

# 合成開口レーダ(SAR)を用いた 海氷モニタリング技術

若林 裕之

日本大学工学部  
情報工学科

Dec. 1, 2017

空間情報話題交換会/日本写真測量学会関西支部

1

## 概要

- ☑海氷の役割・海氷観測の重要性
- ☑SARによる海氷観測
- ☑多偏波SARデータを使用した海氷観測
- ☑まとめ

2

## 自己紹介

わかばやし ひろゆき

若林 裕之

- ・ 1958 静岡県沼津市出身
- ・ 1977 北海道大学入学(工学部電子工学専攻)
- ・ 1983 宇宙開発事業団 (NASDA > 現JAXA)入社
- ・ 1986- NASDA/地球観測センター：宇宙(人工衛星)から地球を観る
  - ・ 地球観測センター
  - ・ 地球観測衛星開発(だいち設計)
  - ・ 地球観測研究センター
- ・ 1991-1992 アメリカ アラスカ大学へ留学：雪氷関係研究開始
- ・ 宇宙+雪氷>>人工衛星から地上の海氷を観測>>海氷の厚さを推定
- ・ 2001-2003 第43次南極地域観測隊員として南極昭和基地に滞在
- ・ 2006-現在 日本大学工学部 情報工学科 教授
- ★ マイクロ波リモートセンシングを使用した雪氷分野の環境動態解析を専門

3

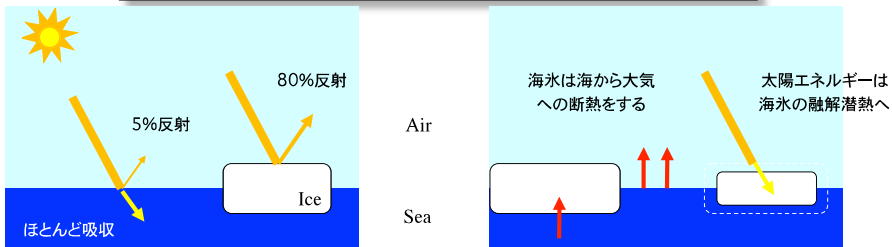
## 海氷の役割・海氷観測 の重要性

4

## 海水の役割 (海水観測の重要性)

- 太陽光の反射板
  - > 雪氷の高いアルベドにより太陽光をほとんど反射
- 海水/大気の断熱材
  - > 海水から大気への断熱と海水の融解潜熱としての消費により海水温の上昇を抑制

海水は局所的のみならずグローバルな環境変動に影響する



海水のアルベド効果

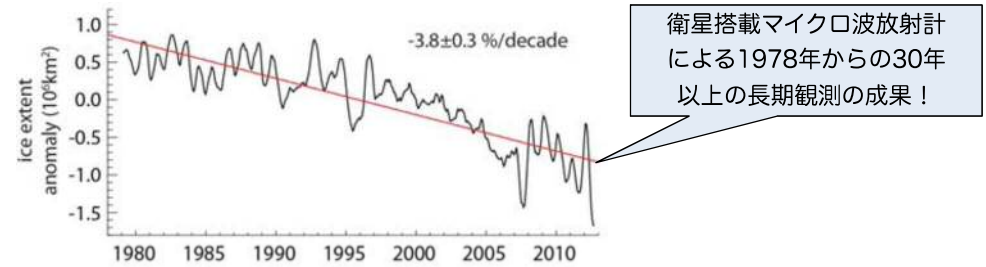
海水の断熱効果

船舶航行への影響  
海水の有無  
海水の厚さ

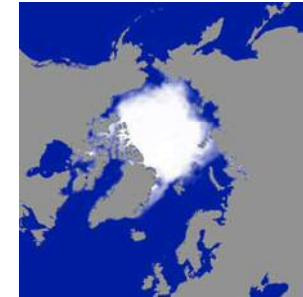
- ・リモートセンシングにより海水面積および体積を把握
- ・全天候かつ高分解能に

SARによる観測に期待

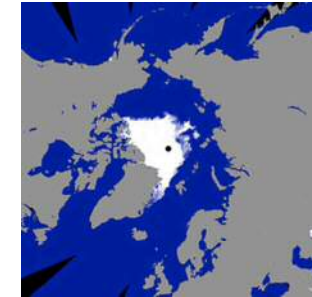
## 北極海の海水の減少傾向



(IPCC第5次報告書で地球温暖化を断定する根拠の1つ)



1980年代8月



2012年9月16日

## 海水の種類

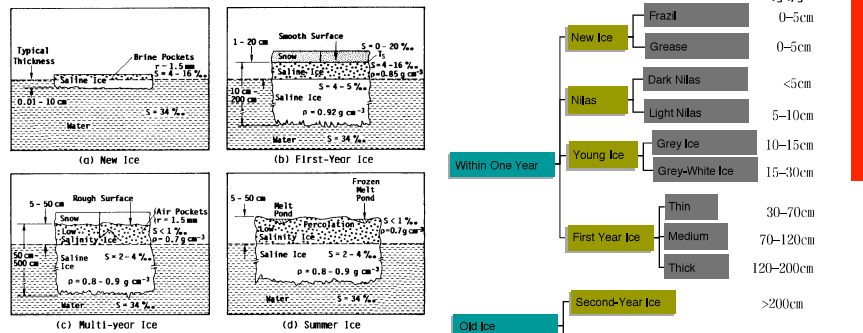


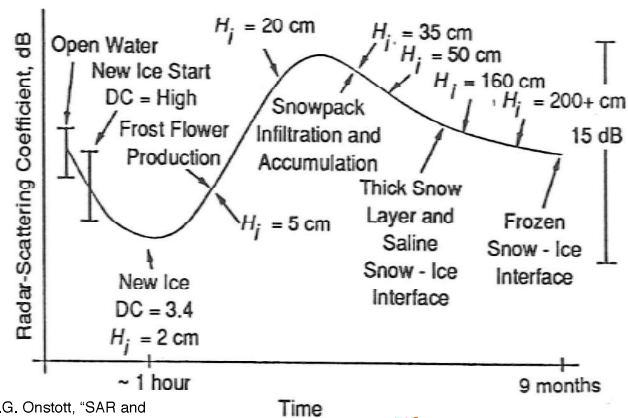
Fig. 20.48 Schematic representation of some principal ice types (from Zwally, et al., 1983). ← Microwave Remote Sensing, Vol. 111 (Ulaby et al., 1986)



SARデータによる  
海水観測

# 一年氷の後方散乱変化について

## 海水からの後方散乱係数の変化



- (1) OW → New Ice  
• 誘電率低下  
• ラフネス減少
- (2) New Ice → Nilas, Young ice  
• ラフネス増加  
• 誘電率増加(ブライン生成)
- (3) First Year Ice  
• 誘電率減少(ブライン排出)

R.G. Onstott, "SAR and scatterometer signatures of sea ice," in Microwave Remote Sensing of Sea Ice (Geophysical Monograph 68), F.D. Carsey Ed. Washington D.C., American Geophysical Union, pp. 73-104, 1992.

