

基調講演

「地球温暖化や自然災害に挑む研究の現状と展望」

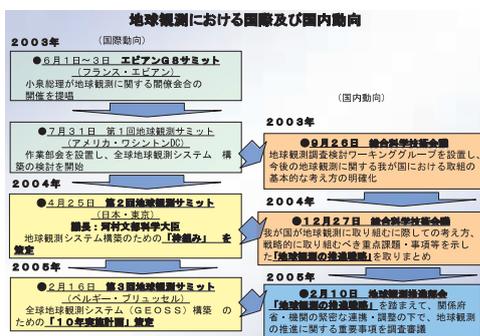
地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁 事務局長
財団法人 日本気象協会 顧問

藤谷 徳之助 氏

1945年、大阪府生まれ。1969年京都大学理学部地球物理学科卒業。1971年同大学院理学研究科修士課程修了。京都大学防災研究所助手、気象庁気象研究所研究官、研究室長、筑波大学教授（併任）を経て、1995年福岡管区気象台技術部長。1997年気象庁気候・海洋気象部海洋課長。1999年観測部管理課長。2001年札幌管区気象台長。2002年気象庁地震火山部長。2003年気象庁気象研究所長。2006年退職。現在は地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁 事務局長（（財）日本気象協会顧問）。専門は気象学。理学博士。



1. 地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁とは？

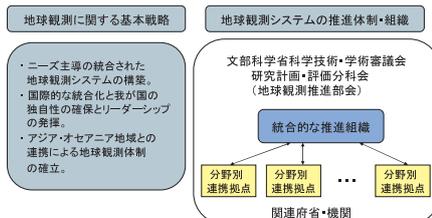


まず私が所属しています地球温暖化観測推進事務局について簡単にご紹介致します。2003年のフランス・エビアンサミットで、当時の小泉首相が、地球温暖化問題などの地球環境問題を解決するためには、もっと地球を良く知る必要がある、地球観測をきちんとやる必要がある、ということをご提案されました。それを受けて、7月にワシントンで第1回地球観測サミットが開催され、地球観測に関する作業部会が設置され、地球観測システムの検討が始まりました。翌年、東京で第2回サミット、2005年にベルギーのブリュッセルで第3回のサミットが開催されました。そのとき、いわゆる全球地球観測システム (GEOSS: Global Earth Observation System of Systems) 構築のための10年実施計画というのが採択され、地球観測システム構築の計画が開始されています。

一方、国内を見ますと、このような国際的な動きを受けて、日本としても地球観測をどうするかという基本戦

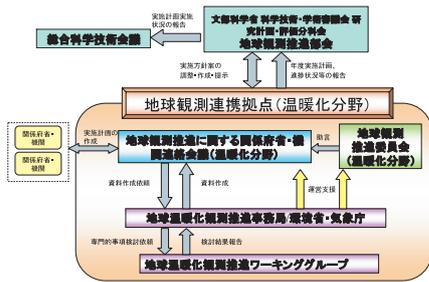
略をつくらないといけないということになりました。総合科学技術会議に市川惇信先生を主査に地球観測調査検討ワーキンググループが設置され、私もこのワーキンググループに参加していましたが、このワーキンググループで検討が行われました。そして、2004年12月に「地球観測の推進戦略」を総合科学技術会議に報告しています。

「地球観測の推進戦略」
(総合科学技術会議2004年12月)



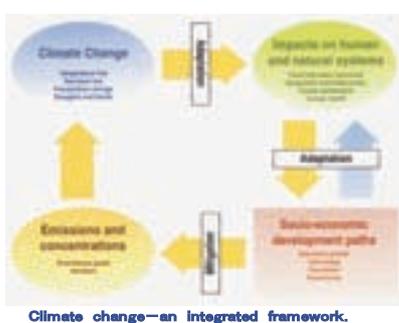
「地球観測の推進戦略」では基本戦略として、ニーズ主導の統合された地球観測システムの構築、国際的な統合化と我が国の独自性の発揮とリーダーシップ、アジア・オセアニア地域との連携、が述べられています。実際の推進体制としては、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会に地球観測推進部会が設置され、そこで統合的な地球観測を推進する体制になっており、私もこの部会に参加しております。推進戦略では特に5つの重要な分野について重点的に取組む必要があると述べられており、その1つが地球温暖化分野であります。これら重点5分野につきましては、関係府省・機関の連携を促進する体制としての連携拠点を整備することが必要であるとされており、このような背景のもと、地球観測連携拠点 (温暖化分野) が設置されました。

この連携拠点はバーチャルな組織なのですが、関係府省・機関連絡会議が意志決定組織であり、これに科学的なアドバイスをするのが地球観測推進委員会で、大学の先生方にご参加いただいています。それから私が所属しています推進事務局、さらに、その下に実際にいろいろな調査をやる地球温暖化観測推進ワーキンググループが設置され、専門家の方々にご参加いただいています。このような組織で、地球温暖化に関するいろいろな観測ニーズなどを取りまとめています。



2. 地球温暖化問題とは？

これから地球温暖化問題についていろいろとお話ししていきますが、環境問題は、以前は公害問題あるいは酸性雨などの地域環境問題がその中心的な問題でした。しかし、現在ではそれが地球規模まで拡大し、特に気候変動と密接に結びついて、空間的には地球全体、時間的には数百年という単位での地球環境問題、地球温暖化問題となったわけです。地球温暖化問題というのは、温室効果ガスの増加に伴う気温の上昇をそう呼んでいます。このような問題は非可逆的な側面が強く、我々の生活全てに関係しています。しかも我々の世代だけで終わるのではなくて、将来の世代にも影響する恐れがある問題です。さらに、単に技術的な対抗策を考えるだけでは不十分で、社会的・経済的の制度に結びついた解決策を求める必要がある、非常に複雑な問題です。



気候変動は人間社会や自然システムにインパクトを与え、社会・経済的な発展の道筋とも相互に関係しています。さらに、温室効果ガスの排出をどう減らすかということにも関係しており、お互いに影響を及ぼし合うことから、解決するのはなかなか難しい問題です。とはいえ、

きちんと解決しないとイケない問題です。

3. 気候・気候変化(変動)とは？

いま、私は簡単に「気候変動」と言っておりますが、正確に言いますと、「気候変化」と「気候変動」は意味しているところが違います。「気候変化」はclimate change、「気候変動」はclimate variationです。昨年ノーベル平和賞を受賞いたしました「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)で用いている「気候変化」という言葉では、自然の変動または人間活動の結果、どちらによるものであろうと、全ての気候の時間的変化を示しています。一方、京都議定書などでよく出てくる「気候変動枠組条約」(UNFCCC: United Nations Framework Conventions on Climate Change)では、人間活動に直接あるいは間接に起因する気候の変化の部分だけを「気候変化」といっています。また、気候変化というのは10年あるいはそれより長いスケールの変化、それに対して気候変動というのは、あらゆる空間的、時間的スケールの変化を意味しています。ただし、我が国においてはIPCCやUNFCCCに関して、climate changeを最初に「気候変動」と翻訳したことから、現在もその訳語が使用されています。

それともう1つ、「異常気象」という言葉があります。この言葉は、過去の平均的な気候状態と大きくかけ離れた気象現象をいうわけですが、気象庁の定義では、「過去30年間あるいはそれ以上にわたって観測されなかったほど平年値から偏った場合」となっています。

さて、気候というのは大気の平均的な状態を示すわけですが、これに影響するものが非常にたくさんあります。例えば、雲や降水などの水の循環、二酸化炭素(CO₂)などの大気の組成、土壌・植生などの陸面、海洋、さらには、雪氷圏などがあります。しかし、最も重要なものは太陽放射です。このような各要素が相互に影響しながら、あるいは外部から影響されながら変わっていくシステム全体を気候システムと呼び、その変化が気候変化ということです。



気候変化、気候変動と一口に言いましても、いろいろな時間スケールの変動や変化があります。過去90万年の気温の変動を見ますと、大体10万年ぐらいの周期で気温が高くなったり低くなったりしています。もう少し詳しく見ますと、もっと細かい変動があります。その中をまた詳しく見ると、さらに細かい変動があるという具合に、実はいろいろな変動が重なっています。

