

大波高中でハッチカバーに働く甲板荷重に関する模型実験

運動性能部 小川 剛孝、南 真紀子、谷澤 克治

1. はじめに

船舶の波浪中での安全基準の一つとして、荷物の積み過ぎによる事故等を防止するため、満載喫水線が定められており、国際的には満載喫水線条約として規定されている。近年、現条約が採択された 1966 年当時に比べて、運航実態が変化してきている事等を背景として、条約改正の機運が高まっている。そこで、見直しのための技術的な検討作業が国際的に行なわれている。この見直し作業の一つにハッチカバー強度の見直しがあり、日本、英国、オランダを中心として検討が行なわれている。ハッチカバー強度を考えるためには、海水打ち込みによる荷重を正しく評価する必要があると考えられる。しかしながら、海水打ち込みは水の挙動が複雑な現象であるため、これまでも数多く研究されているが、打ち込み荷重を定量的に評価した例^{1) 2)}³⁾はあまりないのが実態である。よって、定量的に評価するためには実験及び理論の双方から詳細に検討する必要があると考えられる。

当部では、これまでも海水打ち込みについて実験及び理論の双方から検討を行っている^{1) 2)}。これらの蓄積された知見をもとに、平成 13 年度から指定研究として「ハッチカバー等に働く極限波浪荷重の研究」を開始し、ハッチカバー強度の見直し作業に資する実験データの取得及び技術的な検討を行う予定である。平成 12 年度には、この研究に先立ち、大波高不規則波中での海水打ち込みの予備実験を行った。この結果から、ハッチカバーにはたらく打ち込み荷重の評価及び今後検討すべき事項についての整理を行ったので以下に報告する。

2. ハッチカバー強度の見直しの背景

現行の満載喫水線条約（以下 ICLL）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で一層この設定荷重が問題とされるようになった。また、船級協会の国際組織 IACS (International Association of Classification Society) では、UR-S21 という基準で新しく造るバルクキャリアのハッチカバーに対する基準を強化した。これらの背景により、ICLL の改正作業の中で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、その結果が国際海事機関 (International Maritime Organization、以下 IMO) に逐次報告されている。ここで示されている実験結果によると、ICLL 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 ICLL の設定荷重の強化を提案しているところであるが、日本及び IACS から様々な反論が出されており、実験で最大荷重が発生した波の統計的な位置付けが明

確でないので、その荷重の大きさだけで議論するのは適当ではない等の意見が述べられている。このような背景から、荷重を定量的に評価することが検討に際して重要になると考えられる。

3. 模型実験

3.1 実験方法

海上技術安全研究所 80m 角水槽において、ケーブサイズ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：Cb=0.806) を用いて不規則波中での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表 1 に示す。船首高さ (型深さから喫水をひいた値) は、ICLL で規定される最小船首高さと同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、舷弧は取り付けしていない。

表-1 供試船主要目

	Ship	Model
Lpp(m)	307.0	4.5
B(m)	50.42	0.739
D(m)	26.61	0.390
d(m)	19.44	0.285
Bow height(m)	7.16	0.105
GM(m)	7.467	0.109
Cb	0.806	0.806
Disp.(ton)	260523.00	0.82

実験で用い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。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 秒とした。また、出会い波数は約 500 波である。この不規則波を用いて正面向波 (φ=180°) 及び横波 (φ=90°) で計測を行った。船速は、正面向波については 14kt (フルード数 0.131)、1.4kt (フルード数 0.014) の 2 状態、横波については平均船速 14kt の 1 状態について計測を行った。これらのパラメータを表 2 に示す。

3.2 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。受圧面寸法及び船長方向の取り付け位置を図 1 に示す。取り付け位置は Fore deck (以下 PG1)、No.1 Hold (以下 PG2)、No.3 Hold (以下 PG3) を想定している。PG1 は上甲板と面一となるように取り付け、PG2 及び PG3 はハッチ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。PG1 及び PG2 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)、PG3 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。

