

# 沿岸ポリニヤにおける過冷却水およびフラジルアイス生成過程についての研究

伊藤優人<sup>1</sup>、大島慶一郎<sup>2</sup>、深町康<sup>2</sup>、清水大輔<sup>3</sup>、岩本勉之<sup>3,4</sup>、松村義正<sup>2</sup>、A. R. Mahoney<sup>5</sup>、H. Eicken<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学環境科学院

<sup>2</sup> 北海道大学低温科学研究所

<sup>3</sup> 国立極地研究所

<sup>4</sup> 新潟大学理学部

<sup>5</sup> アラスカ大学フェアバンクス校地球物理学研究所

## A study of formation processes of supercooled water and frazil ice in a coastal polynya

M. Ito<sup>1</sup>, K. I. Ohshima<sup>2</sup>, Y. Fukamachi<sup>2</sup>, D. Simizu<sup>3</sup>, K. Iwamoto<sup>3,4</sup>, Y. Matsumura<sup>2</sup>, A. R. Mahoney<sup>5</sup>, H. Eicken<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

<sup>2</sup> Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

<sup>3</sup> National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

<sup>4</sup> Department of Environmental Science, Niigata University, Niigata, Japan

<sup>5</sup> Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA

We have conducted mooring measurements off Barrow in the Chukchi Sea since 2009 to examine the process of sea-ice formation in a coastal polynya. Remote sensing imagery, including Synthetic Aperture Radar (SAR), show that coastal polynyas, characterized by streaks of new ice in SAR scenes, occur episodically in this region and further along the coast to the southwest. Each mooring at the nearshore (depth of 45 m) and offshore (depth of 57 m) sites consists of a conductivity-temperature recorder, an acoustic Doppler current profiler and an ice-profiling sonar which can detect frazil ice in the water column. Previous laboratory experiments showed that the underwater frazil ice formation occurs in association with supercooled water resulting from large surface heat loss under the turbulent conditions. When this process is applied to a coastal polynya in the real ocean, ice production rates can be quite high, because of the lack of an insulating ice cover. However, in-situ observations of ice production processes in such polynya settings are greatly limited due to logistic challenges. Our mooring data collected 30-40 m below the surface reveal several potential supercooling events, i.e., with the potential temperature of the subsurface water below the surface freezing point, and two in-situ supercooling events. When the supercooling occurs with strong wind condition, frazil ice was episodically detected by the ice-profiling sonar down to 2-5 m water depth. These findings indicate that frazil ice formation associated with in-situ supercooling occurs through strong direct surface cooling and turbulence.

沿岸ポリニヤにおける海氷生成過程について、大きな熱損失を伴う乱流下で行われた室内実験 (Ushio and Wakatsuchi, 1993) では、海面で生成された過冷却水の沈み込みによる海中でのフラジルアイス生成が観察された。海面からの熱損失を阻害する ice cover が形成されないこのプロセスが、現実のポリニヤにも起こっているのならば、非常に効率のよい海氷生産が可能となる。しかしながら、活発な海氷生産が期待される冬季の観測は難しく、現場での観測例はわずかし報告されていない。その例として、ベーリング海、St. Lawrence Island の沿岸ポリニヤで行われた冬季係留系観測によるものがある (Drucker et al., 2003) 。この観測では SAR 画像によってポリニヤ域にグリーンアイスの存在が確認されたとき海中では 0.01°C 程度の過冷却が発生し、同時に水深 5 m 程度の海中にフラジルアイスの存在を確認している。ただし、この報告のみが唯一の観測例であるので、実際の海で上記の実験室で見られたプロセスが発生するのか、ということについてはさらなる研究が必要である。そこで、今回我々は 2009-2010 年にアラスカのチャクチ海バロー沖で取得された係留系による連続データを、海水の過冷却とフラジルアイス生成に着目し解析を行った。係留系はより岸に近い水深 45 m の地点 (71.23N, 157.65W) とそれより西におよそ 30 km 離れた沖側の地点 (71.32N, 156.88W) の 2 系が設置され (以下、岸側および沖側と呼ぶ)、各係留系には水温塩分計、ADCP、それに水中のフラジルアイスを検知する能力を有する ice-profiling sonar (IPS) が取り付けられ、IPS については岸側が 5 分間隔、沖側が 30 秒間隔でフラジルアイスの detection を行った。さらに、これらの係留系データに加えて、衛星データとして、AMSR-E による薄氷厚データ (Iwamoto et al., 2013)、それに基づく熱収支データ、ASAR (合成開口レーダー) データや、近くの空港で取得された気象データを組み合わせることにより、いつ、どのような環境下でどの程度の海水の過冷却が発生し、そのときフラジルアイスはどのくらいの水深に現れるのかを明らかにすべく、解析を行った。その結果、冬季のこの海域では、数回にわたる長期間 (1-2 週間程度) 継続した potential supercooling (ポテンシャル過冷却) と短期間イベント的に発生した 2 回