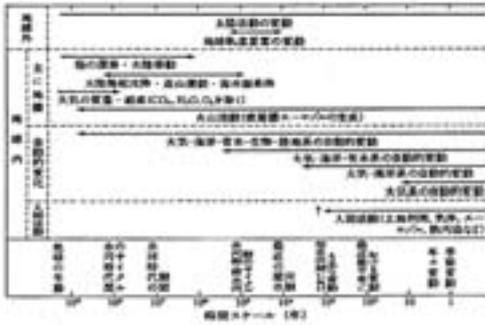
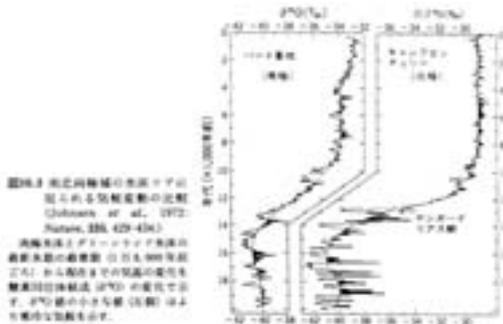


図1-1 気候変動の時間スケールとそれらの気候変動に因る変動をみる図解 (アッペリア, 1974)

このような気候変動を起こす原因にはいろいろな時間スケールのものがあります。例えば、地球の軌道要素が変わることによる変動は、大体10数万年の時間スケールです。それから、太陽活動や大気の状態・組成の変動は、長い場合には数億年スケールというように非常に広い時間スケールで変わります。また、火山活動などによってエアロゾルが成層圏に入って気候が変わるといったことは間歇的に生じます。海洋ではその変動の時間スケールは10年から1,000年、あるいはそれより長いスケールになります。さらに、雪氷ではもっと長くなります。人間活動については、はっきりとはわかりませんが、1,000年ぐらいのスケールまでは影響すると思われます。よく知られているように、氷期、間氷期のサイクルは大体10万年スケールです。



気候の変化というのは非常に緩やかに変わっているという印象があります。約1万8,000年ぐらい前から間氷期が始まって暖かくなります。この図をよく見ますと、暖かくなる過程で突然急に寒くなったりしています。緩やかに変化しているように見えて、詳しく見ると実は非常に劇的に変わっている場合があります。



図3-1 Figure 1. Schematic of the Earth's orbital changes (Milankovitch cycles) that drive the ice age cycles. 'e' denotes changes in the orbit (eccentricity) of the Earth's axis, 'i' denotes changes in the eccentricity of the orbit and 'p' denotes precession, that is, changes in the direction of the axis tilt at a given point of the orbit. (FAQ 6.1, Figure 1)

さて、先ほど言いました地球の軌道要素が変わることによって気候が変わるといのは、基本的には太陽からの日射、特に地球の夏のときに入射する日射量が変わることによるわけです。これを言い出したのは、ミランコビッチというセルビアの天文学者で、このような変動の様子をミランコビッチサイクルと我々は呼んでおります。軌道要素として3つありまして、1つは、地球の楕円軌道の離心率が変わります。これが大体10万年と41万年の周期です。その次に、現在、地球は23.5度傾いているのですが、これがやはりプラスマイナス1.25度ぐらい変わります。その周期が大体4万1,000年です。それからもう1つは、いわゆる歳差運動(味噌揺り運動)です。この周期が大体2万3,000年と1万9,000年ぐらいです。

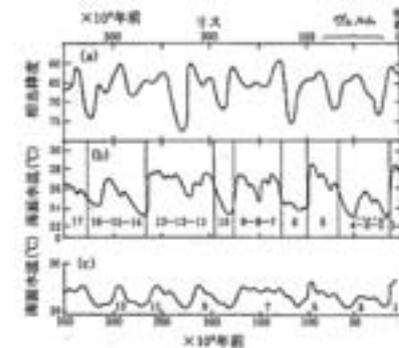


図4-1 日射と海面水温の変動。
(a) ミランコビッチ(1900)作成のもの。ミランコビッチ(1900)が修正した日射の変動。標高緯度で示す。
(b) エミリアニ(1955)が作成した大西洋熱帯海域の海面水温の変動。
(c) エミリアニ(1964)が(b)とほぼ同じ緯度で得た新しい資料によるもの。

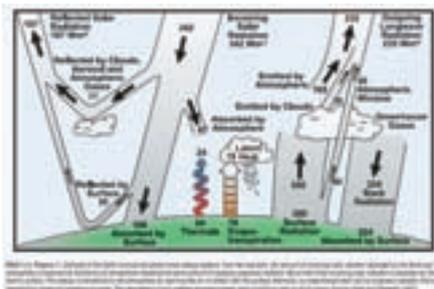
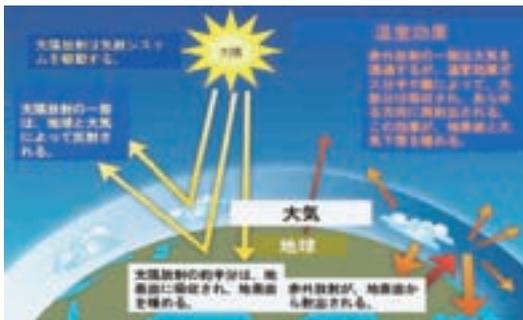
これらのいろいろな周期の変動が合成された10万年スケールの日射量の変動と、気温の変動がほぼ対応しています。そういう意味で気候変動の非常に有力な原因の1つは、いわゆる地球軌道要素による日射量の変化なのですが、それだけでは全てを説明することができません。ほかにも原因があります。それがこれから申します、温室効果ガスによる、いわゆる地球温暖化の現象です。

4. 地球温暖化のメカニズム

地球温暖化のメカニズムはどういうものなのでしょうか。地球

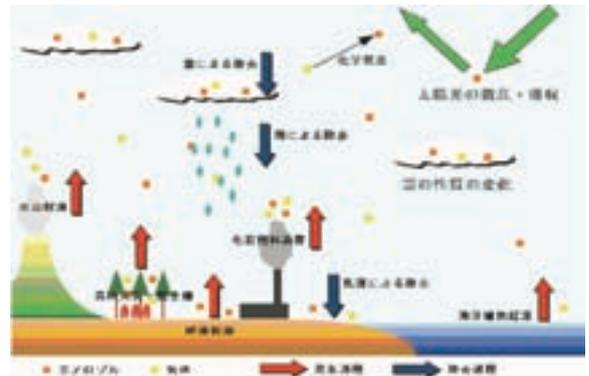
というのは太陽からの放射を熱源とする熱機関ですが、一方向に寒くなったり暑くなったりするわけではなく、熱的にはバランスがとれているわけです。どれぐらいの気温でバランスがとれるかといいますと、これは簡単な計算で求めることができ、表面の平均温度が大体マイナス18℃ぐらいになります。この温度を有効放射温度と言います。ところが実際の地球というのはもっと暖かく、実際の地球表面の温度は大体15℃から17℃ぐらいになっています。そうするといわゆる熱的にバランスがとれる温度と35℃ぐらいの差があるわけです。この温度差がどうして起きたかという、地球に大気があることによって生じているわけです。我々はそれを地球大気の温室効果と呼んでいます。

では、温室効果はどのようにして生じるかといいますと、太陽からの放射（短波放射といいます）は一度大気層を突き抜けて、地表面に吸収されます。その地表面は低い温度ですので、地表面から放出されるのは長波放射です。その長波放射を地球大気・雲・水蒸気・CO₂などが吸収して、それを再び上下方向に放射します。この放射を大気や地表面が吸収することで暖まります。言い換えれば大気というのは太陽放射で直接暖まるのではなくて、一度地球に吸収されて長波放射となって放出された放射で暖まられています。大気が太陽放射に対して透明であるのに対して、地球放射に対しては不透明である、こういう効果を温室効果と呼んでいます。その温室効果のおかげで大気の温度が10数℃になっていて、我々が生活できているわけです。

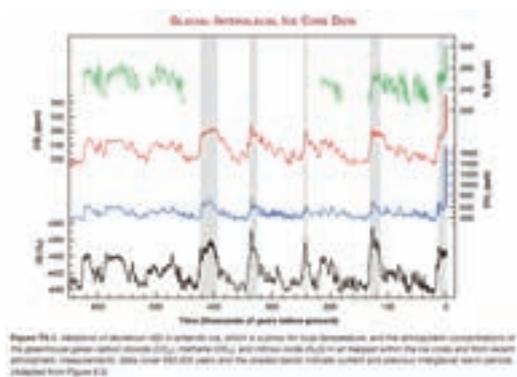


実際には大気だけではなく、雲とかエアロゾルとかがあって、非常に複雑な過程となっています。340W/m²ぐらいの太陽放射のうち、大気の上端で直接に地球圏外に反射されるのが、大体3分の1ぐらいの100W/m²です。それに対して3分

の2が地面に吸収されます。吸収された放射は、地表面から一部は潜熱や顕熱の形で大気を暖めますが、大部分は長波放射として上向きに放出されて、それが大気や雲に吸収され、再度放射されます。図にありますように、最終的に宇宙に放射される量は235W/m²になっています。これが先ほど言いました有効放射温度、マイナス18℃ぐらいの地球からの放射の量になるわけで、この全体がバランスを保っているのです。



