

平成 21 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18510003

研究課題名（和文） 季節海氷域の実態に基づく数値海氷モデルの構築

研究課題名（英文） Buildup of a numerical sea ice model based on the real state of the seasonal ice zone.

研究代表者

豊田 威信（TOYOTA TAKENOBU）

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号：80312411

研究成果の概要：季節海氷域の振る舞いを正しく予測するために必要となる数値海氷モデルを構築することを目的として、オホーツク海や南極海で現場観測を行い季節海氷域の基本的な特性の解析を行った。その結果、氷厚発達過程の特徴、合成開口レーダーが氷厚分布推定に有用であること、比較的小さな氷盤分布の一般的な特徴など、モデルの構築に有用な知見が得られた。また、海氷内部応力の検証を行うために海氷漂流データセットの作成も遂行した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,000,000	0	2,000,000
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	450,000	3,950,000

研究分野：海水物理学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海氷・季節海氷域・数値海氷モデル・氷盤の大きさ分布・氷厚分布・衛星画像解析・海氷現場観測・海氷漂流速度分布

## 1. 研究開始当初の背景

海氷は冬季に海洋から大気に放出される多大な熱を遮断し、また高いアルビードの故に日射量を大幅に減じる役割があり、地球の気候システムに大きな影響を及ぼす。海氷域の中でも季節海氷域は北極で約 5 割、南極で約 8 割を占めており、その消長が気候変動に大きな影響を及ぼすことは容易に想像される。従って、気候変動の解明のためには季節海氷域の振る舞いを正しく予測することが重要な課題である。

季節海氷域の変動が気候変動に及ぼす影

響を定量的に見積もるには数値海氷モデルを気候モデルに組み込むのが最も一般的な手法である。しかしながら、従来の海氷モデルは必ずしも季節海氷域の実態に基づいたものとは言えない状況にあった。というのも、従来のモデルのそのほとんどが海氷域内部の多年氷領域と同様に、同一の氷厚を持つ一枚の連続体として扱っており、モデルの中で使用されてきたパラメータも観測に基づいたものというよりは、計算された海氷域の広がりを実実に合わせるように組み込まれてきたからである。現実の季節海氷域では海氷

は決して一枚の連続体のごとく分布しているのではなく、様々な大きさの氷盤がまとまって分布する特徴を持っている。それぞれのまとまりの中で氷盤は互いに衝突をしたり乗り重なったりしながら成長しており、氷盤の形態は多年海氷域以上に大変複雑な様相を示す。同じ海氷密度度であっても氷盤が小さいほど全体の周囲長が長くなるため融解過程を正しく再現するには氷盤の大きさの分布をきちんと把握する必要がある。また、特に季節海氷域のように薄い海氷が多数存在する海域では、正しく氷厚分布を知ることが大気との熱交換を見積もる上で重要であることが知られている。このように、モデル化に当たっては季節海氷域特有の“複雑さ”もある程度再現することが要求される。気候変動の解明が重要な課題となっている現在、海氷の実態を基盤とした数値海氷モデルの構築が早急に求められている。

## 2. 研究の目的

上の背景をふまえ、本研究では、季節海氷域の実態を把握するための観測・解析に着手して季節海氷域の実態に見合った数値海氷モデルの基礎を構築することを目的とした。海氷域の実態把握においては、モデル化にあたって鍵を握る項目となる海氷成長過程、氷盤の大きさ分布、氷厚分布、表面凹凸分布、氷盤の漂流速度分布、それに氷盤間に働く内部応力の取り扱いの解析に焦点を絞る。

従来、季節海氷域を対象とした数値海氷モデルは、取り扱いの利便さの点から、確固たる根拠なく海氷域をグリッド内で同一の氷厚を持つ連続体として取り扱われることが主流であった。このため、季節内の海氷変動を精度よく表現できない問題を抱えており、モデルの検証データも不十分であった。本研究はモデル化を念頭において解析を行ない、実態を明らかにしようとする点が新たな特徴である。特に氷厚分布に関してはモデルの検証のためにも重要なデータであるので、衛星リモートセンシングによる見積もることの可能性についても検証を行う予定である。

