HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	グリーンランド南東ドームにおける浅層アイスコア掘削と初期物理解析
Author(s)	飯塚, 芳徳; 的場, 澄人; 藤田, 秀二 他
Citation	低温科学, 75, 45-52
Issue Date	2017-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.75.45
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65082
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_45-52.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 75 （2017） 45–52
doi: 10.14943/lowtemsci. 75. 45

グリーンランド南東ドームにおける浅層アイスコア掘削と初期物理解析

飯塚　芳徳[1)]，的場　澄人[1)]，藤田　秀二[2)]，新堀　邦夫[1)]，山崎　哲秀[3)]，宮本　淳[4)]，堀　彰[5)]，斉藤　健[1)]，古川　崚仁[1)]，杉山　慎[1)]，青木　輝夫[6)]

2016 年 10 月 28 日受付，2017 年 1 月 16 日受理

グリーンランドにおける高涵養量域の圧密氷化過程の特徴の解明や近年の人為起源エアロゾルの変遷の解読を目的として，2015 年 5 月にグリーンランド南東ドームにおいて，90.45 m の浅層コア掘削を実施した．掘削地点はタシーラク（アンマサリック）から 185 km 北に位置している（SE-Dome；67.18°N，36.37°W，3170 m a.s.l.）．掘削孔の氷温は 20 m 深において－20.9℃であった．2015 年 8 月にコアが日本に輸送され，低温科学研究所の低温室において密度測定や電気伝導度測定などの初期コア解析が行われた．その結果，SE-Dome コアの氷化深度は 83–86 m，涵養量は約 1.0 m w.e. yr^{-1} であった．SE-Dome コアは氷床のドームとしては最も高涵養量の地域の一つである．圧密氷化過程を調べたところ，750 kg m^{-3} 以上の密度域において，SE-Dome コアは通常の涵養量地域の浅層コアよりも変形しやすい特徴を持つことが分かった．

Shallow ice core drilling and preliminary analysis at South-East Dome, Greenland

Yoshinori Iizuka[1]*, Sumito Matoba[1], Shuji Fujita[2], Kunio Shinbori[1], Tetsuhisa Yamasaki[3], Atsushi Miyamoto[4], Akira Hori[5], Takeshi Saito[1], Ryoto Furukawa[1], Shin Sugiyama[1], Teruo Aoki[6]

In order to understand 1) temporal variations of anthropogenic aerosols from European regions under the Icelandic Low with high time resolution, and 2) the snow densification mechanism at a high accumulation dome in Greenland, we drilled a 90.45 m ice core in a high accumulation area of the southeastern Greenland Ice Sheet. The drilling site (SE-Dome; 67.18°N, 36.37°W, 3170 m a.s.l.) is located 185 km north of the town of Tasiilaq in southeastern Greenland. The ice temperature is −20.9℃ at 20 m depth, and the site has an average accumulation rate of 1.0 m w.e. yr^{-1} in water equivalent. The ice core exhibits distinct firn densification. The close-off density of 830 kg m^{-3} occurs at 83.4–86.8 m depth, which is about 20 m shallower than predicted from an empirical model. In the region where the density $\rho > 750$ kg m^{-3}, the densification appears faster than according to the empirical model.

キーワード：グリーンランド氷床，南東ドーム，アイスコア，圧密氷化
Greenland Ice Sheet, South-East Dome, ice core, snow densification

連絡先
飯塚　芳徳
e-mail：iizuka@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
2）大学共同利用機関法人　情報・システム研究機構　国立極地研究所
National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan
3）アバンナット
Avangnaq, Takatsuki, Japan
4）北海道大学高等教育推進機構
Institute for the Advancement of Higher Education, Hokkaido University, Sapporo, Japan
5）北見工業大学社会環境工学科
Kitami Institute of Technology, Kitami, Japan
6）岡山大学大学院自然科学研究科
Okayama University, Okayama, Japan

1．はじめに

極地氷床で掘削されるアイスコアは古環境を復元する有力なツールである．極地氷床の高標高地域は広域の環境情報を記録している．特にドームと呼ばれる氷床の頂上は他からの氷の移流がないために精度の良い古環境復元をするうえで良い場所である．こういった背景からこれまで多くの氷床コア掘削が行われてきた．南極においては Dome Fuji（Watanabe et al., 2003），EPICA DML（EPICA community members, 2006），EPICA Dome C（EPICA community members, 2004），グリーンランドにおいては GRIP（Greenland Ice-core Project Members, 1993），GISP2（Grootes et al., 1993），NGRIP（North Greenland Ice Core Project Members, 2004）などが代表的な代表的な氷床ドームコアの掘削地であるである．一般的にこれらの氷床ドームコアは 1）乾燥しているために低涵養地域，2）高緯度で標高が高いために低温地域という特徴がある．こういった低温低涵養量地域の氷床コアは融解の影響が少なく，数十万年にわたる古環境の復元を可能にする．しかしながら，低涵養量は古環境を復元できる時間分解能を粗くし，極端に低涵養量な地域に於いては一年間堆積が欠損しうる（Kameda et al., 2008）という短所がある．

