

温暖化と海面上昇

Sea Level Rise due to Global Warming

松 本 英 二

Eiji MATSUMOTO

1. はじめに

大気中で二酸化炭素、メタンなどが増え続けている。これら温室効果ガスの増加は、地球温暖化をもたらす。地球温暖化は、雪氷の融解により海面上昇を引き起こすと考えられている。急激な海面上昇は、臨海低地の水没、塩水の侵入、海岸浸食など、人類社会に大きな影響を与えることになるので、海岸工学関係者にとっても大きな関心事であろう。

ここでは、地球科学の立場から、過去 100年間の海面変化とその要因を探る。また、将来の海面上昇については、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変化に関する政府間パネル) の温暖化シナリオに基づいて話を進めることにする。

2. 平均海面

海面の高さ (sea level) は潮汐 (tide) により半日周期で変化する。この値を長期間平均したものを平均海面 (mean sea level) と呼んでいる。平均海面は、陸に設置された水準点に対する海面の高さとして検潮器 (tide gauge) によって測定されている。従って、平均海面の変化は、陸に対する海面の相対的变化である。海水量の変化 (ユースタシ, eustasy) がなくとも、陸の鉛直運動があれば、海面変化として観測される。陸の鉛直運動としては、地質構造 (テクトニック, tectonic) 運動、アイソスタティック (isostatic) 運動、揚水による地盤沈下などが考えられる。また、海面は、気圧、温度、風、海流などの変化の影響を受ける。地盤運動は、完新世 (過去 1 万年) にわたる古汀線の変化を地質学的手法で調べるにより見積ることができる。風や海流による影響は短期的な現象であるので、長期間のデータを使えば除外することができる。

3. 過去 100 年間の海面変化とその要因

3. 1. 過去 100 年間の海面変化

世界中の検潮所の海面データは、英国の Bridston 観測所に集められ、PSML (Permanent Service for Mean Sea Level) のデータバンクと呼ばれている。このうち、420の検潮所のデータが海面変化の研究に利用可能である。

Gornitz と Lebedeff (1987)¹⁾ は、20年以上の連続記録があり、地盤変動を補正しうる 130の検潮所のデータから、1880年～1982年間の海面変化カーブを示した (図1)。このカーブから海面上昇速度として $1.0 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$ の値が得られる。他の研究例もすべて上昇傾向を示し、 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm/yr}$ の値に収斂する。

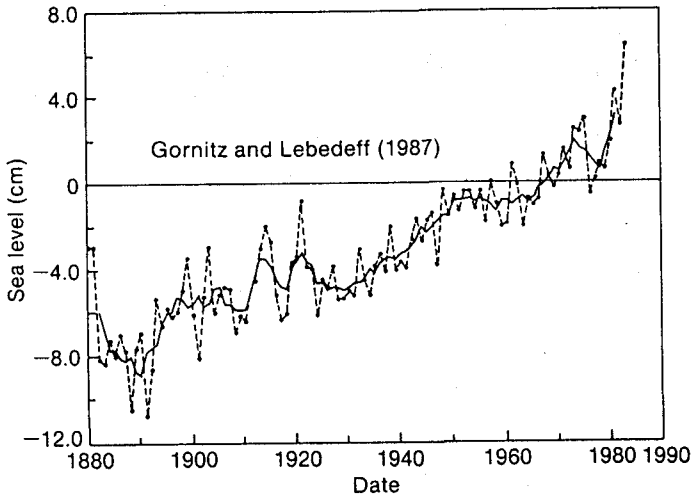


図1. 1951～1970年間の平均を基準としたグローバルな平均海面変化。

点線は年平均、実線は5年間の移動平均。

3. 2. 海面上昇の要因

過去 100年間の海面上昇をもたらした主な要因として次の2つが考えられる。

- 1) 海水の熱膨張
- 2) 陸上の雪水の融解

図2は1861年以降の地球表面の温度の変化である。1910～1940年間で1975年以降今日の2つの期間で温度上昇が著しい。このカーブから1861～1989年間で $4.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が読みとれる。この温度上昇との関連を考察してみる。

