HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	南極氷床 : その変動と海洋との相互作用
Author(s)	杉山, 慎
Citation	低温科学, 76, 169-177
Issue Date	2018-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.169
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70333
Type	departmental bulletin paper
File Information	18_Lowtemsci76_p169-177.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 76 （2018） 169–177
doi: 10.14943/lowtemsci. 76. 169

南極氷床
── その変動と海洋との相互作用 ──

杉山　慎[1)]

南極氷床は地球に存在する淡水の 60％以上を蓄積し，巨大な淡水リザーバとしての役割を担っている．その変動は海水準，海洋循環，アルベド，地殻隆起など，地球の気候システムに大きな影響を与える．近年の観測技術の向上によって，この氷床が氷を失いつつあることが明らかになってきた．南極沿岸部において顕著な質量損失が報告されており，海洋の変化に影響を受けた棚氷と溢流氷河の縮退がその原因と考えられている．本稿では，南極氷床の特徴と地球環境に果たす役割，氷床変動のメカニズムについて概説した後，近年の氷床変動とそれを駆動する氷床・海洋相互作用について最近の知見を紹介する．

The Antarctic ice sheet
── its variation and interaction with ocean ──

Shin Sugiyama[1]

The Antarctic ice sheet stores ＞60% of freshwater on the earth, acting as a giant freshwater reservoir. Changes in the ice sheet give impact on the climate system of the earth by affecting sea level, ocean circulation, albedo and lithospheric uplift. Recently advanced observational techniques tell us that the Antarctic ice sheet is losing mass. Significant mass loss is reported from the coastal margins, implying the influence of ocean changes on the ice shelf and outlet glaciers. This contribution provides a general overview of the Antarctic ice sheet, and its dynamics and potential influence on the earth's climate system. Research results are introduced to outline the recent ice sheet mass change driven by the ice-sheet-ocean interactions.

キーワード：氷床，棚氷，溢流氷河，棚氷底面融解，カービング
ice sheet, ice shelf, outlet glacier, subshelf melting, calving

1．南極氷床

人工衛星画像に写った南極大陸を見ると，くっきりと白く浮かび上がったその美しさが印象的である．この白い輝きは大陸表面のほとんど（98％）が氷に覆われている証であり，この巨大な氷体を南極氷床（Antarctic ice sheet）と呼ぶ．氷床の表面積（1.4×10^7 km^2）は地球の陸域面積の 8.2％に相当し，氷の体積（2.7×10^7 km^3）は地球に存在する全氷河氷床の約 90％を占める（Vaughan et al., 2013）．氷の厚さは平均 1937 m，最も厚い部分では 4897 m と見積もられており（Fretwell et al., 2013），まさに地球最大の氷の塊である．

氷床は陸上に降り積もった雪が，やがて圧縮されて氷となったものであり，いわゆる氷河の一種である．氷河の中でも面積が大きく（5×10^4 km^2 以上）大陸規模で陸地を覆うものを氷床と呼び，その他の山岳氷河（mountain glacier）と区別することが多い．地球に現存する氷床は南極氷床とグリーンランド氷床のみであるが，例えば 2 万年前には北米大陸とヨーロッパ北部がそれぞれローレンタイド氷床とスカンジナビア氷床に覆われていた．大陸規模に広がる厚さ数 1000 m の氷が数万年のう

連絡先
杉山　慎
北海道大学　低温科学研究所
〒060–0819　北海道札幌市北区北 19 条西 8 丁目
Tel. 011–706–7441
e-mail：sugishin@lowtem.hokudai.ac.jp
1）北海道大学　低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

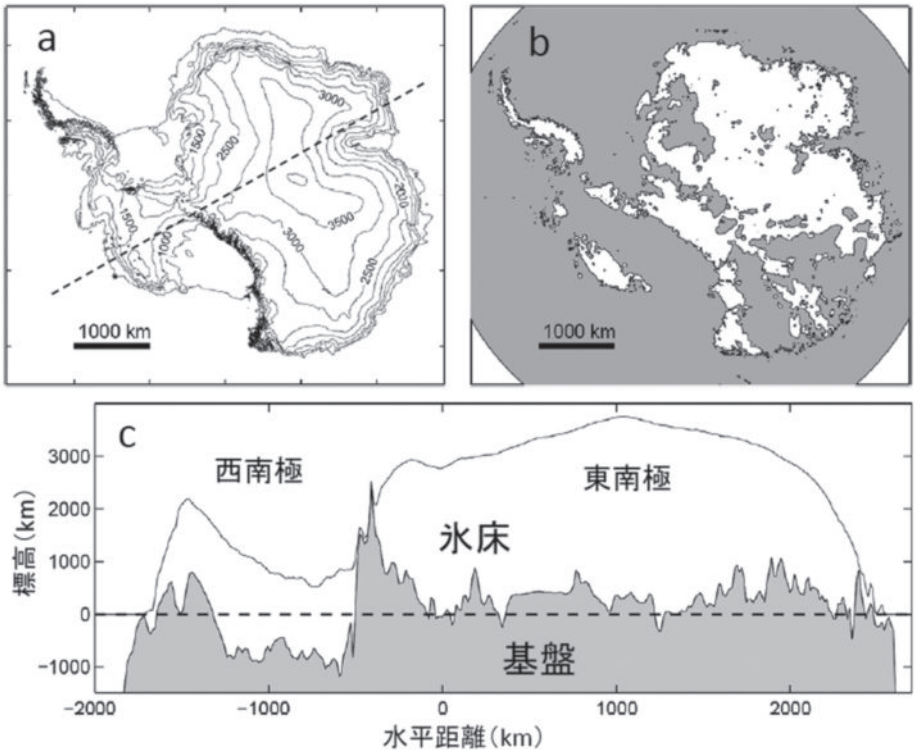


図 1：(a) 南極氷床の表面標高（等高線の間隔は 500 m）．(b) 氷床底面の標高が海水準よりも高い地域を白抜きで示す．(c) 図 1a 中の破線（東経 60°から西経 120°）に沿った氷床の縦断面図．西南極氷床の一部では氷床底面が海水準よりも低い．

