

波浪による防波堤の越水に関する基礎的研究

水野雄三* ・ 笹島隆彦**・ 神田尚樹***
佐伯 浩****・ 秋原真哉*****

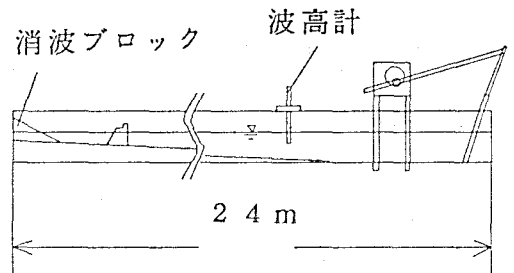
1. はじめに

近年、網走港や紋別港のような流水の襲来する北海道のオホーツク海沿岸に建設されている港湾において、冬期に襲来する流水が波浪により防波堤を越えたり（以降、越水と呼ぶ）、防波堤天端上に堆積する現象がみられる。これにより、防波堤上に設置されているパイプラインや、その背後に設置されているドルフィン、防御フェンス、その他の施設に被害が生じている。さらに将来建設が計画されている親水性の防波堤が、越水してくる流水により安全性に問題が生じ、親水式防波堤の役割を果たさなくなることも予想される。浅川ら（1989）や Ueda et al. (1991) の研究によると、波の入射してくる方向の海域において、波長の10倍程度の範囲が、浮氷盤群により完全に覆われている場合、氷盤による波高の減衰効果により、伝達波高は沖合いの 1/10 程度となることが明らかになっている。この様に防波堤前面や、対象港湾の沖合いに帯状の密氷野が存在するときは、防波堤前面の波高は小さく越波はもちろんのこと、越水も起こらない。上述の越水が問題となるのは、流水の襲来時、あるいは開氷時のような流水のまばらな状態（低密接度状態）において高波浪が来襲するときである。最近、北海道沿岸に襲来する流水は、北西の季節風が弱いことと、気温が比較的暖かいこともあり、その量は以前に比べて少なく、また密接度も低いことが多いため、流水来襲時も高波浪の場合が多く、それが越水による被害を増加させている。今まで他では取り扱われたことのないテーマに関して、基礎的実験を行ったものである。

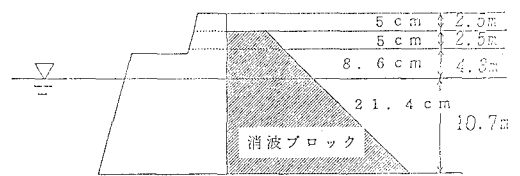
2. 実験方法

2.1 実験装置

図一に実験に用いた水槽を示す。一端にフラッター式造波機、その前面に波高計を、もう一端に消波ブロックを設置しており反射波の発生を防いでいる。防波堤



図一 実験水槽



図二 模型断面図

は、図二に示すように、前面に消波ブロックがある場合と無い場合の2種類と天端高が3種類の合計6ケースの防波堤断面を使用した。また、氷盤の模型としては、比重が約 0.85 と海水にほぼ等しいパラフィン盤を使用した。この実験において問題となるのは、模型氷盤の比重、流体と氷盤の摩擦係数それに、模型氷盤間の摩擦係数である。パラフィン盤の性質に関してはパラフィン板と流体間の摩擦係数は、上田ら（1992）の実験結果より氷盤の場合と一致することが明らかになっているし、パラフィン板相互の動摩擦係数も浅川ら（1989）の実験結果より氷盤の場合とほぼ一致していることから、氷盤の模型として、パラフィン板は適当であると判断した。対象となるオホーツク海沿岸の港湾における構造物の設計波は波高が 10 m、周期は 12.3 秒である。本研究ではオホーツク海沿岸の網走港および紋別港防波堤の標準断面を参考にして、フルード相似則を用い、縮尺を 1/50 としして実験を行った。実験に用いた入射波高は 5～20 cm の範囲を目安に 5～6 種類、入射波の周期は 1.74, 14.1, 1.13 秒の3種類で、これらは、12.3, 10.0, 8.0 秒に相当する。また、パラフィン盤の寸法は 3 cm 角から 8 cm 角、厚さ 0.8 cm から 3 cm の組み合わせで、

