

中型貨物船の打ち込み荷重の計測及び定量的な評価

海上安全研究領域 耐航・復原性能研究グループ *小川 剛孝、南 真紀子、
谷澤 克治

1. まえがき

近年の運行実態の変化及び基準改正の議決方式の変更を背景として、船舶の安全基準のひとつである満載喫水線条約 (ICLL66) の見直し作業が行われている。この見直し作業はIMO (国際海事機関) に設置されている復原性・満載喫水線・漁船 (SLF) 小委員会において段階的に行われている。ここでは現在、最小船首高さの式やハッチカバー強度の見直し作業等が現在行われている。

このうち、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上で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、これまでもたびたび議論の的となっている。特に、近年の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 によりバルクキャリアのハッチカバー強度をレベルアップした事も議論に拍車をかけている。これに関して、英国、オランダ及び日本を中心として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 に逐次報告されている¹⁾²⁾。これらに示されているバルクキャリア模型を用いた模型実験の結果によると、ICLL66 の設定荷重より大きな打ち込み荷重が計測されている。これらの結果から、IMO では荷重の値だけではなく強度の観点から全体を見直す必要があるものの、慎重な検討及び研究成果の集積を行った上で荷重の見直しも必要との見解を下している。

これに関して、前回開催された第 44 回 SLF 小委員会において LLCG (満載喫水線コレスポンデンスグループ) の議長から提案された条約改正の試案³⁾では、船長 100m 以上の船舶の第一位置 (S.S.7.5 から船首側) における打ち込み荷重を船種や船長

にかかわらず F.P. で 6.0ton/m^2 、S.S.7.5 で 3.5ton/m^2 と定めてその間を直線近似する案が提案されている。しかしながら、船種や船長が異なれば船体運動、相対水位変動、ひいては海水打ち込みも違ってくると考えられるため、船種や船長にかかわらず同じ荷重を一律に適用するのは合理的とはいえない。

さらに、打ち込み荷重についての研究は、近年のバルクキャリアに関する模型実験¹⁾²⁾⁴⁾を除いてあまり行われておらず、打ち込み荷重を用いて満載喫水線の評価を行うためには実験及び理論の双方からさらに検討を進める必要がある。そこで今回、中型貨物船を用いて海水打ち込み実験を実施した。これにより中型貨物船にはたらく打ち込み荷重を現行基準等と比較、検討したので以下に報告する。

2. 模型実験

2. 1. 計測項目

中型貨物船模型を用いた自由航走試験を海上技術安全研究所 80m 角水槽において行った。中型貨物船の主要目を表 - 1 に、計測装置の配置図を図 - 1 に示す。船首楼甲板、センターライン上の 3 箇所に水圧計を取り付けて打ち込み水圧を計測した。また、S.S.9 及び S.S.8 において、模型船の主船体と分離した上甲板の下に検力計を取り付けて打ち込み荷重を直接計測した。分離した上甲板の面積は共に 0.1034m^2 であった。検力計で計測した値から分離した甲板の自重による慣性力を取り除くために甲板の真下にあたる F.P.、S.S.9 及び S.S.8 の 3 箇所に加速度計を取り付けて上下加速度を計測した。さらに、船上にとりつけたビデオカメラで打ち込みの様子を観察した。

これ以外に、船体運動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

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。また、相対水位変動は、容量式波高計を船首及び船側部4箇所（S.S.91/2, S.S.7, S.S.5, S.S.3）の計5箇所に取り付け計測した。

表 - 1 中型貨物船主要目

	Ship	model
Lpp(m)	160	5
B(m)	24.13	0.75
d(m)	9.58	0.30
D(m)	15.79	0.49
Disp.(m ³)	24546.32	0.75
Block Coef. : C_B	0.663	0.663
GM	3.03	0.09
Longitudinal gyration (k_{yy}/L_{pp})	0.252	0.252