表-2 実験パラメータ

出会い方位 (deg)	φ=180°	φ=90°
有義波高(m)	10.6	
平均波周期(sec)	14	
フルード数(Fn)	0.131, 0.014	0.131

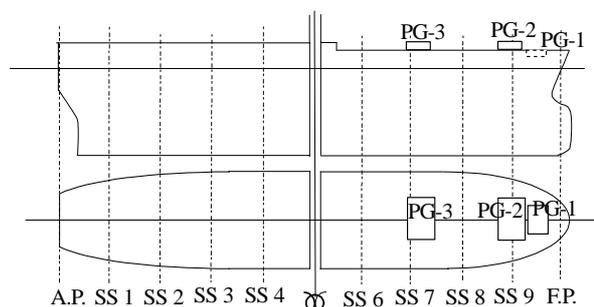


図-1 パネルゲージ配置図

打ち込み荷重以外に、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。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。

表-3 パネルゲージ受圧面寸法及び取り付け位置

	寸法(長さ×幅、単位mm)	取り付け位置
PG1	210×240	S.S. 9.6
PG2	280×260	S.S. 9.15
PG3	207×322	S.S. 7.35

4. 実験結果

4.1 船体運動及び船首相対水位変動

はじめに、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等の結果について示す。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。結果の一例を図2及び3に示す。横軸は入射波及び縦揺振幅を実船スケールに換算して表わす。また、縦軸は出会い波数に対する超過確率を対数軸で表わす。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、あまり大きすぎればならない事がわかる。

同様に、船首相対水位変動の超過確率を求めたので、その一例を図4及び5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振幅を実船スケールに換算して表わす。また、縦軸は出会い波数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、入射波及び縦揺の場合ほど完全ではないが、ほぼレーリー分布に従う事がわかる。しかし、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大きくはずれてくる事がわかる。

打ち込み荷重が大きくなるのは、船首相対水位が大きくなり、船首を乗り越える高さが大きくなる時である。よって、打ち込み荷重を推定する場合には、船首相対水位の非線形性に

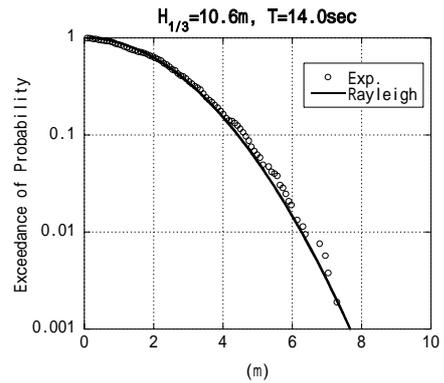


図-2 入射波の超過確率(有義波高 10.6m、平均波周期 14 秒)

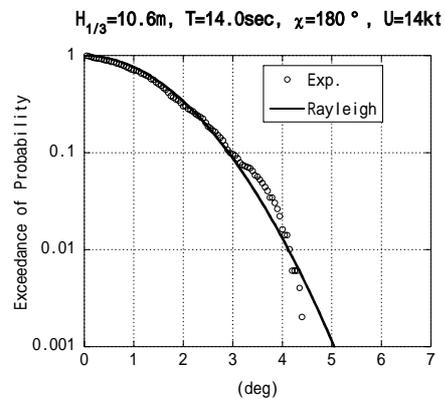


図-3 縦揺の超過確率(正面向波、船速 14kt)

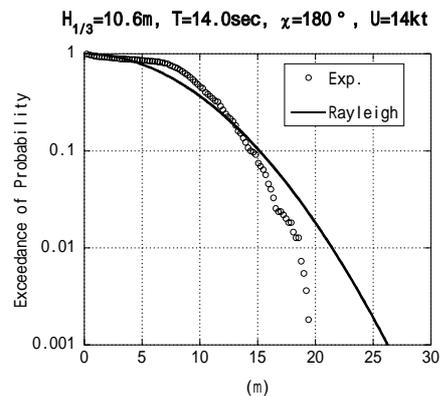


図-4 船首相対水位の超過確率(正面向波、船速 14kt (Fn=0.131))