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所
** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
*** 北海道開発局小樽港湾建設事務所
**** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
***** 学生会員 北海道大学工学部土木工学科

重さが 6.1g から 91.8g の 5 種類に関して実験を行った。これらは実規模において、寸法が 1.5m 角から 4.0m 角、厚さ 0.40m から 1.5m、重さが 0.77t から 11.5t に相当する。また海底勾配は現地海岸より急勾配で 1/30 として実験を行った。

2.2 入射波高の測定及び越水量の測定

入射波高の測定に関しては、造波後、防波堤で波が反射し、波高計に到達する前までの間の波の波高を計測し、これを沖波に換算して入射波高 (H_0) とした。また定常状態での波の反射率の測定も行ったが、防波堤前面に氷盤がある場合と無い場合では、氷盤存在時の方が反射率は若干小さな値となった。また浮氷盤によ波高の著しい減衰を防ぐために、密接度 100% の時の氷盤の水面被覆長さがおよそ波の一波長分に相当する程度の量のパラフィン盤を、防波堤の沖側に疎らになるように浮かべた。このときの全水面に対する氷盤の被覆率は 20 から 30% であった。そのような状態で波を起こすと、個々のパラフィン板は波の質量輸送により徐々に防波堤に接近し、最終的には、防波堤の前面に押しつけられた状態となり、堤前面はパラフィン板の密接度が 100% となる。この様な現象は実際のオホーツク海沿岸の漁港や港湾の防波堤前面でもよくみられる。防波堤直前で碎波するような大きな波の場合には、パラフィン盤は水表面を覆

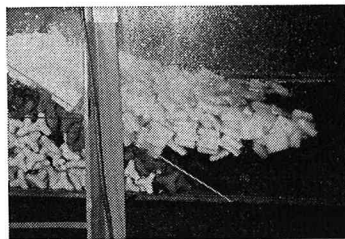


図-3 消波ブロック被覆堤の越水状況

うだけでなく、波に巻きこまれ、堤前面で数層に折り重なり、そのうちの表層の部分が防波堤を乗り越え越水していく。この状況を図-3に示す。越水量は、波が定常状態になり、越水を開始してから約1分間(40~60波)に防波堤上に残存している氷盤と、防波堤を乗り越えた氷盤の数とその数量を調べた。これを各防波堤断面に対して波浪条件を変えて実験を行った。

3. 実験結果

3.1 波浪条件及び氷盤の大きさと越水量の関係

図-4と図-5に単位幅、単位時間当たりの越水量 Q_i と沖波波高 H_0 の関係を示す。各図から明らかなように、周期 T 、防波堤の天端高 H_c 、防波堤の形式、それに氷盤の大きさが同一であれば、越水量 Q_i は波高の

増加と共に増加している。また、ある波高以下では越水は起こらないことを示していて、これらの関係は越波流量と波高の関係とほぼ同じである。次に波の周期の効果を見るため、図-4(a)と図-4(b)、図-5(a)と図-5(b)を比較してみる。図-4は消波工のある場合、図-5は消波工のない場合である。まず、防波堤前面に消波工がある場合には、天端高 H_c が同一であるなら、氷盤の大きさに関わらず、周期が長いほど越水量は大きい値を示している。これは他の周期の場合にも同様な結果となっている。図-4(b)の場合、波高 H_0 が大きくなると、防波堤から離れた沖で碎波するため、越水量 Q_i はほとんどゼロとなっている。