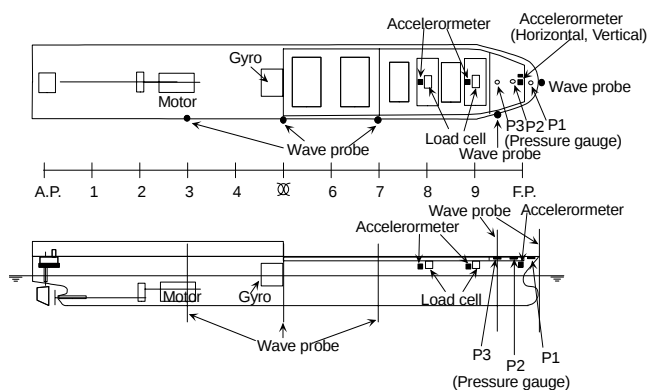


図 - 1 計測装置配置図

2. 2. 実験条件

正面向波（ $\chi=180^\circ$ ）規則波及び不規則波中で計測を行った。海水打ち込みが発生するような大波高中での船速は自然及び人為的減速により低くなること及び先に述べたバルクキャリアの模型実験が0から6knotの間で主に行われていること¹⁾²⁾⁴⁾を勘案して、船速は4knot（フルード数 $Fn=0.0390$ ）及び2knot（ $Fn=0.0195$ ）の2種類とした。規則波中実験は、縦運動の同調点付近である波長船長比 $\lambda/L=0.8, 1.0, 1.2$ の3状態について4種類の波高 H_w （4, 8, 10, 12m）で行った。

不規則波のスペクトラムには、ISSC スペクトラムを用いた。1/3 有義波高及び平均波周期は実船

スケールでそれぞれ12m及び10.4秒、出会い波数は約500波である。作成した500波の信号を分割して計測を行った。分割した信号は前後で十分に重複させることで連続した波形になるよう留意した。

3. 実験結果

3. 1. 規則波中実験結果

3. 1. 1. 船体運動

船体運動の結果の一例として、4knot及び2knotでの上下揺れ及び縦揺の周波数応答関数を波高毎に整理して図-2から図-5に示す。図中には、上下揺振幅 z を波振幅 ζ 、縦揺振幅 θ を最大波傾斜 $k\zeta$ で無次元化した値を示す。ここで k は波数を表す。横軸は波長船長比 λ/L を表す。また、図中にはストリップ法 (NSM) による計算値を比較のために実線で示す。

本実験に用いた中型貨物船についてはストリップ法による計算値は実験値と概ねよく一致する。また、船体運動に対する波高の非線形影響はあまり大きくないことがわかる。4knot及び2knotの結果を比較した場合に有意な違いはなく、この程度の船速の変化は船体運動にあまり影響を及ぼさないことがわかる。

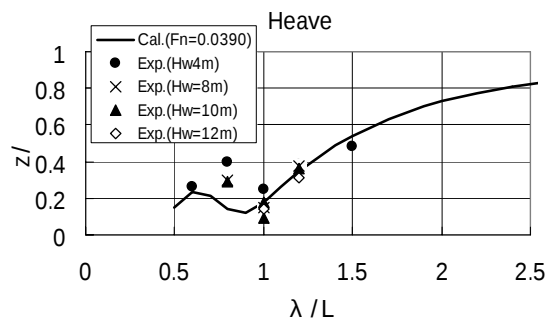


図 - 2 上下揺の周波数応答関数 (船速4knot)

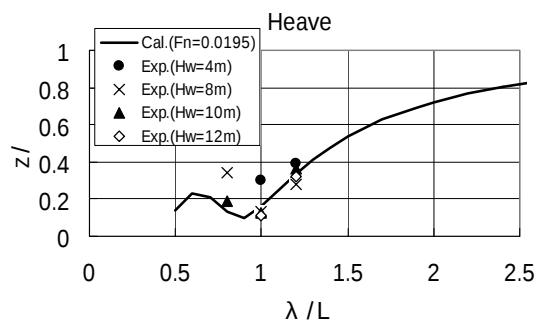


図 - 3 上下揺の周波数応答関数 (船速2knot)

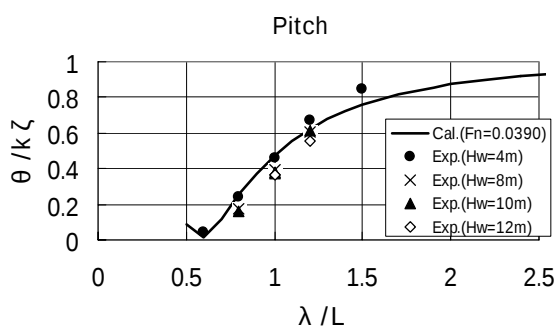


図 - 4 縦揺の周波数応答関数(船速4knot)