ちに消失する，これが氷床変動の時空間スケールである．南極氷床はその規模が大きく，寒冷な気候条件下にあるため，通常の氷河とは異なる特徴を持っている．重要な特徴のひとつは氷床周縁部に形成された棚氷（ice shelf）である．大陸から海へと流れ込んだ氷の底面がやがて基盤から離れ，氷床とつながったまま海に浮いた棚氷となる．南極の棚氷は氷床面積の 12%に相当し，氷の厚さは数 100 m から 2000 m にまで及ぶ（Griggs and Bamber, 2011）．基盤に接地した氷と棚氷との境界は接地線（grounding line）と呼ばれ，その総延長は 5.4×10^4 km と報告されている（Bindschadler et al., 2011）．氷床の表面標高は内陸で 4000 m に達する一方で，氷の底面，すなわち大陸基盤が海水面よりも低くなっている地域がある．特に西南極（West Antarctica）では広い範囲で基盤標高が海水面を下回っており，東南極（East Antarctica）とは異なった様相を呈している（図 1）．

南極に氷として蓄積された水は地球に存在する淡水の 60%以上を占め，巨大な淡水リザーバとしての役割を担っている．従ってその量が変化すれば，地球環境に著しい影響を与える．氷床の変動がもたらす重要な環境変化のひとつは海水準変動である．南極氷床の氷が全て融けて海に流れ込めば，58.3 m の海水面上昇が起きる（Fretwell et al., 2013）．また海洋への淡水流入は塩分の変化を通じて（本巻の青木を参照），南極沿岸および地球規模の海洋循環にインパクトを与える（本巻の勝又，草原を参照）．また，氷床が気候・気象に果たす役割も大きい．例えば氷床表面はアルベド（光の反射率）が非常に高いため，全球の表面熱収支を考える上で特に重要である．また，氷床内陸で冷やされ，沿岸へと吹き降ろす強い大気の流れはカタバ風と呼ばれ，南極域における特徴的な気象現象となっている．さらに，氷の上載荷重によって大陸基盤が数 100 m 沈降しており，過去の氷床変動に追従して現在も年間数 mm の基盤隆起が続いている（e.g. Whitehouse et al., 2012; 本巻の奥野を参照）．このほか氷床の流動が基盤を削ると同時に堆積物を輸送することで，地形の形成に主要な役割を果たす．南極沿岸の海底地形には氷床が形成した地形が残されており，氷床変動復元の手がかりとなっている（e.g. Livingstone et al., 2012）．

2．南極氷床の質量収支と流動

氷河氷床が雪や氷を蓄積するプロセスを涵養（accumulation），逆に失うプロセスを消耗（ablation）と呼ぶ．

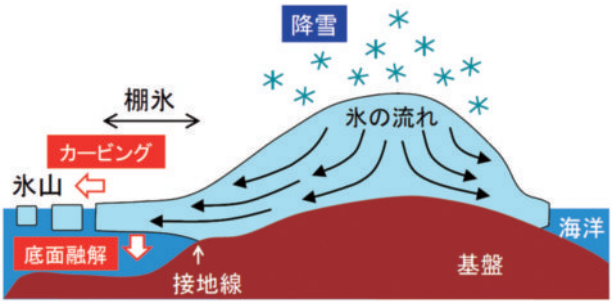


図 2：南極氷床の縦断面を示す概念図．主要な涵養・消耗プロセスを青四角と赤四角で示す．

涵養から消耗を差し引いた量は質量収支（mass balance）と呼ばれ，氷河氷床の質量変化を示す．山岳氷河の多くでは，降雪と氷河表面での雪氷融解のバランスで質量収支が決まり，これら氷河の表面で起きる涵養と消耗のバランスを表面質量収支（SMB: surface mass balance）という．これに対して南極氷床の質量収支はやや特殊で，表面質量収支に加えて，氷床沿岸で起きるカービング（calving）と棚氷の底面融解が重要である．カービングとは，氷河氷床が水中に氷山を分離する現象を指し，末端が海や湖に流入する氷河，すなわちカービング氷河を特徴づける消耗プロセスである．一方，棚氷の底面融解は，海洋に広くせり出した棚氷の底面が海水中で融解する現象である．どちらも氷床周縁部で氷と海洋との境界で起きる現象であり，南極氷床が海洋との相互作用を受けて変動する原因となっている（図 2）．

南極で年間どのくらいの降雪があるかご存知だろうか．実は私たちが想像するほど多くの雪は降らない．特に標高が高く海から離れた内陸は大気が寒冷かつ乾燥していて，年間の降水量は水当量で 100 mm 以下である（Arthern et al., 2006; Lenaerts et al., 2012）．例えば札幌では，冬の 1 カ月あたり水当量で 100 mm 程度の降雪は普通である．それでも南極に巨大な氷床が存在するのは，雪が融けずにそのまま蓄積されるからである．実際，南極における雪氷の融解は，夏のごく短い期間に沿岸でわずかに生じるのみである．氷床沿岸，特に棚氷表面に生じる融解水が氷床変動に影響を与える可能性が近年注目されているものの（Bell et al., 2017; Kingslake et al., 2017），雪氷融解が表面質量収支に占める割合は少ない．したがってカービングと棚氷底面融解の重要性が推測できるが，特に棚氷底面融解の測定は非常に困難で，南極氷床消耗プロセスの実態が解明されたのは最近のことである．人工衛星データを用いた解析によって棚氷の底面融解が定量化された結果，カービングと棚氷底面融解が氷床消耗に占める割合はほぼ同等もしくは後者がやや上回ることが判明した（Depoorter et al., 2013; Rignot et al., 2013）．