グリーンランド氷床は北半球の人間活動圏に近く，過去の人為起源物質を保存している．代表的な人為起源物質は硫酸塩，硝酸塩，有機物，ブラックカーボンなどが挙げられる（IPCC, 2013）．これらのエアロゾルはグリーンランドの各地域で堆積環境が異なる（e.g. Fischer et al., 1998）．北西部では偏西風の影響を受け，南東部ではアイスランド低気圧の影響を受けやすい（Buchardt et al., 2012）．北西部のアイスコアはアジアなどから長距離輸送される人為起源物質を含んでいる（Bory et al., 2014）．他方で，南東部ではいわゆる産業革命後の欧州や北米由来の人為起源物質を保存している（McConnell et al., 2008）．数十年スケールの気候変動としては北極振動（Arctic Oscillation）や北大西洋振動（North Atlantic Oscillation）が地域的な気象状態，気温，降水量に影響を与えていると考えられる．こういったグリーンランドの地域による堆積環境や気候の違いについては，多点浅層掘削によるプロジェクトが行われている（United States, PARCA project; German, NGT project; e.g. McConnell et al., 2006）．しかしながら，南東部は多点浅層掘削があまり行われていない地域であり，古環境復元研究が不十分である．

我々はグリーンランド南東部の高涵養ドームにおいて，浅層掘削を実施した．この掘削の目的はグリーンランドにおける高涵養量域の圧密氷化過程の特徴を解明し，近年の人為起源エアロゾルの変遷を解読するためである．この地域は日本の雪氷学コミュニティーにとってフロンティアであり，ロジスティクスからの取り組みとなった．本稿では，すでに学術誌に掲載されている論文（Iizuka et al., 2016a; 2016b）を参考にし，掘削プロジェクトと国内初期解析の概要を報告する．

2．研究地域

観測地点（67.18°N, 36.37°W, 3170 m a.s.l.）は東グリーンランド最大の都市タシーラクから北に約 185 km に位置する（図 1）．グリーンランド氷床の最高地点は Summit（GRIP/GISP2）で Summit から南に分氷嶺が伸

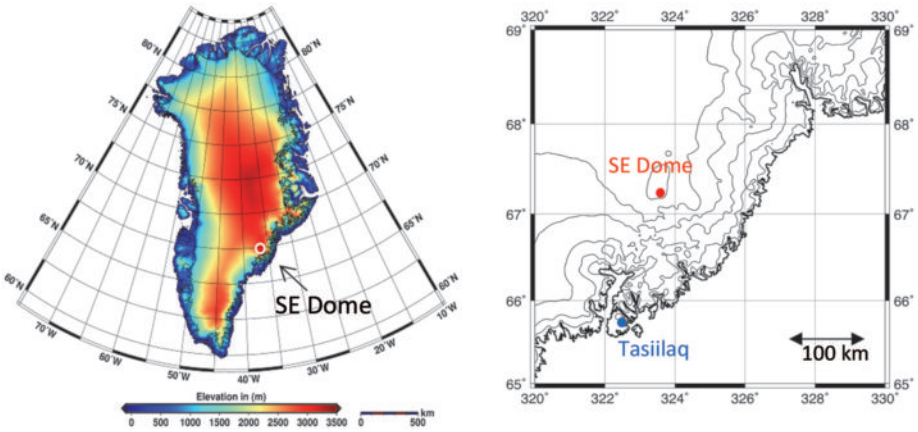


図 1：左：南東ドーム（SE-Dome）の位置．（Helm et al.（2014）のグリーンランド氷床等高線を使用）．右：南東ドーム近傍．
Figure 1：Left: Location of the SE-Dome region. The base map was produced from Helm et al. (2014). Right: Contour map of the SE-Dome region.