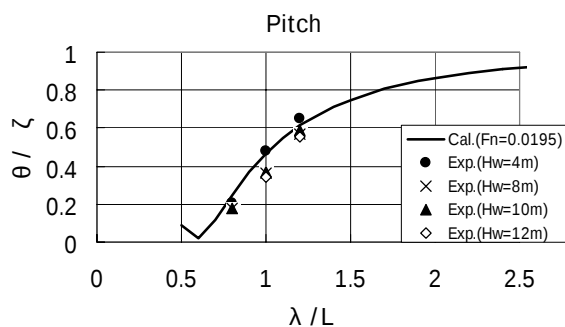


図 - 5 縦揺の周波数応答関数(船速2knot)

3. 1. 2. 相対水位変動

相対水位変動の結果の一例として、4knot及び2knotでの船首部相対水位の周波数応答関数を波高毎に整理して図-6及び図-7に示す。図中には、船首部相対水位の振幅 η を波振幅 ζ で無次元化した値を示す。

振幅は、波高が大きくなるにつれてその無次元値が小さくなっており、波高による非線形影響が現れていることがわかる。特に、打ち込みが激しく発生するようになる波高4mから8mにかけて、顕著に現れている。また、4kt及び2ktの結果に有意な違いはなく、船体運動と同様にこの程度の船速の変化は相対水位に影響を及ぼさないことがわかる。

さらに、船首部相対水位と縦揺との位相差についても検討を行ったので、4knot及び2knotでの位相差 ε_η の周波数応答関数を波高毎に整理して図-8及び図-9に示す。この際、縦揺は船首下げを正、相対水位は鉛直上向きを正とした。また、図中にはストリップ法(NSM)の計算結果を比較のために実線で示す。

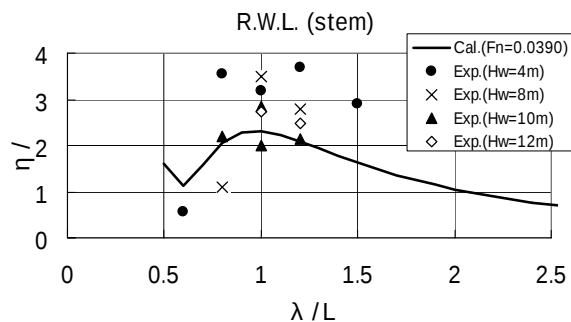


図 - 6 船首部相対水位の周波数応答関数(船速4knot)

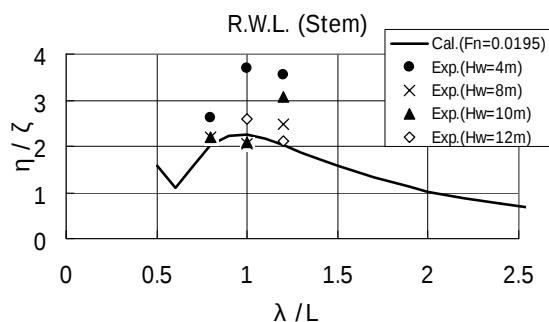


図 - 7 船首部相対水位の周波数応答関数(船速2knot)

位相差は波高にかかわらずストリップ法との一致はよい。振幅については、波高による非線形影響が相対的に小さい波高4mの場合でもストリップ法との一致はよくない。その理由として、ストリップ法で計算しているdynamic Swell-upは船側方向に伝播する波のみを考慮しており、船首部及び船尾部のように船長方向に伝播する波が考慮されていないことがあげられる。

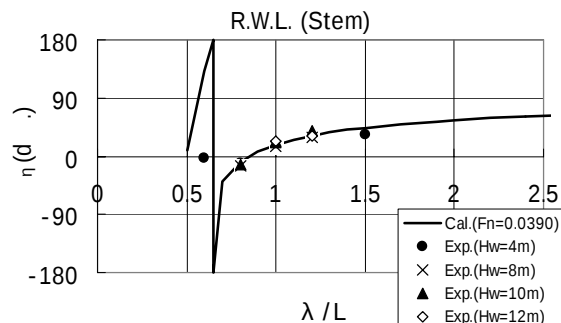


図 - 8 船首部相対水位と縦揺の位相差(船速4knot)