注意を払う必要があると考えられる。

4.2 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ピーク値を讀

み取り、超過確率を求めた。これらを図6から図8に示す。縦軸は出会い波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のピーク値を実船スケールに換算した値を示す。英国の実験結果⁴⁾からFore Deckでの打ち込み荷重の超過確率を読み取った値を同じく図8に示すが、こちらについては5.2節で述べる。

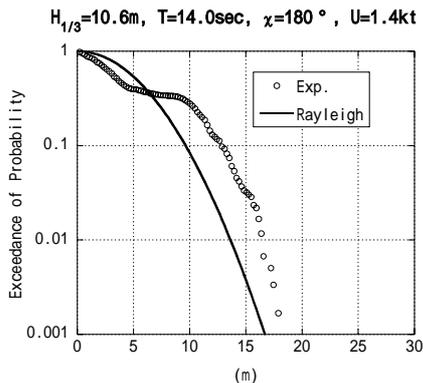


図-5 船首相対水位の超過確率(正面向波、船速 1.4kt (Fn=0.014))

4.2.1 相対水位変動との関係

図6からFn=0.131(14kt)、正面向波の状態で計測した荷重の値は、PG1で最大約40m水頭とかなり大きなものとなる。図4に示すように船首相対水位の最大値は20m弱となっていること及び船首高さが約7mであることから、船首部を越えての乗り上げる波の高さ(越波高さ)は実船換算で最大12m程度となる。さらに、これまでに行われた研究¹⁾²⁾³⁾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。本実験の結果もこれらと同様のものとなった。

4.2.2 出会い方位の影響

図6及び7の比較から、出会い方位が横波の場合、PG1及びPG2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、小さくなるのがわかる。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、PG3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事がわかる。

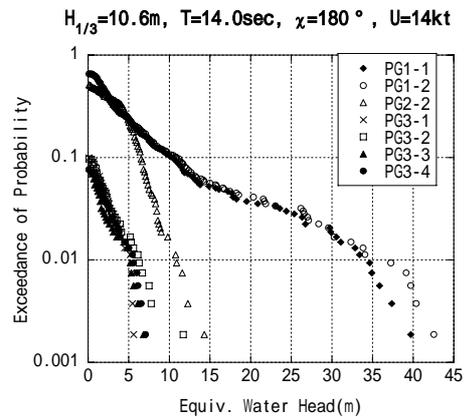


図-6 打ち込み荷重の超過確率(正面向波、船速 14kt (Fn=0.131))

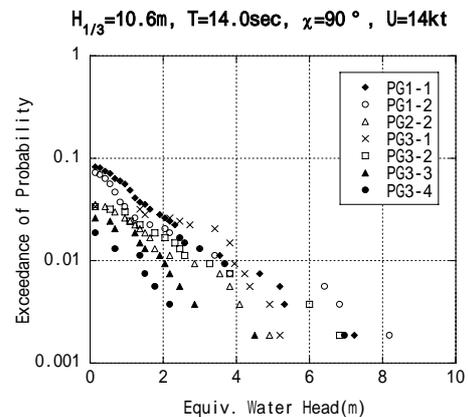


図-7 打ち込み荷重の超過確率(横波、船速 14kt (Fn=0.131))