の in-situ supercooling (現場過冷却) が、(多くの場合岸側と沖側で同時に) 観測された。potential supercooling とは現場海水のポテンシャル水温が表面の結氷温度を下回る現象である。そのうちのいくつかは係留点にポリニヤが発生していないときに観測されているが、その場合は南西側の沿岸に沿ってポリニヤが発生していて、かつ北東向きの流速場になっている場合が多く、potential supercooled water は南西から移流されてきたものと考えられる。一方で、他の potential supercooling や現場の水温が現場結氷温度を下回る in-situ supercooling は、係留点にポリニヤが出現し、かつ熱損失の大きなきに発生しており、これらは大気による海水の直接冷却により生じたものであると考えられる。そのうち、2月20日前後に沖側係留点で発生した potential supercooling について、図1に沖側の係留データと AMSR-E 氷厚データ、気象データの時系列を示す。図2には沖側の IPS で取得したデータの時系列を示す。図2の黒色で示したのは、1秒毎に取得した最も音波の反射強度の強い、海氷底面もしくは海面までの距離のデータ(range データ)であり、灰色の点は30秒毎に全層にわたって検知されたターゲットまでの距離のデータのうち、反射強度が一定のしきい値を超えたデータ(profile データ)をプロットしたものである。profile データのうち range データの下方にあるものはフラジルアイスを検知している可能性がある。これらの図で示した期間は、係留点の海氷は薄く(図1b)、また風が沖向きで15 m/s 程度と強いこと(図1e)から、現場海域にはポリニヤが形成され、強い乱流状態であったと考えられる。さらに、2月20日の ASAR 画像には、現場海域にグリースアイスと思われるストリーク構造が確認されている。この時、水深約40 m の水温-塩分計は potential supercooling を捉えている(図1a)。IPS (図2) の profile 機能からは、この日から3日間ほど、水深5 m 程度までフラジルアイスと思われる反応を捉えている。もしこれらがフラジルアイスなら、IPS によってポリニヤでフラジルアスを直接観測した初めての例となる(川については過去に例がある)。

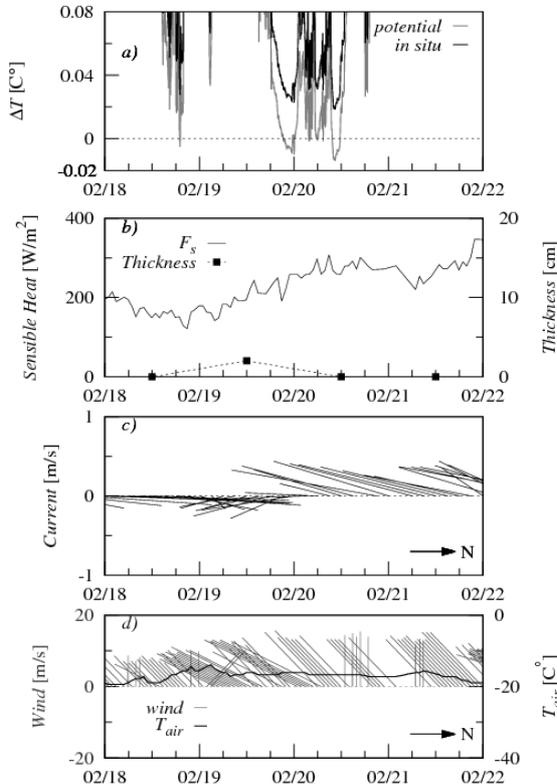


図1、沖側の係留系による海洋データおよび海氷・気象データの時系列

a) 現場水温と結氷温度の差(黒)とポテンシャル水温と表面結氷温度の差(灰色)。b) 開放水面を仮定したときの顕熱フラックス(実線)と AMSR-E による氷厚(四角)。c) ADCP による水深31m の流速のスティックダイアグラム。d) バローでの流速のスティックダイアグラムと気温(黒の実線)。

References

Iwamoto, K., K. I. Ohshima, T. Tamura, and S. Nihashi, Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea, International Journal of Remote Sensing, 34, 468-489, 2013.  
 Drucker, R., S. Martin, and R. Moritz, Observations of ice thickness and frazil ice in the St. Lawrence Island polynya from satellite imagery, upward looking sonar, and salinity/temperature moorings, Journal of Geophysical Research, 108(C5), 3149, doi:10.1029/2011JC001213, 2003.  
 Ushio, S. and M. Wakatsuchi, A laboratory study on supercooling and frazil ice production processes in winter coastal polynyas, Journal of Geophysical Research, 98(C11), 20321-20328, 1993.

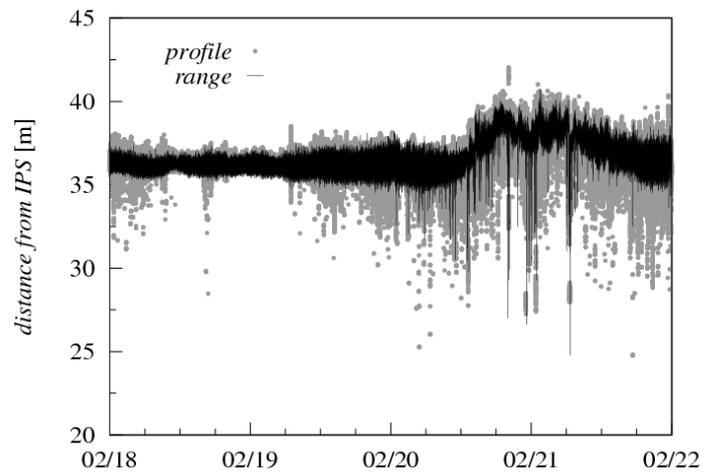


図2、沖側の IPS データの時系列  
黒で range データを、灰色で profile データを示している