- 海水面の後方散乱係数は海上風に依存する
- 海水面が凍結すると後方散乱係数が低下
- 海水厚20cm程度までは後方散乱係数が増加
- 海水厚20cm以上では後方散乱係数が低下

# 一年氷と多年氷の後方散乱の違い

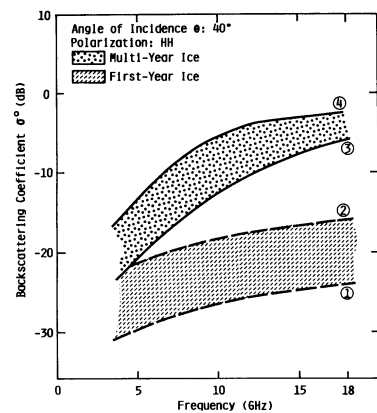


Fig. 20.63 Theoretical  $\sigma^0$  for multiyear ice and first-year ice under normal conditions (from Kim, 1984).

冬期  
1年氷: 表面散乱が支配的  
多年氷: 体積散乱増加

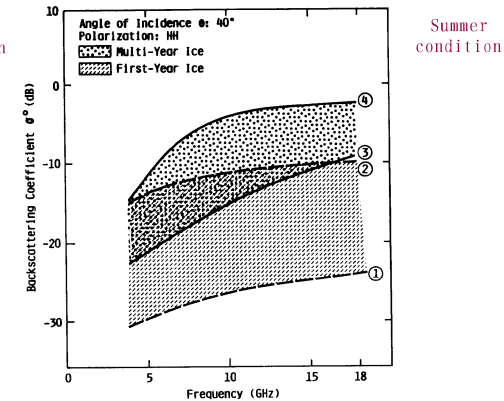


Fig. 20.64 Theoretical  $\sigma^0$  for multiyear ice and first-year ice under extreme conditions (from Kim, 1984).

← Microwave Remote Sensing Vol. 111 (Ulaby et al. 1986)

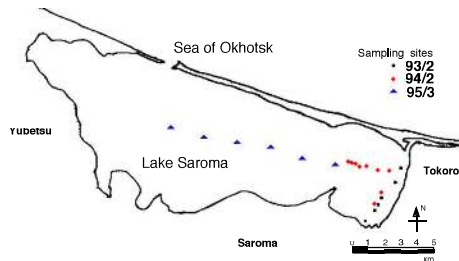
夏期  
1年氷・多年氷共に表面が融解

# サロマ湖 (国内テストサイト)



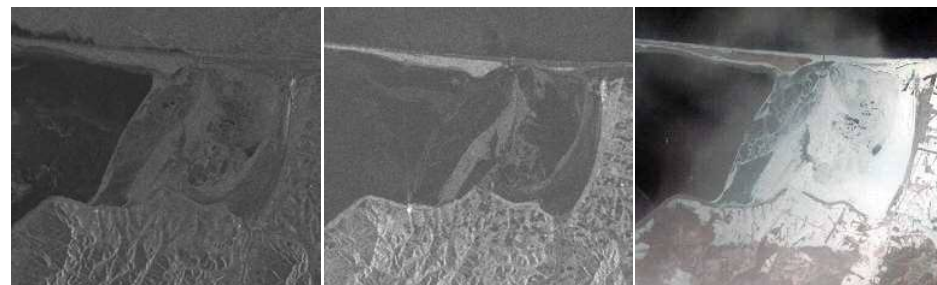
## サロマ湖 (150km<sup>2</sup>)

- 2つの水路で外洋とつながっている塩水湖
- 湖水の塩分濃度は3%以上で海水とほぼ同じ
- 冬期間湖水は結氷し、氷の厚さは50cmに達する
- 湖水の層構造は海氷と似ている(薄い1年氷)
- 湖水は安定していてデータ取得が可能



# 冬季サロマ湖の衛星画像例

1993年2月の例



ERS-1 (1993/02/18)

CバンドSAR

JERS-1 (1993/02/19)

LバンドSAR

SPOT (1993/02/19)

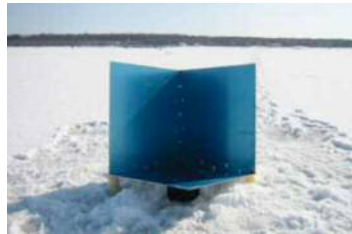
False color image

光学センサ

# グラントゥールスデータ(地上観測データ)取得

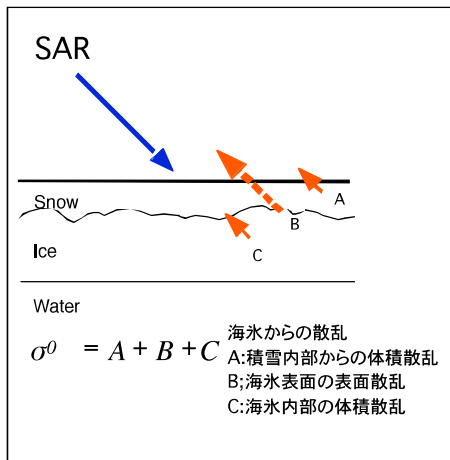
## 観測項目

- ・気温
- ・積雪
  - ▶積雪深
  - ▶温度プロファイル
  - ▶粒径
  - ▶塩分濃度
- ・氷
  - ▶氷厚
  - ▶温度プロファイル
  - ▶塩分濃度プロファイル
  - ▶ラフネス
- ・水
  - ▶水温
  - ▶塩分濃度
- ・校正用コーナリフレクタ設置
  - ▶70cm:2基
  - ▶50cm:2基