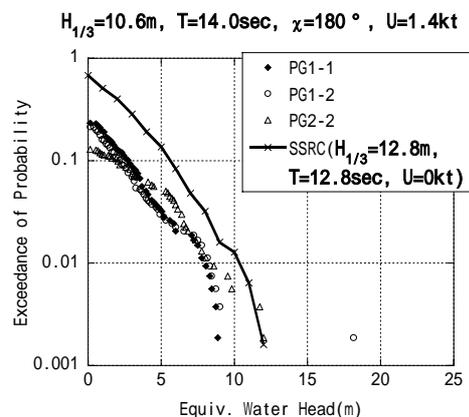


図-8 打ち込み荷重の超過確率(正面向波、船速 1.4kt (Fn=0.014))

4.2.3 船速の影響

図6及び8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1.4ktのPG3では、打ち込み荷重の発生はなかった。しかしながら、PG2はPG1やPG3ほど顕著に速度の影響を受けていない。

ビデオによる観察結果から、船首部から流入した水は、船尾方向へまっすぐ流れるのではなく、甲板上の一点に集中するように流れる。このように水が集中する位置は船速が遅くなるにつれて、その位置が前方に移動する。船速1.4ktの場合PG2前方で集中し、PG2に乗り上げるように打ち込んでいる。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、PG2での荷重はさほど顕著に変化しなかったと考えられる。

船首部から流入した水の挙動が、このような様相を示す事は、打ち込みに関する他の研究⁵⁾でも示されているが、これらを定量的に評価するためには、詳細な検討が必要と考えられるので、こちらについては今後の課題としたい。

5 考察

5.1 現行規定との比較

計測した甲板荷重とICLL及びUR-S21との比較を図9から図11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わす。縦軸は、計測した打ち込み荷重の最大値、1/10有義値、1/3有義値、平均値を表わす。値は全て実船スケールに換算して表わす。

UR-S21で設定される打ち込み荷重と比較した場合、本実験の結果は、正面向波では速度にかかわらず最大値及び1/10有義値はURS-21よりも大きな値となり、1/3有義値で同程度の大きさとなった。また、ICLLで設定される打ち込み荷重と比較した場合、最大値及び平均値ともにICLLの設定荷重を上回る結果となった。

5.2 英国実験との比較

英国の実験結果⁴⁾からFore Deckでの打ち込み荷重の超過確率を読み取った値を図8に本実験の結果とともに示す。図中の英国の実験は船

速0knot、有義波高12.8m、平均波周期12.7秒で行われた。そのため、直接の比較は難しいものの、超過確率の分布は同様な形状を示してい

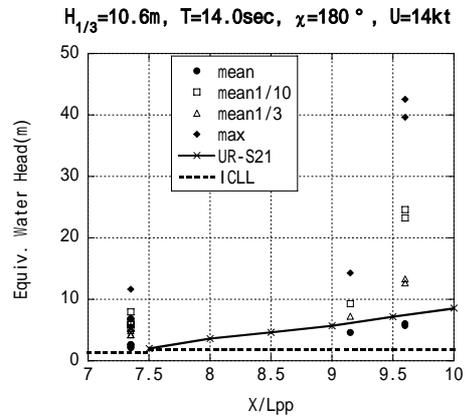


図-9 打ち込み荷重の船長方向分布(正面向波、船速14kt (Fn=0.131))

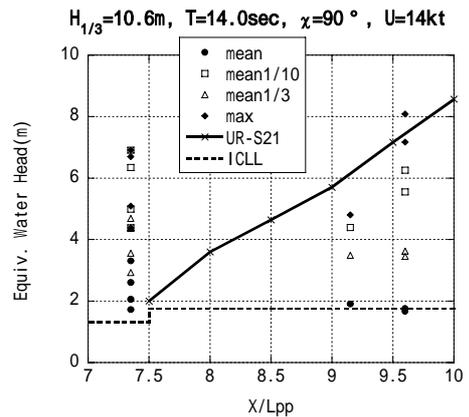


図-10 打ち込み荷重の船長方向分布(横波、船速14kt (Fn=0.131))

