

水工学シリーズ 08 - B - 1

気候モデル(GCM)による海水準の将来予測と その不確定性

東京大学 気候システム研究センター 准教授

阿部 彩子

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2008 年 8 月

気候モデル(GCM)による海水準の将来予測とその不確定性

Changes in Sea level change: Projection by AOGCM and its uncertainty

東京大学気候システム研究センター，阿部彩子 (Ayako Abe-Ouchi)

1. はじめに

数十年から数万年の気候の変化に関連して、海水準は変化する。ここでは、海水準の変化をもたらす要因を整理し、20世紀にこれまで観測された変化についてまとめ、21世紀末さらに数千年、数万年の変化を想定した将来予測についてその不確実性も含めて議論する。将来の海水準予測が必要になるのは、沿岸のインフラ整備だけでなく、原子力発電所の廃棄物処理埋設などもある。これまでの海水準変化の観測とその方法、将来の海水準予測についてここで概観するが、詳しくは、IPCC 報告書 Intergovernmental Panel on Climate Change やその中の引用論文を参照するのがよい。図は IPCC WG1 から引用した。

2. 海水準変化の原因

将来を予測するためには、原理的要因を理解して過去に起こった変化の要因を見積もることが重要である。海水準変化を引き起こす主な要因には、海水の質量の変化と、海水の質量変化を伴わない体積変化、すなわち、膨張がある。前者には、陸水（陸から流出する水、地下水、氷の融解による流出など）の変化と蒸発／降水の変化がある。そもそもの蒸発／降水量は陸水に比べると非常に少ないので、その変化は無視できる。陸水の90%以上は大陸規模の氷（氷床）として南極、グリーンランドなどに蓄えられたものなので、気候変化にともなう氷床の変化を知ることが必要になる。またその他の氷河（山岳に存在する氷の河）の融解／凍結も重要になる。さらに、その他の地下水や河川として蓄えられている陸水の変化の分もある。一方、後者の海水の膨張は、おもに、水が温度上昇とともに熱膨張する性質によってもたらされる。そこで、海水準の変化の要因を知るには、氷床や氷河や地下水や河川などの陸水各項目の量の変化と海水の温度分布の変化が必要になる。さらに、氷床などの体積変化にともなって地球の地殻マントルが変形することによるアイソスタシーの変化を見積もることが必要になることもある。現在の南極では、このアイソスタシーの変化が観測されていると考えられており、南極氷床そのものの融解と区別するために地殻やマントルの変形の見積もりが必要になってくる。このように、現在起こっている海水準変化には、過去数十年だけでなく過去数千年の陸水や気

候の変化が関わっていることが最近明らかになりつつある。

以下の問題をやってみよう。

Q 氷床の融解と海洋の熱膨張が海面上昇をどのくらいもたらすか計算してみよう。海洋の面積を $3.6 \times 10^{14} \text{ m}^2$ 、海水の密度を 1000 kg/m^3 、氷の密度を 900 kg/m^3 、水の熱膨張率を $2. \times 10^{-4} / \text{K}$ として

- (1) 南極氷床の氷とグリーンランド氷床の氷がすべて融けると海水位はどのくらい上昇するか。南極氷床の面積は $1.3 \times 10^{13} \text{ kg/m}^3$ 、平均厚さが、2500m、グリーンランド氷床の面積は 1.8×10^{12} 、平均厚さは 1500m とする。
- (2) 海水面から深さ 800 メートルの海水中まで 5.K 水温が上昇したとすると、熱膨張によって水位は何メートル上昇するか。

3. 過去の海水準変化の観測

海水準は直接的には潮位計によって測られる。そのほか、地質学的、地形学的に復元する方法と、高度計や重力計など衛星から観測する方法がある。

過去数十万年は気候の変化にともなって、海水準が 100 メートル以上変化していたことが知られており、その時間変化の見積もりがさまざまな方法で試みられている。大局的には、12 万年前の現在とほぼ同じ気候からゆっくりした寒冷化、さらに 2 万年ごとの寒暖や日射の上下にともなう氷床変化によって約 2 万年前に 120 メートル以上に海水準低下が起こり、その後、とくに 15000 年前から 6 千年前にかけて約 1 世紀につき 10 メートルの割合で上昇した（図 1）。最近 100 年あまりについては、100 年に 15cm、1990 年以降は最近 10 年では 25mm あまり上昇している（図 2）。さらにその変化には、地域性がある（図 3）。図 4 では、すべての寄与について比較している。各項目の上のバーが 1961 年から 2003 年まで、下のバーは 1993 年から 2003 年までの変化を示している。