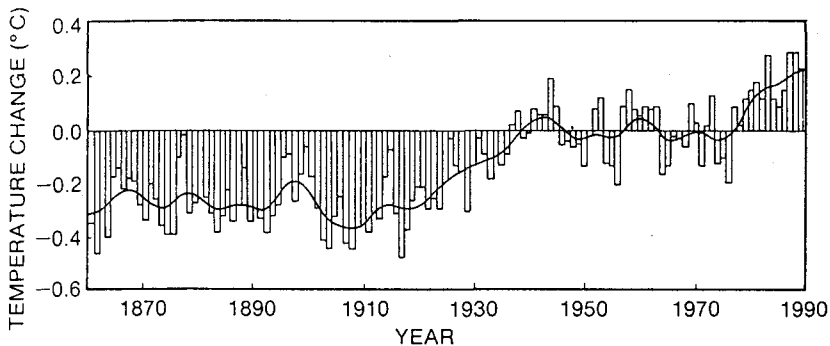


図2. 1861～1989年間の地球表面の温度変化。

1951～1980年の平均を基準にとった。

3. 2. 1. 海水の熱膨張

海水は温度が上昇すると体積を増す (thermal expansion)。たとえば、1 気圧のもとで塩分 35 ‰ の海水の熱膨張係数 α は、10℃で 0.167×10^{-3} で、20℃では 0.257×10^{-3} である。過去 100 年間の $0.45 \pm 0.15^\circ\text{C}$ の温度上昇によって、海水の温度分布がどのように変化したかがわかれば、海面上昇を計算することができる。しかしながら、観測データは時間的にも空間的にも不足していて、この種の計算ができない。海洋循環の三次元数値モデルは発展途上にあつて、まだ時期尚早である。Wigly と Raper (1987) ²⁾ は、単純な拡散-湧昇バランスモデルを使って、海面上昇 2~6 cm の値を求めた。この計算では鉛直拡散係数 $k = 0.64 \text{ cm}^2/\text{sec}$ と $\pi = 1$ を用いた。

3. 2. 2. 陸上の雪氷の融解

気温上昇により陸上の雪氷が融け、海洋に流入すれば、海面は上昇する。陸上の雪氷を山岳氷河、グリーンランド氷床および南極氷床の 3 つに大別し、それらの物理的特徴を表 1 に示した。この表で、Equivalent sea level は、雪氷が完全に融けて海洋に流入したときの海面上昇量である。

表 1. 地球上の氷河・氷床の特性。

	Antarctica (grounded ice)	Greenland	Glaciers & small ice caps
Area (10^6 km^2)	11.97	1.68	0.55
Volume (10^6 km^3 ice)	29.33	2.95	0.11 ††
Mean thickness (m)	2,488	1,575	200 ††
Mean elevation (m)	2,000	2,080	-
Equivalent sea level (m)	65	7	0.35 ††
Accumulation (10^{12} kg/yr)	2200 ††	535 †	-
Ablation (10^{12} kg/yr)	< 10 ††	280 ††	-
Calving (10^{12} kg/yr)	2200 ††	255 ††	-
Mean equilibrium - line altitude (m)	-	950 †	0 - 6,300
Mass turnover time (yr)	~15,000	~5,000	50 - 1,000

さて、陸上の雪氷が気温変化に対してどのような挙動をするかを考えてみる。年平均気温に対する雪の質量収支に関する一般的特性を図 3 に示した。ここでは、年平均気温に対する Accumulation (降雪量) および Ablation (融解流出と蒸発による雪氷の消耗量) を水に換算し m/yr であらわした。降雪量は気温の上昇とともに増加し、0℃あたりで最大となり、続いて減少する。一方、消耗は -15℃以上で起こり、気温の上昇と共に急激に増加する。降雪量から消耗量を差し引いた値は -8℃あたりでゼロとなる。この状態を平衡にあると呼んでいる。