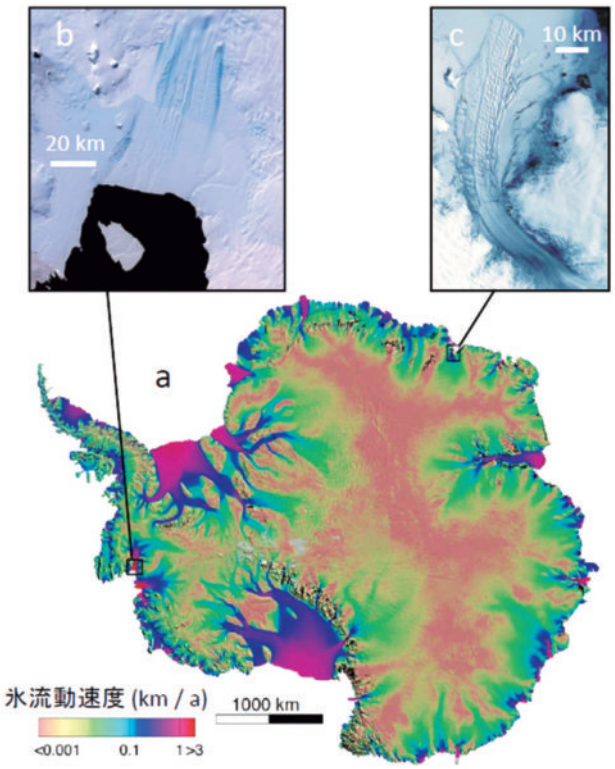


図 3：(a) 南極氷床表面の流動速度分布（Mouginot et al., 2017 に加筆）．(b) パインアイランド氷河（2002 年 Landsat 画像）および (c) しらせ氷河の人工衛星画像（1973 年 Landsat 画像）．単位は年間あたりの流動距離．

氷河氷床の変動を考える上で質量収支と並んで重要なのが氷の流動である．氷河流動は，ハチミツのような性質を持った氷の粘性変形，及びその底面が融解している時に生じる底面滑りと底面堆積物の変形によって起きる．流動は氷河の上流で涵養された氷を下流に運搬して，低標高域で生じる消耗を補う役割を担っている．南極氷床の消耗はそのほとんどが周縁部で起きるため，内陸から沿岸への流動が特に重要といえる．

南極における氷流動の重要性は早くから理解されていたものの，氷床全域で流動速度が明らかになったのは近年のことである（Rignot et al., 2011a; Mouginot et al., 2017）（図 3）．その様相は，粘性流動によって比較的ゆっくり流動する地域と，氷河・氷流（ice stream）・溢流（いつりゅう）氷河（outlet glacier）と呼ばれる速い流れが氷を海に流し出す沿岸域に分けられる．溢流氷河の底面は融解しており，基盤上の氷の滑り，または氷の下に堆積したやわらかい土砂の変形によって，年間数 km にも及ぶ流動が発生する．厚い氷の底面を観測するのは非常に困難で，溢流氷河の流動に関する直接的な証拠は，西南極の氷流で

実施された掘削孔測定で得られているのみである（e.g. Kamb, 2001）．最新の観測データは，一部の溢流氷河が急激に加速して，氷床質量減少の原因となっていることを示している．したがって，速い流動のメカニズム解明が急務となっている．

3．南極氷床における近年の質量変動

南極氷床の面積は日本国土の 37 倍に相当し，全域でその質量変化を正確に測定することは難しい．そのため，氷床の全質量変化がある程度正確に見積もられるようになったのは 21 世紀に入ってからのことである（van den Broecke et al., 2011）．例えば 2001 年に出版された IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第 3 次レポートでは氷床質量が増加傾向にあると記されているのに対し（Church et al., 2001），2007 年の第 4 次レポートでは逆に減少傾向が示された（Bindoff et al., 2007）．その後は新しい技術の開発と複数の手法による測定データの比較が進み（Shepherd et al., 2012; Hanna et al., 2013），質量変化の測定に関する信頼性は上がりつつある．

氷床質量変化の測定が可能となったのは，人工衛星を使った観測技術の発展による（詳細は本巻の福田を参照）．まず ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) や CryoSat に代表される衛星に搭載されたレーザー・レーダー高度計によって，精密な地球表面標高観測が行われるようになった．この手法によって氷床表面を継続的に測定すれば，氷体積の変化が測定できる（e.g. Pritchard et al., 2009; McMillan et al., 2014）．また，衛星データによって測定した氷の流動速度から海洋への氷フラックス（カービングと棚氷底面融解の和）を推定し，表面質量収支と比較することによって各流域での質量変化が算出できるようになった（e.g. Rignot et al., 2008, 2011b）．この手法はインプット・アウトプット法（input-output method）と呼ばれ，その実現には領域気象モデル（RCM: regional climate model）による表面質量収支の計算精度向上が貢献している（e.g. van den Broecke et al., 2006; Lenaerts et al., 2012）．さらに 2002 年には全球の重力分布を測定する人工衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) が打ち上げられて，氷床質量を直接的に測定することが可能となった（e.g. Velicogna and Wahr, 2006; King et al., 2012）．上記 3 つの手法はそれぞれに長所と短所がある．例えば高度計による測定は空間分解能に優れているものの，標高変化から質量変化を求めるためには積雪の密度を考慮する必要がある．一方，重力測定は直接質量変化を測定することができるが，空間分解能が低く，氷床下で変動する地殻の影響（本巻の奥野を参照）を除く必要がある．

