

19 水槽試験における船体氷荷重の計測（その2）

氷海技術部 * 泉山 耕、瀧本忠教、若生大輔

1. はじめに

昨年の本講演会において、著者らはフィルム状の圧力センサーを用いて、氷海水槽における模型実験で模型船に加わる局所氷荷重を計測した結果について報告した[泉山他、2000]。この報告では、模型船と氷との接触の様子が、実船試験において観察されたものと同様に、いわゆる”line-like contact”となることをはじめとして、船体周囲の砕氷現象と計測された氷荷重分布の挙動の関係、ステム部における氷荷重発生位置と船体運動・船首部周辺の氷板のたわみの関係などについて述べた。前回の実験において圧力センサーシートが模型実験における船体氷荷重計測に有用なツールであることが確認されたことから、同じ圧力センシングシステムを用いて第2回目の実験を行った。本報告では、この実験結果について報告する。

水中を航行する船舶に加わる砕氷抵抗は、開水中のものに比べて格段に大きなものとなる。このため、砕氷抵抗の低減を目的として様々な研究が行われてきた。このような研究の代表的な手法としては、システマティックに船型を変化させたシリーズモデルを用いた水槽実験により最適船型を求める手法がある。しかしながら、船舶に加わる砕氷抵抗が、船体各所に働く局所氷荷重の積分として与えられることを考慮すると、砕氷抵抗の更なる詳細な研究には、局所氷荷重に対する知見が不可欠となる。このような計測を行うことを目的として分割模型を用いた研究が行われている(Kayo, 1993, Liukkonen, 1992)。しかしながら、分割模型により計測される局所氷荷重の空間分解能には模型製作技術等による制約がある。この意味において、本研究において用いたセンサーシートは、極めて高い空間分解能において局所荷重を簡便に計測できる特徴がある。本報告では、実験により得られた局所氷荷重の計測結果と船体表面の傾斜角度を組み合わせ、砕氷抵抗に対する船体各所の局所氷荷重の寄与について論ずる。

2. 実験及び解析手法

今回の実験においても前回同様、氷海水槽において抵抗試験を実施し、この時に船体各所に働く局所氷荷重を模型船船体表面に貼り付けた圧力センサーシートにより計測した。実験に供した模型船は、海上保安庁の砕氷型巡視船「そうや」の縮尺 1/20 の模型である。表1に「そうや」の主要目を、実船及び模型について示す。実験においては、模型の swaying、yawing、surging を拘束し、pitching、heaving、rolling については自由に運動ができる状態として模型を計測台車により氷板中を一定速度で曳引した。計測台車と模型の取り付けは容量 2 kN のロードセルを介して行い、模型に加わる全抵抗をこのロードセルにより計測した。実験は、氷厚 (h) が 25 及び 45 mm の平坦氷を対象とし、船速 (V) は 0.115、0.345 及び 0.575 m/s の3種類とした。これらは、実船においてそれぞれ、50 及び 90 cm、1、3 及び 5 ノットに相当する。

表1 「そうや」主要目

	Ship	Model
垂線間長, L_{PP} , m	90.0	4.500
最大幅, B , m	15.6	0.780
喫水, d , m	5.2	0.260

本実験に用いた圧力センサーシステムは、厚さ 0.3mm のフィルム状のセンサーシートと計測データの取り込み・表示・解析用のコンピューターからなる。センサーシートの感圧領域は 238 mm 四方のサイズであり、この中に圧力を計測するセンシングスポットが 4 4 行 × 4 4 列の格子状に配列されている。センシングスポット間の間隔は 5.4 mm である。なお、本圧力センサーの詳細、氷荷重計測への適用等については、昨年 の 報告 及び Izumiyama (1999) 等を参照されたい。

模型船上におけるセンサーシートの位置を図1に示す。センサーシートは、模型船の右舷側のFPからS.S. No.5近傍までの6箇所（Area-1～Area-6）に設置した。ただし、実験に用いた圧力計測システムにおいて一度に計測可能なセンサー数が3枚であることから、同じ条件の下センサーシート位置を変えて実験を2回繰り返すことにより、6箇所の計測領域に対するデータを得た。センサーシートと氷の間の摩擦係数が模型表面と同様のものとなるように、センサーシート表面には予めサンドペーパーを用いて粗度を付けて実験に供した。

