

# オホーツク海における流氷と波浪・風速の関係 について

佐藤 之信<sup>1</sup>・中山 恵介<sup>2</sup>・館山一孝<sup>3</sup>・佐野史弥<sup>4</sup>・駒井克昭<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)豊水設計 海洋マネジメント部  
(〒065-0033 札幌市東区北33条東16丁目2-2)  
E-mail:y\_sato@housui.co.jp

<sup>2</sup>正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)  
<sup>3</sup>正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)  
<sup>4</sup>学生会員 北見工業大学大学院 社会環境工学科専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)  
<sup>5</sup>正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

本研究は、オホーツク海南域における流氷量と波浪発生要因である風に着目し、オホーツク海沿岸の波浪と流氷との関係を明らかにするため、氷量と有義波高及び風速に関し観測データの解析を行った。解析対象波浪は、オホーツク海沿岸に影響を及ぼす波向を北～東と考え、波向に対応する風が6時間以上連続して発生した際の有義波高とし、風速と有義波高の比率とその時の流氷量の関係から、流氷が有義波高に及ぼす影響を解析した。その結果、風速と有義波高の比率は流氷量が多いほど小さくなっており、特にオホーツク沿岸域に近い領域における流氷体積の増大が、有義波高の減少に最も寄与していることが分かった。これにより、今後の波浪と流氷の検討には、可能であれば流氷体積を利用すべきであることが示された。

**Key Words :** *Drift ice ,Okhotsk Sea ,Ice cover area ,Sea ice volume ,Significant wave height*

## 1. はじめに

オホーツク海の日本沿岸域は、流氷が接岸する北半球の最南端に位置しており、多くの水産拠点が存在し、水産資源の観点から大変重要な地域となっている。近年、オホーツク海沿岸において、高潮や高浪による防波堤や護岸の越流等の被害が発生している。特に冬期間(1月～2月)においては護岸の天端付近まで水位が上昇したり、岸壁が水没したりするような異常高潮が発生し、港湾活動や漁業活動に大きな影響を与えている。過去の研究において、積算流氷面積の減少が有義波高の増大を誘発し、それら被害の発生要因となっている可能性が指摘されている<sup>1)2)3)4)</sup>。しかし、過去の論文では、オホーツク海全域を対象とした積算流氷面積と有義波高の関係のみが示されており、オホーツク沿岸域への影響が大きいオホーツク海南域の流氷量に着目した研究が行われていない。また、流氷体積や波浪の発生要因である風についての検討も行われていない。

IPCCのレポートでも述べられているように、地球規模での環境変動がオホーツク海における流氷の接岸にも

影響を及ぼしている可能性がある<sup>5)</sup>。気候変動による影響としては、気候変動は自然災害の発生を増加させ生態系に損傷を与えること<sup>6)</sup>や、温暖化環境でのインド各地における降雨の増加<sup>7)</sup>、降雪地域では気候変動が季節積雪のサイズと流出の季節分布に大きな変化を引き起こすこと<sup>8)</sup>が示唆されている。特に氷河や海氷に関しては、気候変動によるキリマンジャロ氷河の後退<sup>9)</sup>、北半球と南半球の海氷の増減の非対称化<sup>10)</sup>、北極での海氷面積減少に起因する中緯度地帯での降水量増加<sup>11)</sup>、1978年以降北極海の氷のカバー率が年間あたり約3パーセントの減少<sup>12)</sup>が示唆されている。流氷や氷河の長期的な展望については、氷河の減少に起因し2005年から2060年の間で73mmの海水面上昇<sup>13)</sup>が報告されている。つまり、冬期間のオホーツク海において発生している有義波高の増大は、気候変動の影響を受けて発生している可能性が考えられる。

そこで本研究では、オホーツク海南域の流氷量と波浪発生要因である風に着目し、流氷量と有義波高・風速に関し観測データの解析を行い、オホーツク海沿岸の波浪と流氷との関係を明らかにすることを目的とした。