13

# SARで海氷を見る



$$B=f(\text{Rough}, DC)$$

## 海氷表面の粗さ

海氷の成長に伴い表面の粗さが変化  
 粗いほど散乱強度大

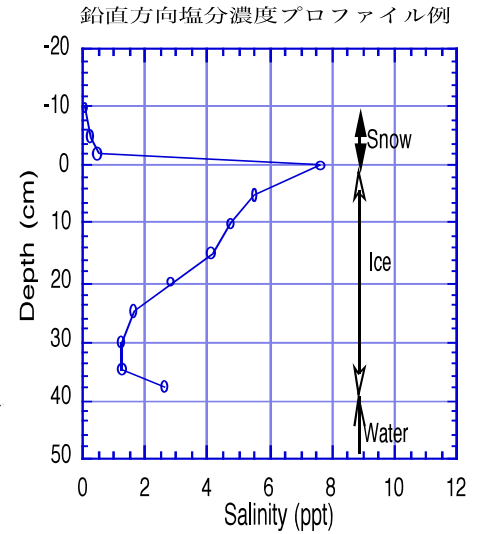
## 海氷の塩分濃度

海氷の成長に伴い塩分濃度低下  
 塩分濃度と誘電率の関係

塩分濃度減少=>誘電率低下=>散乱強度低下

15

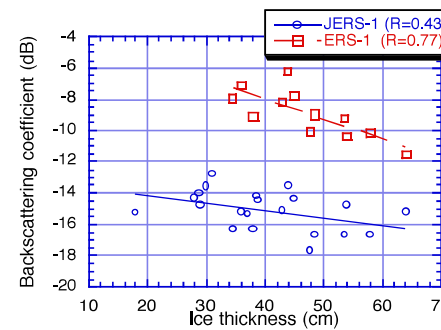
# 氷の層構造



サラマ湖上氷の物理的な性質(塩分濃度や層構造)は北極海の一年氷とほぼ同じ

14

# JERS-1とERS-1データを使用した解析



Relation between ice thickness and backscatter for both JERS-1 and ERS-1

## 後方散乱メカニズム

- 積雪の後方散乱への寄与は小さい
- 氷の中の損失が大きい
- 氷の表面からの散乱が支配的

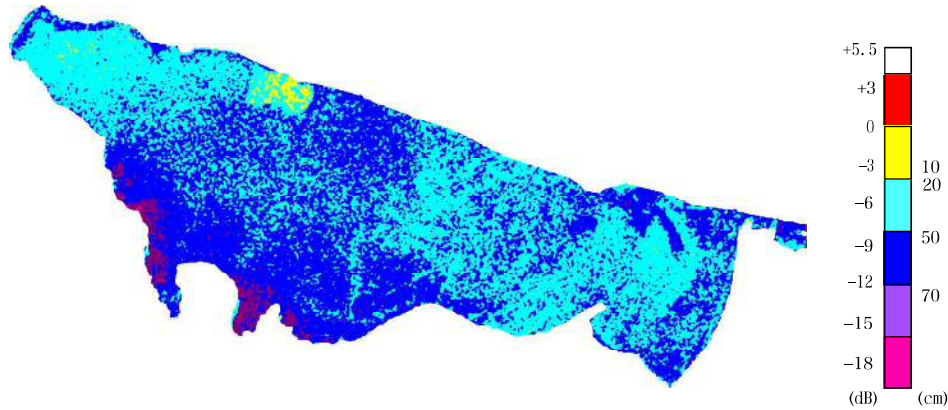
氷表面の誘電率とラフネスの後方散乱への寄与が大きい

Ice thickness	Thin	<-->	Thick
Ice surface temperature	High	<-->	Low
Brine volume	High	<-->	Low
Dielectric constant	High	<-->	Low
Backscattering coefficient	High	<-->	Low

H. Wakabayashi and F. Nishio: A study of ice on lake Saroma using SAR data, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 59(145)-66(152) (1996)

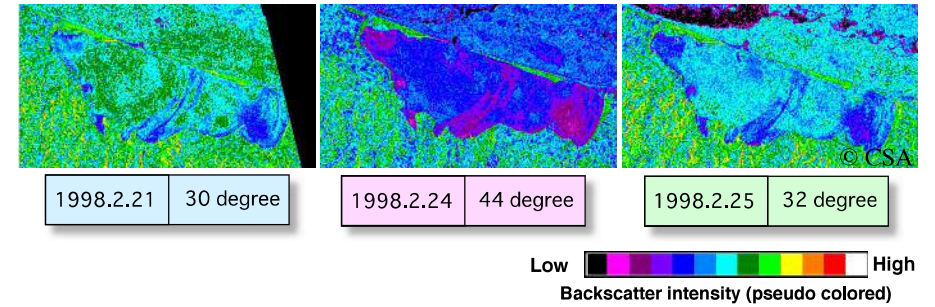
16

## 後方散乱係数から求めた氷厚分布図



17

## RADARSAT 多入射角データ



### ■ 後方散乱係数の入射角特性を使用した海氷パラメータ推定

- 入射角特性 (高入射角と低入射角の後方散乱差) -> 海氷表面の相関長推定
- 推定された相関長 -> RMS高さと氷厚のモデル計算(LUT作成)
- 後方散乱係数 -> LUTによるRMS高さと氷厚の同時推定

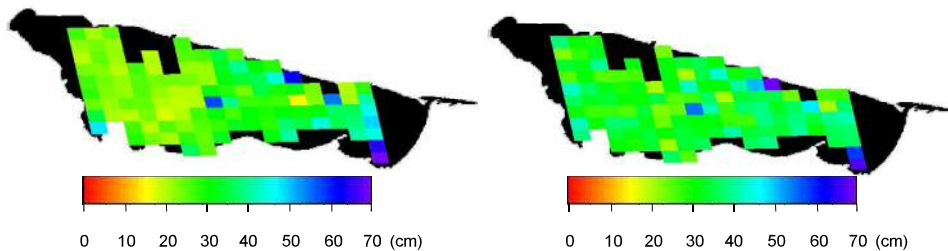
中村和樹, 若林裕之, 西尾文彦, 浦塚清峰 : 多入射角SARデータによるサロマ湖氷のラフネスと氷厚の推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 22, No. 4, 405-422 (2002.12)

18

## 後方散乱入射角特性を使用した氷厚推定結果

### ■ 評価点における氷厚の推定結果

- 氷厚推定結果:推定精度(4.7cm RMS)
- 適用範囲:氷厚80cm程度まで



**Observed ice thickness**  
Lake Saroma field campaign (1km interval)  
in February 1998

**Estimated ice thickness**  
RADARSAT 30°-44° (1km<sup>2</sup> average)  
using SPM & Si-Hi empirical model

19

## JARE43(第43次南極地域観測隊)の海氷観測

### 観測目的:

昭和基地周辺の海氷について物理的な特徴を把握し、マイクロ波合成開口レーダ(SAR)で観測した後方散乱係数との関連づける

### a.オングル海峡

一年氷の成長

### b.南方ルート上

積雪の少ない多年氷

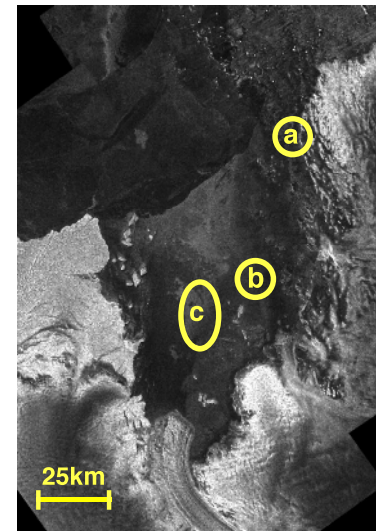
### c.多年氷コアサンプル

積雪の多い多年氷

### 各サイトの主要観測項目:

- 氷厚
- 表面粗度
- 海水コア採取

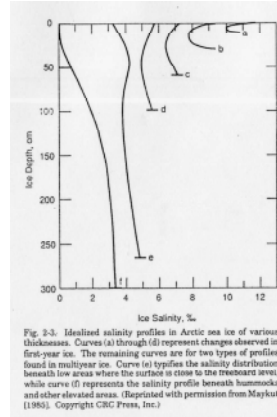
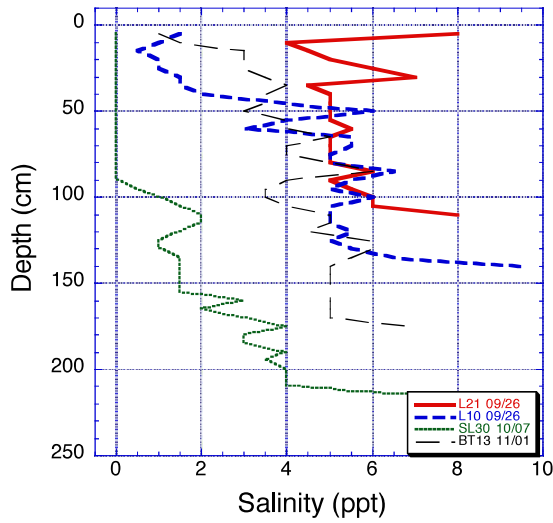
層構造  
鉛直温度プロファイル  
塩分濃度