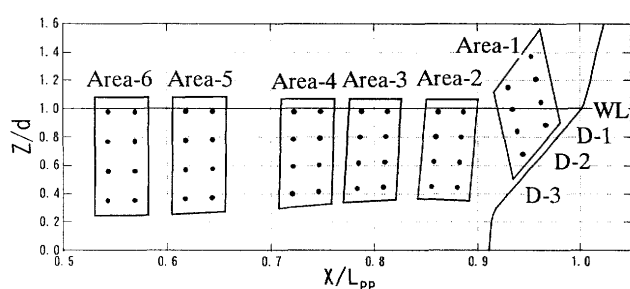


図1 センサーシートの位置

前述のように、本実験に用いたセンサーシートには、 $4 \times 4 \times 4$ 点のセンシングポイントがあり、それぞれからのデータのセットにより圧力分布の1フレームが構成される。これらのフレームが一定のサンプリング周波数（最大 100 Hz）で所定の時間計測された結果が実験データとして得られる。従って、1回の実験の結果として得られるデータは、いわば（ $4 \times 4 \times 4 \times 3$ ）チャンネルの時系列データであり、このような膨大な量のデータの表現には何らかの工夫が必要となる。このため今回の解析にあたっては、センサーシートを分割してサブエリアを設定し、それぞれのサブエリアに含まれるセンシングスポットからのデータの平均等をサブエリアの中心位置の代表点でのデータとして扱うこととした。

図1の各センサーシート領域内に示された点は、センサーシートを8分割（横に2分割、縦に4分割）してサブエリアを設定したときの代表点位置を示す。この場合、それぞれサブエリアには横 22 点、縦 11 点のセンシングスポットが含まれる。図1に示されるように、これらのサブエリアの代表点は、多少のずれはあるが、船底を基準とした高さ z の異なる 4

レベルの位置に存在する。これらの 4 レベルを、上から順に、WL（喫水線近傍）、D-1（ $z/D = 0.8$ 近傍）、D-2（同 $z/D = 0.6$ ）、D-3（同 $z/D = 0.4$ ）と呼ぶものとする（図1参照）。

なお、本実験に用いた圧力センサーからは、各センシングポイントに加わる圧力に応じた出力が 0 から 255 までの値としてコンピューターに取り込まれる。この値を raw と呼ぶ。また、センサーシート上の矩形領域に含まれる各センシングポイントからの raw の和を raw sum と呼ぶ。本報告でもこれらの用語を用いるものとする。

3. 実験結果

前回の報告では、模型船体と氷との接触が水平に伸びた狭い領域に沿って発生し（line-like contact）、このような荷重が模型の前進に伴って喫水線側から船底側へと移動する状況が計測され、これが砕氷現象の観察結果によって説明されることを示した。今回の実験においても船体に働く氷荷重について同様の挙動が計測された。

図1に示したサブエリアの一つについて、これに加わる raw sum の時間変化を示したものが図2である。前述のように、このサブエリアは 22×11 個のセンシングポイントを含む領域であり、実際の面積で言えば $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ の領域である。この例は、S.S. No.8（Area-3）近傍で深さ D-1 での計測結果である。同図より、氷荷重の挙動が鋭いピークを有するスパイク状の荷重の繰り返しであることがわかる。これは、上述のように、氷荷重が狭い領域に集中荷重として発生し、その荷重領域が模型の進行とともに移動するという特性を持つことによる。

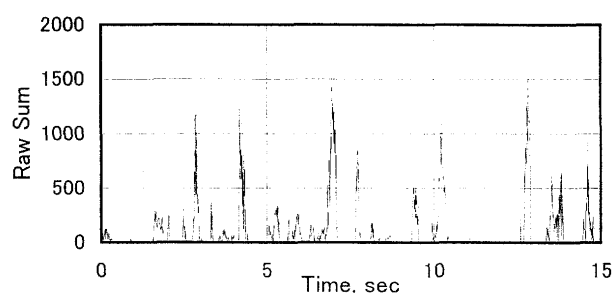


図2 サブエリアに加わる raw sum
($h=45 \text{ mm}$, $V=0.575 \text{ m/s}$)

