

合成開口レーダーを用いた変形氷抽出の試み

豊田 威信（北海道大学 低温科学研究所）

共同研究者：石山惇応（当麻町）、木村詞明（東京大学）、Christian Haas (AWI)

Outline

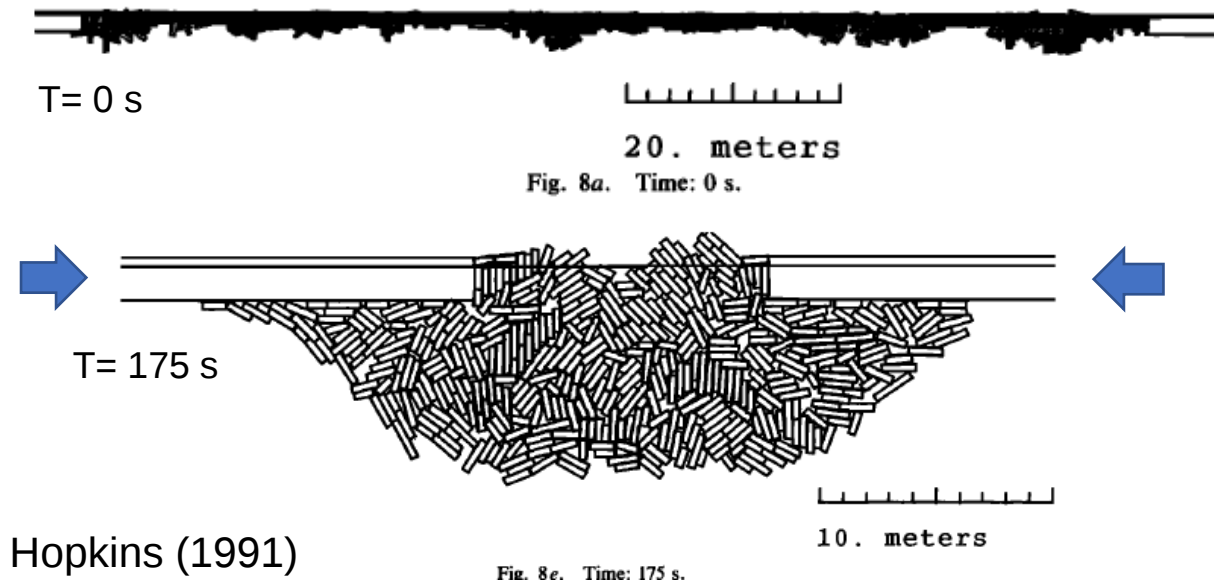
1. はじめに
2. 合成開口レーダーから見えるもの
測定原理、海氷の特性、周波数依存性、偏波特性
3. 最近の研究の紹介
オホーツク海における変形氷抽出アルゴリズムの開発
4. まとめ、今後の計画

1. はじめに

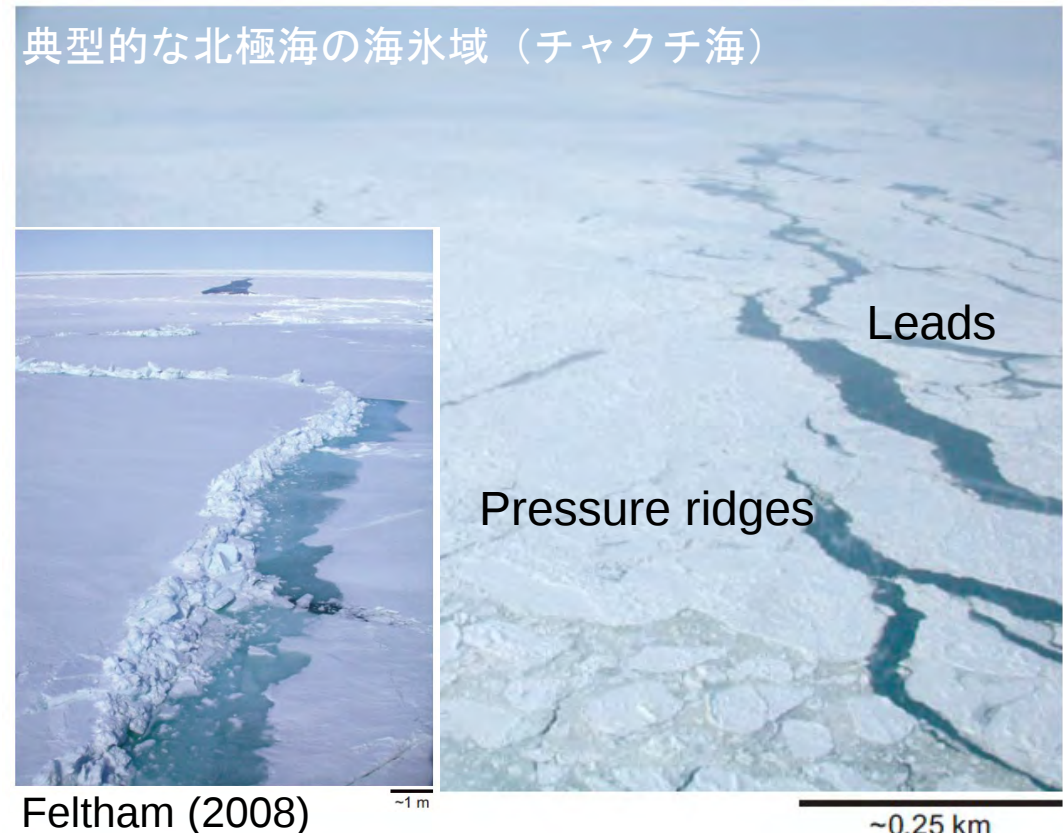
背景

- * 氷厚発達過程には、熱力学的な成長過程（底面結氷）と 変形氷の形成過程（リッジング）
- * 北極海、南極海、オホーツク海では変形氷の体積寄与は約70%に達する (*e.g.* Melling and Riedel, 1995).
- * しかしながら、通常変形過程は数値モデルのグリッド以下のスケールで生じるため、数値モデルの精度を向上させるためには適切なパラメタリゼーションが必要。 (*e.g.* Rampal et al., 2011).
- * 変形過程をより良く理解するためには、変形氷の分布や時間発展に関する観測データが重要。

<変形氷の形成過程（モデル）>

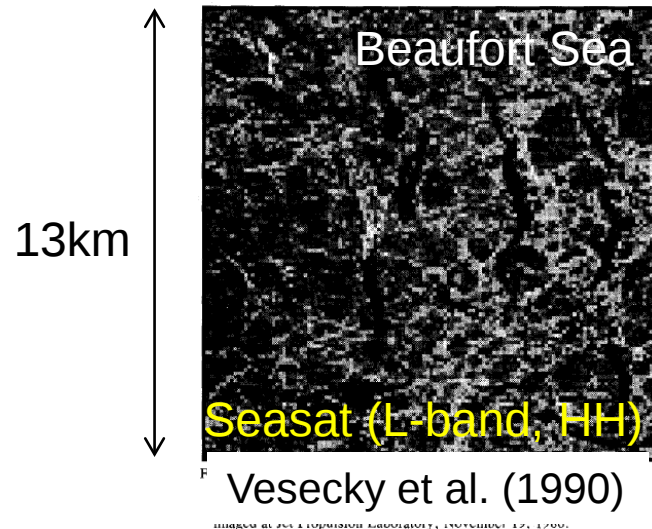


Hopkins (1991)



- * 変形氷の抽出には高分解能な衛星画像が必要 => 合成開口レーダー (SAR)
- * 表面凹凸のスケール $\geq 0.3 \text{ m}$ => L-band ($\lambda = 25\text{cm}$) が C-band (5cm) よりも有用

変形氷の抽出に L-band SAR が有用であることは SAR の初期段階から知られていた。



Multi-parameters

Rignot and Drinkwater (1994)

Wakabayashi et al. (2004)

Nakamura et al. (2005)

Comparison between satellite SARs

Dierking and Busche (2006)

Eriksson et al. (2010)

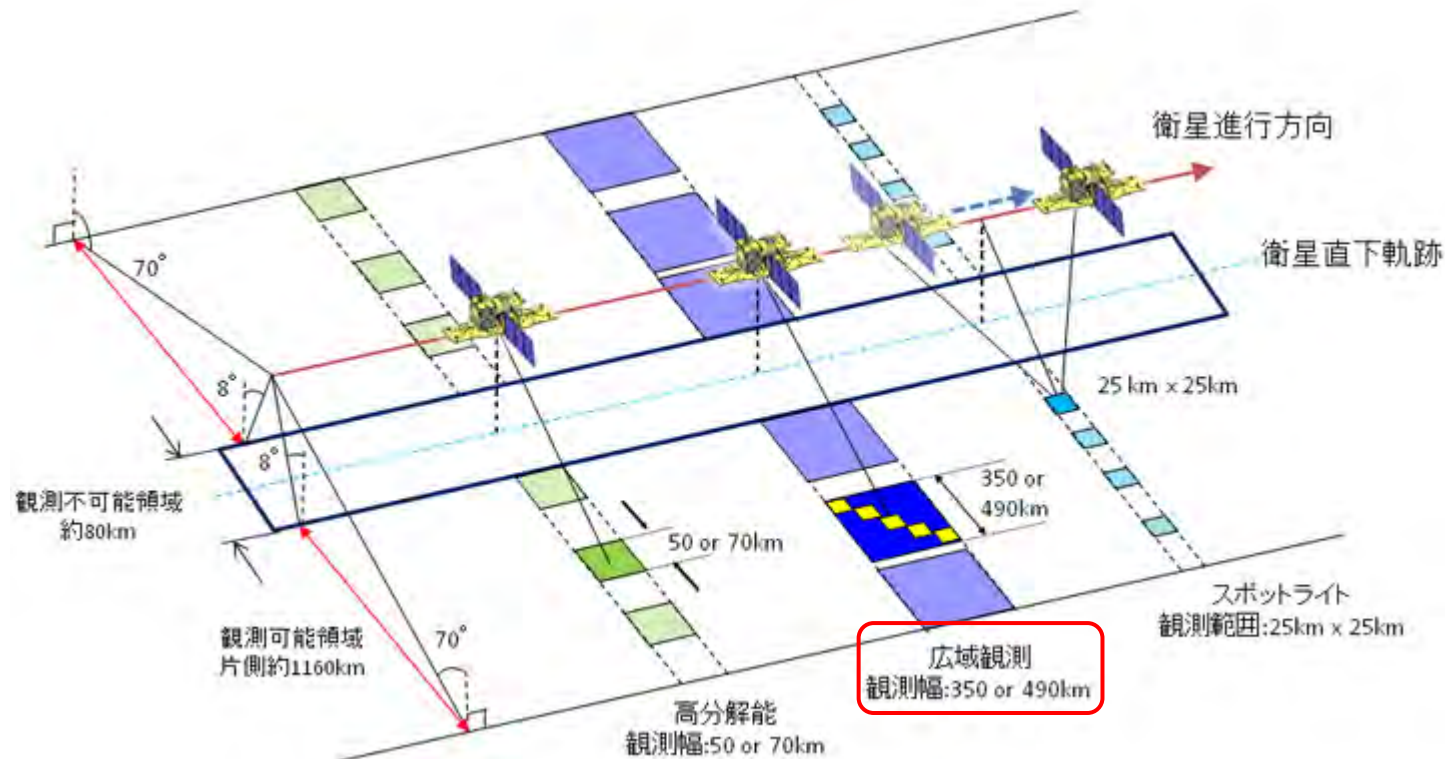
ただし、L-band SAR に関する観測研究はまだ不十分
広い分布を知るには広域モードが適 (ScanSAR)

この研究の目的

1. 広域モード（Scan SAR）の PALSAR 画像を用いて変形氷を抽出するアルゴリズムを開発し、現場観測から検証すること。
2. 季節海氷域の変形氷を抽出するにあたって、**L-band SAR** (PALSAR) と C-band SAR (RADARSAT-2) の有用性の比較を行うこと。
3. PALSAR-2 画像を用いて **dual polarizations** (HH & HV) の特性を吟味し、それらを組み合わせることにより変形氷を効率よく抽出する可能性を吟味。
4. 変形氷の抽出にあたって L-band SAR に影響を及ぼす要素を定量的に調べること。

2. 合成開口レーダー (SAR) から見えるもの

ALOS-2 / PALSAR-2 (2014年5月24日に打ち上げ、現在も運用中)



SAR: Synthetic Aperture Radar

- ・ 昼夜を問わず高分解能観測可能
- ・ 天候状態に左右されない
- ・ 海水上の積雪の影響は少ない

ScanSAR mode (PALSAR)

- Resolution: 100 m
- Swath width: 350 km
- Incidence angle: 18 – 43 deg.
- Polarization: HH

ScanSAR mode (PALSAR-2)

- Resolution: 100 / 60 m
- Swath width: 350 / 490 km
- Incidence angle: 8 – 70 deg.
- Polarization: HH & HV

<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/jpalsar2.htm>

- Revisit time: 14 days
- Altitude: 628 km
- Life time: 5 (7) years
- Centre frequency: 1.24 ~ 1.28 GHz

* **測定原理** : そもそも何を測定しているのか

レーダー方程式

$$P_r = \underbrace{\left(\frac{P_t}{4\pi R_t^2} G_r \right)}_{\text{発信シグナルの単位面積あたり電力}} \underbrace{\sigma \left(\frac{A_r}{4\pi R_r^2} \right)}_{\text{受信された後方散乱}}$$

発信シグナルの
単位面積あたり電力

R_t : 対象物までの距離
 G_t : アンテナゲイン

受信された後方散乱

R_r : 対象物からアンテナまでの距離
 A_r : 有効なアンテナ開口部の面積
 σ : レーダー断面積

地面の対象物が radar signal を散乱する能力を表わす (単位: 面積)

$$P_r = \iint_{A_0} \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \sigma^0 \frac{A_r}{4\pi R_r^2} ds$$

σ^0 : 後方散乱係数 (Backscatter coef.)
(無次元)

表面の固有の特性としての取り扱いが可能

観測対象の領域で平均

$$\langle \sigma_{linear}^0 \rangle = \frac{\iint_{A_0} \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \sigma^0 \frac{A_r}{4\pi R_r^2} ds}{\iint_{A_0} \frac{P_t G_t}{4\pi R_t^2} \frac{A_r}{4\pi R_r^2} ds}$$

