

インド西部グジャラートにおけるハイドロアイソスタシー

奥野 淳一

国立極地研究所

Email: okuno@nipr.ac.jp

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の解析が精力的に進められてきた。ここでは、glacial isostatic adjustment (GIA) のモデリングより推定されている地球内部の粘性構造、氷床融解史を用い、インド西部グジャラートにおけるハイドロアイソスタシーを定量的に評価することを試みた。

海水準変動とアイソスタシー

気候の変化に伴い氷床が融けると、氷床地域は隆起し、その周辺地域は沈降する。この現象をグレイシャルアイソスタシーと呼ぶが、一方で融解した水は海洋へと流れ込み海水は増加し、その増加した海水は新たな荷重となり、さまざまな地域に隆起や沈降をもたらす。この現象をハイドロアイソスタシーと呼んでいる。このような気候変化にともなう地球表面における質量の再分配（氷と水）は、多様な地殻変動をもたらすために、全世界の海水準変動を数値的に再現するためには、このような効果を考慮した数学的定式化が要求され、Farrell & Clark (1976) により確立された。またこれらの地殻変動は、時間変化するために、地球を粘弾性体として取り扱う必要があり、モデリング研究と海水準変動のフィールド研究より地球内部の粘性構造やダイナミクスを推定する研究が90年代を中心に盛んに行われた。

完新世の海水準変動

一方、完新世の海水準変動に関しては、さまざまな地域で、約2-3mほどの融解量が示唆されている。これは、オーストラリアや、地中海沿岸、および九州の西海岸の海面変動の観測値と計算値との比較より明らかにされた（例えば、Nakada & Lambeck, 1989, Okuno & Nakada, 1998）。テクトニックに一樣な作用を受けていると考えられる地域の複数の地点における海水

