

時間的に変化する氷況条件下での波浪特性について

Characteristics of Regular Waves in Arbitrary Sea-ice Condition

小笠原敏記¹・工藤 瞬²・堺 茂樹³

Toshinori OGASAWARA, Shun KUDO and Shigeki SAKAI

Using the wave tank with freezer in Hamburg Ship Model Basin (HSVA), we make clear characteristics of regular waves in arbitrary sea-ice condition. In particular, we investigate the attenuation coefficients of waves propagating under the sea-ice, based on the data of wave height measured by ultrasonic-sensor installed above the water surface. Further, we examine whether the attenuation coefficients obey the power law of frequency or not in variously formed ice. As a result, although the wave height exponentially decays with the growth of ice, the attenuation coefficient strongly depends on the frequency. It is shown that wave condition that the attenuation coefficients do not obey the power law of frequency will exist.

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書 (2007) によると, 近年の気候変化の直接的観測結果において, 気候システムの温暖化には疑う余地がないことを明言している. 気候変動の影響に関して, 北極の平均氷厚の変化と夏期の氷の溶解量の間に強い相関があることをSeymourら (2003) は明らかにしている. さらに, その影響が北極海域の氷を消失させるだけでなく, 氷の形状を nilas と呼ばれる壊れない平板の氷から写真-1に見られるような pancake ice の氷盤群へと変化させている. pancake ice 間の開水域の増加は, 太陽光をよく吸収するため, 更なる温暖化を加速させると言われている. また, 海水域の変化は, 海面気圧にも影響を及ぼすことから, 異常波浪を発生させる恐れがあるため, 波浪とそれに伴う氷の運動を予測することが必要である.

Wadhams (1973, 1975) は, 弾性平板下における波動の線形解を用いて, 波浪が氷板下を伝播する際の波高変化を検討し, 現地観測結果から波浪の減衰が指数関数に従い, その減衰係数が周波数のべき乗に比例することを提示している. さらに, Squire (1984) および堺ら (1996) は, 現地観測および模擬氷盤実験によって, 不規則波の周波数成分のエネルギー密度が, 氷盤下での進行距離に伴い指数的に減少し, 減衰率が周波数に依存していることを明らかにしている. 最近では, 弾性氷盤を適用させた断面2次元数値モデルにおいても同様な結果を示している (Kohout・Meylan, 2008). しかしながら, 氷が時々刻々成長し, 氷の形状が任意に変化するような



写真-1 北極海に斑点のように存在する pancake ice
(出典: naturenews (2009/3/23))

状態での波浪特性は余り良く理解されていないと言える.

そこで本研究では, 冷凍室内の造波水槽を用いた実験で規則波を発生させ, 開水域から時間と共に氷況が変化するような条件下における波浪特性を明らかにする. 特に, 波浪が氷板下を伝播する際の波高変化およびその減衰率を検討し, 氷況が変化するような条件下において, その減衰が周波数のべき乗則に従うのかを明確にする.

2. 実験の概要

氷況変化の実験は, ドイツ・ハンブルクの HSVA (Hamburg Ship Model Basin) において行われた. 室温を任意に設定 (実験中は -4°C に設定) できる冷凍室内に, ピストン式の造波装置を設置した水槽を用いた. 水深