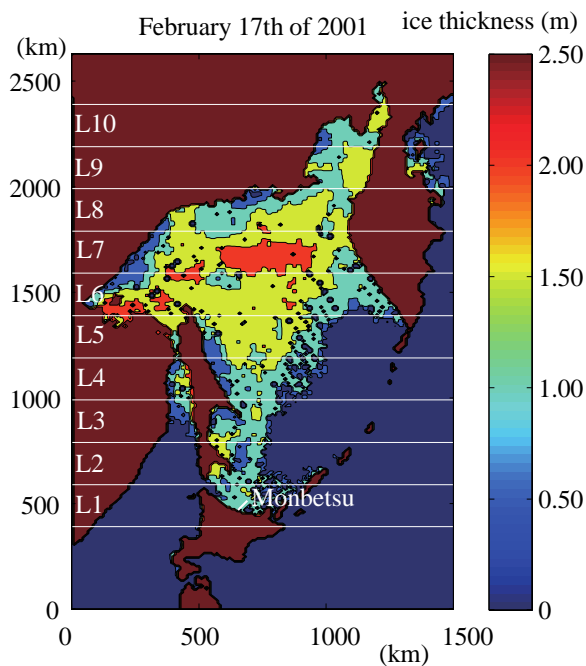


図-1 衛星データから得られた流氷厚さの空間分布。2001年2月17日。

## 2. 流氷・有義波高・風速の観測データ

本研究の研究対象領域は、流氷に関してはオホーツク海全域を、波浪に関しては北海道のオホーツク海沿岸とし、流氷の解析には広範囲をほぼ同時に計測することが出来る衛星解析データを利用することとした(図-1)。また、衛星画像データを流氷の面積や厚さのデータに変換するために、館山らによる衛星リモートセンシングによるオホーツク海の氷厚変動解析結果を用いた過去の研究結果<sup>14)</sup>を用いた。従来、衛星画像データからは流氷面積の推定のみが可能であったが、可搬型多偏波マイクロ波放射計と、氷厚を正確に測定できる非破壊式の電磁誘導式氷厚計を利用することで、より高精度に氷厚を推定することが可能となった<sup>2)</sup>。館山らは地球観測衛星に搭載されているマイクロ波放射計SSM/Iへ推定手法を適用し、南極海での実測データを用いて氷厚推定アルゴリズムの検証を行い、その再現性の高さを証明した<sup>3)</sup>。

本研究では、同手法を用いて推定された1989年から2012年の海水面積および氷厚より、有義波高・風速の観測データの使用が可能となる2001年から2011年の1日間隔のデータを使用した。波浪データはオホーツク海沿岸で唯一観測されている紋別港沖において2時間間隔で観測されている全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)のデータを、気象データは波浪データと同じ紋別市において1時間間隔で観測されている気象庁AMeDASのデータを利用した。また、流氷面積の時間・空間変化が大きいこと