S.S. No.8 (Area-3) における氷荷重の鉛直分布の計測結果を図3に示す。同図は、鉛直方向に11分割したサブエリアに対する raw sum の時間平均値の鉛直分布を示したものである。同図より喫水線には氷荷重はほとんど働かず、その下部の水中部分に卓越することがわかる。これは、氷の曲げによる破壊が船体による氷板の押し下げがある程度進んだ後に発生することによると考えられる。荷重の鉛直分布は氷厚により異なり、氷厚 25 mm の場合は $z/D = 0.9$ 近傍で最大値を示すが、氷厚 45 mm では $z/D = 0.8$ よりも深い位置での荷重が卓越的となる。これについても氷の破壊に至るまでに氷板に発生する曲げたわみの量が氷板が厚くなるほど大きくなることによるものであろう。

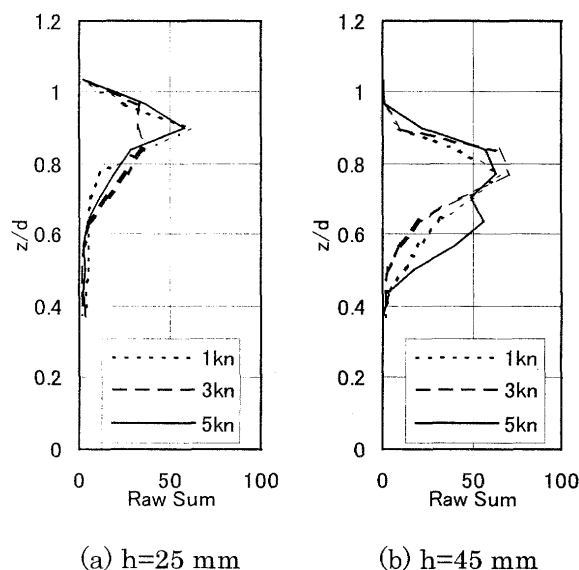


図3 氷荷重の鉛直分布

氷荷重の水平方向分布の解析結果を、氷厚 45 mm の場合について、模型船の速度毎に図4に示す。同図は、図1に示したサブエリアの代表点について、各サブエリアに発生する raw sum の時間平均値を示したものであり、前述の WL から D-3 までの各深さレベルに分けて結果を示したものである。

同図より、図3に示された結果と同様に、喫水線近傍の深さレベルである WL における荷重分布は非常に小さいことがわかる。唯一の例外は船速が 0.575 m/s の場合の S.S. No. 5 から 6 にかけての領域であり、ここにはある程度の荷重の発生が認めら

れる。これについては、氷荷重の挙動を観察すると、船首部において形成された砕氷部の外側の母氷板縁、あるいはこれと船体との間に挟み込まれた砕氷片が船体に押し付けられるときの荷重と考えられる。

一方、最も深いレベルである D-3 にもほとんど荷重が発生せず、荷重の大部分はレベル D-1 及び D-2 において卓越的である。しかしながらその水平方向分布は速度によって変化する。レベル D-1 については、概略的に言えば、低速時には S.S. No. 7 より船首側に荷重が発生するが、船速の増大に伴い、これが船尾側に移動することが認められる。また、レベル D-2 に発生する氷荷重については、速度の増大とともにステム部の荷重が増大し、 $V=0.575$ m/s の場合に全データを通して最大の荷重が計測されている。

