

船首部における砕氷現象の模型実験による観測

海洋開発研究領域 氷海技術研究グループ *若生大輔、下田春人、泉山 耕

1. はじめに

水中を航行する船舶による砕氷現象は、氷の破壊・運動を伴う複雑な現象である。砕氷航行時には砕氷の反力として船体に大きな荷重が発生する。この荷重「氷荷重」は流体力に比べて荷重強度が高く、また、局所的に発生するため、船体の安全にとって大きな脅威である。一方、氷荷重を船体全体にわたって積分したものは「砕氷抵抗」であり、これを軽減することを目的として様々な船型が開発されている。このような水中船舶の安全性の確保及び性能の向上のためには、砕氷現象及びその結果として発生する氷荷重の詳細についての把握は必要である。

近年当所では、模型実験においてフィルム状の圧力センサーを用いることにより、模型船体に働く氷荷重を詳細に計測することに成功した(泉山, 2000)。本研究では、この試験と同様のセンサーシステムを用いて、様々な氷厚及び船速条件に対して模型実験を行い、船首部における氷荷重の特性の更なる把握を試みた。

2. 実験手法

模型実験は、当所の氷海船舶試験水槽において実施した。実験への供試模型は、砕氷型巡視船として設計・製作した模型である。本模型の主要目は表-1に示すとおりである。実験では船首部左右両舷の S.S. No. 8 及び No. 9 近傍に、喫水線及びその下部を覆うように圧力センサーフィルムを貼り付け、氷荷重の計測を行った。模型の船首部及びセンサーフィルムの貼り付けた状況を図-1に示す。本模型船の船首は、水中のみならず開水中での性能をも確保して巡視船としての要件を満たすために、V字型のフレーム形状を有する伝統的な楔型船首となっている。

圧力計測システムは、Tekscan 社製の I-SCAN である。船首に貼り付けたセンサーフィルムは、

厚さ 0.3 mm のフレキシブルなフィルムであり、210 mm 四方の感圧面内に 4 4 行 4 4 列に感圧スポットが配置されている。本圧力計測システムの詳細については、泉山ら(2000)等を参照されたい。

垂線間長	4.688 m
型幅	0.875 m
計画喫水	0.250 m
排水量	0.527 m ³

表-1 模型船主要目



図-1 模型船船首部と圧力センサーフィルム

実験では、圧力センサーシートを貼り付けた状態で模型船を平坦氷板の中を一定速度で曳引した。模型船の運動は、ピッチング、ローリング、ヒービングは自由であるが、サージング、スウェイング、ヨーイングは拘束されている。実験は、3種類の氷厚(28.4、47.0、63.0 mm)及び4種類の模型船速(0.129、0.389、0.643、0.900 m/s)に対して実施した。また、圧力センサーシートによる船体への荷重の計測に併せ、曳引台車に取り付けた VTR カメラにより、船首部における氷板の破壊挙動の観測も行った。

3. 計測結果

3. 1. 砕氷サイクルと荷重

泉山ら（2000）による前回の実験では、船体に働く荷重が、ほぼ水平の線状の細長い領域に集中的に働く荷重と、比較的広い領域に働く荷重の2種類の荷重により特徴付けられることが示された。これらの荷重挙動について、彼らは、線状の荷重は船体と氷縁の接触によるもので、船体の前進により氷縁が押し下げられて氷が破壊した後は、最氷片が船体周りに回転することにより、第2の荷重が発生する、という解釈を示した。氷と船体との接触が狭い線状の領域において発生することは Riska（1991）により実船試験時においても示されており、彼らは模型試験においてもこのような荷重が発生していることを示した。また、第2の荷重は模型船速が高い場合にのみ観察されるものであり、このことから、この荷重は砕氷片と船体との直接の接触よりも、氷片と船体との間に介在する流体による力が支配的である可能性がある。

今回の試験においても、上記実験と同様の荷重挙動が観測された。今回の実験では、圧力計測に併せて砕氷現象の VTR カメラによる撮影も行っている。船体周辺の氷板破壊の様子とセンサーにより計測された船体荷重を図-2に示した。各図において、背景が VTR 画像であり、左下がセンサーに働く荷重分布のコンピュータ画面上での表示ウィンドウである。図は、砕氷現象の典型的な1サイクルを示したものであり、VTR 画像、荷重ウィンドウとも図の左側が船首側である。砕氷サイクルは以下のように進行する。まず、氷板と船体との接触があり、船体の進行とともに氷板が押し下げられクラックが発生する。荷重は線状の領域に卓越し、これが船底・船尾方向へと移動する（第1、2図）。この線状荷重はある深さで消滅し、その後、砕氷片が船体方向へ回転する過程で、広い領域にわたる荷重が発生する（第3、4図）。