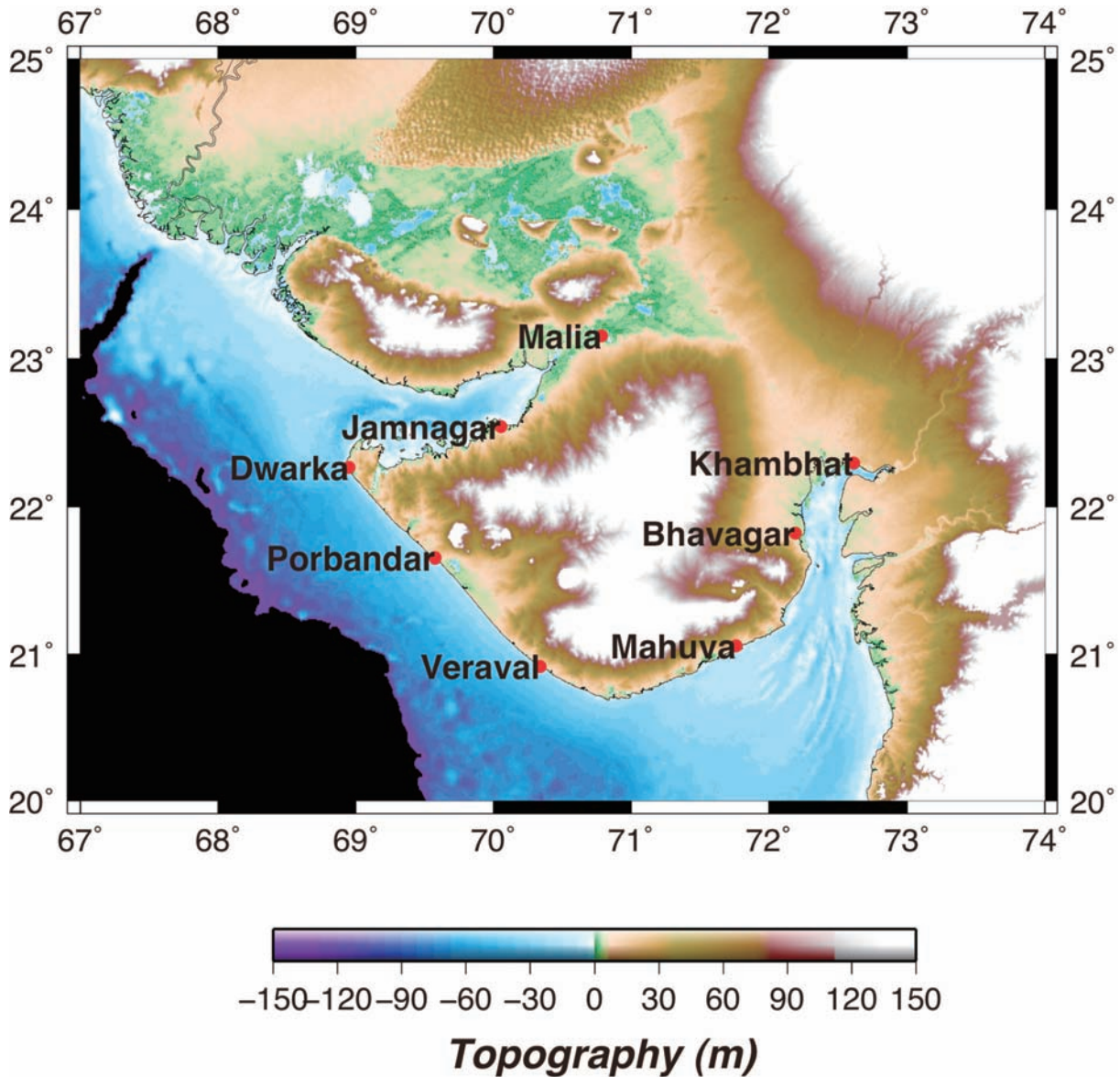


Fig.1 インド西部グジャラート、サウラーシュトラ半島周辺の地形図

準変動から、ハイドロアイソスタシーによる地殻変動の地域性を求め、その地域性を説明しうる粘性構造を求める。この粘性構造から海水準変動曲線を算出すると、どの地域も系統的に7000年前の海面の高さが、観測値より2-3mほど高くなる。これは、この時期に最終氷期からの氷床融解量からすれば、たいへんマイナーではあるが約2-3mほどの氷床融解が起こったことを示唆しているものである。そして、融解の起源は、南極であると推定されている (Nakada & Lambeck, 1988)。一般的に、ハイドロアイソスタシーによる地殻変動は、最終氷期からの氷床融解による海水量の増加が大きな要素となるので、主な大陸氷床の融解が完了したと考えられる、約7000年前がハイドロアイソスタシーによる地殻変動量は最大となる。しかし、前述の完新世の氷床融解が存在するために、実際には、氷床から離れた地域のフィールド観測で認定される完新世の高海面は、多様な高さや年代を示す。これは、海水準変動の地形地質学的観測値は、地殻変動と海水量の変化の両方の合算で、かつ現在に対する相対的な値であるので、海岸線の形状や起伏などによって地域性が生まれる。このことから、完新世の地殻変動を正確に見積もるためには、調査地域において、多点の海水準変動の観測値とハイドロアイソスタシー

