

奥野 淳一

Jun'ichi Okuno

東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

Email: okuno@eri.u-tokyo.ac.jp

Abstract:

The rheological structure of the Earth's mantle is one of the most important factors governing mantle dynamics. To determine the rheological structure, late Pleistocene and Holocene sea-level observations have extensively been examined with an assumption that those are caused by the glacial isostatic adjustment. On the other hands, the relative sea-level records from the last glacial period around the glaciated regions that are significantly dependent on crustal movements due to glacial rebound are very important to infer the melting history of last glacial ice sheets. Many studies have carried out, and various models of mantle viscosity and last deglaciation are proposed. We introduce the various models of mantle viscosity and ice melting history deduce by glacial isostatic adjustment modelling.

1 はじめに

地球内部のダイナミクスを理解するには、地球を構成する物質の変形と流動のメカニズム (レオロジー) を研究することが非常に大切である。固体地球を構成する物質は、短い時間スケールにおいては弾性体として振る舞うが、長い時間スケールでは流動する。地球内部の流動特性や粘性率を推定するため、氷床の融解に伴う全世界レベルでの海水準変動、重力異常、地球自転速度や重力ポテンシャル J_2 の時間変化の解析が精力的に進められて来ている。

また、最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum : LGM) と言われる 20000 年前から 6000 年前の大陸氷床の融解に伴う固体地球の変形 (postglacial rebound : PGR) を評価することによって LGM からの氷床変動を明らかにする研究も進められている。加えて、最近の地球温暖化に伴う南極やグリーンランド氷床の融解による変形を評価することも非常に重要である。つまり、観測された重力や地殻変動の時間変化からそれぞれの現象に対する成分を見積もることにより、南極やグリーンランド氷床および、その他のローカルな氷床の現在のマスバランスを推定することができるためである。

ここでは、海水準変動や重力観測等から glacial isostatic adjustment (GIA) のモデリングより推定されている氷床融解史、地球内部の粘性構造に関して簡単にレビューしたい。

2 海水準変動を記述する方程式

氷床融解に伴う海水準変動を記述する方程式を簡単に説明する。基本的には、Farrell & Clark (1976) により定式化がなされている。

単位質量の点力源を地球の表面においた時の地表に相対的な海水準変動は、粘弾性地球モデルに関する荷重ラブ数 (k_n, h_n) を用いて、

$$G(\gamma, t) = \frac{a}{M_E} \sum_{n=0}^{\infty} [\delta(t) + k_n(t) - h_n(t)] P_n(\cos \gamma) \quad (1)$$

であたえられる。 a は地球の半径、 M_E は地球の質量、 γ は荷重をおいた点と海水準変動を計算する点の角度である。従来、荷重ラブ数の計算はラプラス変換を用いた方法が用いられてきたが、最近直接時間発展を計算する方法も開発されている。任意の時間、位置における荷重は、氷床の高さ変化 ($I(\theta, \phi, t)$) と海面の高さ変化 ($S(\theta, \phi, t)$) を用いて、

$$L(\theta, \phi, t) = \rho_i I(\theta, \phi, t) + \rho_w S(\theta, \phi, t) \quad (2)$$

であたえられる。 θ は緯度, ϕ は経度, ρ_i は氷の密度, ρ_w は水の密度である。式 (1) と (2) を用いて, 表面荷重と, 固体地球の変形を考慮した海水準変動を記述する方程式は,

$$S(\theta, \phi, t) = O(\theta, \phi, t) \left[\int_{-\infty}^t \int_{\Omega} a^2 L(\theta', \phi', t') G(\gamma, t - t') d\Omega' dt' - c(t) \right] \quad (3)$$

となる。 $O(\theta, \phi, t)$ は, 海洋関数で, 海洋で 1, 陸域で 0 の値をとる。 $c(t)$ は, 氷床の消長と海水量の増減に対する質量保存より求められ, 以下の式で表される。

$$c(t) = -\frac{M_I(t)}{\rho_w A_o(t)} - \left\langle \int_{-\infty}^t \int_{\Omega} a^2 L(\theta', \phi', t') G(\gamma, t - t') d\Omega' dt' \right\rangle_o \quad (4)$$