以上のような砕氷現象及び荷重挙動を基本単位として、これが繰り返されて砕氷現象が進行する。しかしながら、前回の実験でも観察されたように、低速領域では砕氷片の回転による荷重が明瞭に現れない場合があった。また逆に、速度が高く氷厚が厚い場合は、図-3に見られるようにスプレイン

グを伴うような氷片の激しい回転も観察され、この場合にはこれによる荷重も高い値が計測された。

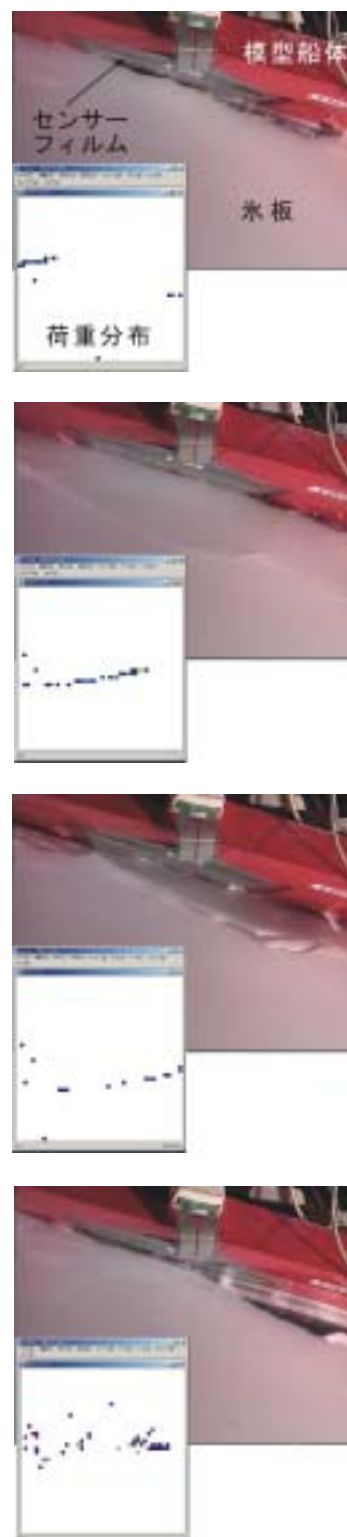


図-2 砕氷サイクルと船体荷重



図-3 スプレイングを伴う氷片の回転

3. 2. 氷荷重発生頻度

前項で示したように、船体に働く氷荷重は、氷縁と船体との接触による線状荷重とこれに引き続く砕氷片の回転による荷重を基本サイクルとする荷重が繰り返される。ここで、このような荷重サイクルがどのような間隔で発生するのかという点について検討を加える。このため、S.S. No.8 に貼り付けたセンサーフィルムへの線状荷重発生頻度を計測した。ここで、センサー上に現れる荷重は、計測対象領域内で発生する場合と、その領域の前方で発生して後方へ移動する過程で対象領域に現れる場合の2ケースが考えられるが、この計測ではこれら両者を解析の対象とした。S.S. No.8 におけるセンサーフィルムの感圧領域を検査区間として、荷重発生頻度を解析したこととなる。

解析結果を図-4及び図-5に示す。これらの図は、それぞれ、荷重の発生回数と走行距離から計算される平均的な荷重発生距離間隔と氷厚及び船速との関係を示したものである。ここに言う荷重発生距離間隔とは、一つの荷重イベントから次の荷重イベントまでに船が前進する距離である。船首部における砕氷現象では氷板の曲げ破壊が卓越する。曲げ破壊による氷板内のクラックは、船体からある程度離れた位置に発生し、これによる新たな氷縁と船体が接触することにより次の荷重イベントが発生する。従って、荷重発生距離間隔は、氷板に発生するクラック間隔、あるいはこれによって生じる砕氷片の代表的サイズを反映したものと言える。