20

# 塩分濃度に見る海水の特徴

- L21:一年氷
- L10:比較的薄い多年氷
- SL30:厚い多年氷
- BT13:6月に流れた氷



# 海水表面状態



## 表面粗度の変化例 (L15 Az:325度)



RMS H= 1.3mm  
Col L=26mm

2002/04/22



RMS H= 1.8mm  
Col L=40mm

2002/07/18



RMS H= 2.2mm  
Col L=23mm

2002/08/22

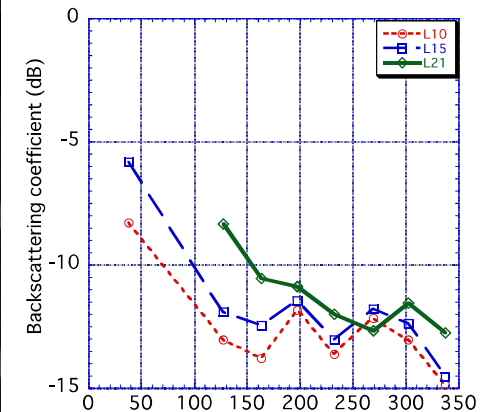
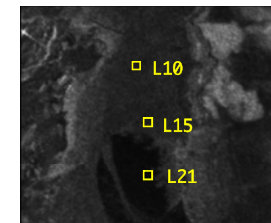
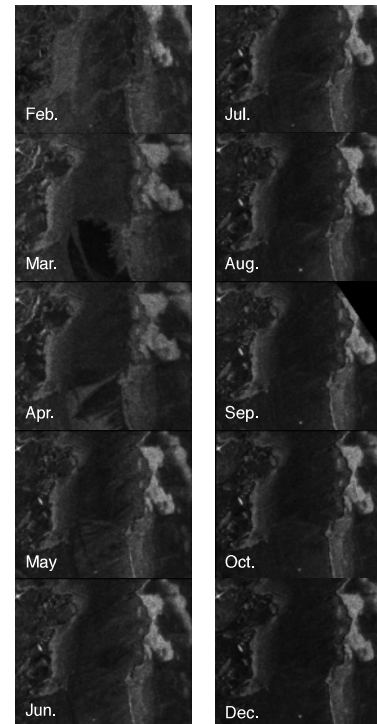


RMS H= 4.2mm  
Col L=23mm

2002/09/26

**RMS高さ、相関長、スペクトル関数** → **後方散乱モデルへの反映**

## オングル海峡定着氷の時系列解析



## L21の推定氷厚と後方散乱

$$K\left(\frac{\theta}{h}\right) = I\rho dh$$

K: 海水熱伝導率  
 θ: 海水表面温度  
 h: 海水厚  
 ρ: 海水密度  
 L: 潜熱

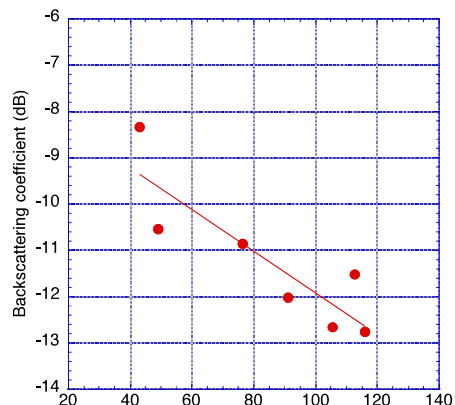
$$h = \sqrt{\frac{2K}{I\rho}} \sqrt{\int \theta dt} = A\sqrt{FI}$$

FI:積算寒度

L21の実測値から

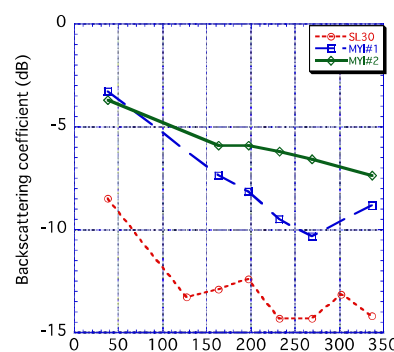
A=2.1

若林裕之, 河村俊行, 牛尾取輝, 西尾文彦 : ERS-2による南極リュ  
 ツオ・ホルム湾の海水後方散乱特性, 日本リモートセンシング学会誌,  
 Vol. 26, No. 2, pp. 138-145 (2006.4)



25

## 多年氷の後方散乱係数変化



	SL30		MYI#1	MYI#2
Date	02/10/07	02/11/12	03/01/15	03/01/15
Location	69° 27' 39.23"	21.7° 43.4"	69° 26' 38.45"	15.5° 31.0"
積雪深	14cm	12-13cm	65-67cm	135cm
氷厚	215cm	221cm	394cm	288cm
水位	-21cm	-19cm	-1cm	+32cm

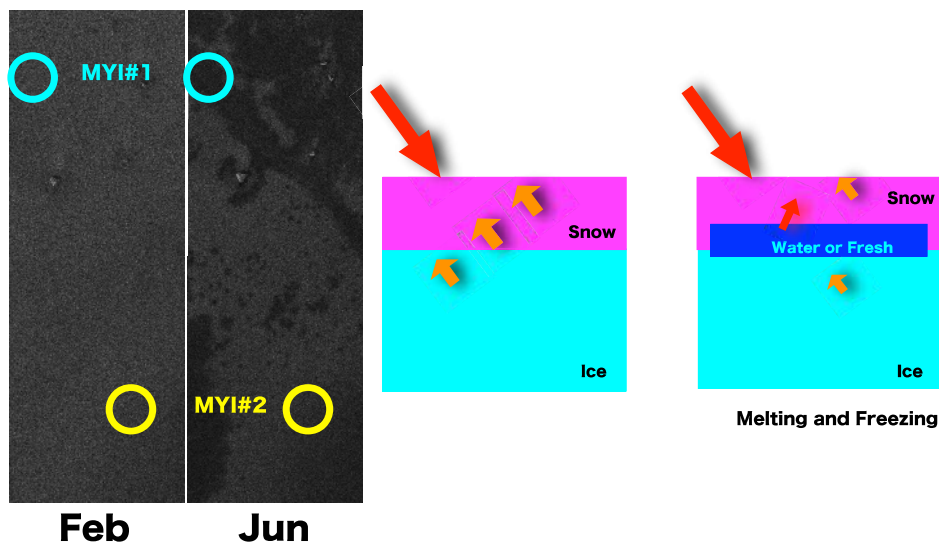
積雪の有無で散乱係数が5dB程度異なる

積雪の少ない多年氷：夏期に高く冬期は安定

積雪の多い多年氷：積雪量によって傾向が異なる

26

## 多年氷の後方散乱係数低下原因推定

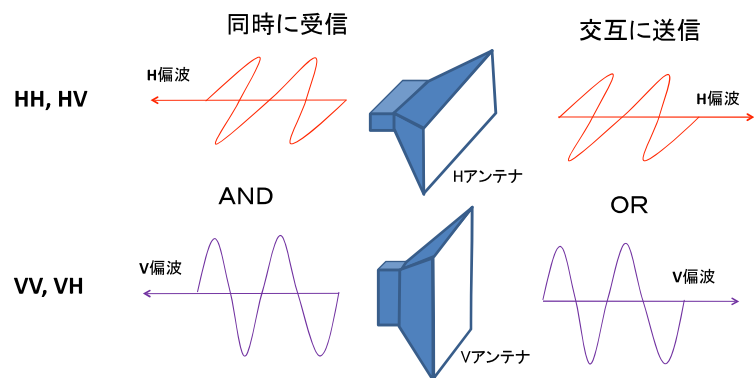


27

## 多偏波SARデータを使用した 海水観測

28

## 多偏波合成開口レーダの観測(データ取得)



水平(H)偏波アンテナと垂直(V)偏波アンテナを使って、電波を交互に送信し、戻ってきた電波を同時に受信することで、HH,HV,VH,VVの全偏波での観測データが取得できる

