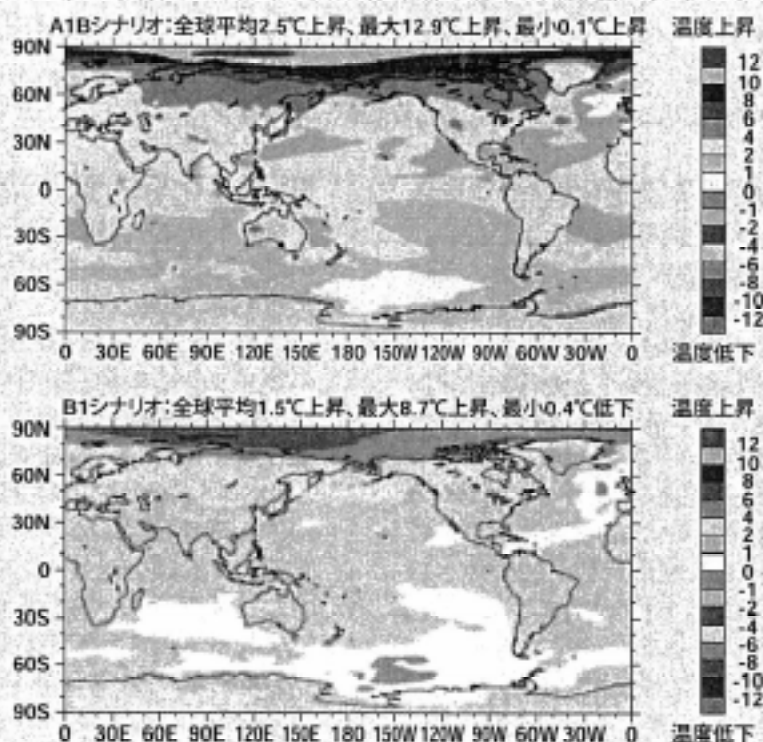


電中研ニュース

408



20世紀末から100年後の気温上昇の予測

西暦2450年までの地球温暖化を予測

— 地球シミュレーターでCO₂濃度安定化の効果を検証 —

- 温暖化対策の効果はいつ現れるのか
- 濃度安定化効果の超長期シミュレーション
- オーバーシュートシナリオの効果
- ひとつと 環境科学研究所 重点課題責任者 上席研究員 丸山 康樹

温暖化対策の効果はいつ現れるのか

温暖化問題については、100年後の地球上の気象、気候がどのように変化するかに関心が集まりがちです。しかし、温暖化対策の究極の目標は、生態系や食糧生産、経済発展と折り合いをつけた気候安定化を達成することです。このためには、22世紀以降までをも対象にして、超長期にわたる温暖化対策の効果を実証的、科学的に検証することが重要になります。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の統合報告書 (2001) では、「温暖化防止の対策を実施しても、その効果が現れ、気候が安定化するまでには数百年から数千年もの非常に長い時間を要するのではないか」という指摘がなされています。温暖化があるレベルまで進行してしまうと、気温上昇や海面上昇などを食い止めることが非常に困難になる恐れがあるという予想です。

電力中央研究所では、世界最高速級のスーパーコンピューターである地球シミュレーターを用いて、西暦2450年までという超長期にわたる地球温暖化の進行を、世界で初めて予測しました。その結果には、温暖化対策の導入時期が遅れることによって、数百年にわたり不可逆的な状況が引き起こされる可能性を示唆するものも含まれています。

今回の予測結果は、IPCC第4次評価書 (2007) のとりまとめへの反映などを通して、京都議定書以降の長期的な温暖化防止の国際交渉に役立つものと期待しています。