(3-1) 海面熱膨張の寄与

海面熱膨張について海洋の水温データから見積もると、時空間変化がわかる。年々変動が大きいものの、船による海洋観測データと海洋モデルによるデータ同化により客観解析データが作られており、誤差は他の項目に比べて小さいと考えられる。図 3 の (b) のように、海洋の循環や温度を反映して地域差がある。最近 10 年では、海面熱膨張による寄与は最近 10 年は 15 mm/年 の変化に達する。

(3-2) 氷河と氷床による寄与

氷河と氷床は陸地に降った雪が氷化して流動しているものであり、海に浮く海氷からは区別され、質量の増減（質量収支）が海面に影響する。その変化は氷の性質や夏だけ融解する季節依存のため非常に時間スケールの長いものとなっ

ており、数十年から数千年におよぶ。主に気温によって融解が制御され、さらに、降水量の変化も質量変化に影響をあたえるので、気温と降水量の変化からある程度見積もることができる。

氷河は世界に何百とあり、すべての質量収支が明らかになっておらず地域性があるため、評価が難しいが、近年人工衛星や各種観測から氷河の後退の大きいことが報告されている。さまざまな情報を総合すると、海面上昇への寄与は、8mm/年前後である。一方、氷床については、人工衛星による高度と重力のモニターがこの10年ほどで可能になったので、ようやく10年の変化がわかってきたところだが、変化の時間スケールが非常に長いので、まだ変化は小さく、また過去の履歴も持っている。グリーンランドと南極はそれぞれ2mm/年前後の寄与があるとされるが、前者は、縁辺部の融解の増加と中央部の降水量増加による差し引きで決まっており、後者はおそらくは氷期からのアイソスタシーの履歴のせいではないかと考えられている。

4. 将来の予測

将来の予測は、人口や社会経済変化を考慮した人為起源ガスの「排出シナリオ」の想定の下で実験した「気候モデル（専門的には、大気海洋結合大循環モデル、AOGCM という）」による気温変化、水温変化、降水量変化の出力を用いる。IPCC AR4 によると21世紀末までに気温は、全球平均で、約2度から6度ほど上昇し、海水準は12cm から54cm 上昇すると予測されている。これには、いくつかの不確実性が含まれる。まず、「排出シナリオ」に想定幅がある。どんな経済社会になるか、予測に大きな幅があるため、SRES という4つあまりに大きくりのシナリオをもとに、計算を行うことになる。つぎに、たとえ同じ排出シナリオでも気候モデルごとに答えが異なってくる。それは、本来気候システムプロセスのなかにさまざまな「気候フィードバック」が含まれており、原理的にその同定が完全にはでき得ないことによる。たとえば、気温があがると、よけい水蒸気が蒸発してさらにその温室効果のために温度上昇がすすむとか、気温があがると、雲が増えてそのために日射量が減った多少温度上昇が押さえられるなどである。この気候フィードバックが大きいモデルは気温上昇を大きめに予測するなど、違いがでる。さらに、気温が同じでも、その後の氷河や氷床は流動の変化（たとえば、氷河がとけて、底面がその融け水が潤滑油のような役目をして滑りやすくなるよけいに氷がとけやすくなるなど）にもフィードバックが考えられる。IPCC AR4 では、その氷床の流動のフィードバックについては考慮なかった（とくにごく最近観測されている氷床の融解や流出の早い進行は考慮に入っていない）。そのため、IPCC AR4 の海水準予測値は実際のものより過小評

価があるとかんがえられており、次回の IPCC に残された課題となっている。また、氷床の変化は非常に長い時間かかるため、たとえ、人為起源ガスの排出がなくなったり、気温上昇が止まったとしても、その後、数百年の変化が引き続き起こることが考えられている。とくにグリーンランド氷床や西南極氷床では、ある境界値を超えると、大きな氷床変化が起こることがかんがえられており、それは、グリーンランドの場合、気温にして2〜3度の上昇であり、西南極の場合はまだ研究不足で定まらない。海水準への影響は、グリーンランドの場合は、5〜6メートル、西南極も数メートルであろうと予測される。

