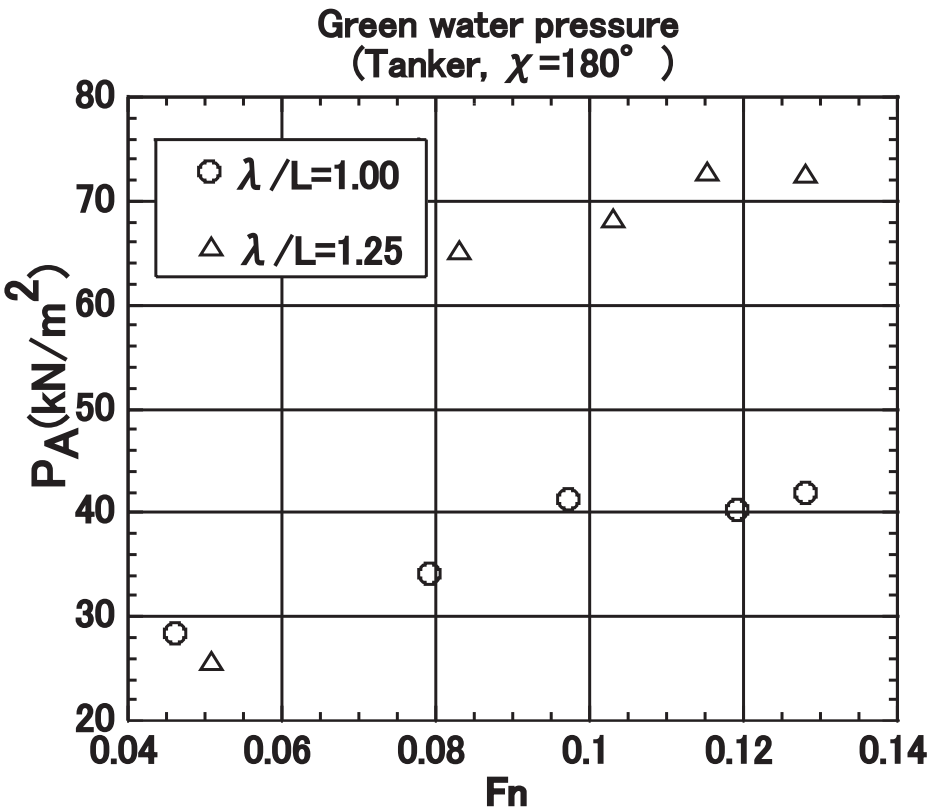

Figure 2.24: Effect of ship speed on green water pressure (Tanker, 50mm fore form F.P., H/λ=1/30, χ = 180 °)

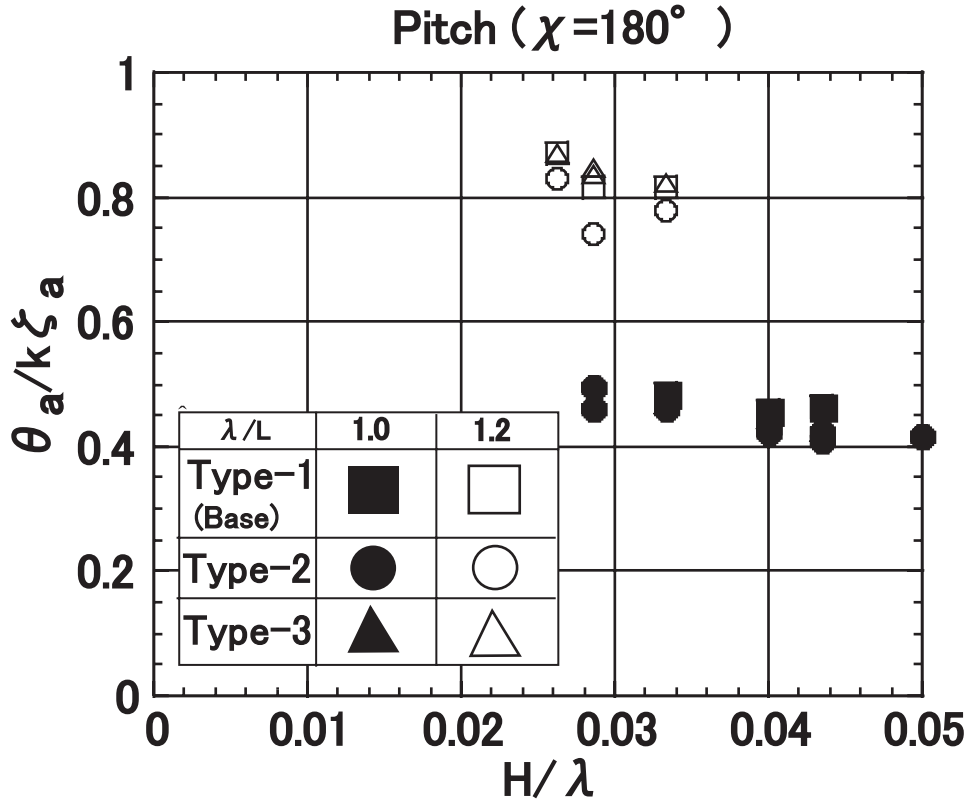

Figure 2.25: Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

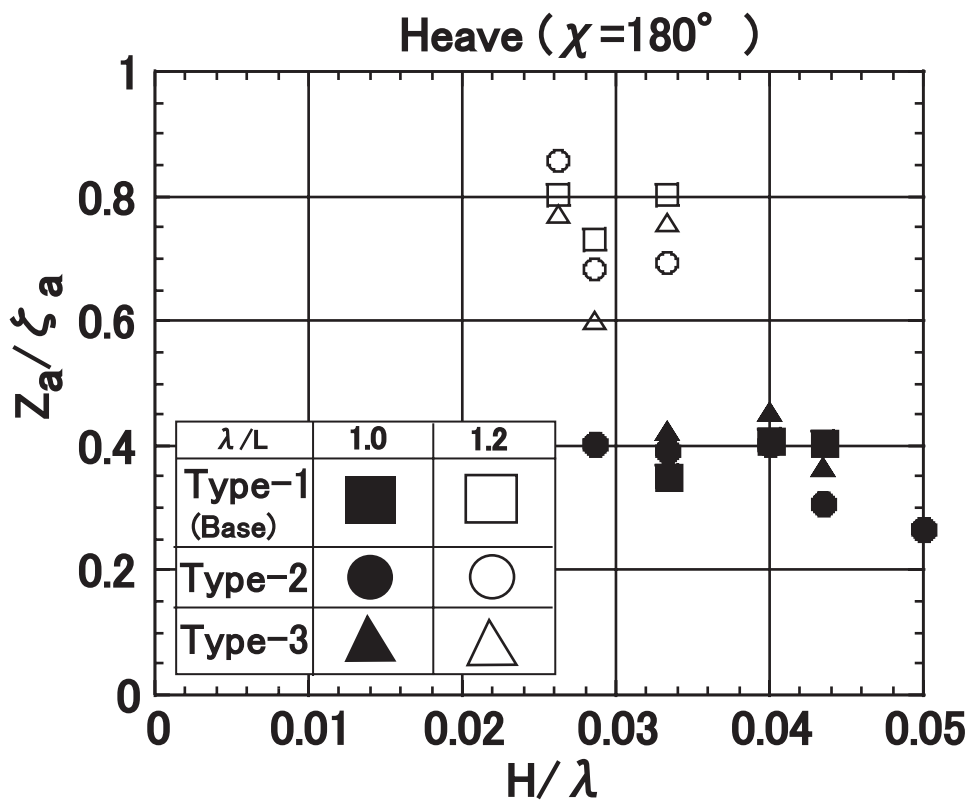

Figure 2.26: Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

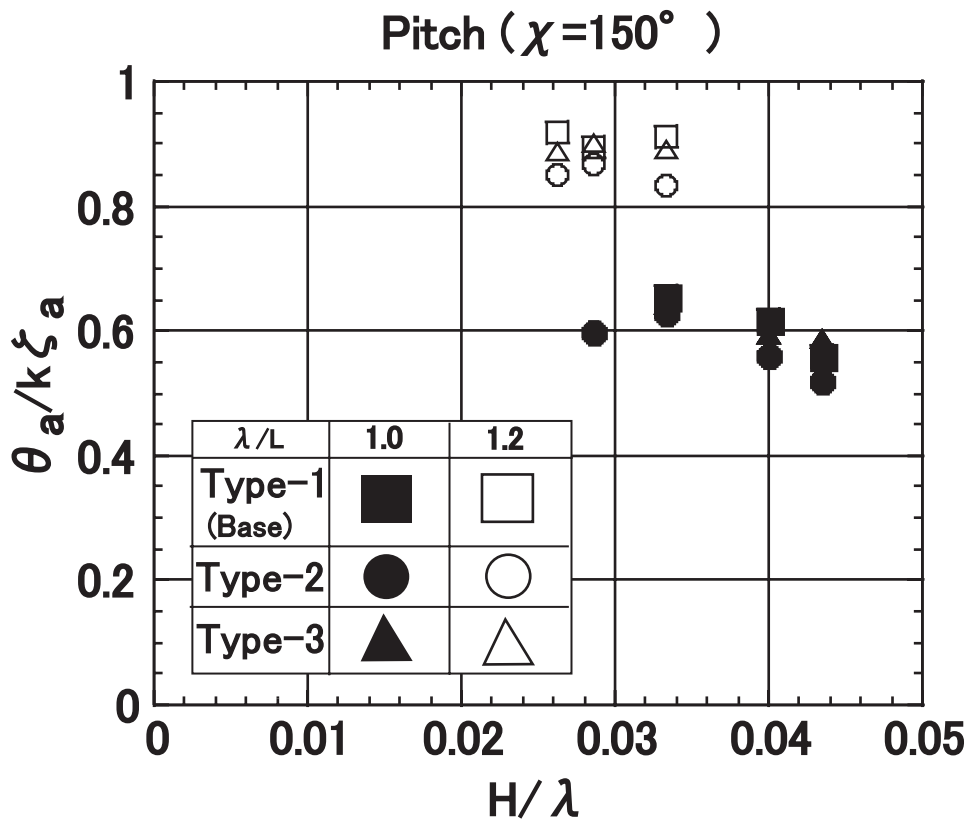

Figure 2.27: Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

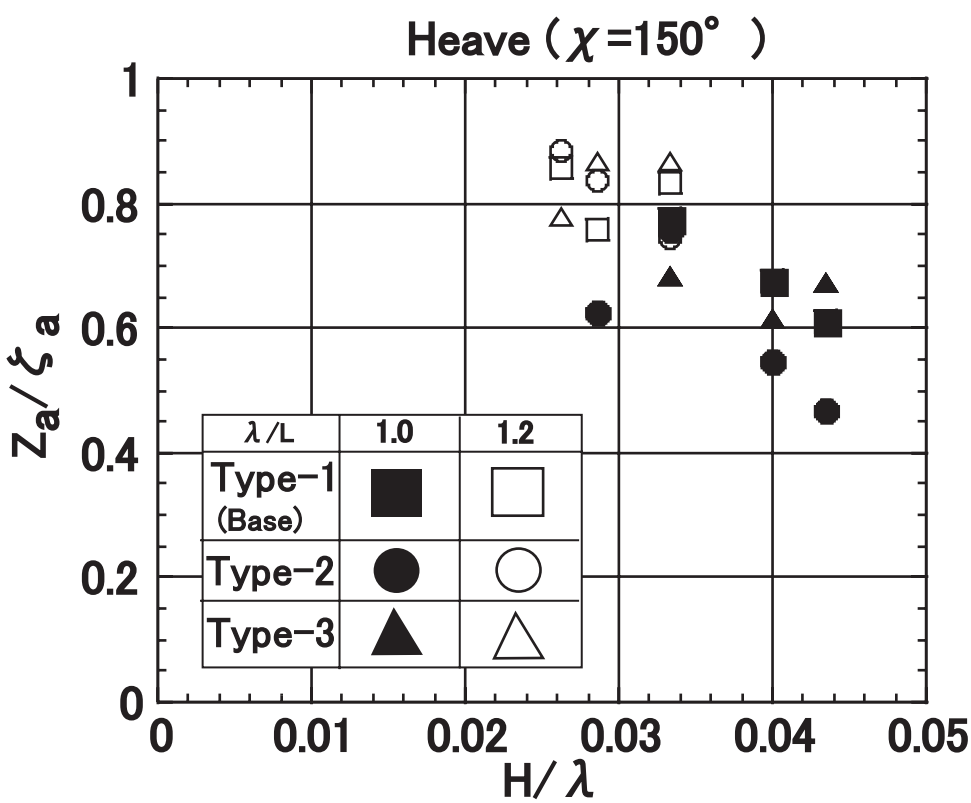

Figure 2.28: Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

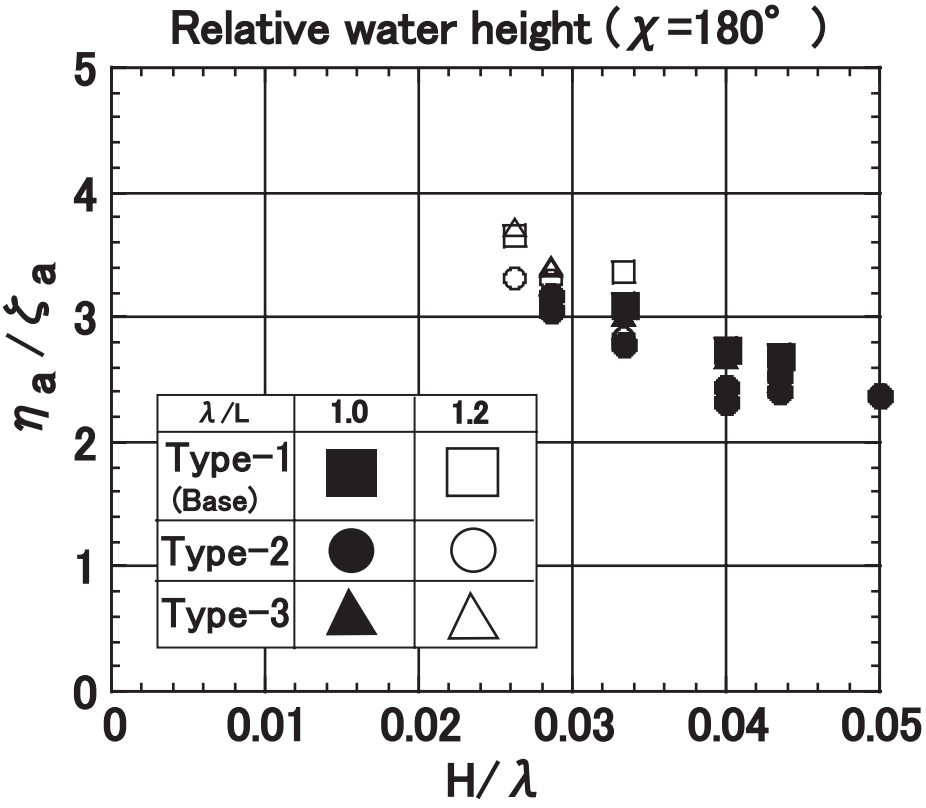

Figure 2.29: Effect of wave height on relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

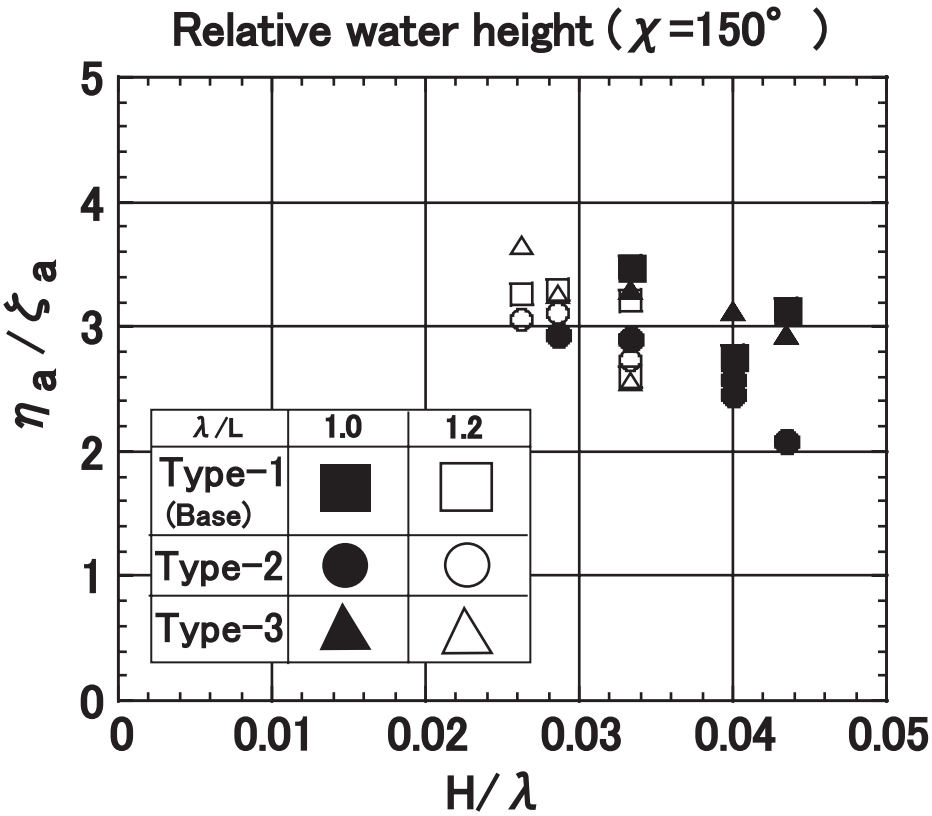

Figure 2.30: Effect of wave height on relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=150 °)

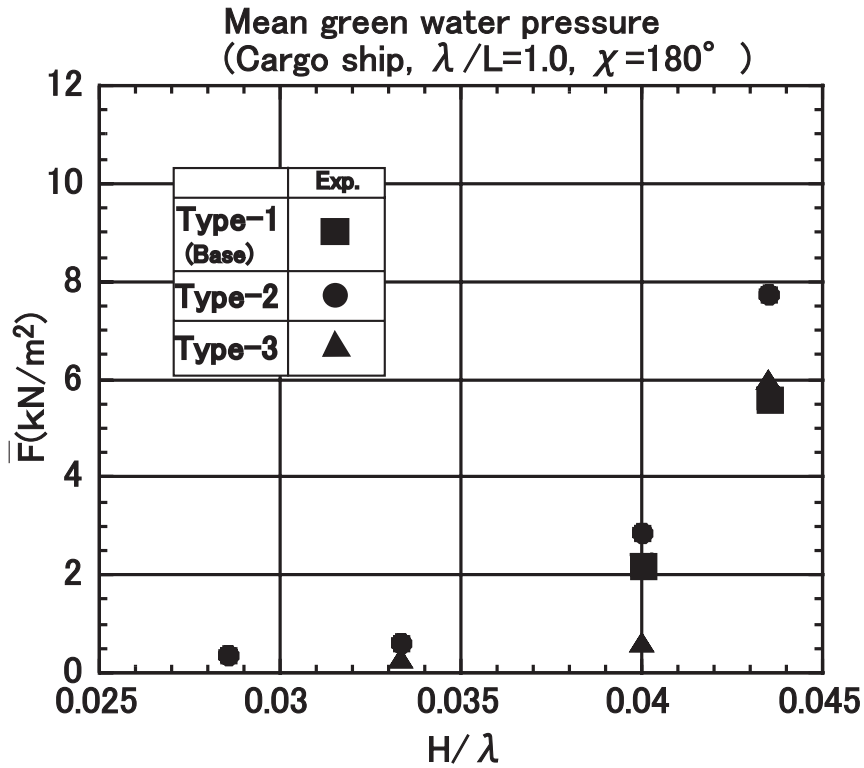

Figure 2.31: Effect of wave height on green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

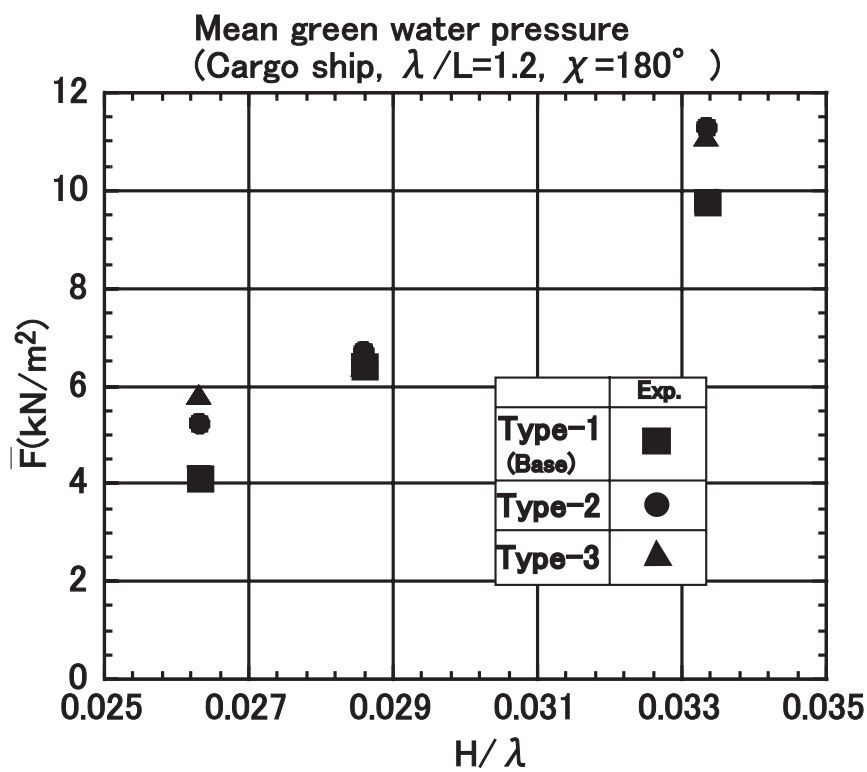

Figure 2.32: Effect of wave height on green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

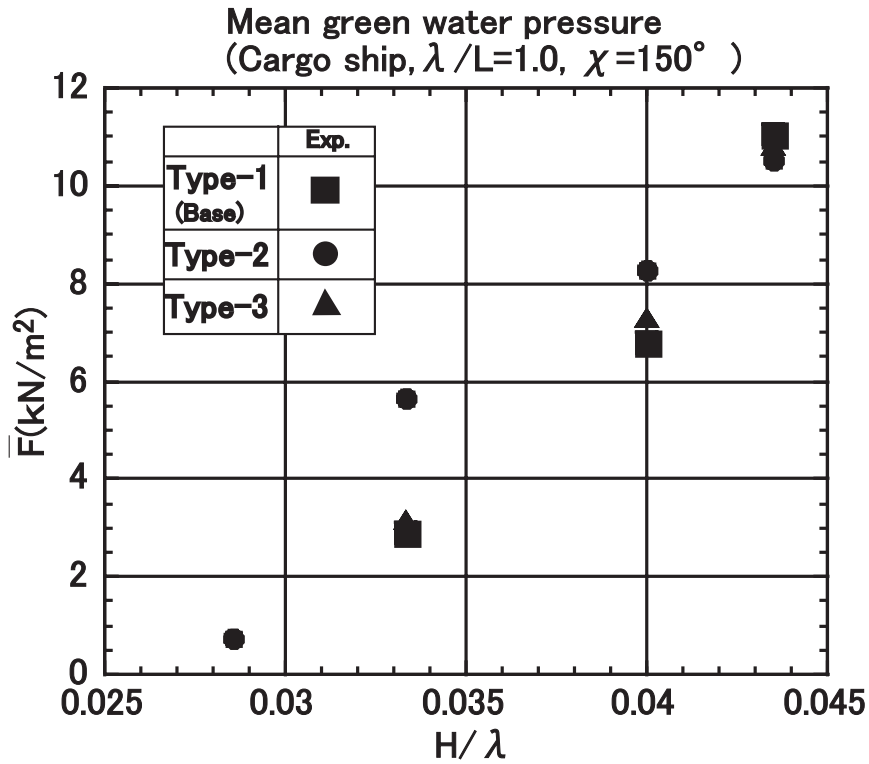

Figure 2.33: Effect of wave height on green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

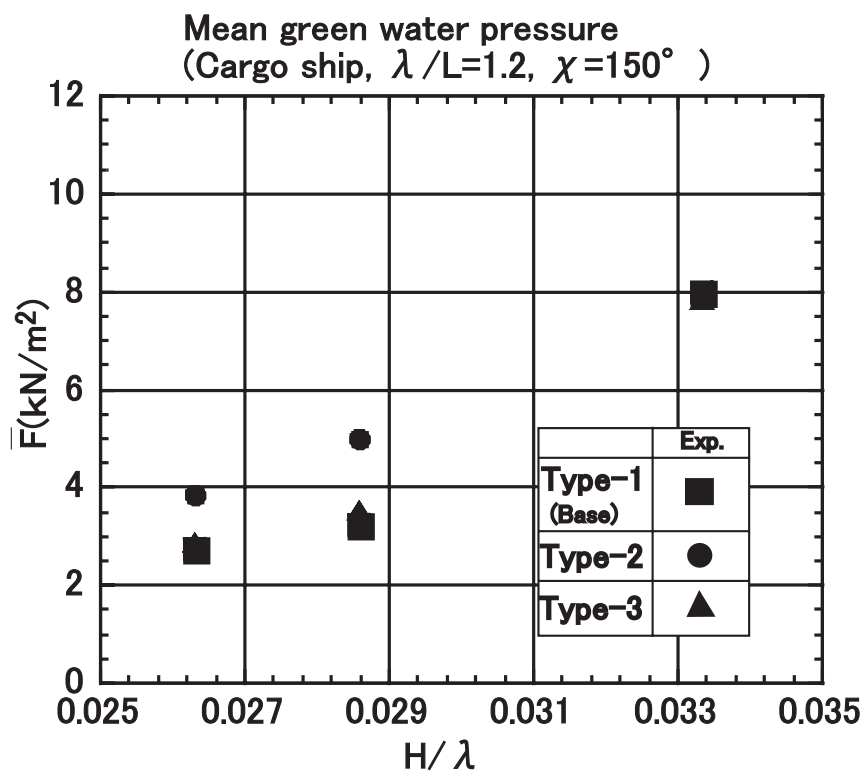

Figure 2.34: Effect of wave height on green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

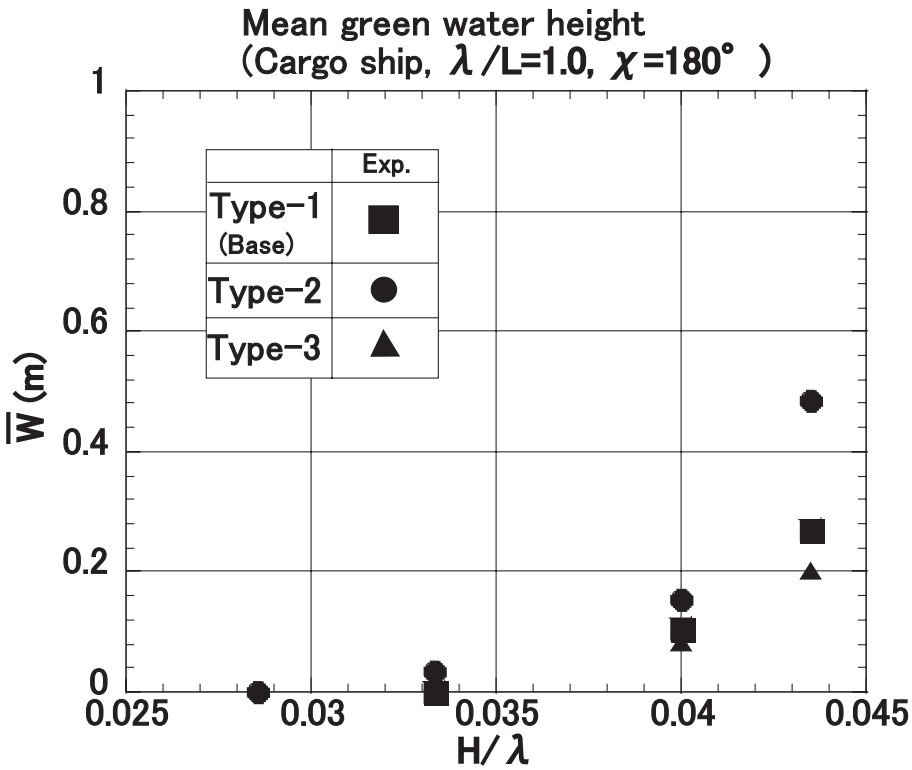

Figure 2.35: Effect of wave height on green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

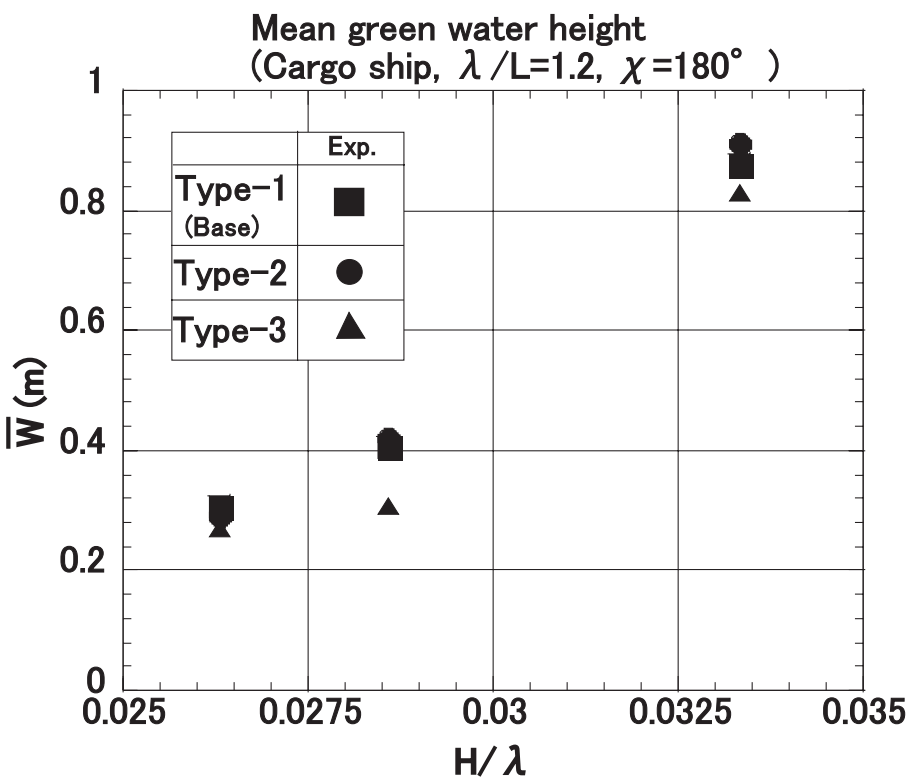

Figure 2.36: Effect of wave height on green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

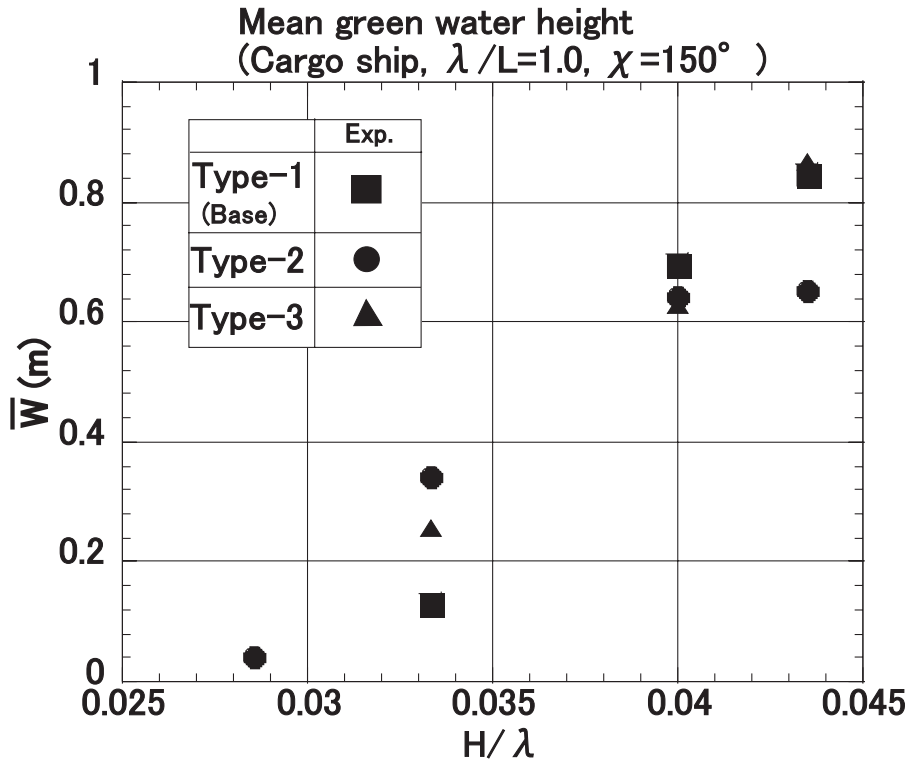

Figure 2.37: Effect of wave height on green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

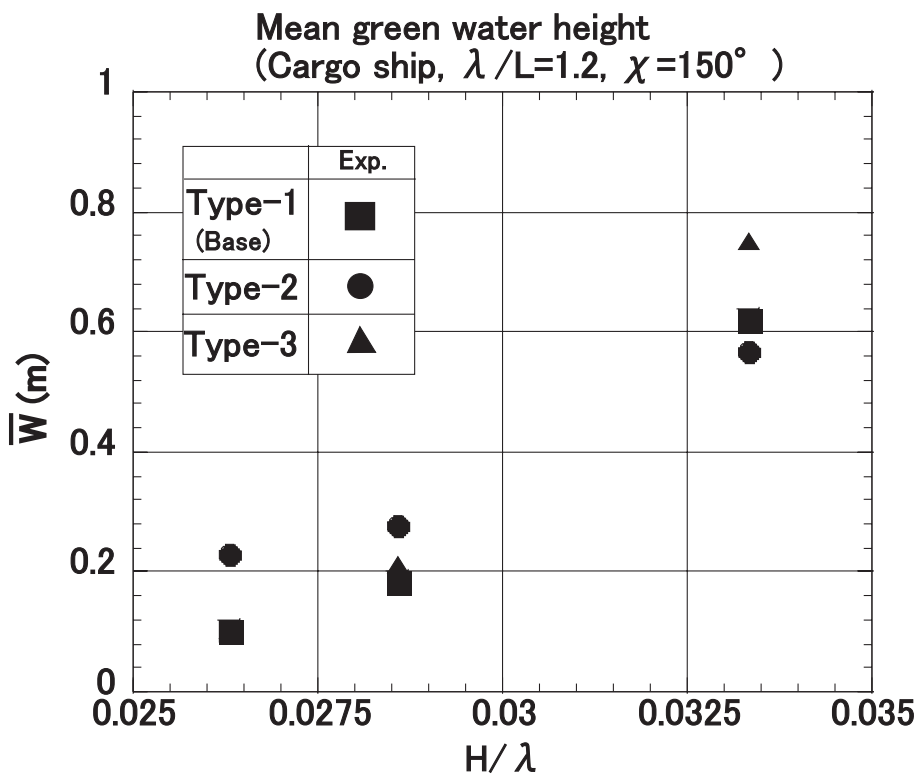

Figure 2.38: Effect of wave height on green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