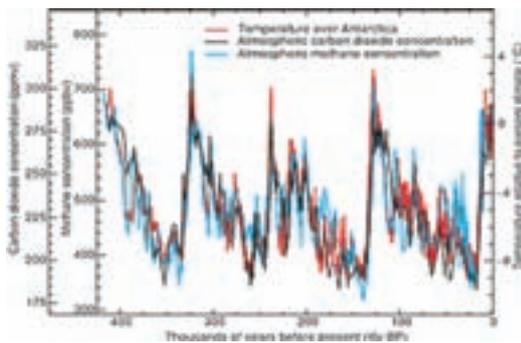
なお、実際の気候ではもっと複雑で、単に雲とCO₂だけではなく、例えば火山噴火、化石燃料の燃焼、森林火災など、さらには海洋からも出ていますエアロゾルが太陽放射を直接に散乱させたり、雲の性質を変化させたりします。後で少しご説明しますが、エアロゾルの働きをどう評価するかによって、我々の温暖化予測というのは非常に変わってきます。



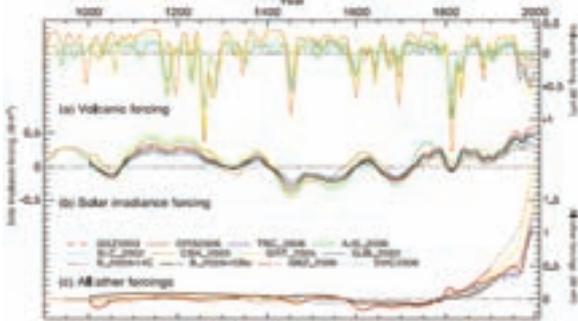
この図は現在から65万年ぐらい前までの、世界のCO₂、メタン、一酸化二窒素、これら代表的な温室効果ガスの濃度の変化を示した図です。あまり大きく変化してこなかった、これら温室効果ガスの濃度が、最近大きく増加しています。CO₂の変化は化石燃料の使用・土地利用の変化（例えば森林伐採など）によって生じています。一方、メタンと一酸化二窒素については農業による排出が主な原因であろうと言われています。

1番下のグラフは気温に比例する量とさせていただいていいのですが、この影をつけている部分が間氷期、いわゆる氷期と氷期間の暖かい期間に相当します。現在は

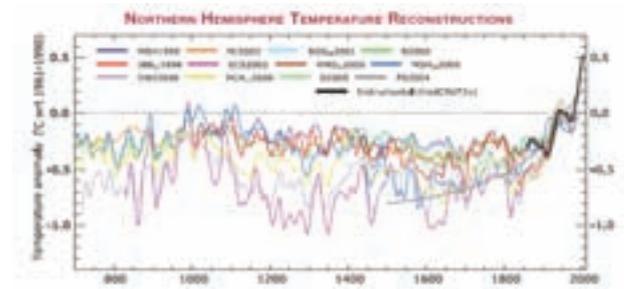
間氷期です。これを見るとわかりますように、ちょうど気温とCO₂の濃度の変化がほぼ対応しています。しかし、だからといってCO₂が原因で気温を上昇させているかという、なかなか簡単には断定できませんが、一応非常に良く対応していることがわかります。後でもっと詳しいグラフをお見せしますが、最近の濃度の上昇は非常に大きい。過去65万年の期間で何十万年もかけてせいぜい、数十ppmしか変わっていないのに、産業革命以降では、既に100ppm以上上昇している。いかに現在の濃度上昇が大きいかというのがおわかりいただけると思います。



この図は40万年ぐらいの期間の、赤が南極大陸の気温、黒がCO₂濃度、青がメタン濃度の変化を示していますが、やはりこれらが非常に良く対応していることがわかります。



この図は過去1,000年間ぐらいの期間の、気温の変化に寄与するいくつかの要素の長期的な変動を表したものです。CO₂以外にいわゆる火山の噴火によって大気中に放出されたエアロゾル、特に成層圏に注入されると長期間留まって日射を弱めたりするので寒冷化の働きをしますが、それから太陽活動の変化に起因する太陽放射がありますが、これらの変化を表したものです。太陽活動が活発なところと太陽活動が少し弱いところがあります。といっても0.5 W/m²程度ですから、先ほど言いました、大気上端での入射の量と比較すると、その0.1%とか0.2%で非常に小さい量です。最近の変化の様子を見ますと、あまり大きく増加していない、ほぼ定常な状態であることがわかります。



この図は西暦800年頃からの気温の変化を表しています。西暦1000年頃に太陽活動が盛んで、気温もちょっと高目になっております。一方、西暦1500年頃には気温が低めになっております。これらは、先ほどの図に示しました太陽活動の強弱と対応しております。この図の黒線はいわゆる測器による気温の観測データです。最近の気温の上昇がいかに急激かおわかりいただけると思います。



産業革命以降の大気温度変化に影響する要素を全てまとめ、大気上端での放射強制力として比較しますと、上図のようになります。全体を見ますと、太陽放射の寄与、すなわち自然起源の影響に比較して、人為起源の影響がずっと大きくなっていることがわかります。人為起源の影響の中でも雲・エアロゾルの部分の不確かさが大きいことから、これからのいろいろな気候予測の精度を上げるためには、雲あるいはエアロゾルの部分の働きをもっときちんと把握する必要があります。

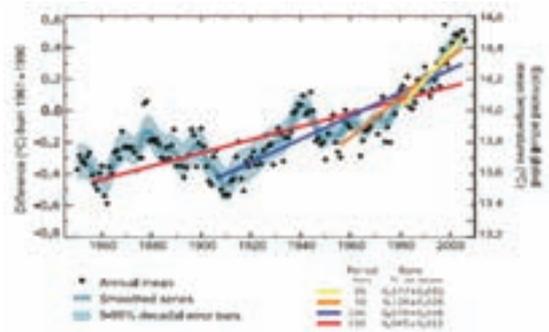
5. 地球温暖化の実態 (影響を含む)

では実際の地球温暖化の実態はどうかということですが、ここで地球温暖化に関するいろいろな出来事について、年表的に振り返ってみたいと思います。有名なハワイのマウナロアのCO₂の観測は1958年にキーリング博士によって始められています。

それから、IPCCが1988年にできています。第1次報告書が1990年に発表されています。国連環境開発会議（地球サミット）が1992年にリオデジャネイロで開催され、このとき気候変動枠組条約が採択されたわけですが、この条

- 1958年: 二酸化炭素濃度の観測開始(ハワイ:マウナロア)
- 1970年: 公害関係法律の整備(「公害対策基本法」の改正)
- 1971年: 環境庁発足
- 1972年: 国連環境計画(UNEP)発足
- 1972年: ローマ条約「成長の限界」
- 1974年: 「気候の物理学的基礎と気候のモデリングについての国際研究会」(ストックホルム)
- 1979年: 第1回世界気候会議—世界気候計画(WCP)
- 1988年: 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第1回会議(ジュネーブ)
- 1990年: IPCC第1次報告書、第2回世界気候会議
- 1992年: 「国連環境計画気候(地球サミット)」(リオデジャネイロ)
「気候変動に関する国際連合枠組条約」採択
- 1994年: 「気候変動に関する国際連合枠組条約」発効
- 1995年: IPCC第2次報告書
- 1997年: 「気候変動に関する国際連合枠組条約第3回締約国会議(京都)」「京都議定書」採択
- 2001年: IPCC第3次報告書、締結書発足
- 2005年: 「京都議定書」発効
- 2007年: IPCC第4次報告書

約が1995年に発効し、さらに1997年に京都で気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)がございまして、京都議定書が策定されております。そして2007年にIPCCの第4次報告書ができています。



2 世界平均地上気温、世界平均海洋温度(観測)

世界平均地上気温

- 最近12年間のうち11年間は、1850年から現在までの間で最も暖かかった。
- 1906年から2005年までに観測された100年間の気温上昇は0.74℃。これはTARの0.6℃よりも大きい。
- 最近50年間(1956～2005年)の気温上昇の傾向は、10年間に0.13℃。これは、過去100年間(1906～2005年)の傾向のほぼ2倍に相当。