これらの新しい技術によって氷床質量変化が測定されるようになって約 10 年．データが蓄積され，独立した測定結果が相互に比較されている．その結果，南極において氷が近年減少していることが明らかになってきた．IPCC 第 5 次レポートでは最新の研究成果をとりまとめて，南極における 1993–2010 年の氷質量変化速度を -135 から -58 Gt a^{-1}（10^9 t a^{-1}）と示した（Vaughan et al., 2013）．この値は年間 0.37–0.16 mm の海水準上昇に相当する．2005–2010 年における変化速度は -221 から -74 Gt a^{-1} とされており，質量損失が近年増加している可能性がある．同じ期間にグリーンランドではより多くの氷が失われており，損失速度の加速傾向もはっきりしている（1993–2010 年：-149 から -94 Gt a^{-1}，2005–2010 年：-290 から -169 Gt a^{-1}）（Vaughan et al., 2013）．体積では南極氷床の 1/10 に過ぎないグリーンランド氷床でより多くの氷が失われているのは，表面融解が消耗に占める割合が大きく，北極域の急激な温暖化によって融解量が増えていることが主要因である．一方の南極氷床では，期間によっては氷が増加傾向にあったとする主張もあり（Zwally et al., 2015），現在起きている質量変化の大きさに対して測定の精度は十分でない．今後巨大な南極氷床がどのように変動するのか，観測の継続と測定精度の向上，さらに数値モデルを使った気候変動への応答予測が求められている（Hanna et al., 2013; 本巻の齋藤・グレーベを参照）．

4．南極氷床と海洋の相互作用

前節で示した南極氷床の質量変化は，地域によってその傾向が大きく異なる．特に西南極沿岸の一部で非常に大きな氷損失が観測されており，海洋との相互作用が重要な役割を果たしていることが明らかになってきた（e.g. Pritchard et al., 2009; Vaughan et al., 2013）（図 4）．南極氷床の周縁はその 93％が海洋に接しており，そのうち 74％が浮氷（棚氷または氷河の浮氷舌）を形成している（Bindschadler et al., 2011）（図 5）．そして氷床のほぼ全周を縁取る氷と海の境界で，主要な消耗プロセスであるカービングと棚氷底面融解が起きている．したがって，南極氷床の質量変動を考える上で海洋との相互作用が重要なのは当然である．特に最近の観測データによって，海洋が氷床に与える影響の重要性が強く認識されるようになった．

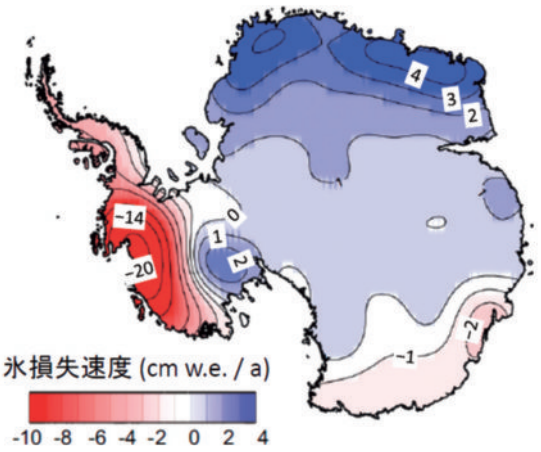


図 4：南極氷床における 2006–2012 年の氷損失速度分布（Vaughan et al., 2013 に加筆）．単位は年間当たりの損失量を水当量に換算したもの．

2000 年頃，西南極最大の氷流出量を持つパインアイランド氷河で，急激な氷河末端の後退と氷河流動の加速，数 100 km 内陸にまで及ぶ氷厚減少が報告された（Rignot, 1998; Shepherd et al., 2001; Joughin et al., 2003）．また南極半島ではラーセン棚氷が相次いで崩壊し．それに続いて棚氷に流入する氷河の流動の加速が観測された（Scambos et al., 2003, 2004）．これらの氷河変動はそれまで南極で起きうると考えられていた変動よりもずっと急激で，海洋の変化による棚氷の融解加速がその原因として指摘された．さらに南極の主要な棚氷で観測された底面融解は過去の予想よりも大きく，各地域の海水温度と良い相関関係にあることが示された（Rignot and Jacobs, 2002）．その後，南極沿岸における氷床変動と棚氷融解の研究は大きく進展し，近年の氷床質量損失が棚氷の底面融解によって駆動されていることが明らかになった．質量損失が著しい西南極では棚氷の氷厚減少が進んでおり（Paolo et al., 2015），そのような地域では比較的暖かい海水が氷床と接していることが示されている（Pritchard et al., 2012）．これらの観測結果によって，南極氷床が海洋環境の変化に敏感な反応を示し，海洋との相互作用によって 10 年程度のごく短い時間スケールで大きく変動し得ることが認識されたのである．