## 3. 研究の方法

観測・解析の方法を下記に項目ごとに記す。

### (1)海氷成長過程

オホーツク海および南極海の現場観測で砕氷船を用いて海氷コアを採取して結晶構造・塩分・密度・ブライン体積比・酸素安定同位対比などの鉛直プロファイルを調べることにより、どのようなプロセスで海氷が成長したかを吟味した。また、海氷上の積雪にも目を向けて積雪が如何に海氷成長に関わっているかも吟味した。

### (2)氷厚分布と表面凹凸分布

オホーツク海の現場観測で、氷厚分布は電磁誘導法(EM法)とビデオカメラを用いて、表面凹凸分布は超音波距離計あるいはレーザー距離計を用いて航路に沿ってモニタリング観測を行った。両者の関係性を調べて衛星、特に合成開口レーダー(SAR)を用いて氷厚分布を見積もることの可能性を吟味した。

### (3)氷盤の大きさ分布

オホーツク海で見出した特徴(氷盤分布は基本的には自己相似性の特徴を持つが、直径数10mを境に異なるレジームが存在すること)を他の季節海氷域で確かめることを第一の目的としている。このために2つの南極航海に参加し、ウェッデル海およびウィルクスランド沖の氷縁付近の比較的小さな氷盤を対象としてヘリ搭載のビデオカメラを用いてデータを収集して解析を行なった。

### (4)海氷漂流速度分布のデータセット作成

海氷の動きや内部応力のパラメタリゼーションを検証するのが第一の目的である。オホーツク海を海氷を対象として、衛星マイクロ波データ(AMSR-E)の輝度温度のパターンの日々の変化から相関法を用いてデータセットの作成を行った。

## 4. 研究成果

個々の項目別の得られた成果の概要は下記の通りである。

### (1)海氷成長過程

オホーツク海南部の海氷および海氷上の積雪の一般的な特性を把握するために、砕氷巡視船「そうや」を用いて海氷拡大期の2月に3年間にわたって観測を行った。現場で28本の海氷コアを採取して解析を行った結果、海氷の結晶構造は粒状氷(全層の約5割)と層状構造(平均層厚12cm)が顕著であり、短冊状氷は約4割程度であること、氷盤を構成する海氷ブロックの平均厚は約30-40cmであること、海氷上の積雪はしもぎらめ雪が卓越していることなど、季節海氷域特有の性質が明らかになった。特にこの結果から、この海域の海氷成長には力学的な変形過程が本質的であることが示され、南極海氷との類似点が見出された。推測される氷厚発達過程を図1に示す。また、酸素安定同位体比を用いて、積雪の海氷への寄与として雪ごおりは約1割、質量比は1-2%と見積もられた。加えて、海氷内のブライン体積比および氷高データを用いてリモートセンシングによる氷厚推定の可能性も吟味された(Toyota et al., 2007)。

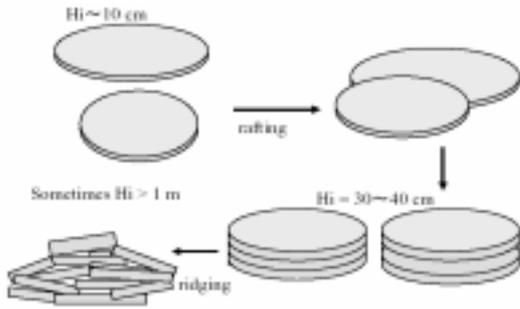


図1 . 季節海水域の氷厚発達過程

## (2)氷厚分布と表面凹凸分布

前項で述べた性質から、季節海水域においては変形過程に伴う海氷表面の凹凸の度合いが氷厚分布の良い指標となることが想定される。もし両者に良い相関があれば、海氷表面の凹凸を衛星から捉えることにより、広範囲な氷厚分布把握への道が開かれることになる。海氷表面の比較的粗い凹凸分布を捉えるには、凹凸のスケールに近い波長を持つ L-band の合成開口レーダー(SAR; 波長 24cm) が有用と考えられる。

この仮説を実証するために、オホーツク海南部で JAXA/NICT による航空機の Pi-SAR (L-band SAR ; 分解能 3 m) 観測と同期して巡視船「そや」を用いた表面凹凸計測と氷厚計測の検証実験を行った。その結果、図2に示すように L-band SAR の後方散乱係数、表面凹凸の度合い、氷厚の間には良い相関関係があることが見出され、確かに L-band SAR は季節海水域の氷厚分布推定に有用であることを示すことができた (Toyota et al., in press)。更に、2008年2月に同じ海域で ALOS 衛星 PALSAR (L-band SAR ; 分解能 100m) の同期観測を行った結果、確かに海水域では後方散乱係数は氷厚と良い相関があることを示すことができた (Toyota et al., 2009)。しかし一方で、単偏波であるため海水と開水面の区別が困難な問題点も見出された。

