

(令和4年1月31日)

キーワード；粒子法、波浪、氷、流体-浮体相互作用

1. 序論

1.1 波浪と海氷

近年の気候変動に伴い両極域の海氷面積が減少し、開放水面面積が増えていることが観測により明らかになっている[1]。温暖化による開放水面面積の増加は、北極圏では新たな航路や排他的経済水域の拡大をもたらすという予測もある[2]。また海氷と波浪が共存する氷縁部では波が氷板下に潜り込み、氷板により波高が減少することが水槽実験により再現されている[3]。しかしこのような波浪と氷板の相互作用のメカニズムについて、未だ完全には明らかになっていない。これにより氷板によって減衰した波高がわからないため、船体や海洋構造物に作用する外力がわからず、安全性の確保が難しくなっている。このことから波浪と氷の相互作用についての研究は、新航路開拓や積極的開発に必要であり、そのメカニズムを解明することが求められている。

1.2 先行研究

波浪と氷の相互作用を解明するために、近年様々な研究が行われている。Parra et al. [4]は水槽実験で様々な形の氷を再現し、これらについての伝搬特性を分散関係と波の減衰から比較を行い、板状氷のときに最も波が減衰することを示した。Toffoli et al. [5]は、氷海域での波の減衰に関する理論モデルについて、モデルでは波形勾配が小さい入射波に対して正確に透過波振幅を求めることができたが、勾配が大きくなるにつれ透過波振幅は実際より大きくなることを明らかにした。以上のように波-氷相互作用について研究が進められているが、氷板下の波が減衰するメカニズムには未解明の部分が多い。

1.3 研究目的

上述のように氷板下に潜り込んだ波が減衰していくメカニズムは未解明の部分が多いことから、氷板による波浪の減衰特性について着目した。Zhang et al. [6]は SPH 法を用いて波による浮体の運動応答と屈曲運動のモデル化し、モデル精度を検証するために計算結果と実験の比較を行なった結果、いくつかの相違点はあるが、精度および安定性を考慮するとモデルは満足できるとわかった。実際の波と氷板の干渉には様々なパラメータが存在し、水槽実験ではそれらの相似則を同時に満たす模擬氷板を作成するのが難しいため、本研究では粒子法によりシミュレーションを行い、氷板による波減衰のメカニズムを明らかにすることを目的とした。また単純化のために、対象は2次元とした。

2. 研究手法

粒子法を用いる理由としては、固体の変形などの複雑な境界を計算するのに適していること、屈曲の計算をする際に格子法で起こる可能性があるメッシュ潰れなどの計算破綻がないことが理由である。粒子法においても氷や波について研究が様々行われている。またその中でも、固体の変形や近年流体-固体相互作用問題にも拡張されている SPH 法を使用した DualSPHysics (以下 DSPH_o) を用いて、シミュレーションを行なった。

Table. 1 Computational specification of wave validation.

影響半径係数 h_c	1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 2.0
人工粘性係数 α	0.001, 0.005, 0.010, 0.015, 0.030
周期 T (s)	0.8, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

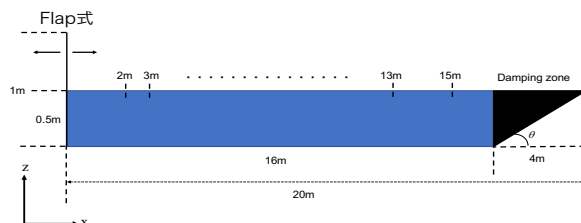


Fig. 1 Setup of numerical tank.

2.1 計算条件

まず DSPH の波浪-氷相互作用への有効性を調べるために、造波について検証した。Fig.1 に数値水槽の模式図を示す。計算は2次元で行い、造波は Flap 式、また beach にはダンピングを入れている。

造波に大きな影響を与えるパラメータである、影響半径粒子径比 $h/dp = \sqrt{2}h_c$ と表せる係数 h_c 、人工粘性係数 α 、周期 T (s) の3つについて主に検証した。まず h_c と α について検証し適当と思われる値を採用して、その後 T について検証した。 h_c 、 α に関しては DSPH の推奨値 $h_c = 1.2, 1.5$ 、 $\alpha = 0.01$ と、文献[7,8] を参考に検証範囲を決めた。用いた値を Table.1 に示す。また今後出てくる H (m) は波高である。