近年，南極各地で様々な研究が実施され，氷河と棚氷の急激な変化に関する観測データが蓄積されると共に，氷床変動メカニズムの理解が進んでいる．特に氷の底面が海水面よりも低く，上流側に向けて底面標高が低くなる場合，急速な氷流の加速と氷厚減少を伴って氷河が後退することが明らかになってきた（e.g. Schoof, 2007; Jamieson et al., 2012）．パインアイランド氷河が位置する西南極アムンゼン湾では複数の氷河が著しく後退し，底面地形の影響を受けて今後も後退が進む可能性が指摘

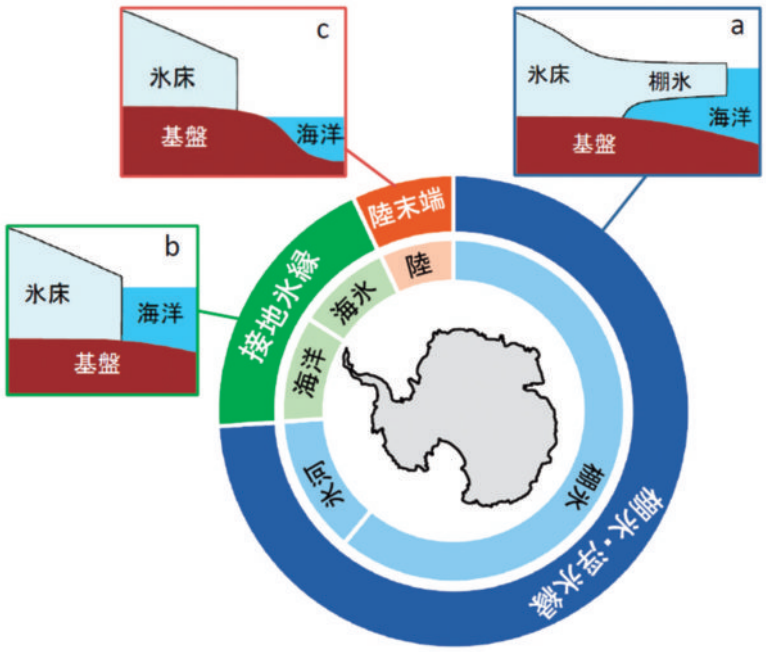


図 5：南極氷床周縁において，それぞれの氷床地形が占める割合．氷床周縁が棚氷または溢流氷河末端の浮氷を形成している場合を青（模式図 a），氷床が接地した状態で海洋または海氷に面している場合を緑（模式図 b），陸上に氷床末端がある場合を茶で示す（模式図 c）．データと氷床地形の分類は Bindschadler et al. (2011) による．

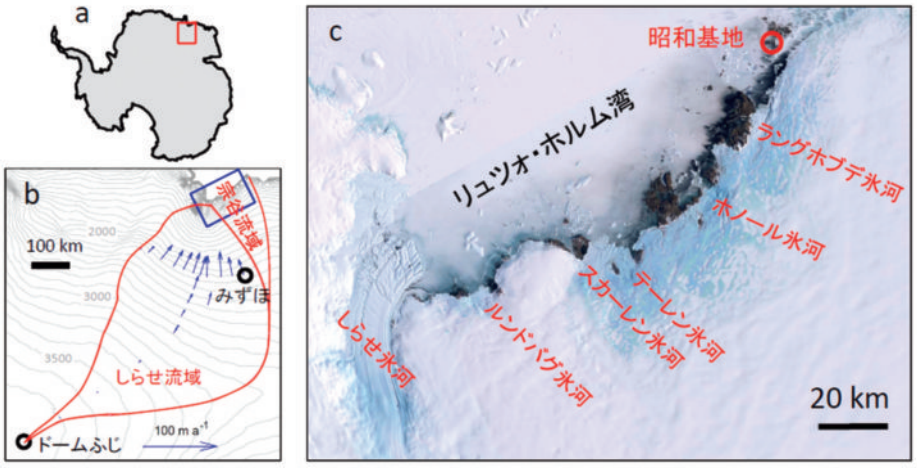


図 6：(a) 南極におけるしらせ・宗谷流域の位置．(b) しらせ・宗谷流域を赤枠で示す．矢印は実測された流動速度（Motoyama et al., 2008）．青枠は (c) に示す衛星画像の位置．表面標高を示す等高線の間隔は 100 m．(c) リュツォ・ホルム湾の人工衛星画像に昭和基地と主要な氷河の位置を示す．

されている（Mouginot et al., 2014; Rignot et al., 2014; Joughin et al., 2014）．基盤が広い範囲で海水面下にある西南極は本質的に不安定であり，小さな外力によって崩壊し得るとの仮説が提唱されている（Mercer, 1978）．これに対して基盤標高が海面よりも高い東南極では，氷床が比較的安定に存在すると考えられている．実際，現在質量を大きく失っているのは西南極の沿岸部であり，東南極では逆に質量増加傾向にあるとの見方がある（Shepherd et al., 2012）．

氷床変動の直接的データが次々と報じられると同時に，氷床を取り巻く海洋の変化，氷床・海洋相互作用の重要性を示す研究成果が報告されている．長期の海洋観測データは棚氷の融解が進む西南極で海水が温暖化していることを示し（Schmidtko et al., 2014），海洋環境が気候や海氷に影響を受けて変化するメカニズムが明らかになってきた（e.g. Hellmer et al., 2012; Darelius et al., 2015）．さらに掘削孔や自動無人潜水艇を使った棚氷下の海洋観測，特殊な氷レーダを使った底面融解測定なども観測例が増え，棚氷下の海洋循環，底面融解，環境変化などの直接的な証拠が示されている（e.g. Hattermann et al., 2012; Nicholls et al., 2006, 2012, 2015; Herraiz-Borreguero et al., 2013）．特に前述したパインアイランド氷河では氷床と海洋の両面から様々な研究が進められており，氷床・海洋相互作用を理解する上で重要な成果が挙がっている（Jenkins et al., 2010; Stanton et al., 2013; Dutrieux et al., 2014）．