$\langle \rangle_o$ は, 海洋における平均値を意味する。 $A_o(t)$ は, 海洋面積である。 $M_I(t)$ は, 時間 t までに融けた氷の量である。 (3), (4) 式が PGR による海水準変動を記述する方程式で, これらの式に氷床モデルを入力としてあたえると, ある粘弾性地球モデルに対する全世界の海水準変動を評価することができる。 ジオイド, 重力異常も同様に計算することができる。

3 氷床モデル

過去 20000 年間の海水準変動の観測値を用いて, GIA のモデリングによる理論値と比較して氷床融解史を推定する研究は 1980 年代から精力的に行われてきた (例えば, Nakada & Lambeck, 1988; Tushingham & Peltier, 1991 など)。 最終氷期の氷床域から離れた地域 (far-field) での約 6000 年前までの海面変化はおもに地球全体での氷床融解の時間変化に依存し, 地球内部粘性構造に鈍感なため, 氷床全体の融解の時間変化および, 全地球的な氷床融解量の推定に有効である (Nakada & Lambeck, 1988; Okuno & Nakada, 1999; Yokoyama *et al.*, 2000)。 これに対し, ローレンタイトやフェノスカンジヤ氷床域である北アメリカや, ヨーロッパなどの海水準変動は, ローカルな氷床融解による地殻変動に依存するため, それぞれの地域の氷床融解を推定する研究も広く行われている (Lambeck, 1995 など)。

北半球の主な氷床は, ローレンタイト氷床, コルデリアン氷床, イニューシャン氷床, グリーンランド氷床, スカンジナビナ氷床, バレンツ氷床, カラ氷床である。 カラ氷床以外の氷床に関しては, 最終氷期における分布とその後の時間変化はある程度解明されている。 北半球の氷床モデルの代表的なものは, ICE1 (Peltier & Andrews, 1976), ICE2 (Wu & Peltier, 1983), ARC3 (Nakada & Lambeck, 1988), ICE3G (Tushingham & Peltier, 1991), ICE4G (Peltier, 1994) などである。 Fig.1 に ARC3 モデルの氷床分布の時間変化を示す。

このようにさまざまなモデルが提唱されているが, 基本的に海水準変動の観測値からローカルな氷床モデルを推定するには, マントルの粘性構造との trade-off が存在するため, どのモデルも確定的とは言いがたい。 特に最近では, ICE5G (Peltier, 2004) というモデルが提案され, LGM 時にローレンタイト氷床における氷床ドームがハドソン湾中心とその西側にも氷床ドームが存在したというモデルとなっている。 また, LGM の正確な時期とその期間などについても, 最近の化学分析や年代測定技術の向上により, サンゴ礁などを用いた海水準変動の研究が精力的に進められている (Yokoyama *et al.*, 2000 など)。

一方で, 南極大陸氷床の融解の歴史は, 理論値と比較するための地質・地形学的データが乏しくほとんどわかっていない。 南極氷床の融解モデルについては, CLIMAP による最終氷期の気候復元モデルに基づいて作成された氷床モデル (Hughes *et al.*, 1981) と Drewry (1982) による現在の氷床厚から融解量を推定したモデルがある。 これまでに GIA のモデリングの研究から, 提案された南極氷床モデルのうち, ICE2 (Wu & Peltier, 1983), ICE3G (Tushingham & Peltier, 1991), ICE4G (Peltier, 1994), ANT3, ANT4 (Nakada & Lambeck, 1988, 1989) などが CLIMAP のモデルに基づいている。 しかしながら, 海水準変動の観測値がまったくないわけではなく, 南極大陸周辺の沿岸のいくつかの地点において, 約 1 万年前から 5 千年前の間の高海面期が報告されている (例えば Hayashi & Yoshida, 1994)。 このような高海面が観測される主な原因は, 氷床の融解による海面上昇と固体地球の変形に伴うジオイドの変化 (glacio-hydro isostasy) と考えられる。 そこで, Nakada *et al.* (2000) では, 現在までに報告された南極周辺の海面変動の観測値をコンパイルし, glacio-hydro isostasy のモデリングを行い南極氷床の融解モデルを作成することを試みている。 Fig.2 におもな南極における氷床モデルの例をあげる。 南極においては, 利用できる海水準変動のデータが少ないため, 推定されるモデル間の時空間分布の違いも大きい (詳しくは Nakada *et al.*, 2000 を参照)。 今後, 各国の調査プロジェクトをとおして, LGM 時にどの程度氷床が拡大したかという地形学的証拠の時空間分布データの