通常、用いられる定義式
 $\sigma^0 = 10 \log_{10} (\sigma_{linear}^0) \text{ (dB)}$

σ^0 に影響を及ぼす主なプロセス

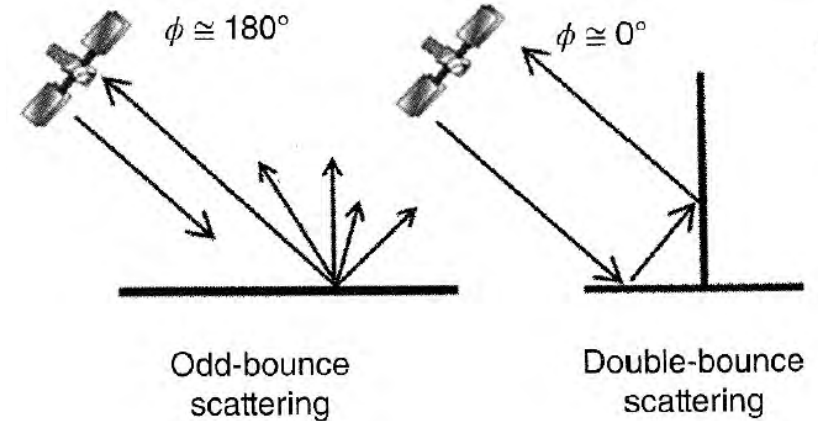
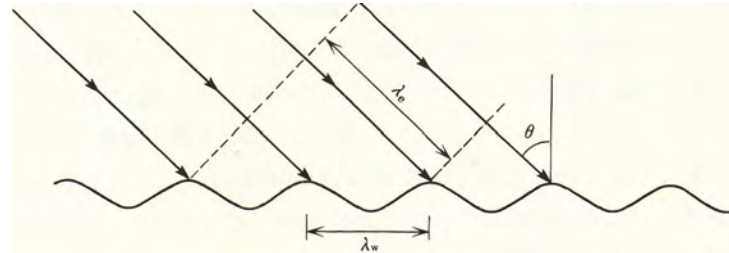
- 表面散乱

- * 鏡面反射

- フレネルの法則

- * Bragg 散乱

- 海面では重要 ($\theta_i \geq 25^\circ$)、海氷は効かない

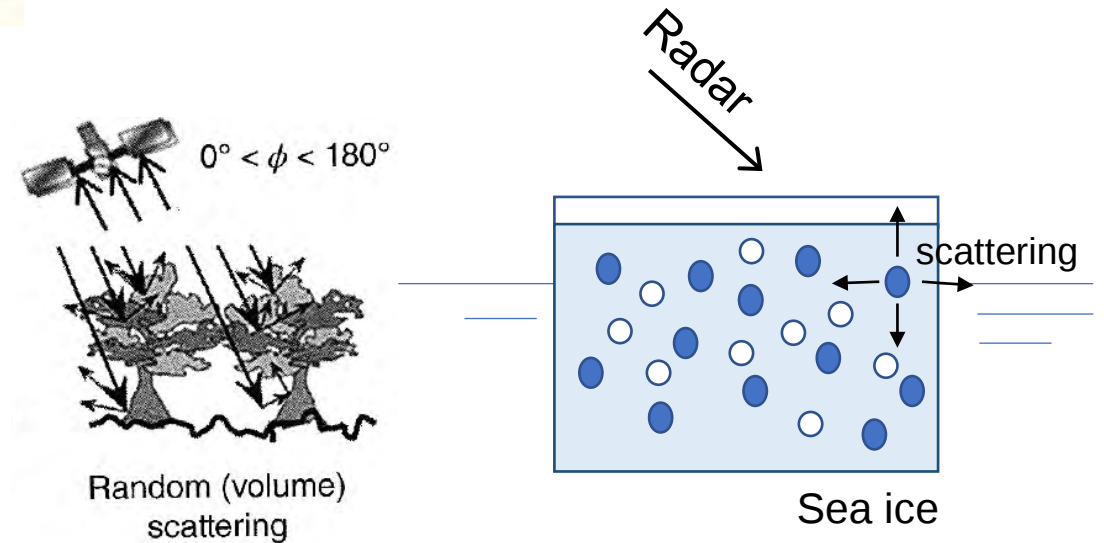


- 体積散乱

- * 透過深度が深い時

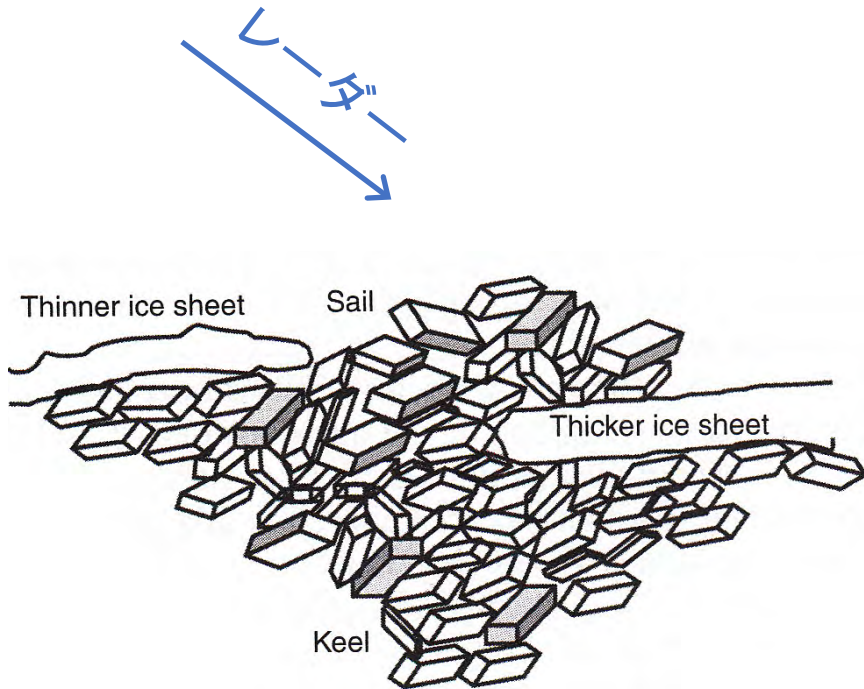
- * 含有物による散乱

(Dierking, 2013)



海氷における σ^0 の決定因子

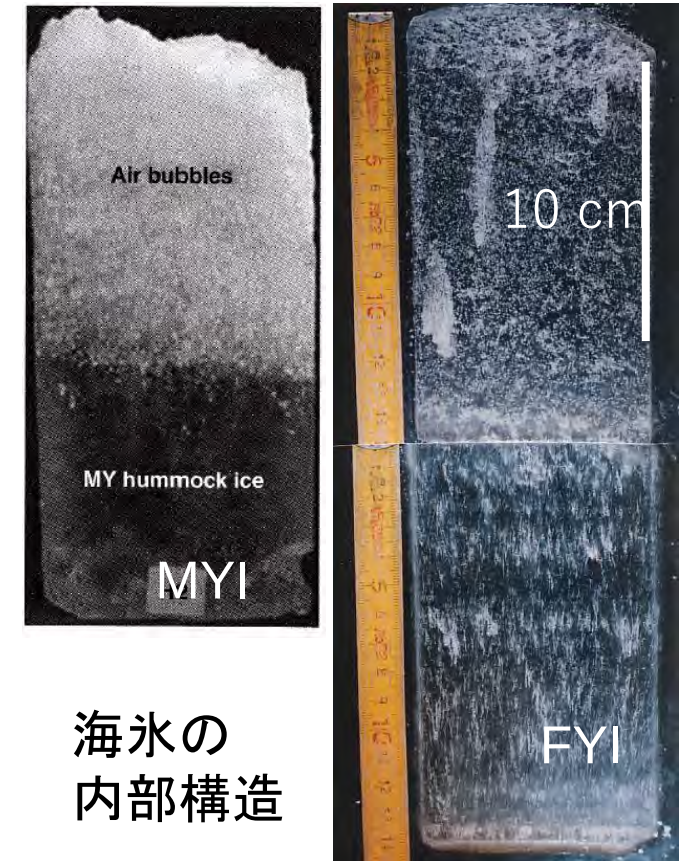
- Surface roughness (ほぼ鏡面散乱)
- 海氷の物理的、電氣的性質
- レーダーの波長（周波数）、偏波特性、局所的な入射角



リッジ部



氷縁域



海氷の
内部構造

レーダー波長依存性

Onstott and Shuchman (2004) :

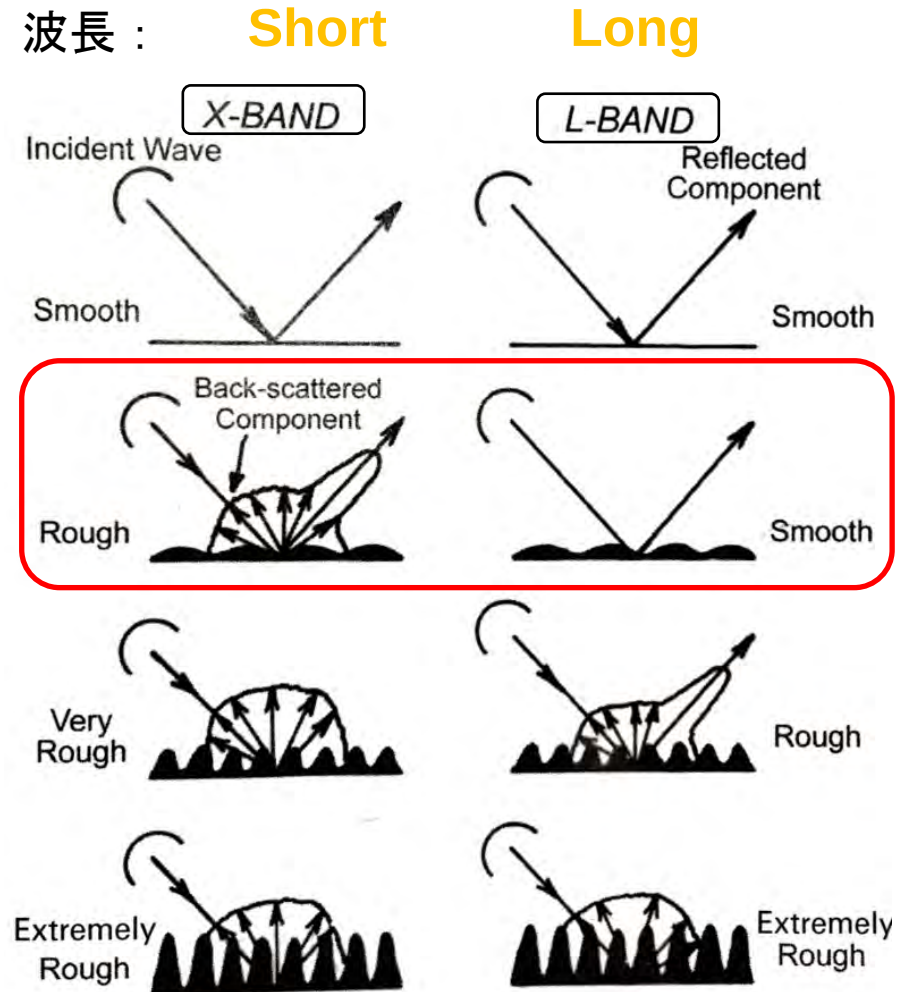
SAR 後方散乱は波長よりも大きな表面凹凸に対して感度が高い



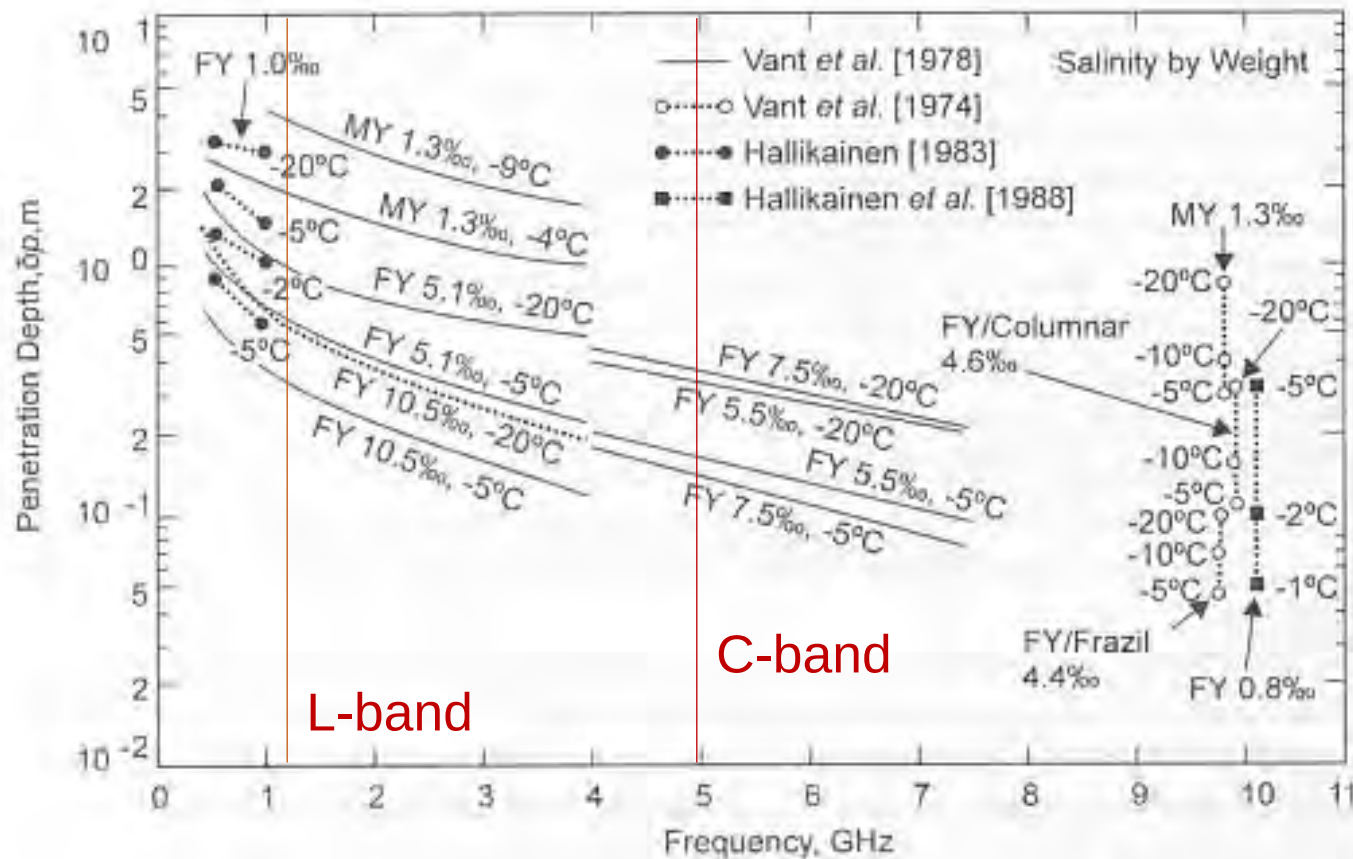
より大きなスケールの表面凹凸を
抽出するには、波長の長い SAR が有効

変形氷(凹凸 > 20 cm)を抽出するには
L-band SAR が C-band や X-band SAR
よりも有効 (Dierking et al., 2006)