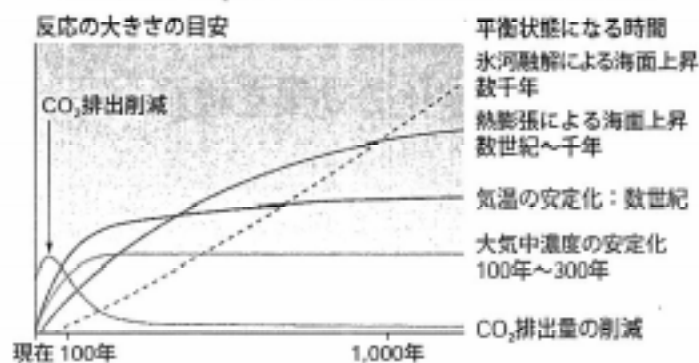
■ IPCCが指摘する温暖化進行の予想

2005年2月16日に「京都議定書」が発効し、温室効果ガスの削減が国際公約として進められることになりました。しかしこの条約では温暖化を10年程度遅らせる効果しか期待できません。今後は、途上国の参加も含めて、京都議定書以降の新たな枠組みに関する国際交渉が活発化するものと予想されます。

気候の安定化のためには、大気中の温室効果ガスをどの濃度レベルで、いつ安定化すべきか。この課題に関する科学的な検証が不可欠ですが、これまでにこの検討はほとんどなされていません。

IPCCの議長の人であるスーザン・ソロモン (Susan Solomon) 博士は、「温暖化防止の効果が現れ、気候が安定化するまでの、数百年以上にわたる超長期間を対象にした、定量的な検証を早急に進める必要がある」と、世界の研究グループにメッセージを送っています。

排出削減後、CO₂濃度、気温、海面上昇は長期間増加し続ける



出典：IPCC統合報告書 (2001)

図1 CO₂排出削減と気候応答の時間スケール

■ 温暖化防止効果の検証プロジェクト

当研究所は、温暖化防止に役立つ科学的知見を得るため、2002年度から文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」に参加し、米国大気研究センター (NCAR)、米国エネルギー省のロスアラモス国立研究所 (LANL) と協力して、世界最高速級の地球シミュレーターを用いた温暖化防止効果の予測研究を実施してきました。

2004年8月にはIPCCの温暖化シナリオをベースに、当研究所独自のシナリオも加えて、濃度安定化効果の予測シミュレーションを完了しました。

この結果は、CO₂濃度安定化の効果予測が盛り込まれる予定であるIPCC第4次評価書 (2007) への反映とともに、京都議定書以降の長期的な温暖化防止の国際交渉に役立つことを期待しています。

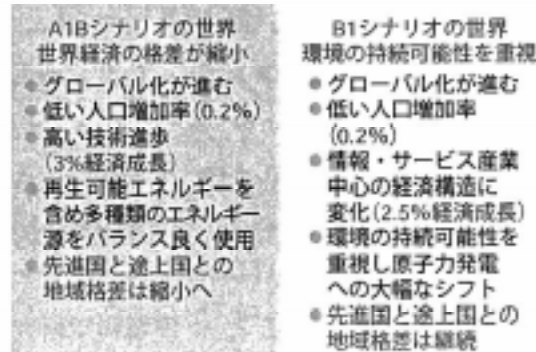


図2 IPCC特別報告書 (2001) の主なシナリオの特徴

濃度安定化効果の超長期シミュレーション

■ 温暖化の予測シナリオ

ベースとなるシナリオは、IPCCの特別報告書(2001)にある、A1BとB1のコード名で呼ばれる2100年までを対象にした2種類のシナリオです。いずれも高い経済成長(3%~25%)を想定し、A1Bでは「世界経済の格差が縮小する世界」を、B1は「環境の持続可能性を重視した世界」を示しています。

それぞれの一次エネルギー構成は、A1Bは再生可能エネルギーへの大幅なシフト、B1では原子力発電への大幅シフトが特徴です。

この2100年までの2つのシナリオをベースに、まず2100年以降は温室効果ガス濃度を2100年レベルで一定にする、2つのシナリオで予測しました。これらは、①2100年まではA1Bで進み、それ以降はその時点の濃度750ppmで安定化させるシナリオ(A1B&750ppm)と、②2100年まではB1で進み、それ以降はその時点の濃度550ppmで安定化させるシナリオ(B1&550ppm)です。