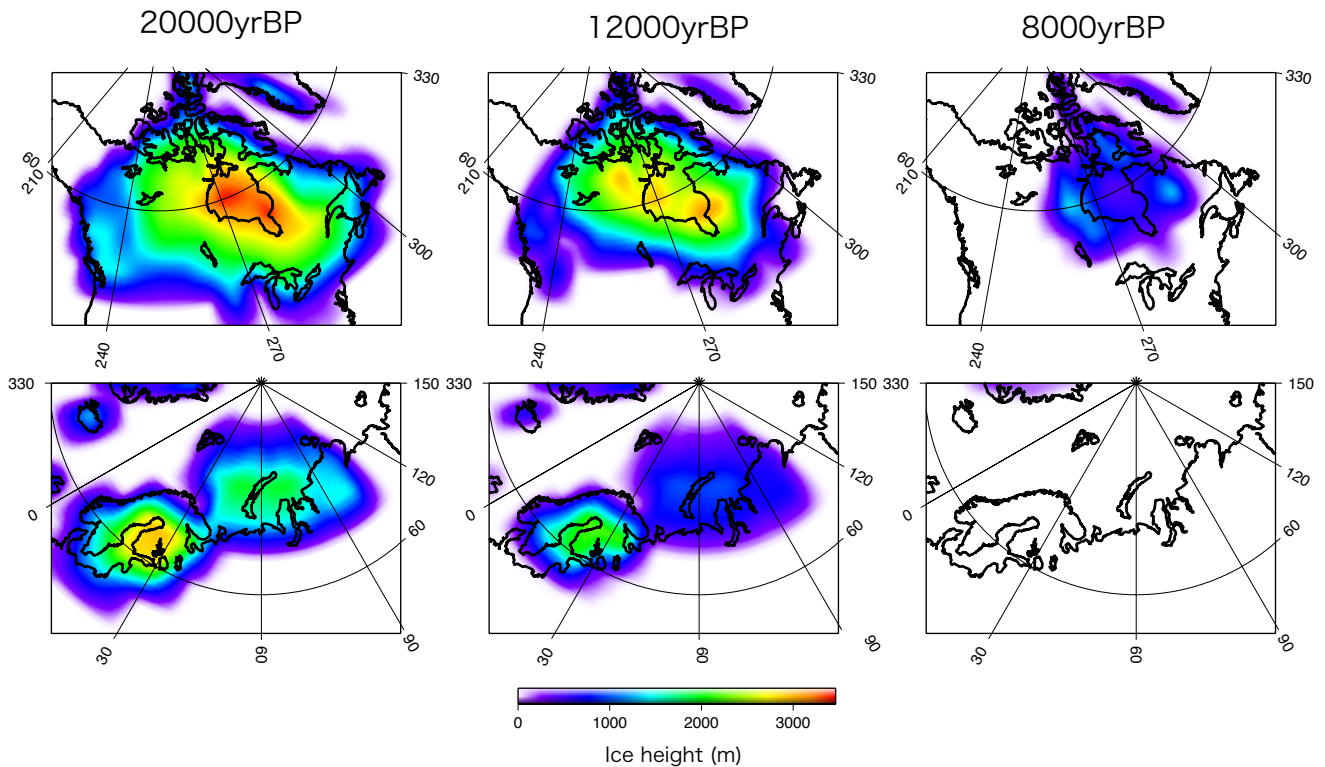


Fig.1 最終氷期最盛期からの北半球の氷床融解史. ARC3 モデル (Nakada & Lambeck, 1989) を示す.