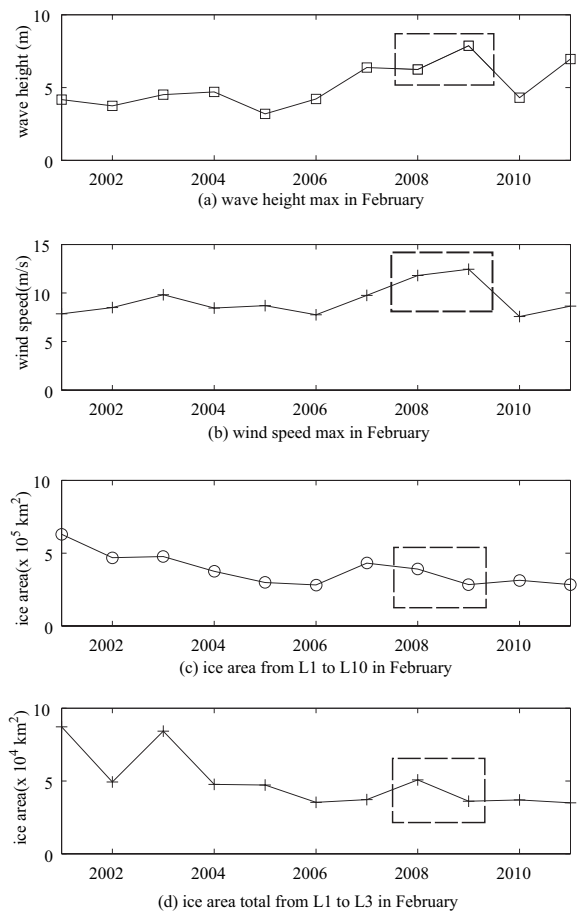


図-2 2001年から2011年の2月における波高・風速・流氷面積

から、オホーツク海を幾つかの小領域に分割することとした。最小の空間スケールとして、風波に注目していることから2001年~2011年における1月および2月のNOWPHAS波浪データの月別の最大平均有義波高4.25 mおよび周期8.2 sを利用した結果、SMBにより吹送距離170 km、吹送時間6時間が得られたため、南北約200 km毎に分割することとした(図-1: L1~L10領域。南域はL1~L3とした)。

## 3. 流氷量と有義波高・風速の関係について

### (1) 有義波高と風速

解析としては、まず対象とする有義波高と風速の選定を行った。紋別港における波向と風向の関係はほぼ90°の差があることが確認された。これはエクマン輸送の基本原則に則っているため、本研究においても風波を引き起こす風向と波向は時計回りに90°の差があることとして解析を行うこととした。冬期のオホーツク海沿岸に影響を及ぼす波浪が北~東であることから、対象とする風は西~北と考え、更に吹送時間の短いものは流

氷の影響を受けづらと考え、波浪は吹送時間6時間以上のものを対象とした。

選定した有義波高と6時間の平均風速について、2月における最大有義波高、そのときの平均風速、オホーツク海全域の流氷面積、南域の流氷面積に関して検討した結果、同様な風速でも流氷面積が減少すると最大有義波高が大きくなっていることが分かった(例えば、2008年は同様な風速でも最大有義波高が小さくなっている)。特に、南域の流氷量の変化が有義波高の変化に顕著に影響することことがわかった。これにより南域の流氷データを利用した解析の優位可能性が示された(図-2)。

## (2) 流氷量と有義波高と関係

続いて、南域における流氷の面積および体積の違いによる波浪への影響を評価するため、南域の各エリア(L1~L3)における流氷面積および体積を小・中・大(Lv1, Lv2, Lv3)と分割し、それぞれのレベルにおける風速と有義波高の関係について検討した(図-3)。検討に当たっては、有義波高は風速に比例して増加すると考えた場合、流氷面積・体積が増大すると $\alpha_h$ (=有義波高/風速)が減少するのではないかと考えた。検討の結果全てのケースにおいて、流氷の面積および体積が増大することで、同じ風速でも有義波高が減少することが確認された。また、 $\alpha_h$ の変化を面積・体積および各領域において調べた結果、どの領域も流氷面積および体積の増大に対して有義波高が減少する傾向を示していた(図-4)。

## 4. 流氷量減少による有義波高増大の予測

前章までの検討において、同じ風速でも流氷量により有義波高が変化することが示された。そこで本章では、流氷量減少による有義波高増大の予測についての検討を行うこととした。同じ風速でも有義波高は流氷面積や体積に比例して減少し、風速に比例して増大すると仮定し式(1)及び式(2)を用いてモデル化した。係数 $ala$ と $abv$ 及び $A0$ 、 $V0$ は、過去の観測データ(有義波高・風速・流氷量)より最小2乗法を用いた多変量解析で推定した。