世界平均海洋温度

- 世界平均海洋温度は、少なくとも水深3,000mまでは上昇しており、気候システムに加わった熱量のうち3割以上を海洋が吸収している。

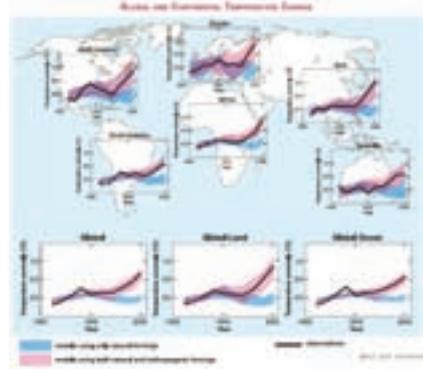
1. IPCCとは

- 設立: 世界気候会議(WMO)及び国連環境計画(UNEP)により1988年に設立された国際機関
- 目的: 気候の観測から得られた科学的知見の基盤のもと、気候変動に関する科学的、技術的、社会的、経済的評価を行い、それらの知見を政策立案者に広く一般に伝えること
- 機能: 政策立案機能であるほか、2つの作業部会及び国家気候フォーラムに関するタスクフォースを構成

作業部会	主要な活動	議長
第1作業部会(気候学)	気候学に関する科学的知見の統合と評価	David Solomon (USA)
第2作業部会(気候学)	気候変動の観測、検出、帰属、予測	David Solomon (USA)
第3作業部会(気候学)	気候変動の観測、検出、帰属、予測	David Solomon (USA)
第4作業部会(気候学)	気候変動の観測、検出、帰属、予測	David Solomon (USA)

これからのお話はほとんどIPCCの報告書に基づいております。さて、IPCCとはそもそもどういうものか。ノーベル平和賞を受賞いたしましたので皆さんもよくご存知と思いますが、これは国連の世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)によって1988年に設立されました。基本的には科学者が運営しているのですが、地球温暖化に関する科学的、技術的、社会的、経済的評価を行い、最終的に報告書をつくっています。

んだん傾斜が急になっています。最近の25年間で見ると、1.8℃ですので、100年間の温度の上昇の2倍強になっています。非常に地球大気が温暖化しているということが、これを見てもおわかりいただけると思います。



2 第4次評価報告書(AR4)とは (1)

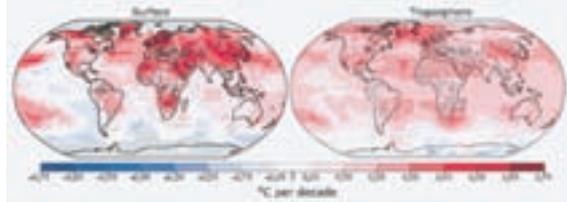
- IPCCは、これまで3回、気候変動の予測・影響・対策に関する評価報告書を公表。
- 第3次評価報告書(TAR)完成後、2002年4月に第4次評価報告書(AR4)の作成が決定。

作業部会1: 気候学
作業部会2: 気候学
作業部会3: 気候学
作業部会4: 気候学

2007年: 第4次評価報告書(AR4)

各大陸別に見ますと、図の黒線が観測値を表していますが、どの大陸においても非常に上昇していることがおわかりいただけると思います。

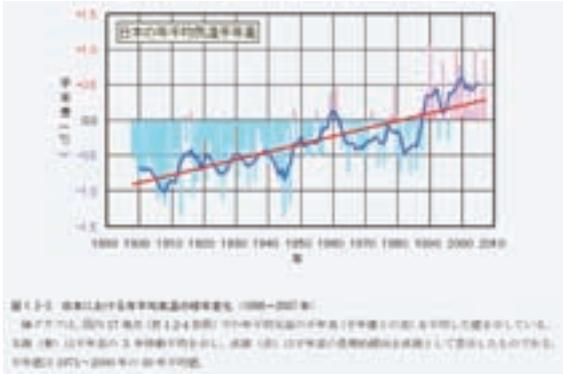
実際の組織は作業部会が3つと、日本が事務局を担当している温室効果ガスの目録に関するタスクフォースというのがあります。これまでに評価報告書を4回出しています。



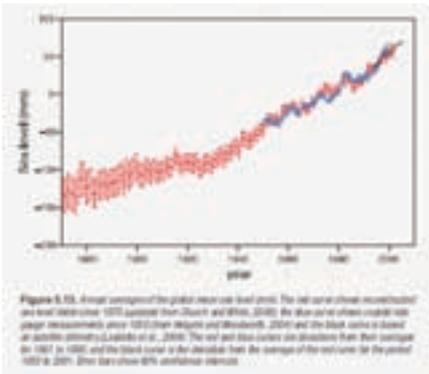
次の図はここ百数十年の間の世界の平均気温がどう変わってきたかを示しています。上昇していることは明らかで、100年間に0.74℃上昇しています。第3次報告書では0.6℃ですからそれよりも大きく、しかも直近で見るとだ

この図は地表と対流圏界面での10年間での気温の上昇の割合を示しています。これを見てもわかりますように、地表面ではいわゆる極域、それから大陸が非常に暖かくなっています。それに対して南極の近くだと大西洋の部分はあ

まりが上がっていない、逆に少し下がっている部分もあります。



では日本ではどうかといいますと、1898年から2007年の期間で、周囲の観測環境があまり変化していない17地点の気象官署を選んで求めた気温の変化は、この図のようになっています。100年間で1.1℃上昇しており、最近は特に暖かくなっています。日本のほうが、先ほどのIPCCの報告よりは少し暖まり方が大きくなっています。



この図は世界の海面水位の変化を表していますが、赤線は各種の資料から復元された海面水位を、青線は検潮所での観測データ、黒線は衛星から求められた水位です。海面水位がずっと上昇してきていることがわかると思います。

4. 世界平均海面水位 (観測)

- 1961～2003年における世界平均海面水位の上昇は年間1.8mm。
- 1993～2003年にかけては、年間約3.1mmと、より早い速度で上昇。
- 20世紀中の海面上昇は0.17mと推定される。

特別な原因がなければ、海面水位の上昇は、この速度で続きます。

グリーンランドと南極における氷床の減少は、1993年から2003年にわたって海面上昇に寄与した可能性がかなり高い。

海面水位については、1960年から2003年まで世界の平均の海面水位は1.8mm/年で上昇しており、それが直近の10年になりますと3.1mm/年と非常に大きな値となっています。20世紀中の海面上昇は17cm程度と推定されています。

では日本ではどうなっているかといいますと、日本では長期的な上昇傾向は観測されておりません。最近は上昇傾向にありますが、長期的に見ると必ずしも直線的に上昇しているわけではありません。

Retreat of glaciers



1820 1974
There has been a widespread retreat of mountain glaciers in non-polar regions during the 20th century.
"Climate into the 21st century" (WMO,2003)

3. 山岳水河と積雪 (観測)

山岳水河と積雪は北半球と南半球の両方で減少している。

アラスカのモヨーア水河

この写真はWMOの報告書に掲載されている1820年と1970年の、同じ水河の状況を比較したものです。氷河が非常に後退していることがわかります。IPCC報告書に掲載されています最近の例を見ますと、1941年と2004年のアラスカの氷河の状況の比較ですが、氷河が非常に大きく後退して、氷河湖が形成されていることがわかります。

7. グリーンランドの氷床 (観測) 参考

最近の研究によって、グリーンランド氷床の氷床質量減少への速度が従来考えられていたより早いことが明らかとなった。

重力データによれば、グリーンランドの氷床は、この4年間で明らかに質量が減少している。

グリーンランドの氷床量の減少は1年で248立方キロメートルであり、これは0.5mmの海面上昇に相当する。

また、グリーンランドの氷床ですが、人工衛星の重力分布の観測から、非常に質量が減っていることが推定されています。

雪氷圏における状況をまとめますと、北極の海水の量は非常に減っている。それに対して南極の海水はあまり減っていない。北半球の凍土の面積が減っており、さらに、積雪面積も減っている。全世界での氷河の質量も減

ってきている。北半球全体の雪氷圏も非常に温暖化の影響を受けていることが、このことからわかります。

表3-3-1 観測された海面水位の上昇率と様々な要因による算出の差額もり (注5, Table 3.3)

海面水位上昇の要因	海面水位の上昇率 (mm/年)	
	1993～2003	1993～2003
熱膨張	0.42	1.64
氷河と氷床	0.50	0.77
グリーンランド氷床	0.00	0.00
氷河氷床	0.14	0.20
海面水位上昇に寄与する個別要因の合計	1.06	2.61
観測された海面水位上昇	3.10	3.10
差異 (観測値から算出の算出の差額もりの合計)	2.04	0.50

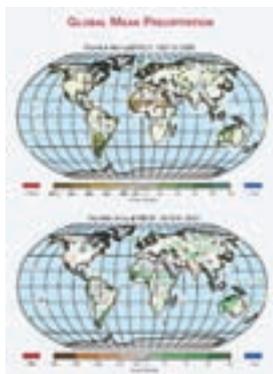
表3-3-2 1993年以前のデータは観測値、1993年以降は衛星高度計の観測による