5. まとめと今後の課題

海水準変化には、おもに氷床と氷河量の変化と海洋熱膨張の変化が考えられる。20世紀の変化は、10年に約20mm以上の海面上昇が起こっており、年が進むにつれ加速している。山岳氷河の融解と海水の熱膨張の各項目の変化原理のよりよい理解のため、観測と気候モデル改良やつきあわせの両方がひきつづき必要とされる。とくに氷床の変化については、注意が必要であるため、過去に起こった観測（数十万年前からのものを含む）をモデルによって再現するなどを通じてモデルを改良していくことが急がれる。また、氷床の変化について、現在の観測を説明する範囲内（想定内）の最悪の見積もりをしてみることも必要であろう。

まとめ：

- (1) 海水準は氷期間氷期サイクルなどで大きく変化してきた。（〜100メートル）。
- (2) その主な原因はこれまでは、山岳氷河と海面上昇にあるが、数百年先は氷床変化にある。
- (3) まずグリーンランドが、つづいて南極が消失の危機にある。
- (4) 1メートル程度でも人の暮らしには大きな影響がある。今影響が小さいと思ってもあとにつづく影響は大きい。
- (5) 数十センチの精度でもとめたり、長期影響の見積もりのためには、氷床のダイナミクスの理解と氷床の気候応答の理解が不可欠である。

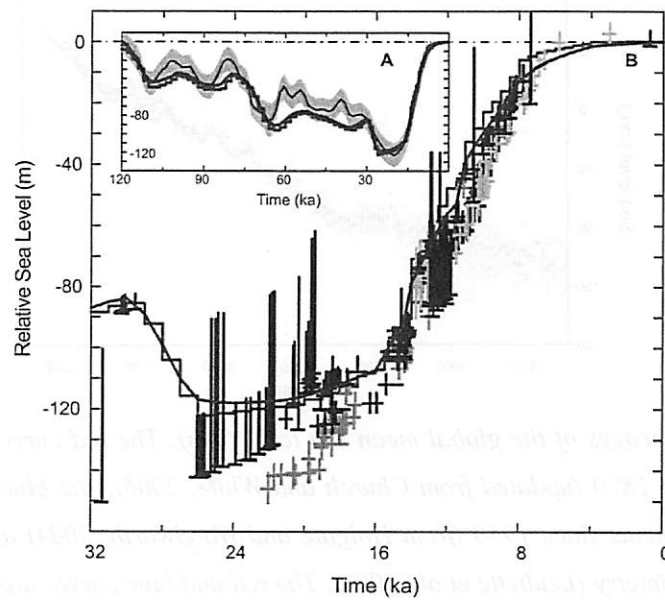


Figure 1. (A) The ice-equivalent eustatic sea level history over the last glacial-interglacial cycle according to the analysis of Waelbroeck et al. (2002). The smooth black line defines the mid-point of their estimates for each age and the surrounding hatched region provides an estimate of error. The red line is the prediction of the ICE-5G(VM2) model for the Barbados location for which the RSL observations themselves provide an excellent approximation to the ice-equivalent eustatic sea level curve. (B) The fit of the ICE-5G(VM2) model prediction (red line) to the extended coral-based record of RSL history from the island of Barbados in the Caribbean Sea (Fairbanks, 1989; Peltier and Fairbanks, 2006) over the age range from 32 ka to present. The actual ice-equivalent eustatic sea level curve for this model is shown as the step-discontinuous purple line. The individual coral-based estimates of RSL (blue) have an attached error bar that depends upon the coral species. The estimates denoted by the short error bars are derived from the *Acropora palmata* species, which provide the tightest constraints upon relative sea level as this species is found to live within approximately 5 m of sea level in the modern ecology. The estimates denoted by the longer error bars are derived either from the *Montastrea annularis* species of coral (error bars of intermediate 20 m length) or from further species that are found over a wide range of depths with respect to sea level (longest error bars). These additional data are most useful in providing a lower bound for the sea level depression. The data denoted by the coloured crosses are from the ice-equivalent eustatic sea level reconstruction of Lambeck and Chappell (2001) for Barbados (cyan), Tahiti (grey), Huon (black), Bonaparte Gulf (orange) and Sunda Shelf (purple).