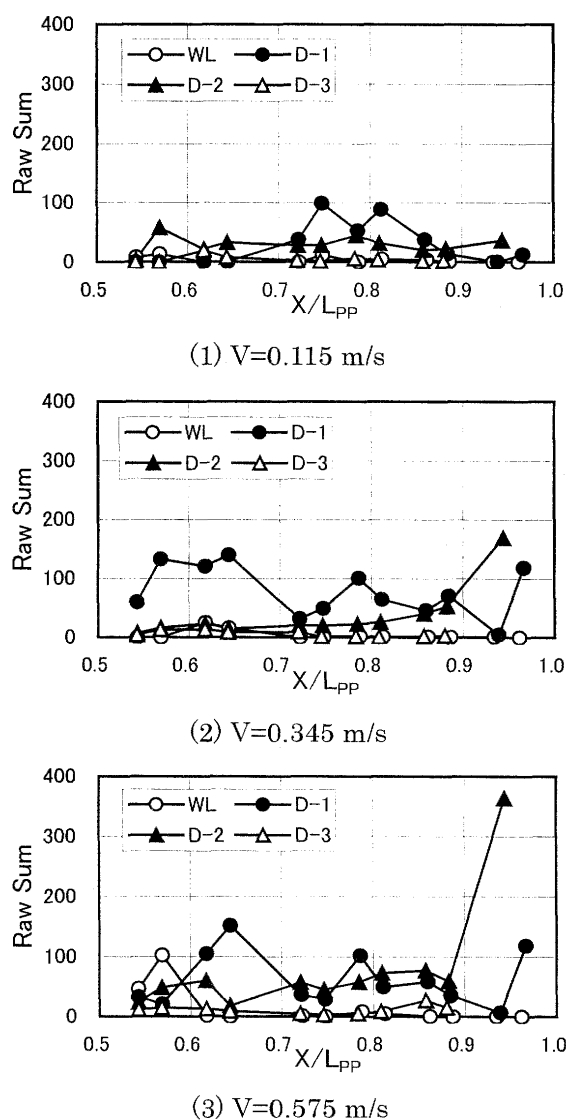


図4 氷荷重の水平分布 (h=45 mm)

4. 局所氷荷重と全抵抗

水中を航行する船舶に加わる砕氷抵抗は、開水中におけるものに比べて格段に大きな抵抗であり、これを低減することを目的として様々な船型が考えられてきた。特に、砕氷抵抗は船首部に卓越することから、各種の船首形状を有する模型船・実船を用いての実験・計測が行われてきた。

Noble は、異なる船首形状を有する4種類の模型船を用いて水中抵抗試験を行った。彼はこれらの模型外面の傾斜角を用いてそれぞれの船首形状の砕氷能力を示す指標を計算し、これを抵抗試験結果と比較した。彼の用いた指標は、船体外板の法線ベクトルの前後方向成分 (F)、横方向成分 (S)、鉛直方向成分 (D) を考慮したものであり、これらの値を喫水線及びこれから喫水深の約15%下がった水線上の7点 (F.P.から S.S. No. 6の間) について計算した。Noble は、これらの値を用いて氷を破壊する力 (鉛直下向きの力) と抵抗となる力の比に対する指標として D/F を、また、氷を船側へ排除するための力をも考慮したものとして $(D+S)/F$ を採用し、これらと実験で得られた抵抗値との比較を行っている。

Noble の研究は、船首形状を砕氷性能という観点から定量化しようとしたものであり、その系統的な模型試験とともに高く評価できるものである。しかしながら、今回の実験結果から彼の手法には以下の問題点が指摘できる。まず、彼の考え方は船体に働く氷荷重の分布が一様であることを前提としたものであるが、実際の氷荷重は船体上の位置により大きく変化する。また、彼は喫水線とこの近傍の水線をもって船首形状を代表させているが、実際の氷荷重はこれよりもさらに下部において卓越する可能性がある。本研究では、計測された局所氷荷重から抵抗成分を計算し、これと全抵抗の関係を考察した。