さらに、上記①で2150年まで進み、それから2250年にかけて750ppmから550ppmに温室効果ガス濃度を直線的に減少させ、その後2450年まで550ppmを維持させるという、電中研独自のオーバーシュートシナリオでも予測を行いました。

■ 温暖化防止効果の検証

温暖化のシミュレーション計算にはアンサンブル予測という手法を採用しました。この手法は、初期値を数種類変化させて、その平均を取る計算手法です。これにより、地球上の各地域の状況が全体の気候に微妙な相互影響を及ぼす温暖化計算の精度を飛躍的に向上させ、あわせて、一つのシナリオに対する予測を変動幅をもって把握することができます。

予測に用いた大気海洋結合モデルの解像度は、大気モデルが約150km、海洋モデルが約100kmと中規模の解像度ですが、温暖化防止効果を把握するための超長期の予測に適しています。

温暖化防止効果はシナリオによって異なります。A1B&750ppmシナリオでは、21世紀末では、全球の地上気温は約2.5℃上昇し、全球降水量は6.0%増加。2100年以降も気温は徐々に上昇し、気温の安定化には数百年程度の時間がかかることが分かりました。食糧生産などへの影響が避けられません。

一方、B1&550ppmシナリオでは、21世紀末に約1.5℃上昇し、降水量は約3.9%増加すると予測され、2100年の濃度安定化後、気温は比較的早く安定化することが示されました。

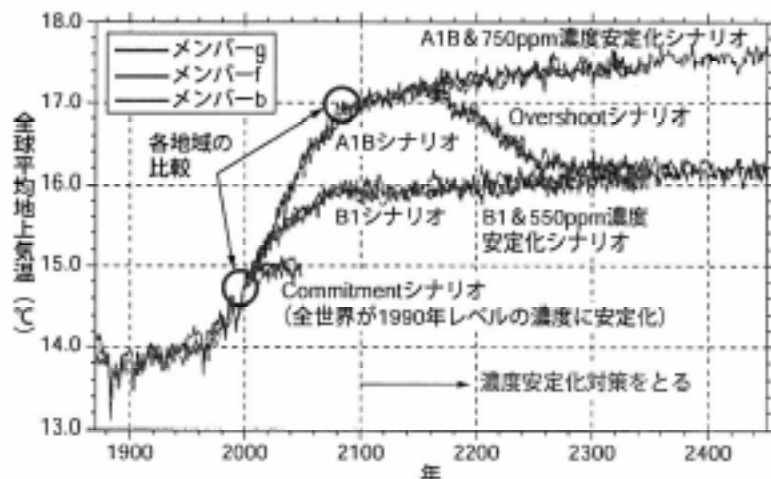


図3 全球レベルの気温上昇予測結果(全シナリオ)

オーバーシュートシナリオの効果

■ 新たに分かったことと今後の課題

温暖化によって海水温が上昇すると、海水には非常に大きな影響を受ける可能性があります。

今回の予測では、A1B&750ppmシナリオでは、海水体積が濃度安定化後もわずかに減りつづける傾向がみられるのに対して、B1&550ppmシナリオでは、比較的早く安定化することが分かりました。

一方、温暖化防止対策によって大気中の温室効果ガス濃度を削減するオーバーシュートシナリオの場合は、気温、海水体積、深層海流の循環などは550ppmで安定化レベルにほぼ復元する可能性が高いことが示されました。

またいずれのシナリオでも、海面上昇の原因となる海洋の温度上昇が継続するため、海水の熱膨張による海面上昇は、数百年から千年以上も超長期間継続する可能性のあることが分かりました。

今後の課題としては、温暖化には、海水や永久凍土の解凍、気候変化ストレスによる生態系影響（枯死など）など、一旦発現すると復元が困難な現象との相互作用も考慮する必要があります。これらについての検討が残されています。