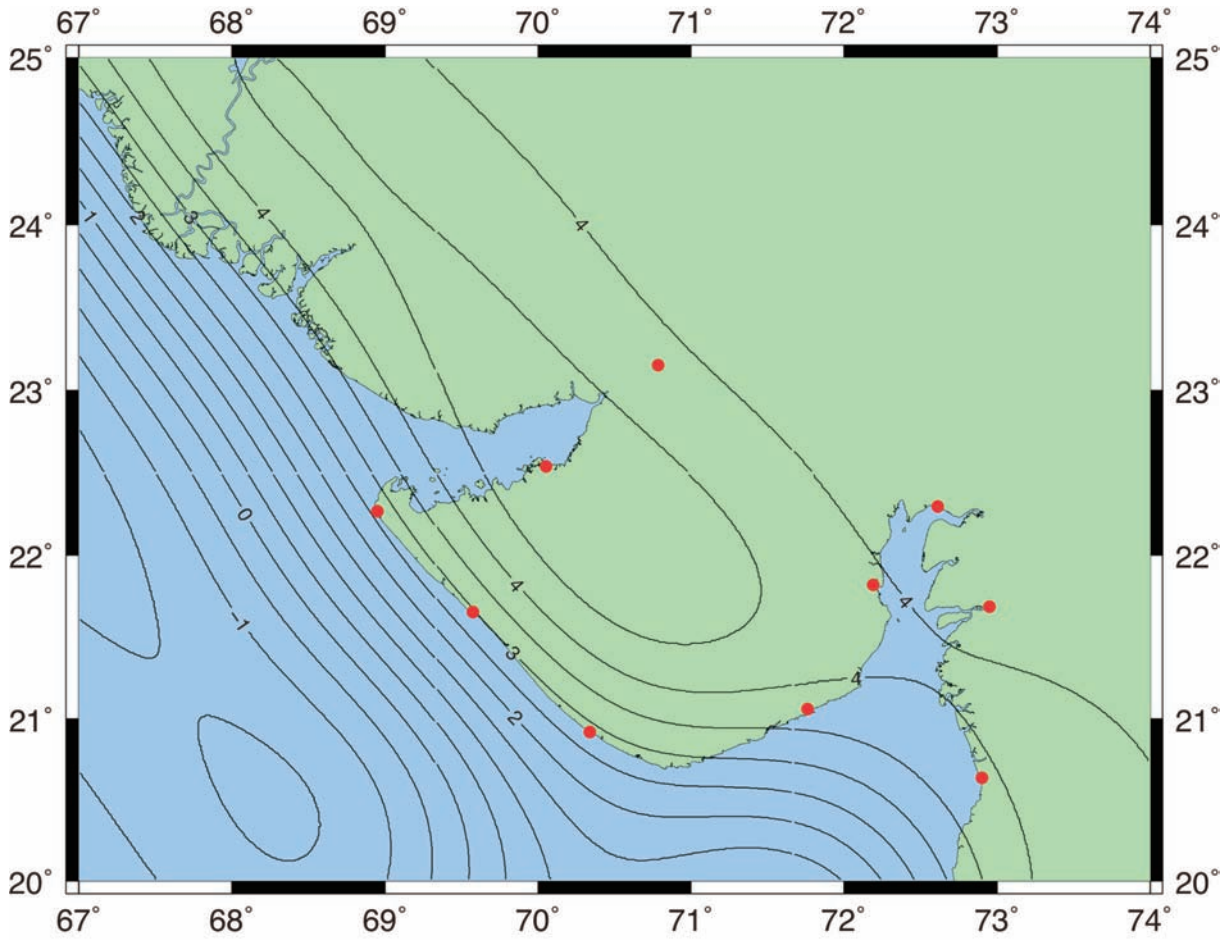


Fig.2 標準的な粘弾性モデルを用いたハイドロアイソスタシーのモデリングより推定される
サウラーシュトラ半島周辺の過去 7000 年間の地殻変動量（コンター間隔は 0.5m）

のモデリングの両方が必要不可欠である。

グジャラートにおける海水準変動に対するハイドロアイソスタシーの効果

今回の解析で行った研究対象地域の地形図を Fig.1 に示す。サウラーシュトラ半島周辺の海域は、-150m までの海底が広く分布し、最終氷期最盛期においては、この地域あたりまで、陸化していた可能性が示唆される。また、-150m までの海底が広く分布していることで、最終氷期からの氷床融解に伴う海水の増加によっておこるハイドロアイソスタシーによる地殻変動が大きく観測されうる地域であることも十分示唆される。

Fig.2 に過去 7000 年間のハイドロアイソスタシーによる地殻変動量の空間分布を示す。用いた地球内部粘性構造モデルは、地球表層の 50km を弾性的に振る舞うリソスフェアとし、その下層から深度 650km までの上部マントルを 5×10^{20} Pa s、それから下層～2900km までのマントル-コア境界までの下部マントルを 10^{22} Pa s とした。このモデルは、地球上のさまざまな地域で求められている平均的な粘性構造である (Kaufman & Lambeck 2000)。また、氷床の融解史としては、オーストラリア国立大の ANU モデルを使用した。これらのモデルによる地殻変動量は、およそ 7000 年間に最大 5-3m 程度の隆起量が見込まれる。その特徴として、全体的に海岸線に