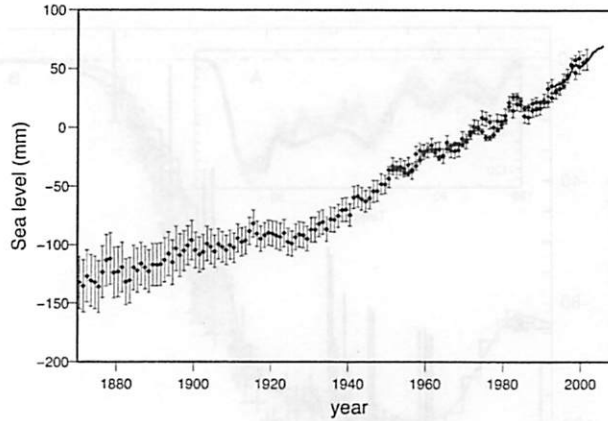


Figure 2. Annual averages of the global mean sea level (mm). The red curve shows reconstructed sea level fields since 1870 (updated from Church and White, 2006); the blue curve shows coastal tide gauge measurements since 1950 (from Holgate and Woodworth, 2004) and the black curve is based on satellite altimetry (Leuliette et al., 2004). The red and blue curves are deviations from their averages for 1961 to 1990, and the black curve is the deviation from the average of the red curve for the period 1993 to 2001. Error bars show 90% confidence intervals.

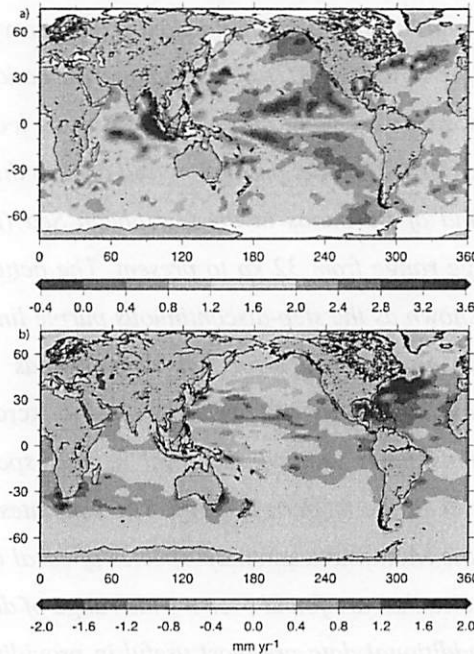


Figure 3. (a) Geographic distribution of long-term linear trends in mean sea level (mm yr^{-1}) for 1955 to 2003 based on the past sea level reconstruction with tide gauges and altimetry data (updated from Church et al., 2004) and (b) geographic distribution of linear trends in thermal expansion (mm yr^{-1}) for 1955 to 2003 (based on temperature data down to 700 m from Ishii et al., 2006). Note that colours in (a) denote 1.6 mm yr^{-1} higher values than those in (b).

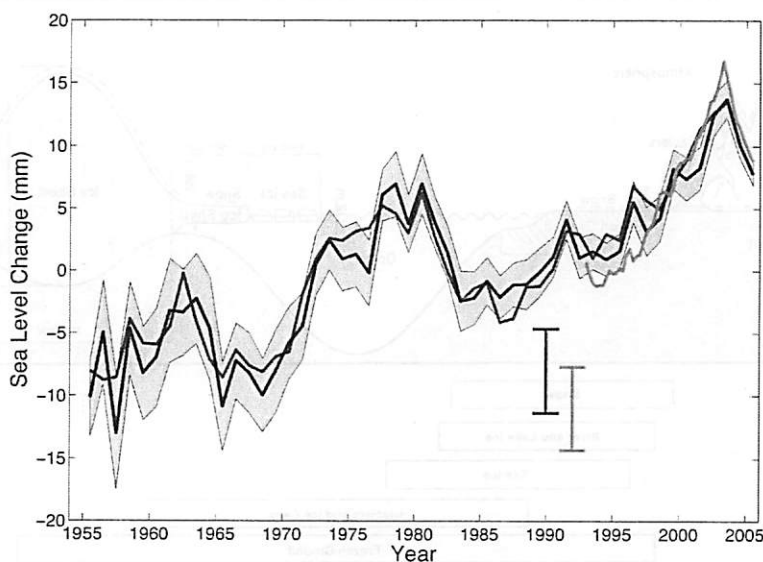


Figure 4. Global sea level change due to thermal expansion for 1955 to 2003, based on Levitus et al. (2005a; black line) and Ishii et al. (2006; red line) for the 0 to 700 m layer, and based on Willis et al. (2004; green line) for the upper 750 m. The shaded area and the vertical red and green error bars represent the 90% confidence interval. The black and red curves denote the deviation from their 1961 to 1990 average, the shorter green curve the deviation from the average of the black curve for the period 1993 to 2003.

