

グレイシオハイドロアイソスタシー (用語解説)

中田正夫¹・奥野淳一²

Glacio-hydro Isostasy (Explanation of Terminology)

Masao NAKADA¹ and Jun'ichi OKUNO²

Abstract

During the growth of an ice sheet the continental crust beneath and near the ice sheet subsides, while in the decay period of glacier ice the crust is unloaded and rebounds. The process is called glacio-isostasy. The volume of sea water decreases during ice growth, while it increases during ice decay. The changing water load causes the vertical movement of the oceanic crust. The process is referred to as hydro-isostasy. These two processes combined are involved in glacio-hydro isostasy, i.e., the Earth's response to changes in ice and water loading during glacial cycle. The outline of a model for glacio-hydro isostasy is described and an application of the model to the northwestern Kyushu area is briefly introduced.

Key words: *Earth crust, glacio-isostasy, hydro-isostasy*

1. はじめに

大陸氷床が融解する間氷期には融氷水が海洋に流れ込み海面が上昇するが、氷期となり氷床が発達すると海面が低下する。第四紀においては、このような氷河性海面変動は他に要因をもつ海面変化（構造的や堆積性海面変化など）と比較してその規模において卓越している。氷河性海面変化の観測値には氷床域からの距離によって異なるという地域性がみられる。これは、氷床の盛衰とともに変化する氷床および海水の荷重が固体地球表面の変形をもたらしているためである。グレイシオハイドロアイソスタシーとは、氷床と海水の荷重による固体地球のレスポンスを表す概念で、海水準変動、地殻変動や重力変化などを理解するのに重要である。この概念の理論的モデルを解説し、モデルの適用例の一つとして九州の西北域での水中遺跡の分布を説明する。

2011年4月12日受付, 2011年4月26日受理

¹ 九州大学理学研究院地球惑星科学部門

¹ Department 研究史室 Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

² 国立極地研究所

² National Institute of Polar Research, 10-3, Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518, Japan

2. モ デ ル

Farrell and Clark (1976) は、海面は常に等ポテンシャル面を形成し、固体地球は表面荷重に対し変形するという物理的根拠に基づき、氷床の盛衰に伴う氷床・海水の質量再分配に対する海面の変化を記述する方程式 (sea level equation) を導いた。この方程式はグレイシオアイソスタシーの概念を厳密に定義している。基準となる時間を $t = 0$ とし、球座標系の任意の地点 (θ, ϕ) における任意の時間 t の表面荷重 $L(\theta, \phi, t)$ は

$$L(\theta, \phi, t) = \rho_i I(\theta, \phi, t) + \rho_w S(\theta, \phi, t) \quad (1)$$

で与えられる。 $I(\theta, \phi, t)$ は着底している氷床の厚さの変化量、 $S(\theta, \phi, t)$ は海面の変化 (水深の変化)、 ρ_i と ρ_w はそれぞれ氷と水の密度である。地点 (θ', ϕ') に単位質量をもつデルタ関数的な荷重を時間 t' に置いた時の、地点 (θ, ϕ) 、時間 t の海面の変化を $G(\gamma, t-t')$ とする。 γ は荷重と海面の変化を観測する地点の角度である。 G は sea level equation のグリーン関数で、(i) 荷重が水を引きつける重力効果、(ii) 荷重による固体地球のポテンシャルの変化、(iii) 荷重による固体地球の変形の効果を含み、(ii) と (iii) は固体地球の密度・弾性・粘性構造、特に、粘性構造に強く依存する。固体地球の構造としては、一般的にマックスウェル粘弾性体が用いられていて、地球表層のリソスフェアは弾性体 (粘性率が無限大)、リソスフェア以深のマントルは粘弾性体として解析が進められている。

表面荷重とグリーン関数の時空間積分として

$$Z(\theta, \phi, t) = \iint G(\theta - \theta', \phi - \phi', t - t') L(\theta', \phi', t') ds dt' \quad (2)$$