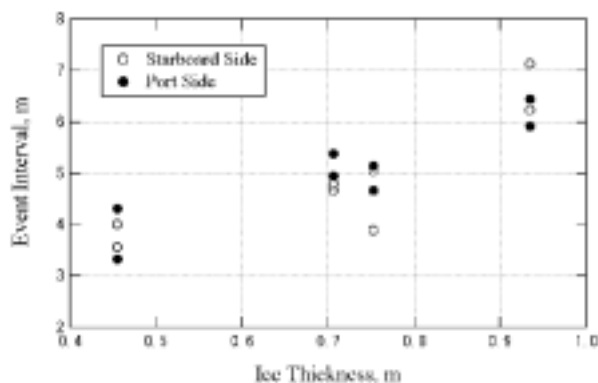


図-4 荷重発生距離間隔と氷厚の関係

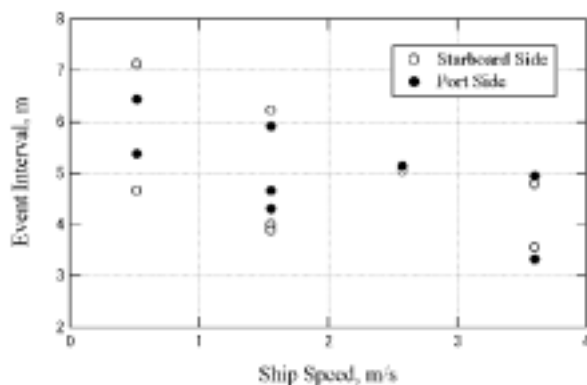


図-5 荷重発生距離間隔と船速の関係

砕氷現象により氷板に発生するクラック間隔については、Yamaguchi (1992) らによる研究がある。彼らは実船及び模型実験における砕氷パターンの詳細観察を行った。この結果においては、クラック間隔が氷厚とともに増大することが示されたが、一方、船速については明瞭な影響は見られなかった。Yamaguchi らの研究グループはこの問題についてさらに研究を続け、二次元模型による水槽実験並びに数値計算による検討を行っている (Usami, 1995; Yamaguchi, 1995)。これらの研究では、クラック間隔についての前回の研究による氷厚の影響を確認するとともに、船速の影響については、船速の増大とともにクラック間隔が減少することを示した。本研究における計測結果は、これらの Yamaguchi らによる研究結果と同様の傾向を示したものである。本研究の結果は、氷板の破壊特性が氷荷重の発生頻度にも影響を与えていることを示したものと言えよう。

3. 3. 氷荷重発生深さ

次に、荷重の発生深さについて検討した。これについても、S.S. No.8 に貼り付けたセンサーシートについて、これに発生した線状荷重の鉛直方向の位置を解析した。

荷重発生位置の深さ方向分布の例を図-6に示す。図の横軸は、実船スケールでの船底を基準とする高さであり、高さ4 m位置が静止時の喫水位置である。同図には実船で3ノットに相当する、模型船速 0.389 m/s のケースについて、氷厚が変化したときの荷重深さの変化を示している。図中の矢印は、平均的荷重発生位置である。図-6より、氷厚が厚くなるに従って、荷重発生位置が静止時喫水線近傍から、船底方向に移動することが判る。また、氷厚の増大に伴って荷重発生領域も広い範囲に広がることも示されている。