注意: 偏波の表記について — 受信偏波 送信偏波の順に示す  
例. HVとは水平偏波受信 垂直偏波送信

29

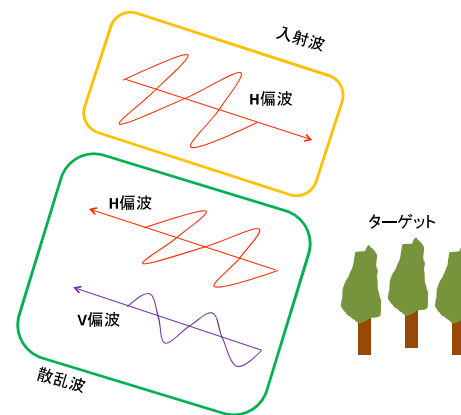
## 多偏波合成開口レーダの観測(散乱行列)

観測対象物による散乱前後の電界ベクトルの関係:散乱行列[S]

$$\begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix}$$

散乱行列

$E^i$ : 観測対象物に入射する入射波の電界ベクトル  
 $E^s$ : 観測対象物で散乱される散乱波の電界ベクトル



30

## 外洋の海氷について

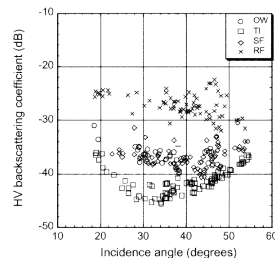
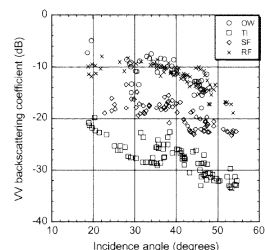
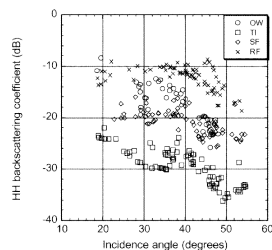


(a)Thin ice(TI)

(b)Smooth First year ice(SF)

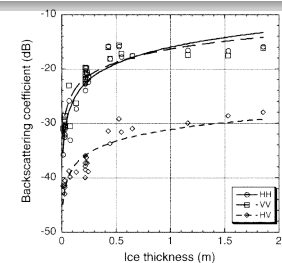
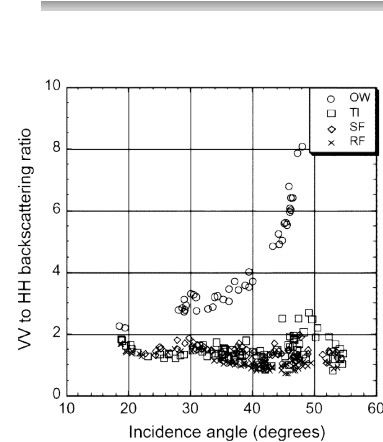
(c)Rough First year ice(RF)

海氷厚 TI < SF < RF

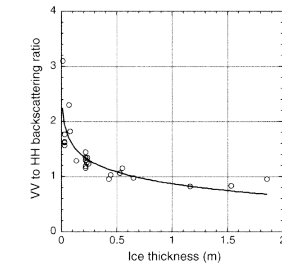


31

## 外洋の海水厚に感度が高いパラメータ



ラフネス増加に伴う後方散乱係数の増加

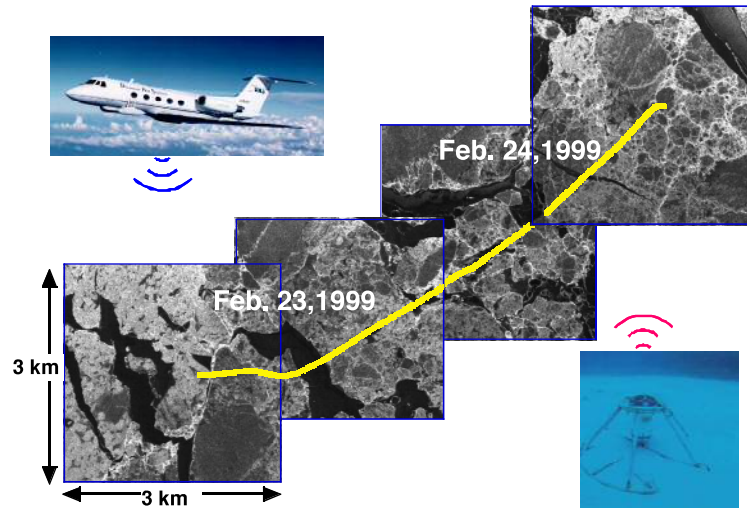


海水厚増加に伴う海水誘電率の低下

32



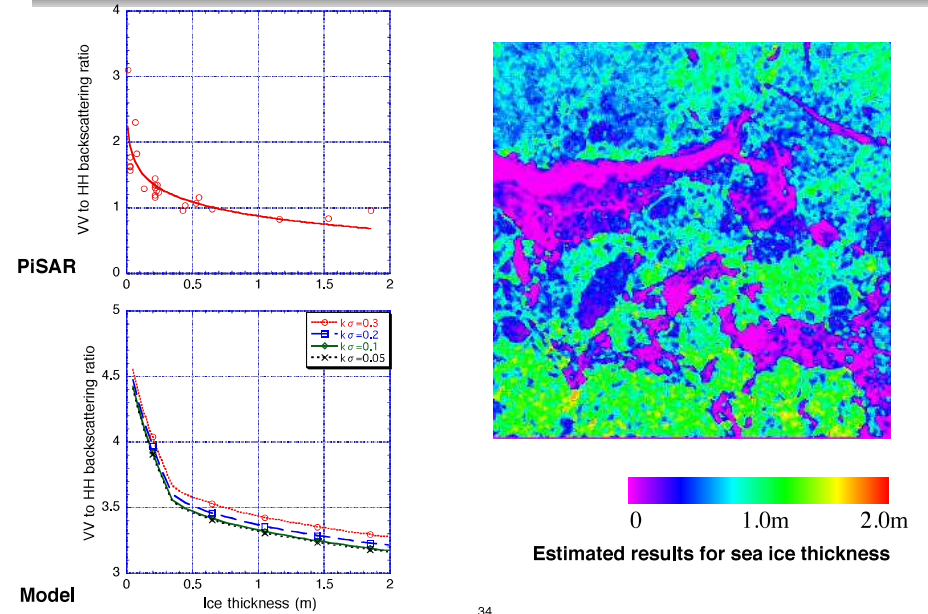
# PI SAR Lバンド多偏波データの解析



多偏波データ：HH+VV+HV+VH  
散乱メカニズムの推定

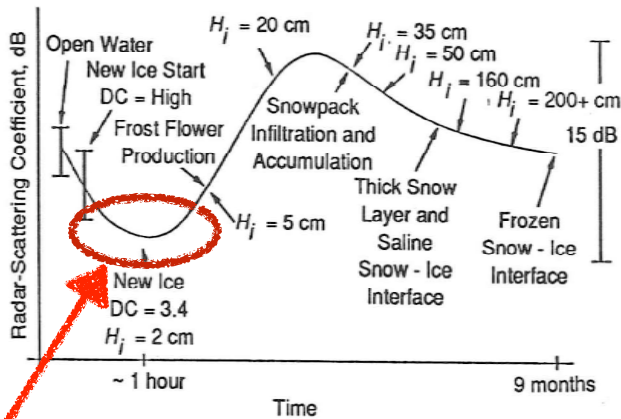
H. Wakabayashi, T. Matsuoka, K. Nakamura and F. Nishio : Polarimetric characteristics of sea ice in the Sea of Okhotsk observed by airborne L-band SAR, IEEE Trans. on Geo-science and Remote Sensing, Vol. 42, No.11, 2412-2425 (2004.11)

# LバンドVV/HH 後方散乱比を使用した海氷厚推定



# 散乱エントロピによる海氷検出 (SARによる海氷モニタリングの問題点)

一般的な海氷からの後方散乱係数の変化



R.G. Onstott, "SAR and scatterometer signatures of sea ice," in Microwave Remote Sensing of Sea Ice (Geophysical Monograph 68), F.D. Carsey Ed. Washington D.C., American Geophysical Union, pp. 73-104, 1992.