3. 計算結果

3.1 造波検証の結果

まず h_c について検証結果の一部を Fig.2 に示す。(a)は $h_c = 1.4$ のときの波高の時系列、(b)は各 h_c で造波が安定してきた後半 30 周期の計算波高 H_{cal} の平均値を取り、設定波高で割ったものである。推奨値よりも小さい $h_c = 1.0$ では計測点が遠いほど大きな波高減衰が見られた。推奨値付近の $h_c = 1.4, 1.5, 2.0$ では 1.0 ほどではないが計測点が遠いほど減衰が見られた。この結果、減衰が小さくかつ計算コストも少ない $h_c = 1.4$ を採用して計算を進めた。

次に人工粘性係数 α の検証結果の一部を Fig.3 に示す。(a)は $\alpha = 0.001$ のときの波高の時系列、(b)は各 α において h_c と同様の方法で波高を取った。 α が大きくなると、波高減衰が大きくなった。また計測点が遠いほど減衰する傾向が引き続き見られた。また最も減衰が小さい $\alpha = 0.001$ では波高が振動し、右肩上がりの上昇傾向が見られた。これは人工粘性が小さすぎることで造波により、近隣の粒子間距離がカーネル関数と重ならないほどに離れて正確な波高が取れなかったのではないかと考えられる。この結果から、波高の減衰が小さくかつ振動のない $\alpha = 0.005$ を採用して計算を進めた。

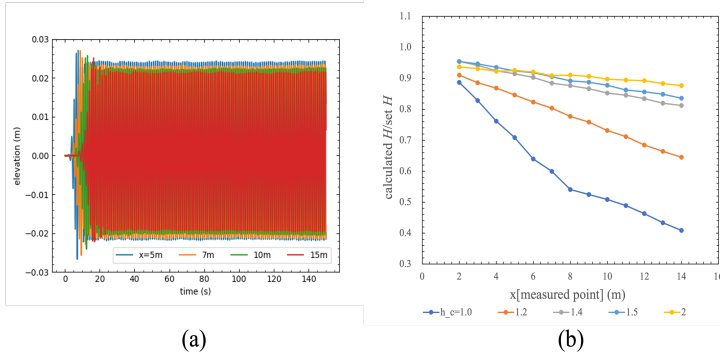


Fig. 2 Validation of h_c

(a) H of $h_c = 1.4$ (b) calculated H /set H ($\alpha = 0.005, T = 1.2s, H = 0.05m$)

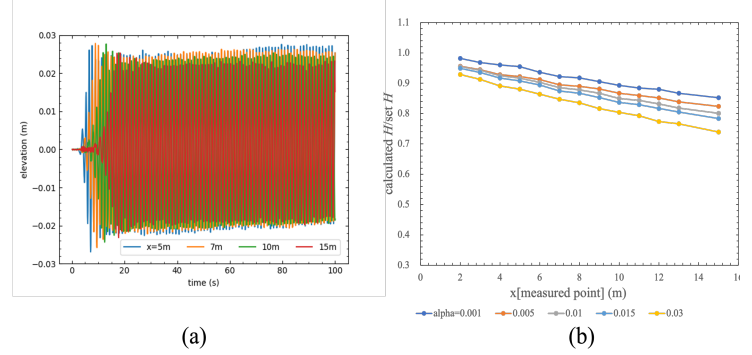


Fig. 3 Validation of α

(a) H of $\alpha = 0.001$ (b) calculated H /set H ($T = 1.2s, H = 0.05m$)

最後に周期 T (s) の検証結果の一部を Fig.4 示す。(a)は $T = 3.0s$ のときの波高の時系列、(b)は各 T において h_c と同様の方法で波高を取った。この結果から周期が大きくなるほど、波高減衰が小さくなる傾向が見られたが、平均波高が振動している様子も見られた。

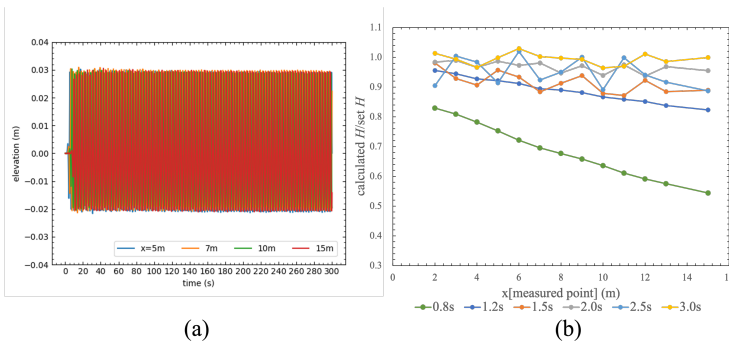


Fig. 4 Validation of T

(a) H of $T = 3.0$ (b) calculated H /set H ($\alpha = 0.005, H = 0.05m$)