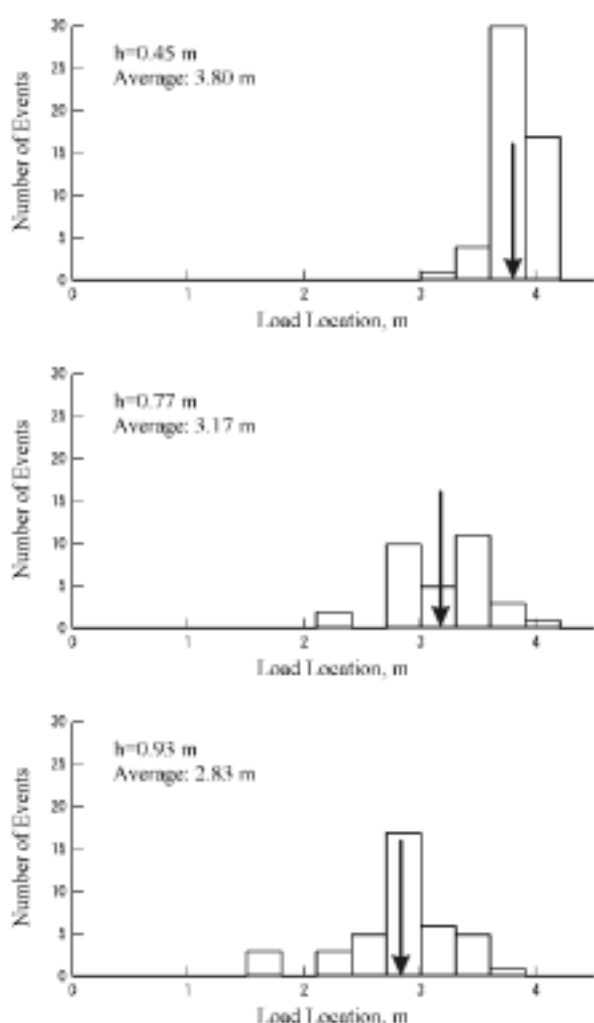


図-6 荷重発生位置の分布

船体上における荷重発生深さの変化の理由は、船体運動に求めることができよう。船舶による砕氷は、WAAS 船型等の特殊なものを除き、氷板を曲げて破壊することによる。すなわち、船の持つ推進力あるいは慣性力といった水平方向の力を、傾斜した船首部により鉛直方抗力に変換することにより氷板を曲げ割る。この鉛直方抗力の反力として、船体には上向きの力が発生し、船体の上昇運動が起こる。この船体上昇量が大きいほど、船体と氷との接触位置は相対的に船底方向に移動することとなる。

図-7は、ピッチングとヒービングの計測結果より計算した、S.S. No.8 における船体上昇量と荷重発生位置（静止時の喫水線からの深さ）の関係を示したものである。図中のデータ点はそれぞれの平均値であり、データ点の周囲のバーは、各データの変動の標準偏差を示したものである。船体上昇量と荷重発生位置との間には良い相関が見られ、荷重位置深さの変化が船体運動によるものであることを裏付けている。一方、同図のデータ点船体運動の変動量は、平均的船体上昇量とともに増大し、これに伴って荷重深さの変動量も増大している。この様子は図-6においても見られている。以上より、氷厚が増大すると、氷と船体との接触位置が平均的な意味において深まるとともに、その変動も大きくなり、結果的に氷厚が薄い場合に比べて船底に近い部分にまで氷荷重が発生する可能性が高まることが示されていると言えよう。

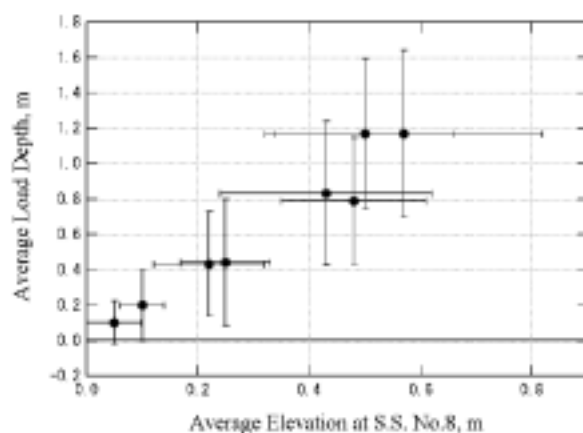


図-7 荷重発生位置と船体上昇

4. おわりに

本報告では、船舶による砕氷現象について、圧力センサーシステムを用いた水槽実験結果を報告した。本研究は、基礎的な研究であり、本研究の成果が、水中船舶の設計等に直接反映されるということは期待できないかもしれない。しかしながら、このような研究を積み重ねて砕氷現象についての理解を深めることにより、水中船舶の性能、安全性の向上に資することができるものとする。また、近年船舶の水中性能について数値計算により把握しようとする試みが行われているが、このような研究においても、本研究において試みたような、砕氷現象の詳細についての知見の獲得が不可欠である。

参考文献

- 泉山他：水槽試験における船体氷荷重の計測．平成 12 年度（第 74 回）船舶技術研究所発表会講演集、395-400 頁．
- Riska, K., 1991. Observation of the Line-like Nature of Ship-Ice Contact. Proc. of the 11th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. 2, pp. 785-811.
- Usami, A., Kato, K., Adachi, M., Yamaguchi, H. and Miyanaga, M., 1995. A Study of Dynamic Effects on Icebreaking in 2 Dimension: Experiment. Northern Sea Route; Future & Perspective. Proc. of INSROP Symposium Tokyo '95. pp. 437-446.
- Yamaguchi, H., Kurasawa, M. and Kato, H., 1992. Full-scale and Model Observation of Ice breaking pattern on a Japanese Patrol Icebreaker "Soya". Proc. of the 11th International Symposium on Ice, Vol. 1, pp.164-175.
- Yamaguchi, H., Usami, A., Kato, K., Adachi, M. and Kato, K., 1995. A Study of Dynamic Effects on Icebreaking in 2 Dimension: Computations and Components of Icebreaking Load. Northern Sea Route;

Future & Perspective. Proc. of INSROP Symposium Tokyo '95. pp. 447-452.