1993年から2003年の期間の海面水位の上昇に、雪氷圏がどれくらい影響しているかといいますと、雪氷圏の氷河と氷帽などで0.77mm/年、一方、海水の熱膨張の影響は相当大きくて1.6mm/年となっています。気候変動に寄与する個別の要因の合計が2.8mm/年、実際に観測された海面水位の上昇が3.1mm/年となっています。このことから海面水位の上昇も気候の温暖化によると考えられています。

気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。

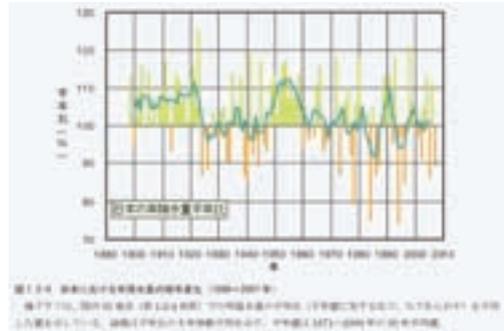
Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global average sea level (see Figure SPM.3). (3.2, 4.2, 5.6)

気候システムの温暖化について、これまでのIPCC報告書でははっきりとは断定してこなかったのですが、このようにいくつかの明確な地球温暖化に関する観測事実から、今回のIPCC第4次報告書では、気候システムの温暖化は明白であると断定したのです。

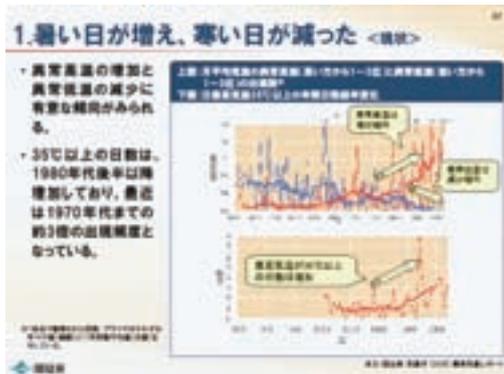


先に気温の変化について述べましたが、気温以外で重要な気象要素である降水量についてどうかといいますと、この図にありますように、北米大陸の東岸とか北・中央アジアでは増えているのがわかります。一方、地中海やアフリカ

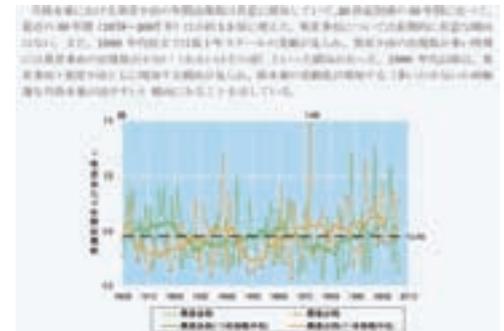
南部などでは乾燥化が観測されています。しかし、降水量が減ってきている地域でも、大雨の頻度が増えている可能性が高く、非常に降水量の変動が大きくなってきています。



この図は日本の降水量の経年変化を表しています。図から明らかなように、近年、年ごとの降水量の変化が非常に大きくなってきています。

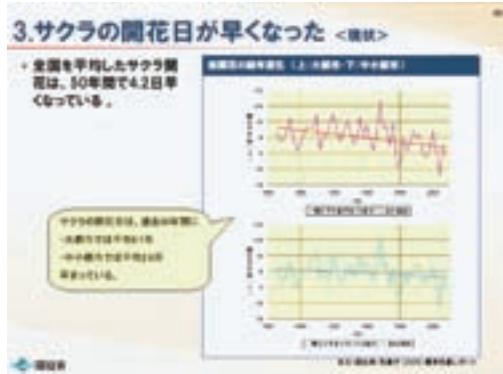


また、暑い日、寒い日、いわゆる異常高温とか異常低温がどうなっているかといいますと、異常高温が増えてきています。例えば最近の30年間では20世紀初頭の30年間に比べて大体6倍ぐらい増えています一方、異常低温のほうは7割ぐらい減ってきています。また、いわゆる猛暑日というもの、確実に最近増えつつあります。



それから雨の降り方ですが、異常多雨とか異常少雨というのもこれで見ると、最近、どちらも非常に増えているのがよくわかります。降るときはものすごく降るのですが、降らないときもある。降水量の変動性が増加してきています。気象庁が5年ごとに発表している「異常気象

レポート」の2005年版では、「日本における大雨の出現数の長期的な増加傾向には地球温暖化の影響があらわれている可能性がある」と述べています。



ほかにも、桜の開花日が非常に早くなっています。これまでは満開の桜というのは入学式につきものでしたが、このごろは卒業式につきものというように変わってきています。

6. 地球温暖化の原因

ではその地球温暖化の原因は何か。先ほどCO₂と気温の間には非常に明瞭な相関関係がありましたが、本当の原因はどうか、人為的なCO₂の排出がその原因なのか。これを明らかにするためにはモデルを用いたシミュレーションを行う必要があります。モデルを使わないと明らかにすることができません。さて、そのモデルの精度は、第3次報告書よりも第4次報告書というように、だんだんよくなってきています。

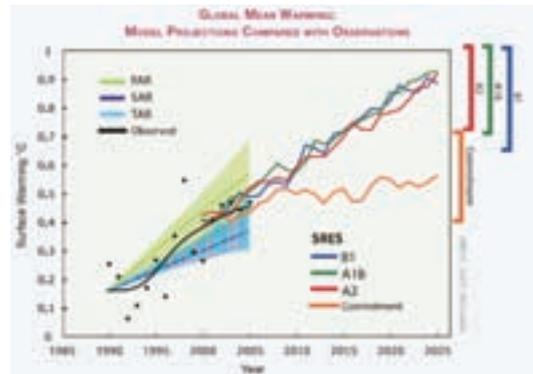


1番上の図が第1次報告書の頃のモデルの地形ですが、このときは分解能が500km程度ですから、地形もよくわからないような状況です。それがだんだん細かい分解能のモデルを使うようになり、最近の第4次報告書では100km程度の分解能のモデルを用いていますので、細かい地形もきちんと表現できるようになってきています。

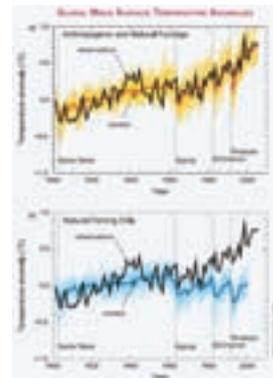
しかも、最初の頃のモデルに含まれている気候に関する過程も非常にシンプルなもの、例えば第1次報告書に



使用されたモデルでは、海は単なる水たまりとして表現されていましたが、第2次報告書ではきちんと海流も表現されるようになり、だんだんモデルもよくなってきています。特に第4次報告書になると、化学的な過程も考慮するようになり、非常にモデルの精度がよくなってきています。



これは第1次～第4次報告書の気温予測の比較の図です。黒丸は気温の観測値で、黒線は10年移動平均値です。モデルの精度がよくなってきていることがわかります。第4次報告書では、3つのシナリオについての予測が2025年までは予測結果もその不確実性の幅もほぼ一致しています。



いろいろな排出シナリオに従って、この先どうなるかという予測を行うわけですが、その前にまず、このようなモデルで、これまでの気温の変化などを再現できるかどうか、モデルの信頼性を確かめる必要があります。20世紀の気温変化を再現する計算の結果をこの図は示しています。20世紀の

気温変動の観測値がこの黒線です。古い時代については上下どちらの図とも、再現結果と観測値は合っています。このことから、このモデルが信頼できることがわかります。しかし、1960年頃以降の部分を見ますと、下図では計算結果と観測値が一致していません。下図は自然の強制力の変化だけでモデルを動かしたものです。一方、上図はいわゆる人為的なCO₂やエアロゾルの排出などを取り入れています。そうすると観測値に合ってきます。気温の上昇は自然的な強制力だけでは説明できず、人為的な要因を考慮して説明できるということがわかります。したがって、この図は温暖化の原因は人為的なCO₂の排出ではないかという1つの証拠です。

このような気温の上昇については、全球だけでなく、それぞれの大陸規模でのモデル計算結果でも、観測値と合うのは人為的なものを考慮した場合となっています。このことから、人為的なCO₂の排出が地球温暖化の基本的な原因である可能性がかなり高いと言われるようになったのです。IPCC第4次報告書では、「Most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic GHG concentrations」と述べられています。「very likely」というのは90%以上の確率ということで、これまで、「likely」(60%) ぐらいだったのが、今回は「very likely」ということで、温暖化はほぼ人為的な温室効果ガスの排出の影響ではないかということが結論づけられています。