びている．この分氷嶺は南東方向，南西方向に分岐し，南西方向の分氷嶺は Dye 3 を通り Narsarsuaq 近くまで南下する．南東方向の分氷嶺の端に標高 3170 m のドームが形成されており，このドームが今回の観測地点である（以後，南東ドームまたは SE-Dome という）．標高 3000 m 以上の南東ドームが維持されている原因は，この氷床の下に山が形成されていること（Bamber et al., 2013）や涵養量が大きいこと（Burgess et al., 2010）が考えられる．南東ドームの下流には Helheim Glacier, Fenris Glacier, MIdård Glacier が流れ，これらの氷河は Sermilik Fjord に流出する．

デンマークの気象研究所（Danish Meteorological Institute）によれば，タシーラクの降水の特徴は他のグリーンランドの都市とは異なっており，膨大な年降水量を示すとともに冬季に降水の極大がある．南東部の気候は北大西洋に起因するアイスランド低気圧によって支配されている（Pedro et al., 2012）．南東ドームはタシーラクと同様の降水特性を持っていると考えられる．

いくつかのモデルや衛星解析が南東ドームの気候状態や涵養量を推定している（Bales et al., 2009; Burgess et al., 2010; Hall et al., 2013; Howat et al., 2014; Helm et al., 2014）．これらの研究は南東ドームの特徴として，1）グリーンランド氷床上で有数の海抜 3000 m 以上の高地；2）67°N にしては比較的寒冷であり年平均気温が −20℃以下；3）グリーンランドのドームの一つで涵養量は 0.6〜0.8 m water equivalent（w.e）yr^{-1} などを挙げている．南東ドームで採取されたアイスコアはグリーンランドのドームで最も高涵養量でかつ比較的低温の特徴を持つ．これらの特徴は近年の人為起源物質の変動を高時間分解能で追跡できる長所がある．

南東ドームの北 30 km の地点（67.5 N，36.1 W）に於いて，2002 年に浅層コアが掘削されている．このアイスコアは DAS2 コアと呼ばれており，1936〜2002 の期間の水等量は約 0.9 m w.e. であり（Pedro et al., 2012），冬季の海塩物質（海域起源）の極大と春季の炭酸塩とアルミ鉱物（陸域起源）の極大がみられている（Banta et al., 2008）．

3．旅程

観測隊員はタシーラクのエアーグリーンランド社からヘリコプター（Bell 212）をチャーターし，物資をタシーラクから南東ドームに輸送した．総輸送量は装備や食料約 700 kg，発電機用ガソリン 180 L，調理用の灯油 80 L であった．2015 年 5 月 18 日観測隊員 3 名がドリル一式，燃料，食料，居住用テントとともに南東ドームに移動し，2 つの居住テントと掘削テントを設置した．その後，18 日夜から 20 日までブリザードであり，掘削テントが半壊した．翌 21 日掘削テントを再設置した．21 日夕方，観測隊員 2 名が装備，燃料，食糧，居住テントとともに南東ドームに移動した．22 日から 27 日まで調査・掘削をした．28 日に撤収を開始したが，6 月 2 日までブリザードのためにピックアップフライトがなく，停滞した．6 月 2 日に観測隊員 5 名と装備と一部のアイスコアをタシーラクに輸送した．追加のピックアップフライトが 6 月 4 日に実施され，残りのアイスコアと試料がすべてタシーラクに輸送された．アイスコアと氷試料はタシーラクのスーパーマーケット（the Pilersuisoq general store）の −20℃の低温室に保管された．アイスコアと氷試料は 20 ft の冷凍コンテナに移され，輸送船 HEUNG-A AKITA 0013 によって，タシーラクから Aalborg，Denmark を経由し，石狩湾まで輸送され，8 月 24 日に北海道大学低温科学研究所の −50℃の低温室に保管された．アイスコアや試料は −25℃以下の環境で輸送された．低温科学研究所の低温室において，アイスコアが輸送中の破損がなく良質の状態で輸送されたことを確認した．

4．アイスコア掘削

掘削テントや掘削ドリルのセッティング後，アイスコアの掘削を始めた．掘削機は低温科学研究所の技術部が 2002 年に開発した軽量の電動駆動アイスコア掘削システム「どこでもドリル 2」である（Shiraiwa et al., 2003; Matoba et al., 2014）．掘削の総重量は約 100 kg である．掘削機はガイドがなく，3 本のパントグラフ型のアンチトルクがついている．コアバレルは掘削機の長さを短くするために，チップ室とコア室に分かれている．また軽量化のため，ドリルマストはコアバレルの輸送箱として使用できる．我々は 4 気筒シングルシリンダー型のガソリン発電機を 2 機（HONDA model EU16i; YAMAHA model EF2300i）掘削に用いた．高地で使用するために燃料噴射ノイズを小さく加工した．5 月 27 日，我々は 195 回の掘削を経て深度 90.45 m のアイスコア掘削を終了した．平均のアイスコア長は 0.479 m であり，54.95 時間を要した．コア採取速度は 1.65 m h^{-1} である．掘削後，アイスコアの層位観測を行い，層構造とアイスコアの長さを記録した．アイスコアはいくつかの氷板を含んでいたが，そのほとんどは 0.02 m 以下であった．