1 正会員 博(工) 岩手大学准教授工学部社会環境工学科
2 岩手大学大学院工学研究科建設環境工学専攻
3 正会員 工博 岩手大学教授工学部社会環境工学科

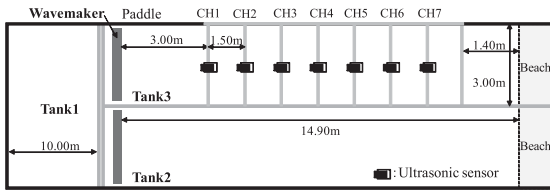


図-1 実験水槽および実験装置

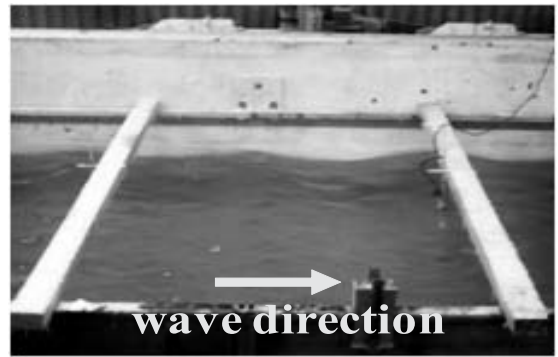
$h=80\text{cm}$ の一樣下の水槽内で、周期 $T=0.8, 1.1, 1.3$ 秒の3種類の規則波を発生させ、水面から20cm上方に固定した超音波センサーを造波板（ $x=0\text{m}$ ）から3mの位置、2台目以降を1.5mの計測間距離で7ヶ所に設置した。各位置の水面または水面の変位データは、室外に備えたデータロガーを介してPCに保存される。計測時間は、各周期ともサンプリングタイム0.02秒で15時間以上であった。また、計測中に氷況の変化をカメラによる撮影と目視による判断を行い、氷盤の長さの計測も行った。図-1は、実験水槽の概要を示す。なお、国際共同実験のため、水槽は目的別に3分割され、本研究では水槽3を用いた。水槽の全長は30m、深さは1.5m、幅は6mである。

3. 実験結果

(1) 氷況変化

写真-2は、周期1.1秒の波浪条件下における時間の経過に伴って変化した氷況の様子を表す。自由水面（写真-2 (a)）から氷晶（frazil ice）が水面に分布したシャープベツト状のgrease iceを最初に形成する。写真-2 (b) 中の拡大写真は、grease iceを取り出したfrazil iceとsilver dollarである。その後、frazil ice同士が固着して円盤状のpancake iceに成長する（写真-2 (c)）。最終的に、造波側近傍ではgrease ice状態のままであったが、岸側では氷板（sheet ice）状態へと氷況が変化する（写真-2 (d)）。しかし、同波高で周期0.8秒の波浪条件下では、岸側においても氷板状態にならず、15時間を経過してもgrease ice状態のままであった。また、周期1.3秒では、氷板状態になるまでの時間が長く、氷板を形成した領域も周期1.1秒に比べて小規模であった。

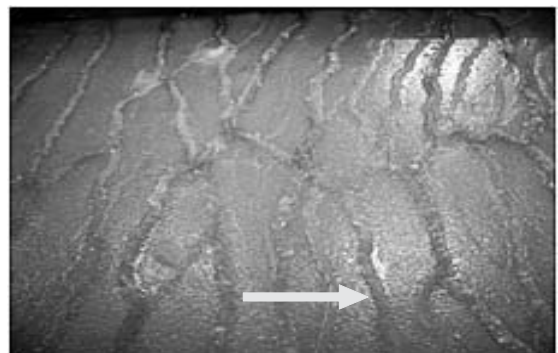
図-2は、pancake iceに成長するための核になると考えられる氷盤（silver dollar）について、周期1.1秒での各位置（ $x=3\text{m} \sim 7\text{m}$ ； x は造波板からの距離）における造波開始から1時間後および4.5時間後の直径の平均値を比較したものである。なお、写真-3は計測に用いた氷晶が固着して形成されたsilver dollarの一例である。その長さは、時間に依らず造波板から10m以上離れた位置で大きくなる傾向を示し、1時間後に比べて4.5時間後では、2倍近くにまで成長している。しかし、10m以内では、時間による差は見られず、余り成長していないことがわかる。