	波長 (cm)
C-band	3.75 – 7.5
L-band	15.0 – 30.0



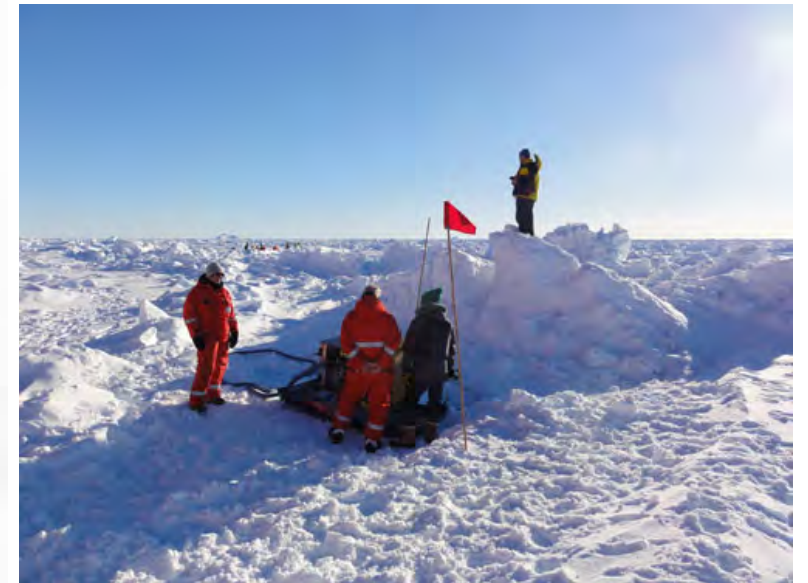
マイクロ波領域における理論的な透過深度



(Hallikainen and Winebrenner, 1992)

L-band: ~ 0.5 m 体積散乱
C-band: ~ 0.1 m 表面散乱

定義：レーダーシグナルの強度が
 $1/e$ にまで減衰する深さ

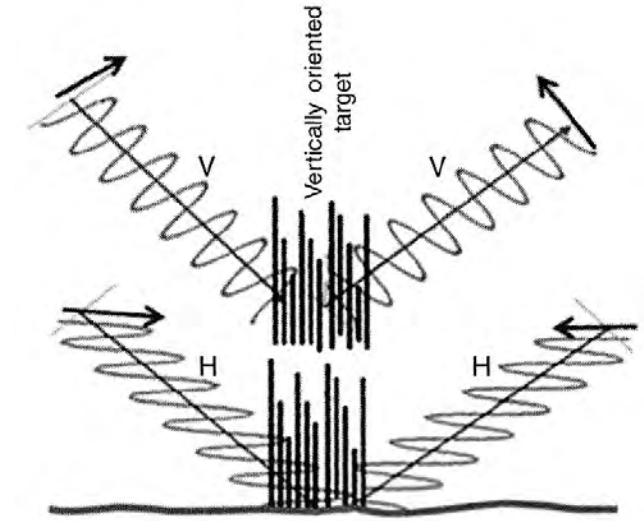


東南極で見られたリッジ：
比較的薄い氷盤の積み重なりである
ことに注目

レーダーシグナルの偏波特性

Transmitted radar pulse: polarized EM wave

- Co-polarization signals (HH, VV)
- Cross-polarization signals (HV, VH)
(* From theory, HV and VH are identical.)



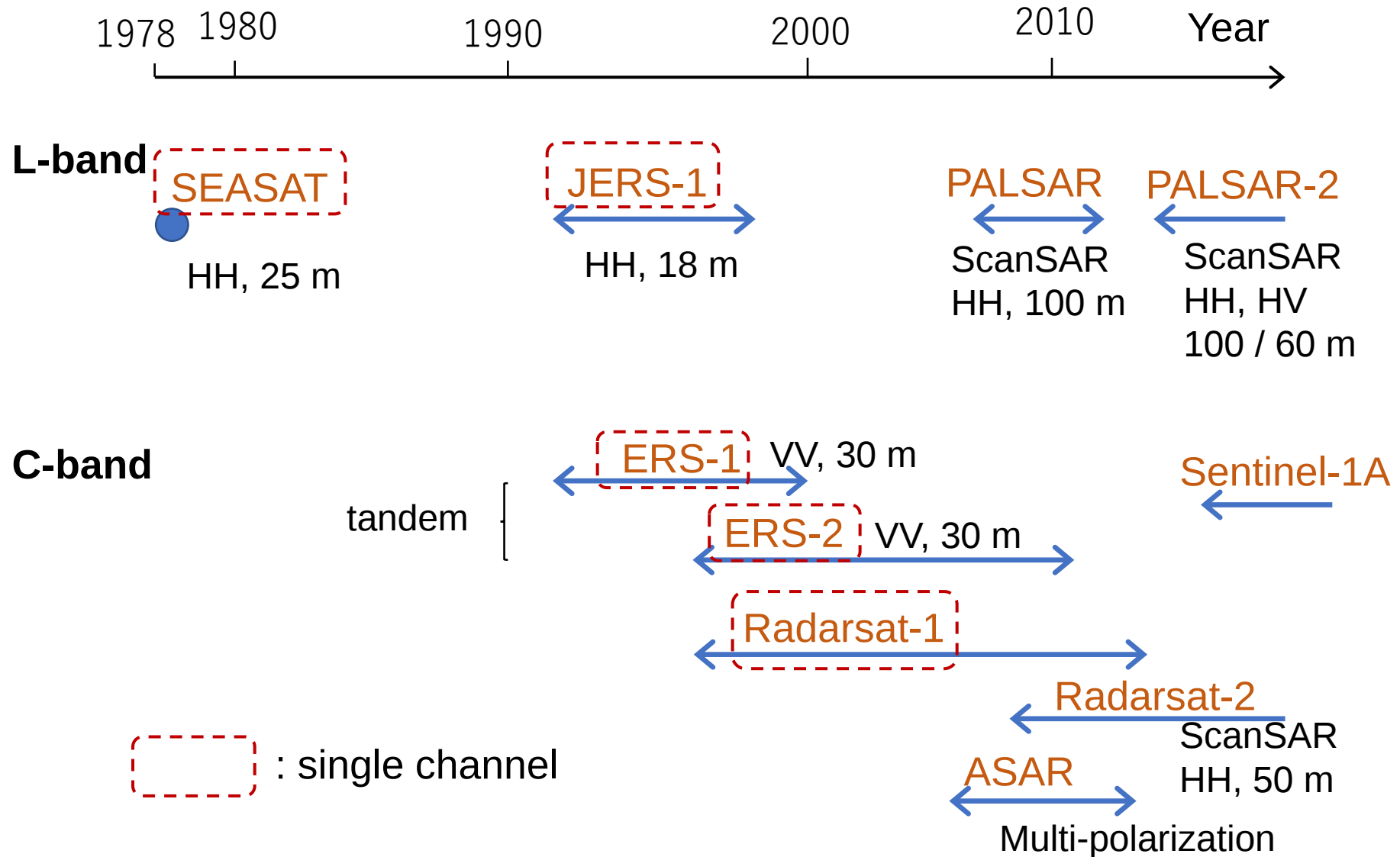
高い HV シグナルを生み出す要素

基本的にはシグナルの多重散乱
(地形、非等方的な特性による)

(例) 一年氷の場合はリッジの形成
多年氷の場合は表面付近の気泡による体積散乱

⇒ 入射角依存性が比較的小さいのが特徴

衛星 SAR 観測の歴史



3. 最近の研究の紹介

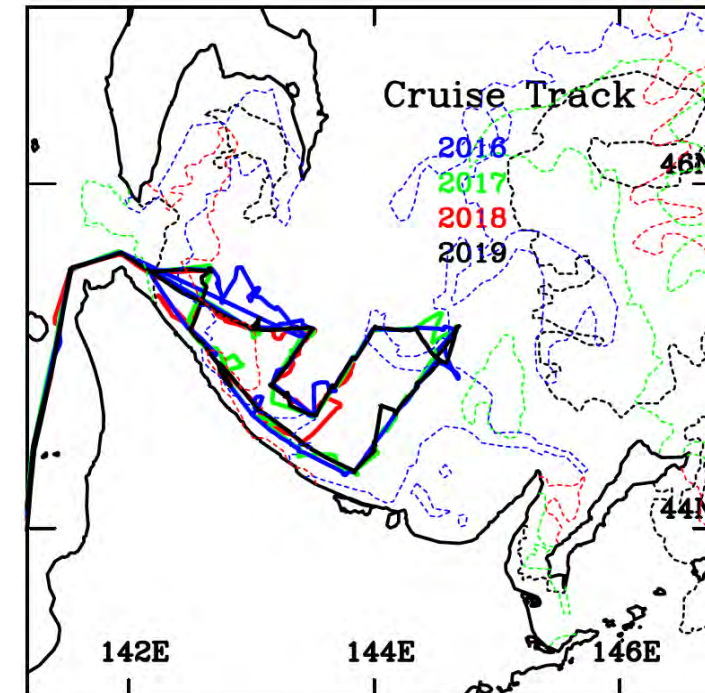
研究対象領域

(Toyota, Ishiyama, and Kimura, 2020 *IEEE TGRS*)



2月15日における
平均的な海水域
(1980-2010)

アルゴリズム作成に
用いた点もプロット



巡視船「そうや」
を用いた観測領域
(2016-2019)

破線：
各年の航海期間中の
氷縁位置

この領域で変形氷抽出アルゴリズムを作成する利点：

1. 毎冬、海上保安庁と協同して巡視船「そうや」を用いた観測が実施され、現場検証データがある程度利用可能
2. この領域には多年氷がないため、極域に比べて海水の分類がよりシンプルであること。
3. 海上保安庁とJAXAとの間の協定により、この領域の上空を通過するPALSAR, PALSAR-2画像はすべて取得

データ

1) 衛星 SAR 画像

	PALSAR	RADARSAT-2	PALSAR-2
Obs. time	2009-2011 Jan to Mar	2010/2/22	2016-2019 Feb (cruise period)
Number	35	1	8
Frequency	L-band	C-band	L-band
Polarization	HH	HH	HH & HV
Incident angle	18-43 deg	20-46	8-70
Pixel spacing	100 m	50 m	50 m
Swath	~350 km	~450 km	~350 km

- ・ **PALSAR** 画像は海氷の種類を判別するアルゴリズムの開発に使用
- ・ 変形氷を抽出する能力を比較するため、最も接近した**RADARSAT-2** 画像を比較解析
- ・ **PALSAR-2** 画像はアルゴリズムの検証、および HH 画像と HV 画像の有用性の比較をするために使用

2) 現場検証データ

巡視船「そうや」を用いた海氷観測が実施された期間

PALSAR	2009	2010	2011	
	Feb 8-13	Feb 4-10	Feb 13-17	
PALSAR-2	2016	2017	2018	2019
	Feb 5-11	Feb 10-16	Feb 8-14	Feb 6-12

- ・ 船舶のアップーデッキから毎時撮影された**写真**
- ・ 船舶搭載のヘリコプターから撮影された**航空写真**
- ・ 国際的な指標である ASPeCt protocol (Worby and Allison, 1999) に基づく **目視観測結果**
(船舶から半径 1km 以内の海氷の種類、氷盤の大きさ、氷厚、変形氷、密接度など)
- ・ 船舶搭載のビデオを用いて測定した**氷厚データ** (Toyota et al., 2004)
- ・ 衛星マイクロ波データ AMSR-E から導出した日々の**海氷漂流速度データ** (分解能 : 37.5 km)
- ・ 気象再解析データ (ERA-Interim), 主に高さ 10-m の風データ

PALSAR 画像を用いた海氷の種類判別アルゴリズム



Deformed Ice



Pancake Ice

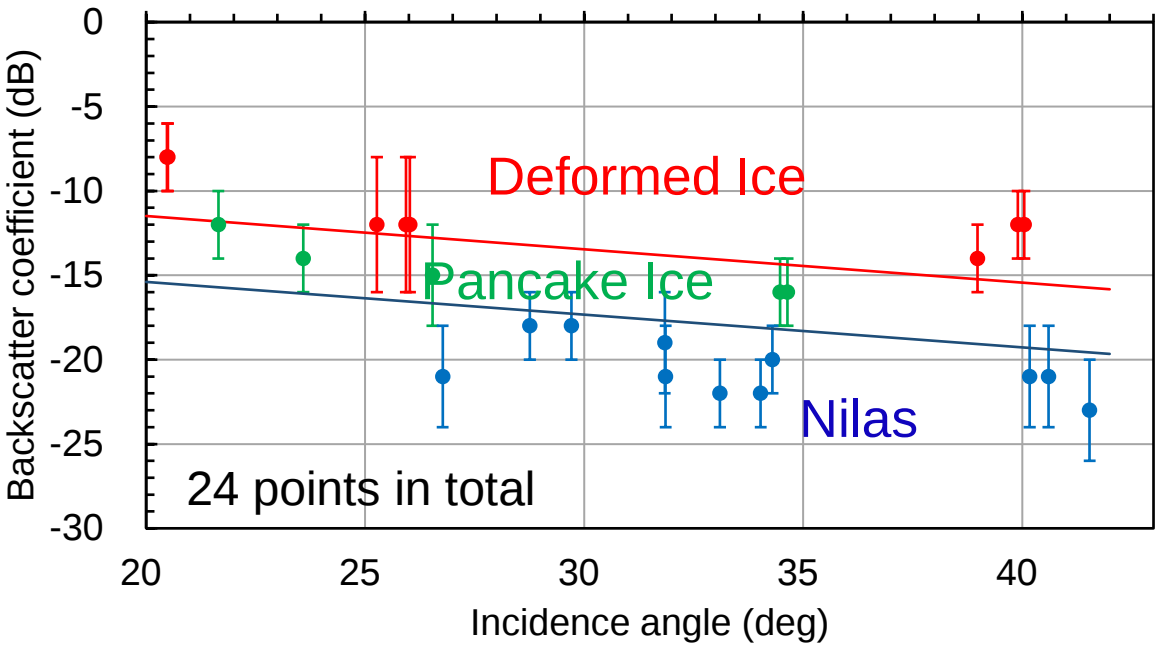


Nilas

写真に基づき、海氷は三つの種類に分類

- Deformed ice (thick rough ice)
- Pancake ice (thin rough ice)
- Nilas (thin level ice)