蓄積により、モデルの修正がなされて行くだろう。最近では、昭和基地周辺における完新世 (4000-2000 年前) の詳細な海水準変動データより、ローカルな氷床融解の可能性が示唆され (Okuno *et al.* 2004), 南極各地で報告されている完新世の温暖期との関連や、気温変化と氷床の安定不安定性などが議論されている。今後、固体地球分野のみならず、気候モデリング等の地球流体力学分野との共同研究よりさらなるモデルの向上が期待される。

4 上部マントルの粘性率

次に、地球内部粘性構造モデルの現状について述べる。リソスフェアの下部には、一般的に地震波の低速度層が発達している。この部分の粘性率を評価するには、波長の短い変形の緩和現象による解析が必要である。アメリカ、ユタ州のボンビル湖 (Lake Bonneville) の干上がりによる地殻変動 (Bills & May, 1987) や、西九州の海面変化の研究 (Okuno & Nakada, 1998) によると、湖の粘性率は $10^{19} \sim 10^{20}$ Pa s 程度で、その下層の上部マントルとの粘性コントラストはたかだか、10 倍程度である。Okuno & Nakada (1998) によると、過去約 6000 年間のハイドロアイススタシー (氷床の融解による海水の増加に伴うアイススタティックな地殻変動) による地殻傾動は長崎五島列島と熊本玉名間で $3 \sim 4$ m/6000 年である。もしこの地域の最上部マントルに 10^{18} Pa s 程度の低粘性層が 100 km の厚さで存在したとすると、海水の上昇に併せて瞬時に海水荷重に関する緩和は終了する。つまり、後氷期以降 (過去 6000 年間) の地殻傾動は観測されないはずである。これらの観測結果とそれに基づく解析を考えると、顕著な低粘性層はごく限られた地域 (ブルームの上昇域や海嶺) のみに存在するのかもしれない。

低粘性層下の上部マントルに関しては比較的波長の短い氷床 (フェノスカンジヤ氷床やイギリスやスコットランドの氷床) の glacial rebound に関係した海水準変動 (Lambeck *et al.*, 1996; Okuno & Nakada, 2001) や、オーストラリアでの海水準変動の観測値 (Nakada & Lambeck, 1989) が有効である。それら結果によると、上部マントルの平均的な粘性率は $(2-5) \times 10^{20}$ Pa s で、一桁程度の地域性の存在が示唆されている。物性科学的には、深さ 400 ~ 670 km 付近の遷移層では、粘性率が高くなる可能性が示唆されているが、海水準変動の解析では、上部マントル中に高粘性層の存在を積極的に支持する結果は得られておらず、Okuno & Nakada (2001) では、北西ヨーロッパの海水準変動を詳細に解析し、リソスフェアの厚さ 60 ~ 100 km, 上部マントルの粘性率が $3 \sim 10 \times 10^{20}$ Pa s というモデルが観測値を満足させるモデルであると指摘している。また、このような結論はスカンジナビア半島における GPS 観測による粘性構造の推定 (BIFROST: Milne *et al.*, 2001) とも調和的である。