$$Hw = ala \cdot (A0 - Ai) \cdot Ws \quad (1)$$

$$Hw = abv \cdot (V0 - Vi) \cdot Ws \quad (2)$$

ここで、 $Hw$ : 有義波高(m),  $A0$ : 臨界流氷面積(km<sup>2</sup>),  $V0$ : 推定最大流氷体積(km<sup>3</sup>),  $Ai$ : 流氷面積(km<sup>2</sup>),  $Vi$ : 流氷体積(km<sup>3</sup>),  $Ws$ : 風速(m/s),  $ala$ : 流氷面積に対する風速と有義波高との係数,  $abv$ : 流氷体積に対する有義波高と風速との係数である。また、臨界流氷面積  $A0$ , 推定最大流氷体積  $V0$  はそれぞれ波高が0となる時の流

氷面積、流氷体積を示す。

また、流氷の厚さが小さい場合、流氷は海面と同じ挙動を示し有義波高の減衰率が小さくなるのではないかと考えられる。そのため、流氷の面積、体積の他に流氷の厚さが  $ala$ ,  $abv$  に及ぼす影響を把握するため、流氷の面積および体積を計算する際、氷厚 10cm 以上のみ考慮、20cm 以上のみ考慮、以後氷厚 10 cm 刻みに 200 cm 以上のみ考慮までの 21 ケース (C1 から C21) を設定した。領域を分割した L1 から L10 において式(1), 式(2)を適用して  $ala$ ,  $abv$ ,  $V0$ ,  $A0$  を推定した結果を図-5 に示す。

波浪の伝達を考えると、流氷の厚さが厚いほど波浪の減衰に影響すると考えられる。しかし図-5 によると流氷厚 1.6m 以上のものは、 $ala$ ,  $abv$  共に傾向にばらつきが存在していた。これは 1.6m 以上の流氷量が流氷全体量に対し面積・体積共に少ないためであると考えられる。一方で、流氷厚が 1.4 m 以上まで値を利用した場合(1.6m 以上の値はバラツキが大きいため検討から除外)、他のケースと比較して  $ala$ ,  $abv$  共に領域に関係なく最も大きな値を示していた。また、図-5 の(b)(d)に示されているように、オホーツク海南域の沿岸域に近づくほど  $ala$ ,  $abv$  は共に大きくなっている。これにより、有義波高の減衰に与える影響は、流氷厚が 1.4 m 程度以上のものが最も大きくなり、有義波高の減衰率は、流氷がオホーツク沿岸域に近づくほど大きくなることが示された。

臨界流氷面積  $A0$  は、流氷面積がその値に一致すればどんなに大きな風速が与えられても有義波高はゼロとなる臨界値を意味している。つまり、風が与えられても有義波高がゼロとなる場合は、対象とする領域全てが氷で覆われた状態であると考えられるので、臨界流氷面積  $A0$  は、対象領域の面積と一致すべきであると考えられる。そこで、風に対して最も流氷が大きな与える L1 領域における流氷厚毎の臨界流氷面積  $A0$  と海域面積  $As$  との比率を計算した(図-6)。流氷厚さが薄い場合を含むケースでは、その比率は理論的には1であることが望ましく、実際に流氷厚が 0.6m 程度までは臨界流氷面積と海域面積の比 ( $A0/As$ ) は 1 程度であることが確認された。その後、徐々に小さくなり、上述の有義波高に大きな影響をおよぼす 1.4 m の厚さで最低の比率を示すことが確認された。これは、流氷による波高の伝達率により、流氷面積=海域面積となる前に波高が0となるため  $A0/As$  が 1 以下の値を示し、1.6m 以上の値はデータが少なくばらつきが大きいため、1.4m 以上の値が最少を示したと考えられる。これらの検討から、本論文での提案式の妥当性が示されたと考えられる。

有義波高に対して、面積より流氷厚さ(体積)が重要な影響を与えることが示されたことから、流氷の体積に着目した有義波高の推定を行った。推定条件としては、オホーツク沿岸の有義波高へ最も影響を及ぼす L1 の流