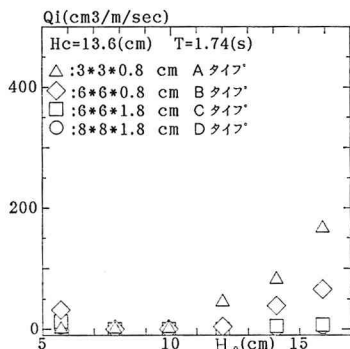


図-4 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

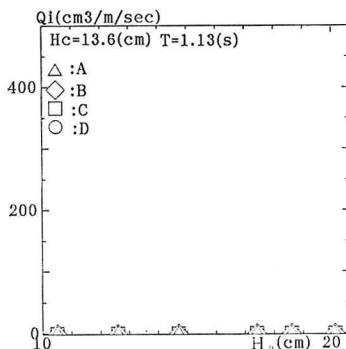


図-4 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

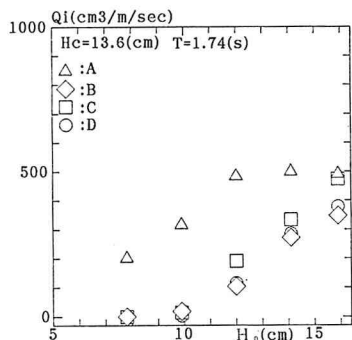


図-5 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

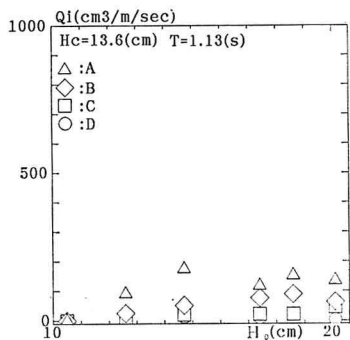


図-5 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

次に、消波工の無い直立堤の場合の周期 T の効果についてであるが、この場合も、天端高 H_c 、氷盤の大きさが同一の条件であれば明らかに、周期 T の長いほうが越水量は多くなっている。また、図-5(b)

の周期 1.13 秒の場合、波高 15 cm までは Q_i は波高の増加と共に増加しているが、波高が 15 cm を越えると Q_i はほぼ一定値を示している。これは、碎波の発生位置に起因するもので、越波流量の場合と同様に構造物の直前で碎波する場合が越水量 Q_i は最も多くなり、碎波位置が沖に移ると越水量 Q_i は若干減少する傾向がみられる。次に氷盤の大きさと越水量 Q_i の関係を調べてみる。図-4 (a) 中に示されているように、 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 0.8\text{ cm}$ 、 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 1.8\text{ cm}$ 、 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 1.8\text{ cm}$ 、それに $8\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 1.8\text{ cm}$ 角の模型氷盤をそれぞれ A, B, C, それに D タイプの氷とする。図-4 (a)、図-5 (b) からは、模型氷盤の体積が小さい場合の方が同一の波浪条件であれば越水量は大きくなる傾向があるが、図-5 (a) のように比較的越水量が大きいような条件下ではその関係は明確ではなくなってくる。越氷現象は越波と共に起こる現象で、越波流量 Q が少ない条件下では、氷厚の大きい氷盤は天端に阻害されて越氷しにくくなるが、越波流量が多く、越波時の防波堤天端上の水深が大きくなると氷厚の大きい氷盤も越氷しやすくなる。そのような条件では、氷盤は水面上に浮かんだ状態で越氷するので、同一の長さの氷盤でも厚い氷の方が越水量は大きい値を示すことになる。

3.2 防波堤の形状と越氷量の関係

すでに示した、図-4、図-5 から明らかなように、同一の天端高 H_c の場合、氷盤の大きさが同じであると、直立堤の前面を消波工で被覆した消波ブロック被覆堤の方が明らかに越水量は少なくなる。これは合田ら (1975) の越波流量に関する結果とも一致している。前述した様に、越氷現象は越波にともなって起こるものであるから、越波流量と越水量には強い相関があることを示している。

次に天端高 H_c の越水量に及ぼす影響を調べたものが図-6 (a)、(b) である。まず、図-4 (a) と図-6 (a) を比較する。これらは同一の周期 T で、消波工で被覆されている構造で天端高が異なっている。同一の波高で同一の氷盤の大きさと比較すると明らかに、天端高 H_c の小さい方が越水量は多くなっている。また両実験ケースとも越水量が比較的少ないため、氷盤の体積が小さい方が越波流量は大きくなっている。次に消波工の無い場合の天端高の効果を示したものが図-5 (a) と図-6 (b) である。同一の波浪条件で較べると明らかに天端高の小さい方が越水量は大きくなっている。この様に、防波堤が同じ構造形式で波浪条件と氷盤の大きさが同一であれば、天端高が低いほど越水量が多くなることを示している。また、図-6 (b) のように、越水量