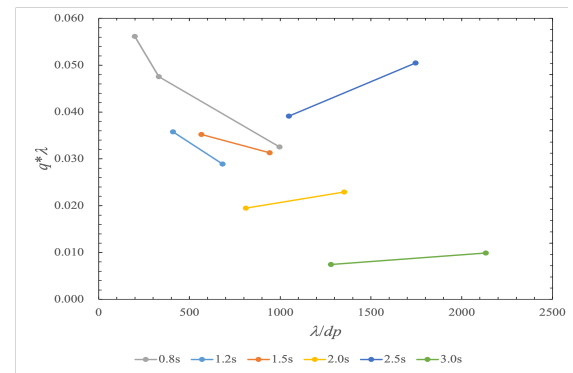


Fig. 5 $q - \lambda/dp$

ここまで周期 T が大きくなるにつれ、波高の空間的減衰が小さくなることがわかった。また粒子法は粒子径 dp を小さくすると、粒子数が多くなり空間解像度が上がるため、精度の高いシミュレーションを行うことができる。そこで同周期（波長）において dp を小さくした場合、空間解像度が上がることで波高の空間的減衰がどのように変化するかを観察するため、 dp と λ の依存性について検証した。これまでの計算では $dp = 0.005m$ を用いたが、本検証では周期 $T = 0.8, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0s$ で $dp = 0.003$ 、

0.005m、また周期 $T=0.8s$ においてのみ $dp=0.001m$ の計算を行なった。その他の条件に関しては周期の検証をした際と同様で、 $\alpha=0.005$ 、 $h_c=1.4$ 、波高 $H=0.05m$ とした。また Newyear et al.[9]は、波が進んだ距離 x と波高には指数関数的に減衰する関係があるとみなし、以下の式を提案している。

$$\frac{H_{cal}}{H} = \exp[-q(x - x_0)] \quad (1)$$

ここで $q(1/m)$ は減衰係数、 x_0 は氷板の端である。これを用いて q を求め、波長と dp の関係を求めた。結果を Fig.5 に示す。Fig.5 から減衰係数 q と λ/dp の関係について考察する。 $T=0.8, 1.2, 1.5s$ では粒子径 dp が小さくなる毎に波高の減衰が小さくなる。一方 $T=2.0, 2.5, 3.0s$ では dp が小さくなると減衰が大きくなっている。この傾向は $T=0.8, 1.2, 1.5s$ では、 dp が小さくなり空間解像度が上がることでこれまで波高として解像されなかった運動まで計算され、減衰が小さくなったのではないかと考えられる。 $T=2.0, 3.0s$ では、そもそも減衰が小さかったため、このような傾向になったのではないかと考えられる。

また分散関係についても検証した。波高 $H=0.05m$ 、 $\alpha=0.005$ 、 $T=2.0s$ 、計測地点 $x=7m$ で造波された DSPH の波について、波高と周期を合わせたサインカーブを理論解として比較した。結果を Fig.6 に示す。DSPH では波がストークス波になっているため山の部分が尖っているが、グラフから周期は適していることがわかった。

次に位相速度を求めた。結果を Table.2 に示す。以上から分散関係が成り立つことがわかった。

Table. 2 phase velocity at each T .

T (s)	$V_{theoretical}$	V_{cal}
0.8	1.245	1.248
1.2	1.707	1.713
1.5	1.884	1.893
2.0	2.028	2.036
2.5	2.095	2.113
3.0	2.132	2.147

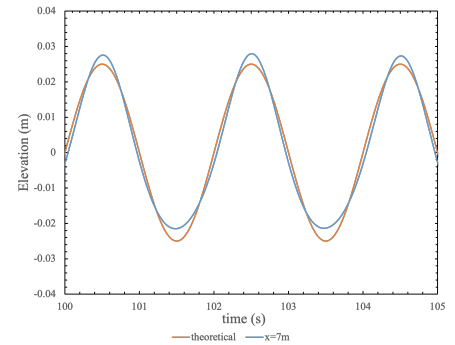


Fig. 6 Comparison of dispersion relations between calculated and theoretical.