掘削後，我々は掘削孔内温度を測定した．孔内温度測

定にはサーミスターセンタつきの温度計（Techno-seven model BYE-64 T and D corporation model TR-52）を用いた．温度計の精度は 0.1℃である．掘削孔温度測定を行ったときの掘削テント内の室温は－15.2℃であった．深度 20 m に 25 分間放置した温度は－20.9℃であった．

5．低温室処理と密度分析

2015 年 9 月から 12 月にかけて，低温研低温室において，いくつかの基本分析を行った．測定項目は層位観察，バルク密度測定，X 線密度測定，電気伝導度測定，可視写真撮影，近赤外写真撮影である．本稿ではこのうち層位観察，バルク密度測定，X 線密度測定，電気伝導度測定について述べる．バルク密度は 189 本の各アイスコアセクションの体積と重量を測定し，算出した．X 線透過法（Hori et al., 1999）によって SE-Dome コアの連続密度プロファイルを得た．この方法では，フィルンコアを透過する X 線の強度をコア試料の反対側につけられた X 線検出器で測定する．氷の厚さに基づいた X 線吸収量の補正式を用いて，X 線の強度を密度に変換する．密度プロファイルの空間分解能は 1 mm である．火山イベントとそれに基づいた年代を推定するために電気伝導度を連続誘電プロファイル（DEP）法で分析した（Fujita et al. 2016）．この方法は 250 MHz の交流電気伝導度の連続プロファイルを得ることができる．電気伝導度プロファイルの空間分解能は 20 mm である．

6．密度プロファイル

図 2 にバルク密度プロファイルが示されている．バルク密度は．深さ 13.8 m で 550 kg m^{-3} になり，深さ 20.2 m で 600 kg m^{-3} になった．密度 550 kg m^{-3} は古典的な圧密氷化理論において重要な密度であり，機械的な雪粒子の再配分機構から転位クリープによる雪粒の変形機構に主なメカニズムが変化する密度と考えられている．また，密度 600 kg m^{-3} は機械的な雪粒子の再配分機構が起きなくなる密度と近年考えられている（Fujita et al., 2014）．その後，バルク密度は．深さ 64.0 m で 760 kg m^{-3} になった．密度 760 kg m^{-3} は，氷化するまでのより高密度フィルンにおいて，転位クリープ機構が主なメカニズムとなると考えられている密度である（Salamatin et al., 2009）．バルク密度は，深さ 86.8 m で 830 kg m^{-3} になり，氷化した．X 線密度もバルク密度とほぼ同じ結果となり，深さ 83.4 m で 830 kg m^{-3} になった．他のグリーンランドで掘削されたアイスコアと比較すると，SE-Dome コアはより深く，より短期間で氷化している特徴をもつ．

7．SE-Dome コアの涵養量

X 線密度プロファイルが図 3 に示されている．X 線密度は周期 1～1.5 m で変動をしている．この短周期変動は冬の高密度と夏の低密度による季節変動である．DEP 深さプロファイルが図 3 に示されている．深さ 11.745 m と 43.420 m に電気伝導度ピークが見つかる．X 線密度による年層カウントから，深さ 11.745 m の電気伝導度ピークは 2010 年の 3 月から 6 月に起きたアイスランドの Eyjafjallajökull 火山噴火によると考えられる．深さ 11.745 m は水等量で 5.27 m w.e. に相当する．起源からの輸送時間を無視すると，2010 年春から 2015 年春の涵養量は 1.05 m w.e. yr^{-1} である．深さ 43.420 m の電気伝導度ピークは 1991 年 6 月 15 日に起きたフィリピンの Pinatubo 火山噴火によると考えられる．深さ 43.420 m は水等量で 24.89 m w.e. に相当する．起源からの輸送時間を無視すると，1991 年夏から 2015 年春の涵養量は 1.04 m w.e. yr^{-1} である．まとめとして，SE-Dome コアの涵養量は約 1.0 m w.e. yr^{-1} であった．今後，SE-Dome コアの涵養量は 1.0 m w.e. yr^{-1}，氷温は

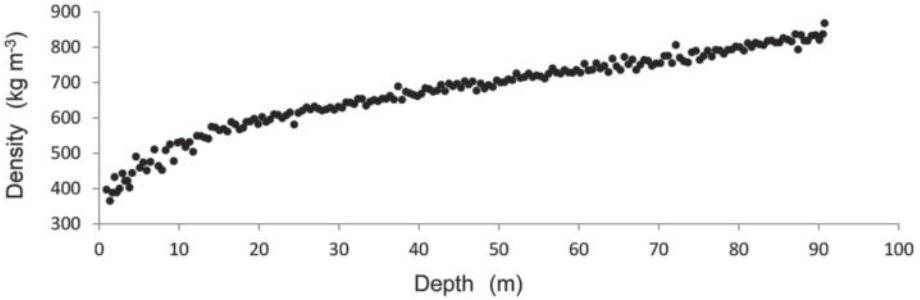


図 2：南東ドームアイスコアのバルク密度の深さプロファイル．
Figure 2：Density profile of the SE-Dome ice core.