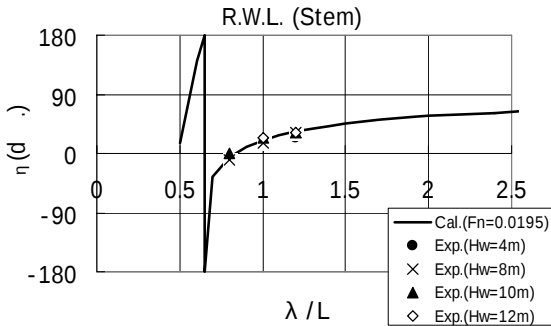


図 - 9 船首部相対水位と縦揺の位相差 (船速 2knot)

3. 1. 3. 打ち込み荷重及び水圧

打ち込み荷重及び水圧の結果の一例として、No.1 ハッチカバー位置(S.S.9)での打ち込み荷重の実験値を図 - 10 及び図 - 11 に示す。図中には、打ち込み荷重の極大値を計測面の面積で割った値 (平均水圧) を、フルード則に基づき実船スケールに換算して表す。横軸は波高を表す。図から、波高が大きくなるにつれて打ち込み荷重は顕著に大きくなる事がわかる。また、船体運動や相対水位に比べると、打ち込み荷重に対する船速の影響が大きい事もわかる。他の位置での計測についても、同様の結果が得られた。

3. 2. 不規則波中実験結果

3. 2. 1. 船体運動及び船首部相対水位

船体運動及び船首部相対水位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。一例として船速 2knot での船首相対水位について図 - 12 に示す。横軸は船首相対水位の振幅をフルード則に基づき実船スケールに換算して表わす。また、縦軸は出会い波の数 (約 500 波) に対する超過確率を対数軸で表わす。

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非線形性が表れるためレーリー分布から外れてくる。

図中には、中型貨物船の船首高さを点線で示す。このことから、海水打ち込みが発生するような大振幅では非線形性が強くなる事がわかる。

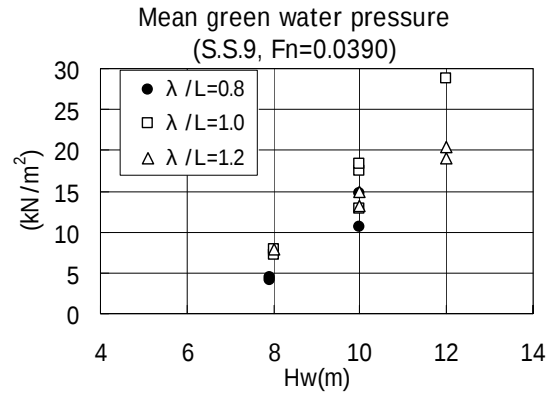


図 - 10 打ち込み荷重 (平均水圧) と波高の関係 (S.S.9、船速 4knot)

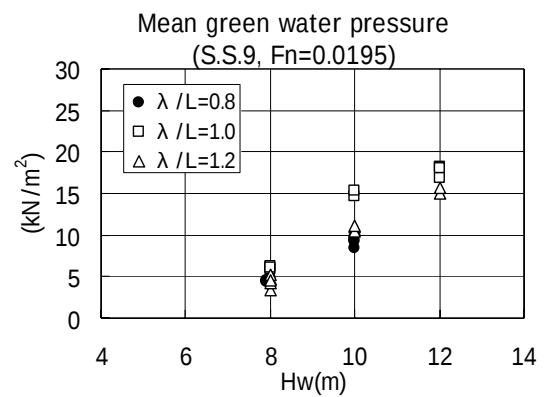


図 - 11 打ち込み荷重 (平均水圧) と波高の関係 (S.S.9、船速 2knot)

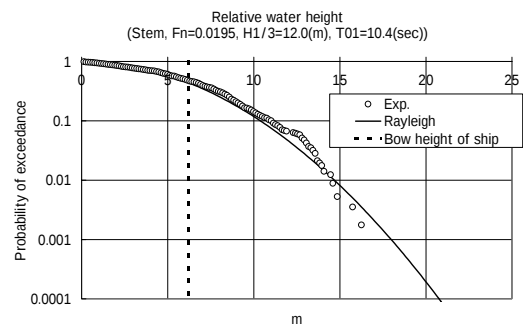


図 - 12 船首部相対水位の超過確率 (船速 2knot)