5．東南極昭和基地周辺における氷床変動

過去 60 年間にわたる日本の南極観測は，東南極のリュツォ・ホルム湾に面した昭和基地を中心に実施されてきた（図 6）．昭和基地が位置する宗谷海岸には海に流れ込む溢流氷河がいくつも存在し，宗谷流域と呼ばれる氷床流域の末端部分を形成している（図 6）．また，宗谷流域のすぐ西側には，南極で最も流動の速い氷河のひとつであるしらせ氷河がある．しらせ氷河は内陸に広がるしらせ流域の末端であり，深層アイスコア掘削が行われたドームふじ基地はこの流域の源頭に当たる（図 6）．東南極は現在のところ大きな質量損失は報告されておらず，比較的安定，または地域によっては質量が増加している可能性がある．しかしながら，東南極に蓄えられた氷量は西南極と比較して大きく，その変動が南極氷床に与える影響は大きい．長年の観測データが蓄積された昭和基地周辺では，氷床がどのような変化を示しているのであろうか．

1969 年から 1974 年にかけて，しらせ氷河の中流域で氷の流動速度が綿密に測定された結果，この地域で氷が流動によって伸ばされて急激に薄くなっていることが判明した（Mae and Naruse, 1978; Naruse, 1979）．しらせ氷河の流動加速がその原因として提案されており，現在の西南極と良く似た現象が起きていた可能性があり興味深い．その後の 1980 年代に実施された観測でも，同程度の氷減少を示すデータが報告されている（Nishio et al., 1989; Toh and Shibuya, 1992）．その一方で，海洋への氷フラックスと表面質量収支の比較から，しらせ流域の氷質量が近年ほとんど変化していないことも示されている

(Fujii, 1981; Nakamura et al., 2016). これらの結果は，しらせ氷河の中流域で氷が失われる一方で，その他の地域，例えば内陸部で氷の量が増えていることを示唆するものである．しらせ流域は下流部で収束して，幅約 10 km のしらせ氷河末端から大量の氷が流出している（図 6）．したがって，しらせ氷河の流動状態が流域の質量変化に重要であることは間違いなく，その経年変化と流動メカニズムの理解が必要である．人工衛星データを用いた流動速度や接地線の測定（Yamanokuchi et al., 2005; Nakamura et al., 2010），GPS (global positioning system) や氷レーダを用いた観測が実施されており（Aoyama et al., 2013），今後の発展が期待される．

また宗谷海岸に位置するラングホブデ氷河では，2012 年に棚氷の接地線付近で熱水掘削が実施された (Sugiyama et al., 2014)．接地域と呼ばれる接地線近傍での全層掘削と氷床底面観測は，南極において初めての試みである．この掘削によって，それまで接地線と考えられていた地点からさらに内陸側に薄い海水層が広がっていることが判明した．掘削孔を使って観測を行ったところ，棚氷下の海水は氷河前の海洋と似た特性を示した (Ohshima et al., 1996)．この結果は，外洋から比較的暖かい海水が流入して，棚氷の底面融解に必要な熱を供給していることを示唆する．さらに掘削孔カメラの映像と海水サンプリングによって，冷たく暗く狭い環境に各種の生物が見いだされた．熱水掘削による底面観測は，棚氷底面融解の他，氷床の底面流動や水理環境，氷底湖など，未知の環境探査に有効な手段である．このようにして得られる直接的な観測データを，広域での衛星解析と組み合わせることが，南極氷床の変動メカニズムを理解する上で重要である．例えば，人工衛星データを用いた解析によって，氷河前の海氷状態がラングホブデ氷河の末端変動に与える影響が示唆されており（Fukuda et al., 2014），現地観測データと合わせた解析によって，大気・海氷・海洋と氷河との相互作用を総合的に理解する試みが進んでいる．

参考文献

Aoyama, Y., K. Doi, K. Shibuya, H. Ohta and I. Tsuwa (2013) Near-realtime monitoring of ice flow in the floating ice tongue of Shirase Glacier through low-cost GPS buoys. *Earth Planets Space*, **65**, 103–108.

Arthern, R. J., D. P. Winebrenner and D. G. Vaughan (2006) Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D06107.

Bell, R. E., W. Chu, J. Kingslake, I. Das, M. Tedesco, K. J. Tinto, C. J. Zappa, M. Frezzotti, A. Boghosia and W. S. Lee (2017) Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river. *Nature*, **544**, 344–348.

Bindoff, N. L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, K. C. Le Quere, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. D. Talley and A. S. Unnikrishnan (2007) Observations: oceanic climate change and sea level. In: Solomon, S. D. et al. (eds.) *Climate change 2007: The Physical Science Basis*, 387–429. Cambridge University Press, Cambridge.

Bindschadler, R. A. et al. (2011) Getting around Antarctica: New high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International Polar Year. *The Cryosphere*, **5**, 569–588.

Church, J. A., J. M. Gregory, P. Huybrechts, M. Kuhn, K. Lambeck, M. T. Nhuan, D. Qin and P. L. Woodworth (2001) Changes in sea level. In: Houghton, J. T. et al. (eds.) *Climate change 2001: The Scientific Basis*, 639–694. Cambridge University Press, Cambridge.

Darelius, E., I. Fer and K. W. Nicholls (2015) Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water. *Nature Communications*, **7**: 12300, doi:10.1038/ncomms1230.