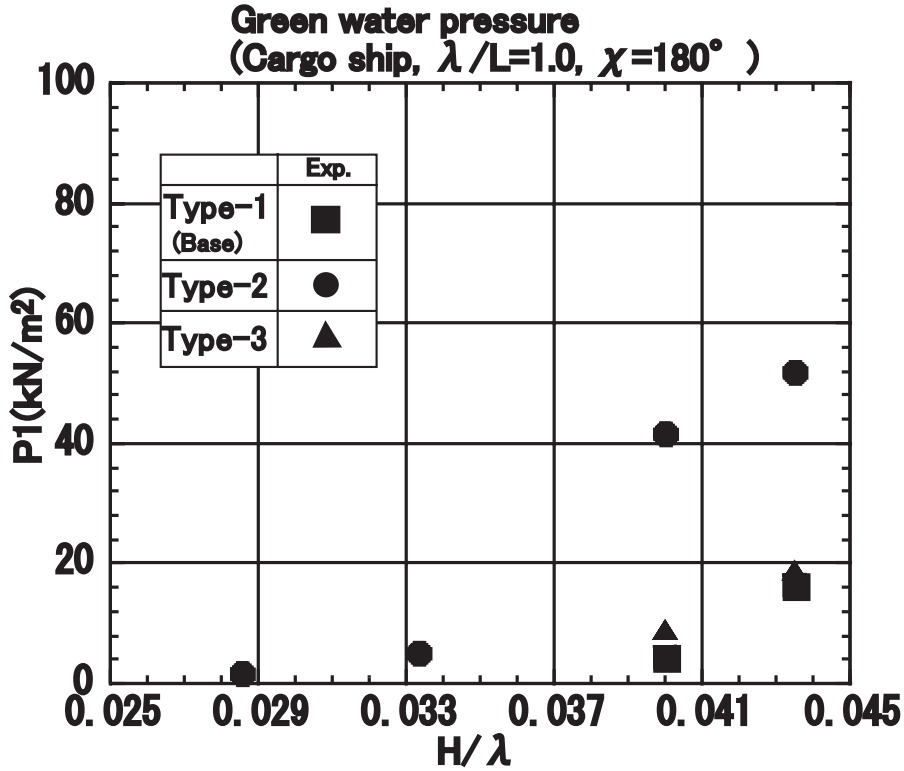

Figure 2.39: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

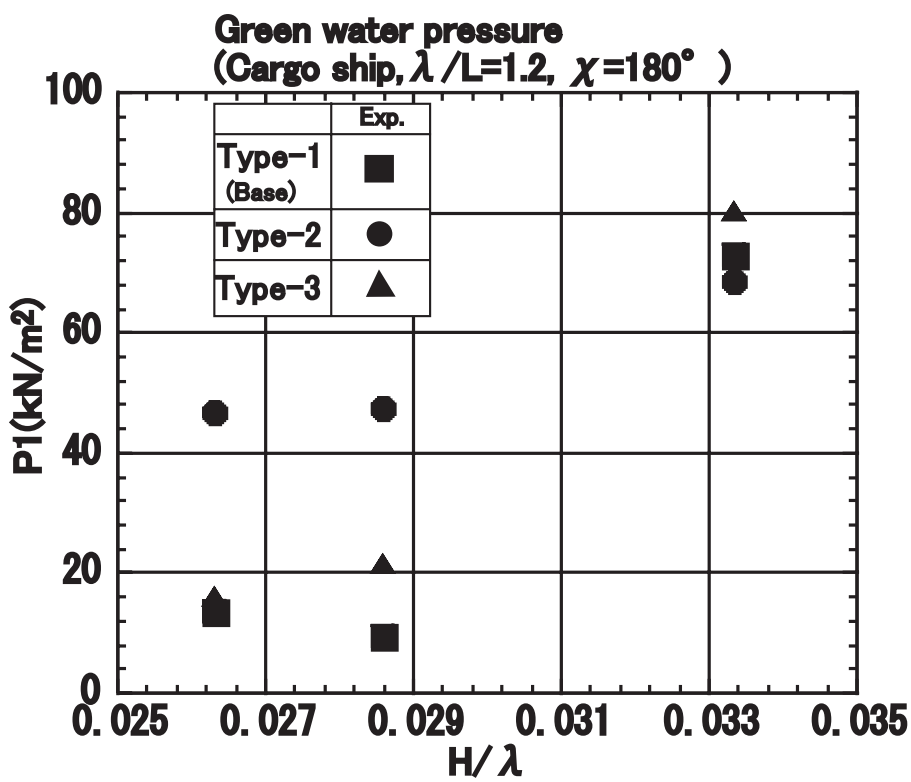

Figure 2.40: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

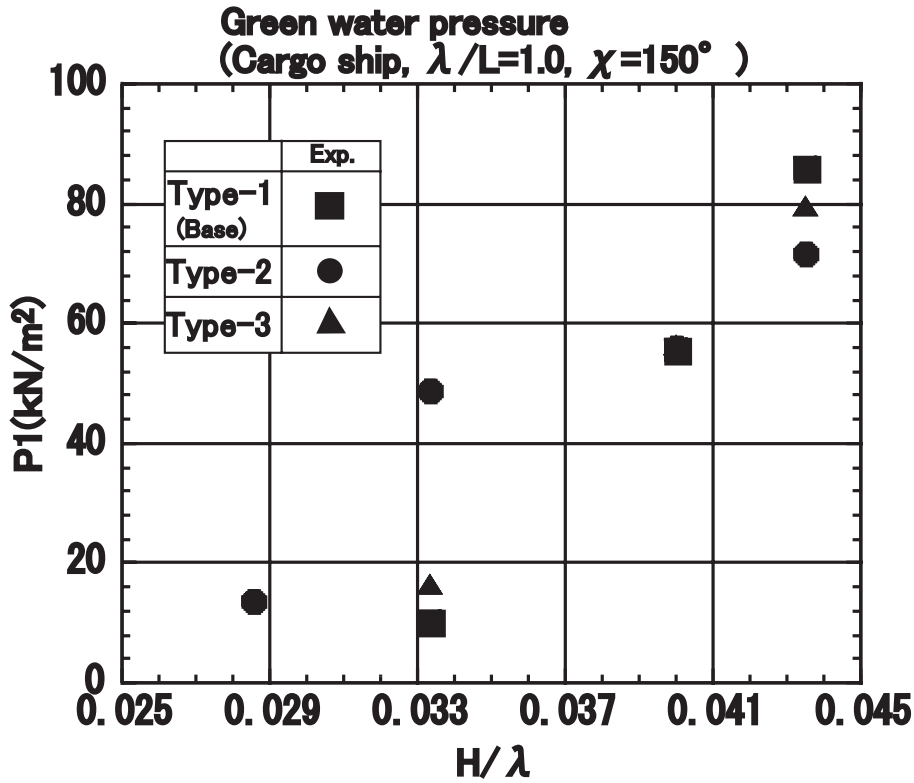

Figure 2.41: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

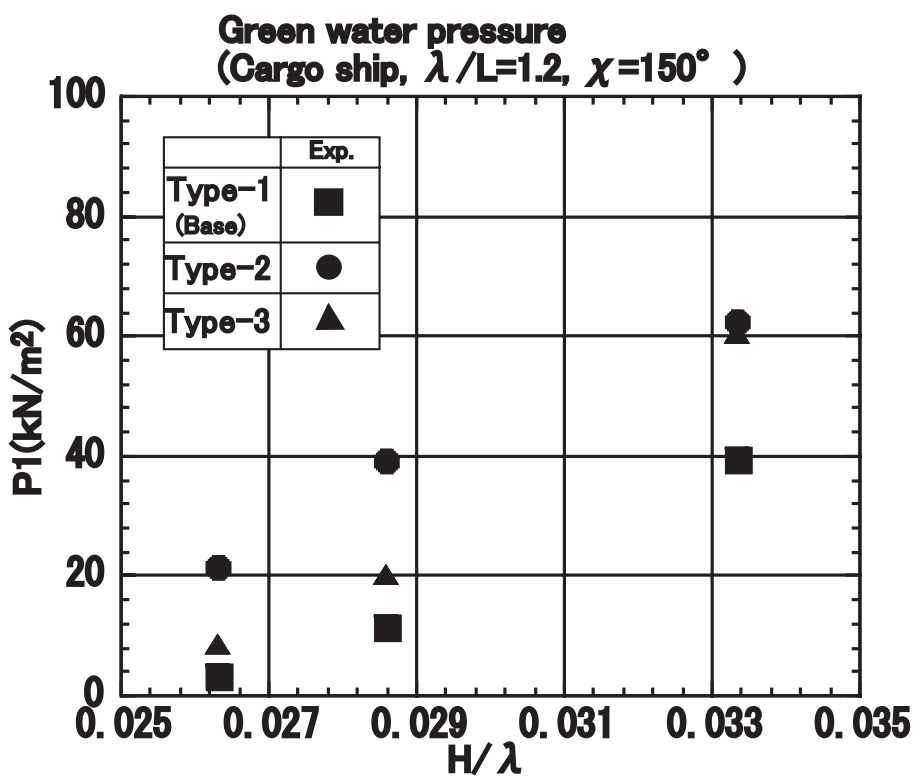

Figure 2.42: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

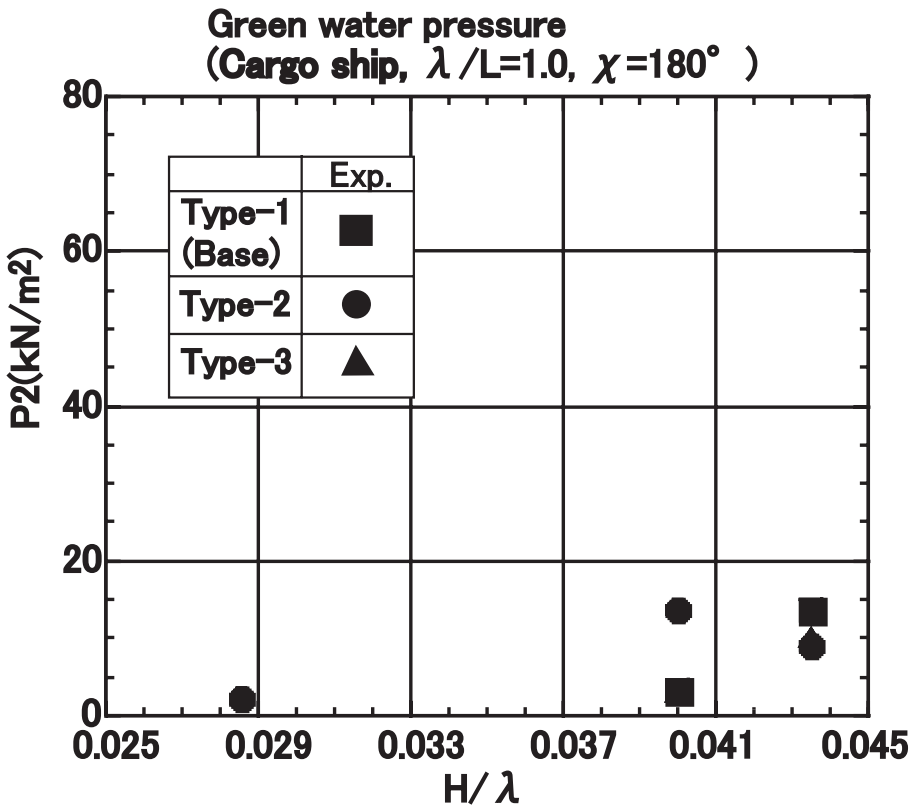

Figure 2.43: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

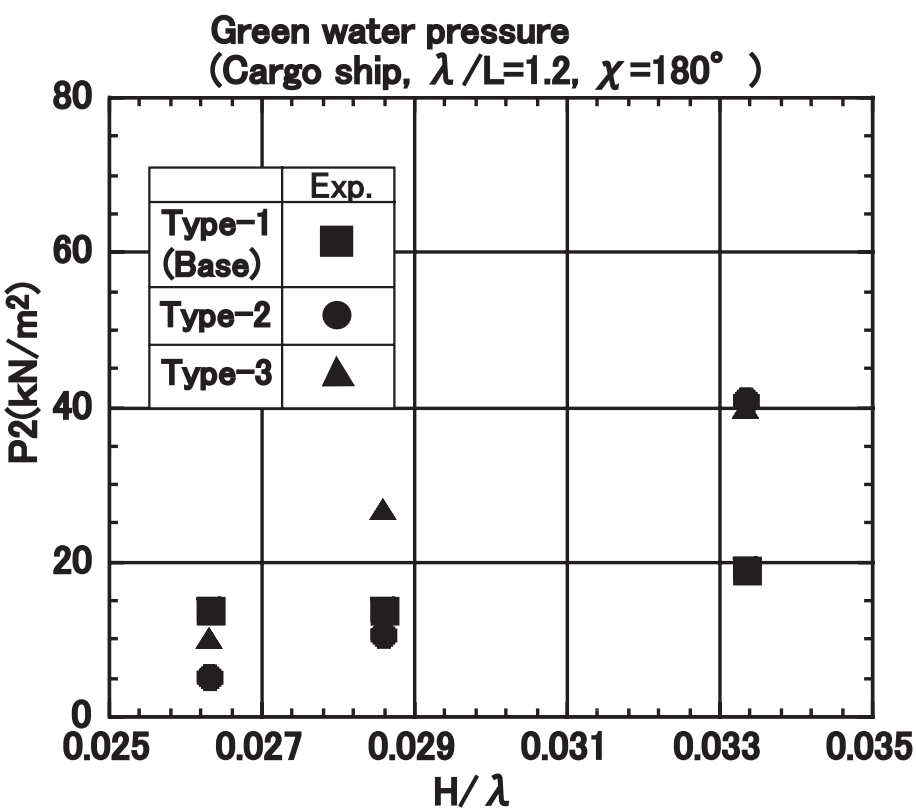

Figure 2.44: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

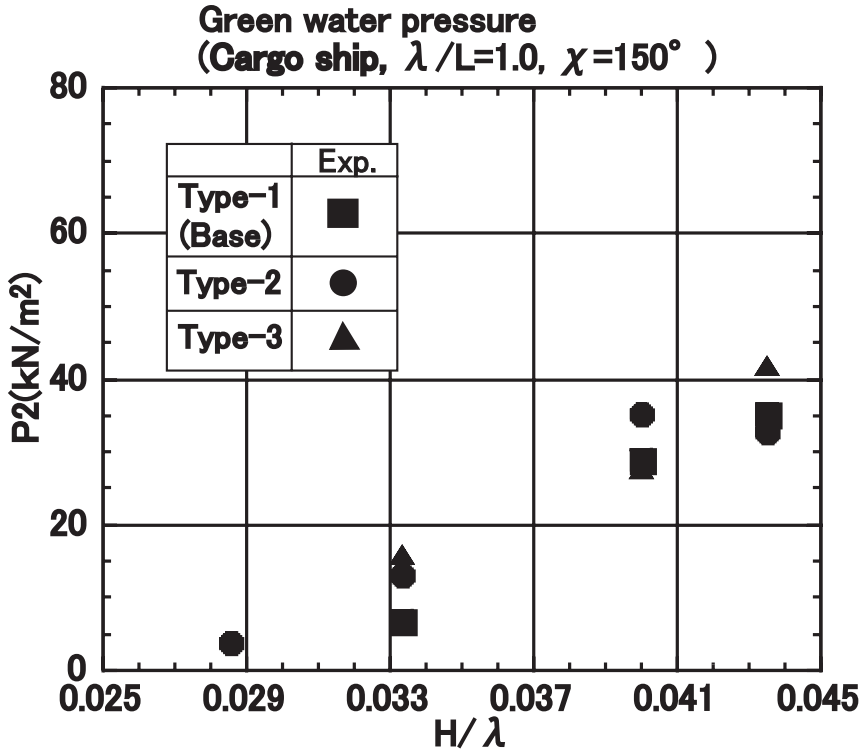

Figure 2.45: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

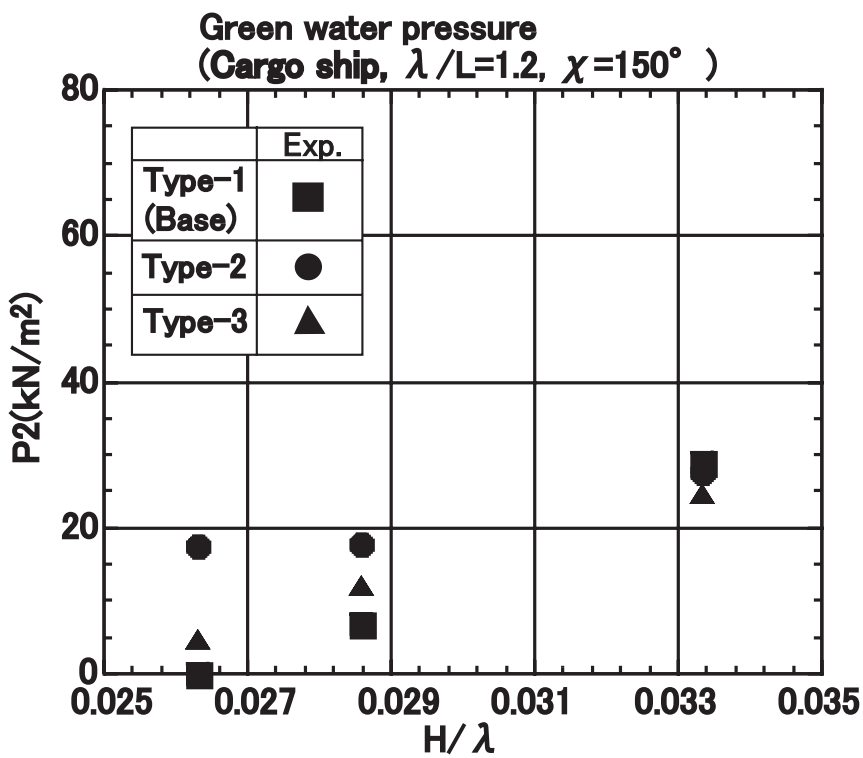

Figure 2.46: Effect of wave height on green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

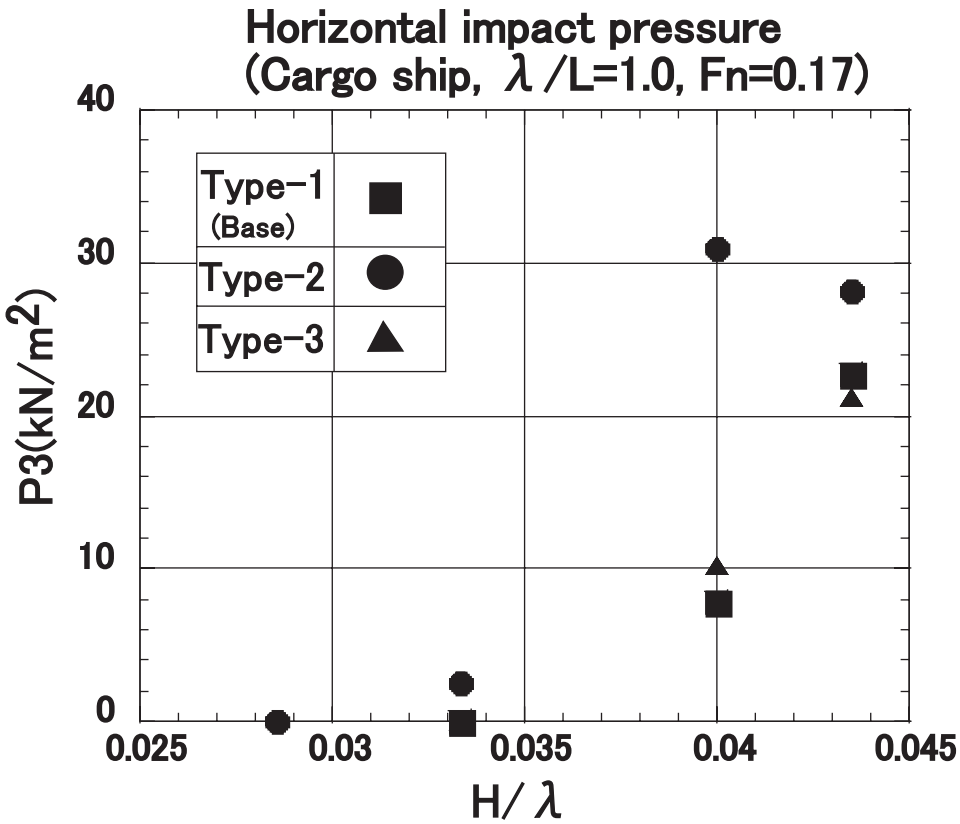

Figure 2.47: Efffect of wave height on horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, $F_n = 0.17$, $\lambda\ /L = 1.0$, $\chi = 180\ ^\circ$).

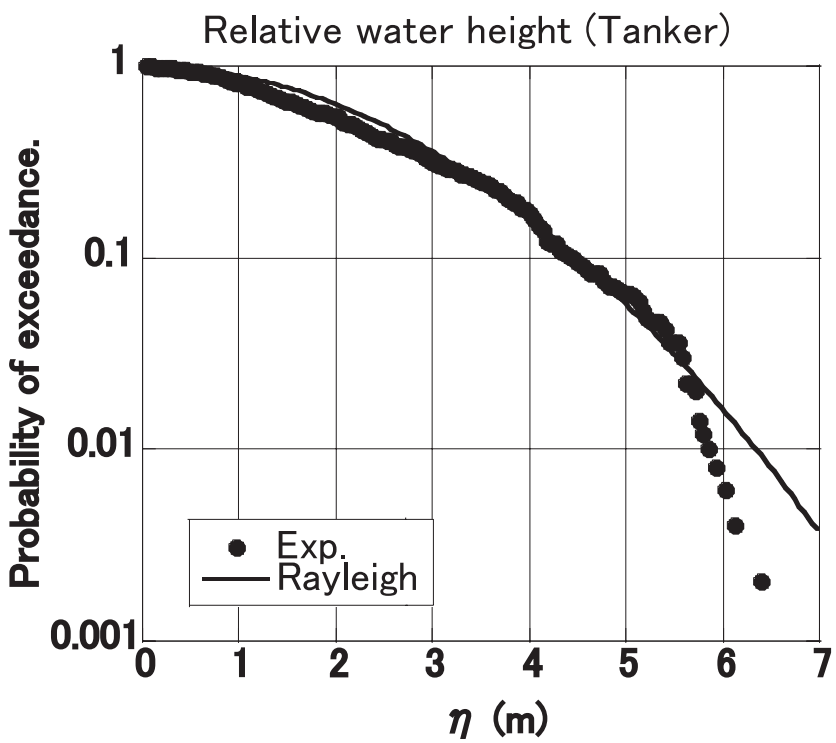

Figure 2.48: Probability of exceedance of relative water height at stem (Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 $^\circ$)

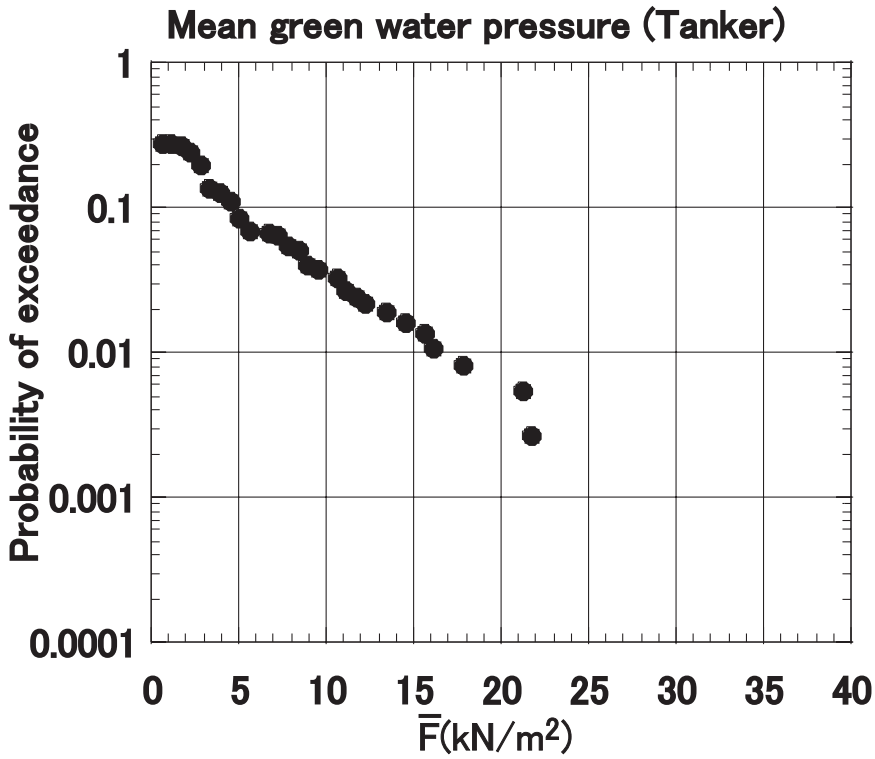

Figure 2.49: Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

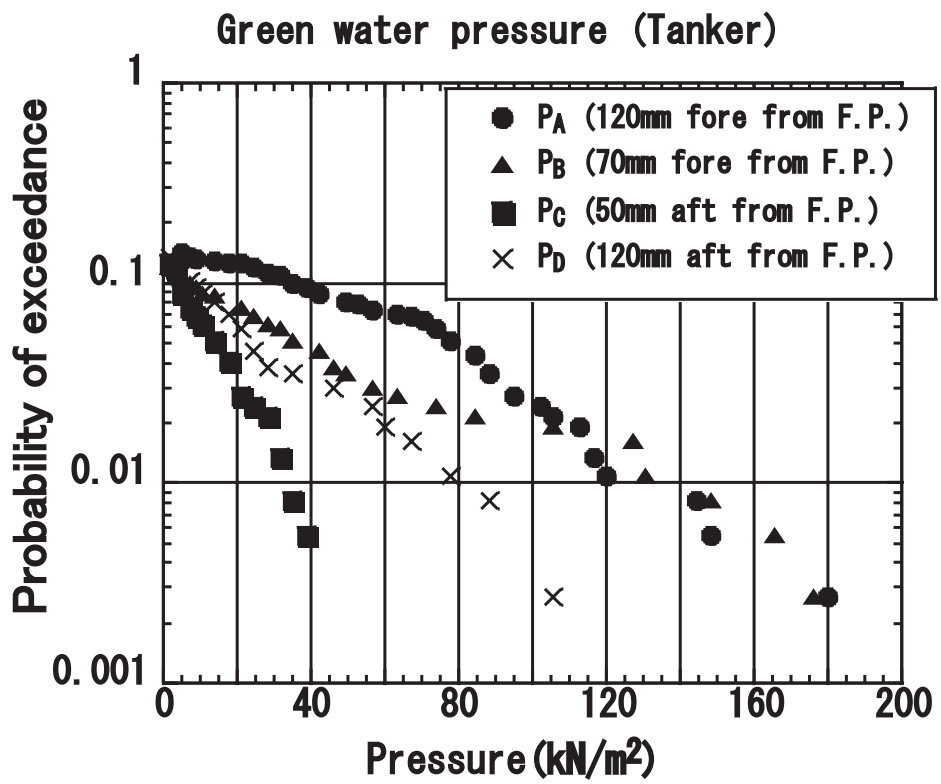

Figure 2.50: Probability of exceedance of green water pressure (Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

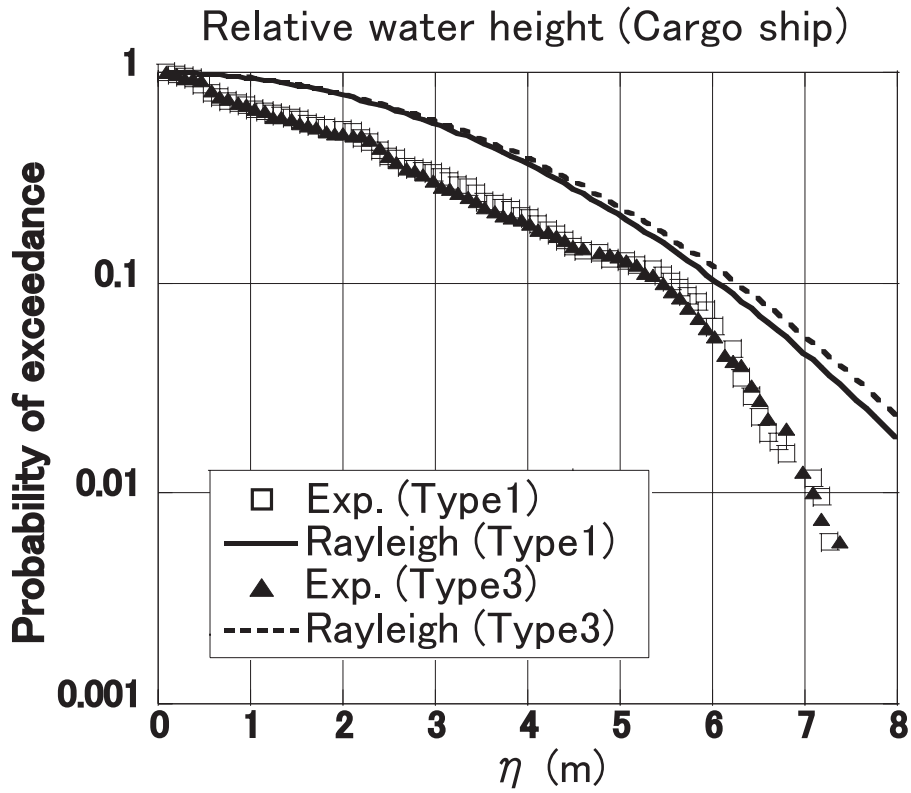

Figure 2.51: Probability of exceedance of relative water height at stem (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

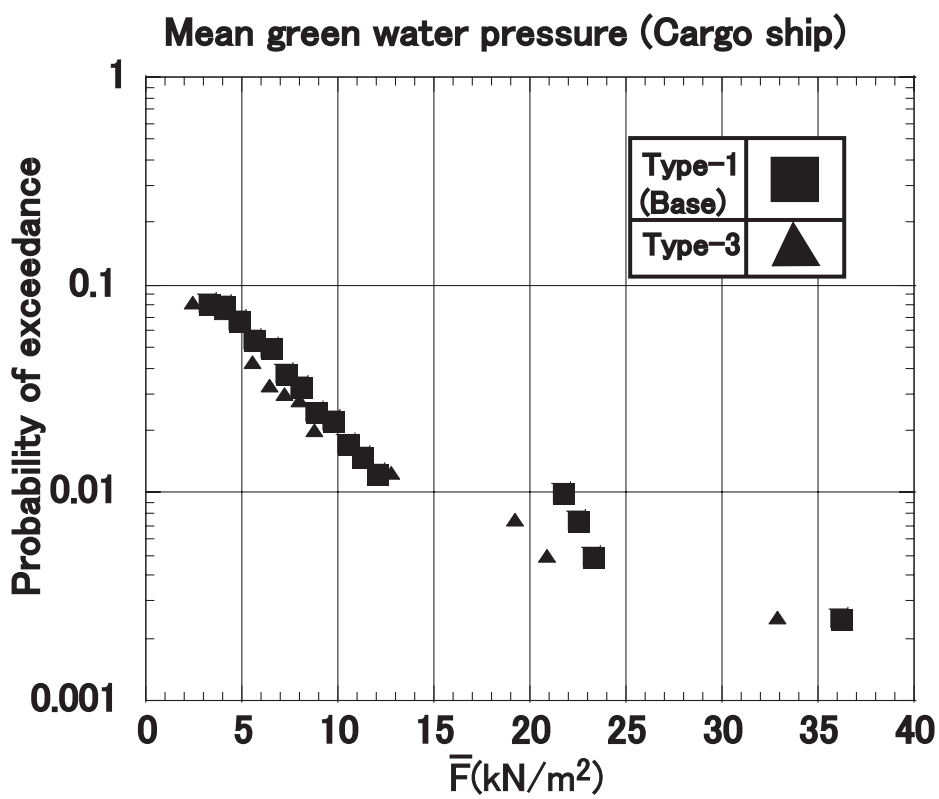

Figure 2.52: Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

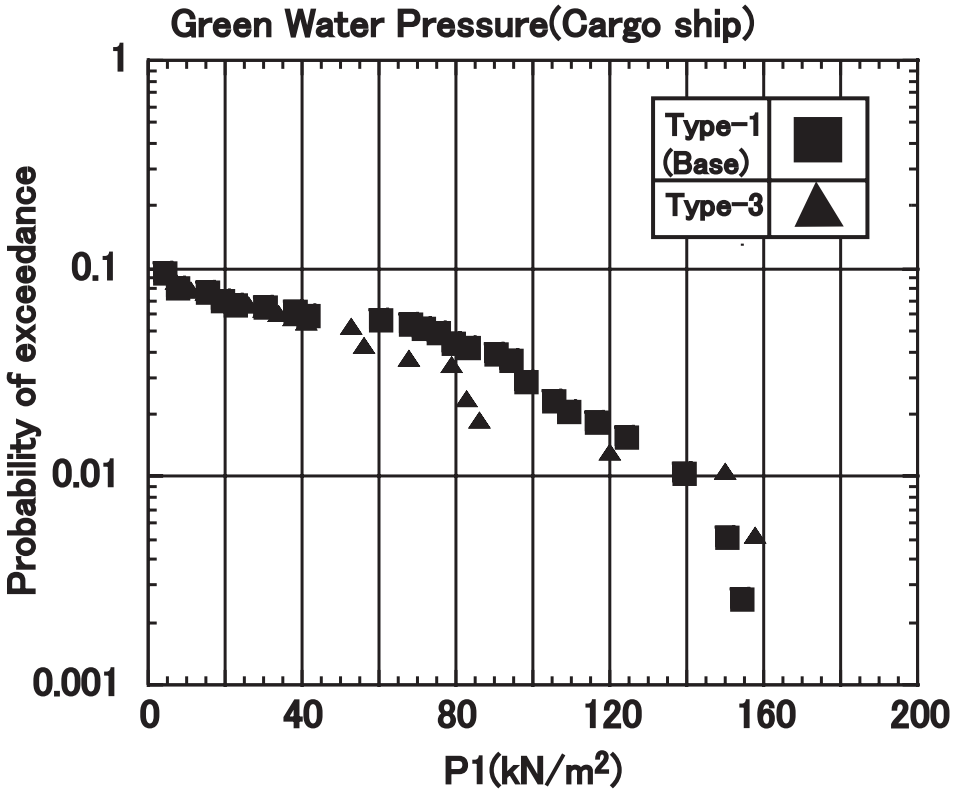

Figure 2.53: Probability of exceedance of green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

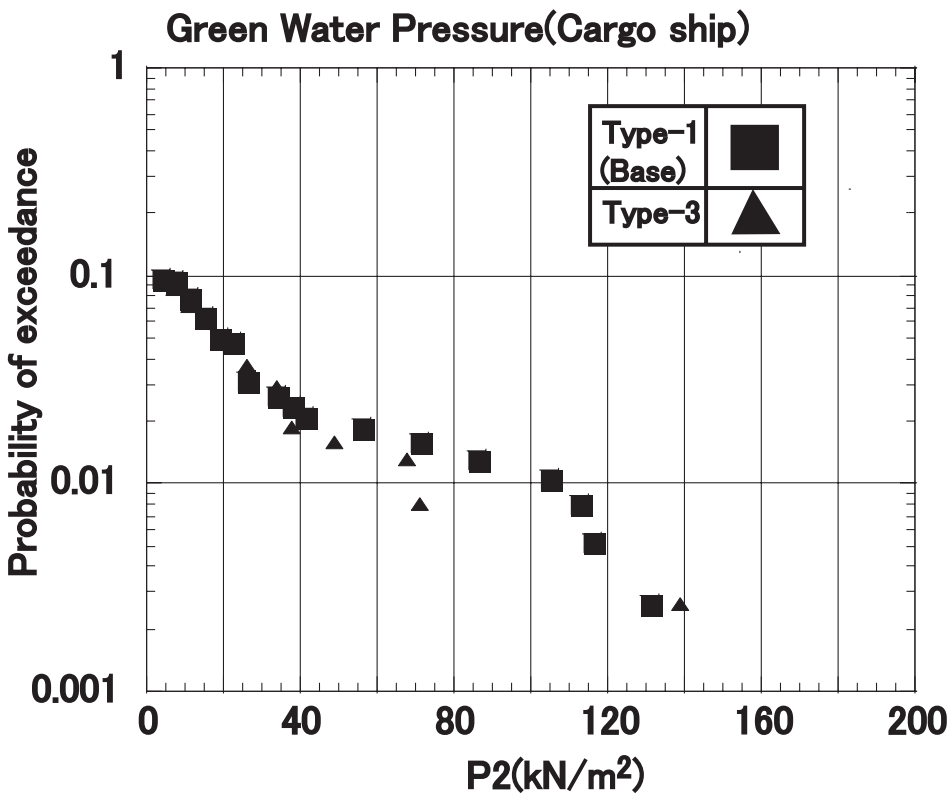

Figure 2.54: Probability of exceedance of green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P. $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

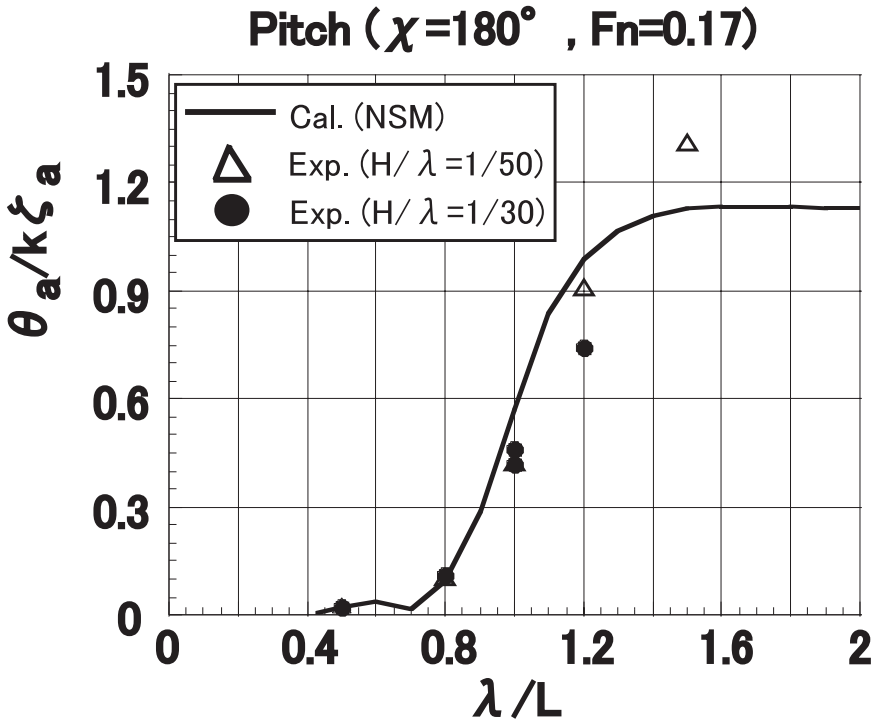

Figure 2.55: Pitch amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

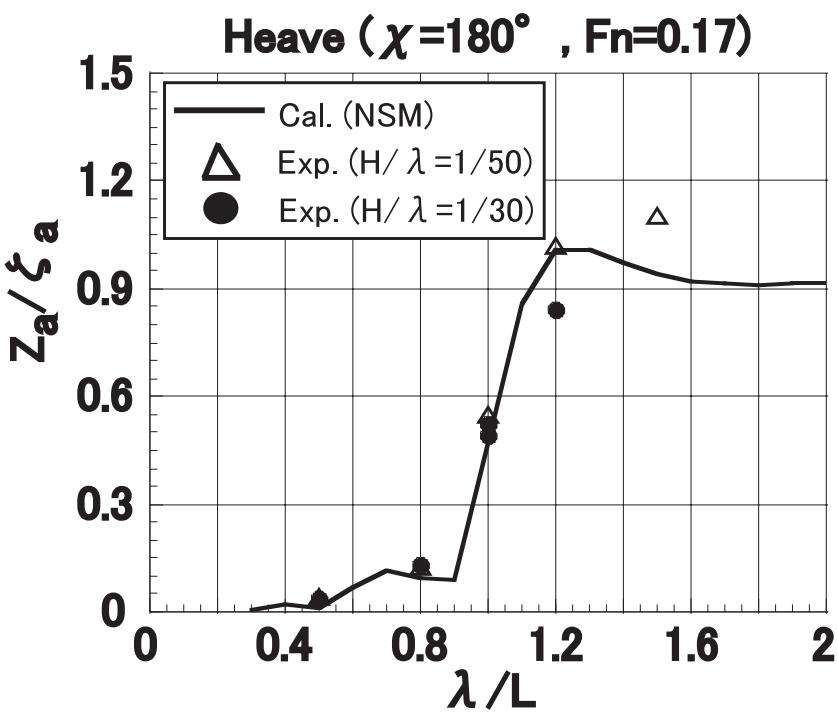

Figure 2.56: Heave amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

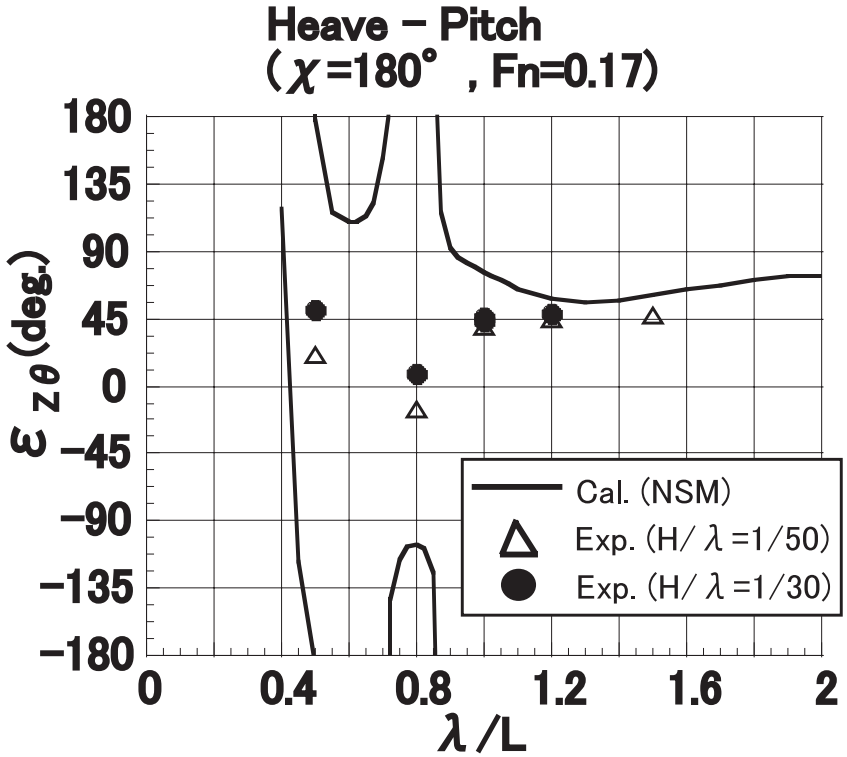

Figure 2.57: Phase angle between pitch and heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