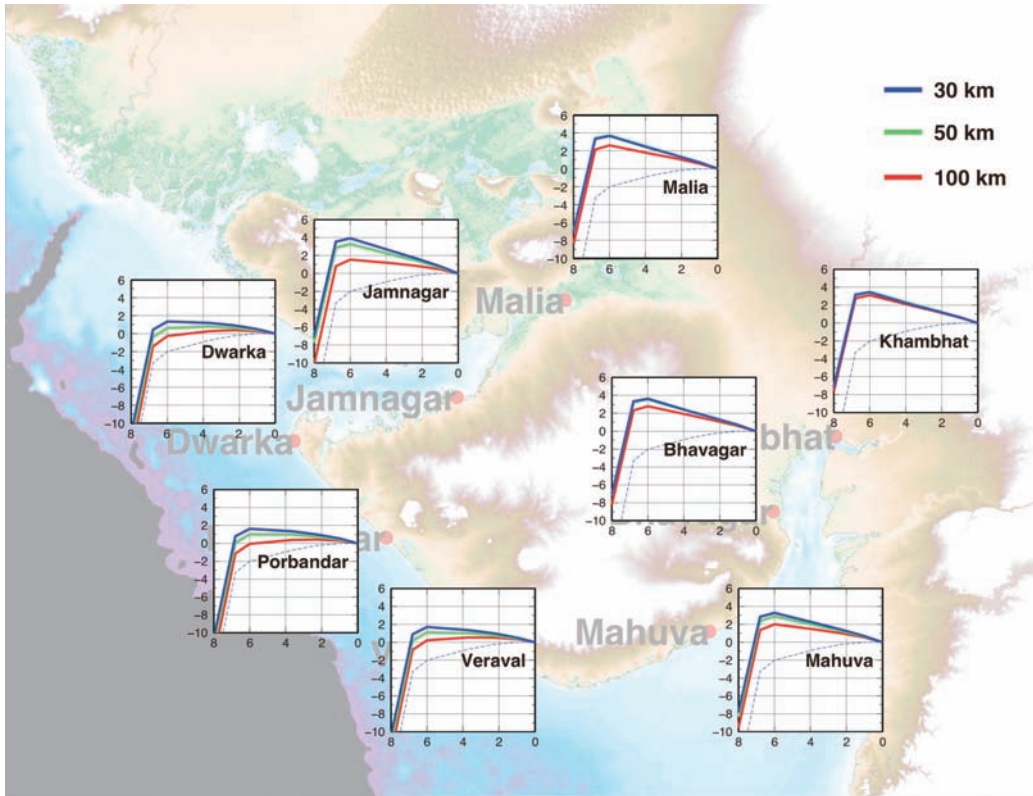


Fig.3 7000 年前から現在にかけて緩やかに融解したモデル (HM1) による
 サウラーシュトラ半島周辺の相対的海水準変動の理論曲線 (点線は氷床融解史曲線：HM1)。
 各色の線はそれぞれ弾性リソスフェアの厚さを示す。