厚い平坦氷は少ないため



Deformed ice 下限
Pancake ice 上限
→ D-P 判別ライン

$$\sigma_{HH_pd}^0 = -0.197 \theta_i - 7.55 \text{ (dB)}$$

HH anomaly = $\sigma_{HH}^0 - \sigma_{HH_pd}^0$

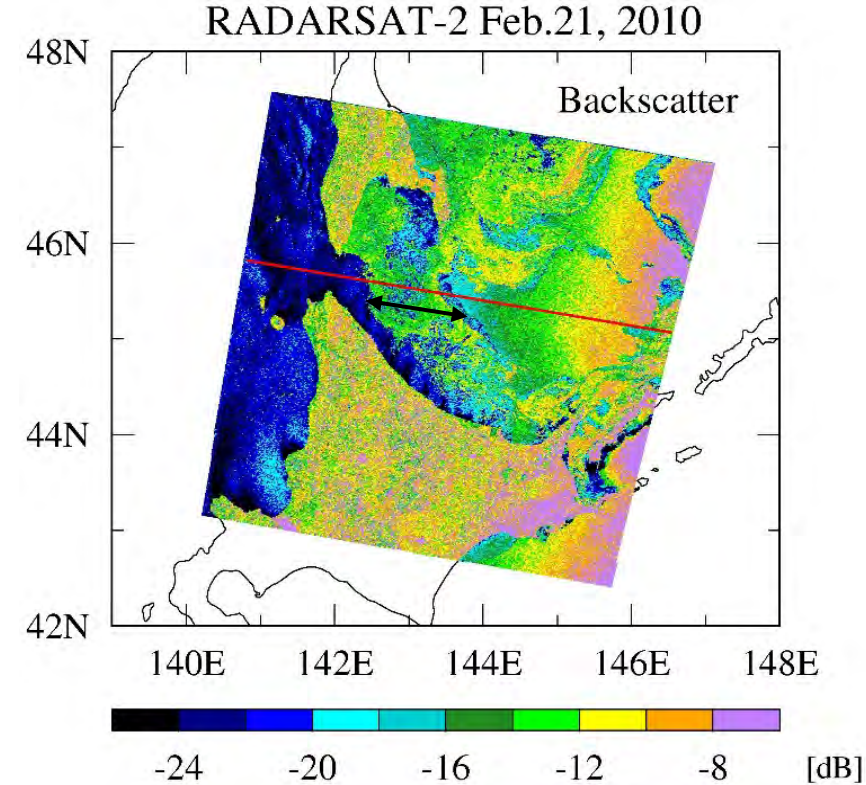
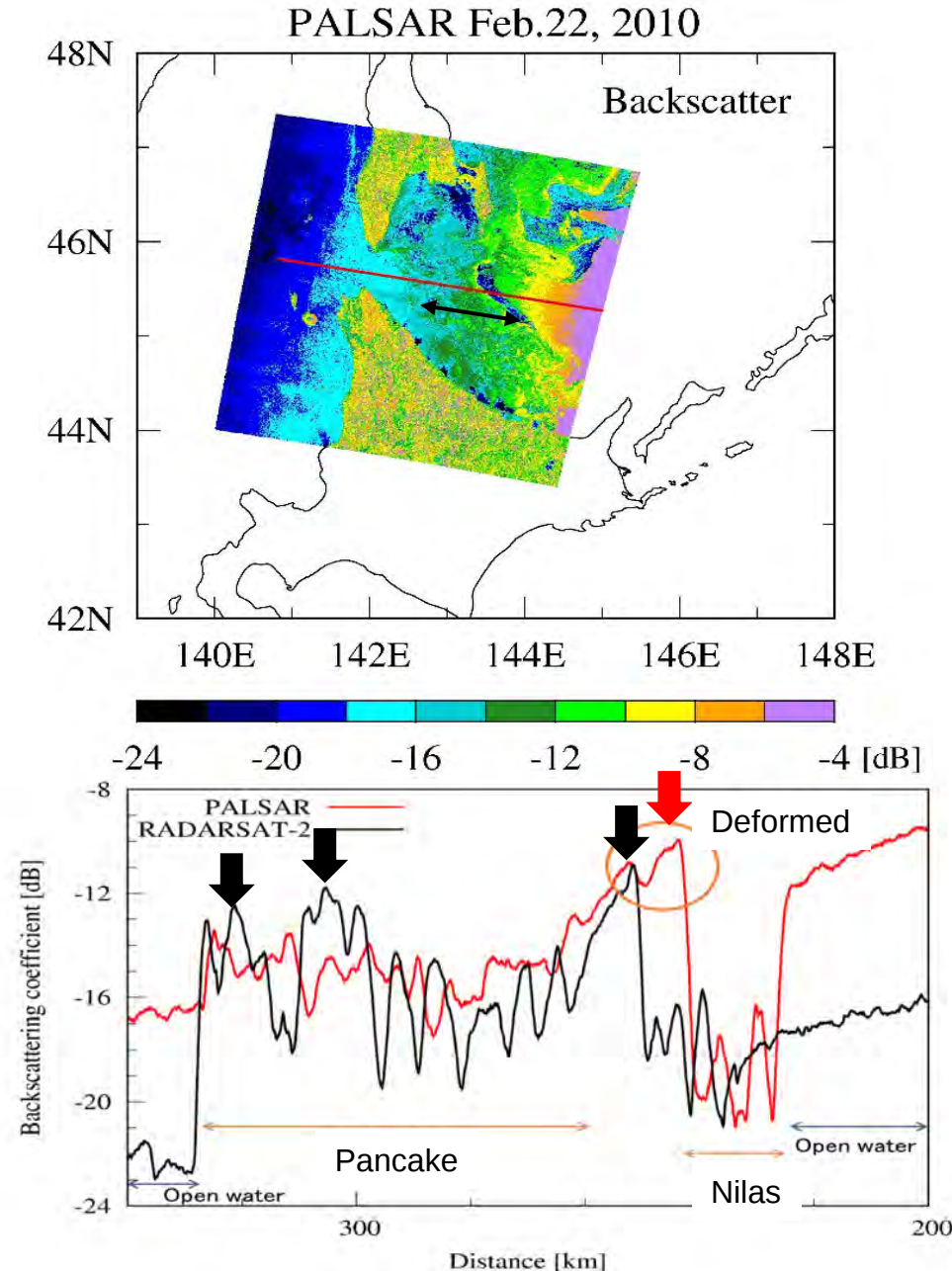
変形の度合いの指標 (?)

(cf) P-N 判別ライン

$$\sigma_{HH_np}^0 = -0.194 \theta_i - 11.51 \text{ (dB)}$$

入射角依存係数 -0.19 ~ -0.20 は過去の北極海一年氷の結果とよく合う (Mahmud et al., 2018; -0.21 dB/deg)

L- & C-band SAR の比較



・ PALSARでは変形氷が卓越する領域のピークが一つであるのに対して、RADARSAT-2.では同等のピークが複数個見られる。

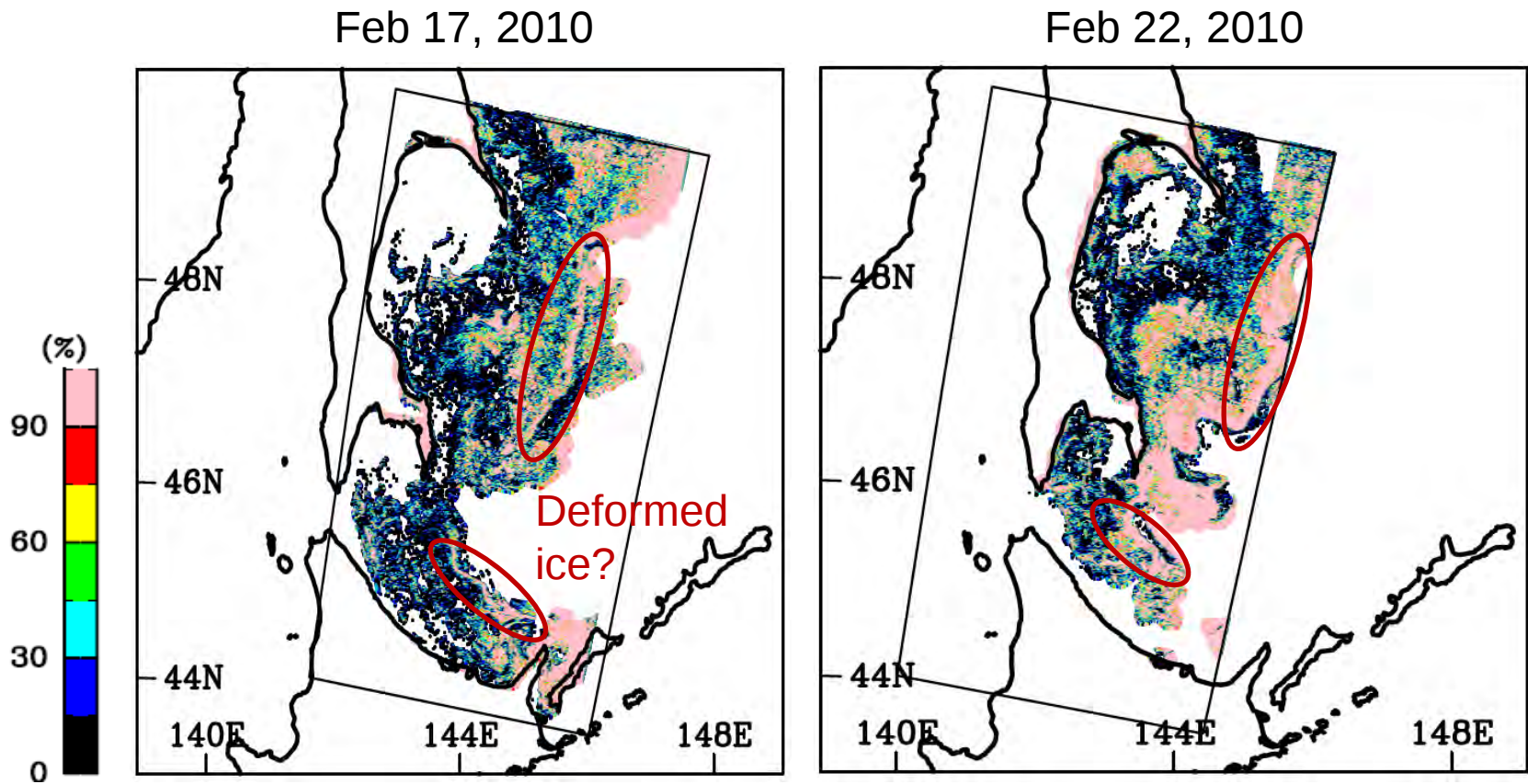
・ ニラスと変形氷の間の σ_{HH}^0 の違いは、PALSAR (~9 dB) の方が RADARSAT-2 (~6 dB) よりも大きい。



L-band SAR.の有用性を示す

変形氷の領域のマッピング

Deformed ice fraction $F_d = N_d / (9 \times 9 \text{ pixels})$



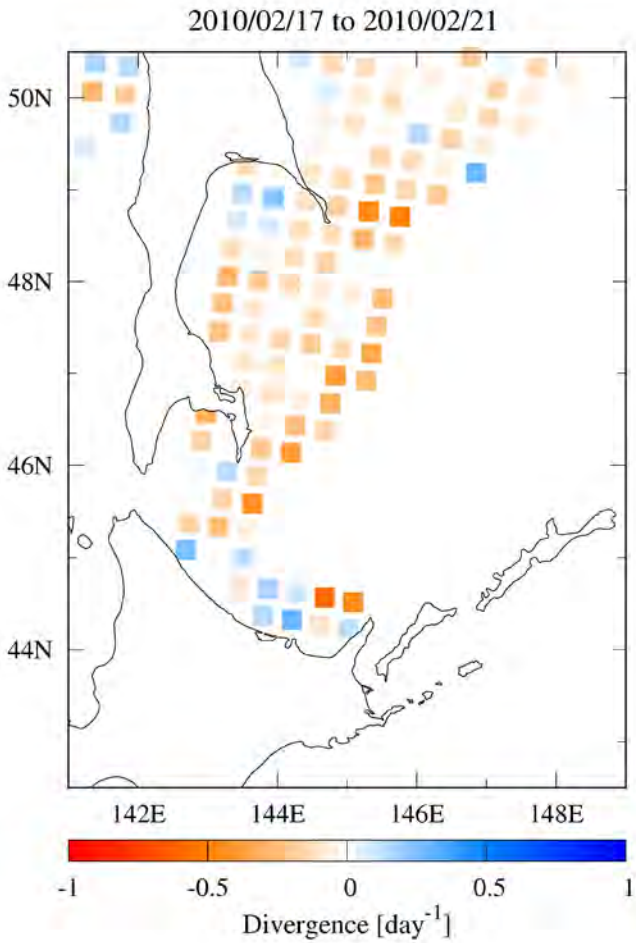
変形氷の領域が顕著に増加

変形氷の領域の増加は漂流速度の収束領域と良く合致



このアルゴリズムの有用性はある程度示された

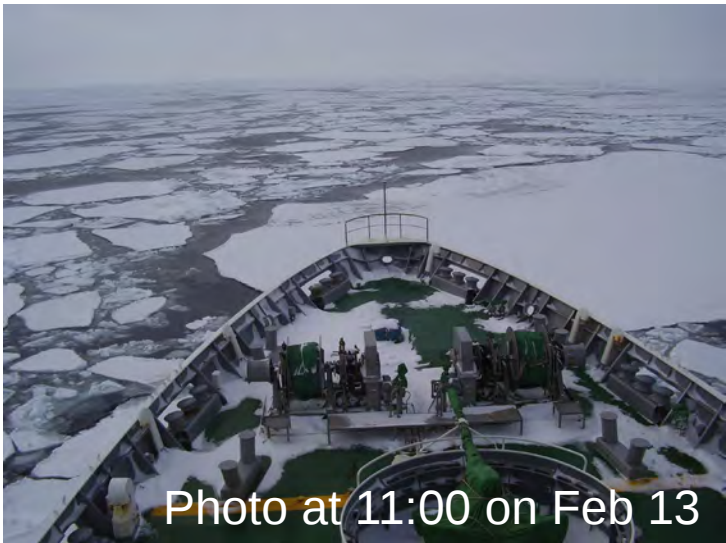
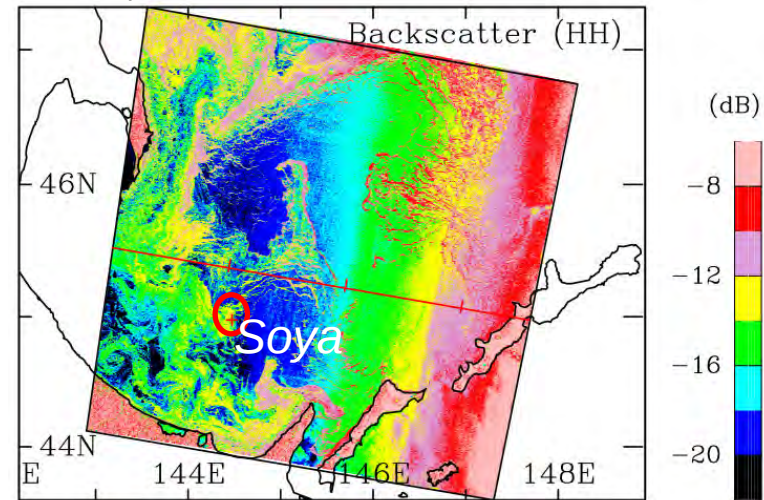
海水漂流速度の発散