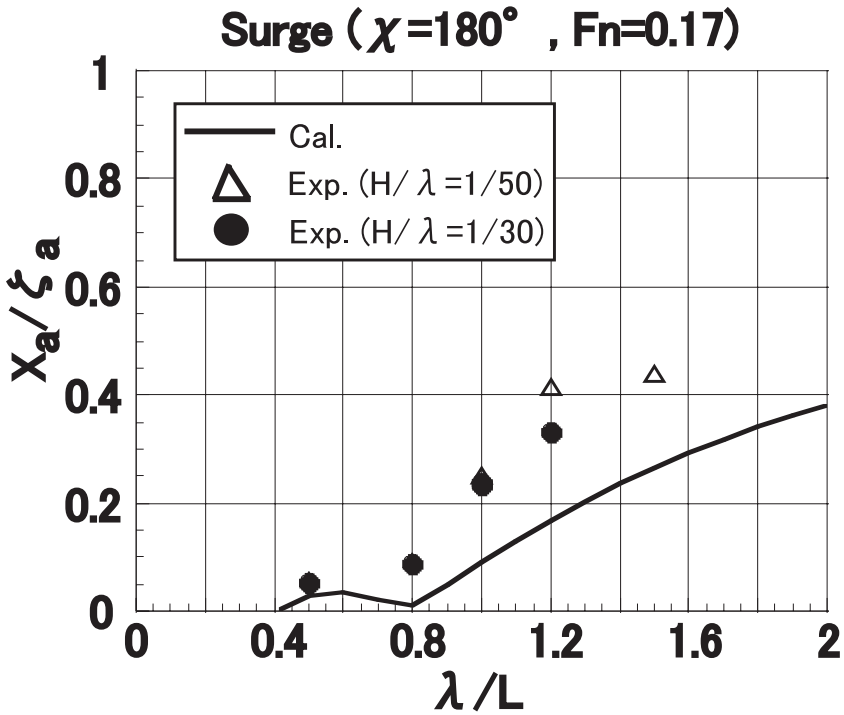

Figure 2.58: Surge amplitude ratio (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

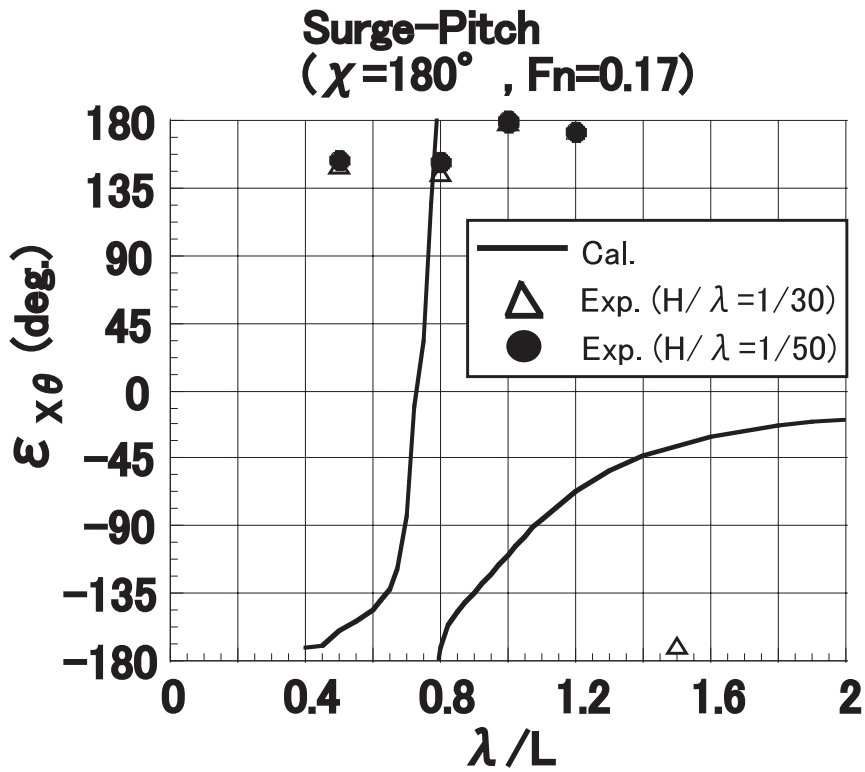

Figure 2.59: Phase angle between pitch and surge (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

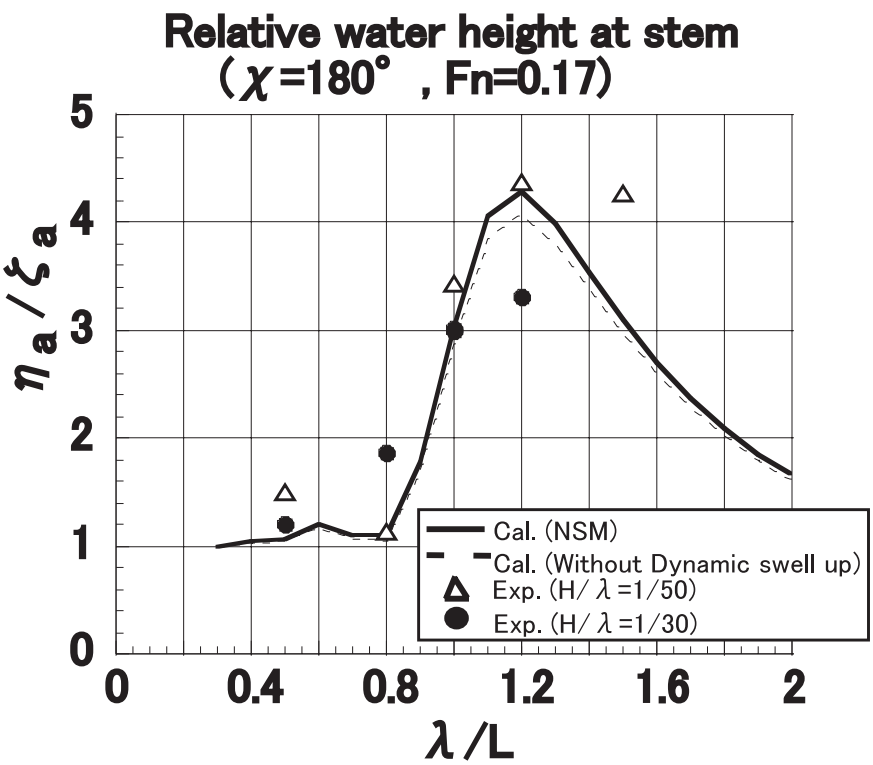

Figure 2.60: Amplitude ratio of relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

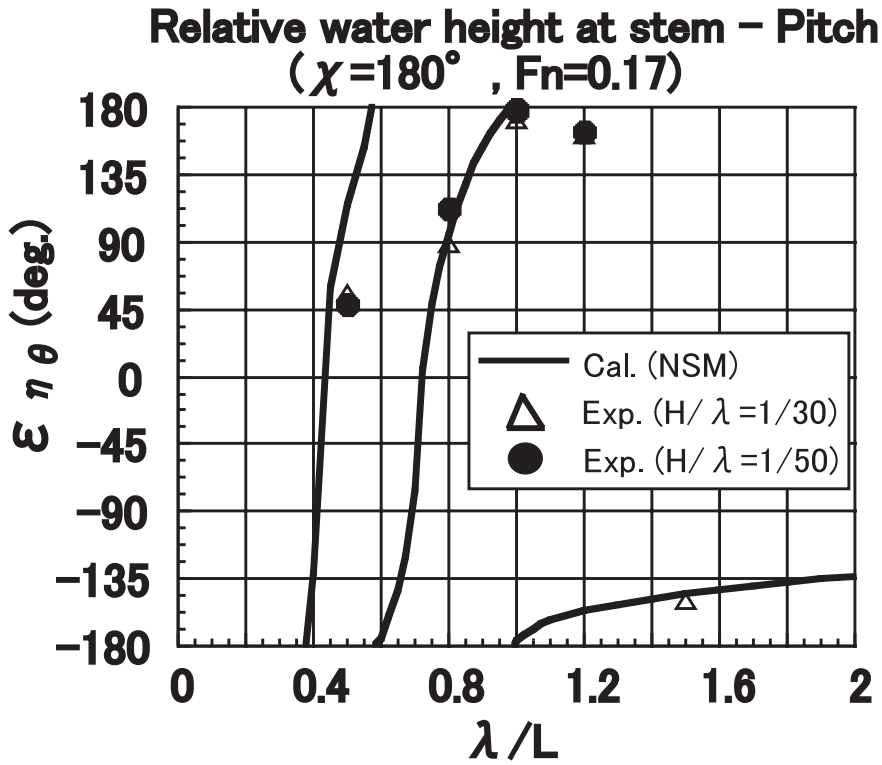

Figure 2.61: Phase angle between pitch and relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

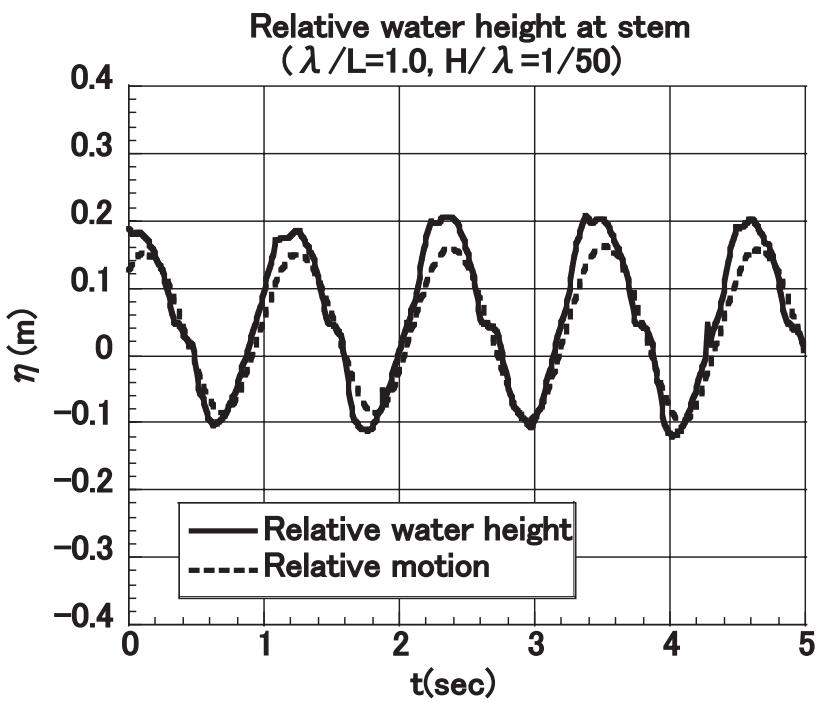

Figure 2.62: Example of time histories of relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °, λ/L=1.0, H/λ=1/50)

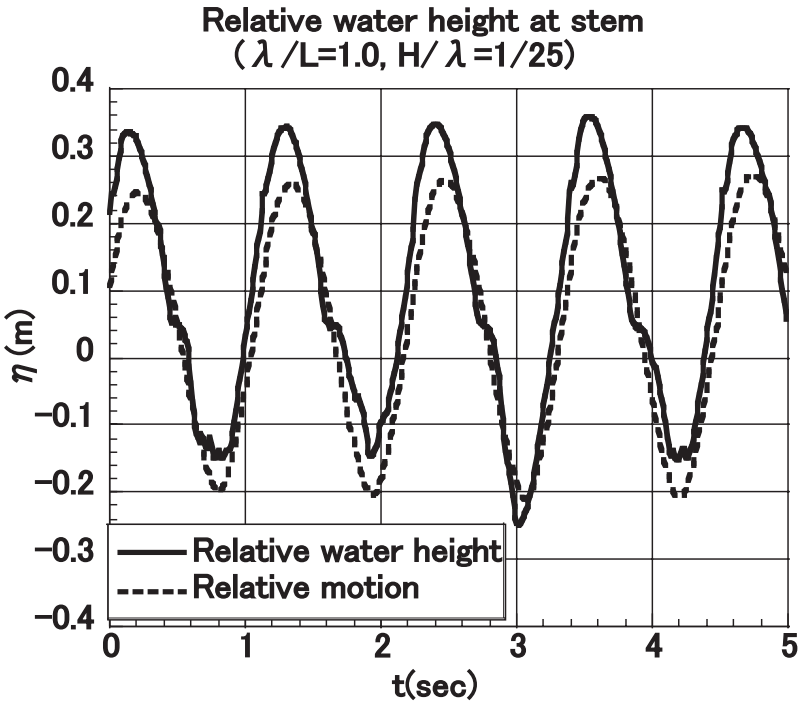

Figure 2.63: Example of time histories of relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °, λ/L=1.0, H/λ=1/25)

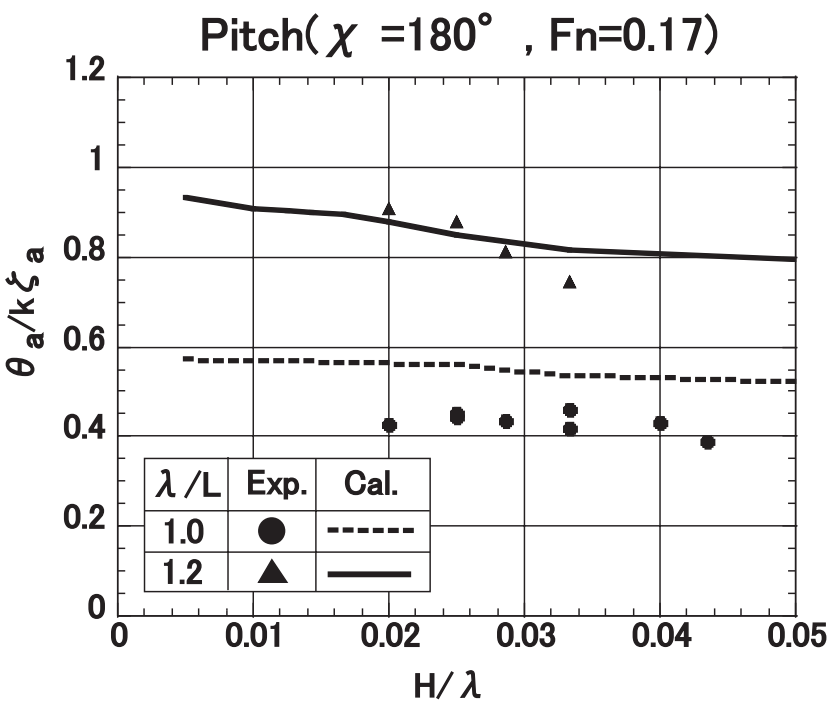

Figure 2.64: Effect of wave height on pitch (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

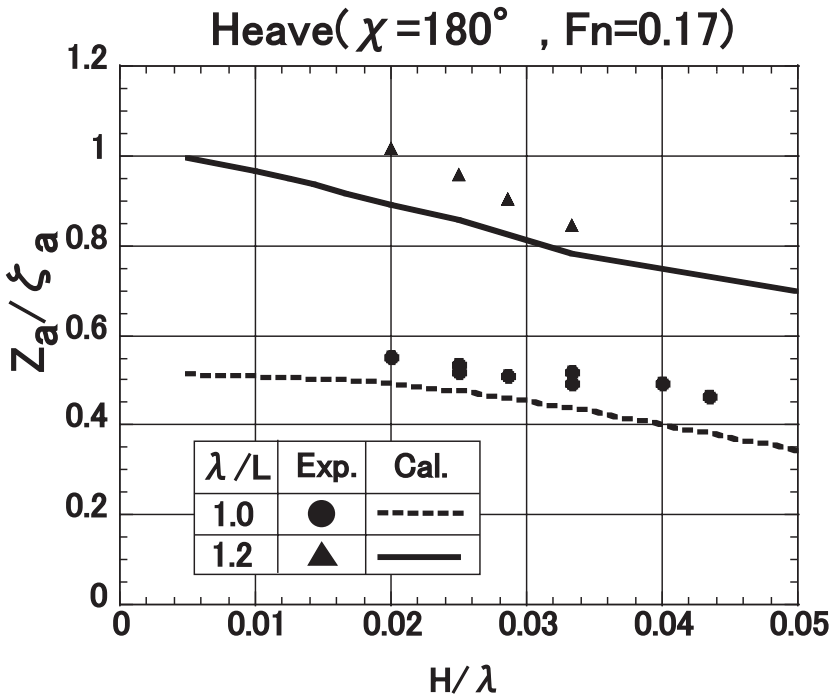

Figure 2.65: Effect of wave height on heave (Cargo ship, F_n=0.17, χ=180 °)

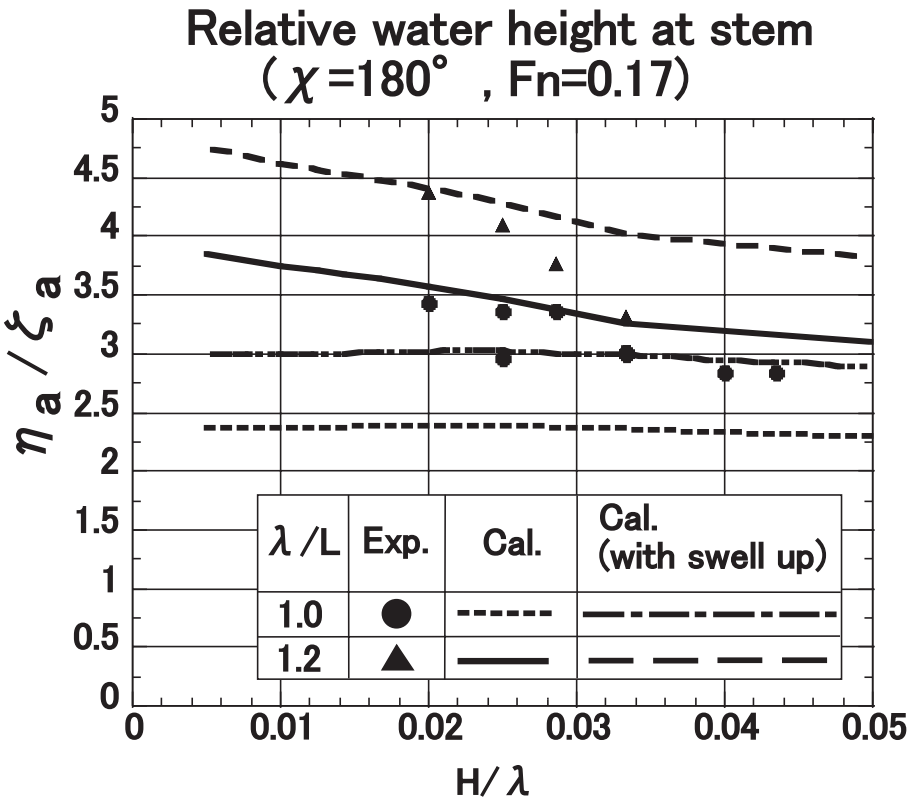

Figure 2.66: Effect of wave height on relative water height at stem(Cargo ship, F_n=0.17,χ=180 °)

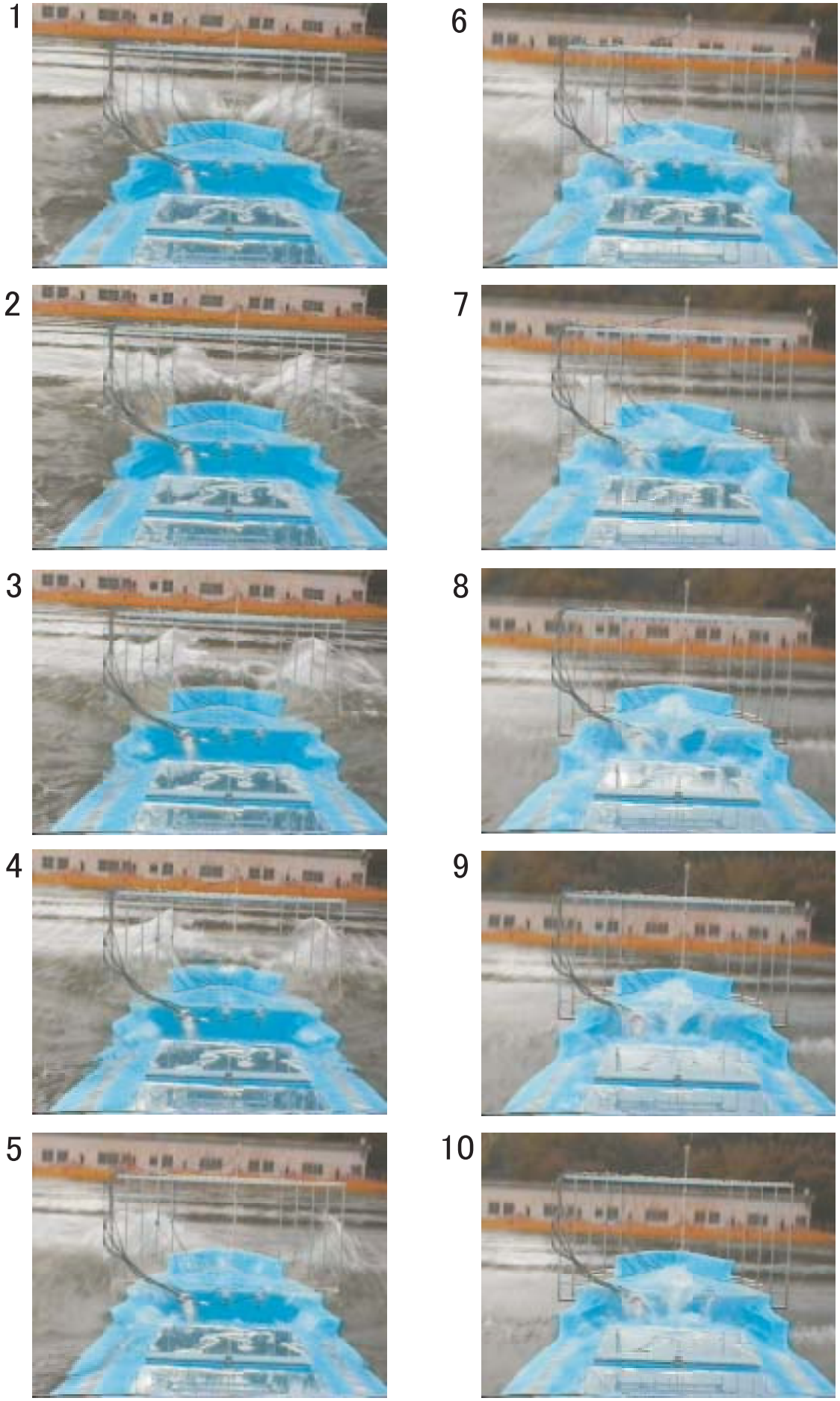

Figure 3.1: Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=180 °, H/λ=1/35)

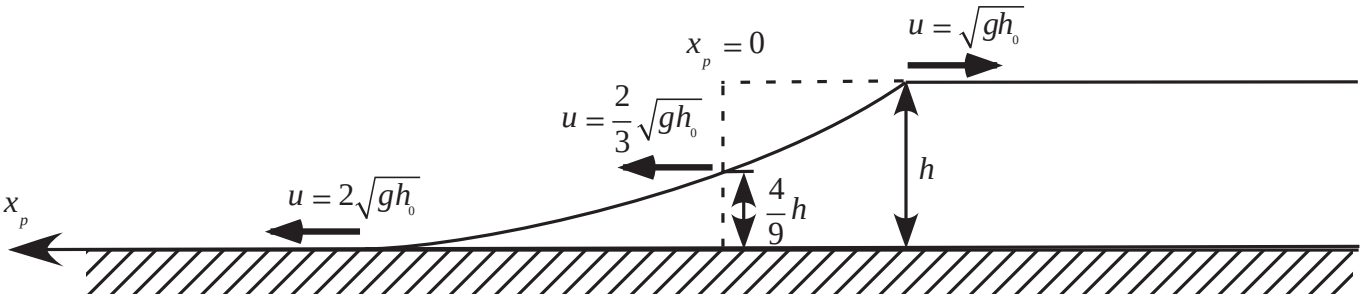

Figure 3.2: Coordinate system for dam break model

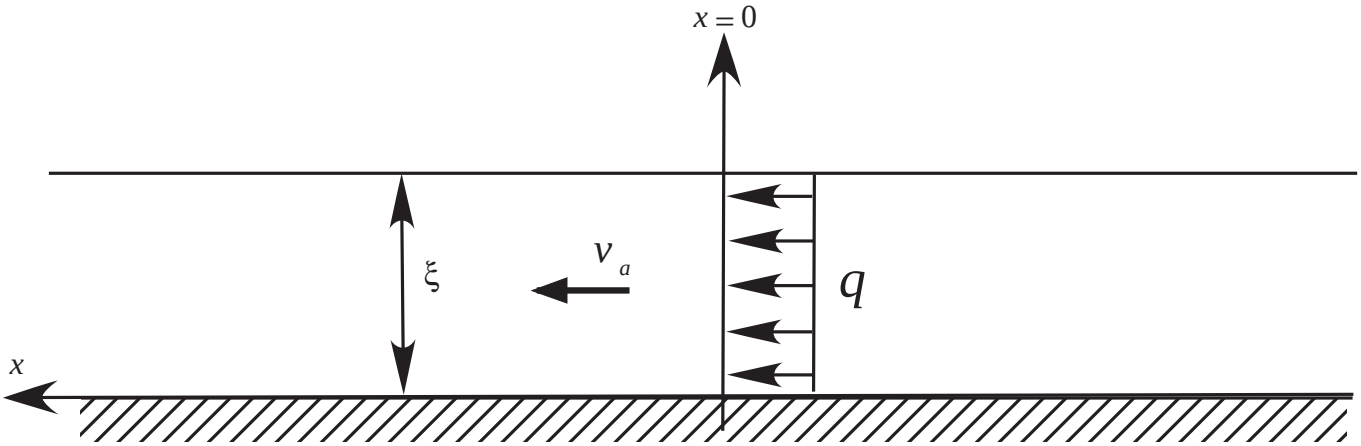

Figure 3.3: Coordinate system for channel flow

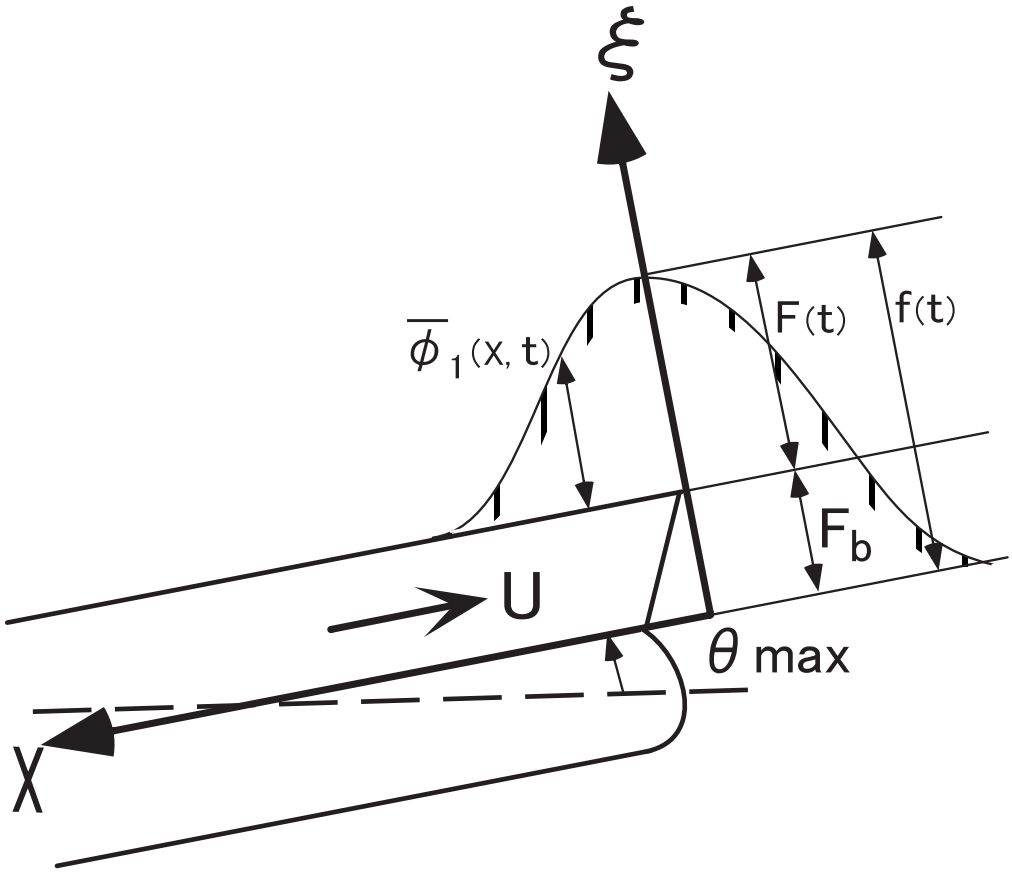

Figure 3.4: Model of flooded waves

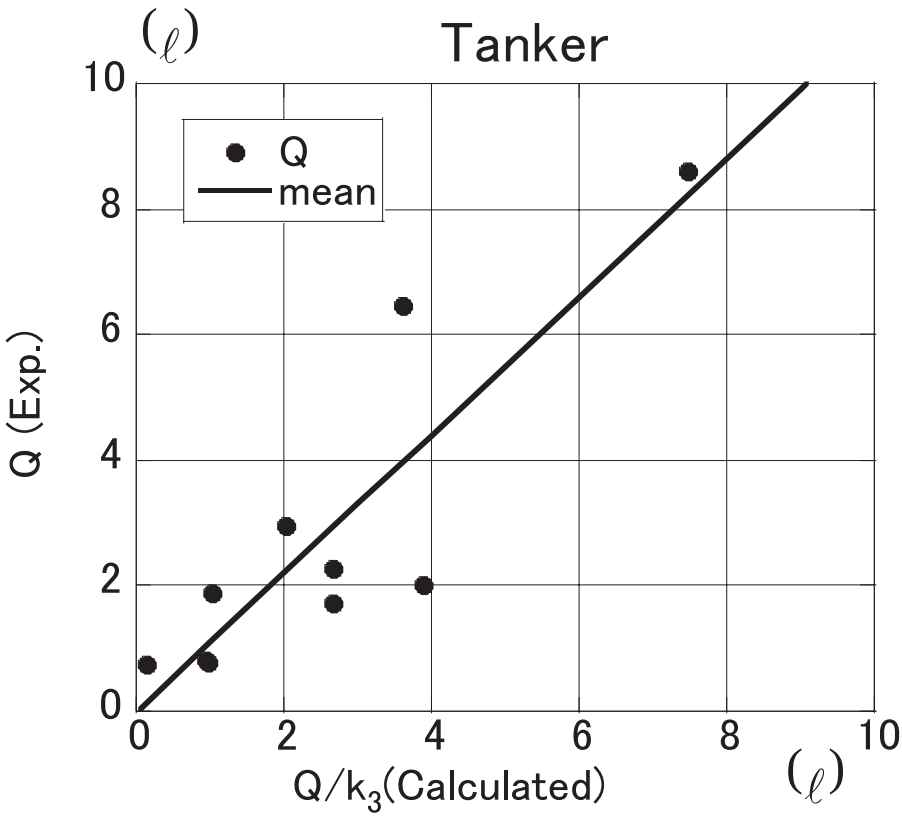

Figure 3.5: Relation between relative water height at stem and green water volume (Tanker)

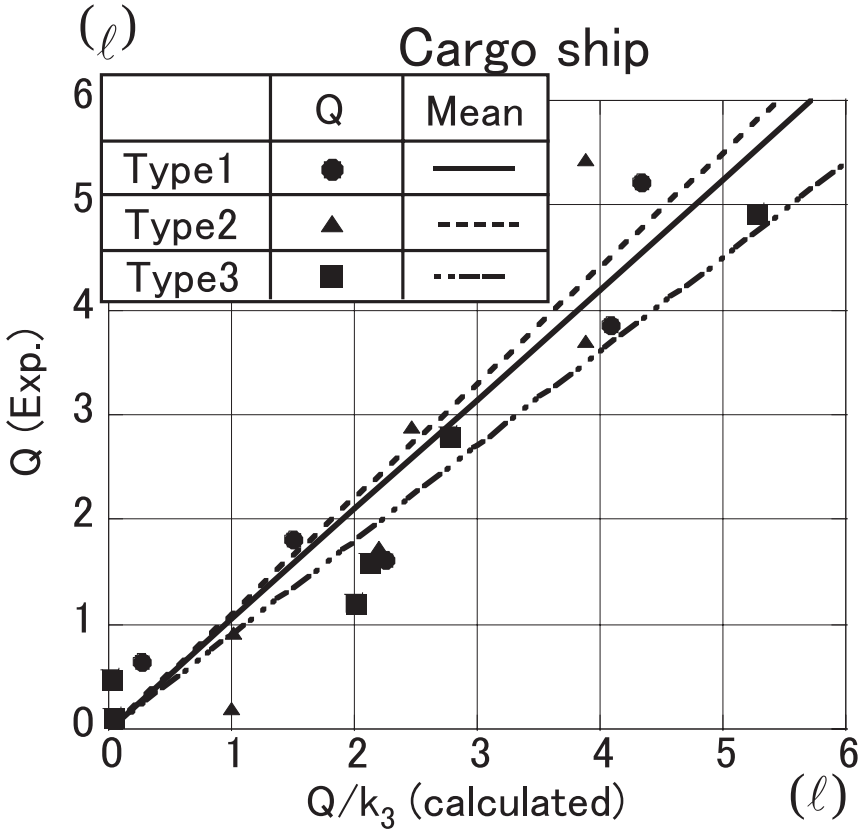

Figure 3.6: Relation between relative water height at stem and green water volume (Cargo ship)

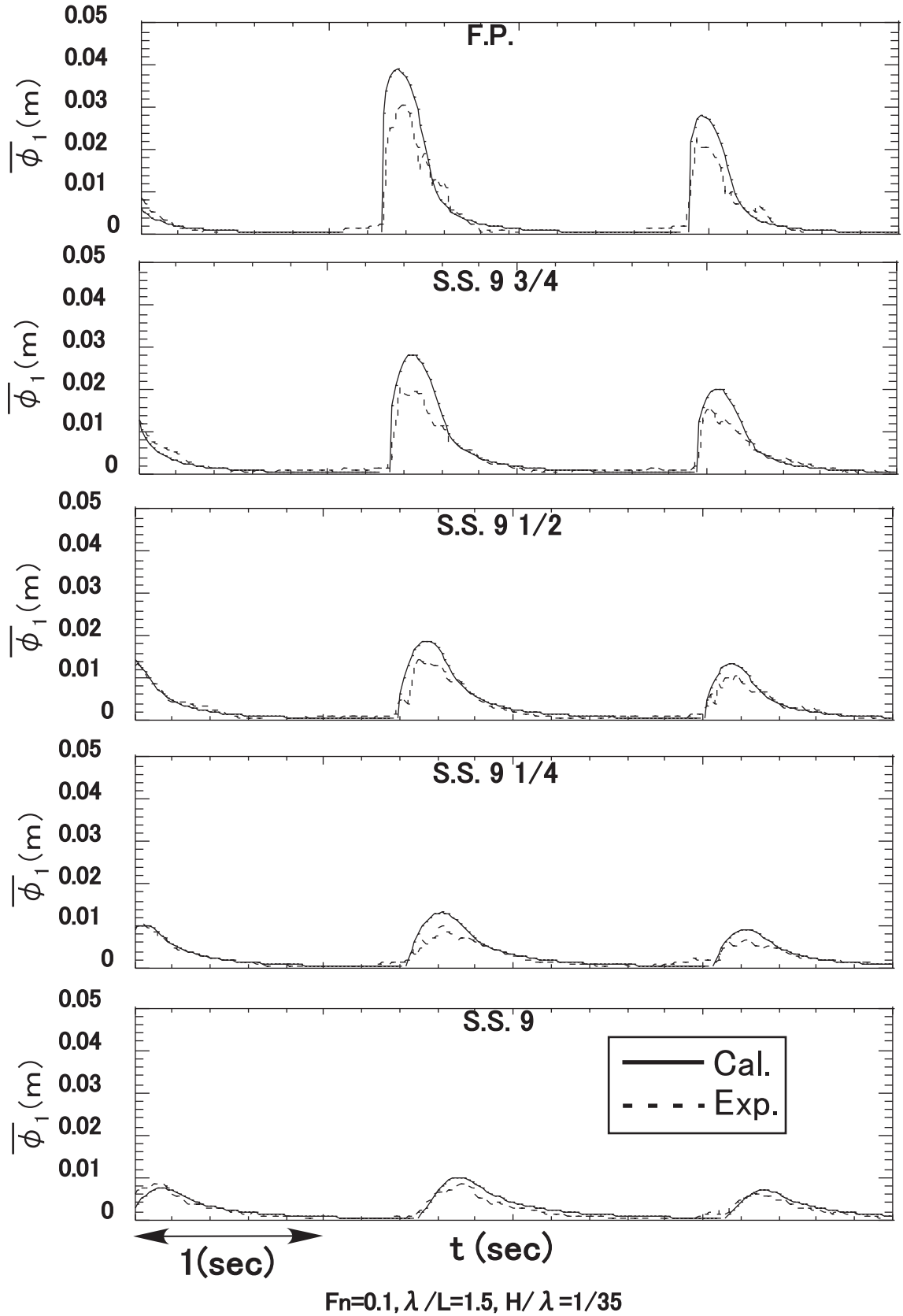

Figure 3.7: Time histories of green water height (Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.5$, H/$\lambda = 1/35$, $\chi = 180\ ^\circ$)