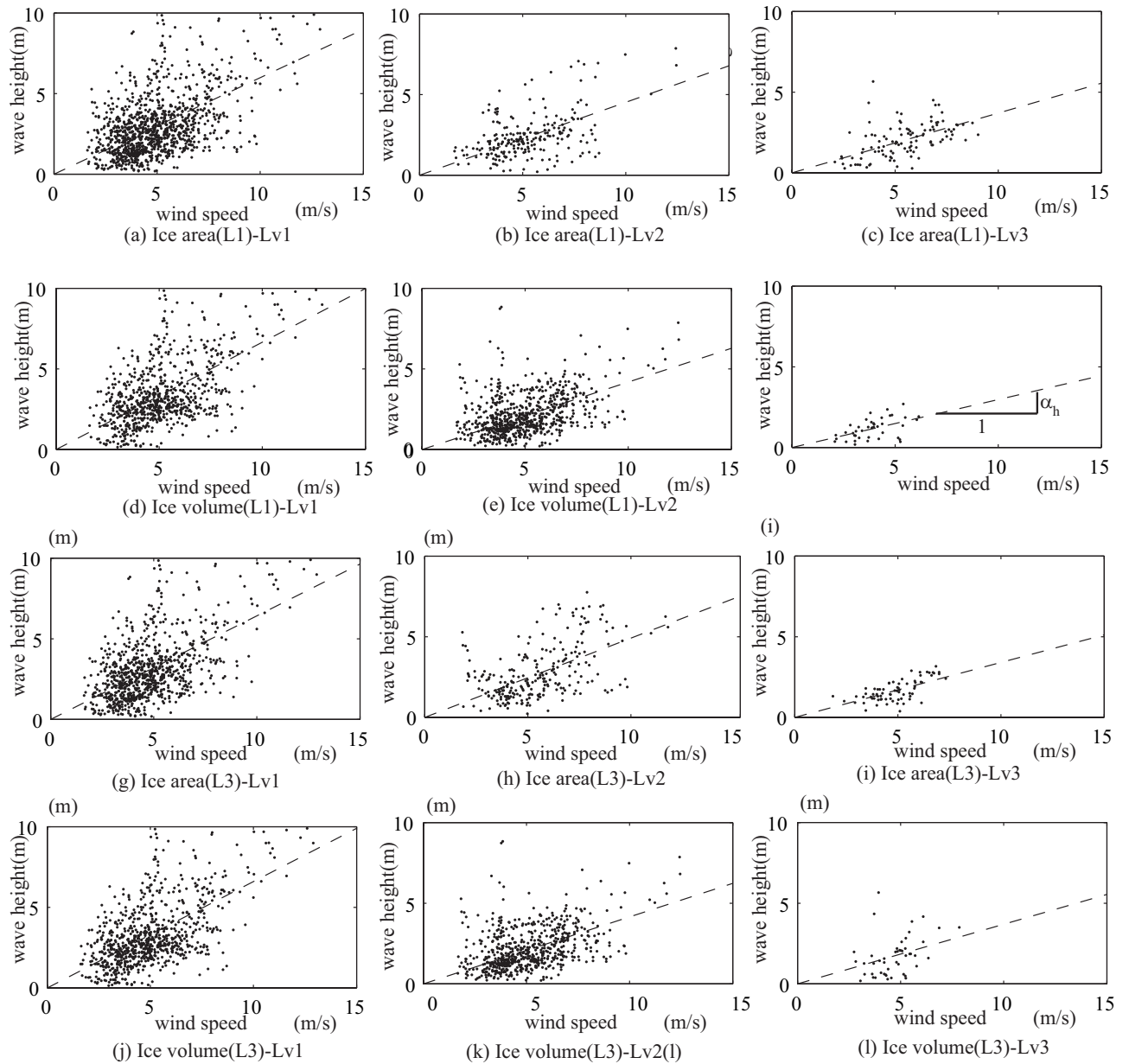


図-3 領域L1,L3における2001年から2011年の1月から2月における風速と有義波高

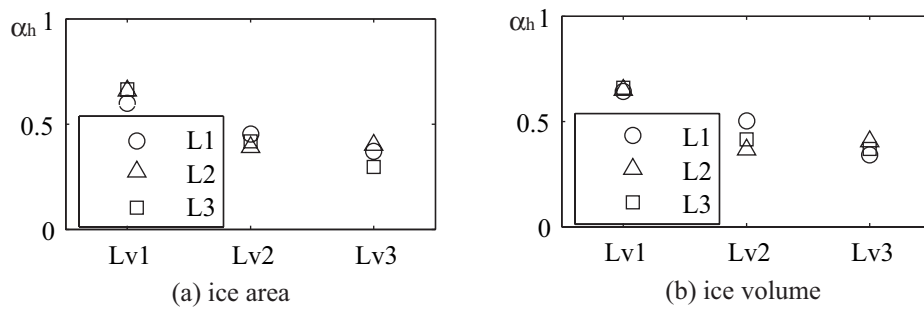


図-4 領域L1からL3における流水レベルLv1からLv3までの $\alpha_h$