が多い場合には、越波時の天端上の水深も充分なため、氷厚の大きい氷盤も越氷しやすくなり、越水量も多くなることを示している。

本実験では、堤脚水深 h 、天端高 H_c 、波浪条件、氷盤の大きさを変化させて、直立堤と、消波ブロック被覆堤の二構造形式に対して、約 600 ケースの越水量に関する実験を行った。それらの実験に基づいて越氷の起こる限界を調べた。越波の場合は、防波堤前で碎波すると、水塊とともにしぶきも飛散し、越波流量が少なくなると、測定誤差も大きくなるが、越氷の場合は個体であるため、越氷の測定は比較的簡単で精度もよい。

前述したように越水量は越波流量と非常に強い相関がみられるので、越波流量へ及ぼす無次元量の H_c/L_0 、 h/H_0 、それに、 H_0/L_0 を用いて越氷の限界を求めた。ここでは h は防波堤脚部の水深である。その結果を図-7 (a)、(b) に示す。(a) は直立堤の場合、(b) は消波工で

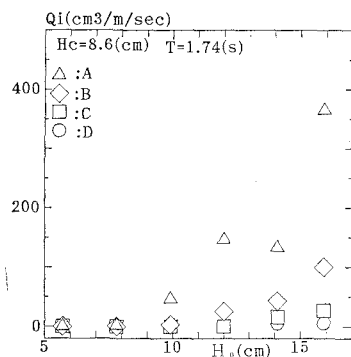


図-6 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

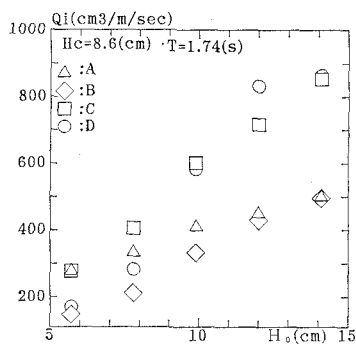


図-6 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

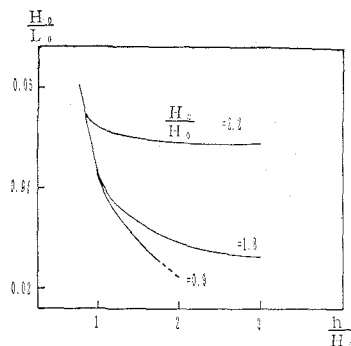


図-7 (a) 越氷の限界 (消波工なし)

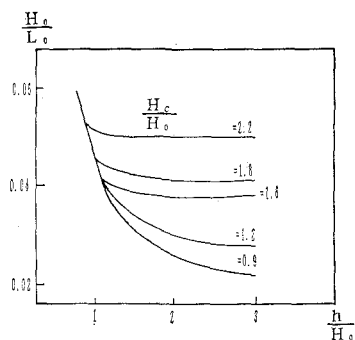


図-7 (b) 越氷の限界 (消波工あり)

被覆された場合である。図中の実線の上側の領域が越水量がゼロとなる領域である。両図を比較すると、消波工で被覆した方が天端高を低くすることが可能であることが明らかとなった。本実験の場合、主として、4種類の大きさの氷盤を用いているが、この程度の大きさの氷盤では、この越水の限界に対してはほとんど影響がみられなかった。波浪中の氷盤の運動については泉山ら(1982)の実験結果が報告されているが、それによると、氷盤の代表水平方向長さ l と波長 L の比 l/L が 0.4 以下の範囲では、氷盤は比較的波浪運動に追従して運動す

ることが示されている。本実験の氷盤の場合 l/L は非常に小さいため、この越水限界に対しては、氷盤の大きさの効果はあまり現れなかったものと考えられる。図-7を用いることにより、越水させない天端高を求めることが可能となる。

3.3 越水量と越波流量の関係

越波流量と越水量との間には強い関係があることが上述した結果より推定される。越波流量や越水量へ影響を与える因子は非常に多く、それらの主要因子と越水量の関係を明らかにすることは多大の時間と労力を要することになる。しかし、越波流量に関し