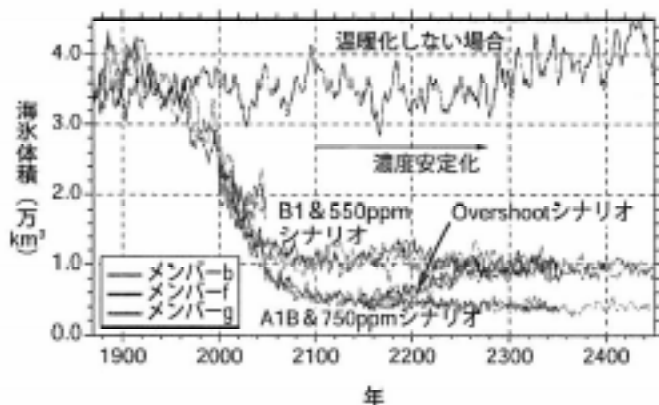


図4 北極の海水体積は安定化後も減少続ける

■ 世界のエネルギー政策への示唆

今回の予測結果からは、次のような世界のエネルギー政策への示唆を引き出せると考えます。

- (1) A1B&750ppmシナリオでは、気温安定化に数百年程度の非常に長い時間がかかり、その間に海水の消滅などの“危険な人為的干渉”を引き起こす懸念があります。750ppmでの安定化は、温暖化防止の濃度目標としては高すぎる可能性があります。
- (2) B1&550ppmシナリオは、温暖化防止のための濃度目標の一つの候補になると考えられます。ただし、目標とする適切な濃度レベルがどういった数値になるかについては、判断基準の明確化を含めて引き続き検討することが必要です。
- (3) オーバーシュートシナリオは、温室効果ガスの削減がうまく進まない場合でも気候復元の可能性を示しており、地球規模でのリスク管理の一つとして検討に値すると考えられます。

● ひとこと



環境科学研究所
重点課題責任者
上席研究員
丸山 康樹

今回の予測は、IPCCから、温暖化予測に取り組む世界の研究機関・研究者に向けて発せられた、研究推進のメッセージに答える研究として実施したものです。

このような計算は、世界最高速のスーパーコンピュータである地球シミュレーターを使うことで初めて実現しました。

地球シミュレーターを使った予測では、2100年までの気候・気象の変化をより解像度の高い全球モデルで予測するプロジェクトも他の研究機関で実施されましたが、濃度安定化の効果を超長期に予測するものは私たちのグループだけが実施しました。

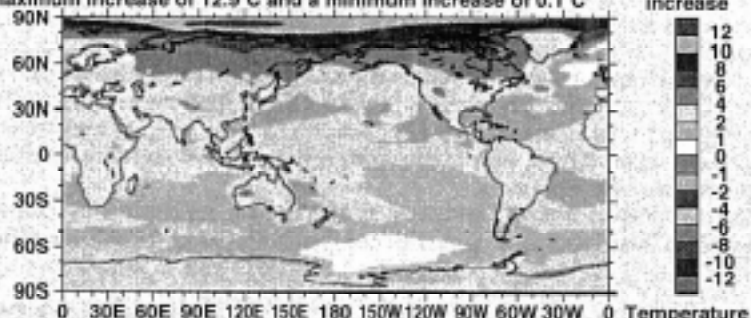
今回は、2100年に突然、温室効果ガス濃度をその時点の濃度で安定化するという不自然なシナリオを採用していますので、今後は、大気海洋結合モデルの信頼性を高める研究を進めると並行して、濃度安定化に向けたより合理的な削減シナリオの検討を進め、温暖化防止効果について政策面での提言に貢献していきたいと考えています。