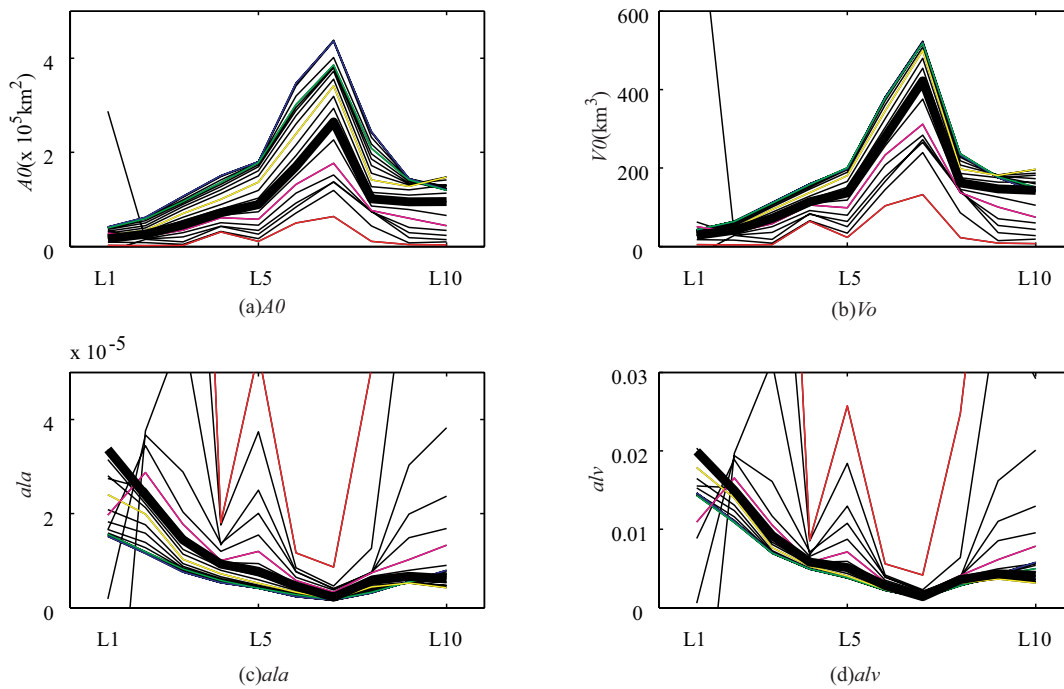


図-5 領域毎の臨界流氷面積( $A0$ )と推定最大流氷体積( $V0$ )及び  $ala \cdot alv$ , 青線 : C1, 緑線 : C6, 黄線 : C11, 紫線 : C16, 赤線 : C21, 黒太線 : C14, その他黒実線 : その他のケース.