(a) Open water



(b) Grease ice



(c) Pancake ice



(d) Sheet ice

写真-2 周期1.1秒における時間の経過によって開水域から氷板へと氷況が変化する様子

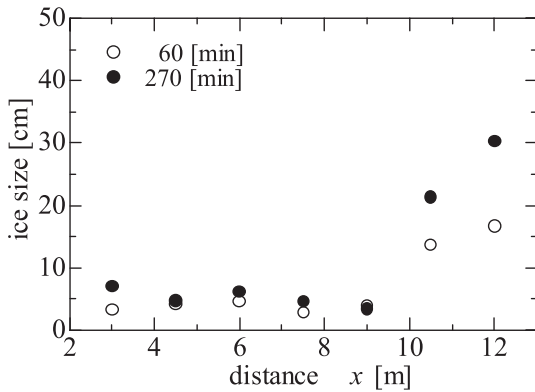


図-2 造波開始から時刻60分および270分後の各位置 (造波板 $x=0$ m) における氷盤の直径の比較

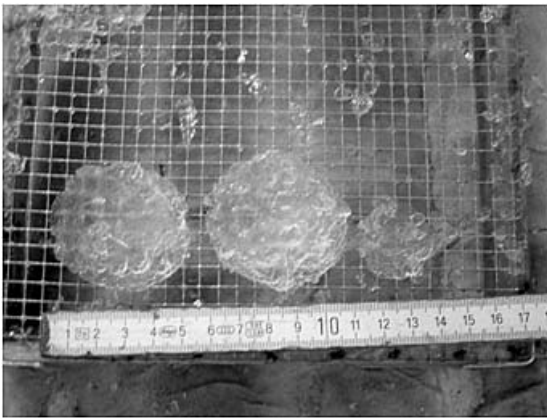


写真-3 代表的な氷盤 (silver dollar)

(2) 波高変化

図-3は、周期1.1秒での各位置における波高の時間変化を示す。なお、図中の平均波高 H は、120分間で平均した値である。造波板から $x=4.5$ mおよび 6.0 mでは、波高は若干の増加あるいはほぼ一定であるが、 $x=7.5$ mになると、時間の経過に伴い減衰傾向を示し、 $x=9.0$ mおよび 10.5 mでは、明らかに時間と共に減衰していることがわかる。この結果、波高の減衰と氷の成長との間には相互に影響し合うものと考えられる。自由水面を伝播する波は、氷況がgrease iceからpancake iceに変化することによって、氷盤の自重による圧力およびその底面のせん断抵抗抗力の影響を受けるようになる。このような力によって、波は減衰すると思われるが、同時に氷盤が波から受ける力も小さくなるため、さらに氷盤の成長を加速させる。そのため、氷の成長は造波板から遠い岸側ほど早くなるものと推察される。