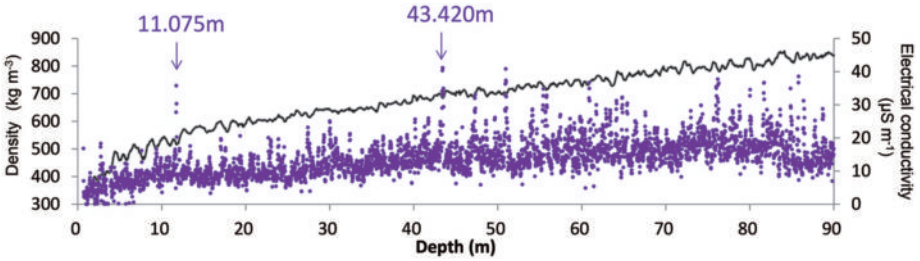


図 3：南東ドームアイスコアの X 線密度（40 mm 移動平均）（実線）と交流電気伝導度（250 MHz）（点）の深さプロファイル
Figure 3：X-ray density (thick line; 40 mm running mean) and alternating-current electrical-conductivity (circle; 250MHz) profiles of the SE-Dome ice core.

−20.9℃として議論を進める．

8．SE-Dome コアと圧密モデルの深さ-密度曲線の比較

経験的な圧密氷化モデルが通常のアイスコアの深さ-密度曲線をよく再現することが知られている（Sorge 1935; Schytt 1958; Herron and Langway, 1980）．代表的で良く使用される経験的な圧密氷化モデルに Herron and Langway's model（Herron and Langway, 1980）がある．表面密度（Surface density; ρ_s=0.36 kg m^{-3}），氷の密度（Ice density; ρ_i=0.83 kg m^{-3}），とすると，密度 0.55 kg m^{-3} 未満（ρ<0.55 kg m^{-3}）の浅層の深さ h（m）における密度（ρ_h）は以下の式で表される．

$$\rho_h=\frac{\rho_i Z_0}{1+Z_0} \quad \cdots (1)$$

ここで，

$$Z_0=\exp\left[\rho_i k_0 h+\ln\left(\frac{\rho_s}{\rho_i-\rho_s}\right)\right] \quad \cdots (2)$$

k_0 は定数であり，−20.9℃において 0.0862 である．

密度 0.55 kg m^{-3} より高密度（ρ>0.55 kg m^{-3}）の深層の深さ（h）における密度（ρ_h）は以下の式で表される．

$$\rho_h=\frac{\rho_i Z_1}{1+Z_1}, \quad \cdots (3)$$

ここで，

$$Z_1=\exp\left[\frac{\rho_i k_1 (h-h_{0.55})}{A^{0.5}} h+\ln\left(\frac{\rho_{0.55}}{\rho_i-\rho_{0.55}}\right)\right] \quad \cdots (4)$$

k_1 は定数であり，−20.9℃において 0.0211 である．A は涵養量である（1.0 m w.e. yr^{-1}）．

図 4 に SE-Dome コアの密度測定値およびモデルによる深さ-密度曲線を示す．密度 0.55 kg m^{-3} 未満において，SE-Dome コア測定値とモデルによる深さ-密度曲線はよく一致している．しかしながら，密度 0.55 kg m^{-3} より高密度において，測定された深さ-密度曲線は涵養量が 1.0 m w.e. yr^{-1} としたときのモデルの曲線とはあわない．涵養量が 1.0 m w.e. yr^{-1} であれば，圧密氷化深度は 107–108 m と計算された．実際の圧密氷化深度は 83–86 m であり，経験式によるモデル深度よりも 20 m 以上浅い結果となった．

9．SE-Dome コアの圧密氷化メカニズム

なぜ SE-Dome コアの氷化深度が経験式によるモデル深度よりも 20 m 以上浅い結果となったのか考察する．SE-Dome コアの圧縮粘性係数は以下の式で表される．

$$\eta_c=\sigma\cdot\rho\cdot\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^{-1}, \quad \cdots (5)$$

ここで，ρ, σ, t はそれぞれ密度（kg m^{-3}），積載荷重（Pa），時間（s）である．

他方で，経験的な圧縮粘性係数の密度依存性は以下の式で表される（Nishimura et al., 1983）．

$$\eta=\eta_0\cdot\exp(K\cdot\rho)\cdot\exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right), \quad \cdots (6)$$