氷厚 1.4m 以上のものを用い, 式(2)により有義波高を推定した. その結果  $ah=0.0199$ ,  $V0=28.3 \text{ km}^3$  が得られた. 流氷体積を過去 10 年間で L1 における平均値 ( $0.816 \text{ km}^3$ ) とした場合, 有義波高推定式は,  $H_w = ah \cdot (V0 - V_i) \cdot W_s = 0.547 W_s$  を L1 領域で流氷体積が仮に 20%減少したとすると, 流氷体積の平均値は  $0.653 \text{ km}^3$  となり, 有義波高推定式  $H_w = 0.550 W_s$  であることから, 係数の比較より約 0.55% ( $= (0.550 - 0.547) / 0.547$ ) 有義波高が増大することになる.

しかし, 平均値を用いた計算だと流氷が接岸しない期間も含んでいるのでかなりの過小評価であると考えられる. そこで, 流氷が接岸したと思われる期間だけを抽出した. その結果, 流氷体積の平均値は  $5.99 \text{ km}^3$  となり,  $H_w = ah \cdot (V0 - V_i) \cdot W_s = 0.444 W_s$  となる. この地域での流氷体積が仮に 20%減少したとすると, 流氷体積の平均値は  $0.479 \text{ km}^3$  であり, 有義波高推定式は  $H_w = 0.468 W_s$  となり, 約 5.4% ( $= (0.550 - 0.444) / 0.547$ ) 有義波高が増大することになる.

地球規模での環境変動が極端な現象として発生すると仮定すると, 将来, L1 領域に流氷が存在しない可能性も考えられる. 過去における L1 領域での流氷体積の最大値は  $14.9 \text{ km}^3$  であり, 有義波高推定式  $H_w = ah \cdot (V0 - V_i) \cdot W_s = 0.267 W_s$  が得られる. 将来, 流氷体積がゼロとなる年が発生するとすると, 有義波高推定式は  $H_w = 0.563 W_s$  となり, 係数の比較から約 111% ( $= (0.563 - 0.267) / 0.267$ ) 有義波高が増大することになる. つまり,

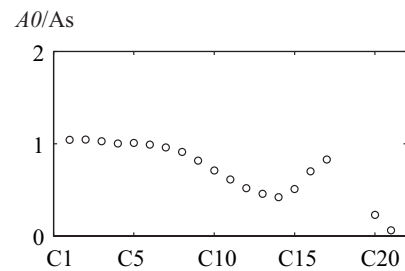


図-6 L1 領域における流氷厚毎の  $A0$  と海域面積 ( $As$ ) の比率. C18, C19 は値が大きすぎてはなすれているため省略した.

流氷が過去 10 年で最大に存在した場合と比較すると, 流氷が存在しない場合には有義波高は約 2.11 倍となることとなる.

## 5. おわりに

本研究では, オホーツク海における流氷量と有義波高・風速の関係を調べることにより, オホーツク海沿岸域での有義波高と流氷量との因果関係について検討を行った. それにより下記の結果を得られた.

- 1) 同じ風速でも流氷量により有義波高が異なることが分かった. これにより流氷により有義波高が減少することが証明された.
- 2) 流氷による有義波高の減少は, オホーツク海沿岸