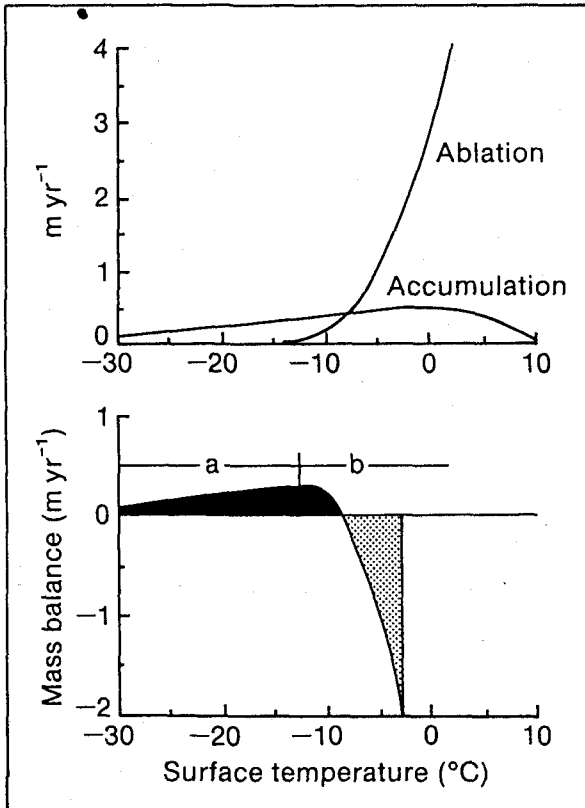


図 3. 降雪量と消耗量の年表面気温に対する一般的関係。

表 1 にみられるように、南極では雪氷の消耗が無視できるほど気温が低い。一方、グリーンランドでは、平衡高度が 950 m と高く、降雪量の約半分が消耗する。氷床では、雪氷表面での質量収支に加えて、氷床の流動化による氷の海への流出 (Calving) がある。表 1 では、消耗と氷流出の和が降雪量に等しくなるように、すなわち、雪氷全体の収支がゼロとなるように設定している。

(a) 山岳氷河

山岳氷河の多くは、過去 100 年間に縮少していることが知られている。その縮少は、20 世紀の中頃に著しく、1960 年頃に縮少から拡大に転じたが、1980 年にはその拡大速度は遅くなっている。Meier (1984)³⁾ は、氷河の観測に基づき、1900～1961 年間に山岳氷河の縮少により 2.8 cm の海面上昇、すなわち $0.46 \pm 0.26 \text{ mm/yr}$ の上昇速度を報告している。また、1885～1974 年に期間を拡大すると、上昇速度は 0.46 mm/yr より小さくなることを示した。

(b) グリーンランド氷床

グリーンランドにおける雪氷の質量収支のデータは乏しい。わずかな質量収支観測とエネルギーバランスモデルを用いて、 $0.3 \pm 0.2 \text{ mm/yr/}^\circ\text{C}$ の海面上昇速度が得られている。上昇速度が小さいのは、降雪量の増加が消耗量の増加を打ち消すためである。この値と 1880～1980 年間のグリーンランドの気温上昇とから、過去 100 年間の上昇量として $2.3 \pm 1.6 \text{ cm}$ ($0.23 \pm 0.16 \text{ mm/yr}$) の値が求められる。

(c) 南極氷床

南極氷床の質量収支については、現在のところ、よくわかっていない。南極では、温度が低いため、わずかの温度変化では、氷の消耗はおこらず、むしろ降雪量を増加させる。そのため、海面を低下させることになる。Fortuin と Oerlemans (1990) は、南極における多くの地点で観測された降雪量と温度との関係から、 $-0.2\text{mm/yr/}^{\circ}\text{C}$ の値を得た。

(d) 結果の合成

過去 100年間の海面上昇に対する各々の寄与の計算結果を表 2 に示した。南極の寄与をゼロと仮定すると、熱膨張、山岳氷河およびグリーンランド氷床からの合計は10.5cmとなる。この値は、海面観測結果10～20cmの下限值である。

表 2 過去100年間の海面上昇への寄与の計算結果。

	LOW	BEST ESTIMATE	HIGH
Thermal expansion	2	4	6
Glaciers/small ice caps	1.5	4	7
Greenland Ice Sheet	1	2.5	4
Antarctic Ice Sheet	-5	0	5
TOTAL	-0.5	10.5	22
OBSERVED	10	15	20

4. 将来の海面変化

将来の海面変化は、気候変化をどのように仮定するかによる。ここでは、ICPP⁵⁾による温室ガス排出量の仮定にもとづいて計算された気温変化を使う。気温変化は、温室ガスの排出量の仮定→大気中の温室ガス濃度の計算→気温変化の計算の順で行う。大気中の温室ガス濃度が2倍になった時の気温上昇予測は多くの研究があり、その値は1.5～4.5℃の範囲にある。ここでは2.5℃の値を用いる。IPCCは温室ガスの排出量について、A、B、CおよびDのシナリオを考え、気温変化を予測している(図4)。Aは排出規制がまったくとられないシナリオであり、B、C、Dの順で規制を強めたシナリオである。