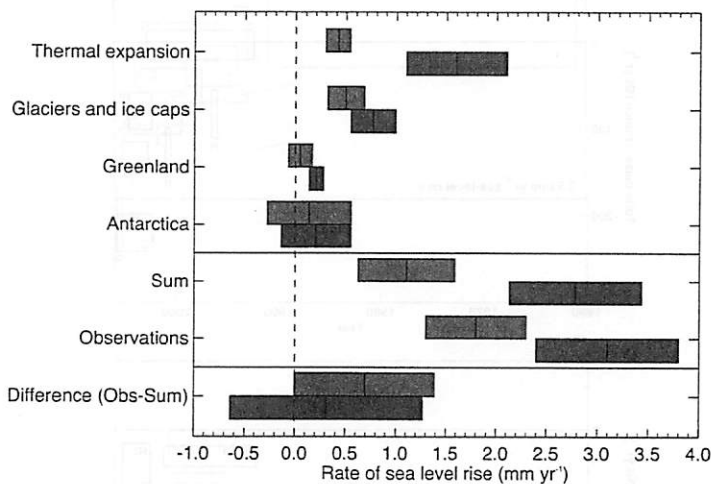


Figure 5. Estimates of the various contributions to the budget of the global mean sea level change (upper four entries), the sum of these contributions and the observed rate of rise (middle two), and the observed rate minus the sum of contributions (lower), all for 1961 to 2003 (blue) and 1993 to 2003 (brown). The bars represent the 90% error range. For the sum, the error has been calculated as the square root of the sum of squared errors of the contributions. Likewise the errors of the sum and the observed rate have been combined to obtain the error for the difference.