■ 既刊「電中研ニュース」ご案内

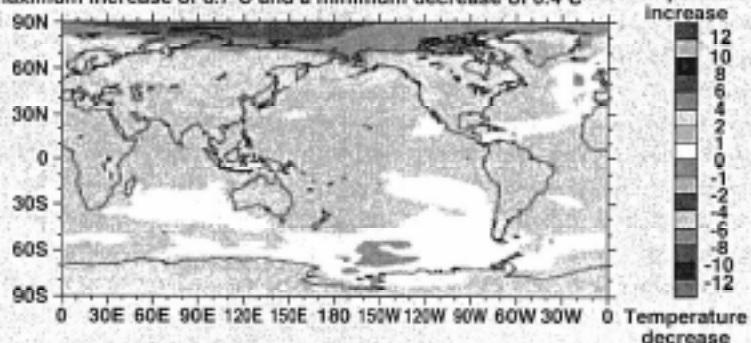
- No.407 画像による監視・計測ソフトの開発を容易に
No.406 複雑な震源断層の形状を把握する

- No.405 CRIEPIのうごき 2005.1冬
No.404 超音波を利用した新しい非破壊検査法

A1B scenario: Increase of globally averaged surface temperature by 2.5°C, with a maximum increase of 12.9°C and a minimum increase of 0.1°C



B1 scenario: Increase globally averaged temperature increase by 1.5°C, with a maximum increase of 8.7°C and a minimum decrease of 0.4°C



Predicted temperature change at 100 years from the end of the 20th century

Prediction of global warming up to the year 2450

— Evaluation of the effect of stabilization of CO₂ concentration in the atmosphere using the Earth Simulator —

1. When do the stabilizations of CO₂ concentration take effect?
2. Prediction of effects of stabilization of GHG concentrations over centuries
3. Effects of overshoot scenario

● **Brief Note:** Koki Maruyama, Director, Principal project of global warming and mitigation, Environmental Science Research Laboratory

When do the stabilizations of CO₂ concentration take effect?

Whenever we discuss the issue of global warming, there tends to be a focus on how the weather and climate on the earth will change in the future. However, the ultimate objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) is to achieve stabilization of greenhouse gas (GHG) concentrations, such as CO₂, methane and CFCs, in the atmosphere at a level that would prevent the "dangerous anthropogenic interference" with climate system within a time frame sufficient to allow ecosystem to adapt naturally to climate change and to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner. To achieve this objective, it will be most important to evaluate the effect of stabilization of GHG concentrations in the atmosphere, quantitatively and scientifically, with special attention on the question what is the "dangerous anthropogenic interference" with climate system.

The Synthesis Report (2001) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) suggests that even if stabilization of GHG concentrations is taken, it may take an extremely long period from a few centuries to millennia for the climate to reach equilibrium condition. It implicates that preventing of temperature change or sea-level rise after the global warming has progressed to a certain level would be very difficult due to large inertia of the earth climate system.

CRIEPI has predicted, for the first time in the world, how global warming will proceed after stabilization of GHG concentrations over an extremely long period as far-off as to the year 2450, using the Earth Simulator, the world's fastest class supercomputer in Japan. The results obtained suggest that the delay in introducing reduction of GHG emissions including CO₂, possibly causes irreversible climate changes over several hundred years.

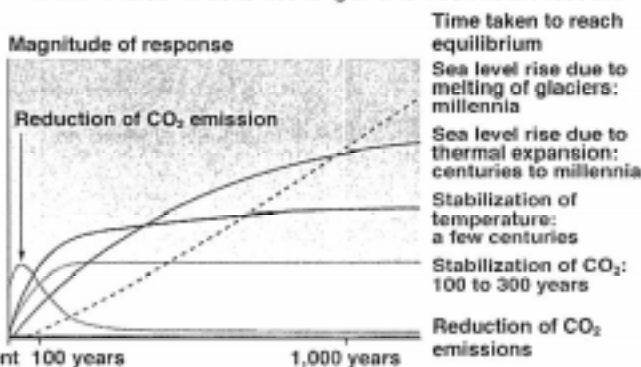
We expect the prediction results will contribute to international negotiations for long-term reduction of CO₂ after the implementation of the Kyoto Protocol, through reflecting them in developing the IPCC Fourth Assessment Report, which will be published in 2007.