Depoorter, M. A., J. L. Bamber, J. A. Griggs, J. T. M. Lenaerts, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke and G. Moholdt (2013) Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, **502**, 89–92.

Dutrieux, P., J. De Rydt, A. Jenkins, P. R. Holland, H. K. Ha, S. H. Lee, E. J. Steig, Q. Ding, E. P. Abrahamsen and M. Schröder (2014) Strong sensitivity of Pine Island ice-shelf melting to climatic variability. *Science*, **343**, 174–178.

Fretwell, P. et al. (2013) Bedmap2: Improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 375–393.

Fujii, Y. (1981) Aerophotographic interpretation of surface features and estimation of ice discharge at the outlet of the Shirase drainage basin, Antarctica. *Antarctic Record*, **72**, 1–15.

Fukuda, T., S. Sugiyama, T. Sawagaki and K. Nakamura (2014) Recent variations in the terminus position, ice velocity and surface elevation of Langhovde Glacier, East Antarctica. *Antarctic Science*, **326**(6), 636–645.

Griggs, J. A. and J. L. Bamber (2011) Antarctic ice-shelf thickness from satellite radar altimetry. *Journal of Glaciology*, **57**(203), 485–497.

Hanna, E., F. J. Navarro, F. Pattyn, C. M. Domingues, X. Fettweis, E. R. Ivins, R. J. Nicholls, C. Ritz, B. Smith, S. Tulaczyk, P. L. Whitehouse and H. J. Zwally (2013) Ice-sheet mass balance and climate change. *Nature*, **498**, 51–59.

Hattermann, T., O. A. Nøst, J. M. Lilly and L. H. Smedsrud (2012) Two years of oceanic observations below the Fimbul Ice Shelf, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, **39**,

L12605, doi:10.1029/2012GL051012.

Hellmer, H. H., F. Kauker, R. Timmermann, J. Determann and J. Rae (2012) Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature*, **485**, 225–228.

Herraiz-Borreguero, L., I. Allison, M. Craven, K. W. Nicholls and M. A. Rosenberg (2013) Ice shelf/ocean interactions under the Amery Ice Shelf: Seasonal variability and its effect on marine ice formation. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **118**, 7117–7131.

Jamieson, S. S. R., A. Vieli, S. J. Livingstone, C. Ó. Cofaigh, C. Stokes, C. -D. Hillenbrand and J. A. Dowdeswell (2012) Ice-stream stability on a reverse bed slope. *Nature Geoscience*, **5**(11), 799–802.

Jenkins, A., P. Dutrieux, S. S. Jacobs, S. D. McPhail, J. R. Perrett, A. T. Webb and D. White (2010) Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nature Geoscience*, **3**, 468–472,

Joughin, I., E. Rignot, C. E. Rosanova, B. K. Lucchitta and J. Bohlander (2003) Timing of recent accelerations of Pine Island Glacier, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, **30** (13), 1706. doi:10.1029/2003GL017609.

Joughin, I., B. E. Smith and B. Medley (2014) Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science*, **344**, 735–738.

Kamb, B. (2001) Basal zone of the West Antarctic Ice Streams and its role in lubrication of their rapid motion. In: Richard B. A. et al. (eds.) *The West Antarctic Ice Sheet: Behavior and Environment, Antarctic Research Series*, **77**, 157–200. AGU, Washington, D. C.

King, M. A., R. J. Bingham, P. Moore, P. L. Whitehouse, M. J. Bentley and G. A. Milne (2012) Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution. *Nature*, **491**, 586–589.

Kingslake, J., J. C. Ely, I. Das and R. E. Bell (2017) Widespread movement of meltwater onto and across Antarctic ice shelves. *Nature*, **544**, 349–352.

Lenaerts, J. T. M., M. R. van den Broeke, W. J. van de Berg, E. van Meijgaard and P. K. Munneke (2012) A new, high-resolution surface mass balance map of Antarctica (1979–2010) based on regional atmospheric climate modeling. *Geophysical Research Letters*, **39**, L04501, doi:10.1029/2011GL050713.

Livingstone, S. J., C. Ó Cofaigh, C. R. Stokes, C. -D. Hillenbrand, A. Vieli and S. S. R. Jamieson (2012) Antarctic palaeo-ice streams. *Earth-Science Reviews*, **111**, 90–128.

Mae, S. and R. Naruse (1978) Possible cause of ice sheet thinning in the Mizuho Plateau. *Nature*, **273**, 291–292.

McMillan, M., A. Shepherd, A. Sundal, K. Briggs, A. Muir, A. Ridout, A. Hogg and D. Wingham (2014) Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2. *Geophysical Research Letters*, **41**, 3899–3905.

Mercer, J. H. (1978) West Antarctic ice sheet and CO_2 greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*, **271**, 321–325.

Motoyama, H., T. Furukawa and F. Nishio (2008) Study of ice flow observations in Shirase drainage basin and around Dome Fuji area, East Antarctica by differential GPS method. *Antarctic Record*, **52**, 216–231. (in Japanese)

Mouginot, J., E. Rignot and B. Scheuchl (2014) Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013. *Geophysical Research Letters*, **41**, 1576–1584.

Mouginot, J., E. Rignot, B. Scheuchl and R. Millan (2017) Comprehensive annual ice sheet velocity mapping using Landsat-8, Sentinel-1, and RADARSAT-2 data. *Remote Sensing*, **9**(364), 3899–3905.

Nakamura, K., K. Doi and K. Shibuya (2010) Fluctuations in flow velocity of the Antarctic Shirase Glacier over an 11-year period. *Polar Science*, **4**(3), 443–455.