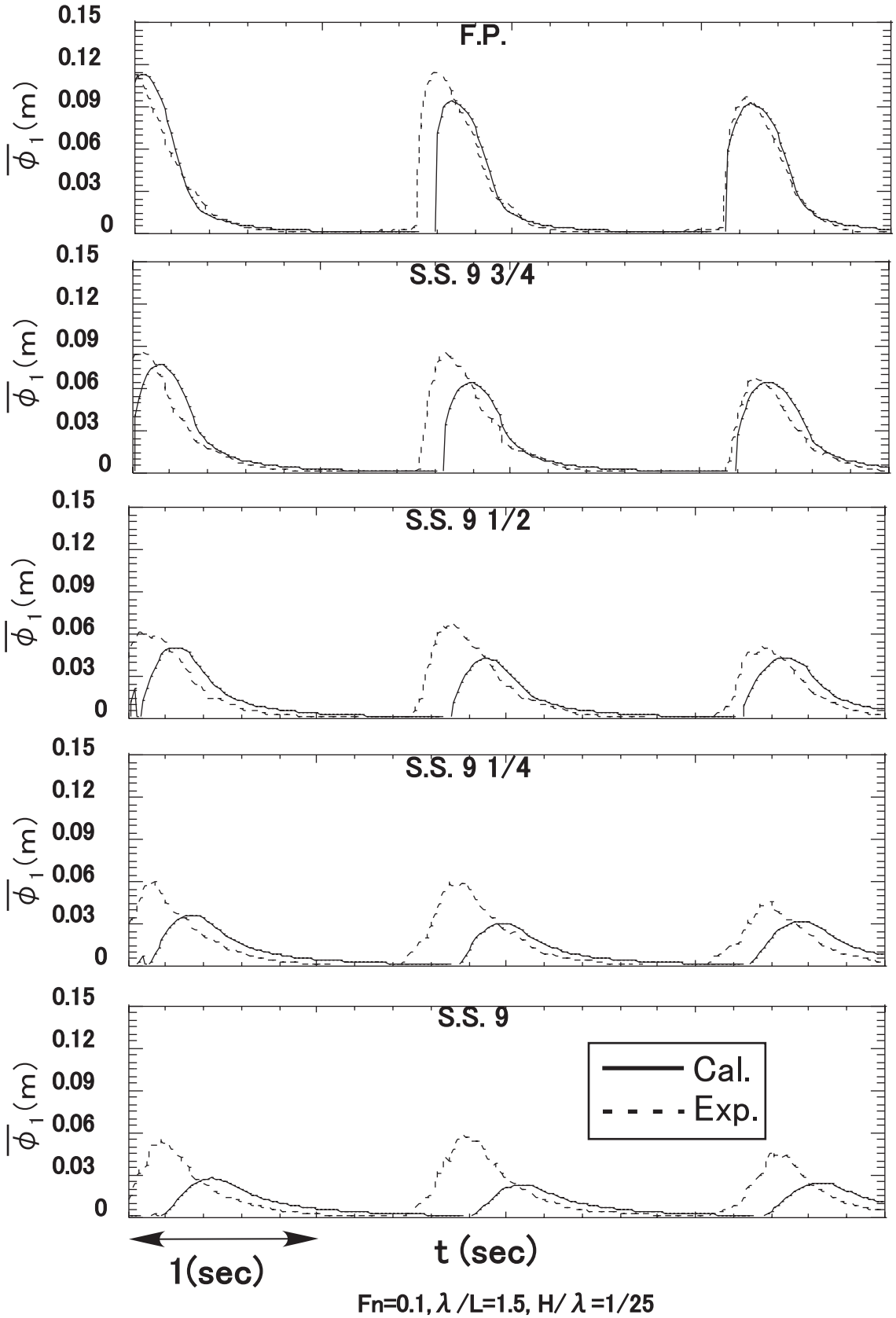

Figure 3.8: Time histories of green water height (Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.5$, $\mathrm{H}/\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$)

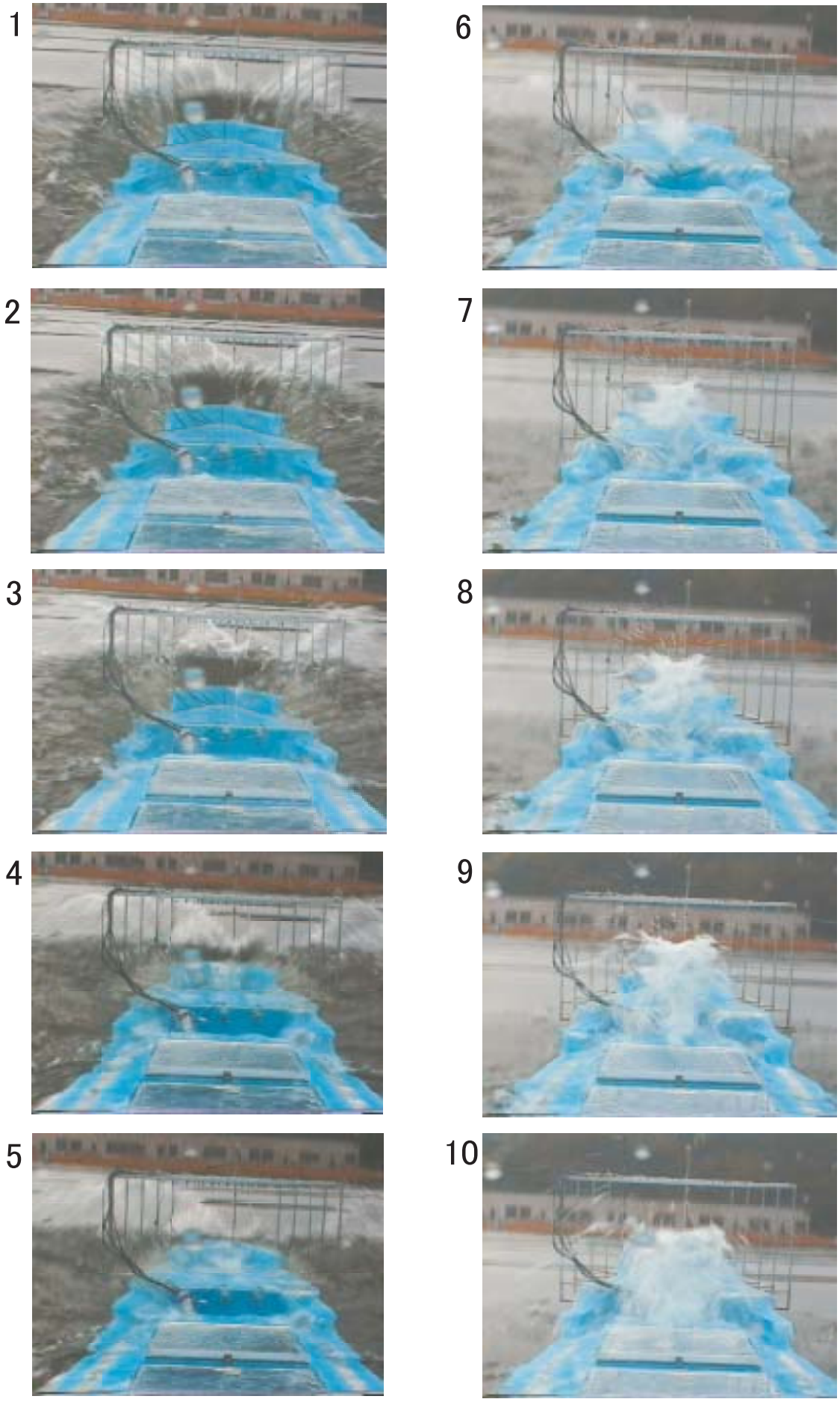

Figure 3.9: Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=180 °, H/λ=1/25)

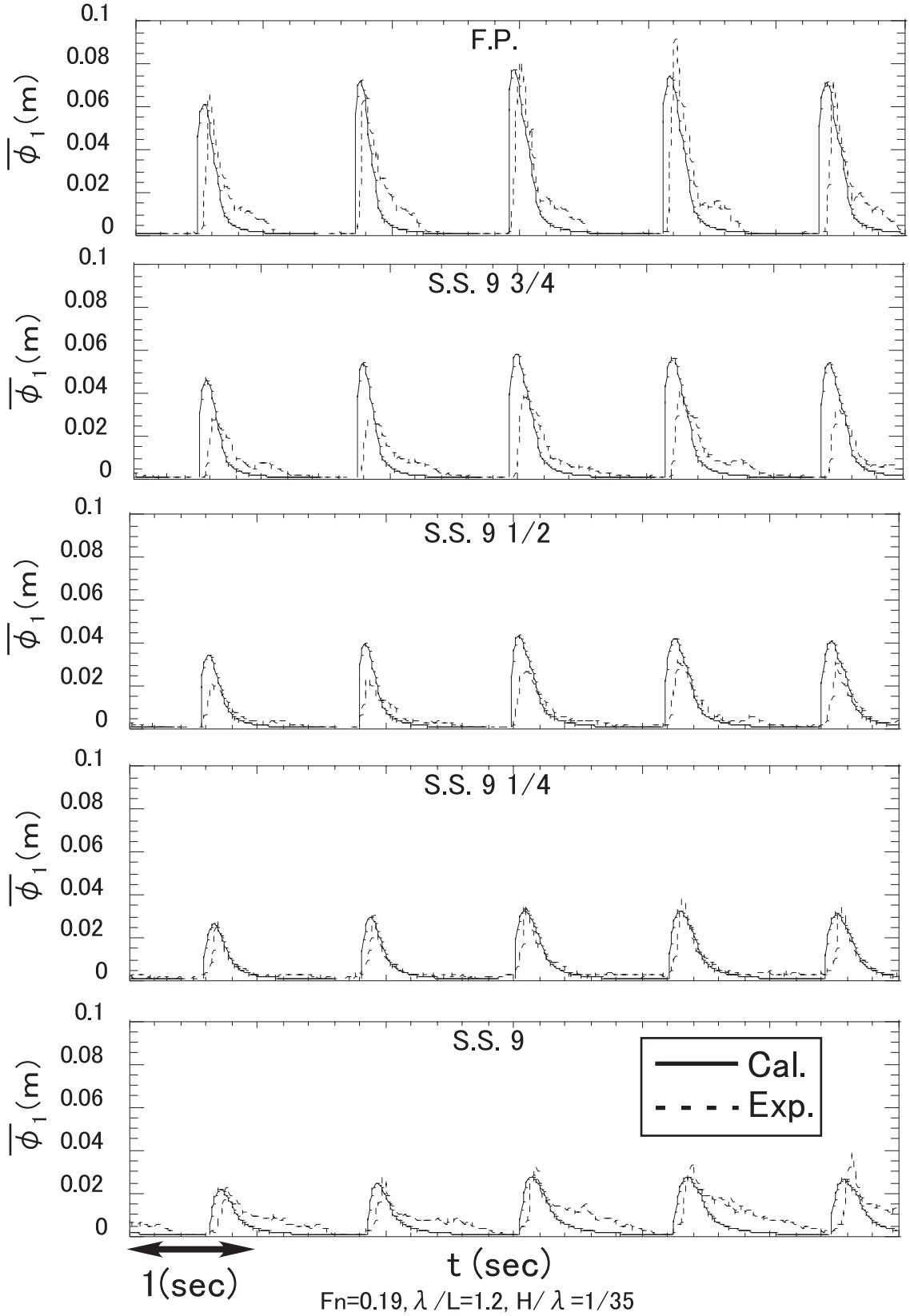

Figure 3.10: Time histories of green water height (Cargo ship, $F_n = 0.19$, $\lambda\ /L = 1.2$, H/λ = 1/35, $\chi = 180\ ^\circ$)

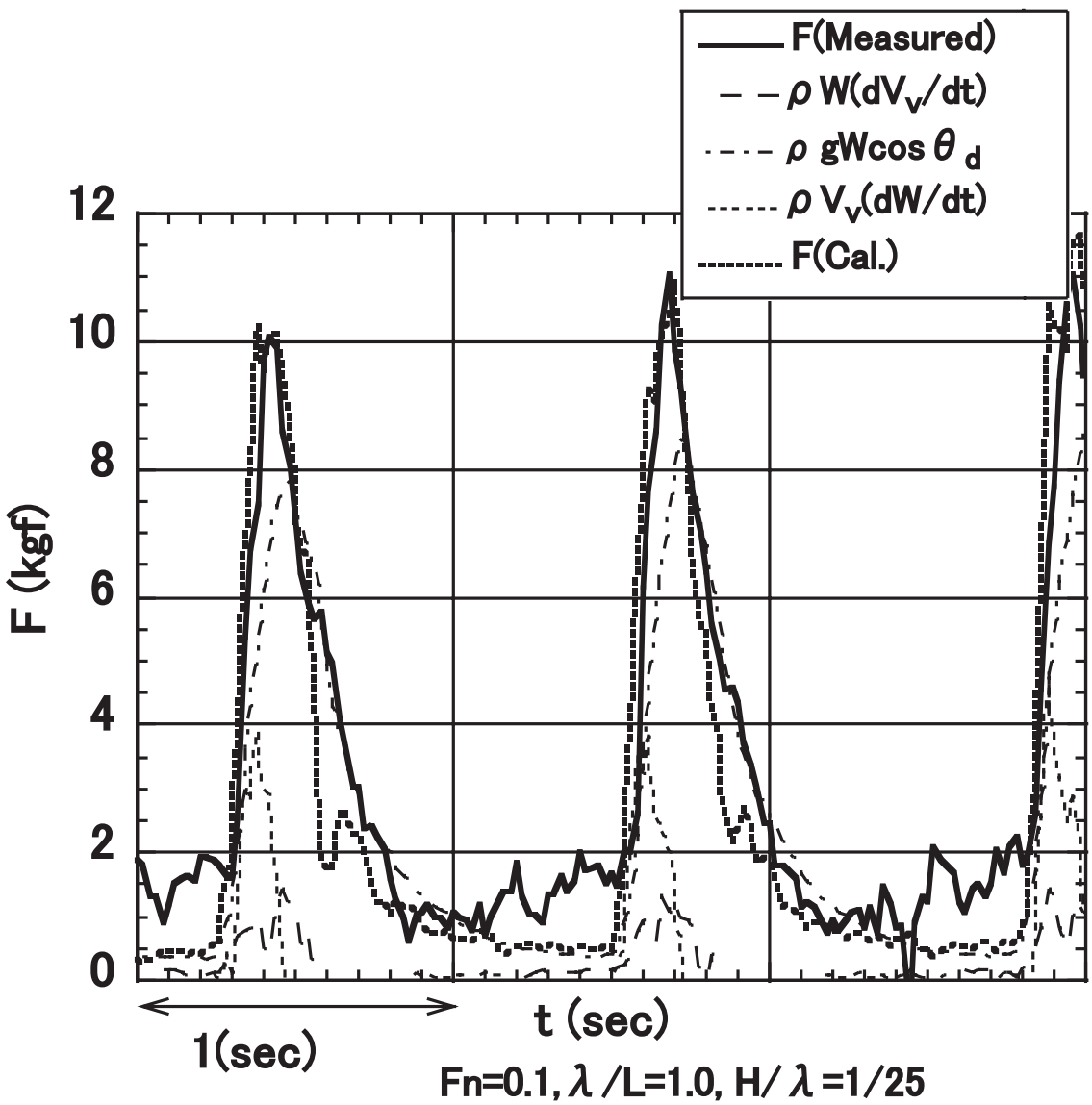

Figure 3.11: Relation between green water load and volume (Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda / L = 1.0$, $H/\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$)

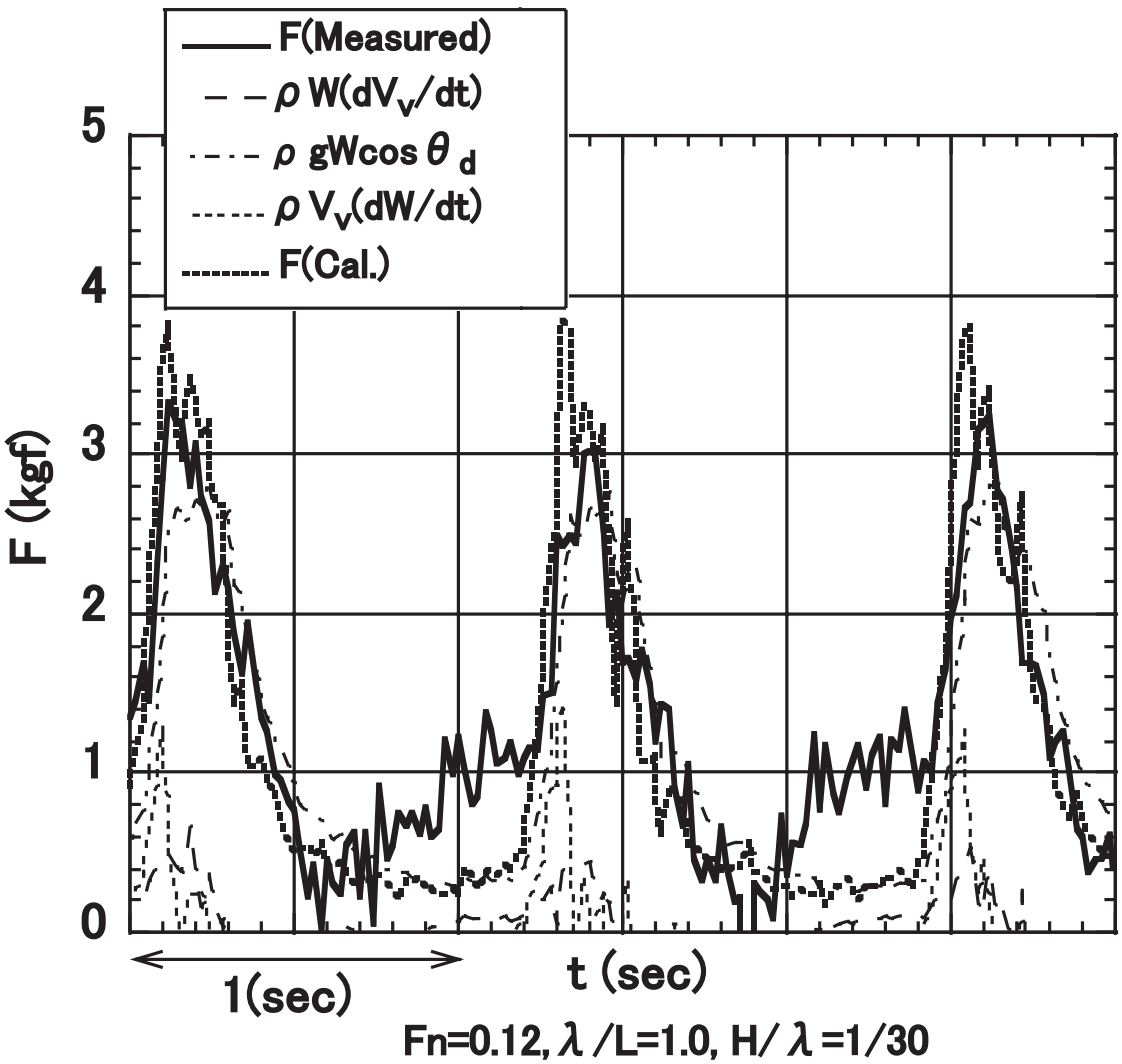

Figure 3.12: Relation between green water load and volume (Tanker, $F_n = 0.12$, $\lambda\ /L = 1.0$, $\mathrm{H}/\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

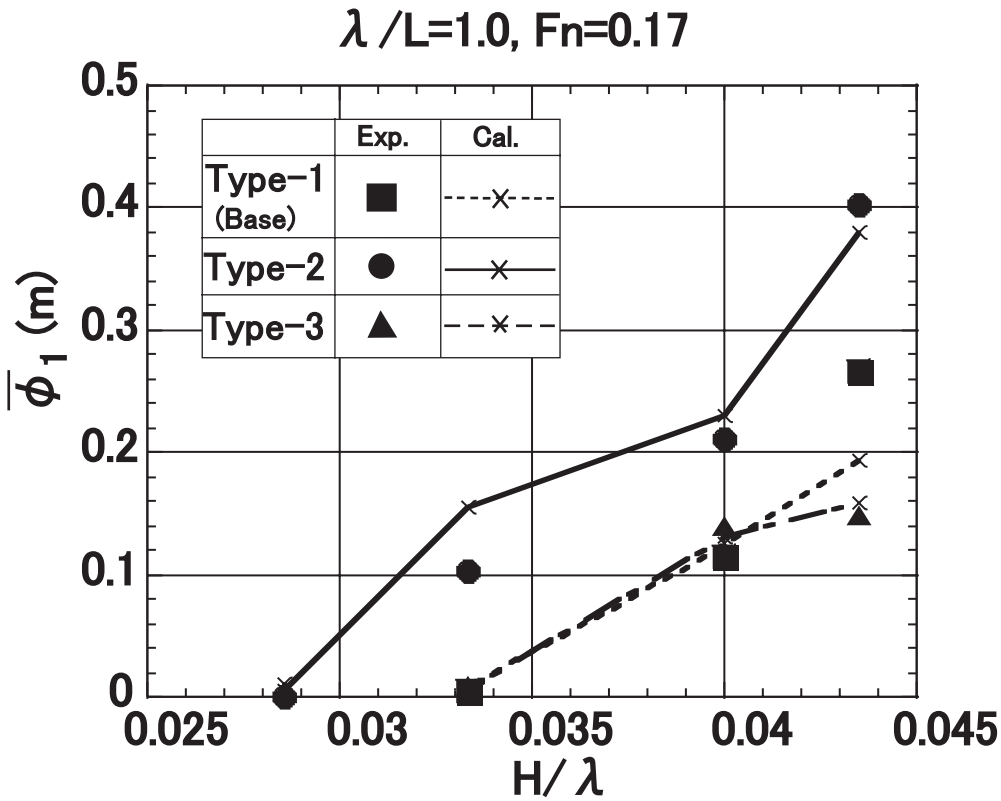

Figure 3.13: Comparison between measured and estimated green water height at S.S.9 (λ/L=1.0, F_n=0.17, χ = 180 °).

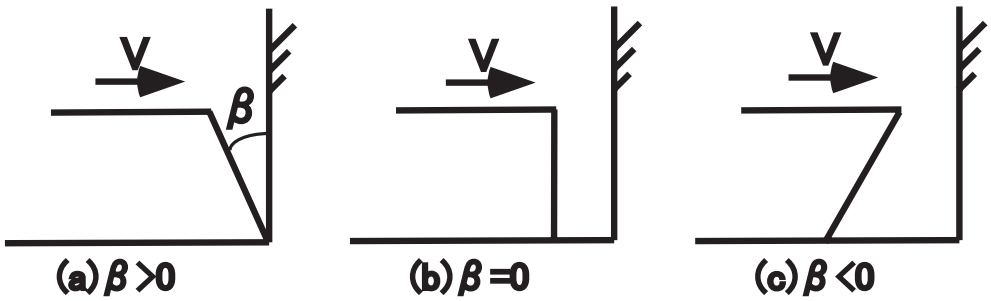

Figure 3.14: Classification of wave impact models ((a)Wagner type, (b)Bagnold+Wagner Type, (c)Bagnold Type)

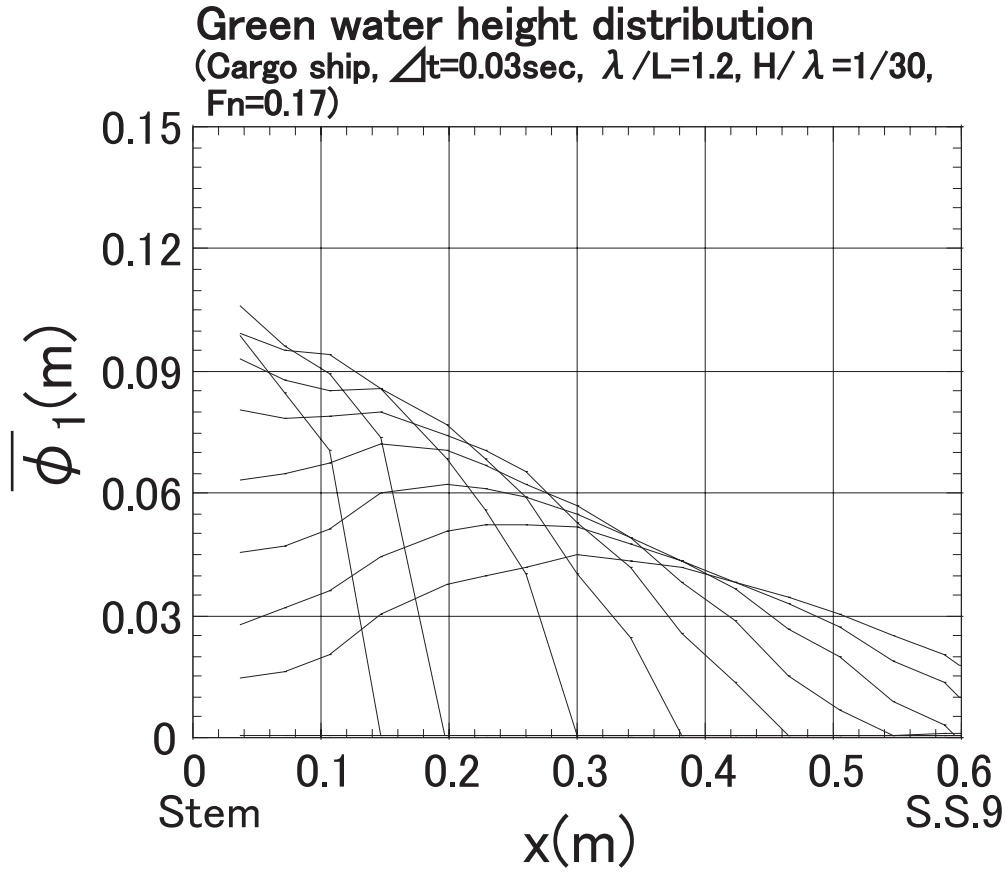

Figure 3.15: Water height distribution on deck (Cargo ship, Δt=0.03sec, λ/L =1.2, H/λ=1/30, F_n=0.17, χ=180 °)

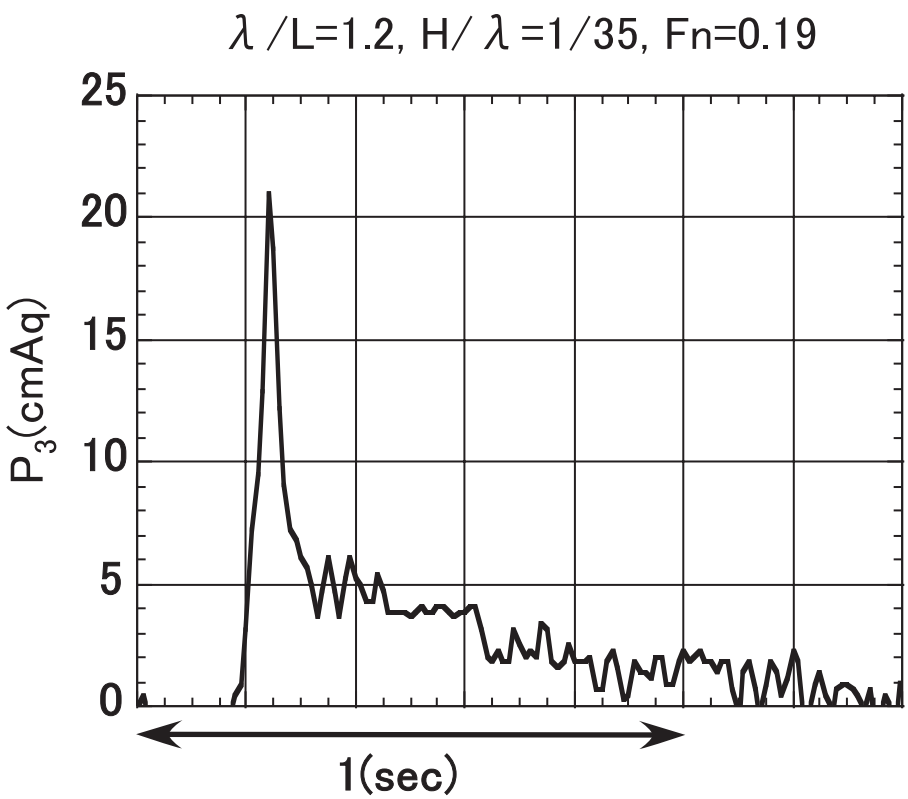

Figure 3.16: Time history of horizontal impact pressure (Cargo ship,S.S.9, λ/L =1.2, H/λ=1/35, F_n=0.19, χ=180 °)

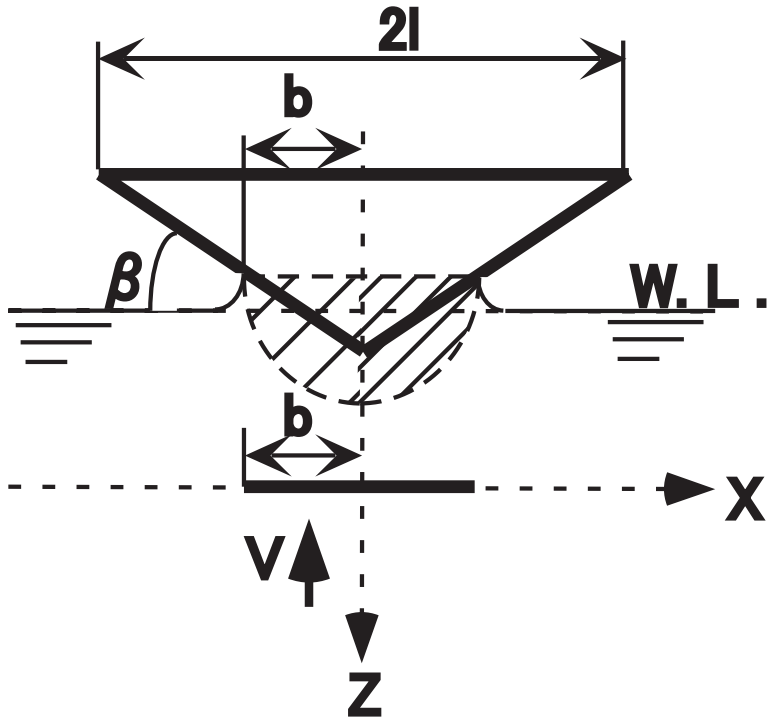

Figure 3.17: Water impact mopdel of Wagner

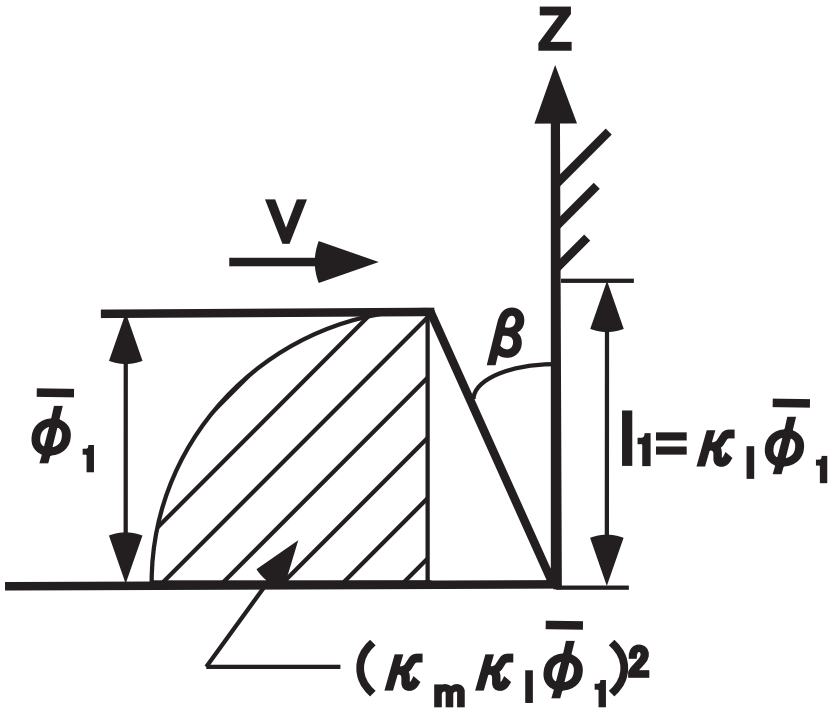

Figure 3.18: Model of green water impact

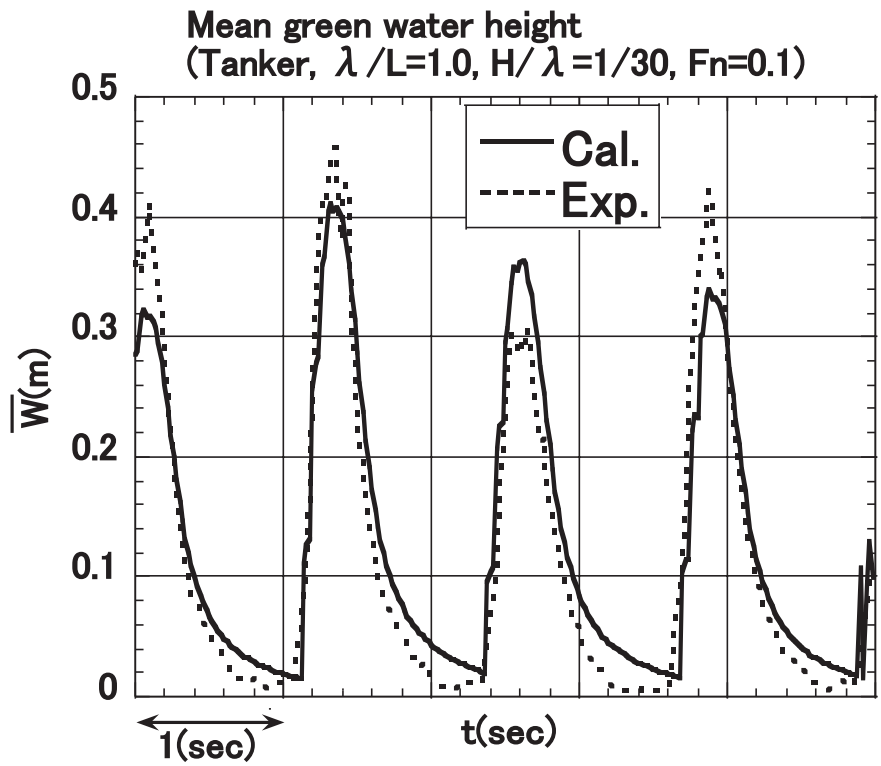

Figure 3.19: Time history of green water volume (mean green water height) (Tanker, $F_n = 0.1$, $\lambda\ /L = 1.0$, H/$\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

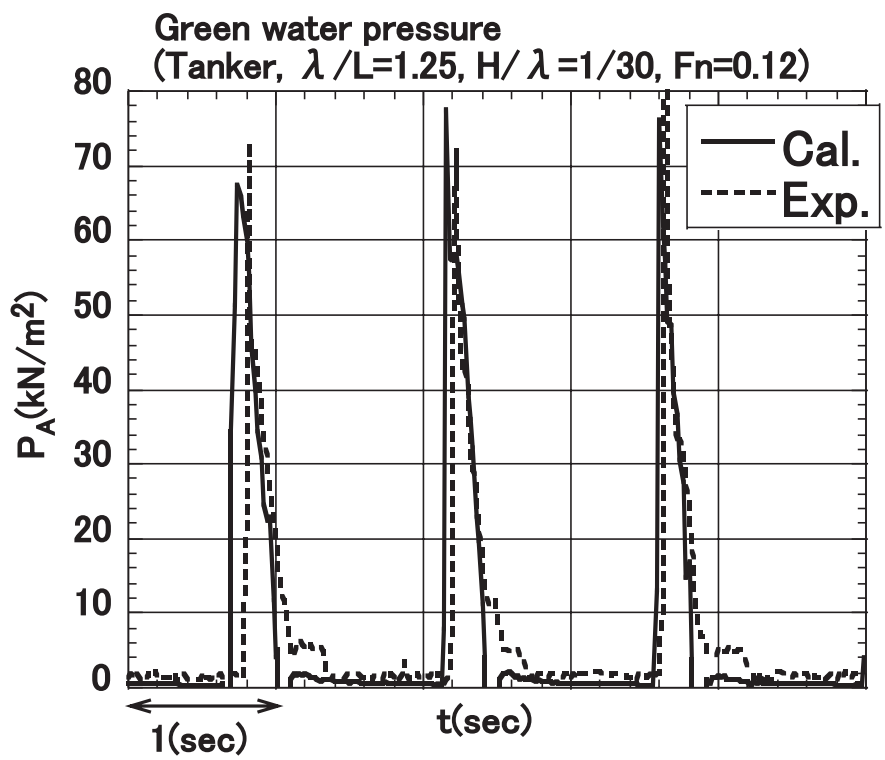

Figure 3.20: Time history of green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., $F_n = 0.12$, $\lambda\ /L = 1.25$, H/$\lambda = 1/30$, $\chi = 180\ ^\circ$)