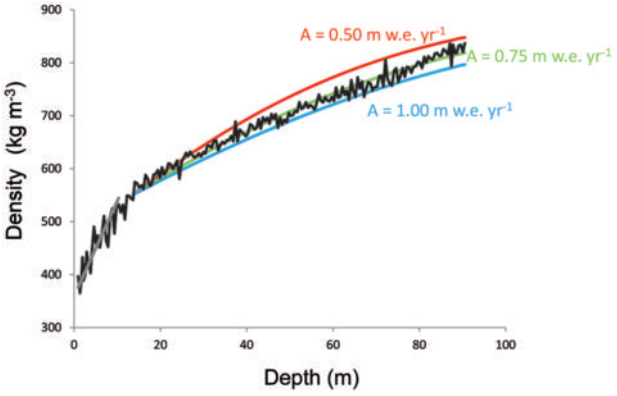


図 4：南東ドームアイスコアのバルク密度（黒）と Herron and Langway's model の深さプロファイル（赤，緑，水色）．涵養量の違いによる曲線の変化をみるために，Herron and Langway's model からは 3 曲線を示した．
Figure 4：Density profiles of the SE-Dome ice core (black) and Herron and Langway's model (red, green, blue).

ここで，η_0 は定数で 0.001～0.007 N·s m^{-2} の値をとる．K は 2.57×10^{-3} m^3 kg^{-1}，ΔE は活性化エネルギーで 51.6 kJ mol^{-1}，k_b はボルツマン定数，T は温度である．図 5 に密度測定値を式（4）に適用して得られた SE-Dome コアの圧縮粘性係数と式（6）によって求めた経験的な圧縮粘性係数を示した．低密度域において，両者はよく一致しているが，ρ＞750 kg m^{-3} の密度域において，SE-Dome コアの圧縮粘性係数は密度によらずほぼ一定の値をとり，経験的な圧縮粘性係数よりも低い値をとる．つまり，ρ＞750 kg m^{-3} の密度域において，SE-Dome コアは経験式よりも変形しやすいといえる．

750 kg m^{-3} 以上の密度域において，SE-Dome コアが経験式よりも変形しやすい理由として二つのメカニズムが考えられる．先ず一つは，高涵養量であるためである．高涵養量は，短期間で大きな積載荷重をもたらす．短期間であることは粒子間の結合が十分に行われないことを意味し，通常の涵養量地域の圧密氷化に比べて，同様の積載荷重であってもより変形が生じやすく（圧密が進みやすく）なる．もう一つは，高涵養量地域のフィルンが短期間で大きな荷重の変化を生み出すために，通常の圧密氷化に比べて高い転位密度の氷が存在しやすいということである．750 kg m^{-3} 以上の密度域における圧密氷化には転位クリープが重要である（Salamatin et al., 2009）．どちらのメカニズムにせよ，高涵養量という物理現象が経験的なモデルとの不整合を生み出していると考えられる．

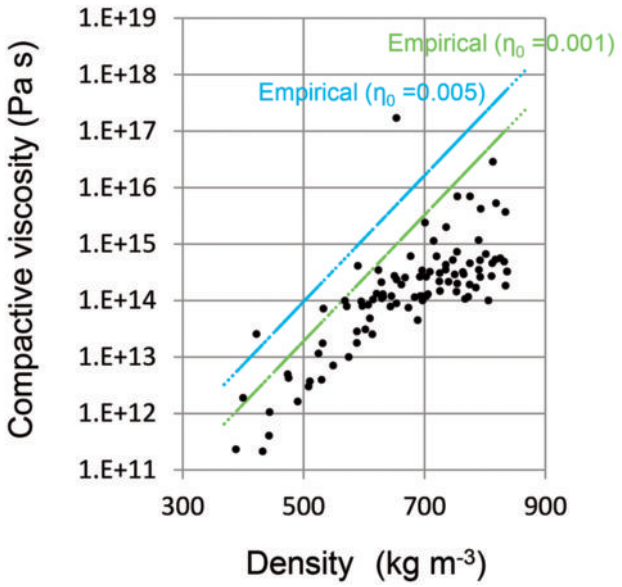


図 5：南東ドームアイスコアの深さ–密度曲線から求めた圧密粘性係数（黒点）と Nishimura et al.,（1983）による経験的な深さ–密度曲線による密度と圧縮粘性係数（水色，緑）．
Figure 5：Compactive viscosity from the SE-Dome ice core (black circle) and an empirical model (blue and green; (Nishimura et al., 1983))