今回の実験において圧力センサーシートにより計測された氷荷重は、船体に垂直な力 (F_N) である。この力の抵抗成分 (F_X) と F_N の比 (C_R) は、着力点における船体の水線角 (α) と開き角 (γ) (図5参照) 及び氷と船体との間の摩擦係数 (μ) により次式で与えられる。

$$C_R = \frac{F_X}{F_N} = \sin \alpha \sin \gamma + \mu \cos \alpha \quad (1)$$

以下では、 C_R を局所抵抗係数と呼ぶものとする。

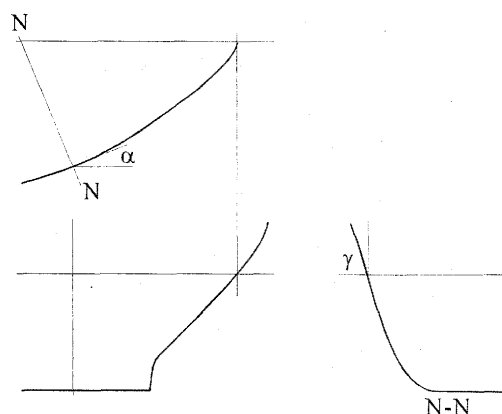


図5 船体外板の傾斜角の定義

実験に供した模型船について、局所抵抗係数を計算した。本船は、砕氷船としては伝統的な形状であるV字型のフレームラインを有し、船首全体としては楔型の船首をなしている。局所抵抗係数の計算においては、氷と船体との摩擦係数として $\mu = 0.1$ を用いた。計算により得られた局所抵抗係数の分布を図6に示す。本船の水線角は S.S. No. 5 において $\alpha = 0$ であり、この結果、摩擦成分だけが抵抗に寄与するためこの点において $C_R = 0.1$ となっている。船体中央から船首に向かって局所抵抗係数は増加し、ステム部において最大値を示す。水線による違いについては、S.S. No. 7 近傍では深い位置ほど局所抵抗係数の値が高いが、この差は船首方向に向かって小さくなる。

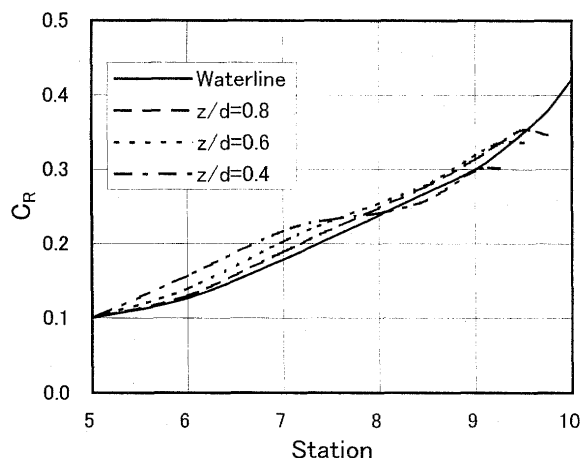


図6 局所抵抗係数の分布

実験により計測された船体各所における局所氷荷重にその点における局所抵抗係数を乗じることによ

り、局所荷重による抵抗成分（以下、局所抵抗成分と呼ぶ）が計算される。図1に示したサブエリアについて raw sum の時間平均値 (S) を計算し、これにその代表点の位置について計算された局所抵抗係数を乗じて局所抵抗成分 S_X を求めた。

$$S_X = C_R S \quad (2)$$

図1に示されるように、今回の実験では模型船の右舷側の船首部の喫水線から下の領域の面積の大部分をカバーするようにセンサーシートが設置されている。従って、模型の曳引距離が十分に長く、船体の両側面における砕氷現象の非対称性を無視し得ると考えれば、各センサーシート上のサブエリアに対する S_X の全サブエリアにわたる和と模型船に加わる全抵抗との間に相関があることが期待される。今回の計測並びに解析手法の妥当性の検討の意味も含め、この相関性について検討した。

図7に S_X の全サブエリアにわたる和と全抵抗の比較を示す。なお、前述のように、同一条件において2回実験を繰り返しているため、 S_X の和についての1データに対して2抵抗データが対応している。また、氷厚 25 mm、船速 0.575 m/s の条件の実験結果については、Area-4~6 についての局所荷重データがシステム不調のため得られていない。図より、 S_X の全サブエリアにわたる和と模型船に加わる全抵抗との間には、氷厚及び船速によらず良い比例関係があり、従って、今回の実験による局所荷重の計測並びに解析が妥当なものであるといえよう。