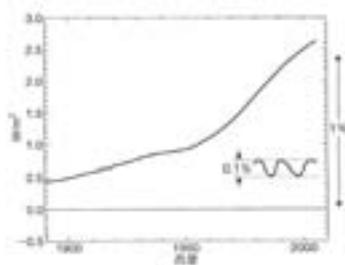


図4 19世紀中の温室効果ガスの放射強制力の増加と自然の要因による放射強制力との比較。赤線は放射強制力に与えた平均放射量を単位としたスケール。

この図は温室効果ガスの放射強制力の変化を示しており、また、右下の部分は1980年頃からの、太陽活動の変動の幅を示しています。温室効果ガスの放射強制力の増加は非常に大きくなっており、一方、太陽活動はほとんど変化がなく、またその変動の幅は非常に小さく、地球温暖化には太陽活動の影響よりも温室ガスの影響が非常に効いているのではないかと考えられます。

7. 地球温暖化の将来予測

では温暖化はこれからどうなるのか。それが我々の一番の関心事です。今後の温暖化の様子を予測するためには、モ

デルによって、CO₂の排出シナリオに従って将来の気温の変化などについて計算をします。排出シナリオにもいろいろのものがあり、IPCCで決めているわけです。シナリオA1というのは、高度成長型社会シナリオと呼ばれるもので、世界中が経済成長し、技術革新が生じるというシナリオです。それに対してシナリオB1というのは持続的発展型社会シナリオと呼ばれるもので、環境に配慮しながら発展するという考えです。

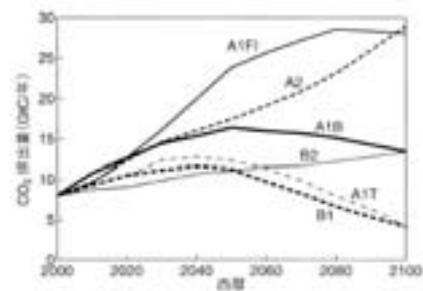
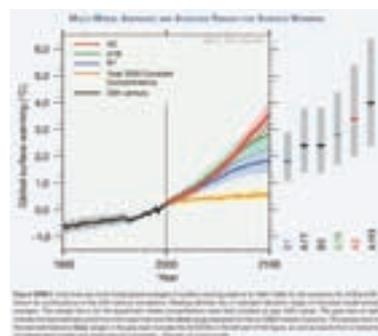
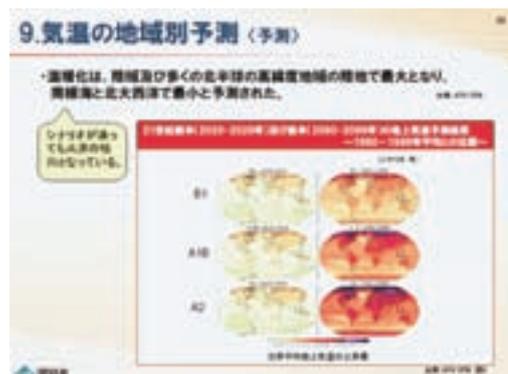


図5 各シナリオが導く今後の二酸化炭素排出量変化。

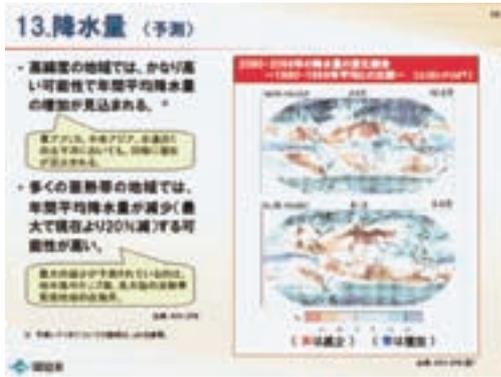
このような各シナリオについて、この図のような2100年までのCO₂の排出量を与えて、それで計算するのです。あくまでもCO₂濃度変化はデータとして与えられており、これを用いて計算を行うのです。



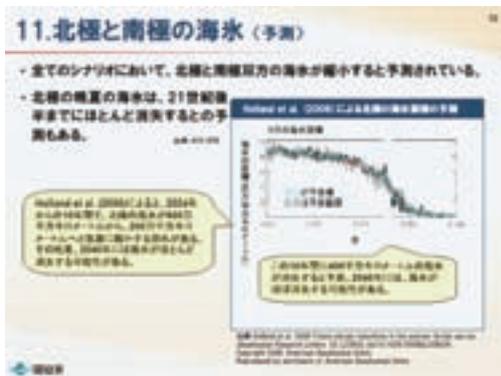
このような各シナリオをもとに将来の気温を予測した結果がこの図です。この図から明らかなように、どんなシナリオであっても今後20年間に10年あたり約0.2℃程度は気温が上昇することはほぼ確実です。その後は、それぞれのシナリオによって2100年には1.8℃から4.0℃程度の気温の上昇が予測されています。



いま述べた結果は全球の平均気温の上昇についての予測結果ですが、気温の変化が地域別にどのようなかという予測結果をこの図は示しています。この図にありますように、やはりどのシナリオでも極域の部分で非常に気温が上昇しています。



一方、降水量はどうなるかといいますと、地域によって増えるところと減るところがあります。高緯度の地域ではかなり高い可能性で年間降水量の増加が見込まれますし、一方、例えば地中海沿岸だとか亜熱帯のところでは降水量は減少する可能性があるということが予測されています。



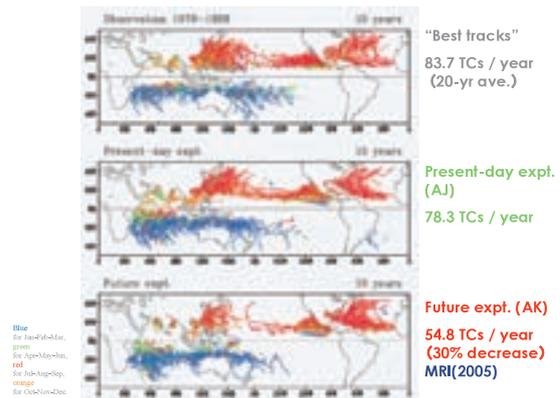
また、北極や南極の海水などがどんどん減っていくということも予測されていますが、ニュースを賑わしていますように、現実には予測以上に減り方が激しいのではないかなというようにも言われています。



それから海洋の酸性化が進むということも予測されて

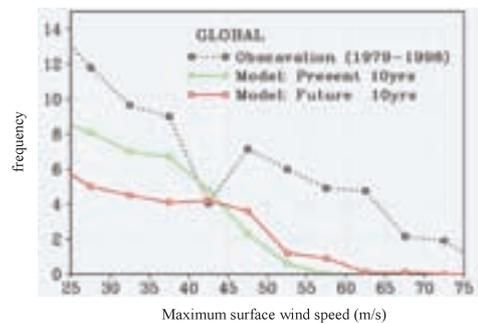
おり、これもこれまであまり注意されてこなかった、予測結果の1つです。しかし、実際にいろいろ実験をしますと、酸性化に強いプランクトンが出てきたりして、なかなか予測は難しいというのが現状です。

それからコンベアベルトと呼ばれている深層の海流の大循環の状況については、例えばそれが止まると、映画「ザ・デイ・アフター・トゥモロー」のようなことになるのですが、現実的には21世紀中にそういうことが起こる可能性は非常に低いだろうと予測されています。

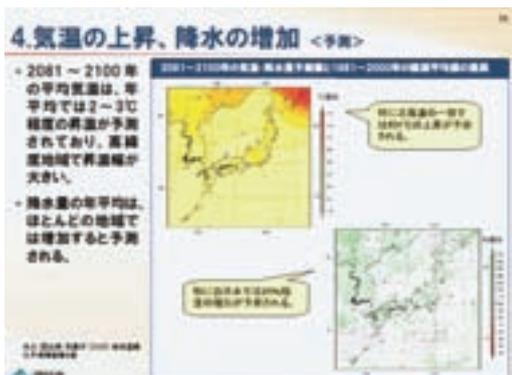


また、台風については、発生数は減少することが予測されていますが、風速の強いものが増えるということも予測されています。

Tropical Cyclone frequency as functions of max. wind



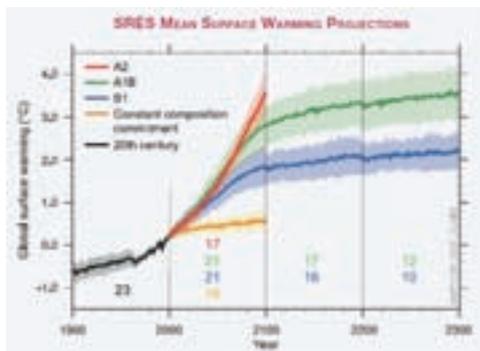
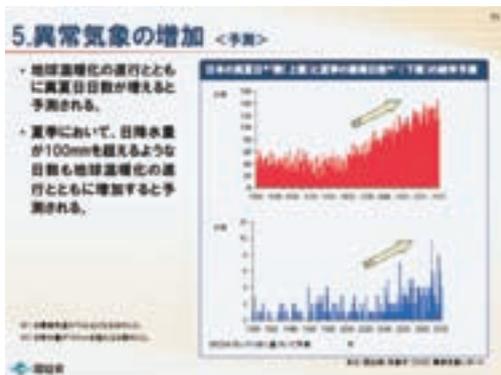
しかし、こういう予測結果を適応策などの施策に結びつけようと考えますと、単に全球での話ではなく、日本付近はどうなるかということが重要になってきます。そ