(3) 波速

図-4は、周期1.1秒および1.3秒における各位置での波

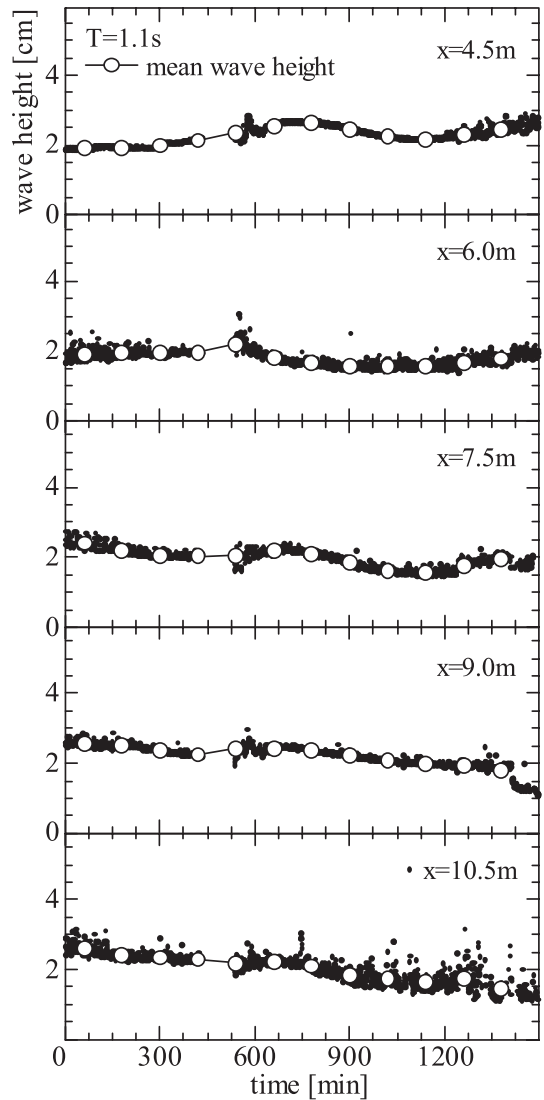


図-3 各位置 (造波板 $x=0$ m) における波高の時間変化

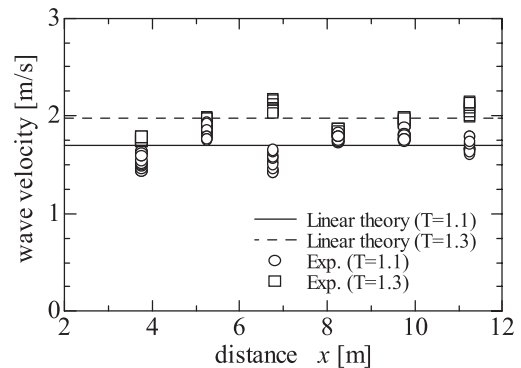


図-4 氷況変化下での波速の理論値と実験値の比較

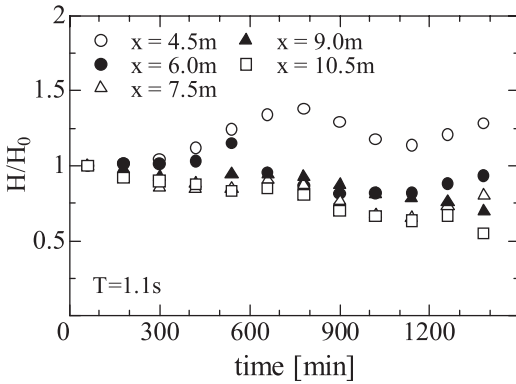


図-5 周期1.1秒における各測点での波高減衰の時間変化

速を比較したものである。図中の実線および破線は開水域の理論値による波速を示す。また、実験値の波速は、各位置で測定された変位の相互相関係数の最大値の時間と計測間距離（1.5m）から算出し、120分間の平均値である。実験値の波速は、いずれの周期も氷況の変化に依らず、開水域の波速と概ね一致している。この結果は、堺ら（1992）のポリプロピレンを用いた模擬氷板の実験結果と同様な傾向を示し、氷況が時々刻々変化する状態であっても線形理論によって概ね予測が可能と言える。

4. 氷況変化下での波高減衰

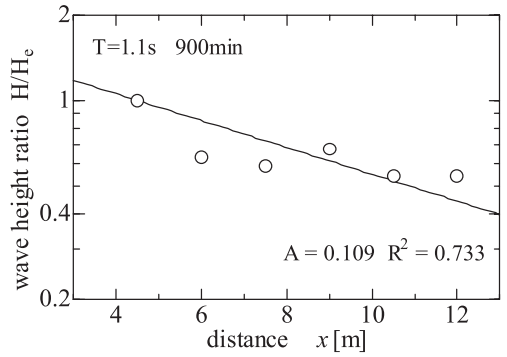
図-3で示した各位置での平均波高の最初の値を基準値 H_0 として、各時間の平均波高 H を正規化した波高減衰率の時間変化を図-5に示す。前述したように岸側に近づくほど、波高の減衰が時間と共に進行することは明白であるが、 $x=10.5\text{m}$ での減衰率は、20時間後に約5割にもなることがわかる。つまり、氷の成長に伴う剛性の変化が波の減衰に強い影響を与えていると推察される。