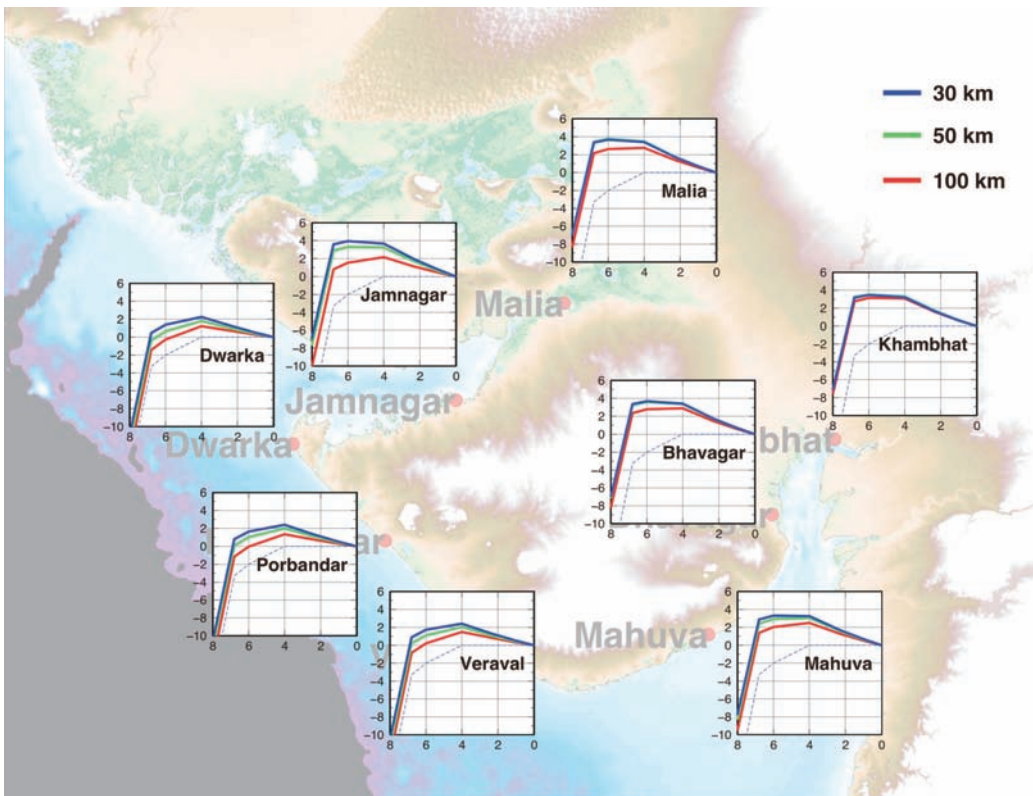


Fig.4 4000 年前に融解が完了したモデル (HM2) による
 サウラーシュトラ半島周辺の相対的海水準変動の理論曲線 (点線は氷床融解史曲線)。
 各色の線はそれぞれ弾性リソスフェアの厚さを示す。

平行するようなかたちで地殻変動量が変化し、南東部のカンバート湾付近は、湾の形状にそった地殻変動の分布をなしている。これは、北東部のカッチ湾に比べると、カンバート湾の湾口が大きく、海水荷重の影響を大きく受けていることによるものである。

Fig.3、Fig.4 にさまざまなパラメータを用いて、サウラーシュトラ半島の8地点の海水準変動曲線を理論的に再現した。注目したパラメータは、完新世の融解史の時間変化のちがい（HM1: Fig.3, HM2: Fig.4）と、リソスフェアの厚さ（30, 50, 100km）である。リソスフェアの厚さについての依存性は、厚さが厚くなるモデルほど、荷重の変化に対して耐性があるために、変形量としては小さくなる傾向がある。これが、完新世の高海面の高度の違いに現れている。また、湾奥より、湾口の地点の比較より、リソスフェアの厚さによる高海面高度の違いが顕著になる。つまり、リソスフェアの厚さを規定できる可能性があることがわかった。また、100km と 50、30km の違いは大きく、50km と 30km のモデルからの違いはあまり出ないことも明らかになった。

一方で、融解史の違いによる海面変化の理論値の違いとして、HM2（4000年前に融解が完了したモデル）では、高海面を示す時期が多様になることがわかる（Fig.4）。特に湾口側の地点では、4000年前に高海面が現れ、湾の中央部では、リソスフェアのモデルによっては、7000年前か4000年前といったように、大きく異なってくる。このことは、湾にそって、高海面の高さと年代が決定できれば、リソスフェアの厚さや完新世の融解史を規定することができることを示唆している。

まとめと今後の課題

今回、GIA モデルを用いて、サウラーシュトラ半島付近の約7000年間のアイソスタティックな地殻変動量と、ハイドロアイソスタシーを考慮した海水準変動曲線を再現した。過去7000年間のハイドロアイソスタシーによる地殻変動量は最大5m程度であり、その空間分布については、海岸線の形状が影響を与えていることが示唆された。また、リソスフェアの厚さと完新世の氷床融解史についていくつかのモデルを用いて、その依存性を明らかにした。今後の課題として、今回再現した海水準変動をもとに、過去のサウラーシュトラ半島付近の古地理変遷をシミュレートすることが挙げられる。現在の地形を考慮すると、最大海進時には、グレートラン、リトルランともに海が進入し、最大20m程度の水深になった可能性がある。今後、このような過去の海岸環境の復元を、フィールド調査や遺跡データなどとの比較検証を行い考察し、インダス文明の立地環境の変遷を議論する予定である。

【引用・参考文献】

- Farrell, W. E. and Clark, J. A. (1976) On Postglacial Sea Level. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 46: 647-667.
- Kaufmann, G. and Lambeck, K.(2000) Mantle dynamics, postglacial rebound and the radial viscosity profile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 121: 301-324.
- Nakada, M. and Lambeck, K. (1988) The melting history of the late Pleistocene Antarctic ice sheet. *Nature*, 333: 36-40.
- Nakada, M. and Lambeck, K. (1989) Late Pleistocene and Holocene sea-level change in the Australian region and mantle rheology. *Geophysical Journal International*, 96: 497-517.

Okuno, J. and Nakada, M. (1998) "Rheological structure of the upper mantle inferred from the Holocene sea-level change along the west coast of Kyushu, Japan", in P. Wu (ed.) *Dynamics of the Ice Age Earth: A Modern Perspective*. Trans Tech Publications, Switzerland. pp.445-458.