ては過去にも多くの研究成果の積み重ねがあるため、ここでは越水量と越波流量の関係を明らかにする。越波流量については、約 20 波の波から越波流量を求めた。流量が大きく合田ら(1975)の結果と差が小さい場合は、合田らの実験曲線の越波流量 Q を用い、越波流量 Q が小さく、著者らの実験結果との差が大きい場合については著者等の実験結果を用いている。図-8 に天端高が 13.6 cm の場合で防波堤が消波工で被覆されている場合を示す。図-8 (a) の周期の長い場合、データの分散はあるものの、越波流量 Q が 100 ($\text{cm}^3/\text{m}/\text{sec}$) 以下では越水量はゼロで、越波流量 Q が 100 $\text{cm}^3/\text{m}/\text{sec}$ を越えると越波流量 Q の増加と共に、小さい氷盤の越水量は増えている。これに対して、同一の条件で周期の短い図-8 (b) の場合は、越水量は図-4 (b) に対応するもので、越波も越水も起こらず、すべての点が 1 点に集まることになる。

図-9 は消波工の無い場合の2種類の周期に対する越波流量と越水量の関係を示したものである。消波工のある場合と同様に、周期が長い方が越波流量、越水量ともに大きい値を示す。図-8 の消波工のある場合に比べると、両周期の場合とも越波流量、越水量共に増加している。また、図-8 と 図-9 から越水量 Q_i が 200 ($\text{cm}^3/\text{m}/\text{sec}$) 程度以下であれば、氷盤の体積が小さい方が越水量 Q_i は大きくなる傾向がある。次に、低い天端高 (8.6 cm) の結果を

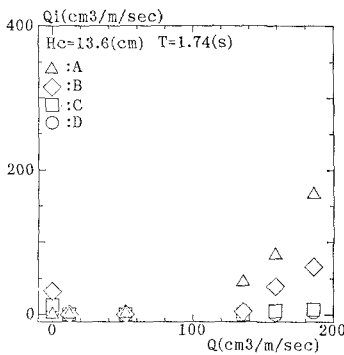


図-8 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

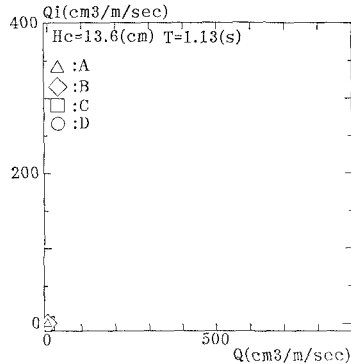


図-8 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

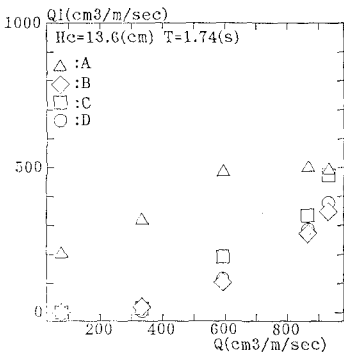


図-9 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

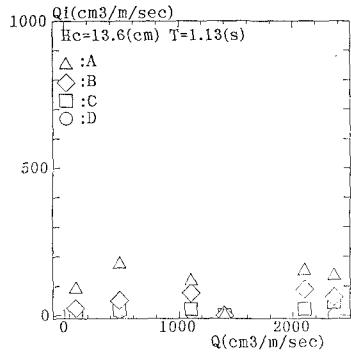


図-9 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

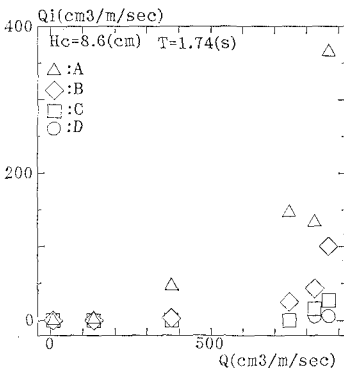


図-10 (a) 越水量と沖波波高の関係 (消波工あり)