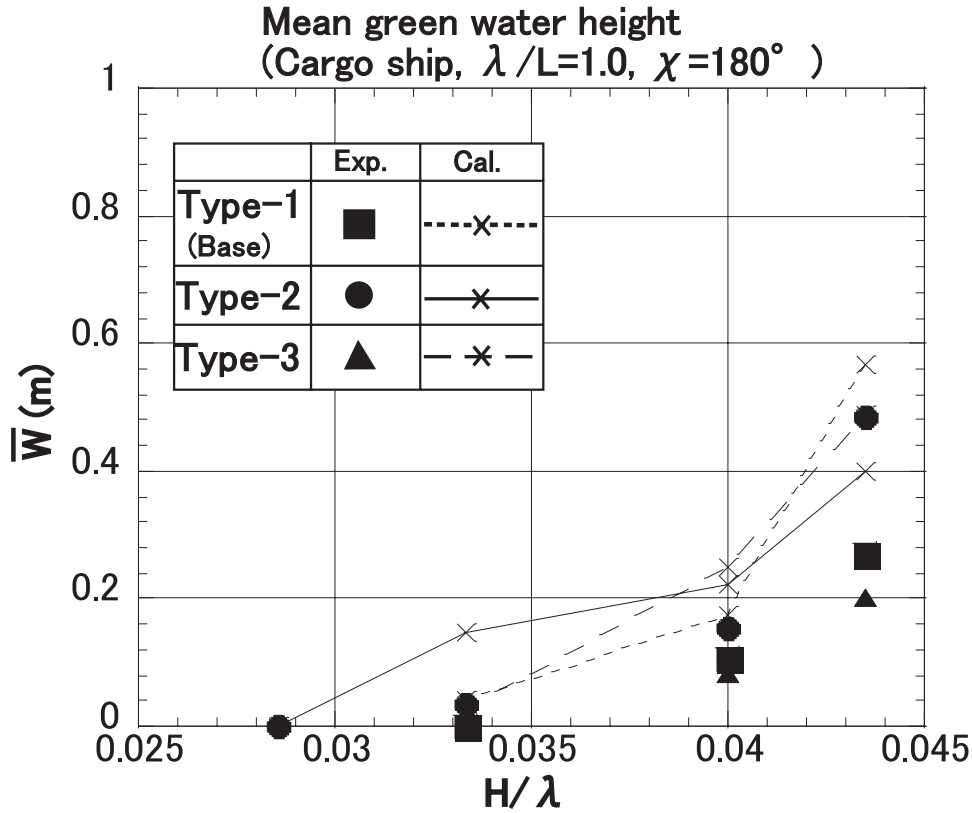

Figure 3.21: Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

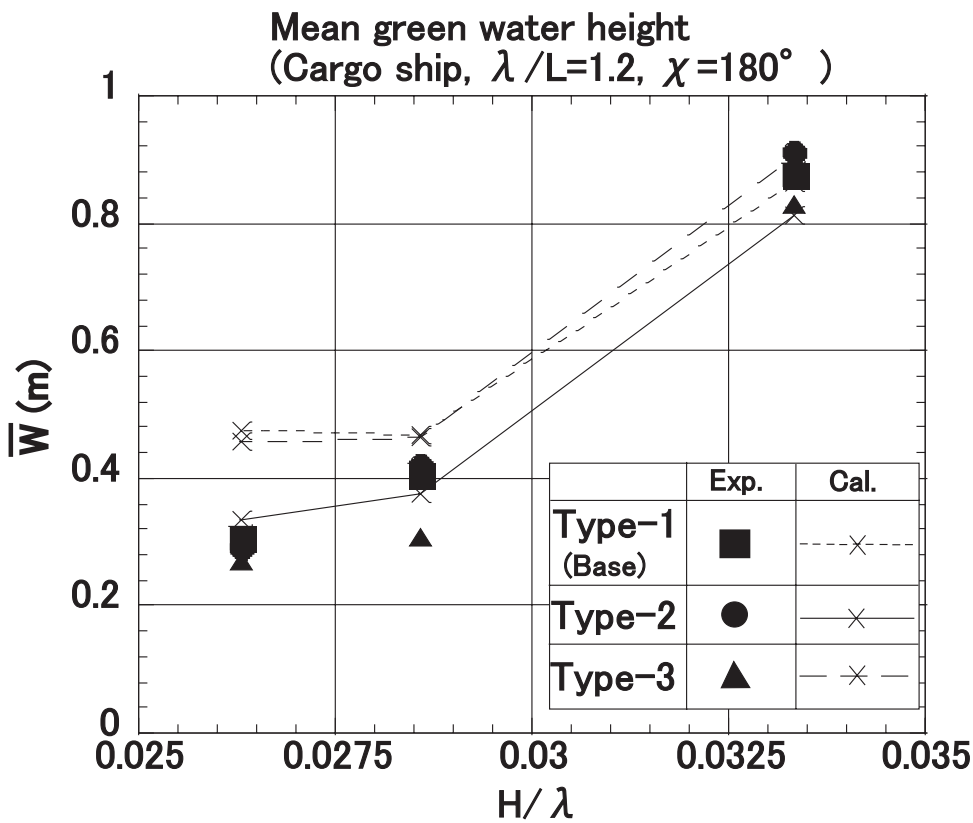

Figure 3.22: Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

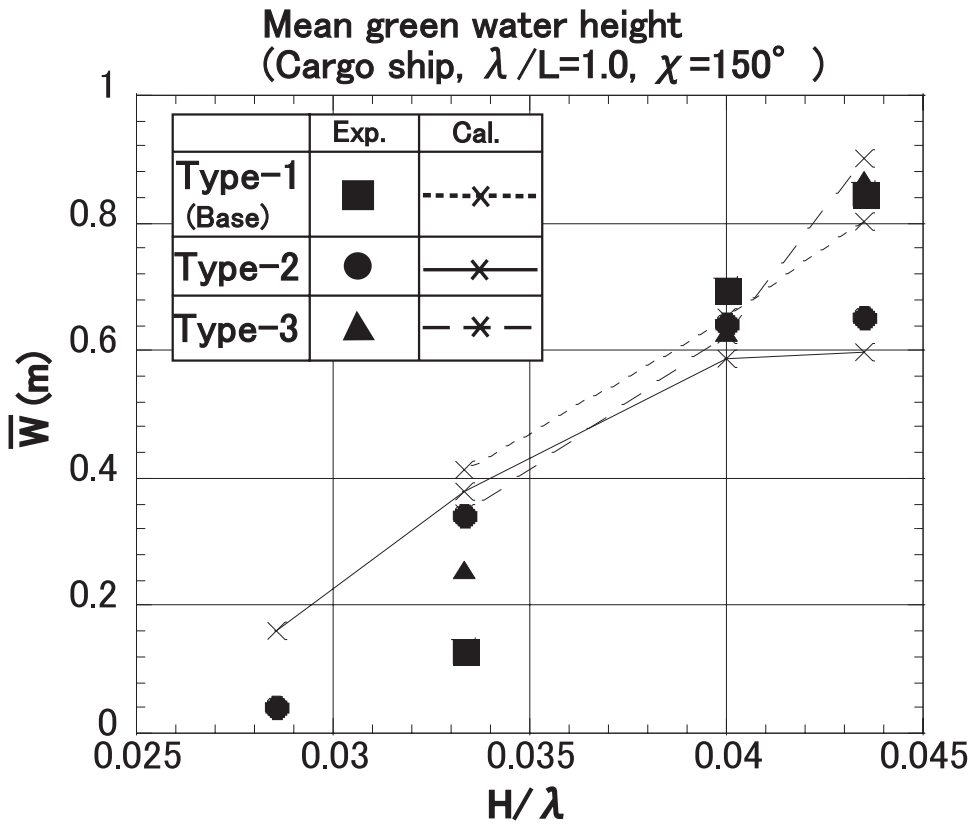

Figure 3.23: Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

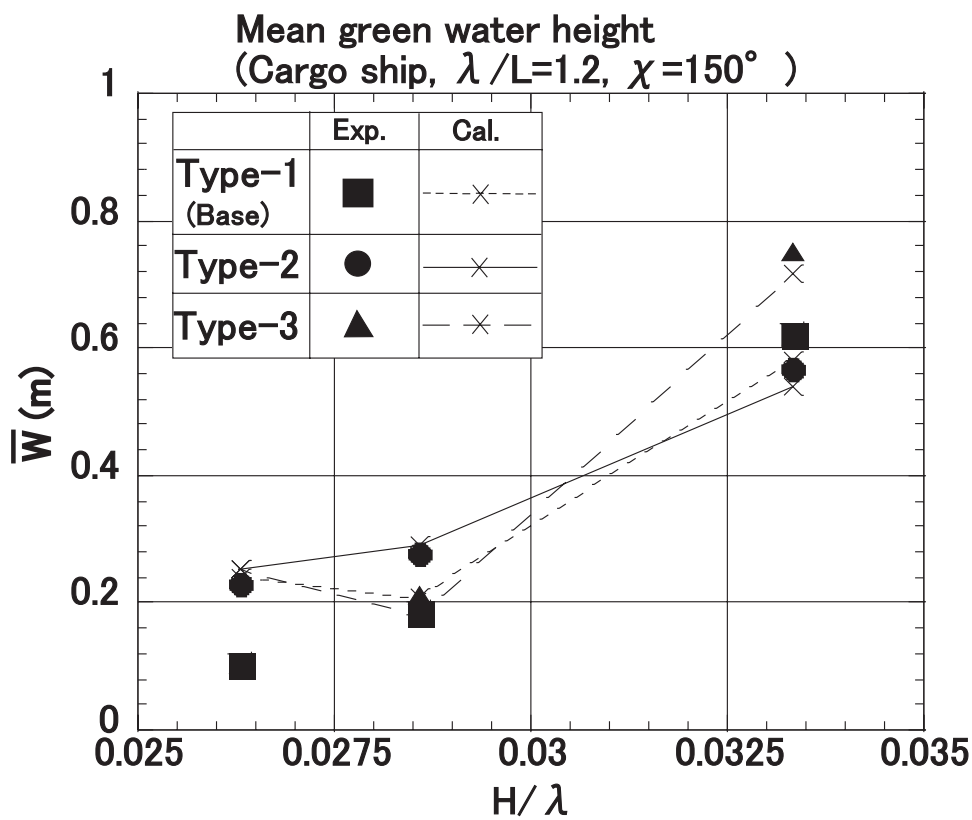

Figure 3.24: Comparison between measured and estimated green water volume (mean green water height) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

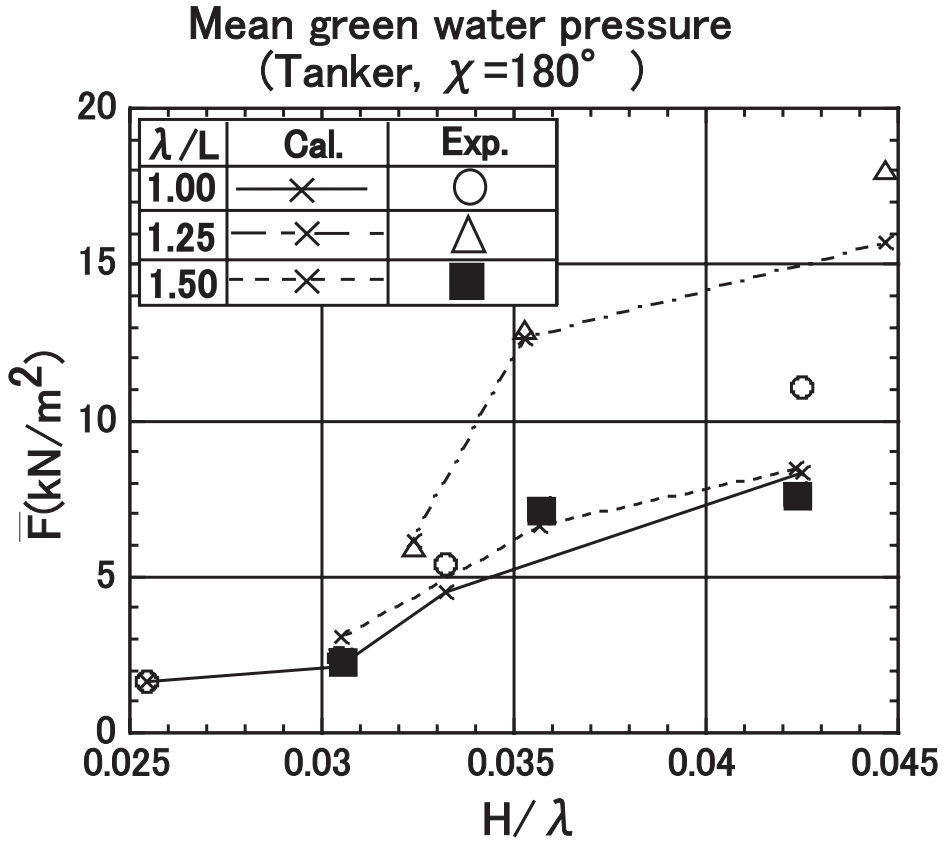

Figure 3.25: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, $F_n = 0.1$, $\chi = 180\ ^\circ$)

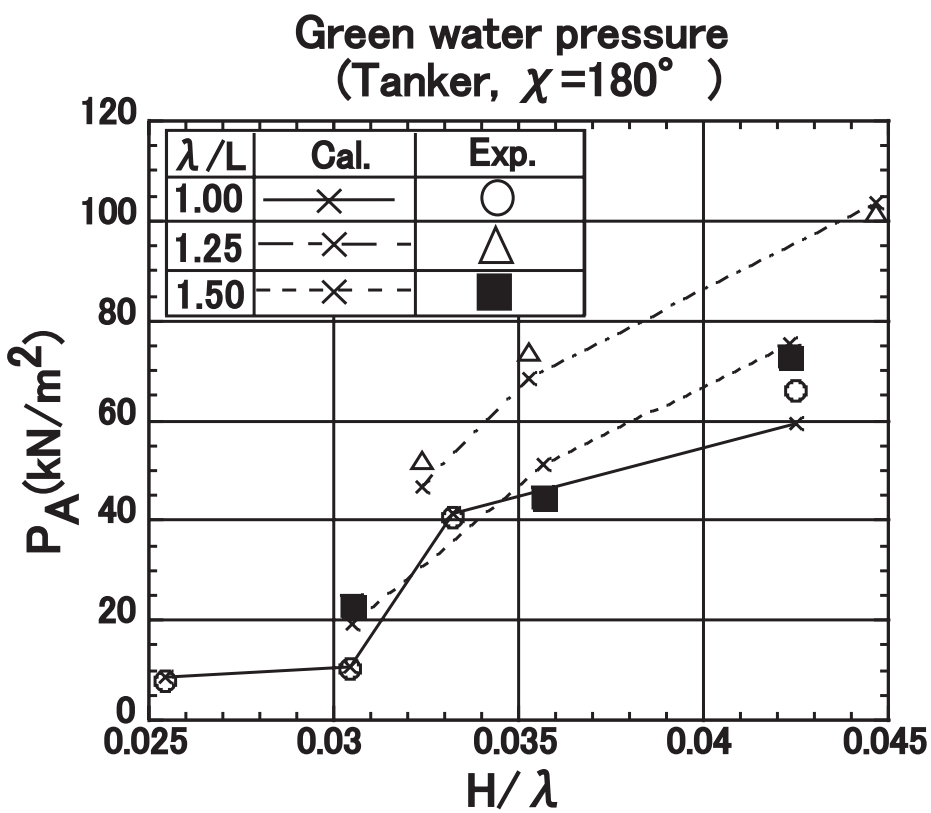

Figure 3.26: Comparison between measured and estimated green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., $F_n = 0.1$, $\chi = 180\ ^\circ$)

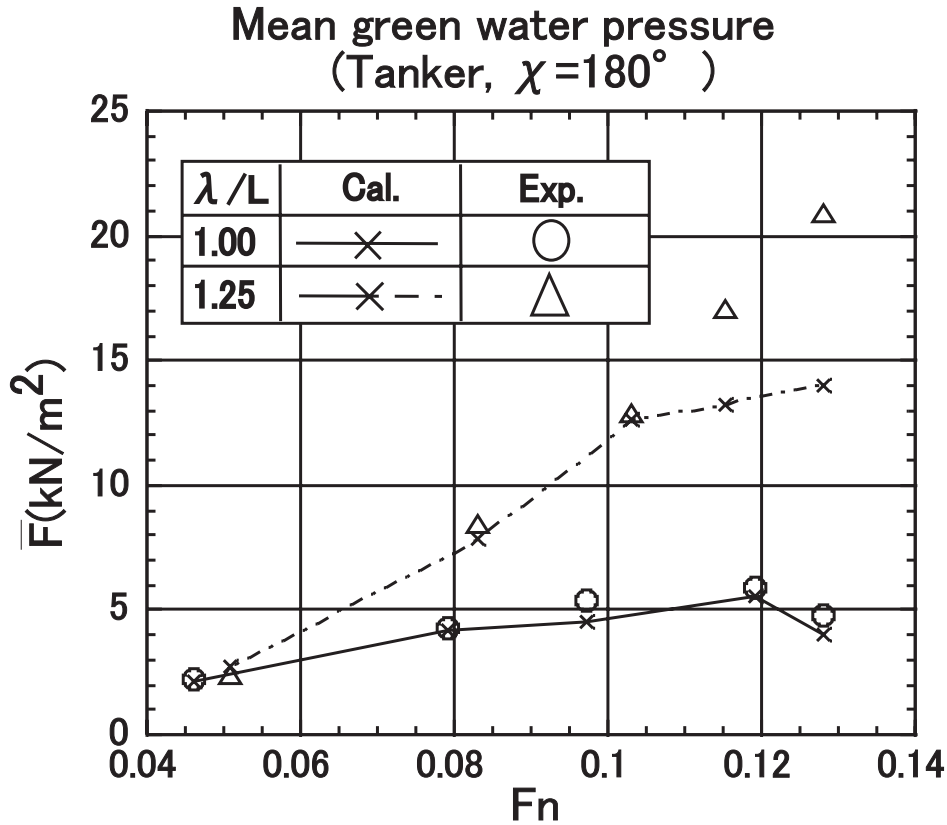

Figure 3.27: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 180 °)

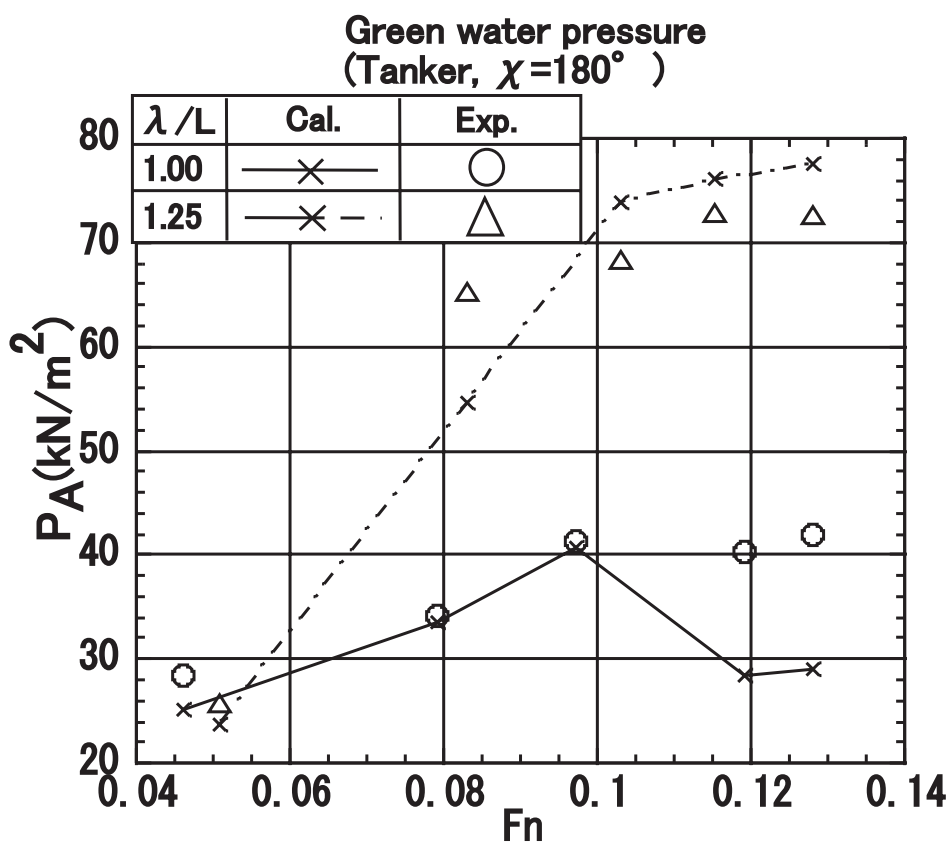

Figure 3.28: Comparison between measured and estimated green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., H/λ=1/30, χ = 180 °)

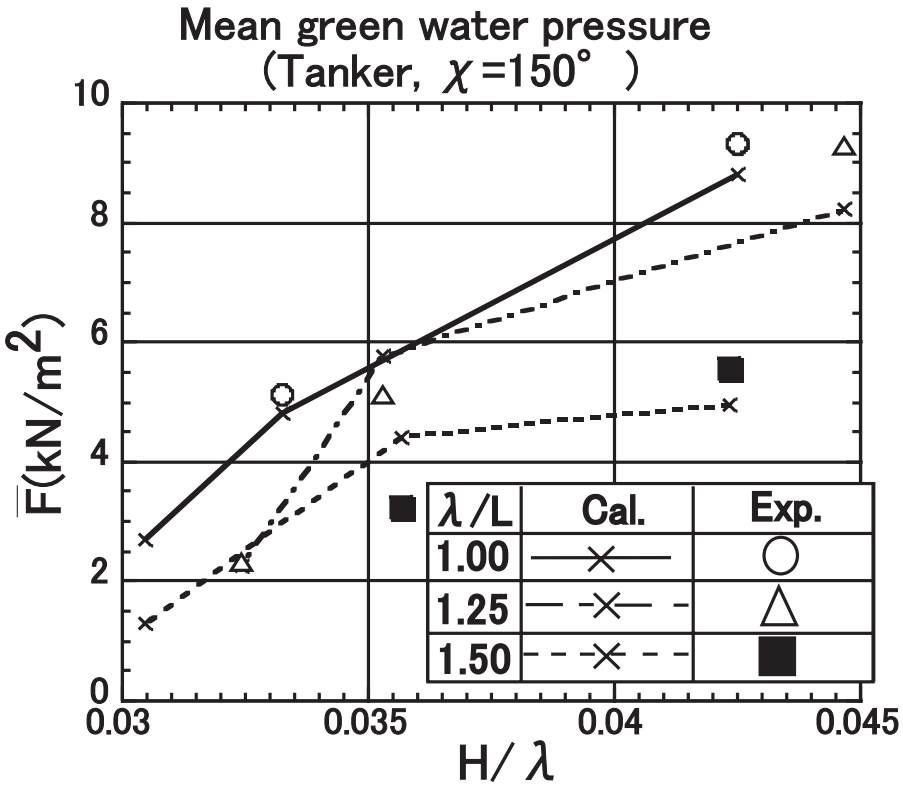

Figure 3.29: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, $F_n = 0.1$, $\chi = 150\ ^\circ$)

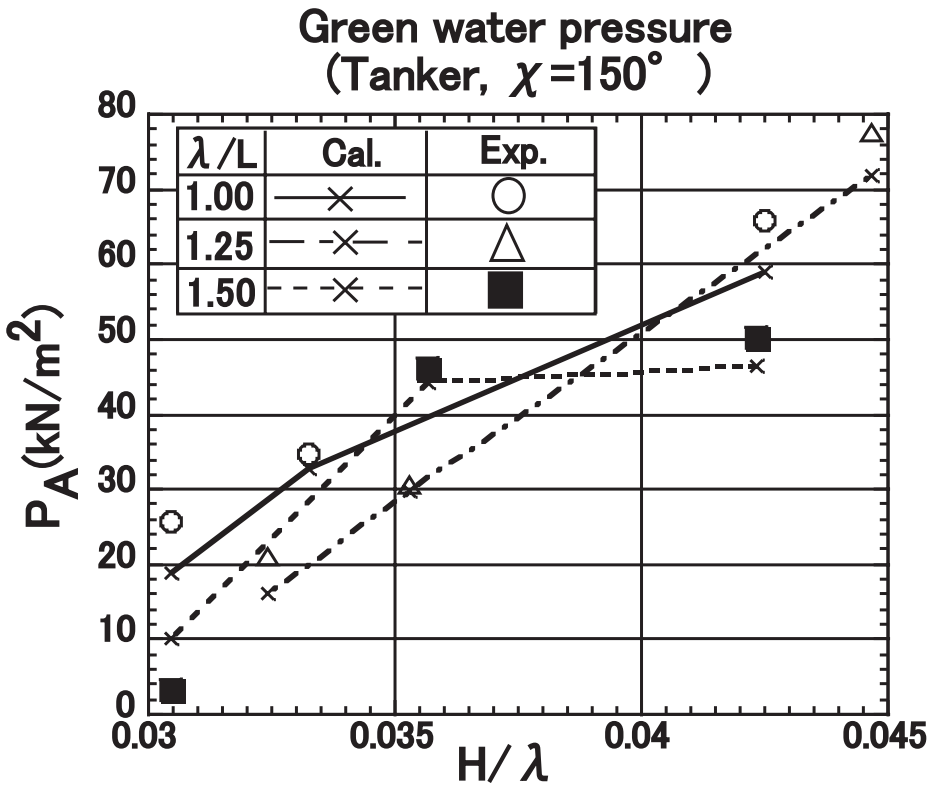

Figure 3.30: Comparison between measured and estimated green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., F_n= 0.1, $\chi = 150\ ^\circ$)

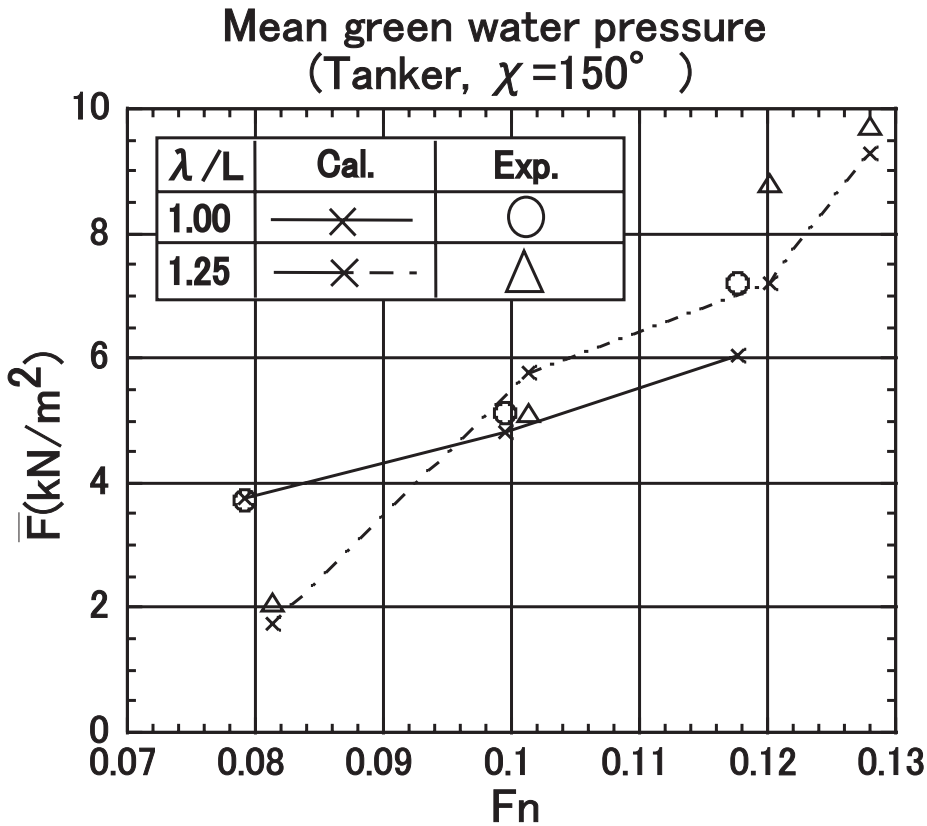

Figure 3.31: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Tanker, H/λ=1/30, χ = 150 °)

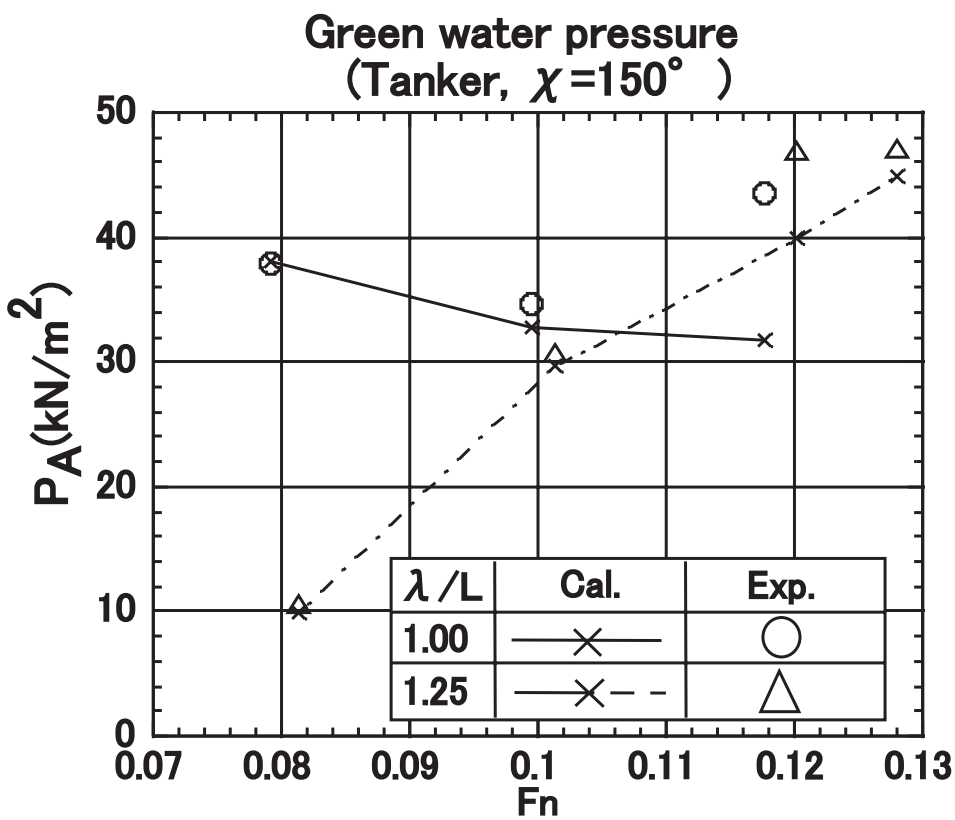

Figure 3.32: Comparison between measured and estimated green water pressure (Tanker, 120mm fore from F.P., H/λ=1/30, χ = 150 °)

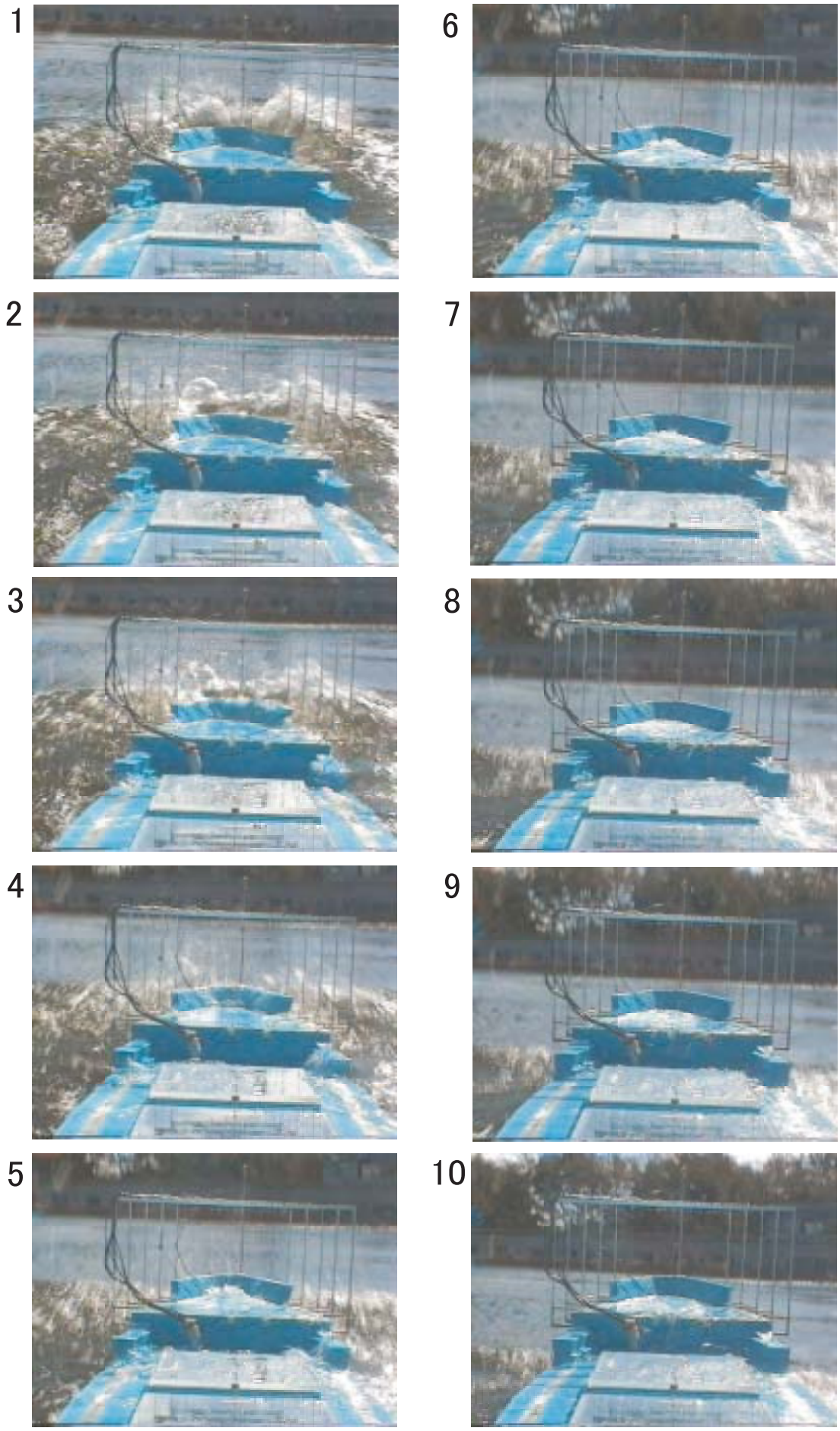

Figure 3.33: Flow of green water on deck (Tanker, F_n=0.1, χ=150 °, H/λ=1/35)

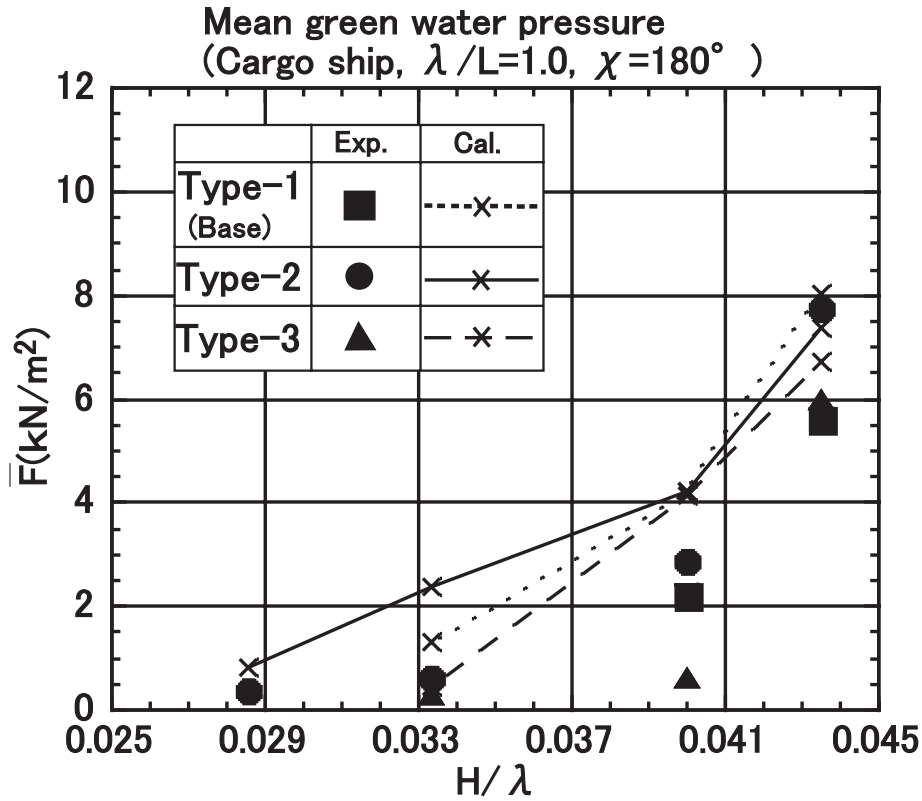

Figure 3.34: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

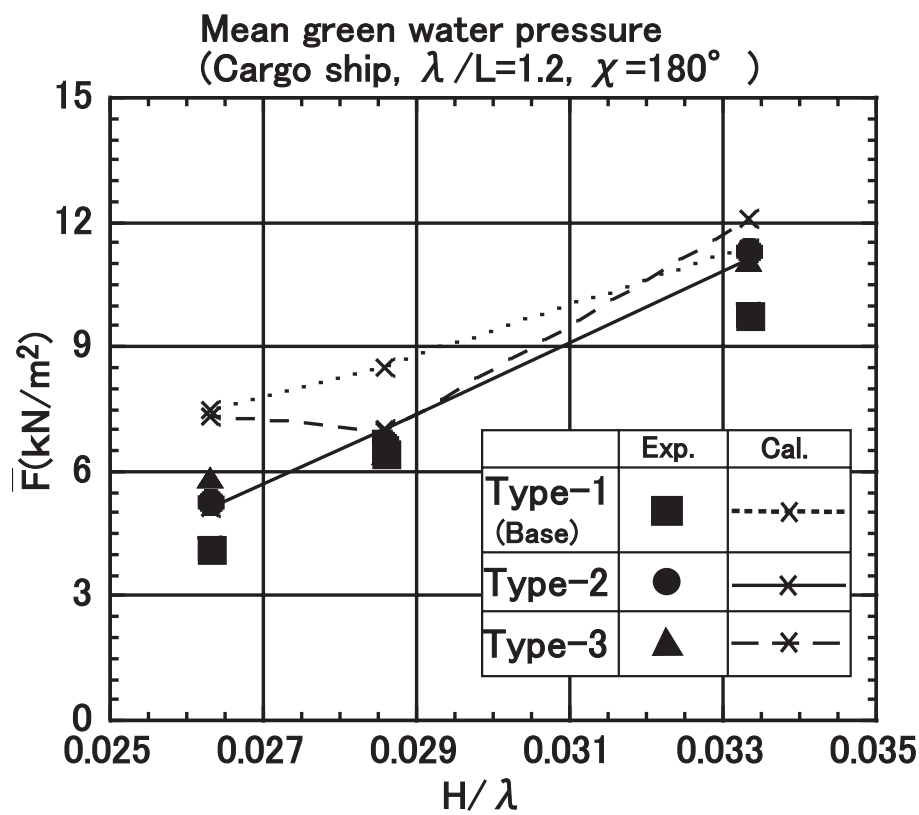

Figure 3.35: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

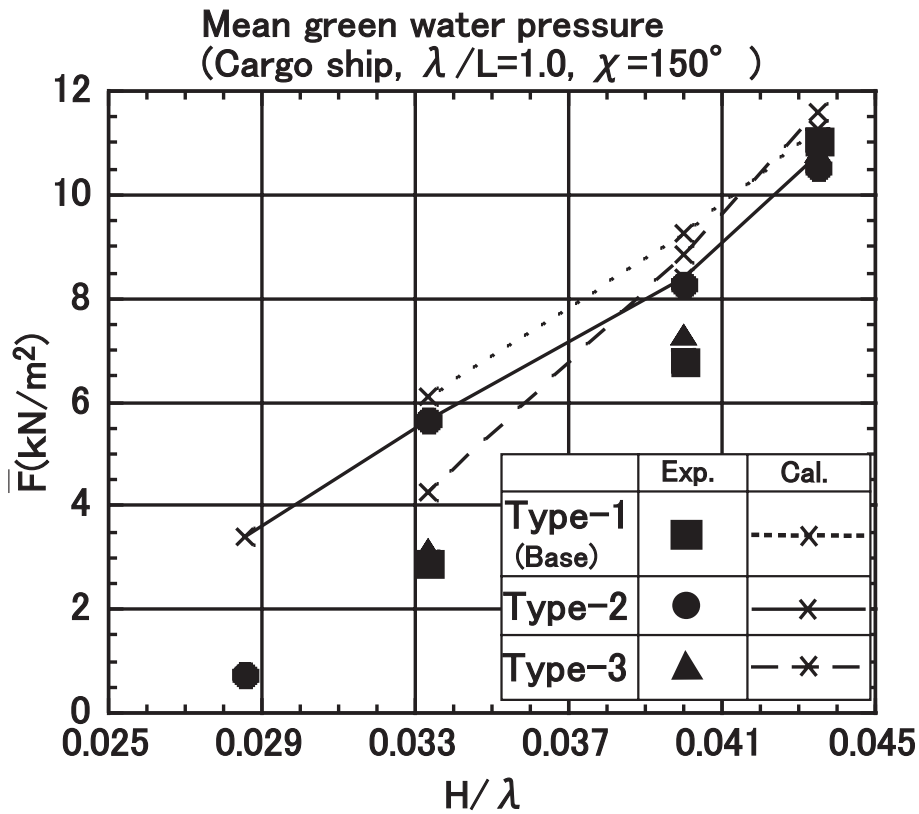

Figure 3.36: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

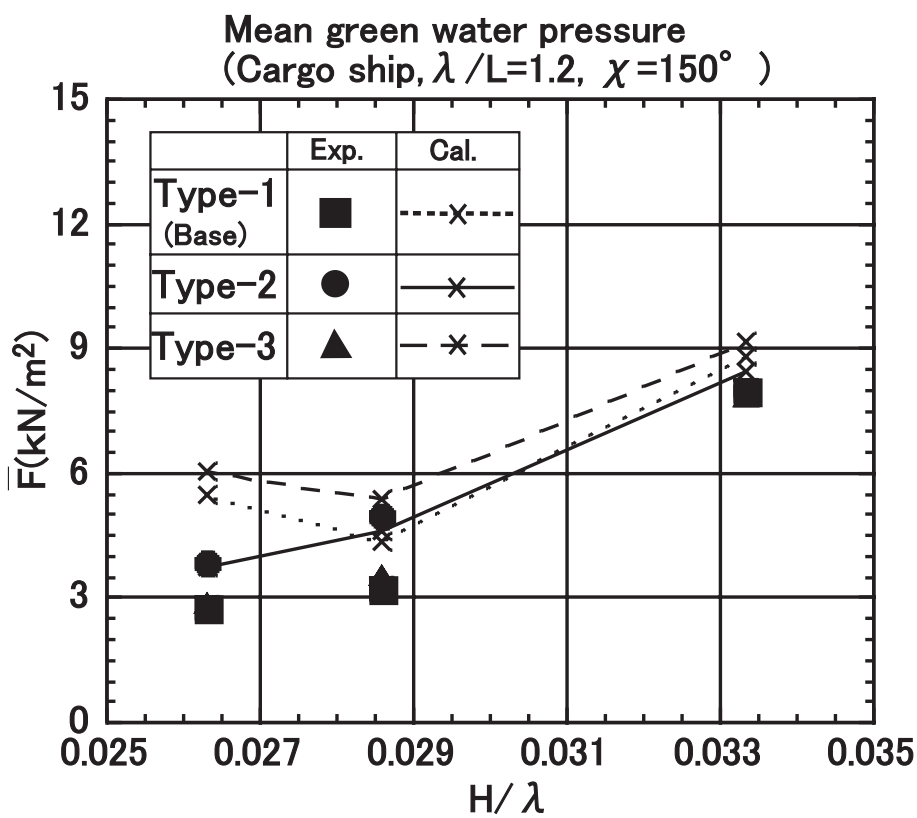

Figure 3.37: Comparison between measured and estimated green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