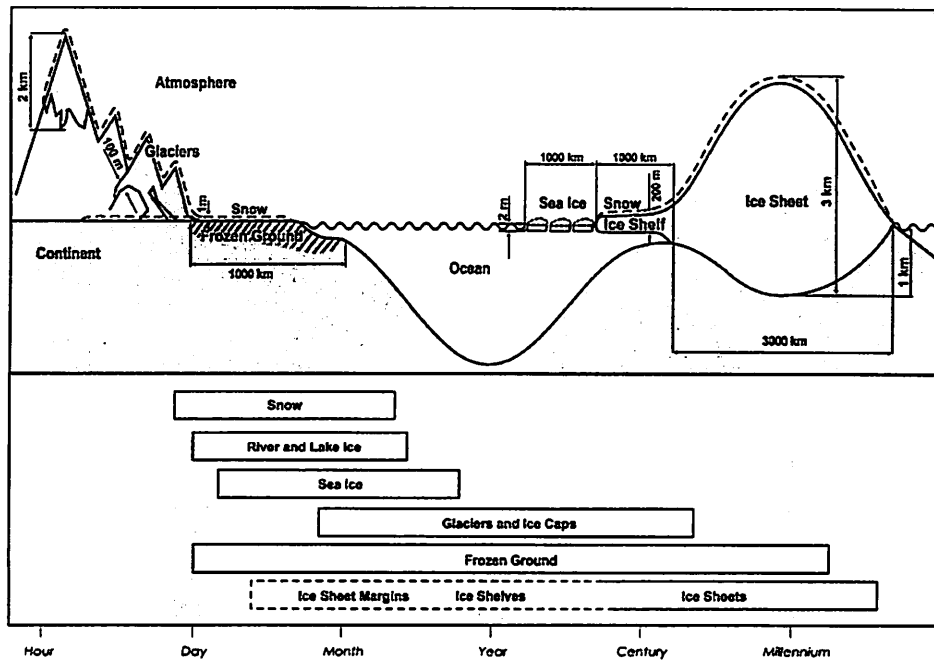


Figure 6. *Components of the cryosphere and their time scales.*

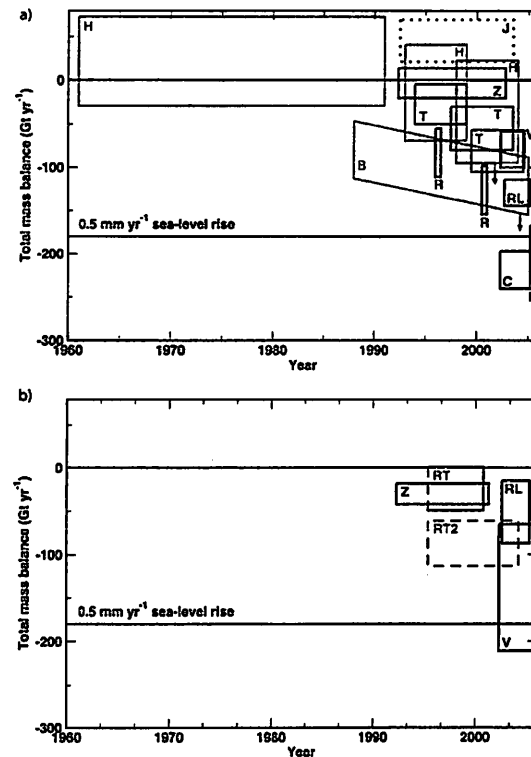


Figure 7. (Top) *Mass balance estimates for Greenland. The coloured rectangles, following Thomas et al. (2006), indicate the time span over which the measurements apply and the estimated range,*

given as (mean + uncertainty) and (mean – uncertainty) as reported in the original papers. Code: B (orange; Box et al, 2006), surface mass balance, using stated trend in accumulation, ice flow discharge (assumed constant), and standard error on regression of accumulation trend, with added arrow indicating additional loss from ice flow acceleration; H (brown; Hanna et al., 2005), surface mass balance, with arrow as for B; T (dark green; Thomas et al., 2006), laser altimetry, showing new results and revision of Krabill et al. (2004) to include firn densification changes; Z (violet; Zwally et al., 2006), primarily radar altimetry, with uncertainty reflecting the difference between a thickness change due to ice everywhere and that due to low-density firn in the accumulation zone; R (red; Rignot and Kanagaratnam, 2006), ice discharge combined with surface mass balance; V (blue; Velicogna and Wahr, 2005) GRACE gravity; RL (blue; Ramillen et al., 2006) GRACE gravity; J (magenta dashed; Johannessen et al., 2005), radar altimetry without firn densification correction and applying only to central regions that are thickening but omitting thinning of coastal regions. (Bottom) Mass balance estimates for grounded ice of Antarctica. Coloured rectangles show age span and error range as in the top panel. Code: Z (violet; Zwally et al., 2006), radar altimetry, with uncertainty reflecting the difference between a thickness change due to ice everywhere and that due to low-density firn everywhere; RT (dark green; Rignot and Thomas, 2002), ice discharge and surface mass balance, with dashed end line because some of the accumulation rate data extend beyond the time limits shown; RT2 (dark green; Rignot and Thomas, 2002), updated to include additional mass losses indicated by Thomas et al. (2004) and Rignot et al. (2005), dashed because the original authors did not produce this as an estimate for the whole ice sheet nor are accumulation rates updated; V (blue; Velicogna and Wahr, 2006), GRACE gravity; RL (blue; Ramillen et al., 2006), GRACE gravity.