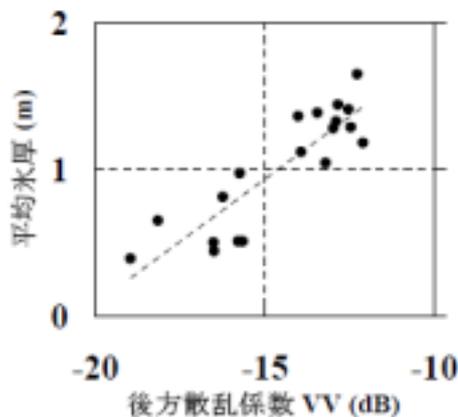


図2 . L-band 後方散乱係数と氷厚の相関

## (3)氷盤の大きさ分布

特に大きさ 100m 以下の氷盤に着目して、解析の対象を更に南極のウェッデル海(WE)とウィルクスランド沖(WI)の氷縁域に広げて一般的な特徴を明らかにすることを目的とした。また、WE ではヘリ搭載 EM を用いて氷厚も併せて測定し、氷厚分布が氷盤分布に及ぼす影響についても考察した。

氷盤分布の観測は、WE 北西部の氷縁域ではドイツ船「Polarstern」の航海観測期間中 2006年9月19日と10月17,18日に、WIの氷縁域ではオーストラリア船「Aurora Australis」の航海期間中 2007年10月8日に、共に船舶搭載ヘリコプターを用いて行われた。ヘリコプターには下向きビデオカメラを設置して原則として異なる高度で高度を一定に保ちながら飛行し、様々な大きさの氷盤の分布状況を記録した。得られた映像から各々の高度毎に一分間隔で静止画像を作成した後(WEで計122枚; WIで計52枚)、輝度に応じて個々の氷盤を抽出し、面積、周囲長、最大径、最小径の計測を行った。抽出した氷盤の総数と画像の総面積は各々WEで27490個と15.8km<sup>2</sup>、WIで18292個と2.7km<sup>2</sup>であった。

解析の結果、以下の特徴が明らかになった。

両海域ともに積算個数  $N(r)$  (直径  $r$  以上の氷盤の 1km<sup>2</sup> あたりの個数) は良い近似で  $N(r)/r$  と書き表されること(図3)。ただし直径 20 - 40m を境に分布の形状は変化し、直径 20m 以下では  $\alpha = 1.19 \pm 0.10$  (WE)、 $1.26 \pm 0.19$  (WI)、直径 40m ~ 100m では  $\alpha = 5.00 \pm 1.90$  (WE)、 $3.40 \pm 0.35$  (WI) の値をとること。

屈曲点は海域と時期に応じて多少の差異が見られること(WEでは9月は約30m、10月は約40m; WIでは約20m)、形状の特徴を調べるために、最大径  $r_{max}$  と最小径  $r_{min}$  との関係性を調べたところ、両海域ともに氷盤の大きさによらず平均して  $r_{min}/r_{max} = 0.56 \sim 0.55$  (WE)、 $0.61$  (WI) の値が得られた。

の結果から、南極氷縁域の氷盤分布もオホーツク海と同様に基本的には自己相似性があり、氷盤分布の特性は数十mを境に変化することが示された。興味深いことは、大きな氷盤の

値はオホーツク海の解析(1.9-2.2)と大きく異なるものの、小さな氷盤の値はオホーツク海の値(1.15)とほぼ合致し、形状から求めたフラクタル次元とも良く一致した点である。また、氷盤の形状の特性もオホーツク海での値とほぼ一致した点である。以上の結果は小さな氷盤の形成過程には共通のメカニズムが存在する可能性があることを示唆する。に関しては、平均氷厚(9/19: 1.1m, 10/18: 1.6m)の違いを反映したものと考えられ、うねりによる氷盤の屈曲分裂が氷盤形成に本質的であることを示唆している(論文執筆中)。