IPCC suggests climate changes continue long after emissions are reduced

The Kyoto Protocol has come into effect on February 16, 2005 and reduction of emissions of GHGs has become an international commitment. However, what we can expect of the Kyoto Protocol is estimated to postpone the increasing of CO₂ concentration in the atmosphere for about a decade at most due to non-reduction in developing countries. Hereafter, international negotiations are expected to intensify to work out a post-Kyoto Protocol framework, involving newly participating of developing countries.

To prevent the climate change, it still remains unknown when and at what level of concentrations of GHGs in the atmosphere should be stabilized. Dr. Susan Solomon, one of the co-chairs of IPCC Working Group I, is sending a message to world's research community, saying, "It is urgently needed to predict effect of stabilization of GHG concentrations for a few centuries to contribute scientifically the post-Kyoto Protocol framework."

CO₂ concentration, temperature, and sea level continue to rise long after emissions are reduced



Source: IPCC Synthesis Report (2001)

Fig.1 Time scale of climate response to reduction of CO₂ emission

The project to estimate effects of stabilization of GHG concentrations

To acquire useful scientific understanding for global warming prevention, CRIEPI has been participating in the research initiative "Project for Sustainable Coexistence of Human, Nature, and the Earth" launched by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) in Japan, since fiscal year 2002, and conducting a research to estimate effects of stabilization of GHG concentrations using the Earth Simulator, the world's fastest class supercomputer in Japan, through international research collaboration with the National Center for Atmospheric Research (NCAR) and the Los Alamos National Laboratory (LANL) both in U.S.A. In August 2004, we finished global warming predictions to estimate effects of stabilization of GHG concentrations, based on A1B and B1 scenarios by IPCC Special Report on Emission Scenarios (2001) (called SRES) in conjunction with CRIEPI original overshoot scenario.

We expect the results of the prediction will contribute to international negotiations for long-term reduction of CO₂ after the implementation of the Kyoto Protocol, through reflecting them in the IPCC Fourth Assessment Report (2007).

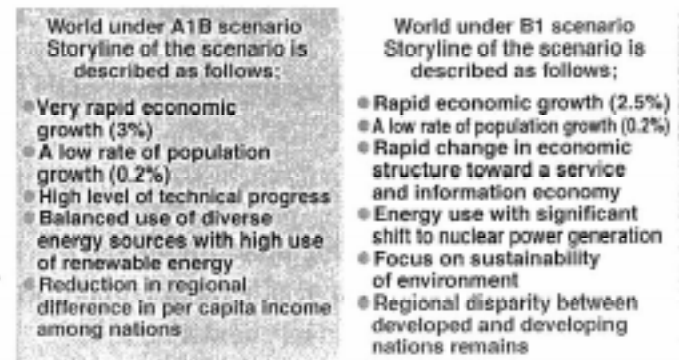


Fig.2 Features of scenarios in IPCC SRES (2001) used for predictions

Prediction of effects of stabilization of GHG concentrations over centuries

Scenarios for predictions

Several kinds of stabilization scenarios were made for predictions based on A1B and B1 scenarios in the IPCC SRES (2001), which deal with a term up to the year 2100. Both scenarios assume a high economic growth (3% and 2.5%, respectively) and A1B shows the world with reduction in regional difference in per capita income among nations, while B1 shows the world with emphasis on sustainability of environment. As for primary energy supply system in the world, A1B features significant shift to renewable energy sources, while B1 features drastic shift to nuclear power generation particularly in Asian countries.