次に、造波開始から15時間後の周期1.1秒および1.3秒のそれぞれの $x=4.5\text{m}$ の波高を基準値 H_e として、各位置における平均波高 H を正規化した波高減衰の空間変化を図-6に示す。なお、 $x=4.5\text{m}$ での位置は、15時間経過した段階でgrease ice状態から氷板域に遷移する氷板端に相当する。空間的な波高減衰の値は、周期によって勾配に差が生じるが、いずれも指数関数に沿って減少する。そこで、この波高減衰を堺ら（1996）と同様に、次式を用いて表す。

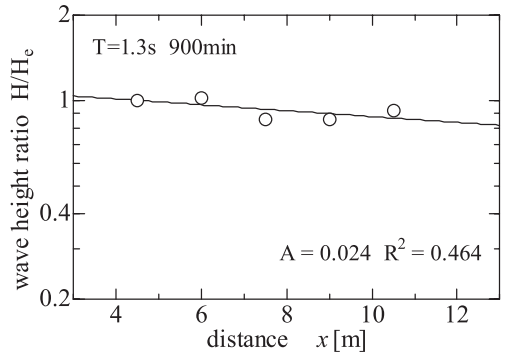
$$\frac{H}{H_e} = \exp(-Ax) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A は減衰率を意味する。図-6の実線が式（1）の回帰直線である。

また、氷盤群中を伝播する波浪の減衰率 A と周波数 f の関係は、ニューファンドランドの東海岸沖の観測結果を



(a) 周期 $T=1.1$ 秒



(b) 周期 $T=1.3$ 秒

図-6 各測点での波高減衰の空間変化

表-1 減衰係数 K およびべき乗係数 n と氷厚の関係

K	n	Ice thickness [mm]
0.040	3.26	5
0.044	1.88	10
0.038	1.18	20

基に、Wadhams（1975）によって得られた次式の関係がある。

$$A = K \cdot f^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K は減衰係数および n はべき乗係数である。堺ら（1996）は、表-1に示すような式（2）の右辺と氷厚の関係を模擬氷盤による実験から求めている。図-7は、周期1.1秒および1.3秒での波高減衰率 A の時間変化を示す。図中の実線および破線は式（2）と表-1の関係から求めた各周期における氷厚 $h_i=10\text{mm}$ の減衰率である。減衰率は、時間と共に増加する傾向にある。周期1.1秒では、その値は、造波開始時に比べて15時間後に10倍強の減衰率となるが、周期1.3秒では、3倍程度に留まっていることから、波高の減衰は、周期に強く依存することが言える。さらに、氷厚10mmに到達する時間に大きな