ALOS-2/ PALSAR-2 画像を用いて更なる検証

海氷の実況との直接比較

Feb 13, 2017



$\sigma_{HH}^0 = -13.1 \pm 1.8 \text{ dB}$ $\theta_i = 43.4 \text{ deg}$

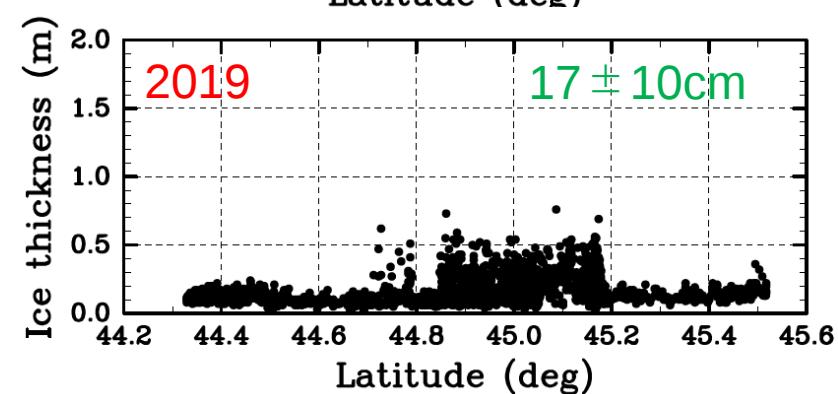
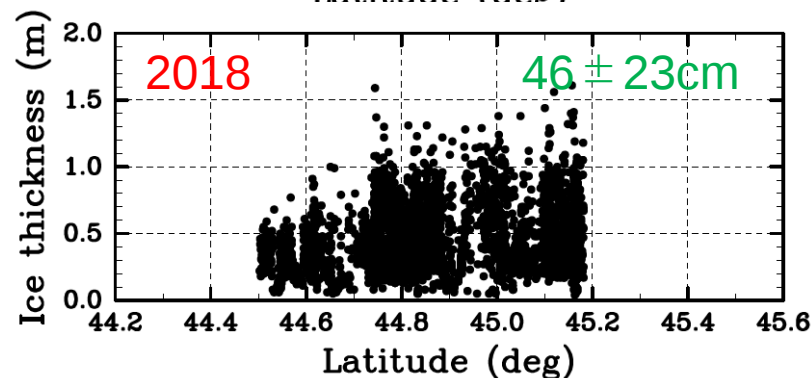
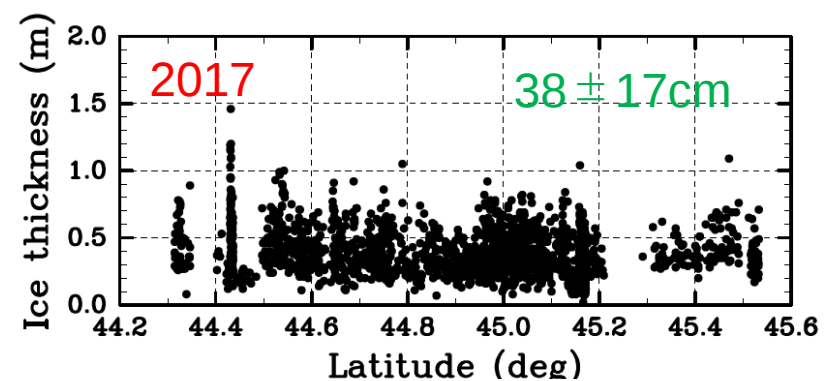
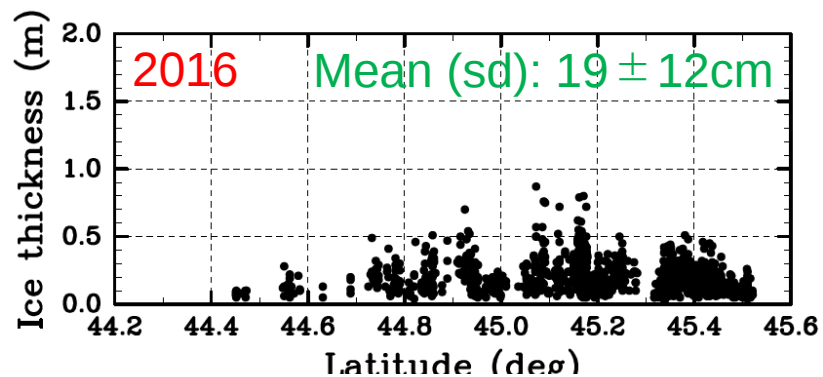
➡ Deformed ice (我々のアルゴリズム)

Date	θ_i (deg)	σ_{HH}^0 (dB)	Prediction	Reality
2016-02-10	55.7	-28.3±7.9	nilas	nilas with small flat ice floes
2016-02-11	-	-	-	open water
2017-02-13	43.4	-13.1±1.8	deformed	deformed ice with relatively small floes
2017-02-14	18.7	-12.0±7.1	pancake	large pancake ice area near shore
2018-02-12	-	-	-	open water
2018-02-13	25.8	-12.9±4.3	pancake	vast pancake ice area with swells
2019-02-07	30.7	-18.2±5.8	nilas	nilas with patches of open water area
2019-02-11	-	-	-	open water

ほぼ合致

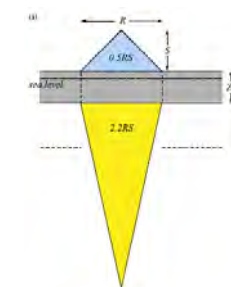
各年の氷況の比較

氷厚データ



目視観測データ (ASPeCt)

	2016	2017	2018	2019
Ridged area (%)	10	21	52	11
Ridged volume (%)	48	65	88	46
Number of obs.	33	47	35	41



Assuming
isostatic
balance

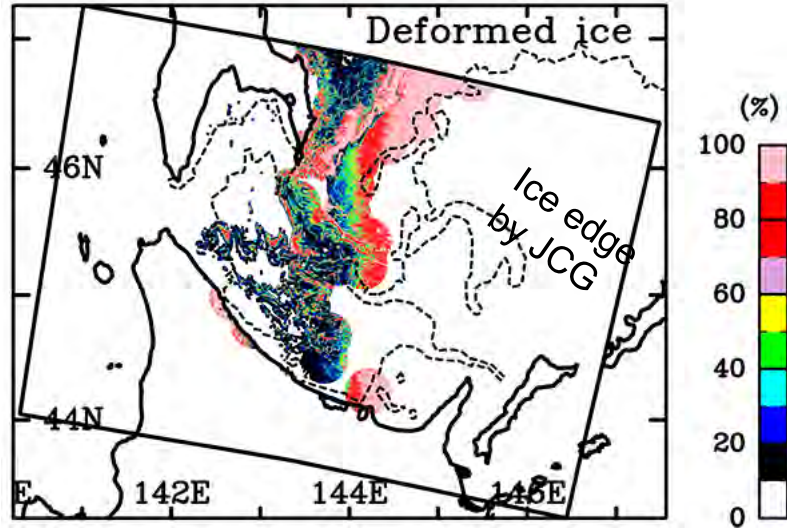
(Worby et al., 2008)

- ・ 各年で氷況は顕著に異なる
- ・ 氷厚データは表面凹凸の良い指標

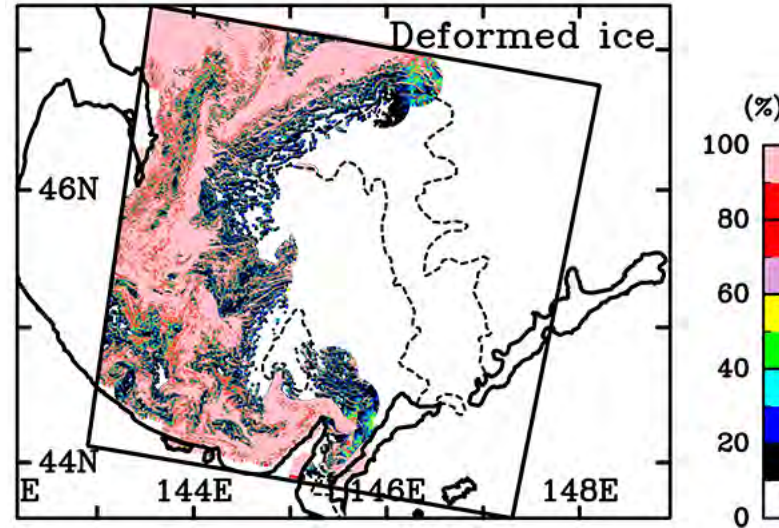
我々のアルゴリズムから導出された変形氷が卓越する領域の分布

(Deformed ice fraction のマップ)

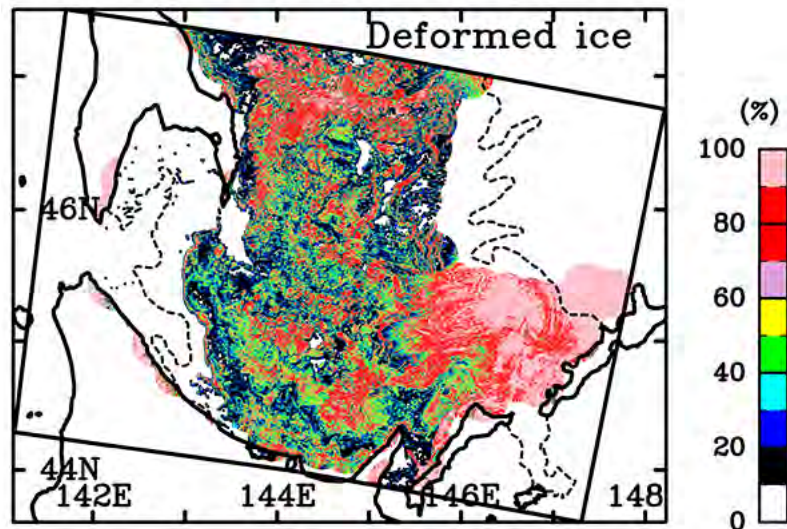
February 11, 2016



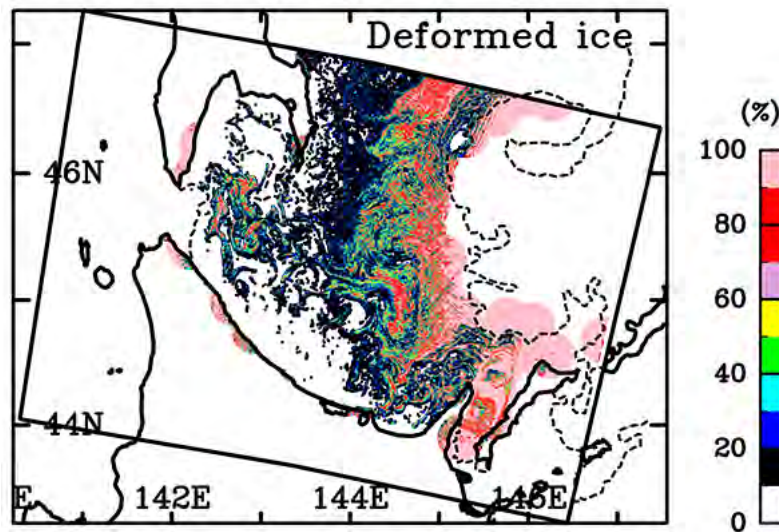
February 13, 2017



February 12, 2018



February 07, 2019



HH シグナル
2016 $\approx$ 2018 < 2017

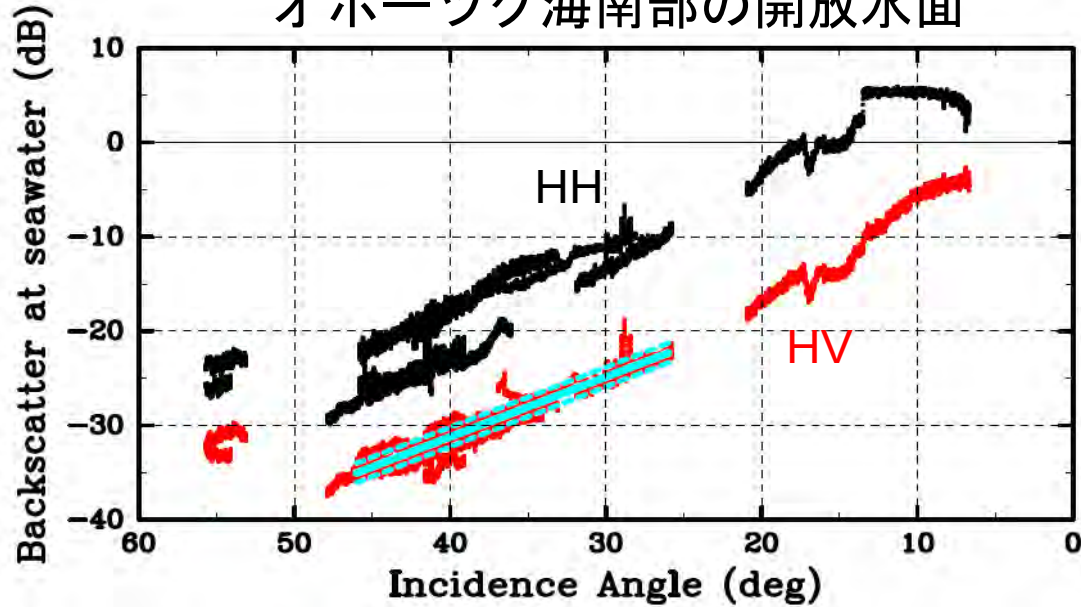
は氷厚データ (表面凹凸)