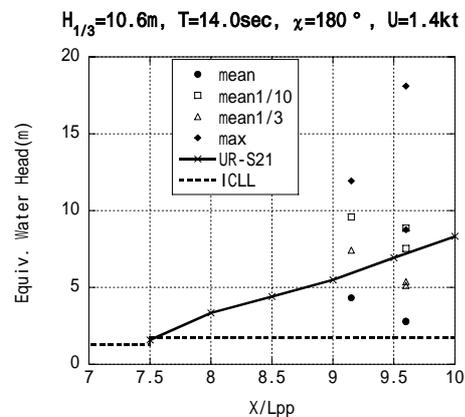


図-11 打ち込み荷重の船長方向分布(正面向波、船速1.4kt (Fn=0.014))

る。しかし、打ち込み発生頻度は本実験の結果と比べて高く、同じ発生確率における荷重は英国の結果の方が大きくなっている。超過確率は示されていないが、波高 10m、周期 11.5 秒の場合の実験も行っており⁴⁾、打ち込み発生確率は約 32%となっている。本実験では約 23%となっていることから全体的に発生確率が大きくなっている。これは、英国が実験に使用した模型船の船首高さが約 6.5m と最小船首高さよりも低い事に起因すると考えられる。このように、船首高さの違いが打ち込み荷重に及ぼす影響は大きく、定量的な評価を行う際には、これらに注意を払う必要があると考えられる。

現在見直しの対象となっている第 1 位置のハッチカバーは、本実験では PG2 を指す。こちらについて英国の実験との比較を行ったので、図 12 に示す。本実験とは、船速、波高等が異なるため直接の比較はできないが、全般的に本実験結果の方が大きな値を示している。また、これらはいずれも ICLL で設定する荷重 1.75m 水頭を大きく上回る結果となっており、荷重を見直す必要があることを示唆していると考えられる。

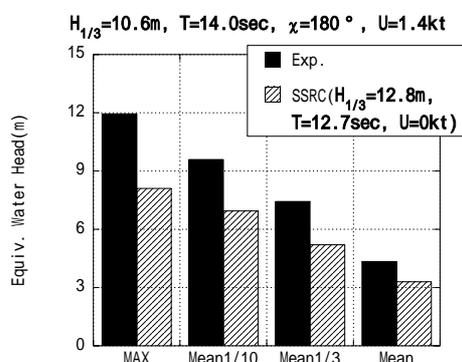


図-12 No.1 ハッチカバーに作用する打ち込み荷重(正面向波、船速 1.4kt (Fn=0.014))

6. まとめ

バルクキャリア模型を用いて、打ち込み荷重の計測を行った結果、以下の事がわかった。

- (1) 打ち込み荷重推定の入力である船首相対水位の非線形性は縦運動に比べて無視できない。推定の際には、この非線形性に注意を払う必要がある。

- (2) 計測された打ち込み荷重は、ICLL で設定する荷重を大きく上回る結果となり、荷重の値を見直す必要性を示唆していると考えられる。

ところで、日本及び IACS の調査によると、ダービシャー号を除けば、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て。このことから、ICLL 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とも考えられる。そのため、現行規則の設定荷重を検討する際には、安全係数を含めて検討する必要があると考えられる。

さらに、バルクキャリア以外にハッチカバーを持つ船種として、コンテナ船が考えられる。コンテナ船は、相対的に打ち込みにくく、荷重も小さくなると考えられるが、これらを定量的に評価するための実験データの蓄積はほとんどない。本研究では、これらのデータを取得し、検討を行っていく予定である。

最後に、本研究は(財)日本海事協会技術研究所、東京大学、(財)造船技術センターとの共同研究の一部として行われたものであり、熊野厚日本海事協会技術研究所主任研究員、影本浩東京大学大学院教授をはじめとする共同研究者の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小川他:海水打ち込みによる甲板水量及び甲板荷重に関する実験的研究、日本造船学会論文集第 182 号、1997
- 2) 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
- 3) 川上他: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
- 4) 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
- 5) 高木他: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