3. 2. 2. 打ち込み荷重及び水圧

打ち込み荷重及び水圧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及び水圧の極大値を読み取り、超過確率を求めた。船速 2knot の結果について図 - 13 と図 - 14 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わす。

横軸は打ち込み荷重及び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。規則波での実験結果と同様に、打ち込み荷重については平均水圧として表す。

実験値の妥当性を定量的に評価するために、これまでに当所で開発を行ってきた打ち込み荷重の予測法⁵⁾を用いて打ち込み荷重の超過確率の計算を行ったので同じく図-14に示す。計算値は実験値とよく一致しており、本実験結果は定量的にも合理的な結果であることがわかる。

これまでに当所で実施したバルクキャリア模型（船長 307m、 $C_B=0.806$ ）を用いた実験の結果⁴⁾も図-14に示す。有義波高(10.6m)、平均波周期(14.0sec)及び船速(1.4knot)は異なるが、打ち込み荷重に対する船種の違いを検討するために示す。センターライン上で船長方向に分布する3箇所の水圧計 P1(S.S.10.2)、P2(S.S.9.75)及び P3(S.S.9.5)の計測値を比較すると船尾に行くに従って急激に打ち込み水圧が小さくなっている事がわかる。打ち込み荷重についても S.S.9 (No.1 ハッチカバー位置)と S.S.8 (No.2 ハッチカバー位置)での計測値を比較すると同様の事がわかる。

定量的には、今回計測した打ち込み荷重は、No.1 ハッチカバー位置である S.S.9 で、実船スケールに換算して最大約 29kN/m^2 程度(約 2.97m 水頭)であった。これは、本実験と比べて、波高が小さくかつ船速が低い条件で計測したバルクキャリアの模型実験の結果⁴⁾に比べると小さい値となった。このことから打ち込み荷重を考える際には、船型要素を考慮する必要があると考えられる。

4. 現行基準等で規定される荷重との比較

本研究で得られた実験結果と現行基準等で規定されている打ち込み荷重との比較を行った。ここでは、満載喫水線条約第 16 規則（以下 ICLL66）IACS の URS-21 及び第 44 回 SLF 小委員会で満載喫水線コレスポネンスグループより提案された第 16 規則の改正案（以下 LLCG）で規定している荷重を比較の対象とした。

船速 2knot の結果について比較した結果を、船長方向の分布の形で図-15に示す。横軸は、F.P. を 10 とした船長方向の位置を表す。縦軸は打ち込

み水圧を表す。荷重で計測した箇所については、先に述べたとおり平均水圧として表す。

縦軸の実験値は、計測した打ち込み荷重の極大値の 1/10 有義値、1/3 有義値及び平均値を表わす。実験値は、基準等で規定している荷重と比較するために全てフルード則にもとづき実船スケールに換算して表わす。

これまでに行われた海水打ち込み実験の結果¹⁾²⁾⁴⁾と同様に、打ち込み水圧は船尾方向に行くにしたがって急激に小さくなっていることがわかる。

実験値を定量的に見た場合、船首楼甲板上での打ち込み水圧は LLCG と ICLL66 の中間に相当する。一方、No.1 及び No.2 ハッチカバー位置(S.S.9 及び S.S.8)で ICLL66 よりも小さい値となる。また、荷重の大きさだけでなく船長方向の分布も IACS の URS-21 及び LLCG のそれらとは異なることがわかる。さらに、バルクキャリア模型を用いた実験結果とも明らかに異なる。

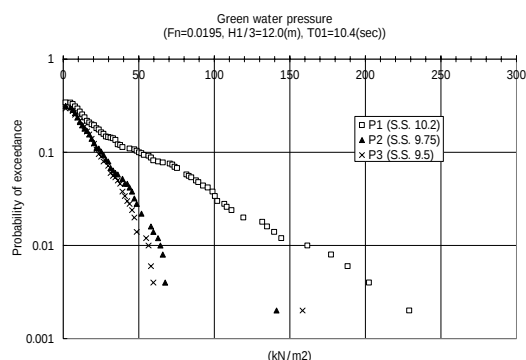


図-13 船首楼甲板上での打ち込み水圧の超過確率(船速 2knot)