As discussed in the IPCC Synthesis Report (2001), long-term climate responses have to be investigated to estimate effects of stabilization of GHG concentrations in the atmosphere. For this purpose, the SRES A1B and B1 scenario are extended beyond year 2100 till year 2350 to 2450 (one ensemble member, discussed later) with constant concentrations at the year 2100 concentration levels of the "nominal" 750ppm and "nominal" 550ppm, respectively. The term of "nominal" means the nominal level of CO₂ concentration but with the combined anthropogenic climate forcing of GHGs, such as CO₂, methane, ozone, CFCs and so on. These two stabilization scenarios are referred as the A1B stabilization and B1 stabilization scenarios, respectively. A commitment scenario is a kind of stabilization scenario requested by the IPCC Working Group I, where the GHG concentrations are held fixed to the contemporary (year 2000) level after year 2000 until year 2050. The purpose of this scenario is to demonstrate how humans have already committed to the global warming in the future.

In addition to above scenarios, CRIEPI proposed an overshoot scenario with linearly decreased GHG concentrations from stabilized A1B level at "nominal" 750ppm of CO₂ concentration to stabilized B1 level at "nominal" 550ppm during 2150-2250 and with subsequent stabilization at "nominal" 550ppm up to 2350-2450 (one ensemble). This scenario is to be

used to investigate hysteresis or irreversible effects in climate system against different pathways of GHG concentrations.

Prediction results

We newly adopted an ensemble prediction method with three members, where each member adopts different initial condition and ensemble mean of results of all members were taken to obtain statistically reliable predictions.

For effective use of computer resources of the Earth Simulator, we developed an optimized code of the coupled atmosphere-ocean climate model based on NCAR CCSM3. The resolutions of CCSM3 are approximately 150 km for the atmosphere component model, and approximately 100 km for the ocean component model. Although the resolutions of CCSM3 are not so high, the model is effective for long-term predictions to estimate effects of stabilization of GHG concentrations.

Predicted results using the CCSM3 show that the global warming prevention effects differ depending on kinds of the stabilization scenarios. A1B and "nominal" 750ppm stabilization scenarios show a rise of approximately 2.5°C in ensemble mean of global surface temperature and an increase by 6.0% in ensemble mean of global precipitation at the end of the 21st century. Both the temperature and precipitation keep gradually rising also from year 2100 onward, taking a few hundred years to reach equilibrium climate conditions. This suggests serious impacts on global ecosystem and food production or other things.

Meanwhile, B1 and "nominal" 550ppm stabilization scenarios show the temperature rise of 1.5°C and a precipitation increase by 3.9% at the end of 21st century, and the temperature changes reaches equilibrium condition relatively faster than A1B and "nominal" 750ppm stabilization scenarios.

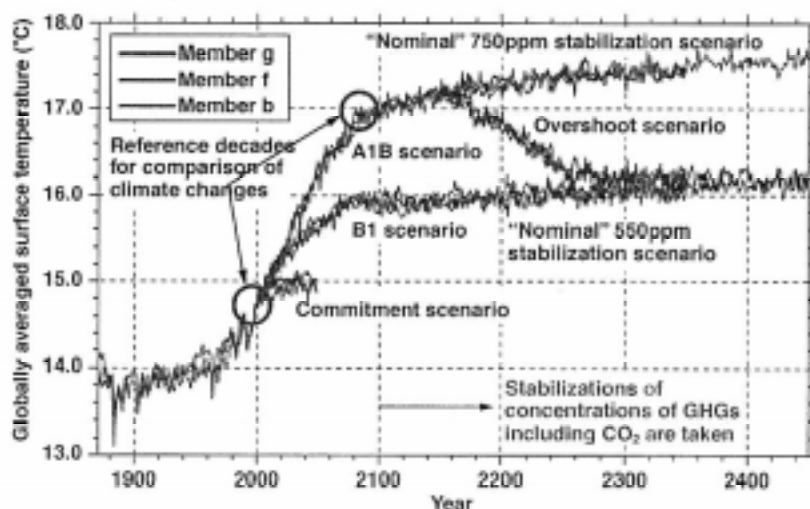


Fig.3 Predicted results of globally averaged temperature change (all scenarios)

Effects of overshoot scenario

New findings and scientific problem lying ahead

Increase of sea water temperature can have a great impact on melting of sea ice.