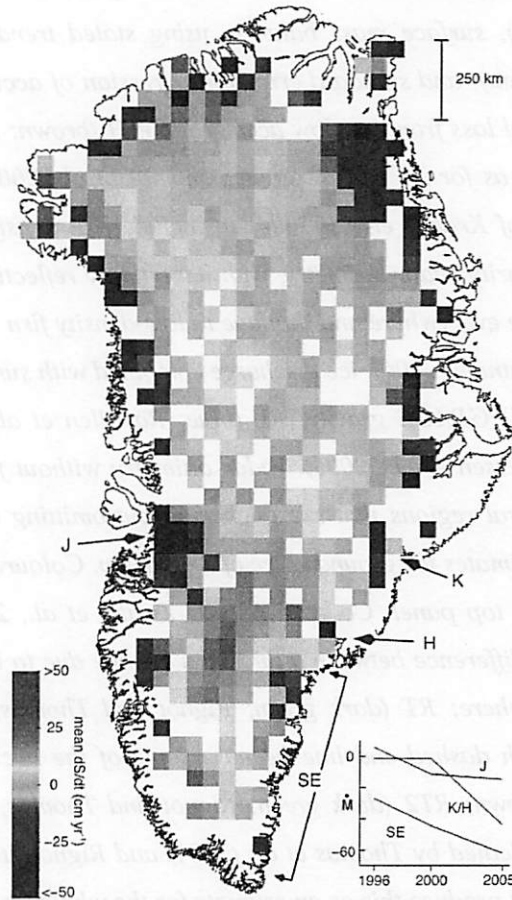


Figure 8. Rates of surface elevation change (dS/dt) derived from laser altimeter measurements at more than 16,000 locations on the Greenland Ice Sheet where ICESat data from 2005 overlay aircraft surveys in 1998/1999 (using methods described by Thomas et al., 2006). Locations of rapidly thinning outlet glaciers at Jakobshavn (J), Kangerdlugssuaq (K), Helheim (H) and along the southeast coast (SE) are shown, together with an inset showing their estimated total mass balance ($\dot{M}$, $Gt\ yr^{-1}$) between 1996 and 2005 (Rignot and Kanagaratnam, 2006).

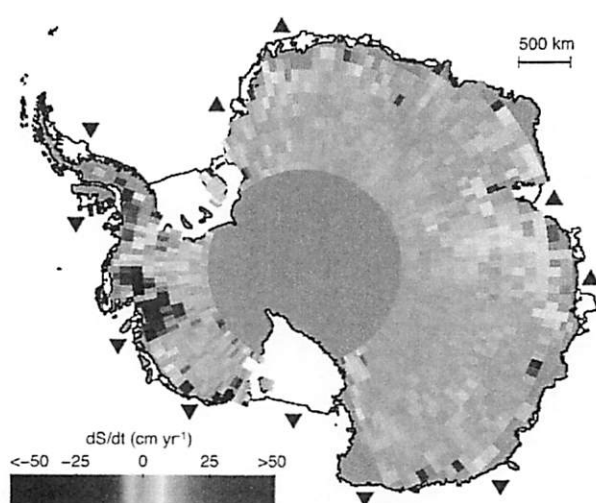


Figure 9. Rates of surface elevation change (dS/dt) derived from ERS radar-altimeter measurements between 1992 and 2003 over the Antarctic Ice Sheet (Davis et al., 2005). Locations of ice shelves estimated to be thickening or thinning by more than 30 cm yr⁻¹ (Zwally et al., 2006) are shown by red triangles (thickening) and purple triangles (thinning).

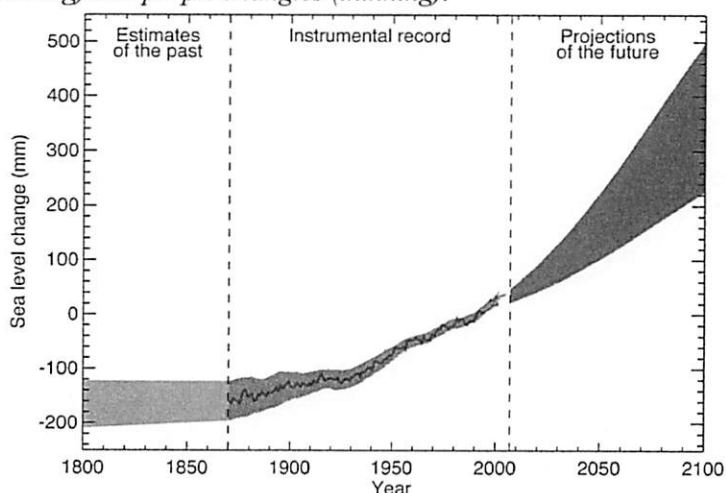


Figure 10. Time series of global mean sea level (deviation from the 1980-1999 mean) in the past and as projected for the future. For the period before 1870, global measurements of sea level are not available. The grey shading shows the uncertainty in the estimated long-term rate of sea level change (Section 6.4.3). The red line is a reconstruction of global mean sea level from tide gauges (Section 5.5.2.1), and the red shading denotes the range of variations from a smooth curve. The green line shows global mean sea level observed from satellite altimetry. The blue shading represents the range of model projections for the SRES A1B scenario for the 21st century, relative to the 1980 to 1999 mean, and has been calculated independently from the observations. Beyond 2100, the projections are increasingly dependent on the emissions scenario (see Chapter 10 for a discussion of sea level rise projections for other scenarios considered in this report). Over many centuries or millennia, sea level could rise by several metres (Section 10.7.4).