2016 $\ll$ 2017 < 2018

とは合致していない。

σ_{HV}^0 に対する平坦氷の指標

オホーツク海南部の開放水面



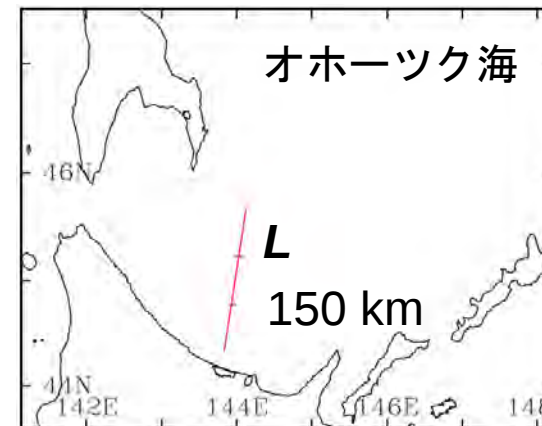
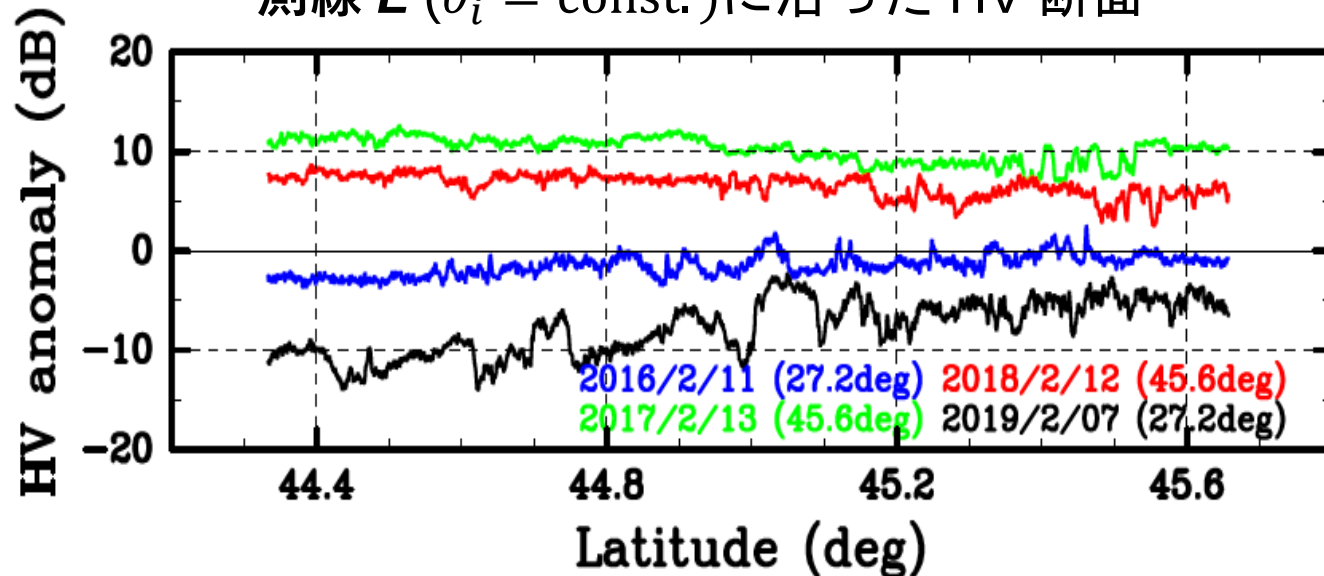
- 全体的に σ_{HV}^0 は σ_{HH}^0 よりも約 10dB 低い
- HH も HV も入射角依存性は大きい
- σ_{HV}^0 は海水面の状態に対する感度がずっと低い

回帰直線: $\sigma_{HV_ow}^0 = -0.64 \theta_i - 5.78$ (dB)

HV anomaly = $\sigma_{HV}^0 - \sigma_{HV_ow}^0$

表面凹凸の指標 (?)

測線 L ($\theta_i = \text{const.}$)に沿った HV 断面



HV シグナル
2016 < 2018 < 2017

やはり、氷厚データ
とは不一致

Discussion

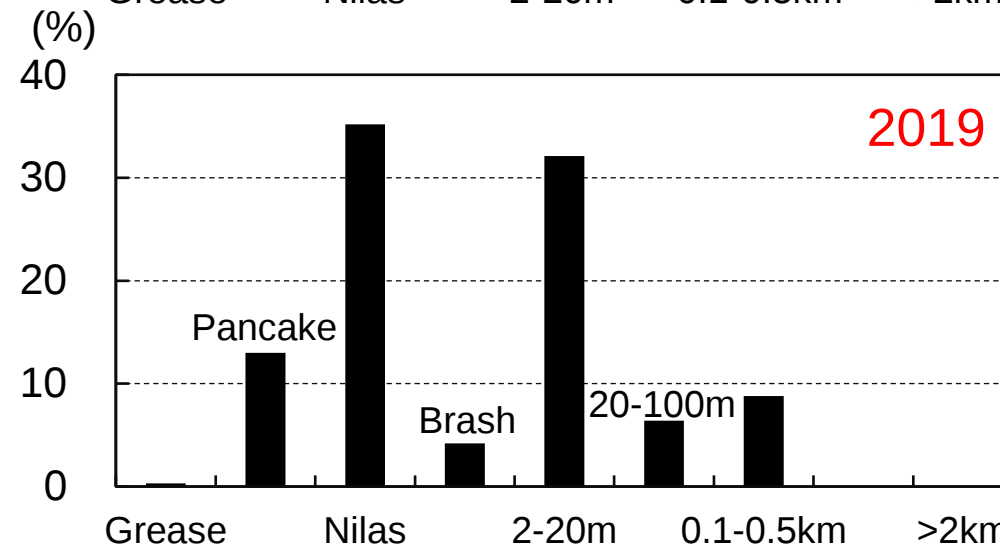
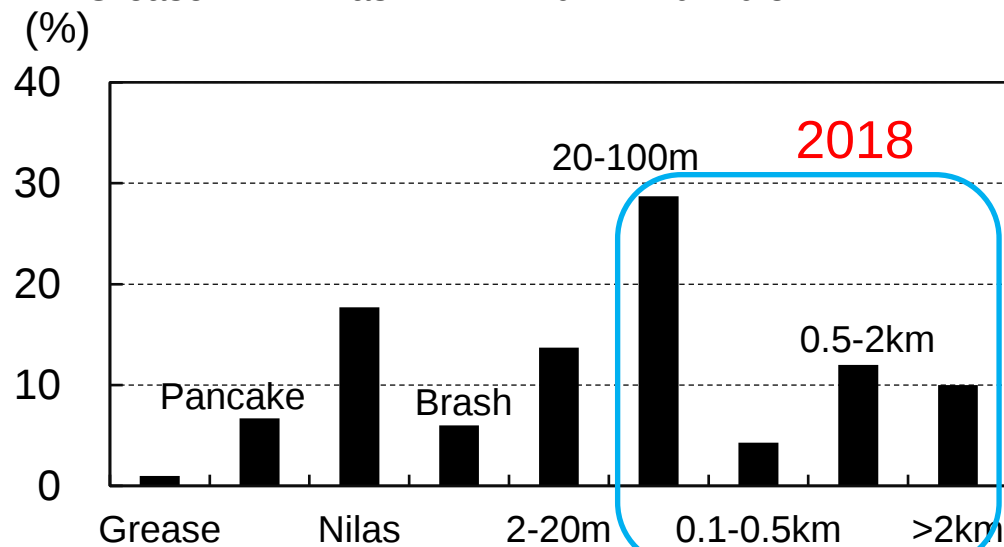
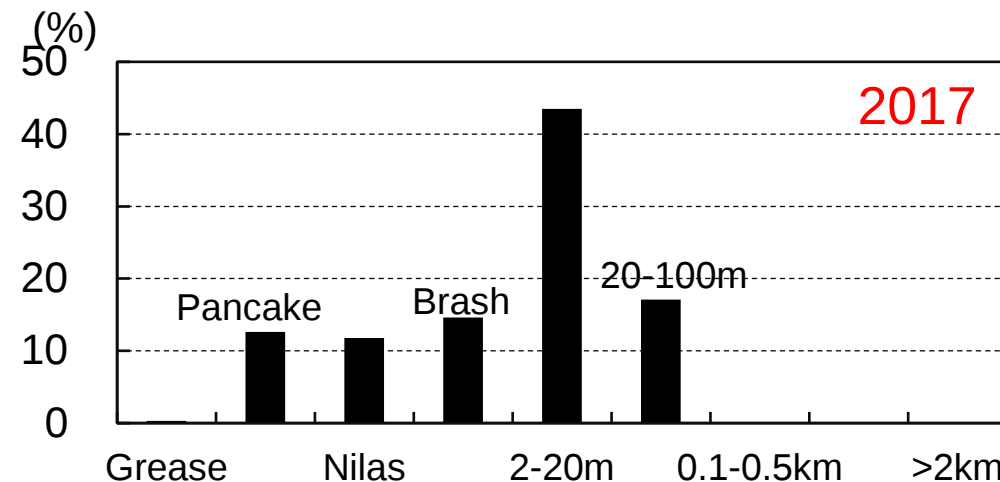
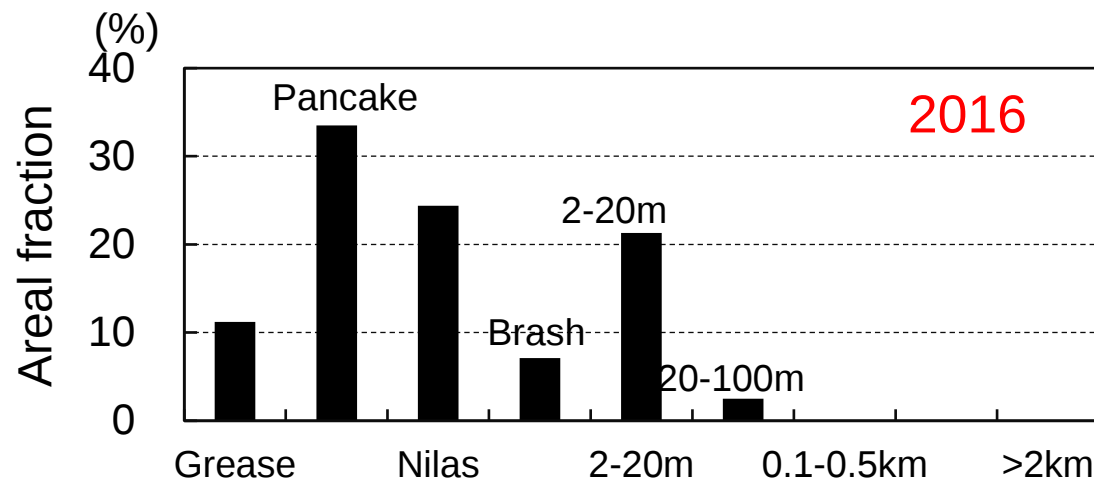
氷厚データとの不一致をもたらした要因は何か？
～氷盤の大きさ分布の影響の可能性～

観測領域の中心付近における航空写真

(撮影協力：海上保安庁)



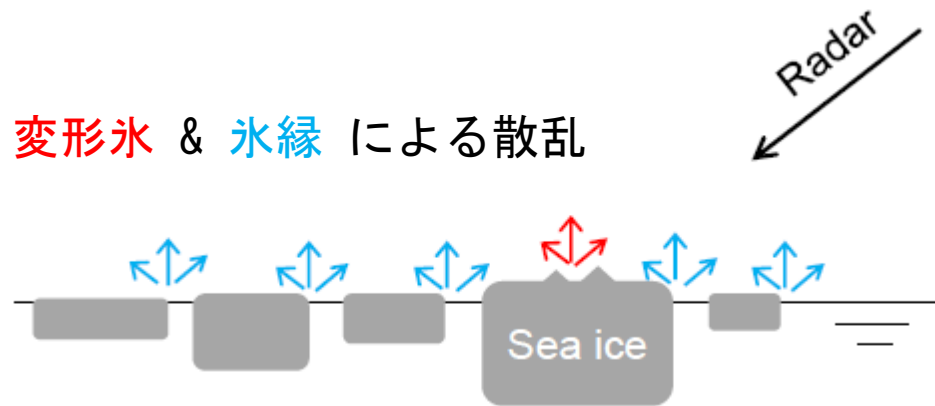
氷盤の大きさ分布の統計



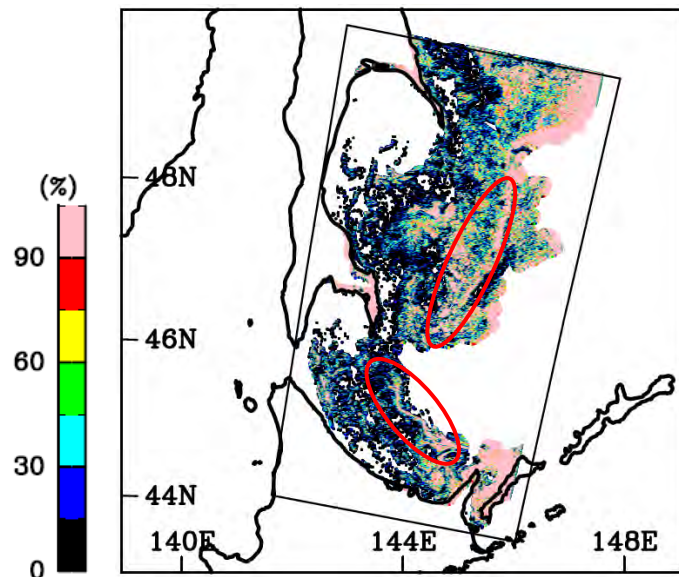
氷盤の全周囲長の比 2016 2017 2018 2019
1.95 : 1.00 : 0.50 : 0.85

氷盤の大きさ分布がどのようにレーダーシグナルに影響を及ぼすか？

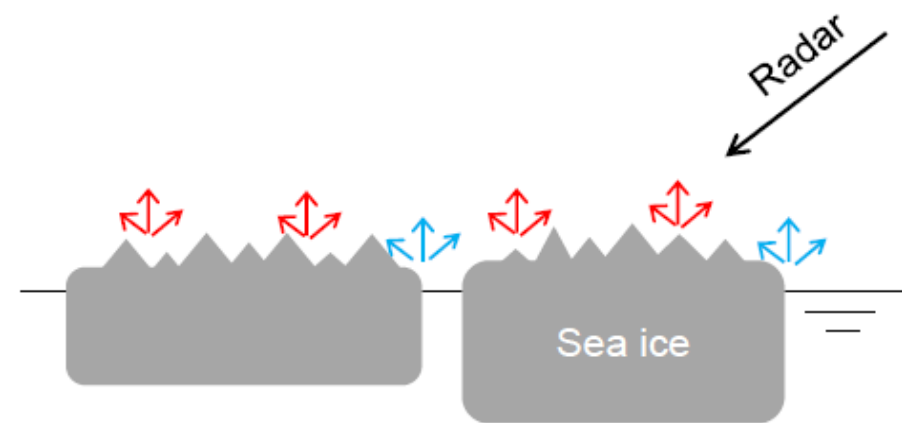
変形氷が少なく氷盤が小さい場合 (2016)