Nakamura, K., K. Doi and K. Shibuya (2016) Net mass balance calculations for the Shirase Drainage Basin, east Antarctica, using the mass budget method. *Polar Science*, **10**(3), 111–122.

Naruse, R. (1979) Thinning of the ice sheet in Mizuho Plateau, East Antarctica. *Journal of Glaciology*, **24**(90), 45–52.

Nicholls, K. W. et al. (2006) Measurements beneath and Antarctic ice shelf using an autonomous underwater vehicle. *Geophysical Research Letters*, **33**, L08612, doi:10.1029/2006GL025998.

Nicholls, K. W., K. Makinson and E. J. Venables (2012) Ocean circulation beneath Larsen C Ice Shelf, Antarctica from in situ observations. *Geophysical Research Letters*, **39**, L19608, doi:10.1029/2012GL053187.

Nicholls, K. W., H. F. J. Corr, C. L. Stewart, L. B. Lok, P. V. Brennan and D. G. Vaughan (2015) A ground-based radar for measuring vertical strain rates and time-varying basal melt rates in ice sheets and shelves. *Journal of Glaciology*, **61**(230), 1079–1087.

Nishio, F., S. Mae, H. Ohmae, S. Takahashi, M. Nakawo and K. Kawada (1989) Dynamical behavior of the ice sheet in Mizuho Plateau, East Antarctica. *Proceedings of NIPR Symposium, Polar Meteorology and Glaciology*, **2**, 97–104.

Ohshima, K. I., T. Takizawa, S. Ushio and T. Kawamura (1996) Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lützow-Holm Bay. *Journal of Geophysical Research*. **101**(C9), 20617–20628.

Paolo, F. S., H. A. Fricker and L. Padman (2015) Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327–331.

Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan and L. A. Edwards (2009) Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, **461**, 971–975.

Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke and L. Padman (2012)

Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature,* **484**, 502–505.

Rignot, E. (1998) Fast recession of a West Antarctic glacier. *Science*, **281**, 549–551.

Rignot, E. and S. S. Jacobs (2002) Rapid bottom melting widespread near Antarctic ice sheet grounding lines. *Science*, **296**, 2020–2023.

Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg and E. van Meijgaard (2008) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, **341**, 266–270.

Rignot, E., J. Mouginot and B. Scheuchl (2011a) Ice flow of the Antarctic ice sheet. *Science*, **333**, 1427–1430.

Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan and J. Lenaerts (2011b) Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, **38**, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.

Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot and B. Scheuchl (2013) Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, **341**, 266–270.

Rignot, E., J. Mouginot, M. Morlighem, H. Seroussi and B. Scheuchl (2014) Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, **41**, 3502–3509.

Scambos, T., C. Hulbe and M. Fahnestock (2003) Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. In: Domack, E. et al. (eds.) *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives, Antarctic Research Series*, **79**, 79–92. AGU, Washington, D. C.

Scambos, T. A., J. A. Bohlander, C. A. Shuman and P. Skvarca (2004) Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, **31**, L18402, doi:10.1029/2004GL020670.

Schmidtko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson and S. Aoki (2014) Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, **346**, 1227–1231.

Schoof, C. (2007) Ice sheet grounding line dynamics: Steady states, stability, and hysteresis. *Journal of Geophysical Research*, **112**, F03S28, doi:10.1029/2006JF000664.

Shepherd, A., D. J. Wingham, J. A. D. Mansley and H. F. J. Corr (2001) Inland thinning of Pine Island Glacier, West Antarctica. *Science*, **291**, 862–864.

Shepherd, A. et al. (2012) A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, **338**, 1183–1189.

Stanton, T. P., W. J. Shaw, M. Truffer, H. F. J. Corr, L. E. Peters, K. L. Riverman, R. Bindschadler, D. M. Holland and S. Anandakrishnan (2013) Channelized ice melting in the ocean boundary layer beneath pine island glacier, Antarctica. *Science*, **341**, 1236–1239.

Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki (2014) Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier. *Earth and Planetary Science Letters*, **399C**, 52–60.

Toh, H. and K. Shibuya (1992) Thinning rate of ice sheet on Mizuho Plateau, East Antarctica, determined by GPS differential positioning. In: Yoshida, Y. et al. (eds.) *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, 579–583. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.

van den Broecke, M., W. J. van de Berg and E. van Meijgaard (2006) Snowfall in coastal West Antarctica much greater than previously assumed. *Geophysical Research Letters*, **33**, L02505, doi:10.1029/2005GL025239.

van den Broecke, M. R., J. Bamber, J. Lenaerts and E. Rignot (2011) Ice sheets and sea level: thinking outside the box. *Survey Geophysics*, **32**, 495–505.

Vaughan, D. G., J. C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang (2013) Observations: Cryosphere. In: Stocker, T. F. et al. (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, 317–382. Cambridge University Press, Cambridge.

Velicogna, I. and J. Wahr (2006) Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, **311**, 1754–1756.

Whitehouse, P. L., M. J. Bentley, G. A. Milne, M. A. King and I. D. Thomas (2012) A new glacial isostatic adjustment model for Antarctica: Calibrated and tested using observations of relative sea-level change and present-day uplift rates. *Geophysical Journal International*, **190**, 1464–1482.

Yamanokuchi, T., K. Doi and K. Shibuya (2005) Validation of grounding line of the East Antarctic ice sheet derived by ERS-1/2 interferometric SAR data. *Polar Geoscience*, **18**, 1–14.

Zwally, H. J. and J. Li, J. W. Robbins, J. L. Saba, D. Yi and A. C. Brenner (2015) Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses. *Journal of Glaciology*, **61**(230), 1019–1036.