薄氷検出が困難

後方散乱係数における海氷検出のしきい値設定は一般的には困難

# 多偏波合成開口レーダデータの解析手法 (固有値分解)

散乱行列から計算されるコヒーレンシー行列[T]を固有ベクトルeに分解する方法

$$[T] = \langle k \cdot k^{*T} \rangle = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3^T] = \lambda_1 e_1 e_1^T + \lambda_2 e_2 e_2^T + \lambda_3 e_3 e_3^T$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HV} - S_{VH} \quad 2S_{HV}]^T \quad [U_3] = [e_1 \quad e_2 \quad e_3] \quad e_j = [\cos \alpha_j \quad \sin \alpha_j \cos \beta_j e^{i\theta_j} \quad \sin \alpha_j \sin \beta_j e^{i\gamma_j}]^T$$

エントロピ(entropy):H

アルファ角(alpha angle):α

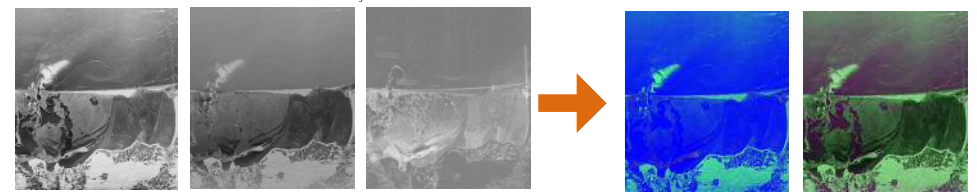
異方性 (anisotropy):A

$$H = -\sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i$$

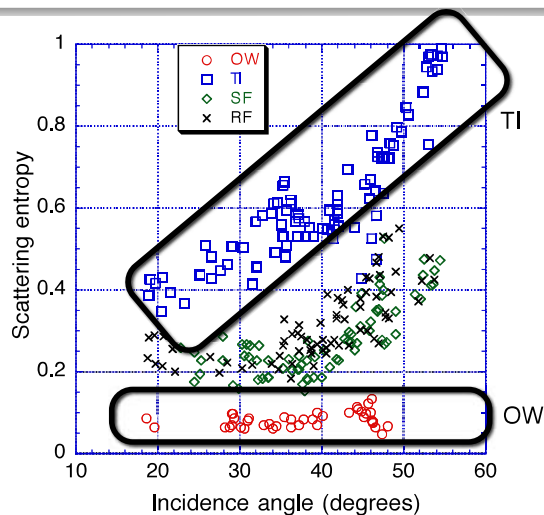
$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^3 \lambda_j} \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$$



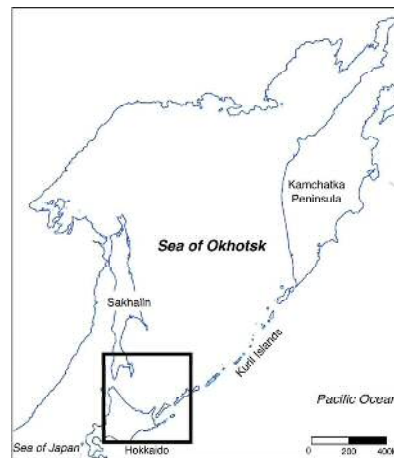
PALSARポラリメトリモードのサンプルデータ(Pi-SAR-L2 data acquired on Feb.24,2015)

# 散乱エントロピーを使用した海氷検出



H. Wakabayashi, T. Matsuoka, K. Nakamura and F. Nishio : Polarimetric characteristics of sea ice in the Sea of Okhotsk observed by airborne L-band SAR, IEEE Trans. on Geo-science and Remote Sensing , Vol. 42, No.11, 2412-2425 (2004.11)

# 関心領域と衛星データ

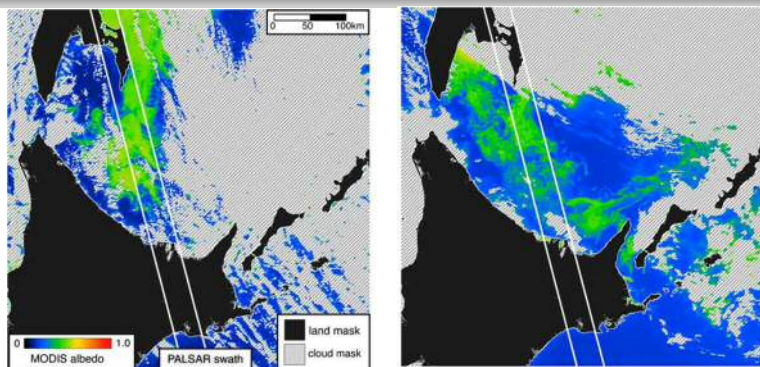


## LIST OF DATA USED IN THIS RESEARCH

Satellite/Sensor	Observation time	Process Level
ALOS/PALSAR	2009/02/17 12:36 GMT 2010/02/20 12:37 GMT	Level 1.1 Quad-pol. (JAXA/ EORC)
Aqua/MODIS	2009/02/17 4:10 GMT 2010/02/20 4:10 GMT	Level 1B(NSIDC)

ROI location

# 衛星データ(MODIS)



(a)

(b)

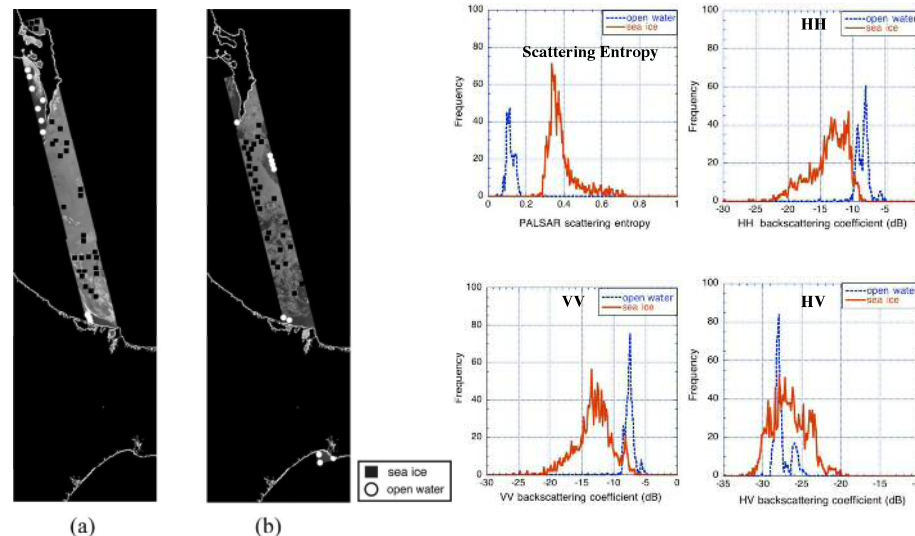
(a) MODIS albedo on Feb. 17, 2009, (b) MODIS albedo on Feb.20, 2010.