まとめ

2015 年 5 月にグリーンランド氷床南東ドーム（SE-Dome）において浅層掘削に成功し，同 8 月には SE-Dome コア 189 セクションを氷のまま日本に輸送した．SE-Dome コアの涵養量は約 1.0 m w.e. yr^{-1}，氷温は −20.9℃であった．SE-Dome コアは氷床のドームとしては最も高涵養量の地域の一つである．高涵養量地域の圧密氷化過程について精査された研究例は少なく，Herron and Langway's model のような優れたモデルですら深さ－密度の関係を再現できなかった．この理由は主に 750 kg m^{-3} 以上の密度域において，SE-Dome コアは経験式よりもつぶれやすい特徴を持つためである．今後，高涵養量地域の圧密氷化メカニズムを明らかにすることで，より包括的な圧密氷化モデルを提案できる可能性がある．

謝辞

SE-Dome コアプロジェクトに関与したすべての皆様に感謝いたします．このプロジェクトの主財源は MEXT/JSPS KAKENHI Grant Number 26257201 と 16K12573，低温科学研究所共同研究経費です．一部 ArCS（Arctic Challenge for Sustainability Project）から助成を受けました．また，低温科学研究所からは共同研究経費だけではなく，多くのサポートをいただいています．心からお礼申し上げます．

References

Bales, R. C., Q. Guo, D. Shen, J. R. McConnell, G. Du, J. F. Burkhart, V. B. Spikes, E. Hanna, and J. Cappelen (2009) Annual accumulation for Greenland updated using ice core data developed during 2000–2006 and analysis of daily coastal meteorological data. *J. Geophys. Res.*, **114**, D06116, doi: 10.1029/2008JD011208.

Bamber, J. L., J. A. Griggs, R. T. W. L. Hurkmans, J. A. Dowdeswell, S. P. Gogineni, I. Howat, J. Mouginot, J. Paden, S. Palmer, E. Rignot, and D. Steinhage (2013) A new bed elevation data-set for Greenland. *Cryosphere*, **7**, 499–510, doi: 10.5194/tc-7-499-2013.

Banta, J. R., J. R. McConnell, R. Edwards, and J. P. Engelbrecht (2008) Delineation of carbonate dust, aluminous dust, and sea salt deposition in a Greenland glaciochemical array using positive matrix factorization. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q07013, doi: 10.1029/2007GC001908.

Bory, A. J. M., W. Abouchami, S. J. G. Galer, A. Svensson, J. N. Christensen, and P. E. Biscaye (2014) A Chinese Imprint in Insoluble Pollutants Recently Deposited in Central Greenland As Indicated by Lead Isotopes. *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 1451–1457, dx.doi.org/10.1021/es4035655.

Buchardt, S. L., H. B. Clausen, B. M. Vinther, and D. Dahl-Jensen (2012) Investigating the past and recent δ^{18}O-accumulation relationship seen in Greenland ice cores. *Clim. Past*, **8**, 2053–2059, doi: 10.5194/cp-8-2053-2012.

Burgess, E. W., R. R. Forster, J. E. Box, E. Mosley-Thompson, D. H. Bromwich, R. C. Bales, and L. C. Smith, (2010) A spatially calibrated model of annual accumulation rate on the Greenland Ice Sheet (1958–2007). *J. Geophys. Res.*, **115**, F02004, doi: 10.1029/2009JF001293.

Cappelen. J., B. V. Jørgense, E. V. Laursen, L. S. Stannius, and R. S. Thomsen (2001) The observed climate of Greenland, 1958–99 - with climatological Standard Normals, 1961–90. *Danish Meteorological Institute Technical Report*, 00–18.

EPICA community members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, **429**, 623–628, doi: 10.1038/nature02599.

EPICA community members (2006) One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, **444**, 195–198, doi: 10.1038/nature05301.

Fischer, H., D. Wagenbach, and J. Kipfstuhl, (1998) Sulfate and nitrate firn concentrations on the Greenland Ice Sheet: 1. Large scale geographical deposition changes. *J. Geophys. Res.*, **103** (D17): 21927–21934, doi: 10.1029/98JD01885.

Fujita, S, M. Hirabayashi, K. Goto-Azuma, R. Dallmayr, K. Satow, J. Zheng, and D. Dahl-Jensen (2014) Densification of layered firn of the ice sheet at NEEM, Greenland. *J. Glaciol.*, **60** (223), 905–921, doi: 10.3189/2014JoG14J006.

Fujita, S., K. Goto-Azuma, M. Hirabayashi, A. Hori, Y. Iizuka, Y. Motizuki, H. Motoyama, and K. Takahashi (2016) Densification of layered firn in the ice sheet at Dome Fuji, Antarctica. *J. Glaciol.*, **62** (231), 103–123, doi: 10.1017/jog.2016.16.

Greenland Ice-core Project Members (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203–207.

Grootes, P. M., M. Stuiver, J. W. C. White, S. Johnsen, and J. Jouzel, (1993) Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **366**, 552–554, doi: 10.1038/366552a0.