を定義すると、荷重に対する、任意の地点、任意の時間の海面の変化は

$$S(\theta, \phi, t) = O(\theta, \phi, t) [-M(t)/(\rho_w A_0(t)) + Z(\theta, \phi, t) - \langle Z(\theta, \phi, t) \rangle_o] \quad (3)$$

の sea level equation を満たす。 $O(\theta, \phi, t)$ は海洋関数で、水深をも含めた時間の関数で、海洋では1、陸では0をとる関数である。 $A_0(t)$ は時間 t の海洋面積、 $\langle Z(\theta, \phi, t) \rangle_o$ は海洋域での平均値である。 $Z(\theta, \phi, t)$ は $S(\theta, \phi, t)$ の関数であり、上式は積分方程式である。右辺の括弧内の第1、3項は荷重の質量保存よりでてくる。 $M(t)$ は時間 t までに変化した氷床の質量で、 $E(t) = -M(t)/(\rho_w A_0(t))$ はユースタティック海面変化である。 $Z(\theta, \phi, t)$ において、氷床荷重と海水荷重に対する成分を各々 $Z_i(\theta, \phi, t)$ 、 $Z_w(\theta, \phi, t)$ とすると、sea level equation は

$$S(\theta, \phi, t) = O(\theta, \phi, t) [E(t) + (Z_i(\theta, \phi, t) - \langle Z_i(\theta, \phi, t) \rangle_o) + (Z_w(\theta, \phi, t) - \langle Z_w(\theta, \phi, t) \rangle_o)] \quad (4)$$

と表される。右辺括弧内の第2項は、氷床荷重に伴う上記 (i)、(ii)、(iii) の効果 (グレイシオアイソスタシー) に伴う海面変化、第3項は海水荷重に伴う3つの効果 (ハイドロ

アイソスタシー)に基づく海面変化である。両方の効果を含めてグレイシオハイドロアイソスタシーと呼んでいる。

地質・地形学的に得られる海面の変化は、現在 (t_0) の海面に関する相対的な海面変化であるので、ある時間 t の変化量は

$$\Delta S(\theta, \phi, t) = S(\theta, \phi, t) - S(\theta, \phi, t_0) \quad (5)$$

で与えられる。氷床域の海面変化は、sea level equation [式(4)]の括弧内の第1, 2項が支配的で、氷床域から十分離れた地域 (far-field) の海面変化は第1, 3項が支配的である。氷床が融解した後 (postglacial phase) の far-field の海面変化は、水深分布をも含めた