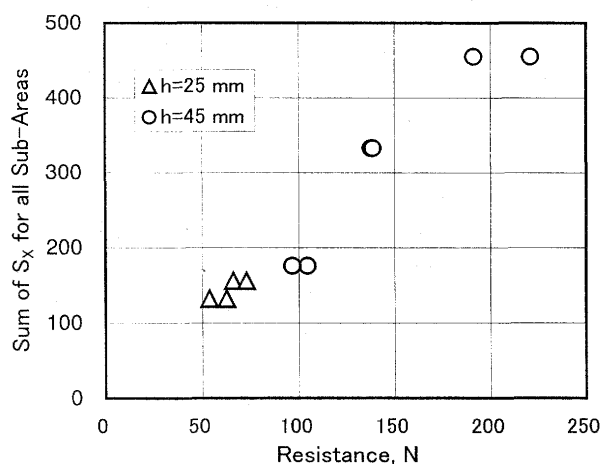
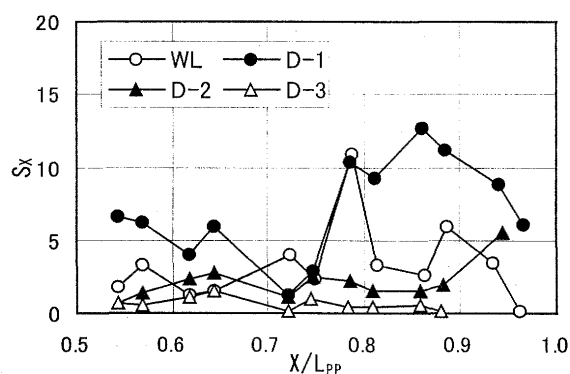


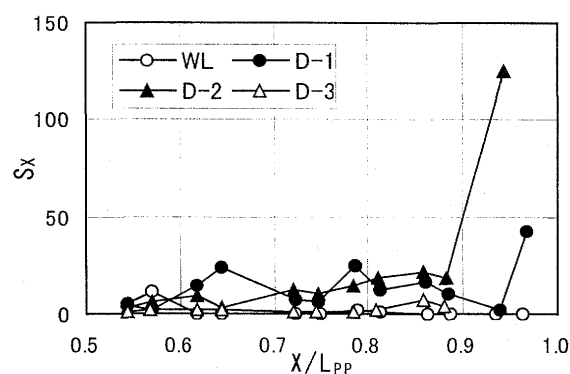
図7 S_X の和と全抵抗との相関

式(2)により計算される S_X の水平方向分布の例を図8に示す。同図(1)は、氷厚 25 mm、船速 0.345 m/s の例であるが、D-1 レベル ($z/D = 0.8$ 近傍) での氷荷重の抵抗への寄与が最も大きい。また、水平方向については、S.S. No. 8 から船首側の船体を受ける抵抗が大きい、S.S. No. 6 近傍においてもある程度の抵抗成分の発生が認められる。これは、前述したように、氷板縁、あるいはこれと船体との間に挟み込まれた砕氷片が船体に押し付けられた結果発生する氷摩擦によるものと言えよう。

一方、図8(2)は、氷厚 45 mm、船速 0.575 m/s の例であるが、この場合、D-2 レベル ($z/D = 0.6$) の最も船首側、すなわちステム部において極めて大きな抵抗成分が発生していることが特徴的である。図4(3)に示されるように、この領域においては荷重そのものが他の領域に比べて大きいことに加え、ステム部における局所抵抗係数の高さがこの傾向をさらに強調する結果となっている。



(1) $h=25$ mm, $V=0.345$ m/s



(2) $h=45$ mm, $V=0.575$ m/s

図8 S_X の水平方向分布

図 8 (2)に示された例外的に大きな局所抵抗を示したステム部のサブエリアに注目し、このサブエリアに働く抵抗成分の全抵抗への寄与の様子を示した図が図 9 である。図は、全サブエリアに働く S_x の和とこのサブエリアを除いた場合の和を船速の関数として表したものである。ステム部のサブエリアの抵抗成分の全抵抗への寄与は船速の増大とともに増加し、 $V=0.575$ m/s の場合では、全体の 27%がこのサブエリアに発生している。