In these predictions, we find out that, with A1B and "nominal" 750ppm stabilization scenarios, the sea ice volume in the Arctic keeps slightly decreasing even after the concentrations of GHGs are stabilized, while with B1 and "nominal" 550ppm stabilization scenarios, the sea ice volume stabilizes relatively faster rather than the A1B and "nominal" 750ppm stabilization scenarios.

Meanwhile, with the overshoot scenario, in which concentrations of GHGs in the atmosphere are reduced linearly from "nominal" 750ppm to "nominal" 550ppm, we find it is possible that the temperature, sea-ice volume, thermohaline (overtun) circulation in the Atlantic and other phenomena are almost restored to the level of stabilization at "nominal" 550ppm.

On the other hand, we also find that the sea-level rise due to thermal expansion of sea water continues for several centuries to millennia in any of the stabilization scenario, because the temperature in the ocean keeps rising even after stabilization of concentrations of GHGs due to large thermal inertia of the ocean.

The phenomena such as melting of sea ice or permafrost, withering of vegetation are supposed to be difficult to restore to the original state once occurred. Therefore, the complicated feedbacks between climate and environmental changes are important scientific problems to be examined in the future.

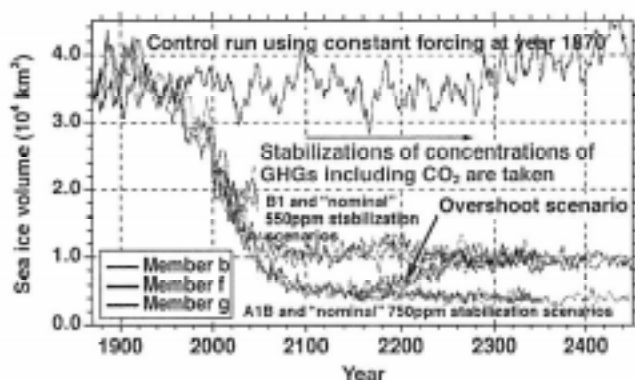


Fig.4 Sea ice volume in the Arctic keeps decreasing even after stabilizations of concentrations of GHGs including CO₂ are taken

Implication to the world energy policy

From the results of the predictions, we can derive following implication to the world energy policy to reduce CO₂ emissions beyond the Kyoto Protocol:

- (1) A1B and "nominal" 750ppm stabilization scenarios may not meet the goal of UNFCCC because the sea ice will vanish in the Arctic, which might correspond to the "dangerous anthropogenic interference" with climate system.
- (2) B1 and "nominal" 550ppm stabilization scenarios might be one of the target levels. However, an appropriate level of CO₂ concentrations in the atmosphere should be decided from a clear criterion, which still remains unknown.
- (3) A further research of overshoot scenario should be pursued because it is expected to be useful for risk managements to cope with low and late emission reduction of CO₂ in the world.

● Brief Note



Koki Maruyama
Director
Principal project of global warming and mitigation
Environmental Science Research Laboratory

We have conducted multi-century global warming predictions to respond to request sent from IPCC WG 1 to research community in the world. The long integrations using the climate model were only possible by the use of the Earth Simulator, the world's fastest class supercomputer in Japan.

Although other research groups in Japan have conducted predictions of climate change up to 2100 by higher resolution global models using the Earth Simulator, our international research group was one of the first groups to predict the effect of stabilization of concentrations of GHGs over multi century.

However, the scenarios we adopted this time were somewhat unrealistic in assuming that the concentrations of GHGs are suddenly stabilized at the time of 2100. Therefore, we will continue with our research on more realistic scenarios for stabilization of concentrations of GHGs, to contribute for global warming prevention, along with the research to improve reliability and accuracy of the coupled atmosphere-ocean climate model through the international collaboration with NCAR and LANL.