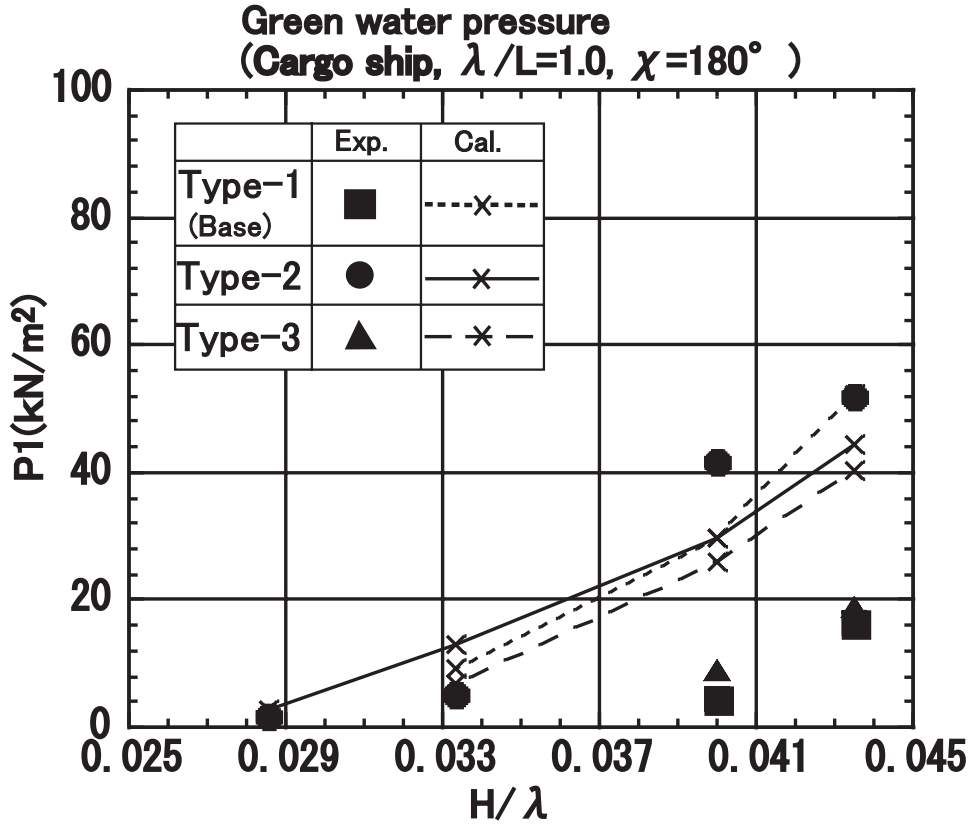

Figure 3.38: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

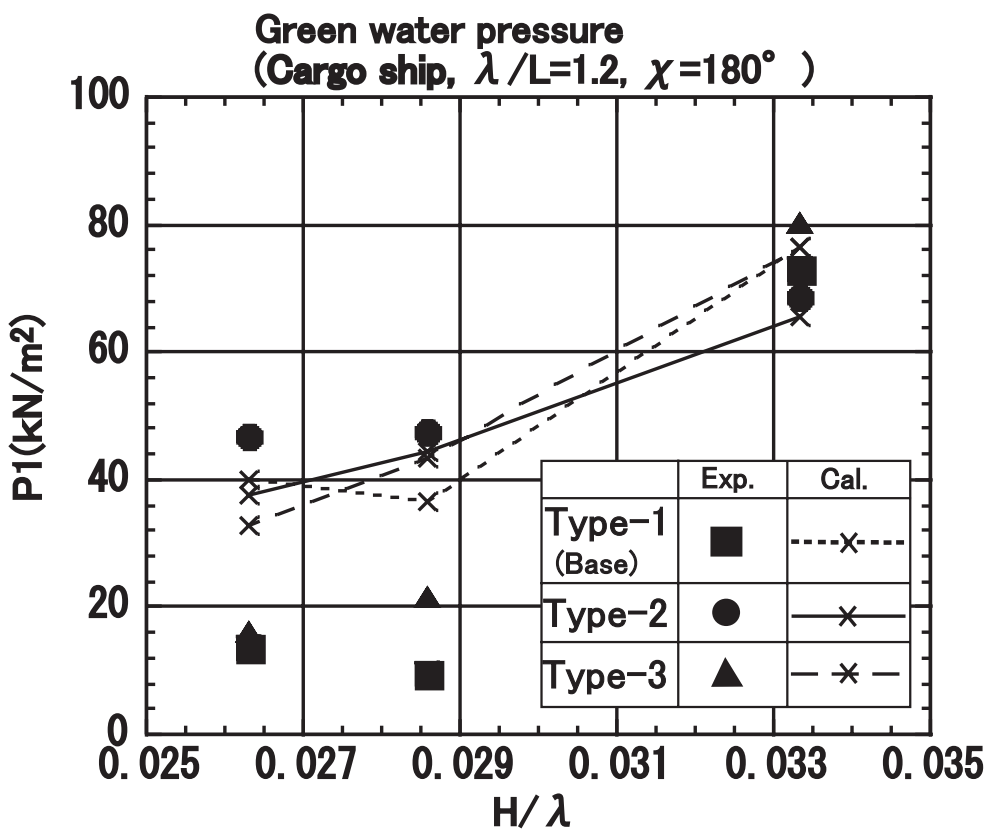

Figure 3.39: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

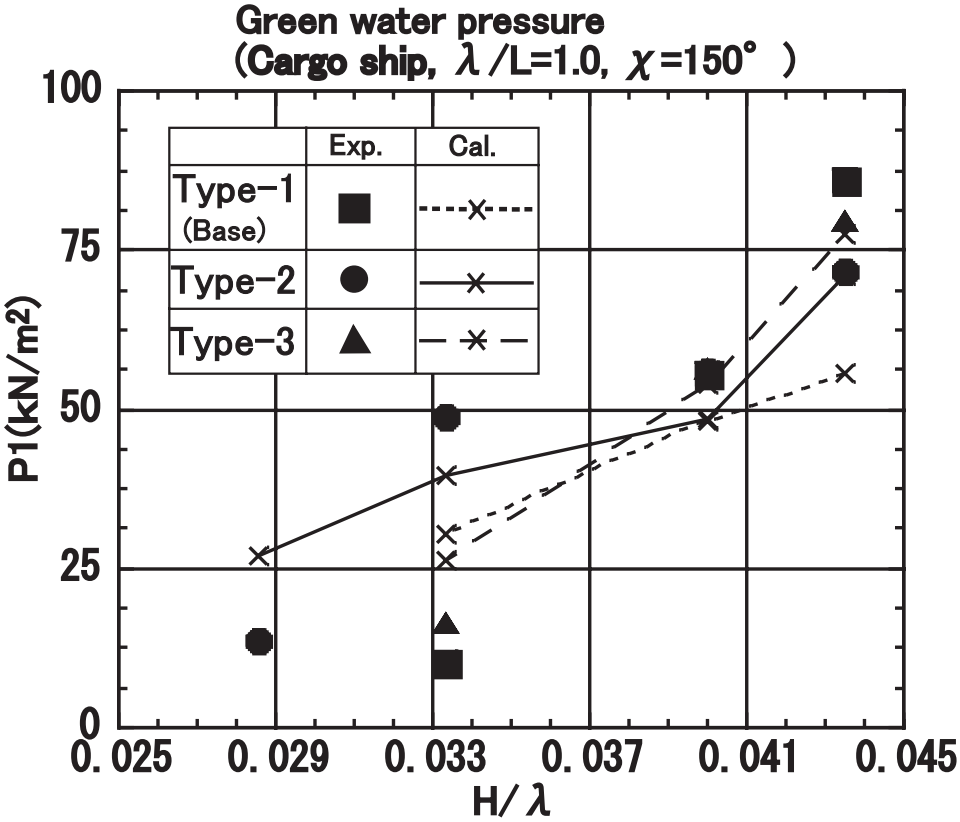

Figure 3.40: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

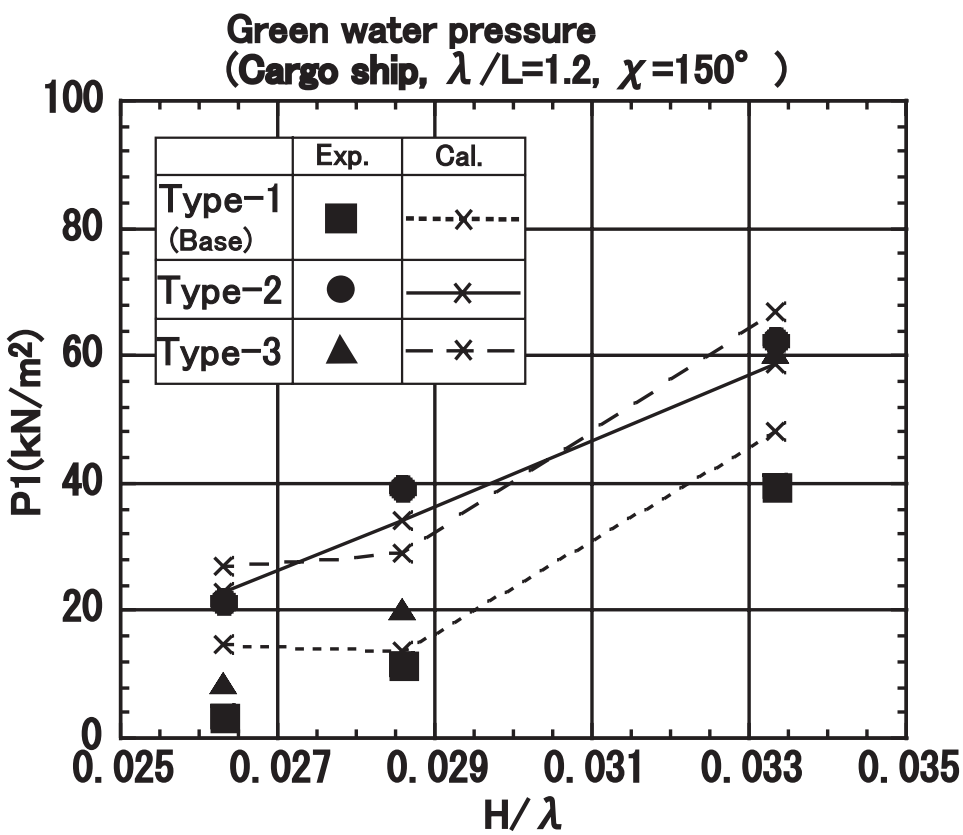

Figure 3.41: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm fore from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

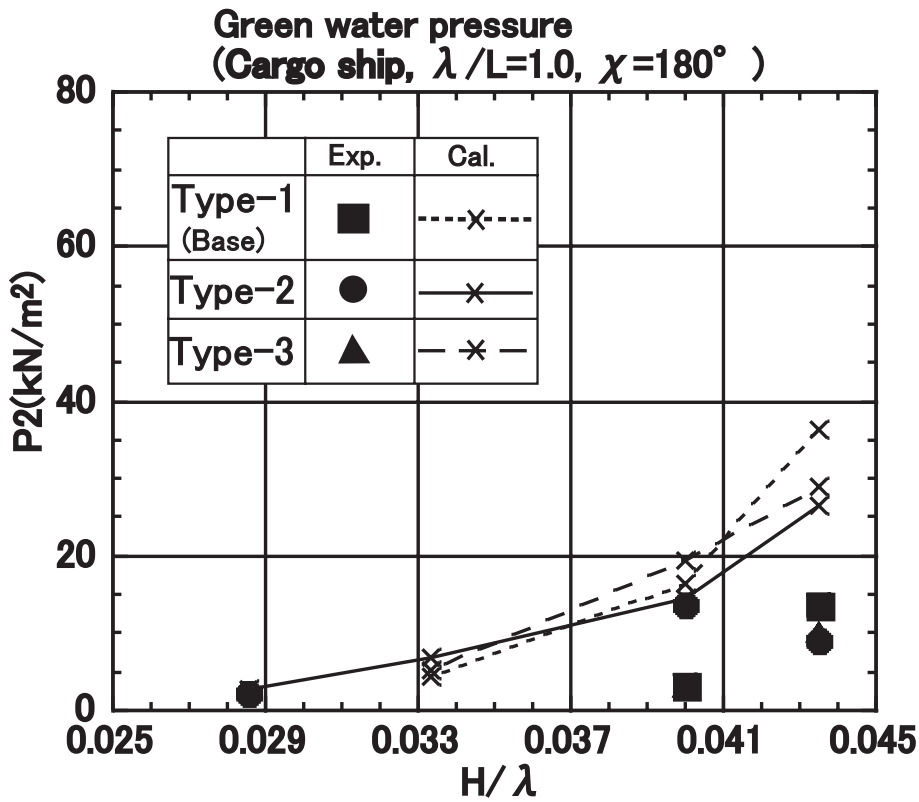

Figure 3.42: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=180 °)

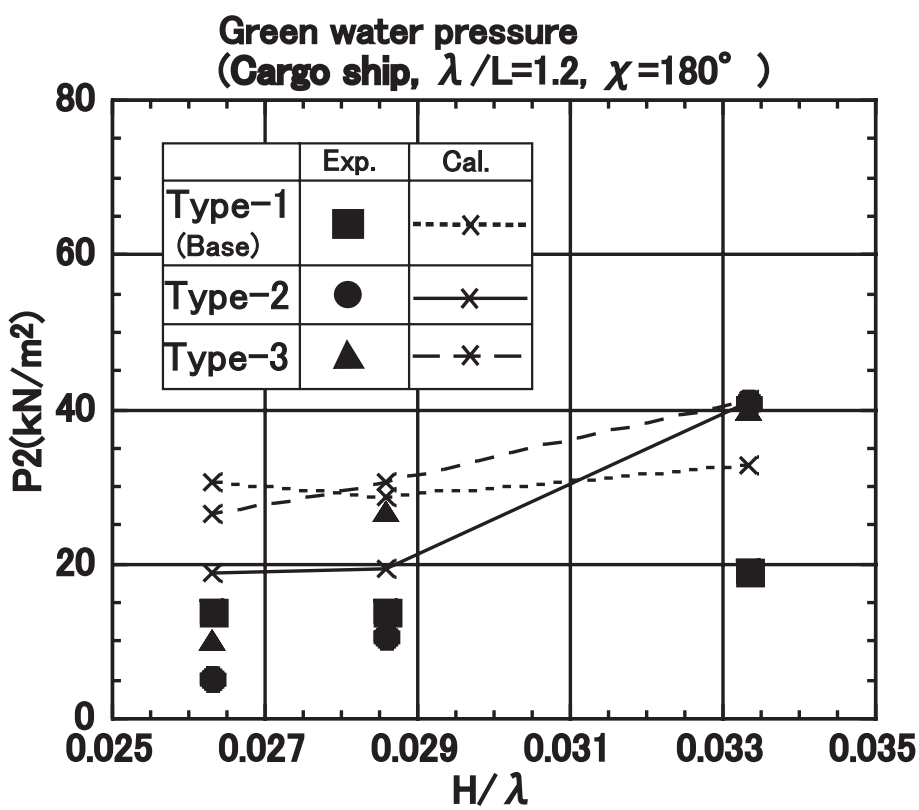

Figure 3.43: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=180 °)

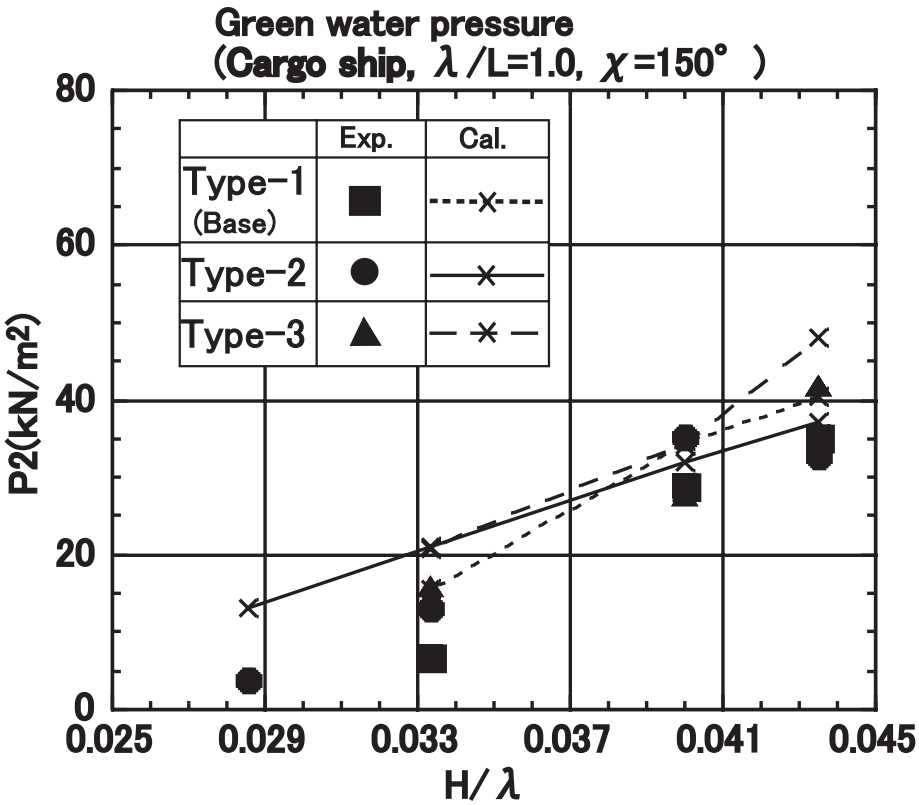

Figure 3.44: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.0, F_n=0.17, χ=150 °)

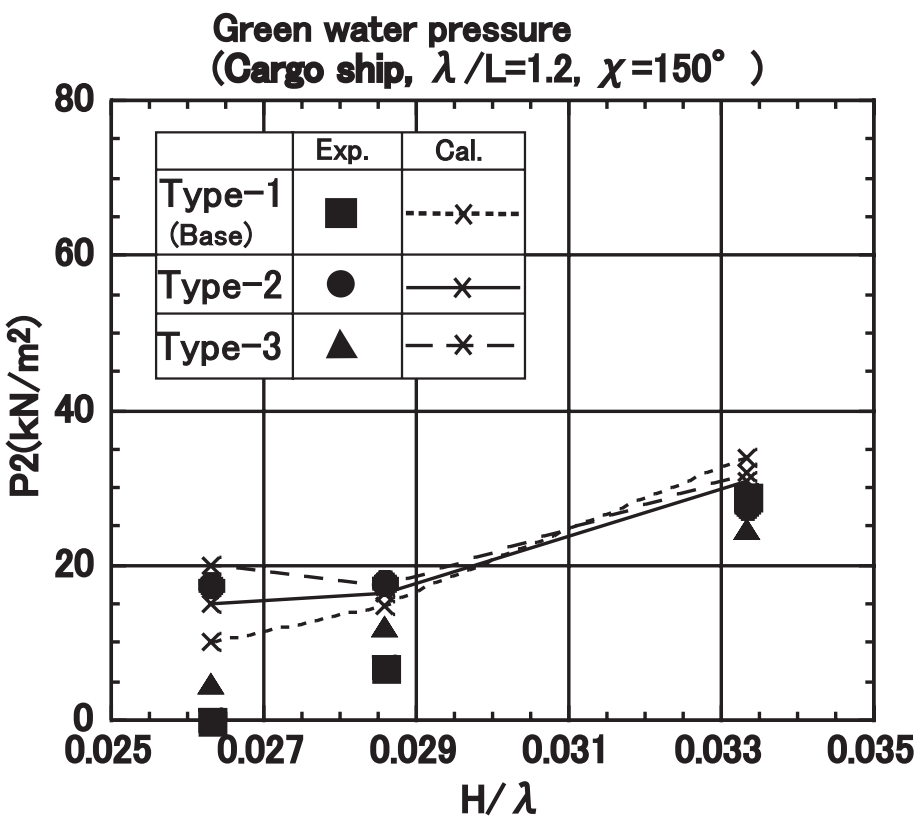

Figure 3.45: Comparison between measured and estimated green water pressure (Cargo ship, 50mm aft from F.P., λ/L =1.2, F_n=0.17, χ=150 °)

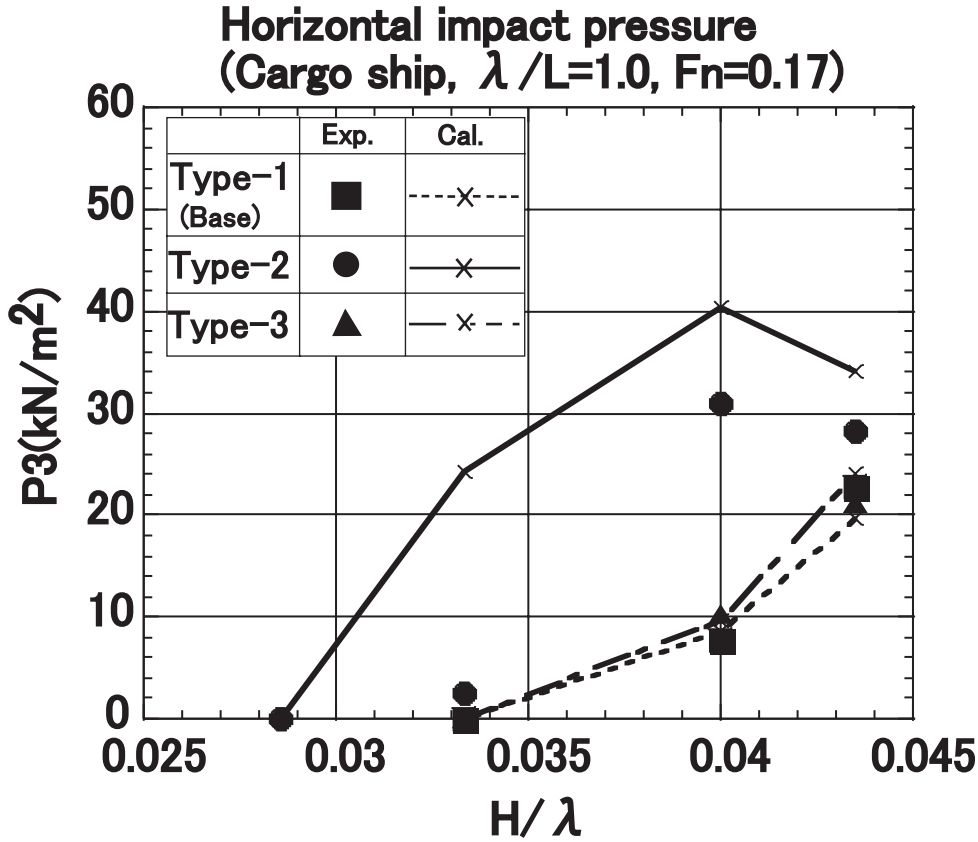

Figure 3.46: Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, $F_n = 0.17$, $\lambda\ /L = 1.0$, $\chi = 180\ ^\circ$).

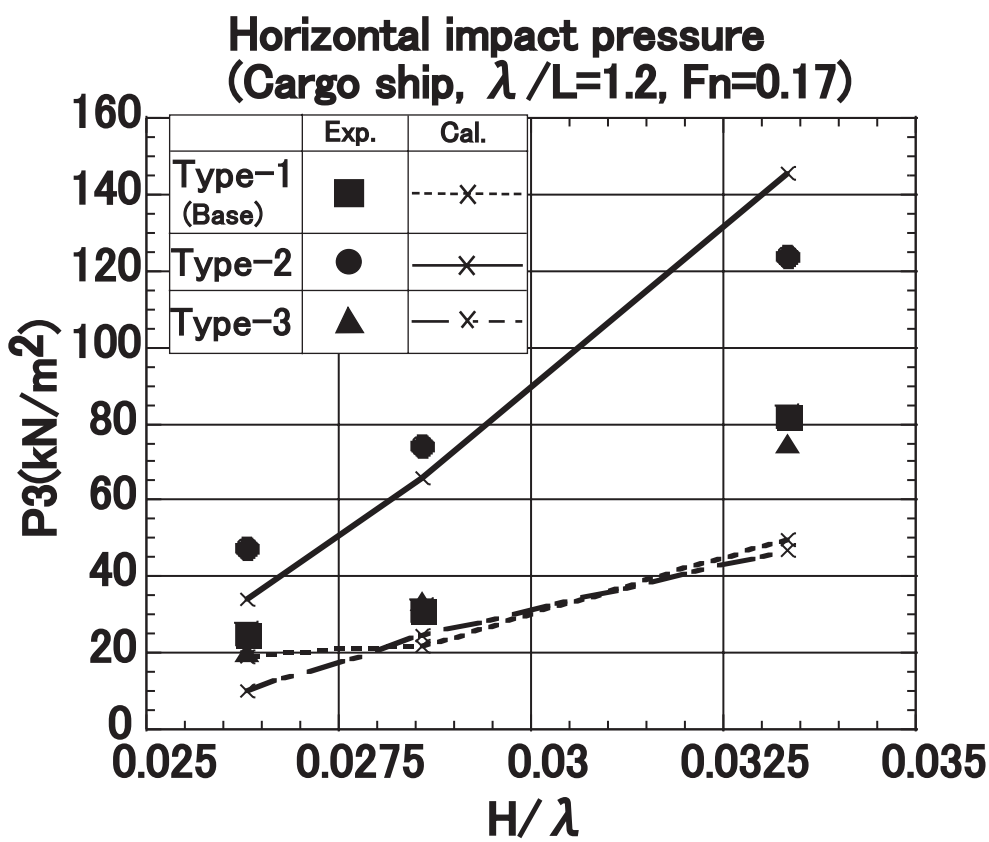

Figure 3.47: Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, $F_n = 0.17$, $\lambda\ /L = 1.2$, $\chi = 180\ ^\circ$).

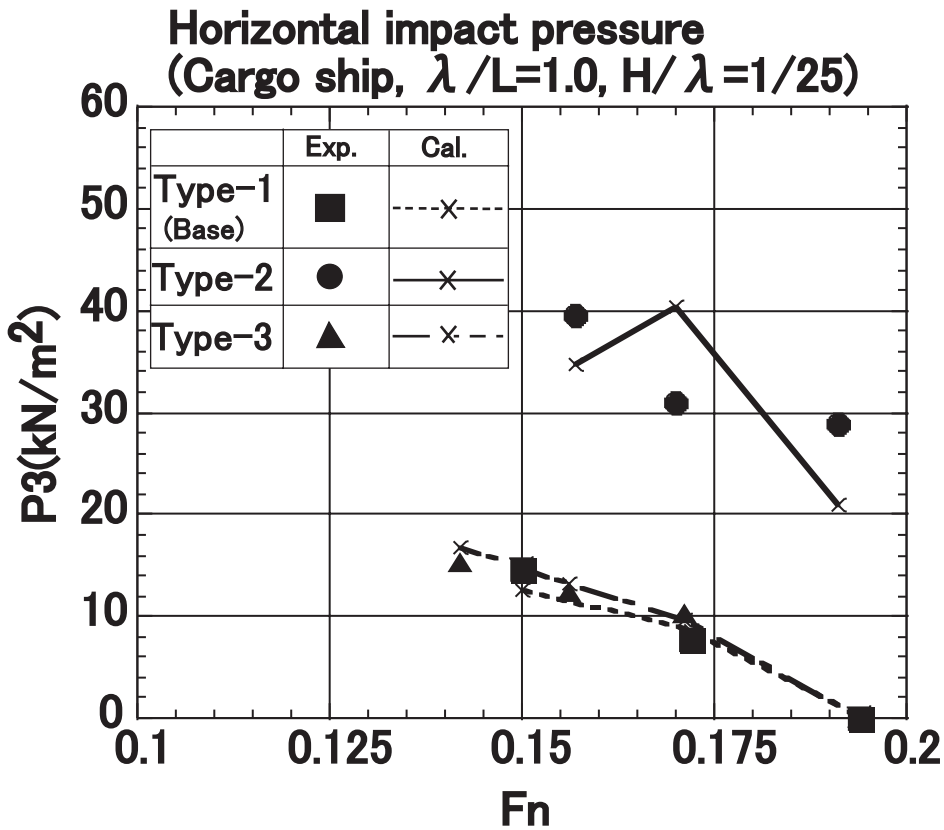

Figure 3.48: Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, $\lambda\ /L = 1.0$, H/$\lambda = 1/25$, $\chi = 180\ ^\circ$).

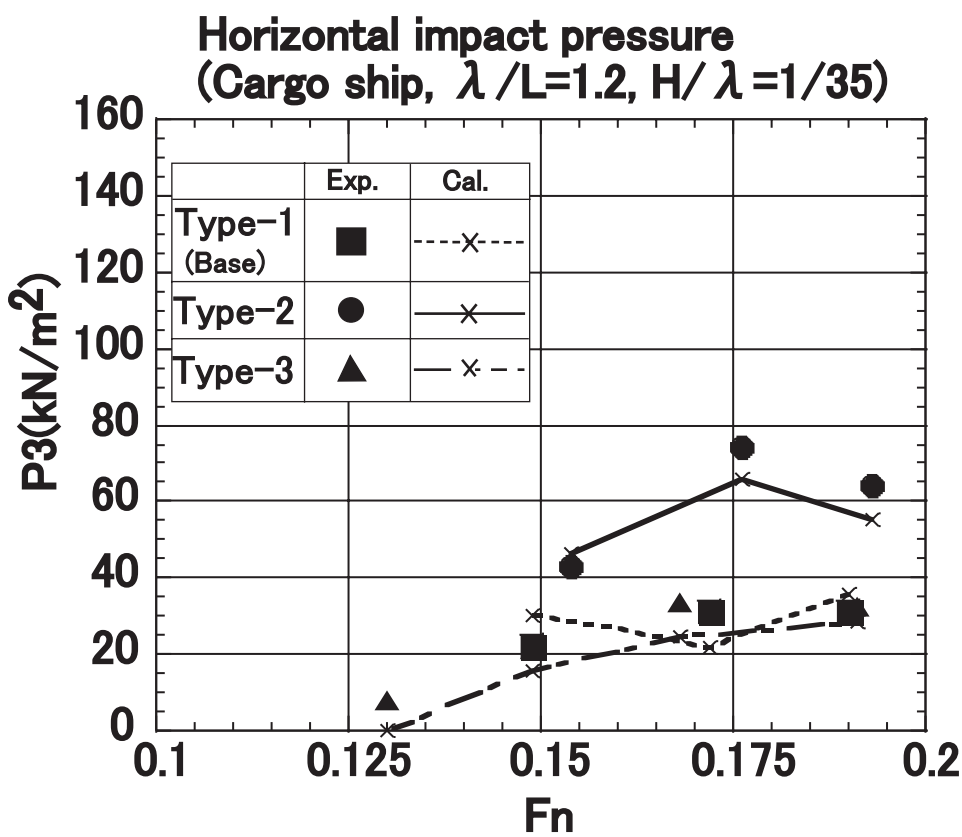

Figure 3.49: Comparison between measured and estimated horizontal impact pressure (Cargo ship, S.S.9, $\lambda\ /L = 1.2$, H/$\lambda = 1/35$, $\chi = 180\ ^\circ$).