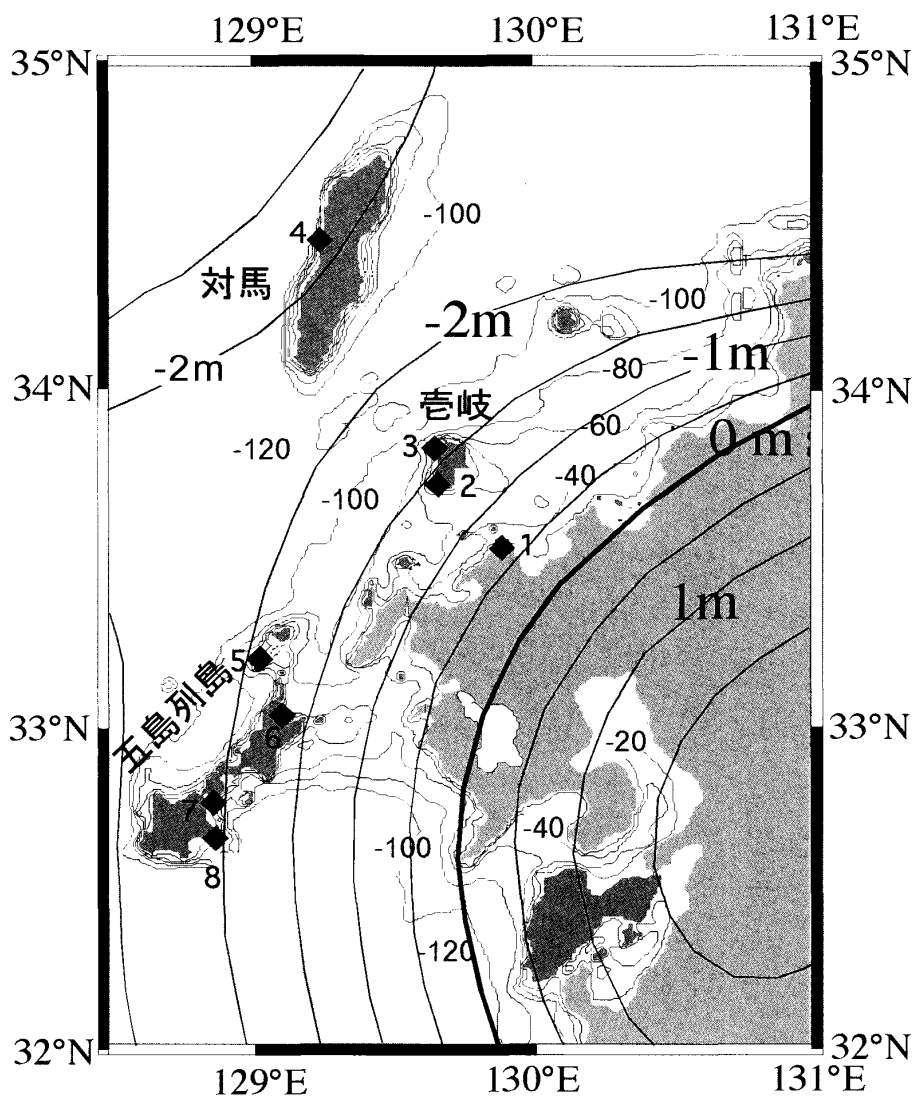


Fig. 1. Distribution of submerged archeological sites in the northwestern Kyushu area of the early- to mid-Jomon period and theoretically obtained contours showing Holocene sea-levels of 6,000 yr BP. The site name is: (1) Akamatsu, (2) Nakiri, (3) Matsuzaki, (4) Meotoishi, (5) Yabitsu, (6) Nishinomata, (7) Dousaki and (8) Ego. (Bathymetric contours in m-units)

海洋関数に強く依存し、グレイシオアイスタシーの大きさはハイドロアイスタシーに比べて一般的に小さい。例えば、氷床域からほぼ同じ距離にある地域（例えば日本）では、グレイシオアイスタシーの効果は一定で、氷河性海面変化の空間依存性（地域性）はハイドロアイスタシーの効果による。空間依存性は海岸線の形状や島のサイズ等に強く依存し、例えば、半島の突端に位置する銚子と内湾に位置する東京の約6千年前の縄文海進時における相対海面は、理論的には東京の方が数メートル高い（Nakada et al., 1991）。

3. モデルの適用例

Fig. 1に九州西北域における縄文前期から中期の水中遺跡の分布と、理論的に求められた6千年前の相対海面高度（コンター）を示す。この図からわかるように、氷河性海面変化による五島列島域の6千年前の海面高度は、現在に比べ低く、当時あった海岸遺跡の水没は氷河性海面変化で説明できそうである。つまり、Fig. 2の模式図に示すように、海水荷重による五島列島域から九州本島に向けてのマンツルの流れに関係したハイドロアイスタシーにより、西九州の海側では地殻の沈降、陸側では地殻の隆起が生じ、これらの地