Hall, D. K., J. C. Comiso, N. E. DiGirolamo, C. A. Shuman, J. E. Box, and L. S. Koenig, (2013), Variability in the surface temperature and melt extent of the Greenland ice sheet from MODIS. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1–7, doi: 10.1002/grl.50240.

Helm, V., A. Humbert, and H. Miller (2014) Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2. *Cryosphere*, **8**, 1539–1559, doi: 10.5194/tc-8-1539-2014.

Herron, M. M. and C. C. Langway (1980) Firn densification: an empirical model. *J. Glaciol.*, **25** (93), 373–385.

Hori, A., K. Tayuki, H. Narita, T. Hondoh, S. Fujita, T. Kameda, H. Shoji, N. Azuma, K. Kamiyama, Y. Fujii, H. Motoyama and O. Watanabe (1999) A detailed density profile of the Dome Fuji (Antarctica) shallow ice core by X-ray transmission method. *Ann. Glaciol.*, **29**, 211–214.

Howat, I. M., A. Negrete, and B. E. Smith (2014), The Greenland Ice Mapping Project (GIMP) land classification and surface elevation data sets. *Cryosphere*, **8**, 1509–1518, doi: 10.5194/tc-8-1509-2014.

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi: 10.1017/CBO9781107415324.

Iizuka, Y., S. Matoba, T. Yamasaki, I. Oyabu, M. Kadota, and T. Aoki, (2016a) Glaciological and meteorological observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bull. Glaciol. Res.*, **34**, 1–10, 10.5331/bgr.15R03

Iizuka, Y., A. Miyamoto, A. Hori, S. Matoba, R. Furukawa, T. Saito, S. Fujita, M. Hirabayashi, S. Yamaguchi, K. Fujita, and N. Takeuchi (2016b) A firn densification process in the high accumulation dome of southeastern Greenland. *Arc. Ant. Alp. Res.*, in press.

Kameda, T., H. Motoyama, S. Fujita, and S. Takahashi (2008) Temporal and spatial variability of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by the stake method from 1995 to 2006. *J. Glaciol.*, **54**, 107–116, doi: 10.3189/002214308784409062.

Matoba, S., K. Shimbori, and T. Shiraiwa (2014) Alpine ice-core drilling in the North Pacific region. *Ann. Glaciol.*, **55** (68), 83–87, doi: 10.3189/2014AoG68A020.

McConnell, J. R. and R. Edwards (2008) Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic. *PNAS*, **105**, 34, 12141, doi: 10.1073/pnas.0803564105.

McConnell, J. R., S. Kipfstuhl, and H. Fischer (2006) The NGT and PARCA shallow ice core arrays in Greenland: A brief overview. *PAGES NEWS*, **14**, 1, hdl: 10013/epic.24999.

Nishimura, H, N. Maeno, and K. Satow (1983) Snow structure and depth hoar formation in Mizuho Plateau, Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, **29**, 149–158.

North Greenland Ice Core Project Members (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147–151, doi: 10.1038/nature02805.

Pedro, J. B., J. R. McConnell, T. D. van Ommen, D. Fink, M. A. J. Curran, A. M. Smith, K. J. Simon, A. D. Moy, and S. B. Das (2012) Solar and climate influences on ice core 10Be records from Antarctica and Greenland during the neutron monitor

era. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **355–356**, 174–186, doi: 10.1016/j.epsl.2012.08.038.

Salamatin, A. N., V. Y. Lipenkov, J. M. Barnola, A. Hori, P. Duval, and T. Hondoh (2009) Snow/firn densification in polar ice sheets. *Low Temp. Sci.*, **68** (Suppl.), 195–222.

Schytt, V. (1958) Glaciology II. A: Snow studies at Maudheim. Glaciology. B: Snow studies inland. Glaciology. C: The inner structure of the ice shelf at Maudheim as shown by core drilling. Norwegian- British- Swedish Antarctic Expedition, 1949–52. Sci. Results, Vol.IV.

Shiraiwa, T., K. Goto-Azuma, S. Matoba, T. Yamasaki, T. Segawa, S. Kanamori, K. Matsuoka, and Y. Fujii (2003) Ice core drilling at King Col, Mount Logan 2002. *Bull. Glaciol. Res.*, **20**, 57–63.

Sorge, E. (1935) Glaziologische Untersuchungen in Eismitte. In Brockamp, B., H. Jülg, F. Loewe and E. Sorge, eds. Wissenschaflliche Ergebnisse der Deutschen Grönland-Expedition Alfred Wegener 1929 und 1930/1931. Band III. Glaziologie. Leipzig, F. A. Brockhaus, 62–270.

Watanabe, O., J. Jouzel, S. Johnsen, F. Parrenin, H. Shoji, and N. Yoshida (2003) Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature*, **422** (6931), 509–512, doi: 10.1038/nature01525.