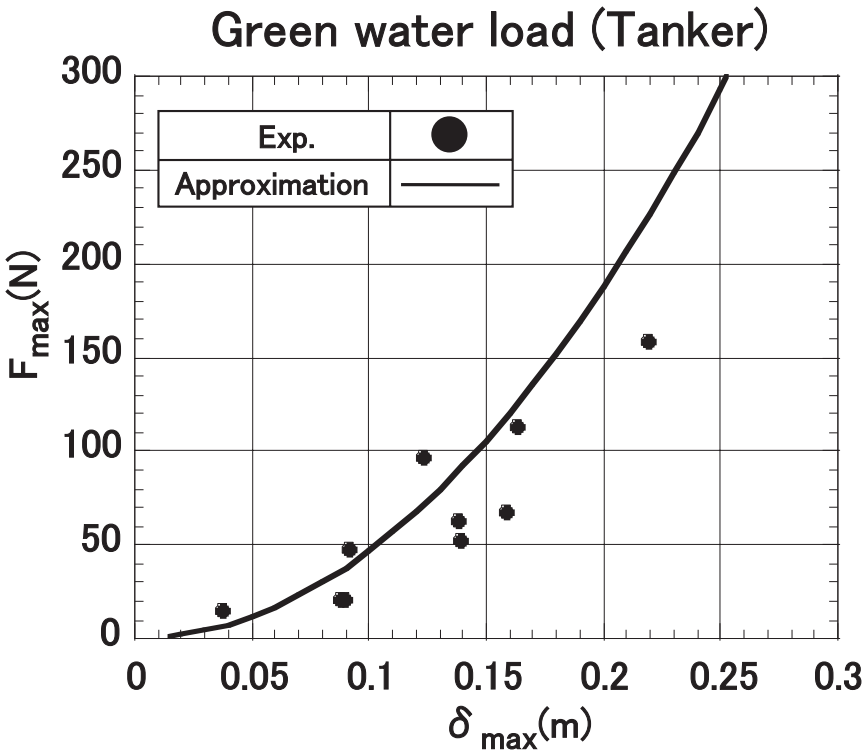

Figure 4.1: Relation between green water load and relative water height at stem (Tanker, F_n=0.1)

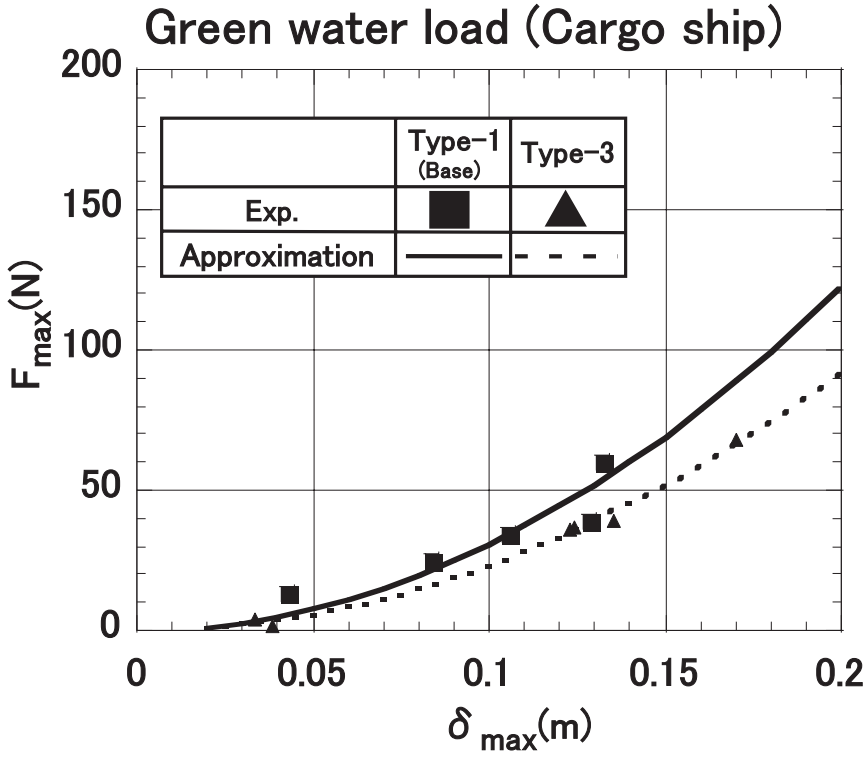

Figure 4.2: Relation between green water load and relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17)

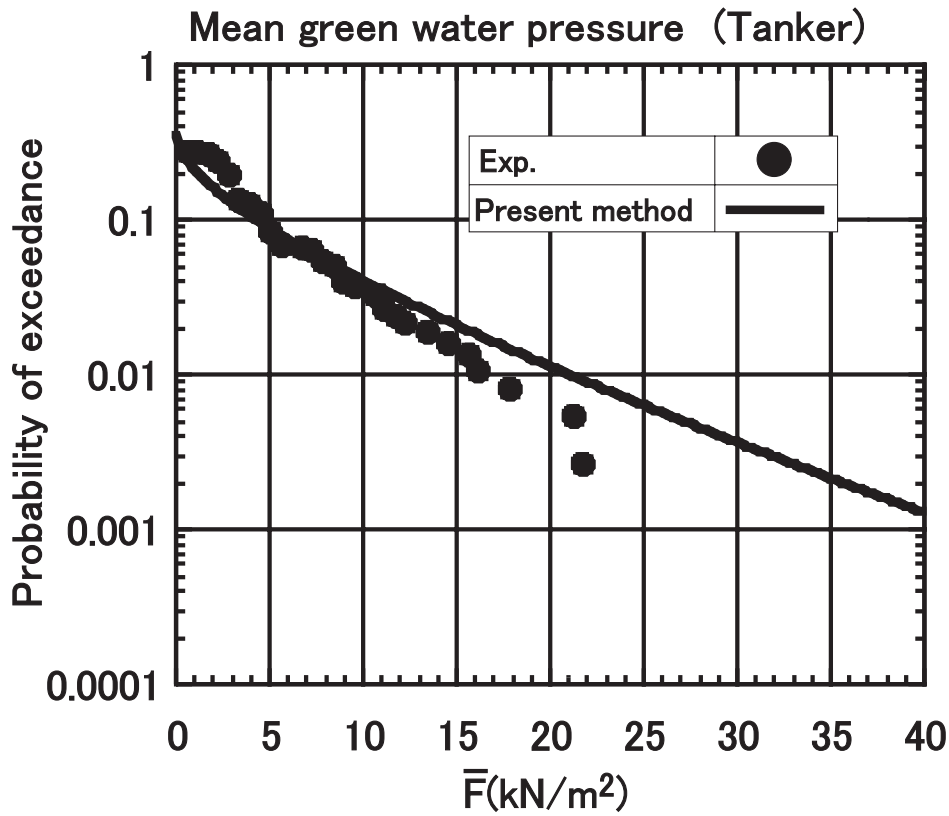

Figure 4.3: Estimation of probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, $H_{1/3}$=3.13m, T_{01}=6.19sec, F_n=0.1, χ=180 °)

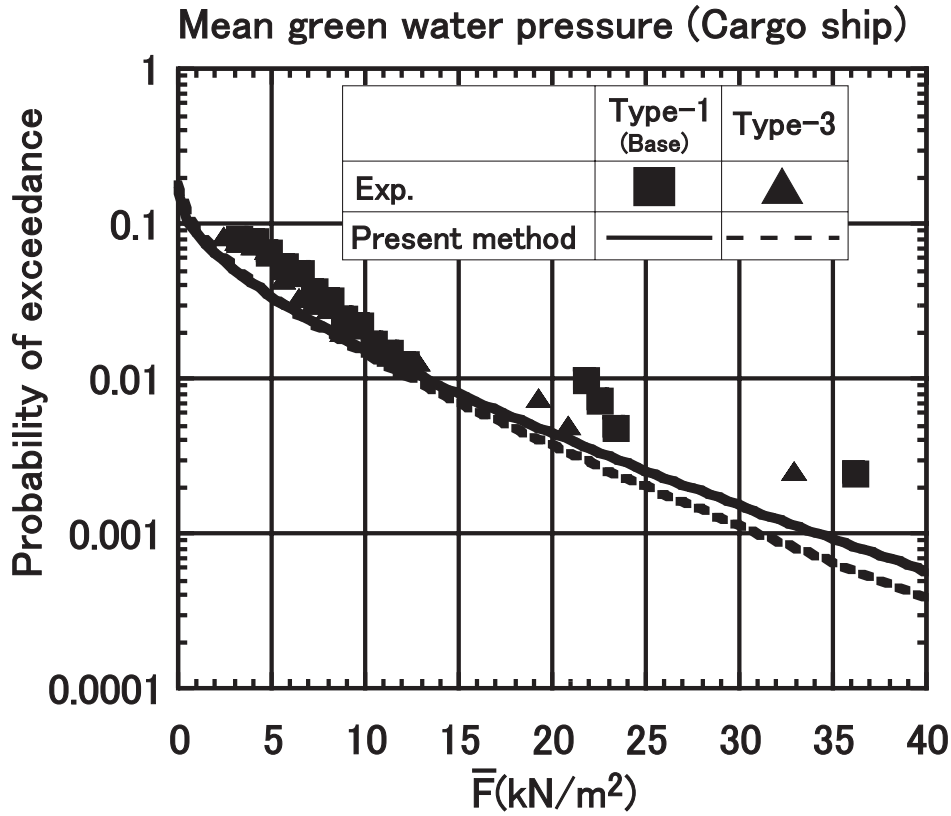

Figure 4.4: Estimation of probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

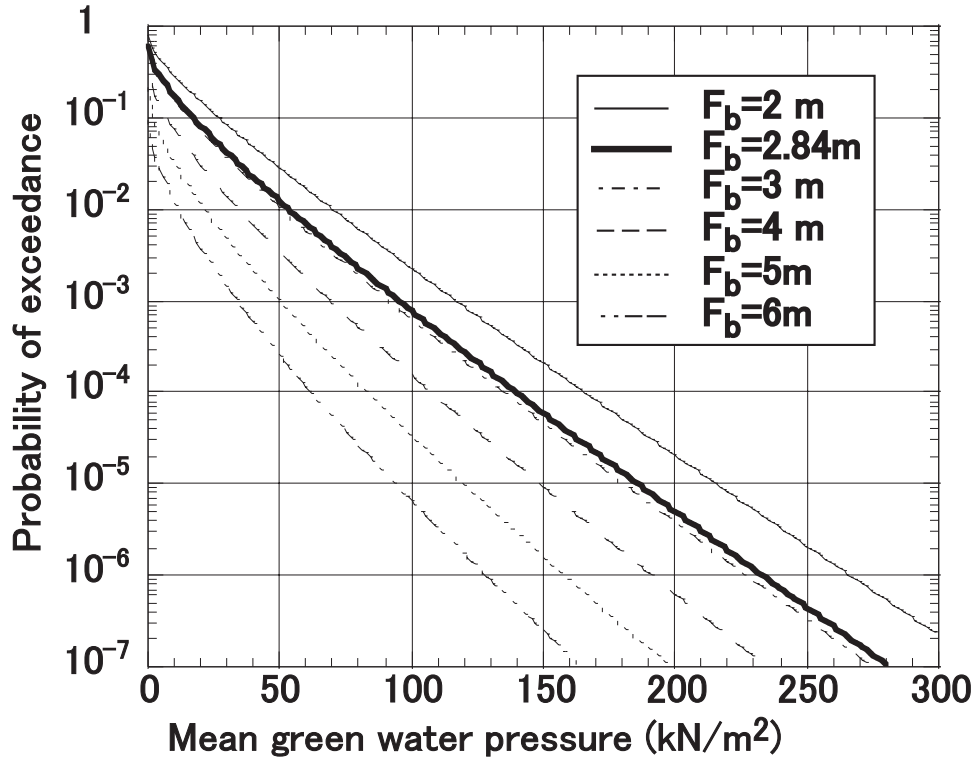

Figure 4.5: Effect of bow height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.1, χ=180 °)

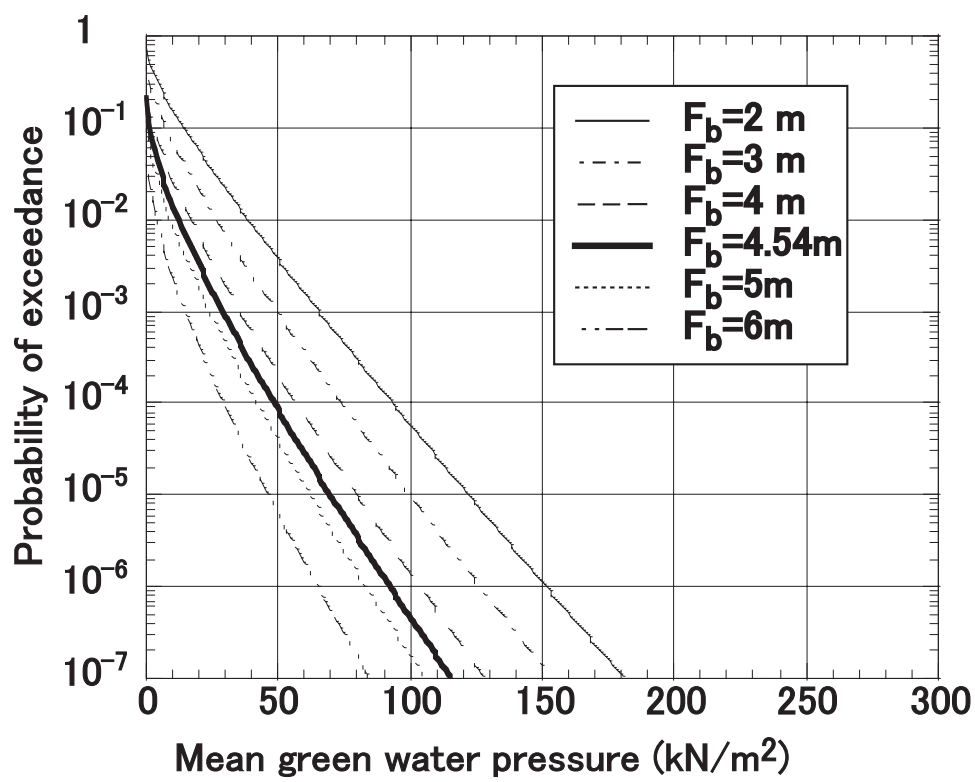

Figure 4.6: Effect of bow height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

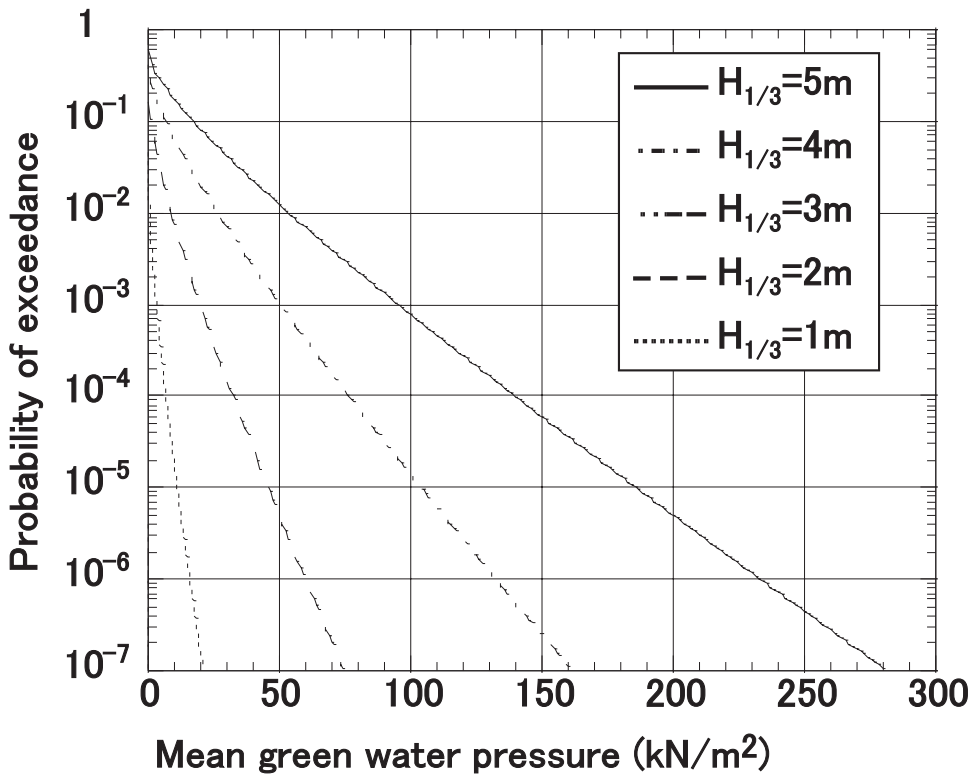

Figure 4.7: Effect of wave height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Tanker, T_{01}=5.56sec, F_n=0.1, χ=180 °)

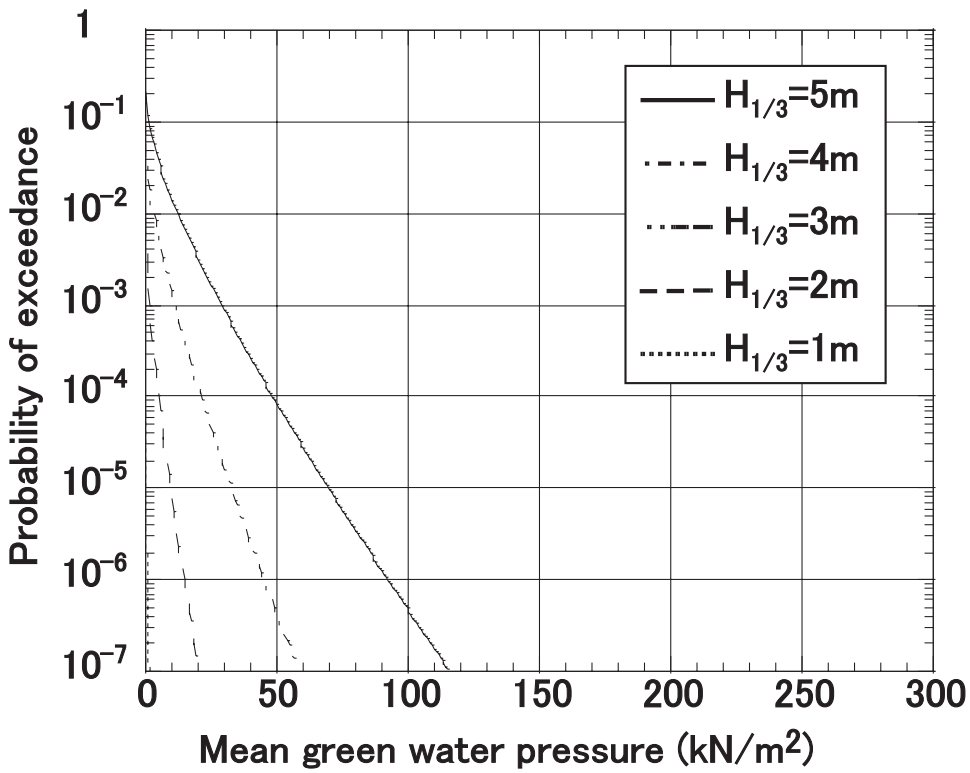

Figure 4.8: Effect of wave height on probability of exceedance of green water load (mean green water pressure) (Cargo ship, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

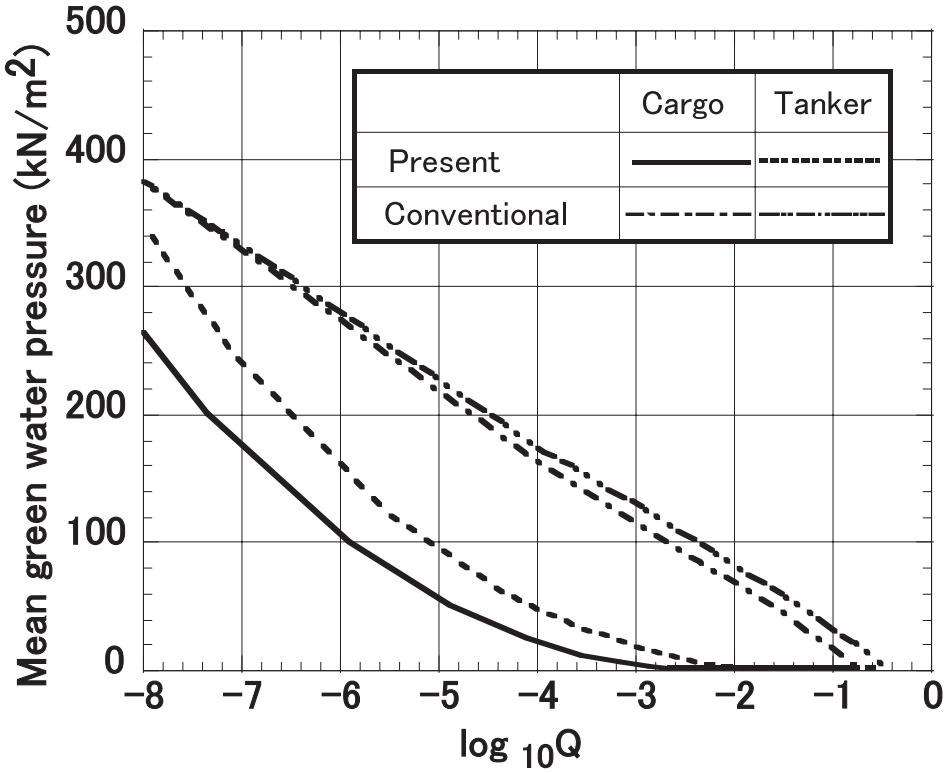

Figure 4.9: Comparison between conventional and present method for long term prediction of green water load (mean green water pressure)

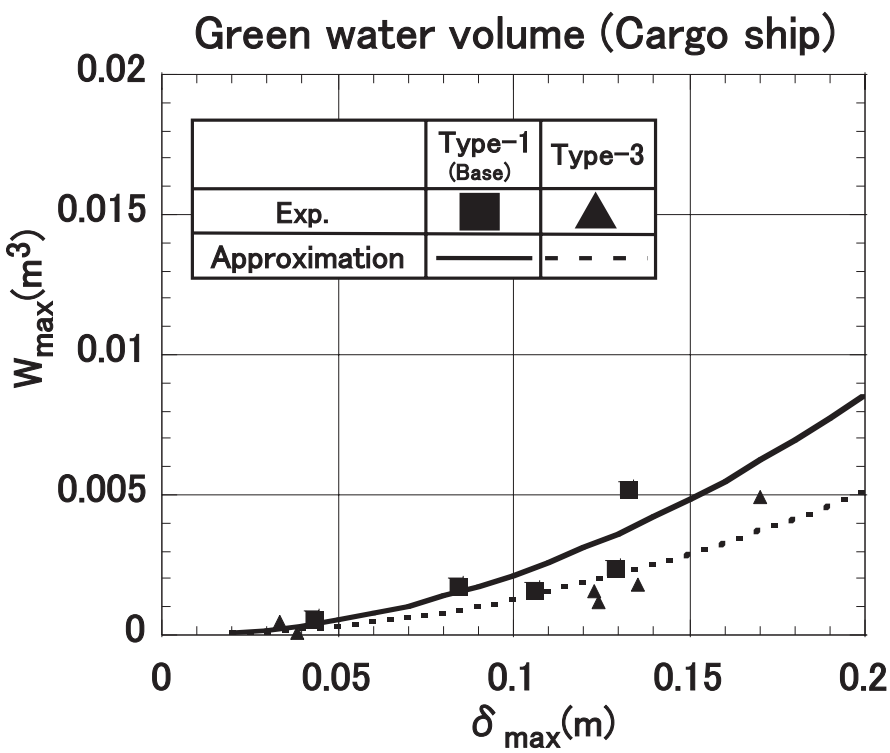

Figure 4.10: Relation between green water volume and relative water height at stem (Cargo ship, F_n=0.17)

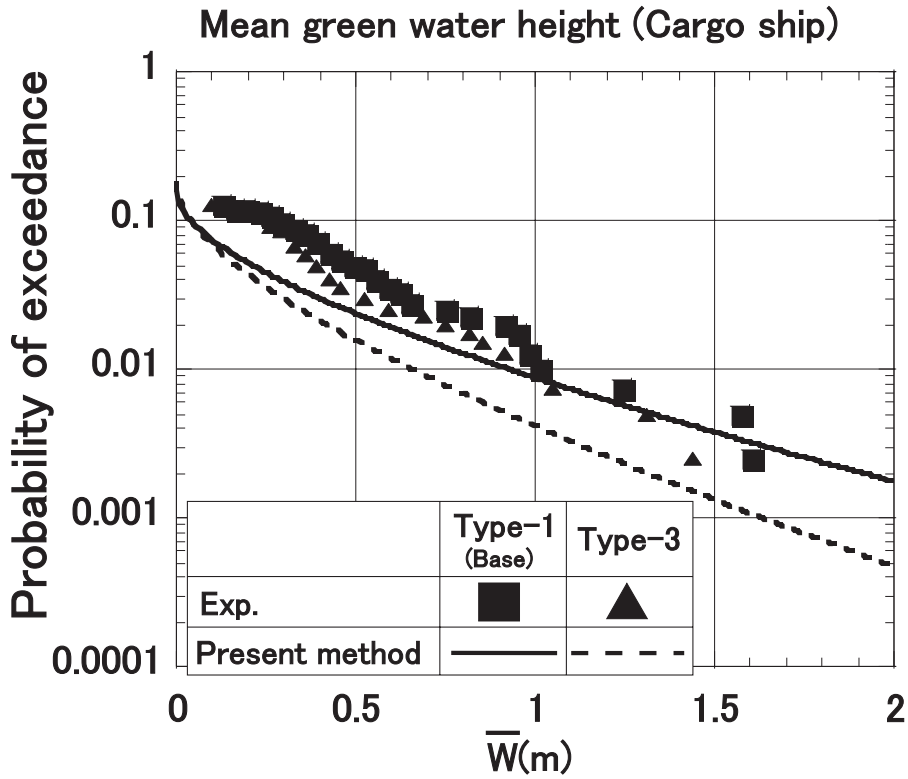

Figure 4.11: Estimation of probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, $H_{1/3}$=3.70m, T_{01}=6.73sec, F_n=0.17, χ=180 °)

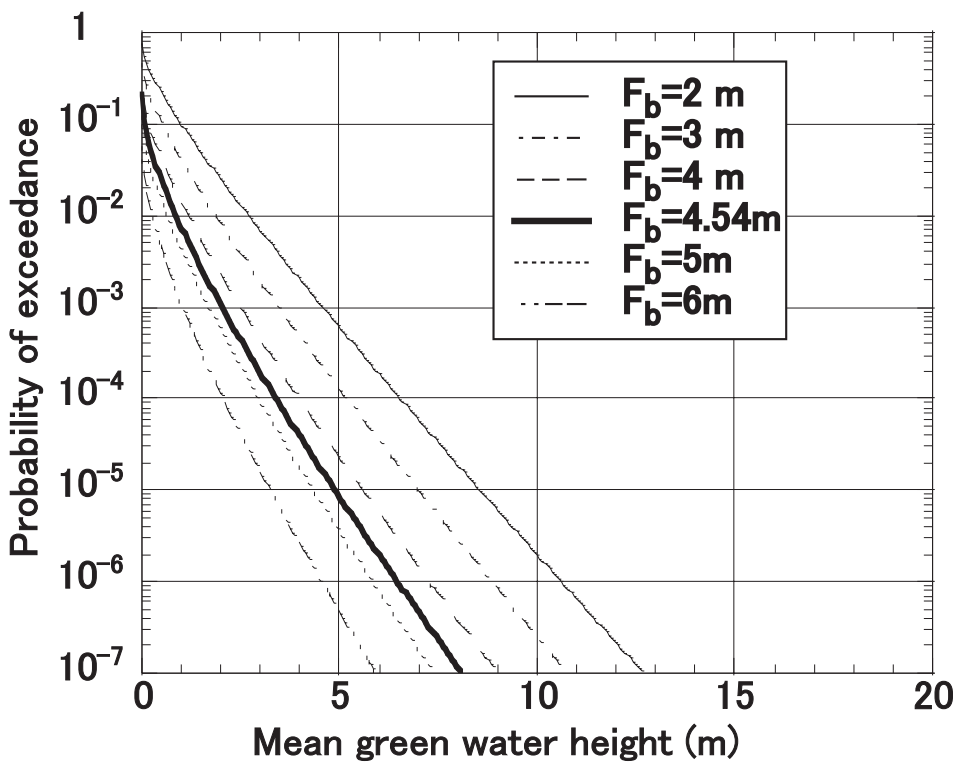

Figure 4.12: Effect of bow height on probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, $H_{1/3}$=5.0m, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

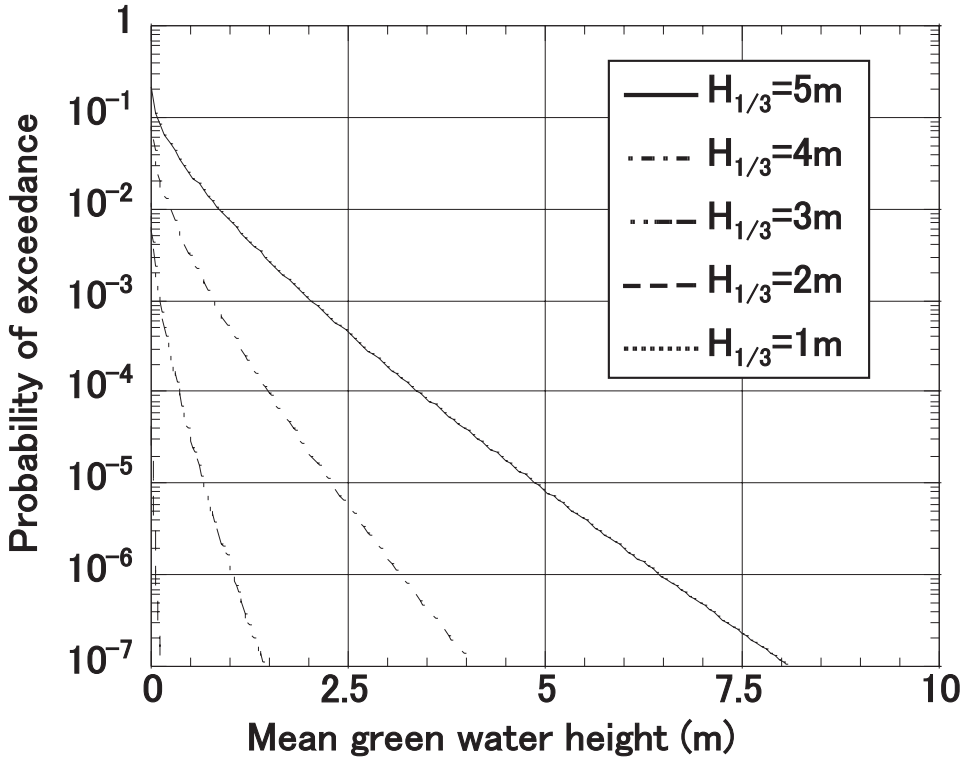

Figure 4.13: Effect of wave height on probability of exceedance of green water volume (mean green water height) (Cargo ship, T_{01}=5.56sec, F_n=0.17, χ=180 °)

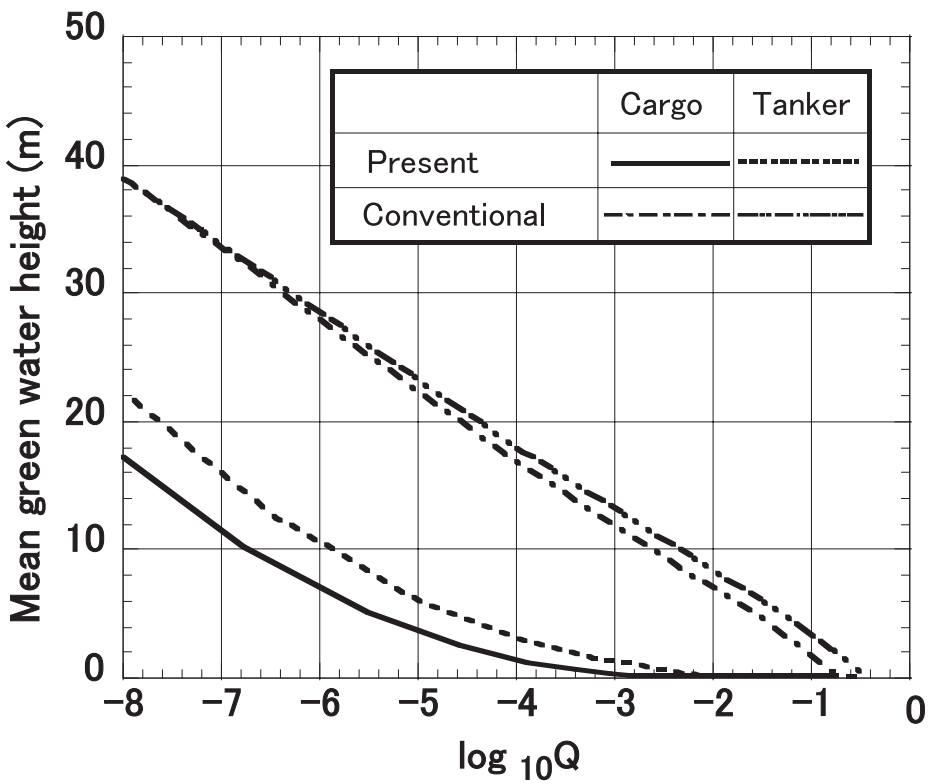

Figure 4.14: Comparison between conventional and present method for long term prediction of green water volume (mean green water height)

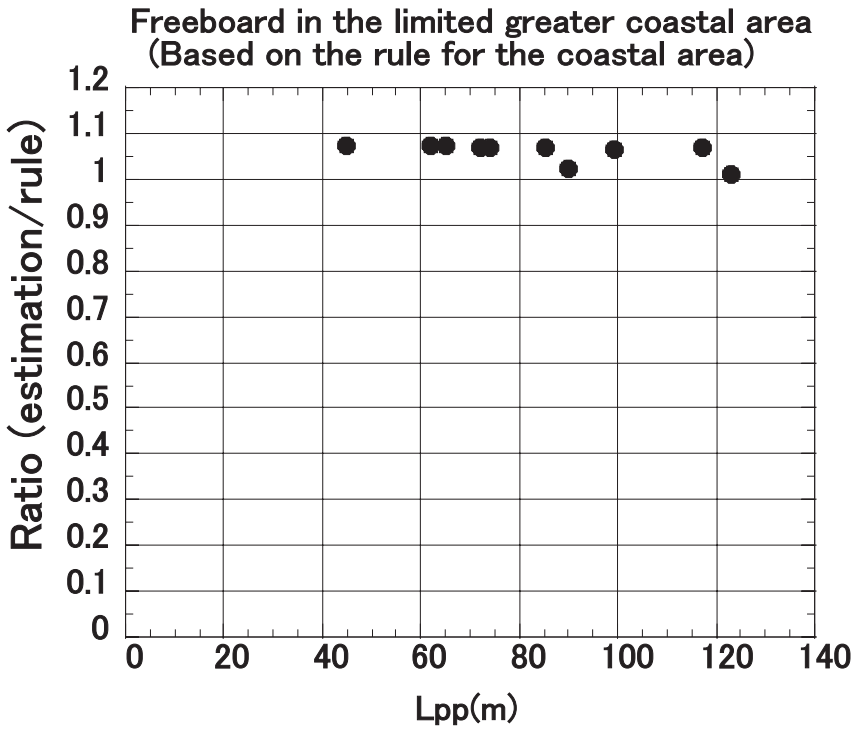

Figure 5.1: Estimation of freeboard in the limited greater coastal area based on the rule for the coastal area

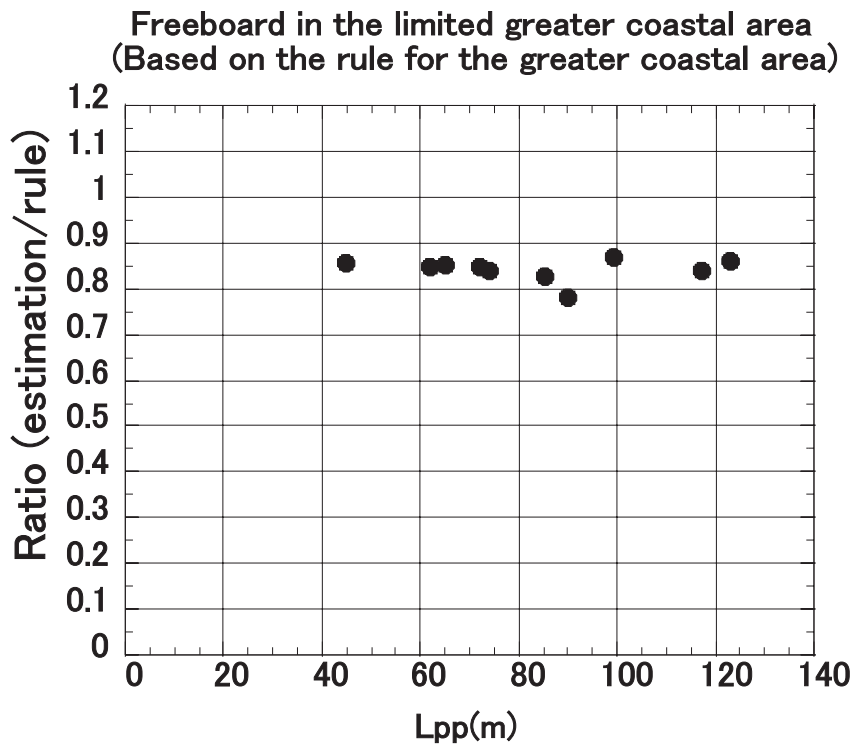

Figure 5.2: Estimation of freeboard in the limited greater coastal area based on the rule for the greater coastal area

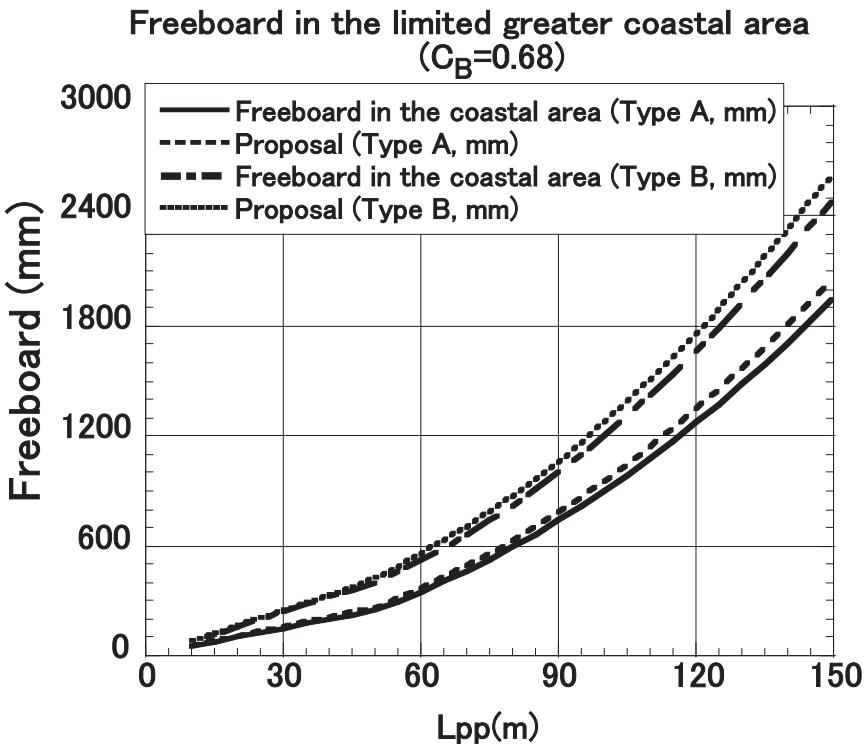

Figure 5.3: Freeboard in the limited greater coastal area (C_B=0.68)

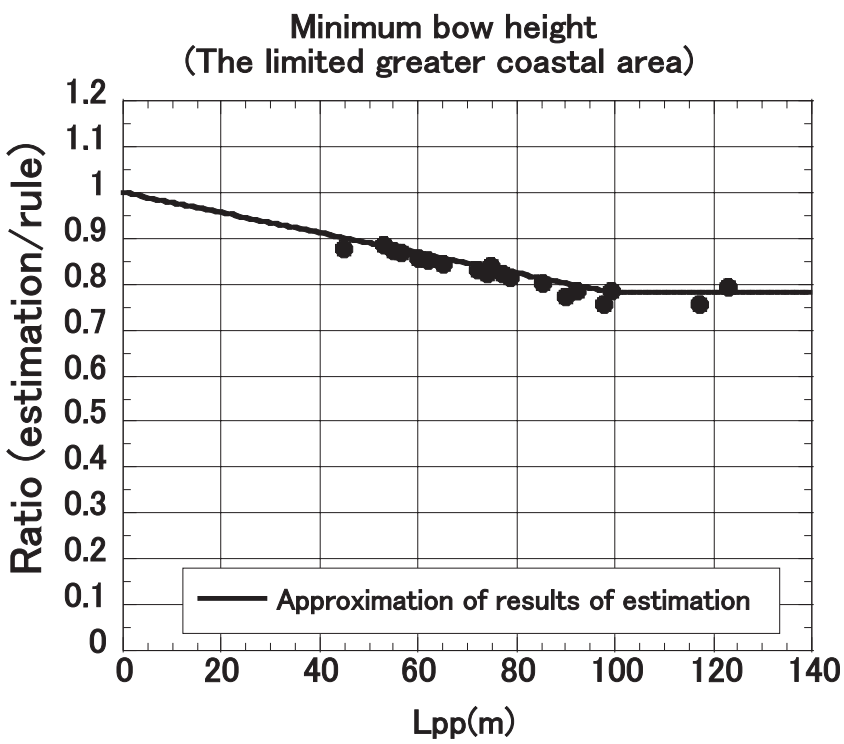

Figure 5.4: Estimation of minimum bow height in the limited greater coastal area based on the rule for the greater coastal area

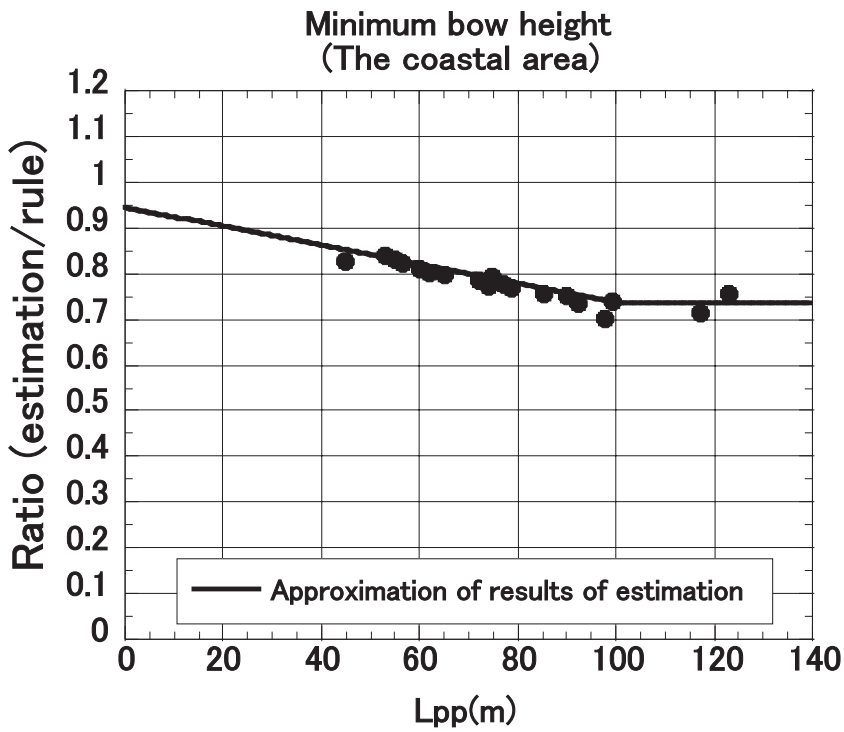

Figure 5.5: Estimation of minimum bow height in the coastal area based on the rule for the greater coastal area