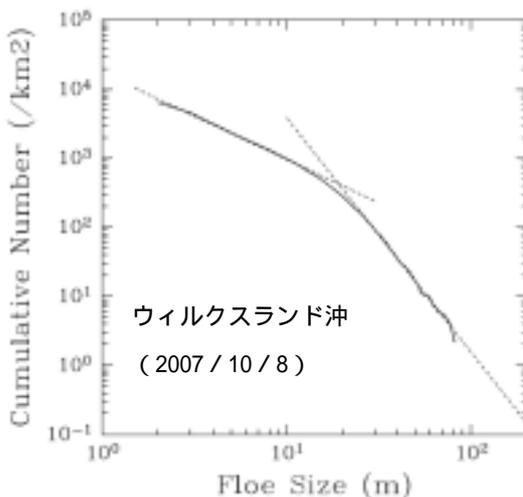
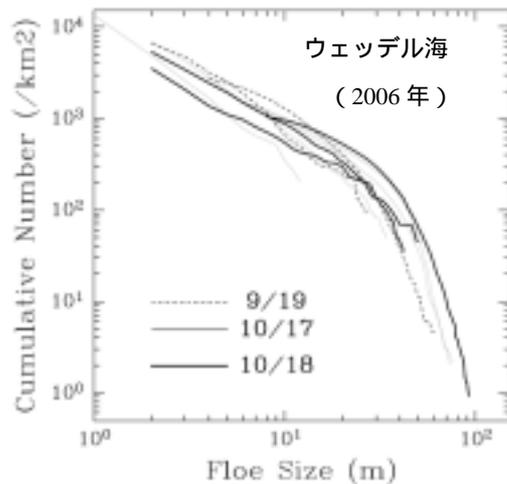


図3 . 氷盤の大きさの積算個数分布

(4) 海氷漂流速度分布のデータセット作成  
漂流速度の計算は日々の AMSR-E の 89GHz チャンネルの垂直偏波および水平偏波の画像を用いて行った。画像データのグリッド間隔は 6.25km で、37.5kmx37.5km の窓画像を用いた面相関法によって、一日後に最も輝度温度分布パターンが似ている方向を探し出すことによって平均的な漂流速度を算出した。従って漂流速度データの時間分解能は一日、空間分解能は 37.5km である。このようにして空間的にこれまでにない高分解能のデータセットを作成することができた。

一方、日々の SSM/I 画像データから同期間の海氷密接度のデータセットを 25kmx25km のグリッドで作成し、日々の NCEP 再解析データを用いて 1.875x1.875deg. の気象データセットも作成した。これらのデータセットを組み合わせることで海氷の内部応力のパラメタリゼーションを検証するための準備を整えることができた。

以上を総括すると、時間の制約もあってモデルの開発までには至らなかったものの、当

初予定されていなかった南極航海に2度参加する機会を得て、より深く季節海氷域の実態の解析を行うことができた。(1)と(2)に関しては海氷成長、(3)に関しては融解過程、(4)に関しては、海氷内部応力の各々のパラメタリゼーションに道を開くものである。特に(3)は海氷-海洋相互作用の解明にも寄与することが期待され、意義深い成果が得られたと考えている。このように、モデルを構築する準備がほぼ整ったので今後継続して研究を発展させたいと考えている。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K.I. Ohshima, and N.Ebuchi, Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from air-borne L-band SAR, *International Journal of Remote Sensing*,30, (in press) , 査読有.

Fujisaki, A., H. Yamaguchi, T. Toyota, A. Futatsudera and M. Miyanaga, Measurements of air-ice drag coefficient over the ice-covered Sea of Okhotsk, *Journal of Oceanography*, 65, (in press) , 査読有.

Toyota, T., H. Kamimura, S. Ono, and K. Cho, Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, *Proceedings of The 24th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu*, 138-142, 2009, 査読無.

Granskog, M., T. Toyota, H.Hattori, D.Nomura, and A.Krell, Observations on physical properties and biogeochemistry of sea ice in southern Sea of Okhotsk, *Proceedings of The 24th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu*, 183-186,2009, 査読無.

Toyota, T., S. Takatsuji, K. Tateyama, K. Naoki, K.I. Ohshima, Properties of sea ice and overlying snow in the southern Sea of Okhotsk, *Journal of Oceanography*, 63, 393-411, 2007, 査読有.

Kimura, N., Mechanisms controlling the temporal variation of the sea ice edge in the Southern Ocean, *Journal of Oceanography*, 63, 685-694, 2007, 査読有.

Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K.I. Ohshima, and N. Ebuchi, Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR, *Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, CD-ROM(4頁), 2007, 査読無.

長幸平, 福島繁樹, 豊田威信, 若林裕之,

「PALSARによる海水観測への期待」、写真測量とリモートセンシング学会誌、査読無、46、11-15、2007.

Toyota, T., K. Nakamura, T. Tamura, K. Cho, K.I. Ohshima, Development of sea ice thickness algorithm from PALSAR data, combined with in-situ observations and other satellite data, *Proceedings of The First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program*, CD-ROM(4頁), 2007, 査読無.

Uto, S., T. Toyota, H. Shimoda, K. Tateyama, K. Shirasawa, Ship-borne electromagnetic induction sounding of sea ice thickness in the south Okhotsk Sea, *Annals of Glaciology*, 44, 253-260, 2006, 査読有.

Tateyama, K., K. Shirasawa, S. Uto, T. Kawamura, T. Toyota, and H. Enomoto, Standardization of electromagnetic-induction measurements of sea-ice thickness in polar and sub-polar seas, *Annals of Glaciology*, 44, 240-246, 2006, 査読有.

[学会発表](計14件)

豊田威信、Christian Haas、田村岳史、「南極氷縁域における比較的小さな氷盤の大きさ分布の特徴」、日本海洋学会春季大会、2009年4月7日、東京大学(東京)。

Toyota, T., Kamimura, H., Ono, S., and Cho, K., Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, オホーツク海及び海水国際シンポジウム、2009年2月18日、紋別市文化会館(紋別)。

Granskog, M., Toyota, T., Hattori, H., Nomura, D., and Krell, A., Observations on physical properties and biogeochemistry of sea ice in southern Sea of Okhotsk, オホーツク海及び海水国際シンポジウム、2009年2月18日、紋別市文化会館(紋別)。

豊田威信、Haas, C., Nicolaus, M., Li, Z., 青木茂、「晩冬季のウェッデル海北西部海水上の積雪の特性について」、極域気水圏シンポジウム、2008年12月3日、国立極地研究所(東京)。

豊田威信、Haas, C., 「ウェッデル海氷縁域における比較的小さな氷盤の大きさ分布について」、極域気水圏シンポジウム、2008年12月2日、国立極地研究所(東京)。

野村大樹、豊田威信、的場澄人、西岡純、白澤邦男、「オホーツク海南部の海水および海水上積雪の栄養塩濃度分布について」、日本雪氷学会、2008年9月24日、東京大学(東京)。

豊田威信、上村治睦、小野修史、矢口龍太、長幸平、「PALSARによるオホー

ツク海の氷厚分布推定の検証観測」、日本海洋学会秋季大会、2008年9月25日、広島国際大学(呉市)。

Toyota, T., Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR, Workshop on "Monitoring of Antarctic sea ice during IPY", July 1, 2008, Bern (Switzerland)。

Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K.I. Ohshima, and N. Ebuchi, Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 26, 2007, Barcelona (Spain)。

Toyota, T., K. Nakamura, T. Tamura, K. Cho, K.I. Ohshima, Development of sea ice thickness algorithm from PALSAR data, combined with in-situ observations and other satellite data, The First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, November 21, 2007, 国際会館(京都)。

木村詞明、「動画で見る海水域内部での海水の動き」、極域気水圏シンポジウム、2007年11月21日、国立極地研究所(東京)。

木村詞明、「人工衛星データを用いたオホーツク海の海水移流軌跡の解析」、日本気象学会秋季大会、2007年10月16日、北海道大学(札幌)。

豊田威信、「Retrieval of sea ice thickness distribution with ALOS/PALSAR」、オホーツク海及び海水国際シンポジウム、2007年2月21日、紋別市文化会館(紋別)。

阿部真育、豊田威信、「異なる塩分下におけるブラインチャンネルの構造特性変化の研究」、極域気水圏・生物圏合同シンポジウム、2006年11月20日、国立極地研究所(東京)。

[その他]

新聞記事

2008年2月22日および27日付の北海道新聞にオホーツク海での海水観測研究の活動内容が掲載された

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

豊田 威信 (TOYOTA TAKENOBU)  
北海道大学・低温科学研究所・助教  
研究者番号：80312411

### (2) 研究分担者

木村 詞明 (KIMURA NORIAKI)  
愛媛大学・沿岸海洋科学研究センター・  
研究員  
研究者番号：20374647