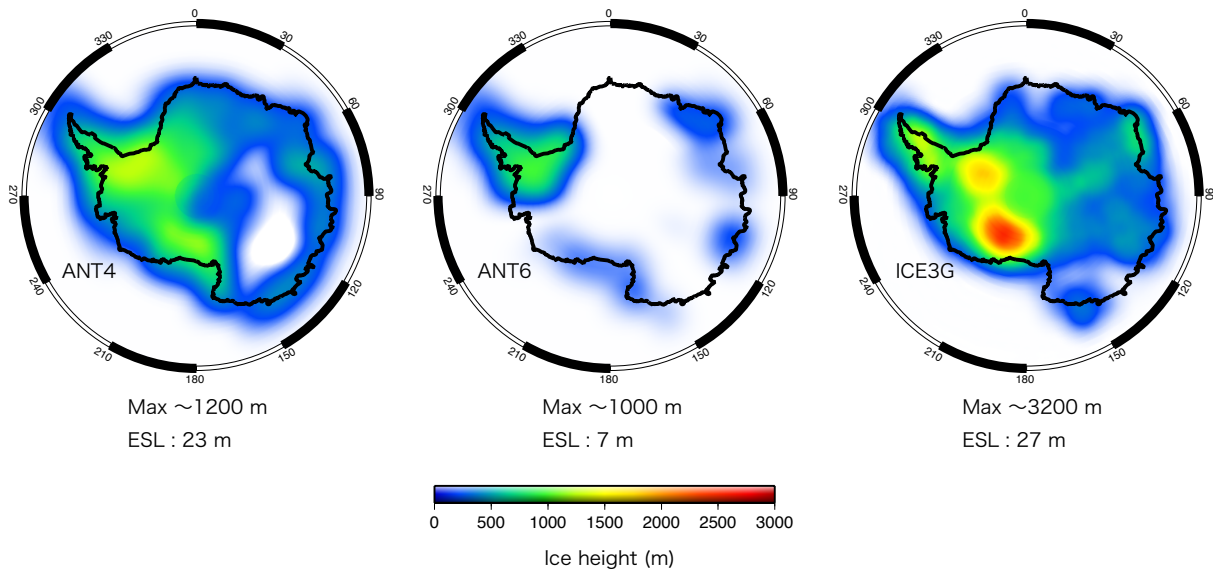


Fig.2 最終氷期最盛期からの南極氷床融解史。モデルはそれぞれ, ANT4 (Nakada & Lambeck, 1989), ANT6 (Nakada *et al.*, 2000), ICE3G (Tushingham & Peltier, 1991) を示す。

また, スバル諸島のニールセンにおける総合的な測地観測 (絶対重力, GPS, VLBI, 検潮儀等) より, PGR による変動の見積もりや, 最近 (過去 400 年程度) の氷床変動を見積もる研究もなされており (Sato *et al.*, 2005), この研究においても, これまで見積もられた上部マントルの粘性構造で無理なく説明でき, より低粘性 ($3 \sim 5 \times 10^{20}$ Pa s 程度) が一番よく説明できると結論づけている。

このように, 地球重力場等の精密な測地観測は地球内部粘性構造の推定に有利なデータである。特に衛星による重力場測定の実現が現実的なものとなり, 静的な重力場の改良はもちろん, 重力場の時間変動も衛星でとらえられるようになってきている。Velicogna & Wahr (2002) 等では, 将来的に得られる GRACE のデータより, 平均的なマントルの粘性構造を推定する予察的な研究がなされているが, それによると, $\pm 30 \sim 40\%$ の精度で決定することができるという結論が得られている。さらに, van der Wal *et al.* (2004) などでは, 近い将来計画されている GOCE ミッションのデータより, 地震学的観測からその存在が示唆されている低粘性層 (low viscosity zone : LVZ) を検知できると予見している。

しかしながら, 地球重力場は, このように地球の粘性構造の推定に有利なデータであることはまちがいないが, Velicogna & Wahr (2002) でも指摘されているように, PGR のモデリングの問題点として, 氷床融解史モデルの不確実性がある。実際に, 粘性構造のみならず, 氷床融解史もモデルパラメータに設定すると, GRACE の性能限界による誤差や, PGR 以外の経年的なシグナルより, 氷床モデルの不確実性による違いの方が大きく, GRACE 等の衛星重力データを粘性構造の規定に用いることに対して難しい問題点があることも指摘している。

5 下部マントルの粘性率

下部マントルの粘性率を評価するには, ローレントイド氷床や (Okuno & Nakada, 2001 など), オーストラリアのハイドロアイススタシーによる海水準変動 (Nakada & Lambeck, 1989) を利用できる。

特にローレントイド氷床が存在した北アメリカ地域での海水準変動が, 大陸氷床の融解に伴うリバウンドにより説明できるとして, 精力的に研究が行われた (例えば, Wu & Peltier, 1982; Mitrovica & Peltier, 1995)。一方で, 重力異常もマントルの粘性構造を推定する貴重な観測値として利用される。特に, Hudson 湾付近で観測される負の重力異常は glacial rebound に伴う残留隆起量に起因しているという解釈がある (Walcott, 1972)。しかし, 一般的に古い大陸ではフリーエア重力異常は負で上部マントルの地震波速度は速い。つまり, この負の重力異常はマントル対流の下降流による結果としても解釈できる (Hager & Clayton, 1989; Forte & Mitrovica, 1996; Pari & Peltier, 1996)。そこで, Simons & Hager (1997) はこの地域のフリーエア重力異常をウェーブレット変換と同様の spatio-spectral localization 法により解析を行い, 負の重力異常の -25 mGal 程度は glacial rebound に伴う残留隆起量に起因しているという結論づけている。