3.2 剛体板を用いた波浪減衰検証の結果

剛体板を用いた波浪の減衰検証を行なった。 $h_c=1.4$ 、 $\alpha=0.005$ 、 $T=2.0, 2.5, 3.0s$ を用いて計算を進めた。数値水槽の模式図を Fig.7 に示す。18~22m の間にダンピングを入れている。計測地点はダンピングゾーンを避けるため、造波板から beach 側に 11~17m の 1m ごととした。式 (1) における x_0 は本検証では 11m となる。また模型氷は長さ 11m、厚さ 0.5cm、密度 $\rho=917 \text{ kg/m}^3$ の板状氷を用い、 $H=0.04m$ とした。この計算では長時間計算を行うと、氷板に水が乗ってしまうオーバーウォッシュが発生し、正しい波高の検証が行えなかった。そのため 60 秒で計算を行なった。 H_{cal} はオーバーウォッシュ影響を避けるため全周期のうち前半と後半の間 10 周期分の平均として求めた。Fig.8 に計算結果を、Table.3 に各周期における減衰係数を示す。

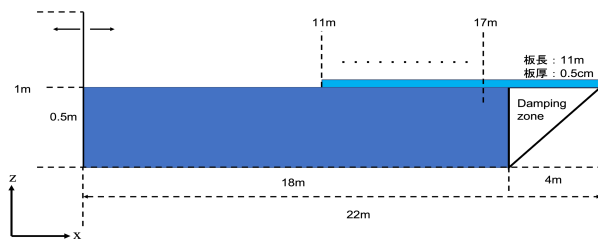


Fig. 7 Setup of numerical tank.

結果を Parra et al.[4]の結果と比較すると、Parra は周期 $T=2.0s$ で板状氷を用いた実験で q を 0.2 と求めている。本研究における周期 $T=2.0s$

Table.3 q at each T of rigid.

T (s)	q (1/m)
2.0	0.3251
2.5	0.4969
3.0	0.3269

の q は、0.3 程度とやや大きい。この差がどのような作用によって発生するか考える。Zhao et al. [10] は、波が減衰するメカニズムは乱流、氷板下の境界層流、氷粒子の衝突の 3 つであると述べている。氷による減衰に関わるのは後者 2 つで、本研究では氷は粒状にならないため、主に境界層による効果が効いてくるのではないかと考えられる。そこで境界層厚さについてブラジウスの厳密解を用いて求めた。結果として氷板の後縁における境界層厚さは、0.01m 程度であることがわかった。本研究では $dp=0.005m$ を使用していて、後縁では粒子 2 個程度でしか解像できないため、流体と氷板の摩擦による粘性減衰は表現できていないと考えられる。

また氷は本来なら弾性板であるため、剛体板を用いている本検証では減衰が大きくなることが考えら

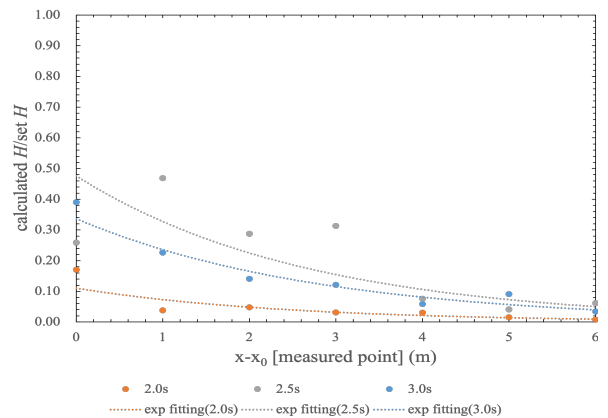


Fig. 8 attenuation trend of rigid plate

れる。

加えて浮体が受ける流体力について、Fig.9 に $T=2.0s$ において氷板が受ける x 方向と z 方向の流体力を示す。Fig.9 から z 方向の力で特に大きく振動しているのが見て取れる。これには波から受ける力以外にも壁とぶつかった時の反発力や反射波が含まれるが、このような氷板に作用する力によって氷板が振動し、それにより波が減衰したと推測する。