域に近づくほど大きくなることがわかった。また流氷厚1.4m以上のケースが最も大きな影響を与えることが分かった。

- 3) また、有義波高の増大については、推定値ではあるが南域の流氷量が0となった場合、最大2倍程度となることが示された。

#### 参考文献

- 1) 水野雄三, 野賢二, 平沢充成, 高橋哲美, 長内戦治 : 「海氷による波浪の減衰に関する一考察」, 海洋開発論文集第7巻, pp.7-11, 1991.
- 2) R. A. Kris field, A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, and M.-L. Timmermans : Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle, *Journal of Geophysical Research Oceans Volume 119*, Issue 2, pages 1271–1305, 2014.
- 3) Shibata H, Izumiyama K, Tateyama K, Enomoto H, Takahashi S : Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes 1980–2011, *Annals of Glaciology* 54, P.139-148, 2013.
- 4) Tateyama Kazutaka, Enomoto, Hiroyuki : Observation of sea-ice thickness fluctuation in the seasonal ice-covered area during 1992–99 winters, *Annals of Glaciology, Volume 33*, pp. 449-456, 2001.
- 5) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 966.
- 6) Atsushi Nakamoto, Keisuke Nakayama, Tetsuya Shintani, Yasuyuki Maruya, Katsuaki Komai, Tetsuya Ishida, Yoshihiro Makiguchi : Adaptive management in Kushiro Wetland in the context of salt wedge intrusion due to sea level rise, *Hydrological Research Letters* Vol. 7 No. 1 p. 1-5, 2013.
- 7) B. N. Goswami, V. Venugopal, D. Sengupta, M. S. Madhusoodanan, Prince K. Xavier : Increasing Trend of Extreme Rain Events Over India in a Warming Environment, *Science*, Vol. 314 no. 5804 pp. 1442-1445, 2006.
- 8) Whitaker AC, Yoshimura A : Climate Change Impacts on the Seasonal Distribution of Runoff in a Snowy Headwater Basin Niigata, *Hydrological Research Letters* 6: P.7-12, DOI, 2012
- 9) Georg Kaser, Douglas R. Hardy, Thomas Mölg, Raymond S. Bradley and Tharsis M. Hyera : Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts, *International Journal of Climatology*, Volume 24, Issue 3, p.329–339, 2004.
- 10) D. J. Cavalieri, P. Gloersen, C. L. Parkinson, J. C. Comiso, H. J. Zwally, : Observed Hemispheric Asymmetry in Global Sea Ice Changes, *Science* Vol.278 pp. 1104-1106, 1997.
- 11) Mark C. Serreze, Marika M. Holland, Julianne Stroeve : Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover, *Science*, Vol. 315 no. 5818 pp. 1533-1536, 2007.
- 12) Ola M. Johannessen, Elena V. Shalina, Martin W. Miles : Satellite Evidence for an Arctic Sea Ice Cover in Transformation, *Science* 3 December 1999, Vol. 286 no. 5446 pp. 1937-1939, 1999.
- 13) Yukiko Hirabayashi, Yong Zan I, Satoshi Watanabe, Sujan Koirala I and Shinjiro Kanae : Projection of glacier mass changes under a high-emission climate scenario using the global glacier model HYOGA2, *Hydrological Research Letters* 7(1), P.6–11, 2013.
- 14) 舘山一孝, 榎本浩之 : 衛星リモートセンシングによるオホーツク海氷厚変動の監視, 土木学会論文集B3 (海洋開発) Vol. 67, No. 2 P.721-726, 2011.

## ABOUT THE RELATIONSHIP OF THE DRIFT ICE AND WAVES, WIND VELOCITY IN THE SEA OF OKHOTSK

Yukinobu SATO, Keisuke NAKAYAMA, Kazutaka TATEYAMA, Fumiya SANO and  
Katsuaki KOMAI

In this study, we made an attempt to clarify the influence of sea ice on wind waves in Sea of Okhotsk by using sea ice area and sea ice volume data sets estimated from satellite images. The Ekman spiral was confirmed to control the difference of the directions between wind and wave from the meteorological data and wave direction data in the coastal area of Sea of Okhotsk. It was found from sea ice and wave height data that the more the sea ice exists, the less the wave height is induced, especially, in the southern part of Sea of Okhotsk. In addition, sea ice volume is revealed to be more influential compared to sea ice area by using the simple model equations proposed in this study. As one of the most significant results, when there is no sea ice in winter season, significant wave height is found to become more than twice as large as the case when sea ice exists the greatest.