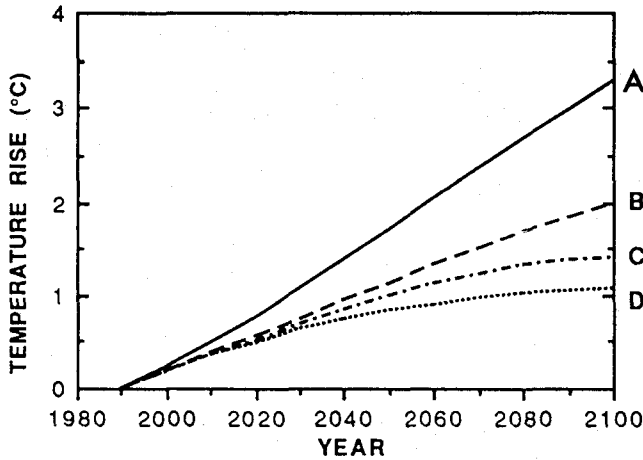


図4 温室ガス排出量の規制別の地球の気温の上昇予測。

Aのシナリオに沿って将来の海面変化を計算してみる。計算は前述の過去の海面上昇で用いた方法である。グリーンランドおよび南極氷床では、氷の流動の変化は無視できるものとし、雪氷表面での質量収支のみを考え、グリーンランド氷床で $0.3 \pm 0.2 \text{ mm/yr/}^{\circ}\text{C}$ 、南極氷床で $-0.3 \pm 0.3 \text{ mm/yr/}^{\circ}\text{C}$ の値を用いる。計算結果を図5に示した。

2030年では 18^{+11}_{-9} cm 、2070年では $44^{+27}_{-35} \text{ cm}$ 、2100年では 66^{+44}_{-35} と計算される。2030年における18cmの内訳は、海水膨張が10.1cm、山岳氷河が7.0cm、グリーンランドが1.8cm、南極が-0.6cmで、海水膨張と山岳氷河の融解の寄与が大きい。2030年で温室ガスの排出を完全に停止した場合の2100年の海面上昇を求めてみると、41cmとなる。これは気候変化に対する海洋や氷の応答の時間的な遅れのためである。

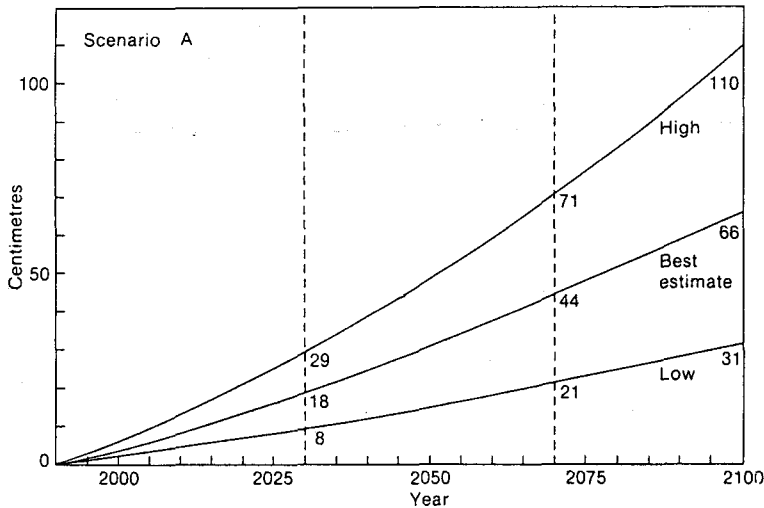


図5 シナリオAに対する1990～2100年間の海面上昇。

5. おわりに

ここで予測した温室ガス排出規制がない場合の2100年の海面上昇は66cmと、従来の予測にくらべると小さい。しかしながら、わずかな海面上昇でも、広大な海岸低地帯を抱えるバングラディシュ、インドネシア、エジプトそれに大洋に浮かぶサンゴ礁の島々にとっては深刻な問題である。

日本でも、海面が1.5m上昇すれば、いわゆるゼロメートル地帯が現在の3.5倍の4,200km²に拡大し、住民の数も980万人に増えるという調査がある。この上昇に伴う被害を最少にするためには、堤防や水門の建設、港湾の改築等のために巨大な土木工事が必要となる。人間による環境破壊の現実はいまに厳しい。

参考文献

- 1) Gornitz, V. and S. Lebedeff: Global sea level changes during the past century.
In: Sea-level fluctuation and coastal evolution, Eds., D. Nummedal, O.P. Pilkey and J.D. Howard, SEPM Special Publication No.41, pp.3-16, 1987.
- 2) Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper: Thermal expansion of sea water associated with global warming, Nature, Vol.330, pp.127-131, 1987.
- 3) Meier, M.F.: Contribution of small glaciers to global sea level, Science, Vol.226, pp.1418-1421, 1984.
- 4) Fortuin, J.P.F. and J. Oerlemans: Parameterization of the annual surface temperature and mass balance of Antarctica, Annals of Glaciology, Vol.14, pp.78-84, 1990.
- 5) Climate Change - The IPCC Scientific Assessment, Eds, J.H. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums, Cambridge University Press, 362pp., 1990.