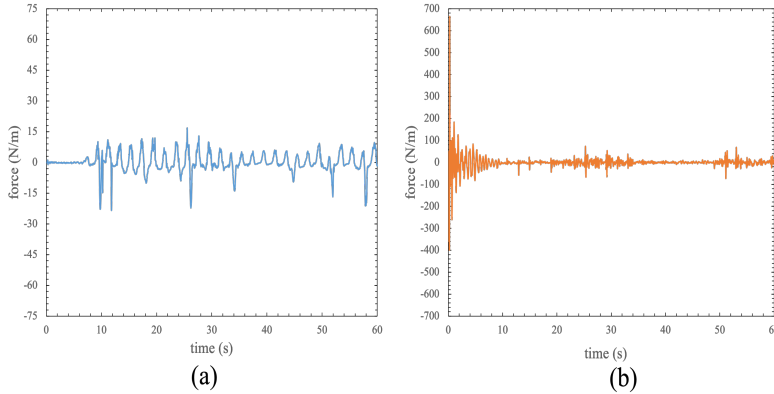


Fig. 9 (a) drag force at $T=2.0s$, (b) lift force at $T=2.0s$

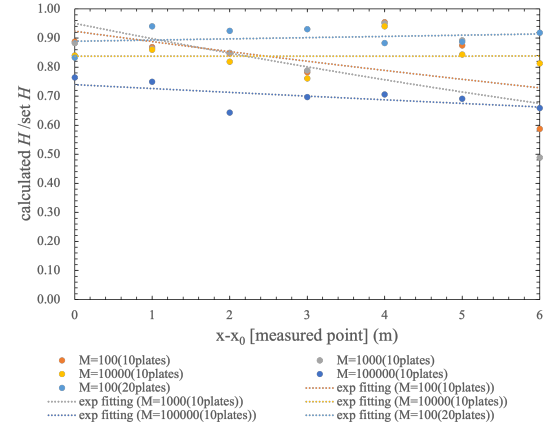


Fig.10 attenuation trend of pseudo-elastic plate

3.3 擬似弾性板を用いた波浪減衰検証の結果

次に擬似弾性板について考える。擬似弾性板は D S P H の hinge 機能を用いて、複数の剛体板を繋ぎその間に、本研究では以下のねじりモーメントの式(2)を作用させて板の曲げを表現する。

$$M = k \theta \quad (2)$$

ここで、 k はねじり剛性(Nm/rad)である。計算結果を、Fig.10、Table.4 に示す。まず剛体板の $T = 2.5s$ における減衰係数 q は、0.497 である。一方で擬似弾性板の減衰係数 q はどのねじりモーメントにおいても 10^{-1} 以上小さい。このことから Parra et al. で用いている板状氷は非常に硬く、剛体に近かったのではないかと考えられる。

Table. 4 q at each M .

M (Nm)	q (1/m)
100	0.0395
100 (20plates)	-0.0046
1000	0.0571
10000	-0.0001
100000	0.0183

4. 結論

本研究では DualSPHysics を用いて、波浪-氷板相互作用について検証するために、SPH 法の造波検証と剛体板、擬似弾性板を用いた波浪の減衰特性についてシミュレーションを行なった。その結果、減衰係数 q は粒子径 dp が小さく、周期 T が大きくなると小さくなることを明らかにし、SPH 法においても $T = 2.0s$ より大きい周期では、実験における板状氷の減衰係数にやや近い値が得られた。

参考文献

- [1] <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>
- [2] Stephenson, S., Smith, L., Agnew, J., "Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic", nature climate change Lett, (2011) Vol.1 156-160.
- [3] R. Wang and R. Shen., "Gravity waves propagating into an ice-covered ocean: A viscoelastic model", J. Geophys Res, (2010), Vol.115 C06024.
- [4] Parra, S., Sree, D., Wang, D. et al., "Experimental study on surface wave modifications by different ice covers", Cold Region Science and Technology, 174(2020),103042
- [5] Toffoli, A., Bennetts, L., Meylan, M. et al., "Sea ice floes dissipate the energy of steep ocean waves", Geophys Res Lett, (2015), 42, 8547-8554
- [6] Zhang, N., Zhang, X., Ma, Q., "Study on wave-induced kinematic responses and flexures of ice floe by Smoothed Particle Hydrodynamics", Computers and Fluids, 189 (2019), 46-59
- [7] Roselli, R., Vernengo, G., Altomare, C. et al., "Ensuring numerical stability of wave propagation by tuning model parameters using genetic algorithms and response surface methods", Environmental Modelling and Software, 103(2018), 62-73.
- [8] Padova, D., Dalrymple, R., Mossa, M., "Analysis of artificial viscosity in the smoothed particle hydrodynamics modelling of regular waves", J. Hydraulic Research, 52:6(2014), 836-848.
- [9] Newyear, K., Martin, S., "A comparison of theory and laboratory measurements of wave attenuation in grease ice", (1997) J. Geophys. Res., Vol.102 (C11), pp.25091-25099.
- [10] Zhao, X., Shen, H., Cheng, S., "Modelling ocean wave propagation under sea ice covers", (2015) Acta. Mech. Sin., Vol.31, 1-15.