MODIS Albedo 算出

$$A_v = 0.3265 \times B_1 + 0.4364 \times B_3 + 0.2366 \times B_4$$

海氷では  $A_v > 0.1$

# 衛星データ(PALSAR)



(a)

(b)

Extracted areas for data analysis in (a) 2009 and (b) 2010

# 線形判別分析 (LDA) 結果



$$S_r = S_w + S_b$$

全分散( $S_r$ ), 群内分散( $S_w$ ), 群間分散( $S_b$ ) の関係

$$\eta^2 = \frac{S_b}{S_r}$$

相関比( $\eta^2$ )が大きいほど群が分離していることを示す

$$z = ax + b$$

$z$ : 合成変量,  $a$ : 判別係数,  $b$ : 定数項,  $x$ : オリジナル変量

$x$ : 後方散乱係数または散乱エントロピを入力

$a$ および $b$ は2群の相関比が最大になるように決定

$$z = \sum_{i=1}^n a_i x_i + b$$

$z$ : 多偏波合成変量

$a_i$ : 判別係数,  $b$ : 定数項,  $x_i$ : オリジナル変量

$x_i$ : 各偏波の後方散乱係数を入力

CORRELATION RATIOS AND DISCRIMINANT ACCURACIES BETWEEN SEA ICE AND OPEN WATER

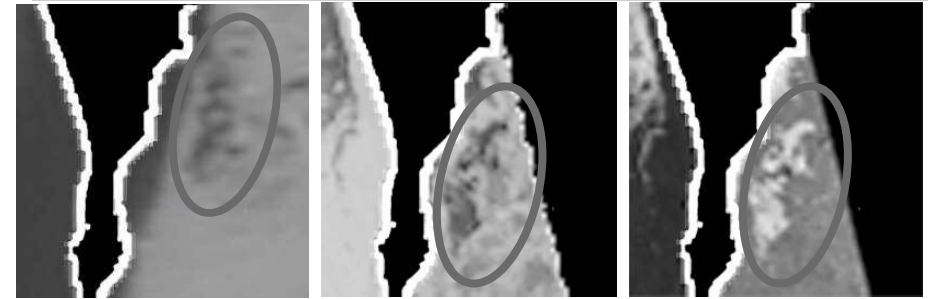
Variable	Correlation ratio( $\eta^2$ )	threshold	Discriminant accuracy(%)
Scattering entropy	0.731	0.25	99.9
HH	0.44	-11.2 (dB)	85.9
VV	0.483	-10.4(dB)	89.3
HV	0.045	-27.2(dB)	38.9

CORRELATION RATIOS AND DISCRIMINANT ACCURACIES FOLLOWING LINEAR DISCRIMINANT ANALYSIS USING BACKSCATTERING COEFFICIENTS

Variables	Correlation ratio( $\eta^2$ )	Discriminant accuracy(%)
HH+VV	0.483	89.4
HH+HV	0.701	99.3
VV+HV	0.706	98.4
HH+VV+HV	0.718	99.3

41

# 散乱エントロピによる海氷検出(薄氷検出例)



MODIS Albedo

PALSAR HH Backscattering coefficient

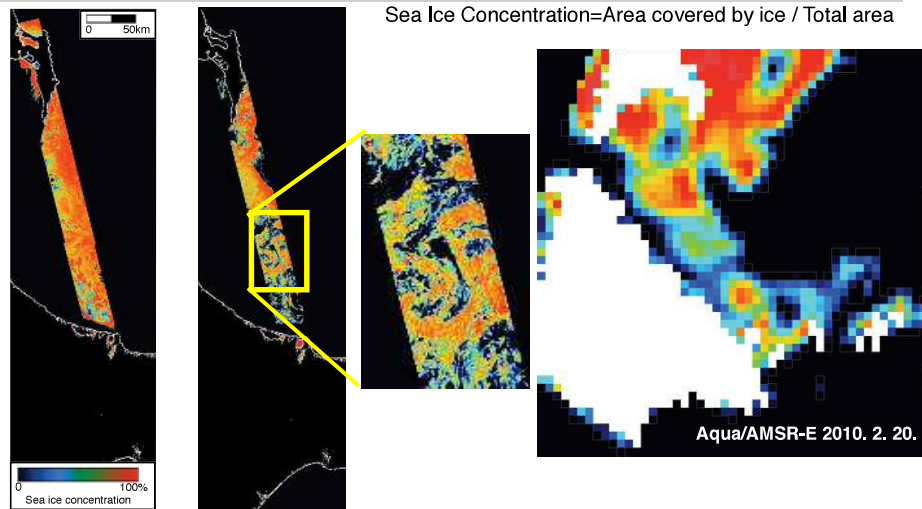
PALSAR Scattering entropy

Parameters	Mean	Standard deviation
MODIS albedo	0.23	0.042
HH	-21.97dB	1.15dB
VV	-21.82dB	1.08dB
HV	-28.99dB	0.36dB
Scattering entropy	0.75	0.04

42

42

# 散乱エントロピによる海氷検出(海氷密接度算出への応用)



Sea Ice Concentration=Area covered by ice / Total area

Aqua/AMSR-E 2010. 2. 20.

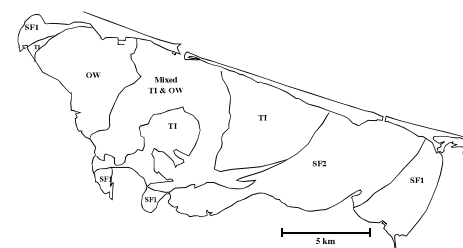
Example of a sea ice concentration map derived from PALSAR data from (a) 2009 and (b) 2010. The spatial resolution of these maps is 500m by 500m.

H. Wakabayashi, Y. Mori, and K. Nakamura: Sea ice detection in the Sea of Okhotsk using PALSAR and MODIS data, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 6, No. 3, 1516-1523 (2013.6)

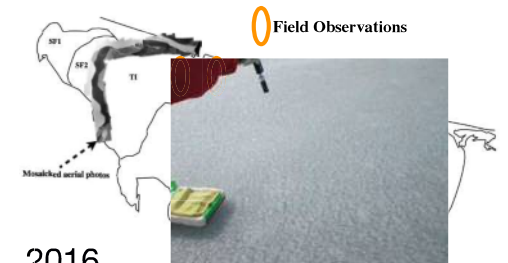
43

# サロマ湖の特徴

- 2つの湖口でオホーツク海とつながる塩水湖(面積: 150km<sup>2</sup>)
- 湖水の塩分濃度は30ppt(3%)以上
- 湖氷の層構造・塩分濃度は外洋における海氷と同様
- 湖氷の氷厚は2月から3月にかけて50cm(湖東西湖岸付近)に達する
- 第一湖口近くは薄氷域が存在