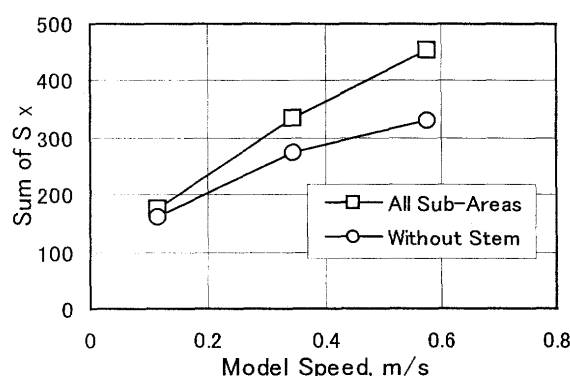


図 9 S_x の速度による変化

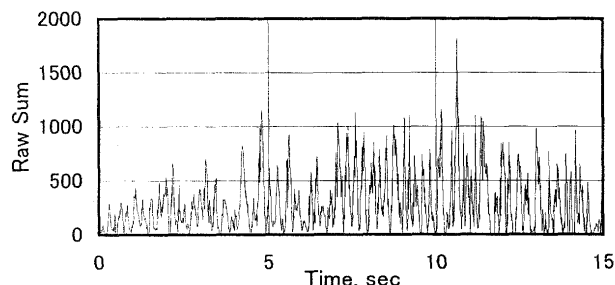


図 10 ステム部のサブエリアへの raw sum
($h=45$ mm、 $V=0.575$ m/s)

ステム部における抵抗成分の高速度領域における増大の理由としては、この部分における荷重発生頻度の高さが挙げられる。図 10 はステム部のサブエリアへの raw sum の時系列図であるが、S.S. No. 8 近傍のデータである図 2 と比較すると荷重発生頻度が極めて高いことがわかる。抵抗試験終了後に氷板に残される砕氷パターンの観察によれば、速度が高い場合にはステム部に細かな砕氷片が発生している。これは船速の増大に伴い、氷板下面に働く動水圧及び氷板の慣性力の影響により、氷板が曲げではなく、クラッシングあるいは剪断モードで破壊した可能性

を示唆するものである。このような破壊モードの発生により船体と氷との接触頻度が高まり、この結果、この部分に働く局所氷荷重の時間平均としての局所抵抗の増大を引き起こしたものと考えられる。

5. おわりに

本報告ではシート状の圧力センサーを用いて、氷海水槽における模型実験時に模型船に働く局所氷荷重について計測した結果を報告した。本研究の結果、船体周囲の局所氷荷重は船体上の位置によって大きく変化し、局所的な抵抗成分が全体抵抗に大きな影響を与えている場合があることが示された。このような形により局所荷重に関する情報を得ることは、水中船舶の合理的な船型設計に大きく寄与するものとする。また、本報告では氷中抵抗という観点から局所氷荷重の計測結果を解析したが、船体構造の安全という面からもこのような模型実験から与えられる知見の有用性は高いと言えよう。

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)船舶技術研究所研究発表会講演集、395-400 頁、2000 年。
- Izumiyama, K, Wako, D and Uto, S., 1999. Ice Force Distribution on a Flat Indentor. Ice in Surface Waters, Shen (ed.), 1999, Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 917-922.
- Kayo, Y., 1993. Measurement of Ice Load Distribution on an Icebreaker Bow Model Composed by Load Panels. Proceedings of the 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Hamburg, August 17-20, 1993, vol. 1, pp. 328-337.
- Liukkonen, S. and Nortala-Hoikkanen, A., 1992. Ice Pressure Tests on a Segmented Icebreaker Model. Proceedings of the 11th International Symposium on Ice, Banff, Alberta, Canada, June 15-19, 1992, vol. 1, pp. 296-308.