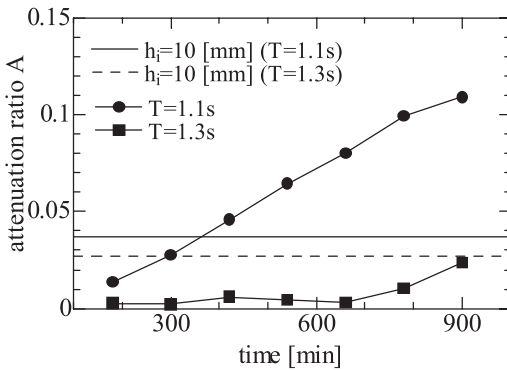


図-7 各周期における波高減衰率Aの時間変化

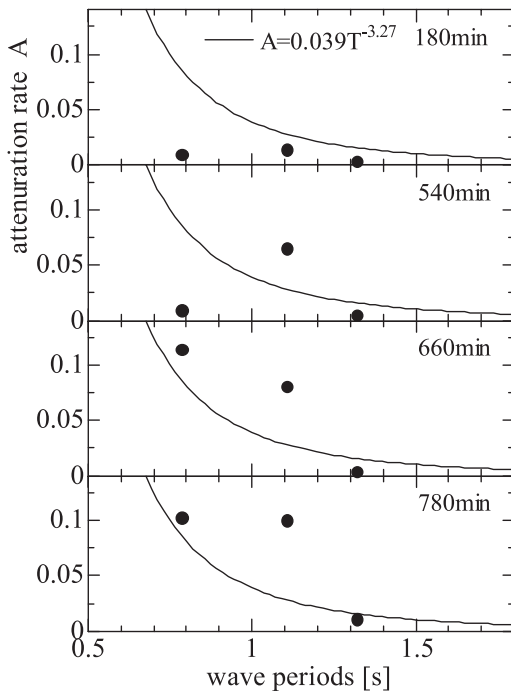


図-8 波高減衰と周期の関係

差異が見られるため、減衰率と氷厚の関係からも周期が氷の成長に影響を与えていると考えられる。

図-8は、各時間における波高減衰率と周期の関係を示す。図中の回帰曲線は、片山ら(1997)の一樣な模擬氷板および模擬氷盤群を用いた実験より得られたものである。氷況が時間的に変化するため、開水域に近い状態では、減衰率の値は回帰式よりも小さくなるが、氷が成長するに連れて大きくなることがわかる。また、時刻780分では、周期0.8秒および1.3秒の減衰率は、回帰式と概ね一致しているが、周期1.1秒では、大きく上回っていることから、模擬氷盤のような一樣氷況下でなく、氷が時々刻々成長するような場合、式(2)で示した周波数のべき乗で表すことに問題があるのではないかと考える。

5. まとめ

本研究では、氷況が時間の経過に伴い変化する条件下での波浪特性を明確にすることを検討してきたが、ここで得られた主要な結論を要約すると、以下の通りである。

- 1) 岸側に近づくほど波高が減衰し、そこでの氷況が氷板を形成することから、波高の減衰と氷の成長には相互作用の関係性を強く持つと言える。
- 2) 氷盤下の波速は、開水域における波動の理論解を適用させることが可能であることを示した。
- 3) 波高の減衰率は、氷況の変化に伴って増加するが、周期に強く依存し、短周期になるほどその減衰率が大きくなる傾向が明らかになった。
- 4) 氷が時々刻々成長するような条件下では、その減衰率は周波数のべき乗に従わない波浪条件が存在する可能性を示唆した。

今後の課題として、波浪減衰が氷況に大きな影響を受けることから、氷の大きさや厚さなどの形状諸量および剛性などの物性値の時間的変化を捉え、波高との関係を明らかにする必要があると考えられる。

謝辞：本実験は、6th EC FRAME WORK PROGRAMにより行われたことを付記する。また、HSVAのKarl博士をはじめテクニカル・スタッフに感謝する。

参考文献

- 片山潤之介・劉 曉東・笹本 誠・金田成雄・泉山 耕・堺 茂樹(1997)：氷盤群下の波浪変形特性に関する実験，海岸工学論文集，第44巻，pp.146-150。
- 堺 茂樹・堀合孝博・笹本 誠・平山健一・佐伯 浩(1992)：氷板による波浪変形に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第39巻，pp.11-15。
- 堺 茂樹・笹本 誠・片山潤之介・劉 曉東・平山健一・泉山 耕・金田成雄(1996)：氷板による不規則波の変形に関する実験，海岸工学論文集，第43巻，pp.426-430。
- Climate Change 2007 Synthesis Report, pp.36-41。
- Kohout A. L. and M. H. Meylan (2008)：An elastic plate model for wave attenuation and ice floe breaking in the marginal ice zone, Journal of Geophysical Research, Vol.113, C09019, pp. 8069-8079。
- Naturenews：published online 23 March 2009, <http://www.nature.com/news/2009/090323/full/news.2009.183.html>
- Seymour, L., P. Neil and S. Doug (2003)：High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region, Nature, Vol.425, pp. 947-950。
- Squire, V. A. (1984)：A theoretical, laboratory and field study of ice-coupled waves, Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.5, pp. 8069-8079。
- Wadhams, P. (1973)：Attenuation of swell by sea ice, Journal of Geophysical Research, Vol.78, No.18, pp. 3552-3568。
- Wadhams, P. (1975)：Airborne laser profiling of swell in an open ice field, Journal of Geophysical Research, Vol.80, No.33, pp. 4520-4528。