これらのことから打ち込み荷重を設定する際は、船長や船種等の船型要素を考慮する必要があると考えられる。また、甲板上に一律同じ荷重で設定するのではなく、船長方向の分布を考慮する必要性があり、荷重の大きさと同様に船型要素を考慮する必要があると考えられる。

URS-21 は船長、船速や方形係数などの船型要素を取り入れているが、バルクキャリアを想定して定めた要件である。そのため、他の船型に同様の考え方を適用するのであれば、URS-21 中で設定し

ている係数について船型要素を考慮して検討する必要があると考えられる。

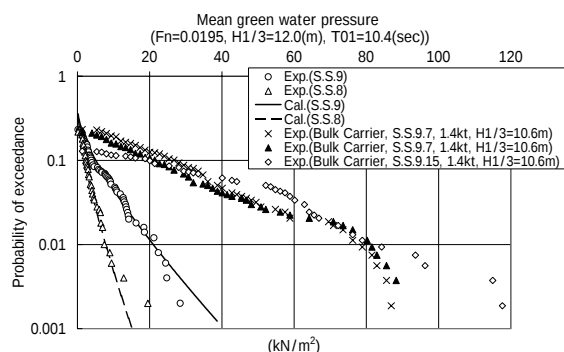


図 - 14 No.1 及び No.2 ハッチカバー位置での打ち込み荷重（平均水圧）の超過確率(船速 2knot)

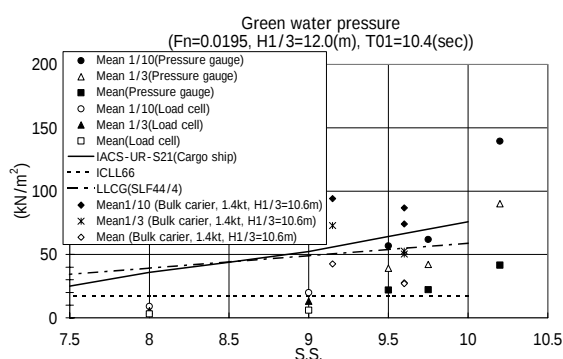


図 - 15 打ち込み荷重（平均水圧）の船長方向分布(船速 2knot)

5. まとめ

中型貨物船について波浪中実験を行い打ち込み荷重及び水圧を計測した。この結果をもとに波高、船速の影響について検討した。また、現行基準等との比較を行ったところ以下のことがわかった。

- (1) これまでに行われた実験結果と同様に、打ち込み荷重及び水圧に対する波高や船速の影響は大きい。
- (2) 打ち込み荷重の船長方向の分布は、船尾方向に行くにしたがって急激に小さくなっている。
- (3) 著者らが開発した予測法による超過確率は、実験値とよく一致しており、本実験結果は定量的にも合理的な結果である。
- (4) 本実験と比べて、波高が小さくかつ船速が低

い条件で計測したバルクキャリア模型の実験結果と異なり、ICLL66で規定される打ち込み荷重に近い結果となった。また、船長方向の分布はURS-21及びLLCGのそれとは異なる

最後に、本研究の一部は、日本財団の助成事業である「船舶関係諸基準に関する調査研究」において(社)日本造船研究協会との共同研究によりとして実施したことを付記し、関係各位に謝意を表します。

また、模型実験の一部は、横浜国立大学、(財)日本海事協会技術研究所との共同研究として行われたものであることを付記し、荒井誠横浜国立大学教授、熊野厚日本海事協会技術研究所次長をはじめとする共同研究実施担当者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Green sea loads on hatch cover and deck wetness derived from seakeeping test on bulk carriers, submitted by Japan, SLF/44/4/10, IMO, September, 2001
- 3) Report of the correspondence group, submitted by Germany of Netherland, SLF/44/4/2, IMO, September, 2001
- 4) 小川他: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、日本造船学会論文集第190号、2001
- 5) 小川他:青波による甲板荷重及び甲板水量の予測法に関する研究、日本造船学会論文集第185号、1999