ここで、全球モデルの一部を切り出した、狭い領域に適用できる大気-海洋結合モデルを用いて、例えば日本付近でどうなるかを予測しています。

そのような予測結果を見ますと、例えば、北海道のほうで気温の上昇が大きいとか、あるいは西日本のほうで降水量が増加するとか、そういうことも予測されています。

このほか、熱帯夜が非常に増える、真夏日や猛暑日が非常に増える、さらには日降水量が100mmを超える日数も増加するというようなことも予測されています。このような地域的な予測を行わないと、具体的な施策にはなかなか結びつきません。



それからこれまでの予測は主として2100年頃にどうなるかということで行われてきていますが、CO₂濃度が規制によって安定化しても、例えば熱的な慣性、特に海洋の熱慣性が大きいので、この図に示されていますように、2100年を越えて当分の間は、気温は上昇し続けるということも予測されています。そういう意味できちんとした排出規制なり、削減策をやらないと、あるところまでい



くと、それこそ引き返しのできない状況が起こるかもしれないということが懸念されています。

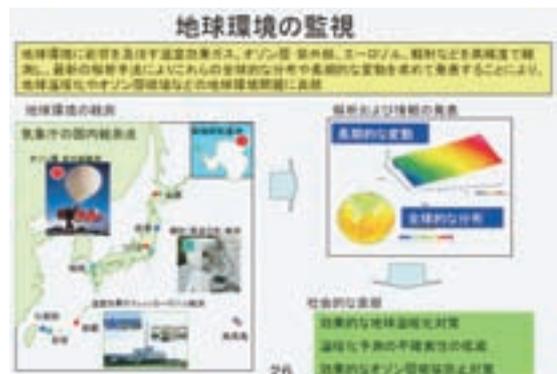
実際にどれぐらい気温が上昇したときに、いろいろなものにどのような影響が生じるかということについて、IPCCの報告書にまとめられています。ヨーロッパでは気温2°Cの上昇をクリティカルな値と考えていますが、例えば水については、わずかに気温が上昇してもいろいろな方面に影響が出始めます。例えば、数億人が水不足の深刻化に直面することや、中緯度地域と半乾燥低緯度地域での水利用可能性の減少と干ばつの増加などが懸念されています。



また、例えば生態系などでは、2°Cぐらい上昇しますと、ほとんどのサンゴは白化する、あるいはサンゴは死滅し始めるということも言われています。

8. 今後の展望

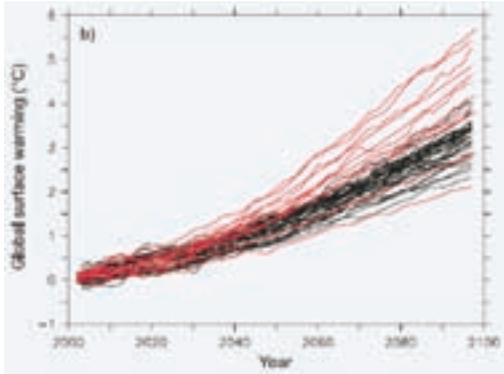
今後、地球温暖化問題はどのような展開を見せるのか。いろいろ不確実な要素がありますが、基本的に我々は、まず観測を行って、地球の実態を正確に把握しないといけないということだけは確かです。最初に述べましたように、全球地球観測システム（GEOSS）計画の、10年実施計画に基づいて、統合された地球観測システムを構築し、包括的な地球観測を実施するというところに世界中で取組んでいます。



気象庁でも関連するいろいろな観測を行っています。例えば温室効果ガスにつきましては北は岩手県の綾里、

南は与那国島や南鳥島などでいろいろな機器を展開して観測しています。

それから予測精度を上げるにはやはりモデルを改良しないとイケないのですが、これまでは与えられたCO₂の濃度に従って計算を行っていましたが、実際にはCO₂が変わると気温が変わる、そうすると、海洋や陸面でのCO₂の吸収の様子が変わるといように、実はフィードバックの過程があるわけです。



いままでのモデルはそういうことを考慮していないのですが、このような炭素のフィードバックを考えますと、この図にありますように予測結果のばらつきが増加します。しかも、このフィードバック過程は地球温暖化を促進する方向に作用することが新たにわかってきました。したがって、フィードバックの過程を考慮しないと、モデルのばらつきを少なくすることができないことになります。

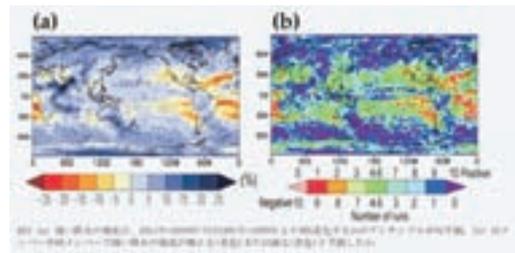
そこで、これまでの大気、海洋、陸面だけを取り扱うモデルではなく、いわゆる生物化学的な過程、炭素循環過程を含めた地球システムモデルを開発して、予測を行うようになってきています。

21世紀気候変動予測革新プログラム

- ・地球環境予測:地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験
- ・近未来気候予測:高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究
- ・極端現象予測:超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究
- ・雲解像モデリング:雲解像モデルの高度化とその全球モデル高精度化への利用
- ・海洋微物理過程:LESによる海洋微物理過程の高精度パラメタリゼーション

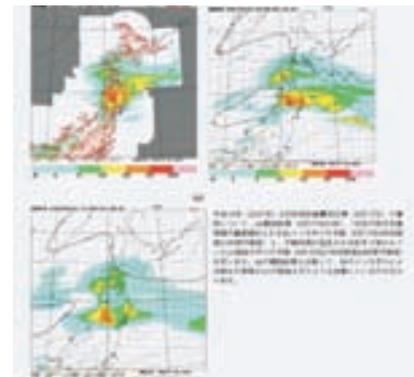
いろいろな研究計画が実施されていますが、例えば、21世紀気候変動予測革新プログラムでは、地球システム統合モデルを開発し、長期予測や、実際の施策に結びつけるために近未来の予測、さらには台風などの極端現象がどうなるのか、そういう予測に取り組んでいます。

さらに確率的な予測結果を得るために、多くの場合についてモデル計算を行って、それらの結果について、平均、あるいは確率分布を求めることで、例えばこれは強い降水の

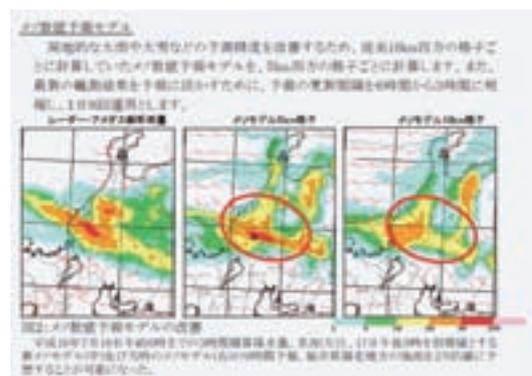


強度がどれぐらい変化するかということも予測しています。

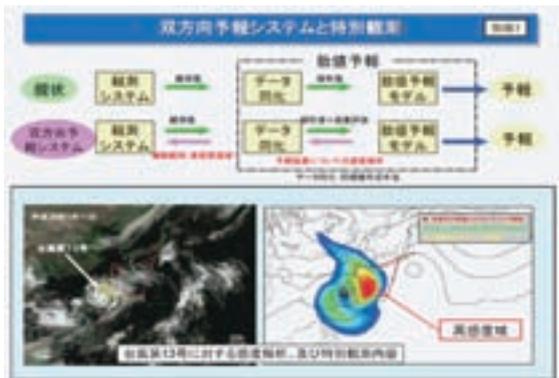
これまで見てきましたように、温暖化すると集中豪雨が増加する、あるいは台風の風速が強くなるというようなことが予測されているわけです。このような将来の事態に備えるためには、現在行われている集中豪雨や台風の予測などの防災に関する予測技術を高度化していく必要があります。例えば、気象庁では、いろいろな気象観測や予報技術の高度化を行っており、日々の気象業務の改善が行われています。ここでは、気象庁で行われている業務の高度化の内容について簡単に述べます。