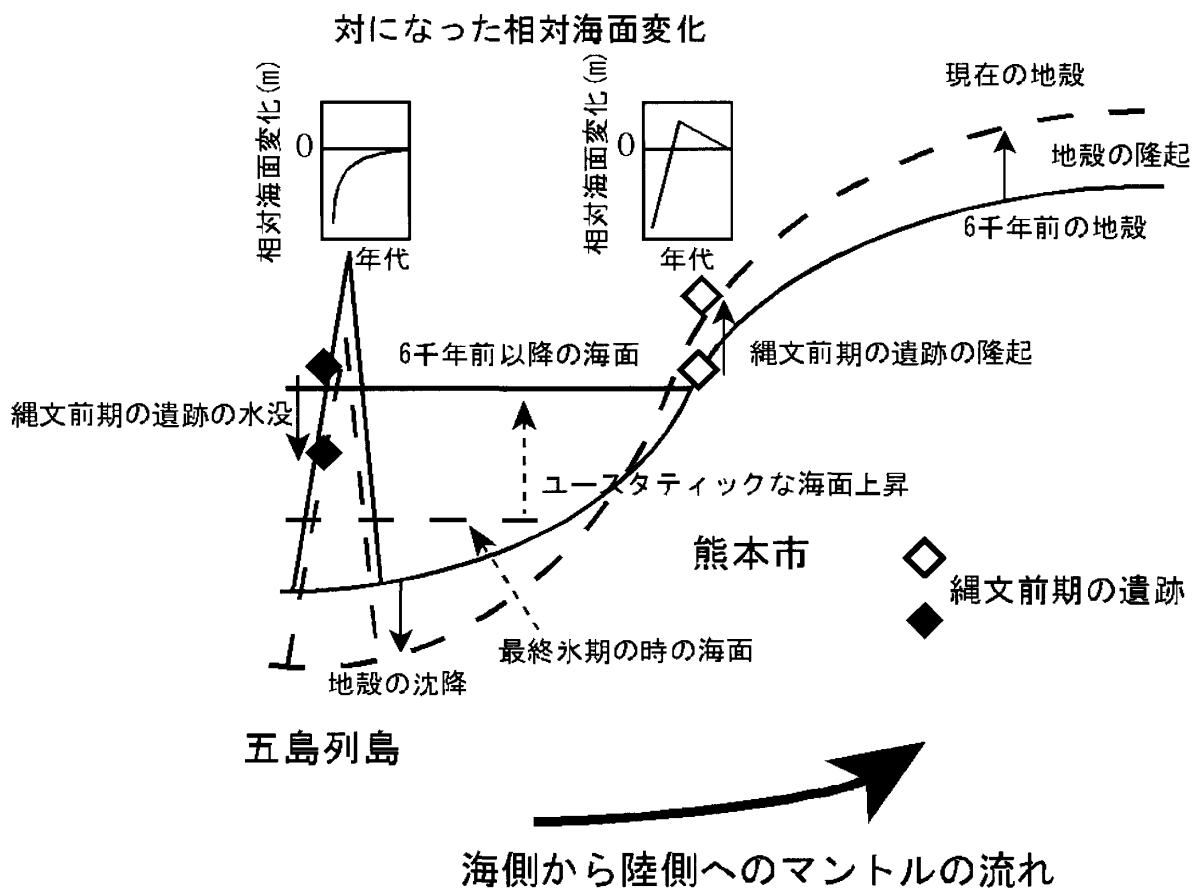


Fig. 2. Schematic diagram of hydro-isostasy illustrating submergence of the early- to mid-Jomon sites.

域の縄文前期から中期の遺跡は水没したと考えられる (Nakada et al., 1998). また, 空間依存性は氷床融解時にも有意で, ほぼ2万年前の最終氷期の海面低下量も約30 m位の地域性が示唆される. これらのハイドロアイソスタシーの性質を考慮することにより, 地球の粘弾性構造の解明 (Okuno and Nakada, 2001) や過去数千年間のテクトニックな垂直地殻変動量の高精度な推算が可能となる.

引用文献

- Ferrell, W. E. and Clark, J. A. (1976) On postglacial sea level: *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **46**, 647-667.
- Nakada, M., Yonekura, N. and Lambeck, K. (1991) Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **85**, 107-122.
- Nakada, M., Okuno, J., Yokoyama, Y., Nagaoka, S., Takano, S. and Maeda, Y. (1998) Mid-Holocene underwater Jomon sites along the west coast of Kyushu, Japan, hydro-isostasy and asthenospheric viscosity: *Quaternary Research (Japan)*, **37**, 315-323.
- Okuno, J. and Nakada, M. (2001) Effects of water load on geophysical signals due to glacial rebound and implications for mantle viscosity: *Earth, Planets and Space*, **53**, 1121-1135.