このような重力異常やこれらの地域の海水準変動の解析結果によると、下部マンツルの粘性率は 10^{22} Pa s 程度で、上部と下部で $10 \sim 100$ 位の粘性率のコントラストが必要である。しかし、Forte & Mitrovica (1996) は、粘性率のコントラストは $10 \sim 100$ 程度必要であるが、粘性率の増加する深さは、ほぼ 1000 km の深さであると主張している。実際どちらで有意なジャンプがあるかは今後の問題でもある。

6 今後の課題

これまで、postglacial rebound に伴う海水準変動や重力異常の観測と理論をもとにした地球内部粘性構造の推定に関する研究では、数学的に簡単な線形レオロジーモデルで、かつ半径方向のみに粘性率の変化するモデルを用いて研究が進められている。現在、水平方向に不均質な粘性率を考慮したモデルをも検討した研究が少しずつながらなされるようになってきた (Antonioli *et al.*, 2004)。例えば、大陸とマンツルプルームの上昇域と沈降域の上部マンツルではかなりの不均質性が当然予想される。しかし、現段階では、説得力のある議論は行われていない。また、氷床融解史の不確定性も、高度に精密化されていく測地観測等の解釈を大きく左右する要素となっている。このような現状の中、今後、地形地質学的観測や測地観測、および、固体地球変形のモデリングに加え、気候モデリングなどの学際的な共同研究を進めることが必要であると思われる。

参考文献

- [1] Antonioli, A., Cianetti, S., Giunchi, C. and Spada, G., Glacial isostatic adjustment and relative sea level changes: the role of lithospheric and upper mantle lateral viscosity variations. *AGU Fall meeting*, 2004.
- [2] Bills, B. G. and May, G. M., Lake Bonneville: constraints on lithospheric thickness and upper mantle viscosity from isostatic warping of Bonneville, Provo, and Gilbert Stage shorelines. *J. Geophys. Res.*, **92**, 11493-11508, 1987.
- [3] Drewry, D.J., *Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio*. Scottland Polar Research Institute, Cambridge., 1982.
- [4] Farrell, W. E. and J. A. Clark, On postglacial sealevel. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **46**, 637-667, 1976.
- [5] Forte, A. M. and Mitrovica, J. X., New inferences of mantle viscosity from joint inversion of long-wavelength mantle convection and post-glacial rebound data. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1147-1150, 1996.
- [6] Hager, B. H. and Clayton, R. W., Constranits on the structure of mantle convection using seismic observations, flow models, and the geoid. *Mantle Convection: Plate Tectonics and Global Dynamics*, Gordon and Breach, Newark, N. J., 1989.
- [7] Hayashi, M. and Yoshida, Y., Holocene raised beaches in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **50**, 49-84, 1994.
- [8] Hughes, T. J., Denton, G. H., Anderson, B. G., Schilling, D. H., Fastook, J. L. and Kinge, C. S., The last great ice sheets: a global view. *The Last Great Ice Sheets*, Wiley, New York, 263-317, 1981.
- [9] Lambeck, K., Constraints on the late Weichselian ice sheet over the Barents Sea from observations of raised shorelines. *Quat. Sci. Rev.*, **14**, 1-16, 1995.
- [10] Lambeck, K., Johnston, P., Smither, C. and Nakada, M., Glacial rebound of the British Isles-III. Constraints on mantle viscosity. *Geophys. J. Int.*, **125**, 340-354, 1996.
- [11] Milne, G. A., Davis, J. L., Mitrovica, J. X., Scherneck, H.-G., Johansson, J. M., Vermeer, M. and Koivula, H., Space-geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Fennoscandia. *Science*, **291**, 2381-2385, 2001.