この図の左上は2007年9月の豪雨の際のレーダーアメダスの観測値ですが、20km格子のアジア地域の領域モデルで予測を行うと、なかなか降雨域の集中を表現できないのですが、例えば10kmスケールのメソモデルを使うと、このような降雨の集中域を予測することができます。



さらに、5kmのメソモデルを使いますと、一層予測結果が改善されます。この5kmのメソモデルは現在、気象庁での予報作業に使用されています。

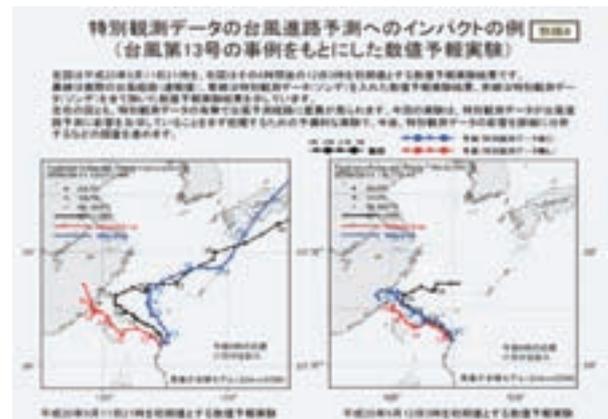


それから台風予報、これも非常に防災対策として重要です。気象庁は、例えば今後5日先までの台風進路予報、雨や風に対する分布情報も出すように計画しています。また、新しい試みとして、WMOの予報に関する研究計画に参加しています。これまでの観測予報システムというのは、観測値を用いてモデルを動かして予報を出すという一方通行だったわけです。それに対していま、WMOが全世界的にやろうとしているのは双方向の予報観測システムという新しい概念です。例えば、予報結果を分析して、このあたりのデータが増えれば予報の精度が非常に上がるということが明らかになれば、その重要なターゲット領域に対して観測を強化するというようなことを行う。このような取組みを行うことによって予報精度の向上を図ろうという計画です。



2008年に気象庁はアメリカと共同で特別観測を実施しています。3つぐらいの台風について、アメリカと日本などが観測用飛行機を飛ばしてドロップゾンデを投下しています。また、観測船で高層観測を強化しています。さらには、現在待機衛星である「ひまわり7号」を使用して、非常に観測領域を絞って短時間間隔の衛星観測を行うというようなことを行いました。このような双方向の観測予報システムが実用化されれば、台風予報の精度などもより一層向上していくものと思われます。

これまで述べてきましたのは、主に地球温暖化の実態の把握と将来予測についてでした。今後の地球温暖化問題で重要となってきますのは、適応策や緩和策を考えていくこと



です。そのためには、地球温暖化の影響評価を行う必要があります。温暖化の影響評価に関しては、多くの研究が行われています。例えば、水資源への影響、森林への影響、農業への影響などが調べられています。その結果、例えば洪水被害が拡大したり、渇水のリスクが高まったり、さらにはブナ林がだんだんなくなってしまい、白神山地もブナの適地ではなくなるとか、そういうことも結果が得られています。

このような状況の下で、我々はこれから地球温暖化にどのように対処していくのか。適応策もいろいろと考えられていますが、やはりCO₂の排出量を減らすという緩和策が重要になってきます。皆様よくご存知のように、京都議定書というのがありますが、2008年からその約束期間が始まりました。日本は1990年比で6%の削減が義務付けられておりますが、その達成の実現には状況が厳しく、いろいろな方策、例えば、排出権取引、先進国と開発国の削減策の共同実施、クリーン開発メカニズムなどを用いて、何とか削減目標を達成しなければなりません。また、ポスト京都についても対応する必要があります。そのための具体的な検討策として、2050年に排出量を70%削減した低炭素社会にするというプロジェクトがあります。

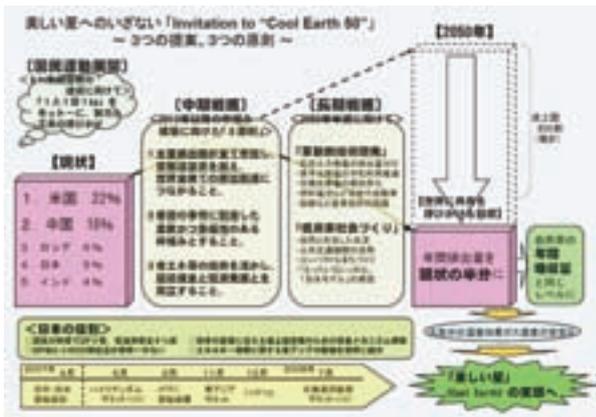


いろいろなシナリオを使って、実現のためのシミュレーションを行うわけですが、検討されているシナリオとしては2つあります。シナリオAは活力成長志向型、いわゆるドラえ

もん型モデルと呼ばれるものです。一方、シナリオBはゆとり分散型で、サツキとメイの家型モデルと呼ばれるものです。こういう2つのモデルについて、2050年に本当に70%削減できるのか、ということプロジェクトとして検討しています。その結果、2050年に70%排出削減という目標に対して、きちんとした対策をやれば、どちらのモデルを使っても達成できそうだということがわかってきています。



そのためには、ここに12の基本的な方策が提示されており、民生、運輸、産業、エネルギー転換の各分野について、より具体的な方策が示されています。例えば、家庭、オフィスでは、安心しておいしい旬産旬消費型農産物を選択する、トップランナーの機器をレンタルするなど、いろいろやるべきことが示されています。こういうことをやれば何とか70%削減を達成できるのではないかとされています。



それから、安倍元総理大臣が言われた、2050年に温室効果ガスの排出量を50%削減するという政府の中長期目標(Cool Earth 50計画)もあります。その中で、我々の中期戦略として、ポスト京都に向けた3原則として、主要排出国が全て参加し、京都議定書を超え、世界全体の排出削減につながる事、各国の事情に配慮した柔軟かつ多様性のある枠組みとすること、省エネなどの技術を生かし環境保全と経済発展を両立すること、などが述べられています。

これまでの議論をまとめますと、まず現状認識ですが、地

球温暖化の影響として、例えば実際に北極の海水が非常に減っていることなど、予想よりも大きな影響が出てきているのではないかとこの恐れがあります。すなわち、気候システムの変化の動きというのは予想よりも速いのではないかとこの危惧があります。研究も政策もなかなかそれに追いついていないのが現状ではないのかということ。それから現場で温暖化の影響がどのように起こっているのか、しっかり把握する必要があります。そういう意味で長期のモニタリングが非常に重要です。これは単に専門の機関だけがやるのではなく、一般市民の方々も参加して、どういった影響が起こっているのか、しっかりモニターするのが非常に重要です。

実際、我々は温暖化に関して漠とした不安は持っていますが、なかなかそれが切迫感に結びつかないのが現状です。石油危機のときは国難来るという感じで、国を挙げて、また、国民一丸となって省エネをやったわけです。それに比べれば、いまは皆不安だけれども自分のこととしてなかなか思い至らない。国民・市民も頑張りましょうと言いますが、その内実は非常に多岐にわたっています。知識とか意識が皆それぞれ違うので、そういう国民一般を対象にしてどうすればいいのかが重要な視点です。

このような現実を打破するためによく言われるのは、「見える化」をやりたいということ。こんなにCO₂が出ているよと、国民に認識させるために「見える化」を図るのが1つ重要なことです。もう1つ重要なことは、「我が事化」しないといけない。単に「見える化」だけではなく、「他人事」ではない、「我が事化」、自分のことだと思うのが非常に重要だと考えられます。それで実際に、「我が事化」になったときに、今日、明日の行動につながる情報発信、これは国レベルであれ、どんなレベルであれ、そういう情報発信をしないとイケない。それから先ほど言いましたように、国難ではないですけども、国が適応策、緩和策について本気である、絶対やるのだということを国民に示す必要があるだろうと思います。そういう空気が大事です。それからもう1つ、長期的には自然をよくする人間、特に自然をよく知っている子供を育てる必要があります。そういう意味で子供の教育が一番重要ではないかと個人的には思っています。

以上、雑駁な話で申し訳ありませんでしたが、地球温暖化問題の概要についてお話ししました。

ご静聴ありがとうございました。