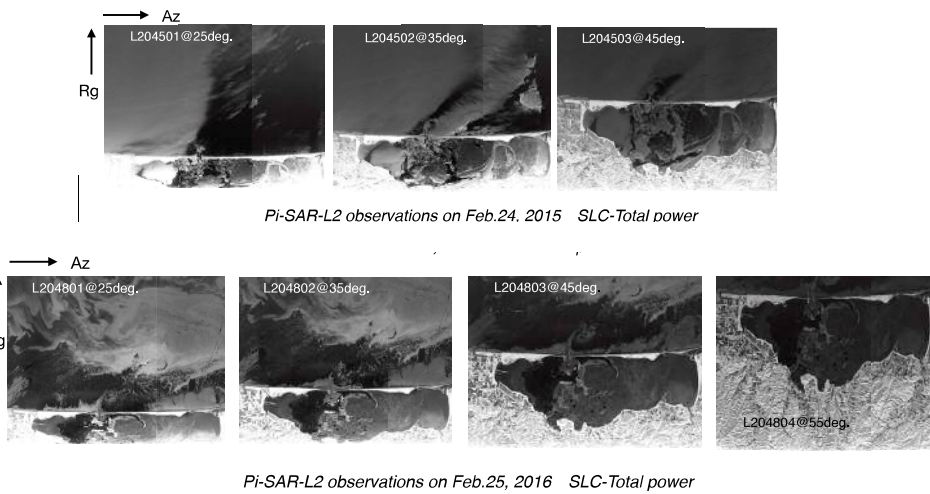
2015



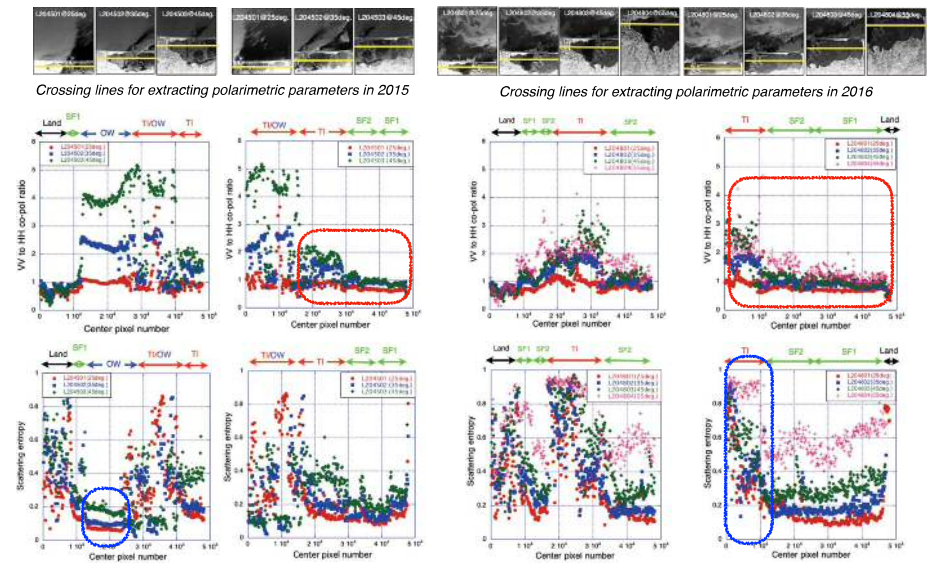
2016

44

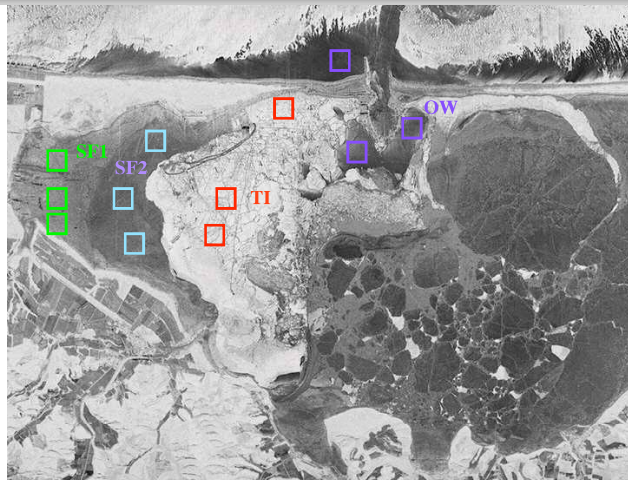
# Pi-SAR-L2 Observations in 2015 and 2016



# Extracted profiles of co-pol ratio and scattering entropy

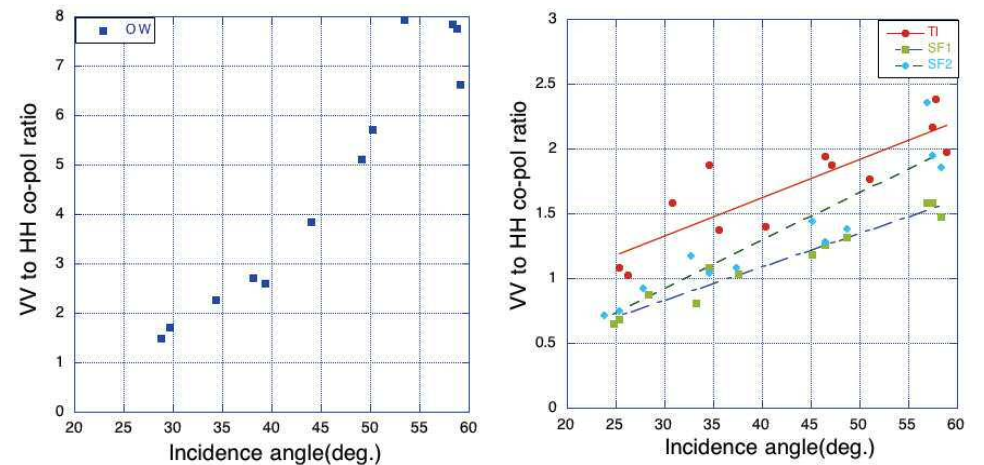


# Sampling areas for each category

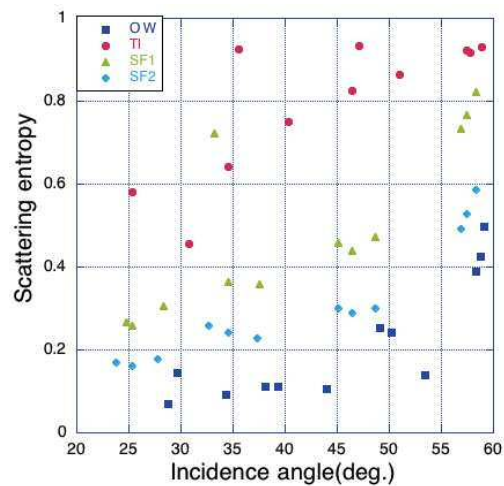


Sampling areas of extracting polarimetric parameters in OW and three ice types indicated on scattering entropy image (L204803)

# Incidence angle characteristics for VV to HH co-pol ratio



## Incidence angle characteristics for Scattering entropy



49

## まとめ

- SARによる海氷観測
  - 高分解能・全天候性
  - 単偏波SARを使用した海氷観測(オホーツク海・南極の例)
- Lバンド多偏波SARデータを使用した海氷モニタリング手法
  - 高入射角におけるVV/HH後方散乱比を使用した氷厚推定
  - 散乱エントロピを使用した薄氷を含む海氷検出
- 多入射角Pi-SAR-L2データを使用したサロマ湖の解析
  - 高分解能多偏波SARデータの可能性評価
  - VV/HH後方散乱比と散乱エントロピの再評価

50