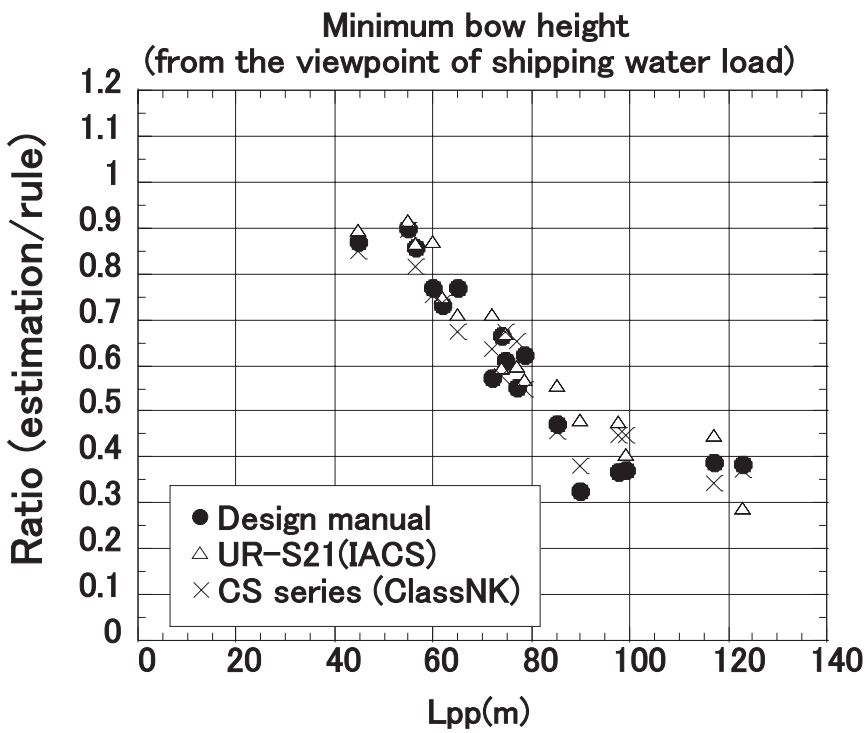

Figure 5.6: Estimation of minimum bow height in the limited greater coastal area based on the rule of green water load for the gerater coastal area

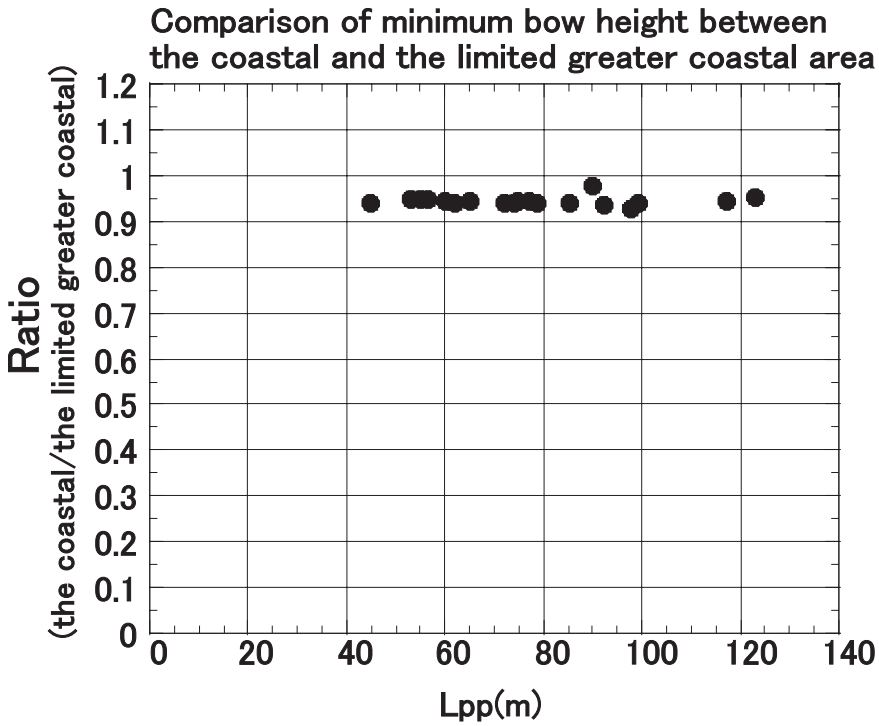

Figure 5.7: Relation of minimum bow height between the coastal and the limited greater coastal area

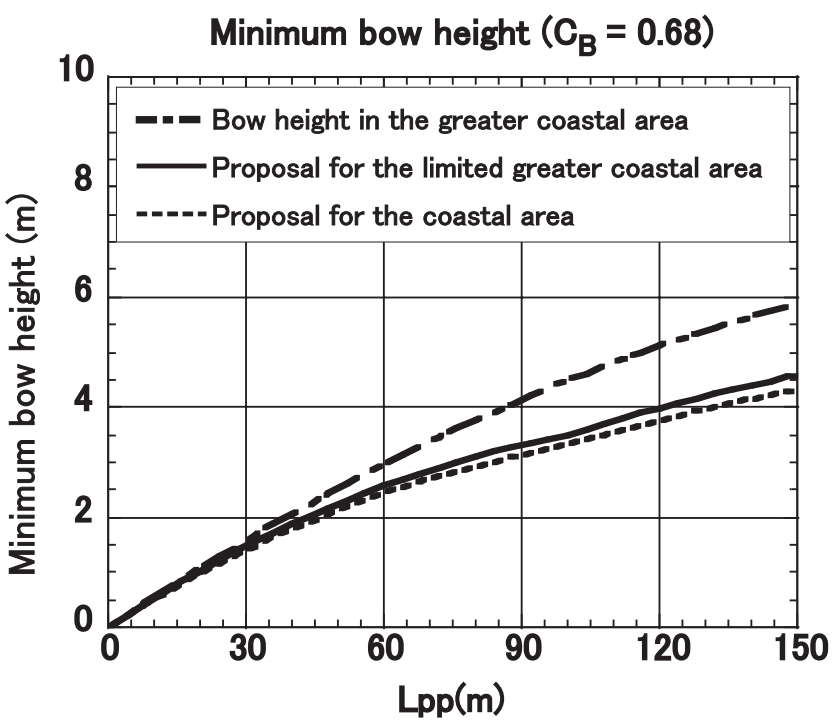

Figure 5.8: Minimum bow height in the limited greater coastal area (C_B=0.68)

Table 5.1: Principal Particulars of bulk carrier

	Ship	Model
L_{pp}(m)	307.0	4.5
B(m)	54.10	0.793
D(m)	26.61	0.390
d(m)	19.44	0.285
Bow top height(m)	7.16	0.105
GM(m)	7.467	0.109
C_B	0.806	0.806
Displacement(ton)	260523.0	0.82

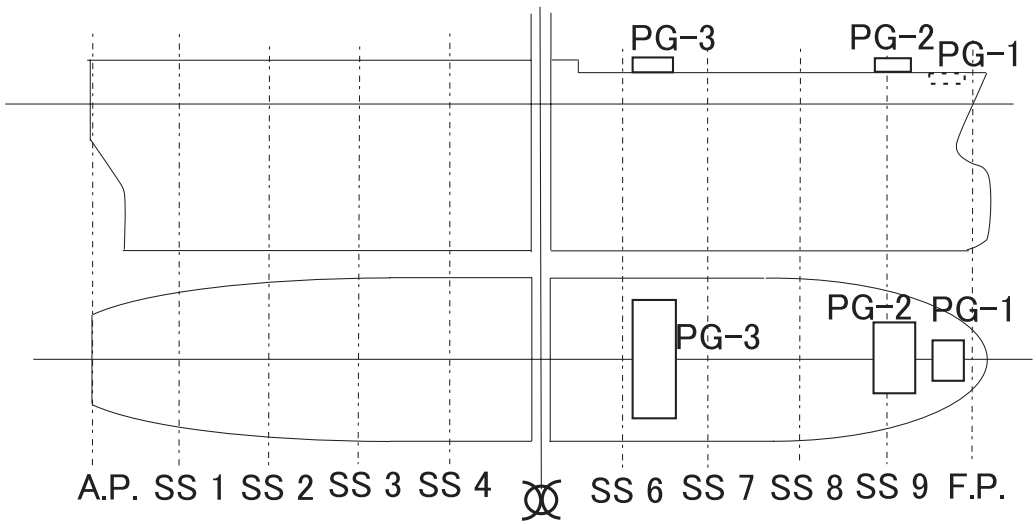

Figure 5.9: Location of measurement of green water load

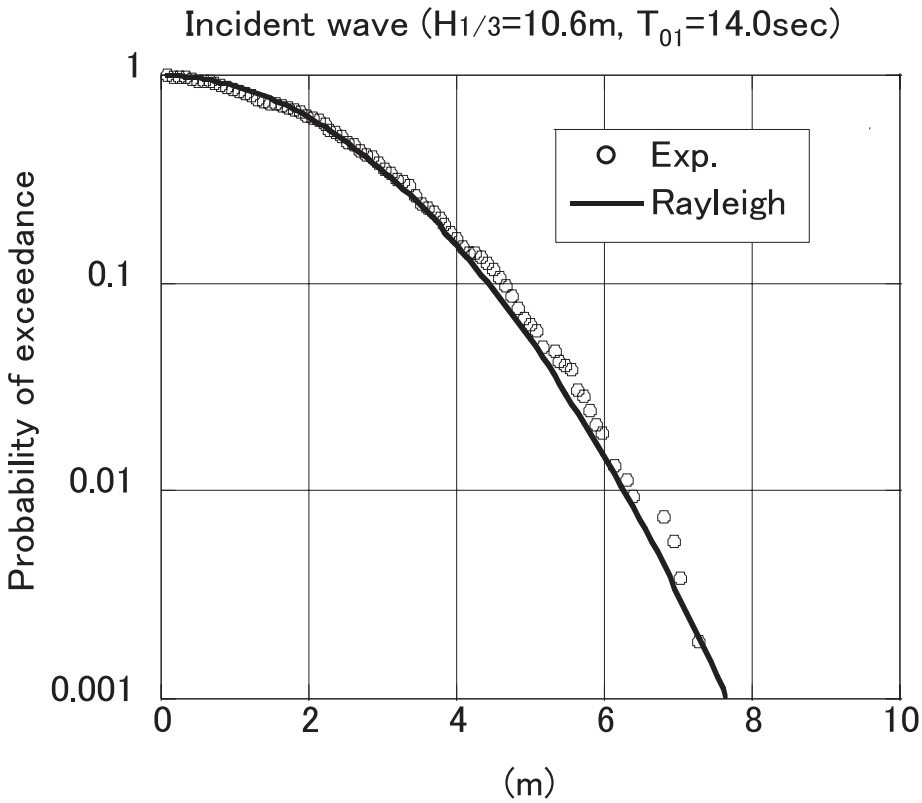

Figure 5.10: Probability of exceedance of incident wave ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec)

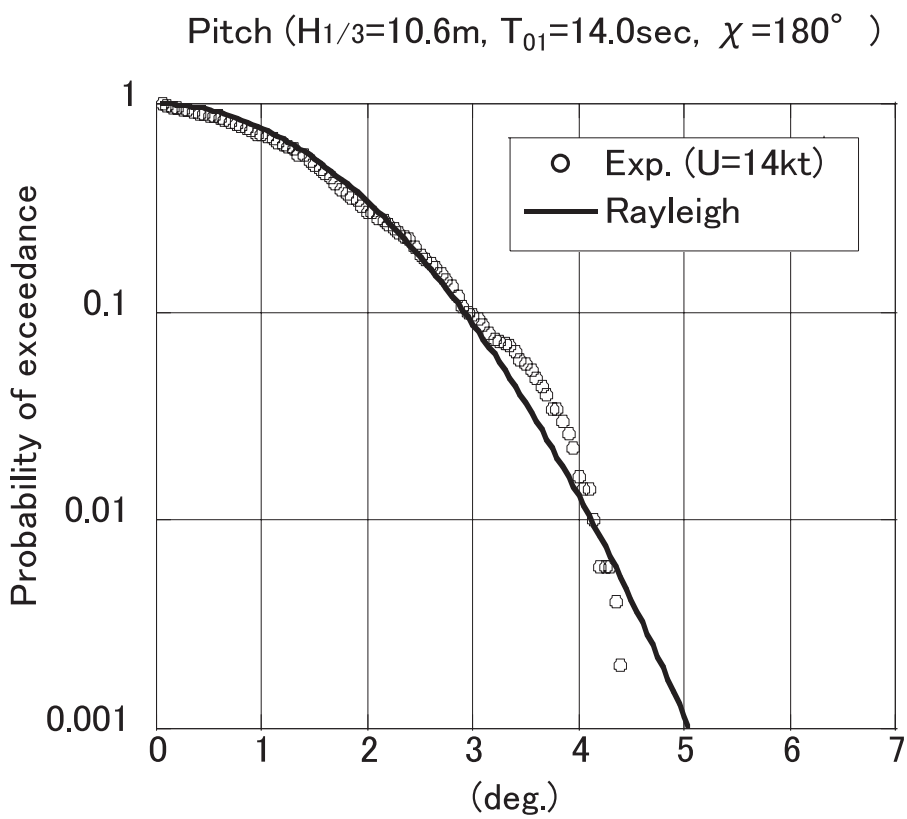

Figure 5.11: Probability of exceedance of pitch ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

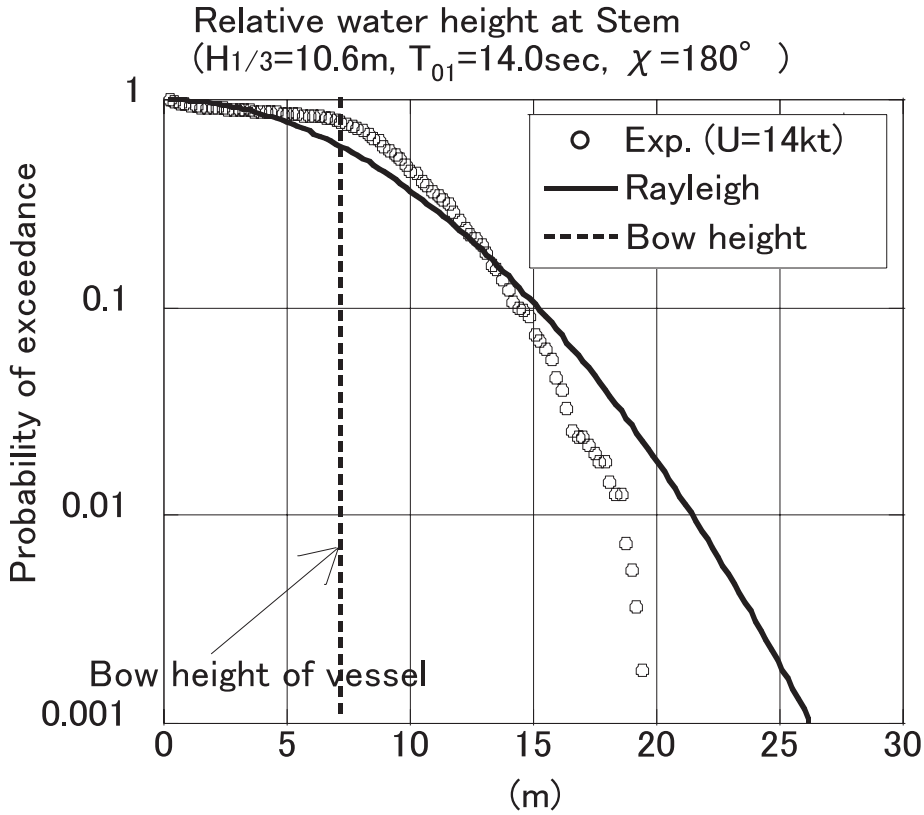

Figure 5.12: Probability of exceedance of relative water height at stem ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

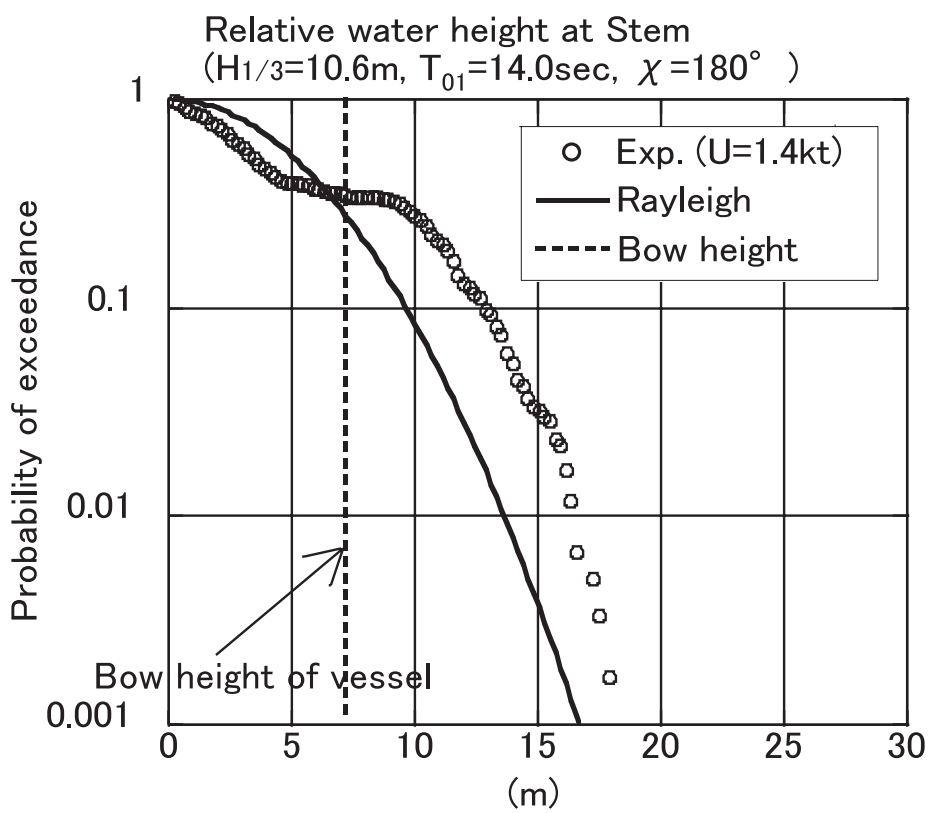

Figure 5.13: Probability of exceedance of relative water height at stem ($H_{1/3}$= 10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

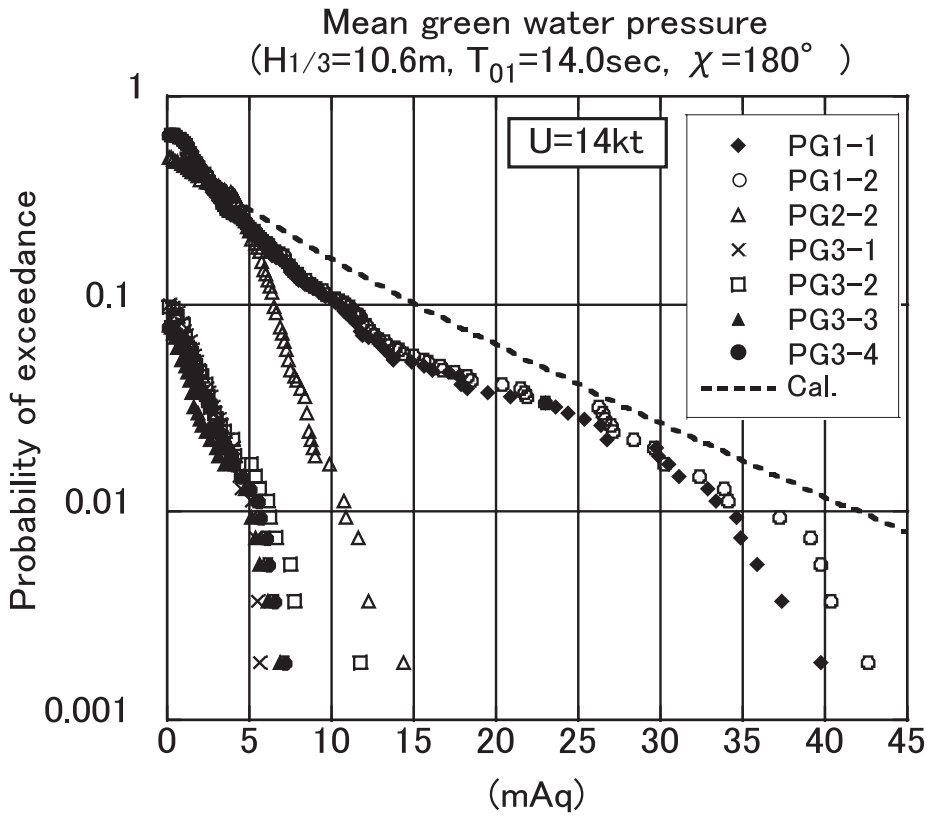

Figure 5.14: Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

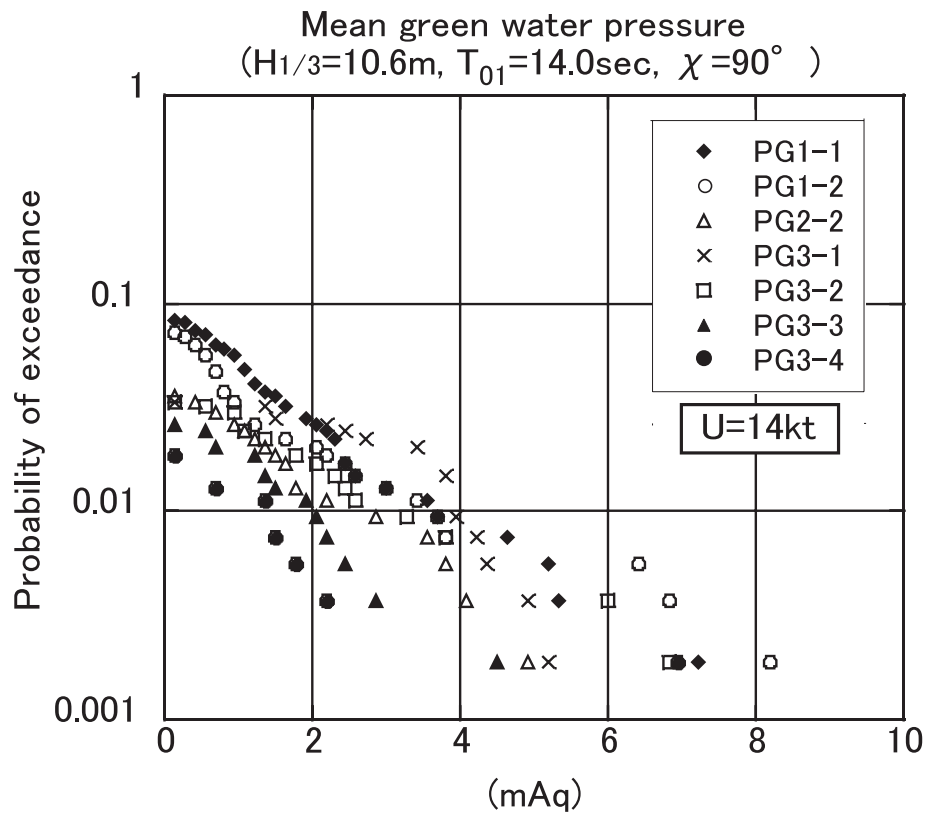

Figure 5.15: Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=90 °, U=14kt)

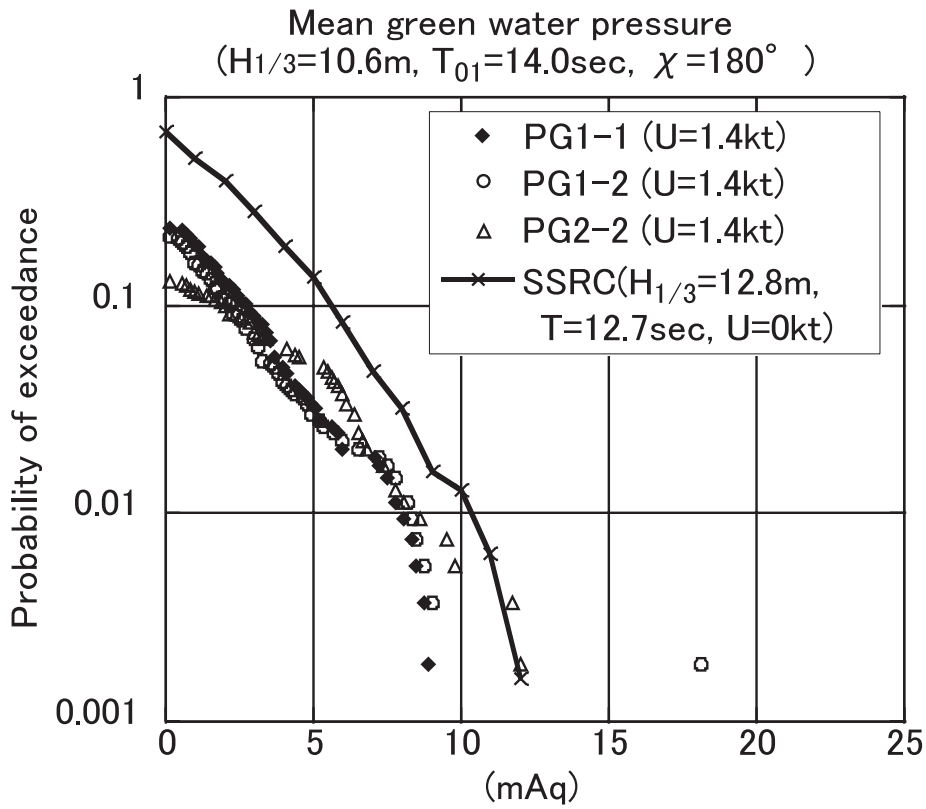

Figure 5.16: Probability of exceedance of green water load (mean green water pressure)($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

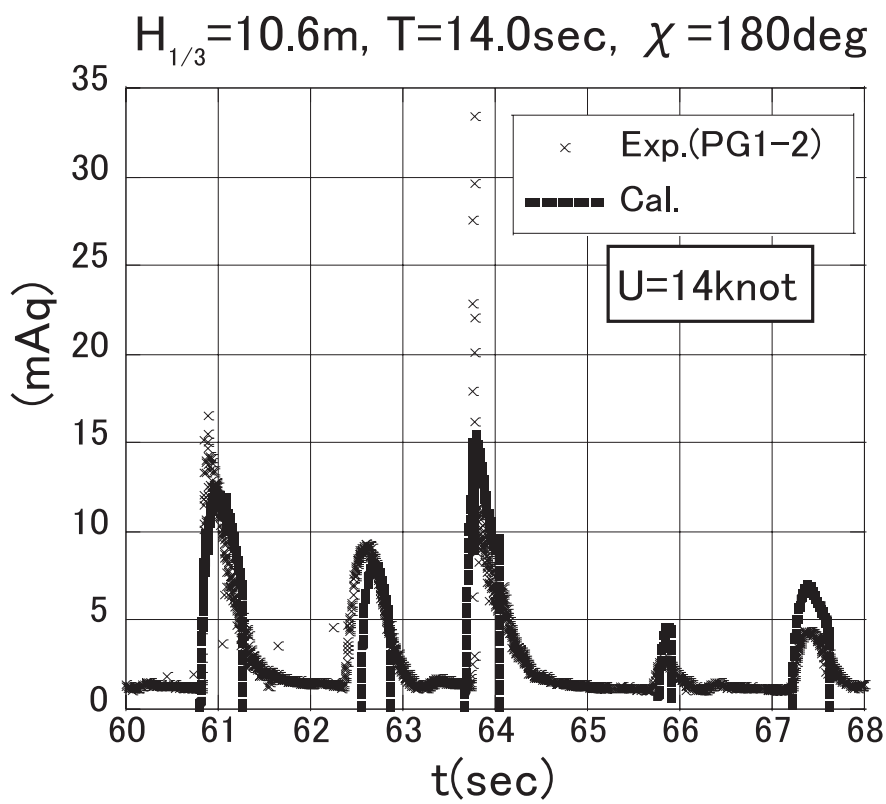

Figure 5.17: Time histries of green water load (mean green water pressure) on fore deck($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

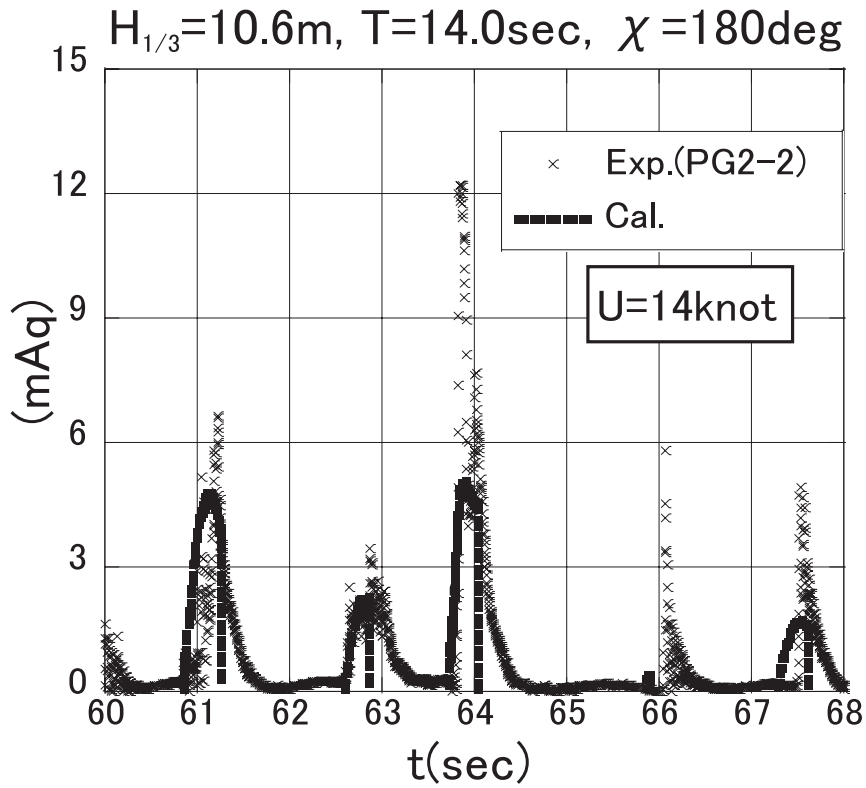

Figure 5.18: Time histries of green water load (mean green water pressure) on No.1 deck($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=14kt)

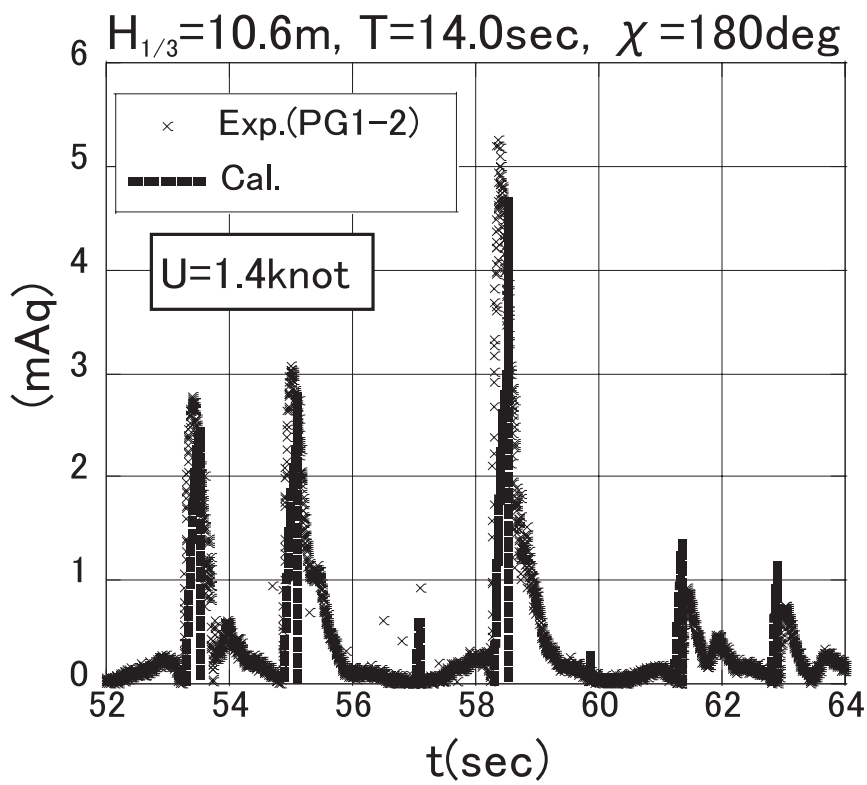

Figure 5.19: Time histries of green water load (mean green water pressure) on fore deck($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

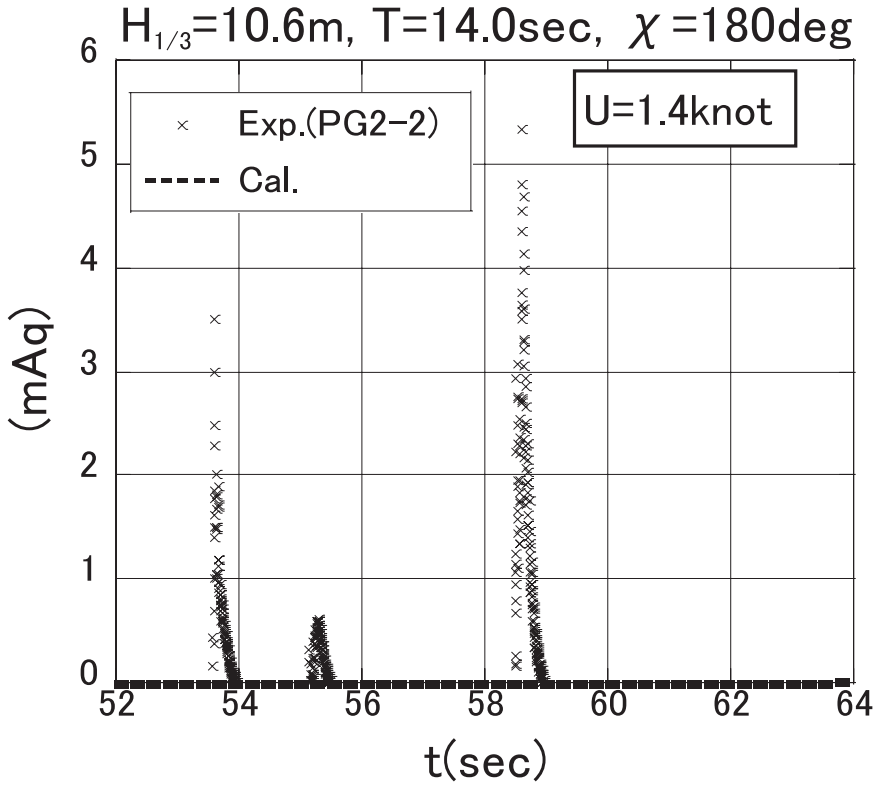

Figure 5.20: Time histries of green water load (mean green water pressure) on No.1 deck($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)

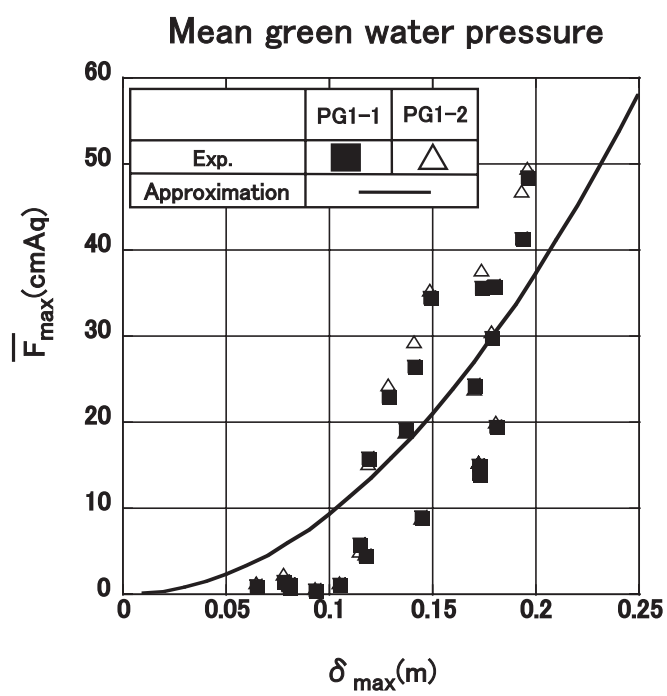

Figure 5.21: Relation between green water load (mean green water pressure) and relative water height at stem (Bulk carrier, U=14kt)

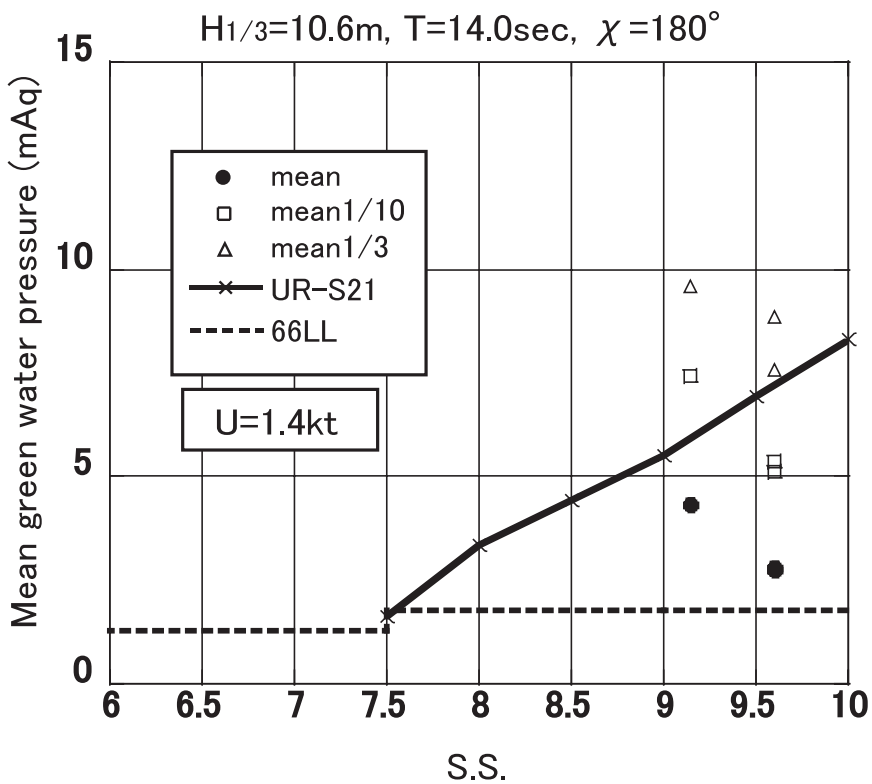

Figure 5.22: Longitudinal distribution of green water load (mean green water pressure)($H_{1/3}$=10.6m, T_{01}=14.0sec, χ=180 °, U=1.4kt)