- [12] Mitrovica, J. X. and W. R. Peltier, Constraints on mantle viscosity based upon the inversion of post-glacial uplift data from the Hudson Bay region. *Geophys. J. Int.*, **122**, 353-377, 1995.
- [13] Nakada, M. and K. Lambeck, The melting history of the late Pleistocene Antarctic ice sheet. *Nature*, **333**, 36-40, 1988.
- [14] Nakada, M., Kimura, R., Okuno, J., Moriwaki, K., Miura, H. and Maemoku, H., Late Pleistocene and Holocene melting history of the Antarctic ice sheet derived from sea-level variations. *Marine Geology*, **167**, 85-103, 2000.
- [15] Nakada, M. and Lambeck, K., Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in the Australian region and mantle rheology. *Geophys. J.*, **96**, 497-517, 1989.
- [16] Okuno, J. and Nakada, M., Rheological structure of the upper mantle inferred from the Holocene sea-level change along the west coast of Kyushu, Japan. *Dynamics of the Ice Age Earth: A Modern Perspective*, Trans Tech Publications Ltd, Brandrain, Switzerland., 443-458, 1998.
- [17] Okuno, J. and Nakada, M., Total volume and temporal variation of meltwater from last glacial maximum inferred from sea-level observations at Barbados and Tahiti. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **146**, 283-293, 1999.
- [18] Okuno, J. and Nakada, M., Effect of water load on geophysical signals due to glacial rebound and implications for mantle viscosity. *Earth Planet Space*, **53**, 1121-1135, 2001.
- [19] Okuno, J., Miura, H. and Maemoku, H., Holocene melting history of Antarctic ice sheet inferred from relative sea-level records around the Lützow-Holm Bay, Antarctica. *AGU Fall meeting*, 2004.
- [20] Pari., G. and Peltier, W. R., The free-air gravity constraint on subcontinental mantle dynamics. *J. Geophys. Res.*, **101**, 28105-28132, 1996.
- [21] Peltier, W. R., Ice age palaeotopography. *Science*, **265**, 195-201, 1994.
- [22] Peltier, W. R., Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, **32**, 11-149, 2004.
- [23] Peltier, W. R. and Andrews, J. T., Glacial isostatic adjustment - I. The forward problem. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **46**, 605-646, 1976.
- [24] Sato, T., Okuno, J., Hinderer, J., MacMillan, D. S., Plag, H.-P., Francis, O., Falk, R. and Fukuda, Y., A geophysical interpretation of the secular displacement and gravity rates observed at Ny-Alesund, Svalbard in the Arctic. - Effects of the post-glacial rebound and present-day ice melting - *Geophys. J. Int.*, 2005, submitted.
- [25] Simons, M. and B. H. Hager, Localization of the gravity field and the signature of glacial rebound. *Nature*, **390**, 500-504, 1997.
- [26] Tushingham, A. M. and Peltier, W. R., ICE-3G: a new global model of late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of postglacial relative sea level change. *J. Geophys. Res.*, **96**, 4497-4523, 1991.
- [27] Velicogna, I. and Wahr, J., Postglacial rebound and Earth's viscosity structure from GRACE. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JB001735, 2002.
- [28] van der Wal, W., Schotman, H. H. A. and Vermeersen, L. L. A., Geoid heights due to a crustal low viscosity zone in glacial isostatic adjustment modeling: A sensitivity analysis for GOCE. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05608, doi:10.1029/2003GL019139, 2004.

- [29] Walcott, R. I., Late Quaternary vertical movements in eastern North America : Quantitative evidence of glacial-isostatic rebound. *Rev. Geophys.*, **10**, 849-884, 1972.
- [30] Wu, P. and Peltier, W. R., Viscous gravitational relaxation. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **70**, 435-486, 1982.
- [31] Wu, P. and Peltier, W. R., Glacial isostatic adjustment and the free-air gravity anomaly as a constraint on deep mantle viscosity. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **74**, 377-450, 1983.
- [32] Yokoyama, Y., Lambeck, K., De Deckker, P., Johnston, P. and Fifield, L.K., Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature*, **406**, 713-716, 2000.