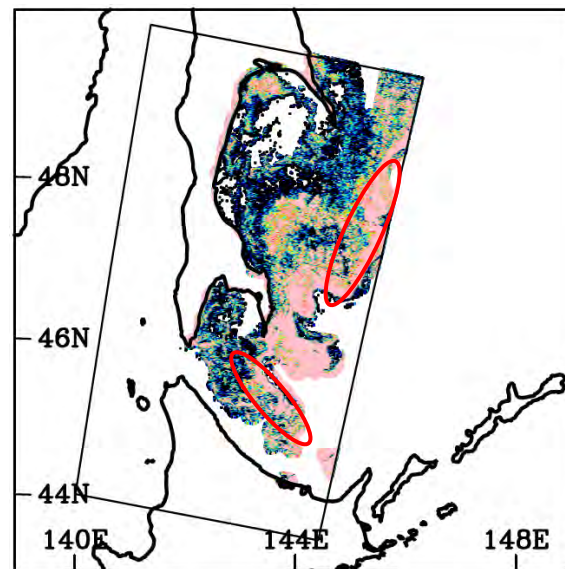
Feb 17, 2010



変形氷が大きくて氷盤が大きい場合 (2018)



Feb 22, 2010



- * このことが氷縁域で σ_{HH}^0 が高い値を取ることを良く説明する。
- * 表面の凹凸だけでなく氷盤の大きさ分布にも留意する必要あり。
- * 全周囲長が 1/4 倍
～ 表面凹凸が 2 倍
→ σ_{HH}^0 は 4-6 dB 増加

氷盤の大きさ分布が SAR に及ぼす影響を示す実例

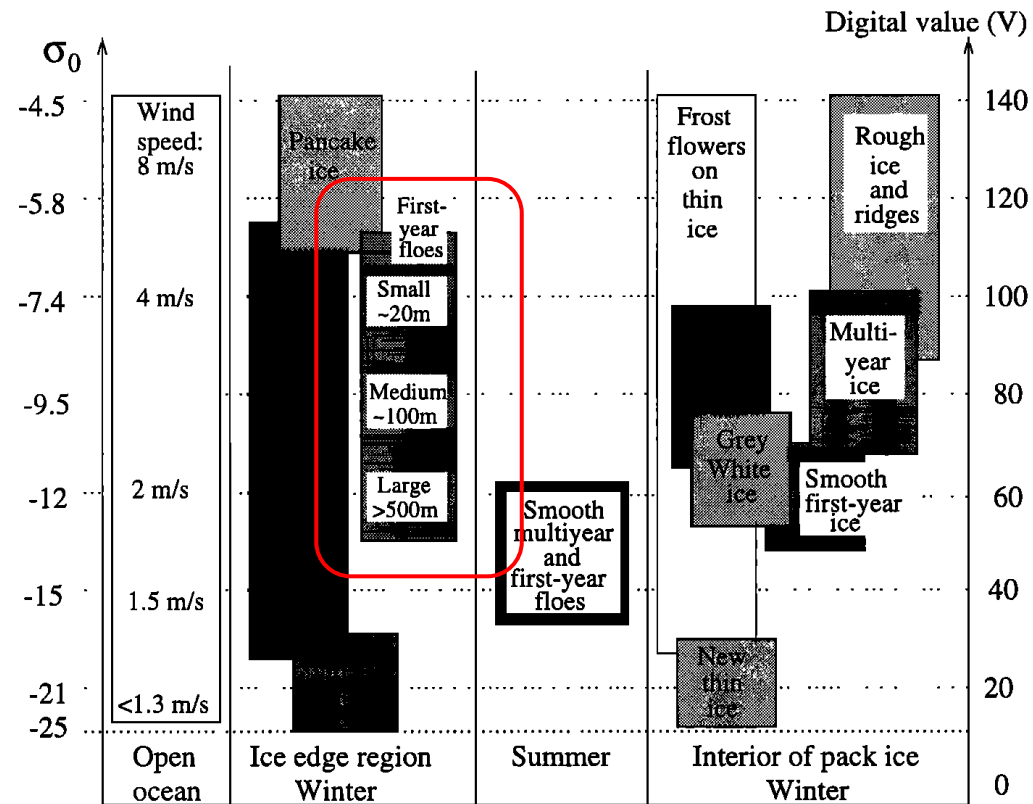


Figure 11. Schematic diagram summarizing SAR backscatter for different ice types studied in SIZEX9 previous experiments. The σ_0 values are based on the empirical relationship: $\sigma_0 = 20 \log V - 46.9$, assuming that $V = 14$ corresponds to a noise floor of -24 dB. V is the digital value of the image data received from Tromsø Satellite Station.

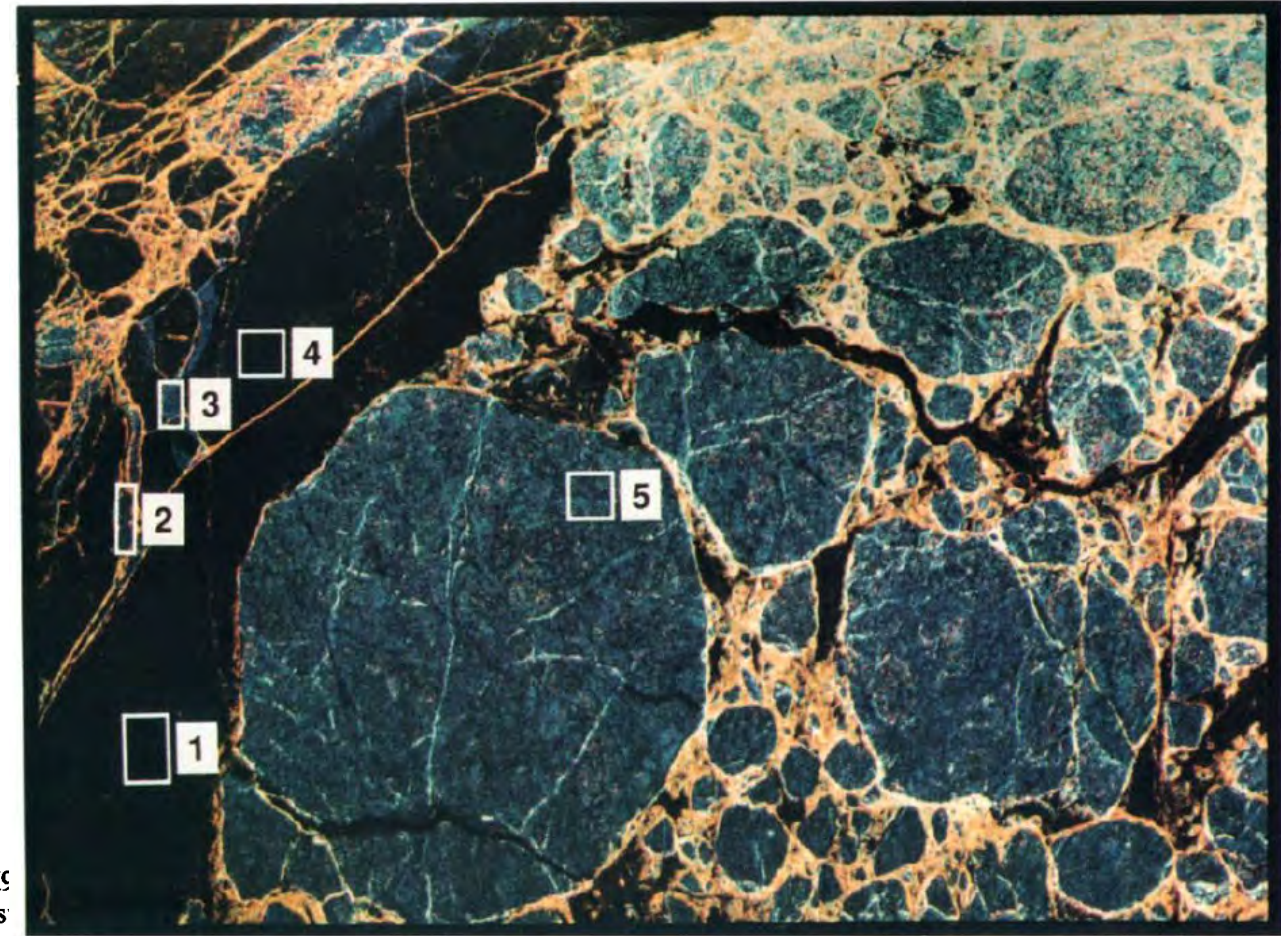


Plate 2. Scene 183: Beaufort Sea three-frequency power image acquired on March 11, 1988, at 73°48.9'N, 141°2.7'W at 1726:39 UT (i.e., 0826:39 LT).

Sandven et al. (1999)

Drinkwater et al. (1991)

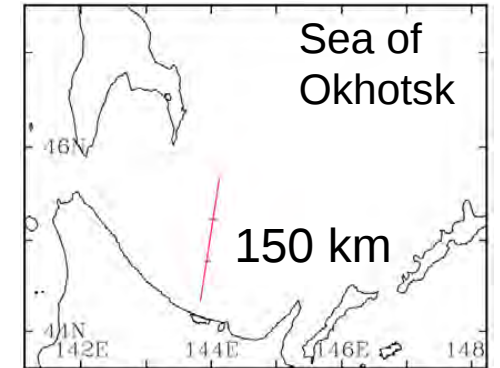
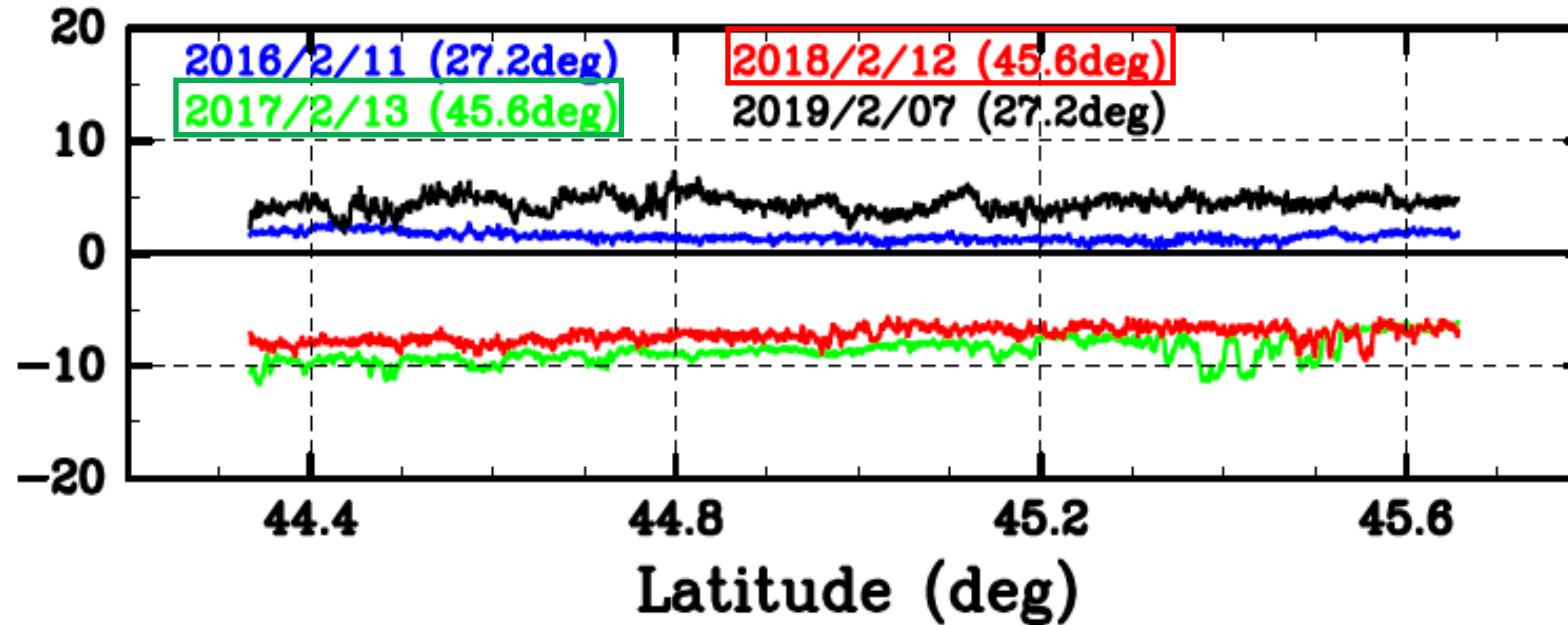
変形氷と氷盤の大きさの効果の相対的な重要性

HH-HV anomaly (dB)

新しい変数の導入：

$$\Delta = (\text{HH anomaly}) - (\text{HV anomaly})$$

右辺各項ともに ridges (**R**) と floe size (**F**)の効果の和



$$R_{HH}^{2018} + F_{HH}^{2018} - R_{HV}^{2018} - F_{HV}^{2018} > R_{HH}^{2017} + F_{HH}^{2017} - R_{HV}^{2017} - F_{HV}^{2017}$$

$$\Rightarrow \Delta R_{HH}^{2018-2017} - \Delta F_{HH}^{2017-2018} > \Delta R_{HV}^{2018-2017} - \Delta F_{HV}^{2017-2018}$$

- ・ 2018年の **R** による増加と2017年の **F** による増加の効果の差は $\sigma_{HH}^0 > \sigma_{HV}^0$ by a few dB
- ・ **F** の観点から言えば、 σ_{HV}^0 は σ_{HH}^0 よりも数dB 氷盤の大きさの効果に対する感度が高い。

4. まとめ、今後の課題

1. 現場観測データに基づき、PALSAR (L-band SAR) から変形氷を抽出するアルゴリズムを開発した。
2. このアルゴリズムから推定された変形氷の分布状況は海水漂流速度分布とほぼ整合的であった。

アルゴリズムの妥当性を確認するため、PALSAR-2 画像を用いてさらに現場検証観測を実施。

3. アルゴリズムの妥当性は入射角 $19 \leq \theta_i \leq 56$ deg に対して現場の氷況との比較からある程度確かめられた。
4. 一方、 σ_{HH}^0 と σ_{HV}^0 はともに変形氷のみならず氷盤の大きさ分布にも有意に影響されることが判明した。
大まかに見積もって、氷盤の全周囲長が 1/4 倍（氷盤の大きさが 1/4）になれば σ_{HH}^0 は 4-6 dB 増加。
5. 氷盤の大きさ分布の相対的な寄与は σ_{HV}^0 のほうが σ_{HH}^0 よりも数 dB 高い。