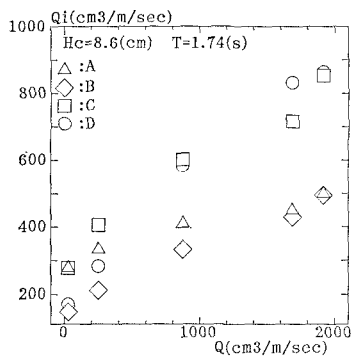


図-10 (b) 越水量と沖波波高の関係 (消波工なし)

図-10 (a), (b) に示す. 防波堤の構造形式が同じである図-8 (a) と図-10 (a) とを比較してみると, 同一の波浪条件であるが, 天端高が低い方が越波流量, 越水量共に多い, これは消波工がない場合も同様である. ここで注目すべきことは, 消波工の無い図-9 (a), (b), それに図-10 (b) において, 越波流量が非常に小さい領域で, 越水量の方が越波流量より大きい値を示すことである. 目視観測によると, これは波浪により直立堤の前面に打ち寄せられている氷盤は重なりあっていて, 最上層の氷盤は波面よりかなり高い位置にあり, これが越水しやすくしているからである. 消波工がある場合には, 消波工の凹凸があり, 抵抗が大きいことと, 法面が傾斜していて, 消波工の法面上では氷盤の最上層部の高さは, 法面の位置とそれほど大きな差はないのでそのような現象は発生しない.

4. 結 論

(1) 防波堤の前面が消波工により被覆されている場合 (以降被覆堤という) とそうでない場合 (以降直立堤という) に関係なく同一周期, 同一天端高であれば波高が大きいほど, 越水量は増える傾向にある.

(2) 同一の構造形式で天端高, 波高が同じであれば, 周期が長いほど越水量は多くなる.

(3) 同一の波浪条件で, 天端高も同じであれば被覆堤の方が越水量は少ない.

(4) 同一の構造形式, 同一の波浪条件であれば, 天端高が低いほど越水量は多い.

(5) 氷盤の大きさの効果については, 越水量が少ない場合 ($200 \text{ cm}^3/\text{m}/\text{sec}$ 以下) には, 氷盤の大きさが小さいほど越水量が多くなるが, 越水量が非常に多くなると逆に氷厚の大きい氷の方が越水量が多くなることがある.

(6) 越水を起こす限界は各構造形式に対して沖波波形勾配 H_0/L_0 , 無次元天端高 H_0/H_0 , それに水深波高比 h/H_0 で決定された. 尚, 氷盤の大きさは, それほど関係していなかった.

(7) 越水量と越波流量は関相関があり, 一般的には越波流量が増えれば越水量は増える傾向が強く, 特に周期が長い場合はその傾向が顕著である.

(8) 氷盤の大きさの影響については越水量が少ない範囲 (Q_i で $200 \text{ cm}^3/\text{m}/\text{sec}$ 以下) では, 越波流量に関係なく, 小さい氷盤の越水量の方が多いが, 越波流量も越水量も多い範囲では, その逆になる傾向がみられる.

(9) 直立堤の場合, 越波流量が少ない範囲 (Q が $300 \text{ cm}^3/\text{m}/\text{sec}$ 以下) では越波流量より越水量が多くなる現象がみられた. これは直立堤前面に層状に積み重なった氷盤がその浮力によって, その最上層の氷盤が波の表面よりかなり上に位置することによるものであることが明らかとなった.

参 考 文 献

- 浅川典敬・折谷徳弘・佐藤英泰・佐伯 浩・井上一正 (1989): 浮氷盤群による波浪の減衰に関する実験的研究, 第5回寒地技術シンポジウム, pp. 410-415.
- 泉山 耕・佐伯 浩・尾崎 晃 (1982): 波浪による氷盤の運動に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第38号, pp. 135-140.
- 上田俊也・佐伯 浩・山下俊彦・村木義男・榎 邦夫 (1975): 浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 135-140.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, Vol. 14, No. 4, pp. 3-44.
- Ueda, T., Yamashita, T., Saeki, H. and Enoki, K. (1991): Experimental Study on the Damping of Wave Height due to the Ice Floes, Abstracts of the Sixth International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, pp. 131-135.