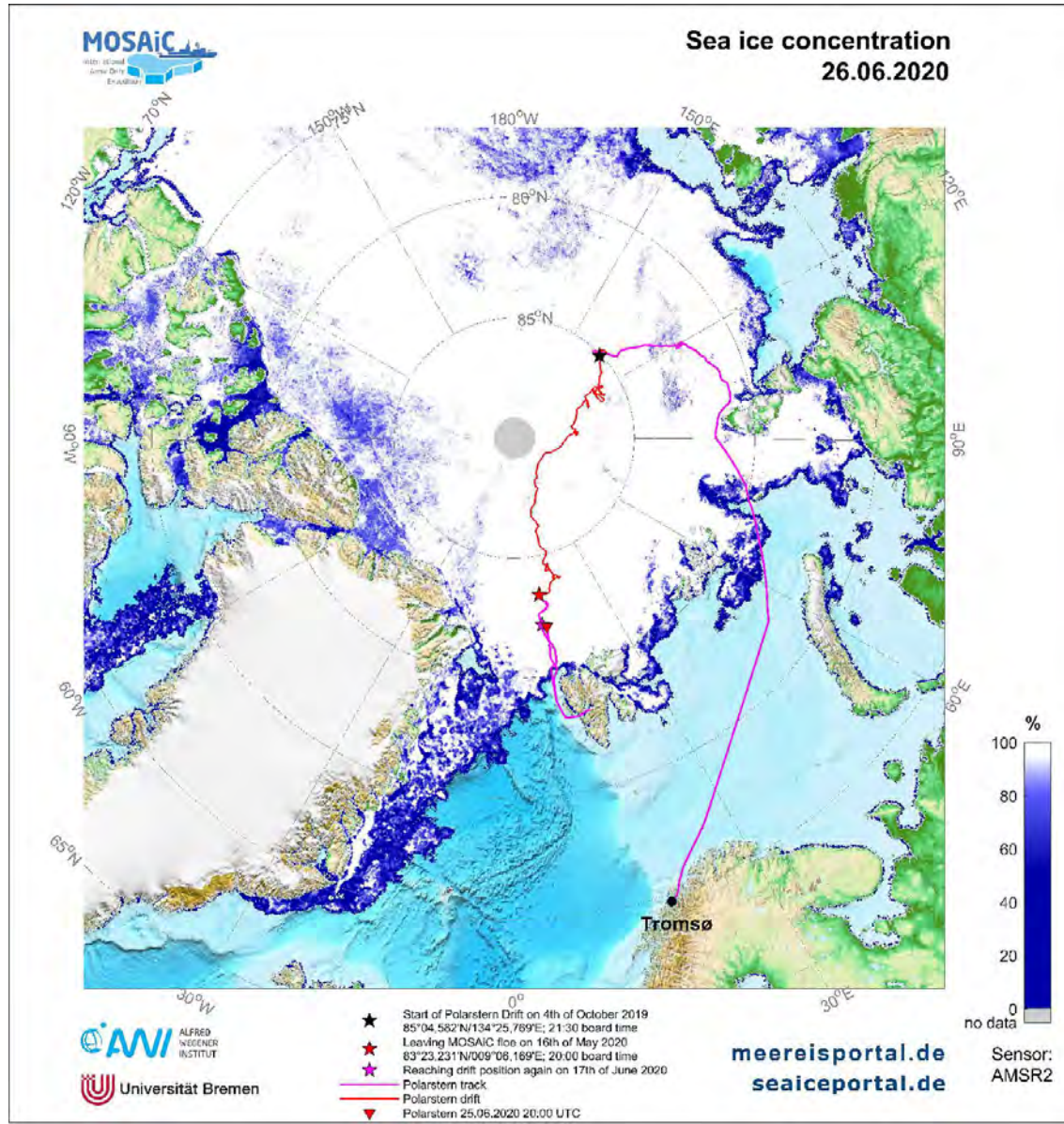
Acknowledgments:

Observations in the Sea of Okhotsk were conducted in collaboration with Japan Coast Guard, PV “Soya”, and many colleagues. ALOS/PALSAR and ALOS-2/ PALSAR-2 images were provided by JAXA through the ALOS Research Project (PI: No.573) and the 2nd Research Project on the Earth Observations (PI: ER2A4N012). RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, DETTWEILER and ASSOCIATES LTD. (2011) – All Rights reserved.

～北極海への応用～

Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate

September 2019 – October 2020



一年間を通して北極海に滞在して特定の氷盤に漂泊して氷盤とともに漂流しながら観測。

目的：

北極域の海氷、天候、気候、生物地球化学過程に関する数値モデルの精度向上

- 20 September 2019: Depart Tromsø
- 6 October: Arrive at floe
85°04.582 N, 134°25.769 E
- 14 October: Distributed network completed
- 12 October 2020: Arrive at Bremerhaven

Project title:

(MOSAIC) Development of the sea ice rheology and parameterization of the sub-grid scale deformation process in the Arctic Ocean

(JAXA) Validation of the algorithm with L-band SAR data for detecting deformed sea ice area in the Arctic Ocean

Purpose: To examine the rheology for sea ice based on observational data of ice drift and surface roughness

Science questions:

How can we parameterize the sub-grid scale deformation processes in numerical models?

- * to correlate the deformation rates between a sub-grid scale and larger grid scales
- * to examine their effect on the evolution of deformed ice and ice thickness distribution

Data to be used:

- * Ice drift data: Deployed buoys & MODIS (sub-grid scales < 10km), AMSR2 (larger scales > 30km)
- * **Deformed ice mapping: Developing an algorithm with PALSAR-2 based on results for the Okhotsk Sea**
- * **Ice thickness & surface roughness: Embird**, in-situ drilling data, satellite-derived dataset
- * Floe size distribution: Aero photos taken from a helicopter

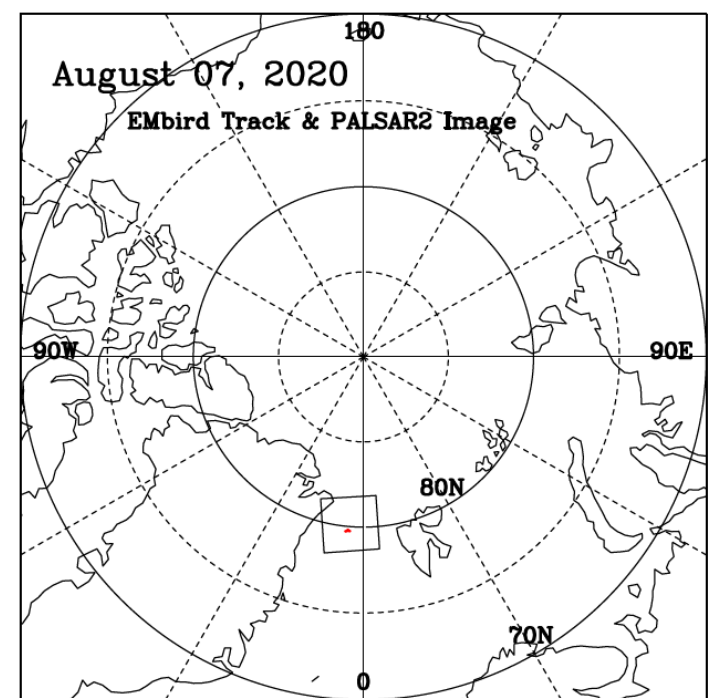
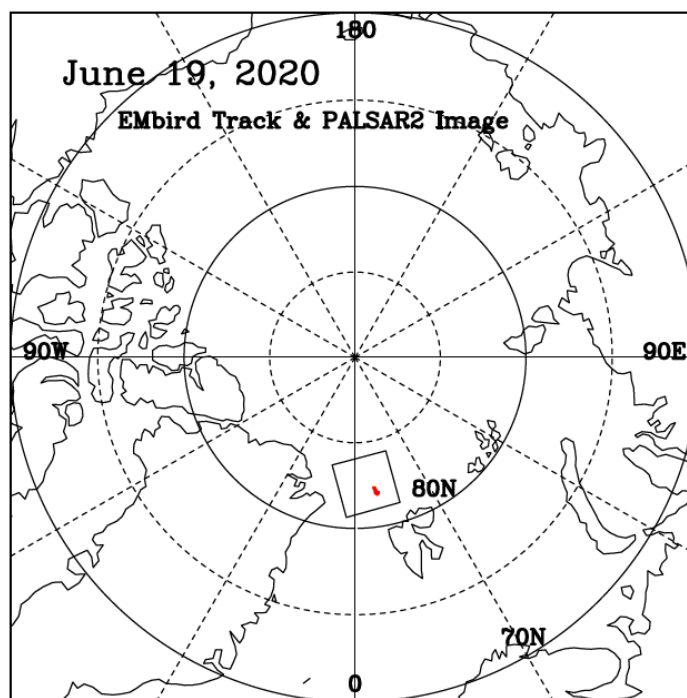
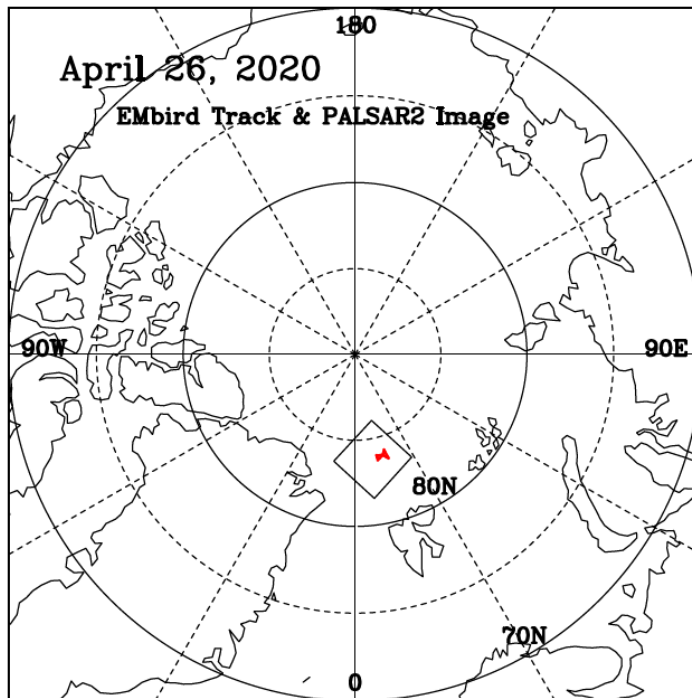
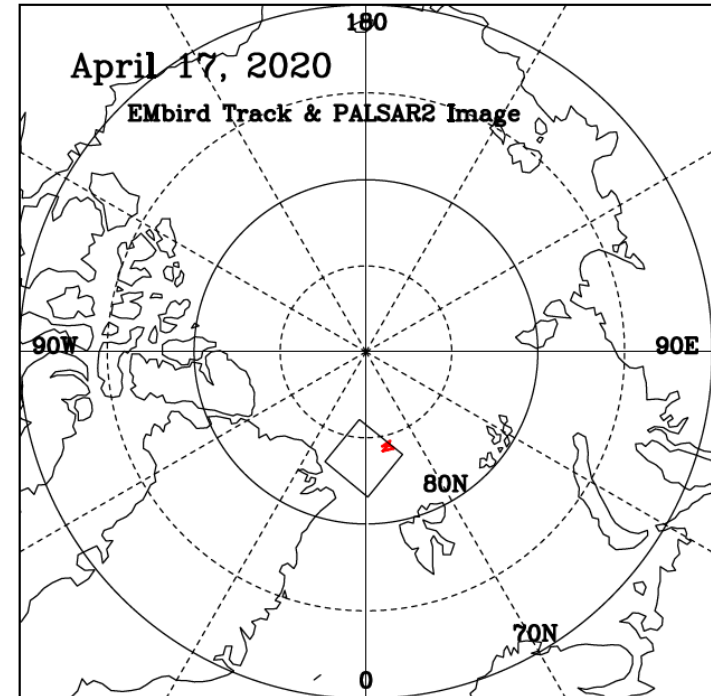
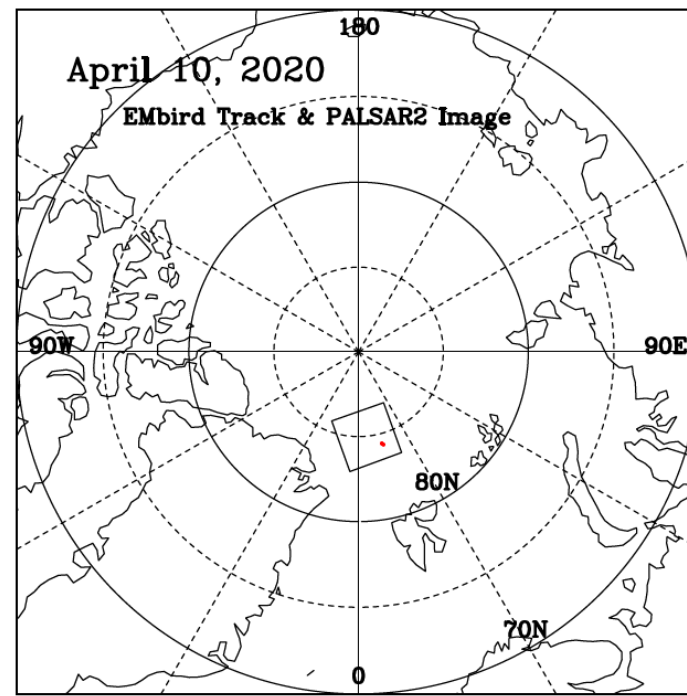
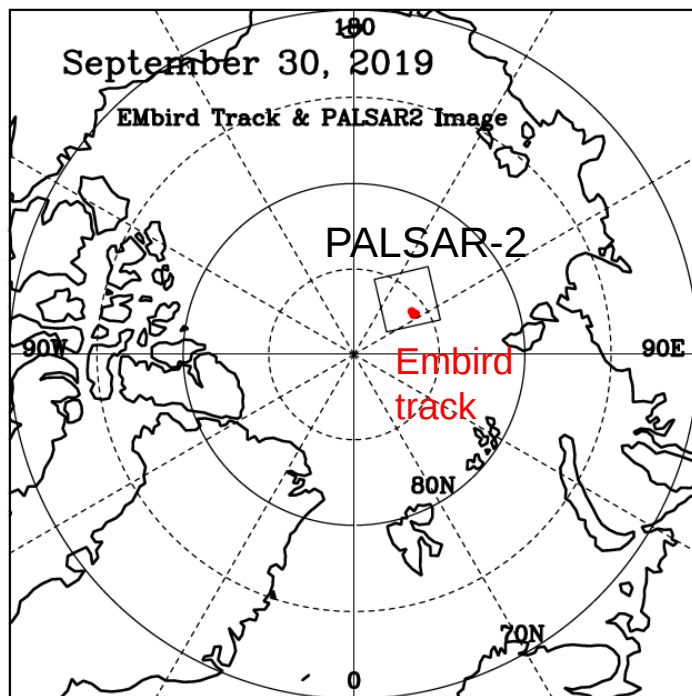
EM bird measurements until summer:

2019 **Sep 30**, Oct 13, Oct 14

PALSAR-2 obs.

2020 Apr 04, **Apr 10**, **Apr 17**, **Apr 26**, Apr 30, **Jun 19**, Jun 21, Jun 22, Jun 30, Jul 01, Jul 07, **Aug 06**, Aug 07

EM data are still under processing but will be used to develop an algorithm to estimate ice thickness from $\sigma_{HH,HV}^0$.



σ_{HH}^0 distribution of PALSAR2 at a ScanSAR mode with EM measurement line

