

# 「地球温暖化防止月間」講演会

平成13年12月3日 13:30～  
安田生命富山駅前ビル 地下1Fホール

## 講演

### 「地球温暖化は日本海側の気候をどう変えるか」

—日本海学の視点から—

筑波大学地球科学系教授  
地球フロンティア研究システム 安成 哲三  
水循環予測研究領域長

#### <日本海学の目指すもの>

日本海学は、環日本海地域及び日本海を一つの循環・共生体系としてとらえて、地域・地球の自然環境と人間とのかかわり、地域間の人間と人間とのかかわりの歴史の中で繰り返されてきた循環・共生システムに学んでいく。そして、将来において起こりうるさまざまな問題を予測し、これに対処する備えを用意することにより、地域全体の危機を回避し、ひいては健全な地域・地球を子供に引き継いでいくことをめざすものである。

## 講 演

ただいまご紹介にあずかりました筑波大学の安成です。富山県の中井生活環境部長さんにぜひ話をしてくださいと、だいぶん前に頼まれてまして、お引き受けした次第です。今、地球の温暖化がいろいろな形で問題になっています。

私は以前から日本海側に関しては、雪の問題が温暖化に関して非常に重要ではないかと考えておりました。

若干それに関連する研究もしてまいりました。今日はちょうど良い機会を与えていただいたので、私なりに地球温暖化と日本海側の気候環境がどういう関係にあるのか、あるいは今後どうなる可能性があるのか、お話をさせていただければありがたいと思います。これはこれからの話でいろいろ不確定な要素があり、私なりに解決はできませんが、問題提起とまではいかないかもしれません。

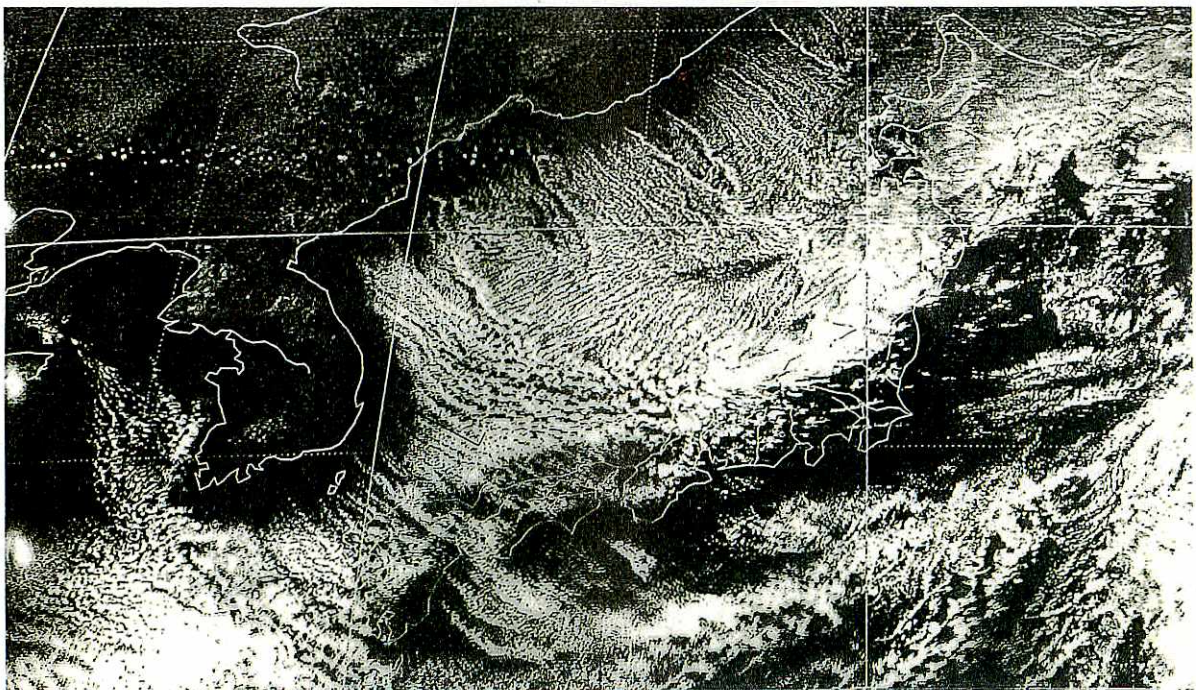
今日のタイトルは、「地球温暖化は日本海側の気候をどう変えるか、日本海学の視点から」というタイトルにさせていただきます。特に日本海というのは、日本、富山の雪に関して非常に大きな役割を果たしております。

最初に、多分皆さんもテレビの天気予報等で見られているかと思いますが、図1は、気象衛星から見た冬の日本海側、特に非常に大雪が降っている時の写真です。

(これが朝鮮半島ですね。日本列島がちょっと見えにくいですが、ここにあります。)



図1



日本海側の大雪は、最近はなかなかないですが、去年の冬の終わり頃にはかなり雪が降ったと聞いています。それから昭和56年、38年の豪雪の時は、図1のようにいわゆる雪雲が日本海全体を覆います。決して山沿いだけに雲がかかるわけではありません。日本海があるおかげで、しだいに海から水蒸気が供給されながら雪雲が発達します。図中の白いところ、ちょうど富山、新潟の日本海側にあたり、そこで大雪を降らせていますが、南から対馬の暖流が流れこんだ比較的温かい海である日本海があるということが、温かい海水からたっぷり水蒸気を供給し、このような雪雲を生み出す大気が形成される条件なのです。

しかし、一方シベリアからは、非常に冷たい空気が供給されますが、これが大雪のもうひとつの条件です。最近雪が降らないというのは、シベリアの寒気団が非常に弱くなってきているということになります。

#### <地球温暖化とは>

地球温暖化という問題にまず戻ってお話したいと思います。地球温暖化問題とは何か。たぶん皆さんもいろいろなご関心があり、ある程度のこと、あるいは非常によく知っておられる方の中にはいらっしやと思います。一応念のために少し復習をかねて話したいと思います。

まず、我々が車に乗ったり、工場で作る等々、いわゆる文明を維持するような人間活動によって温室効果ガス、具体的には炭酸ガス、それからメタン、フロンといった気体ですが、それがどんどん増えています。それによって地球の気候が変わってきているのではないかと、特に気温が上がってきているということが最近指摘されています。現在、温室効果ガスの増加による気候の変化として一番問題になっているのは、温暖化です。現実の温暖化では、空間的な分布としては比較的高緯度、北半球の高緯度を中心として暖かくなっています。

現在雪が減ってきているという話がありますが、実際に大気の気候のひとつの要素として大事なものは、気温だけではなくて雨や雪（降水）があります。あるいは、水の循環という言い方をしても良いかと思えます。これがどうなっているか、いろいろな予測、モデルの結果では降水量は増えているのではないかと、あるいは水の循環が活発になっているのではないかといわれています。それから海面の上昇、これも特に海岸付近の町とか国では、非常に大きな問題になっています。

最近の地球の気候を調べると、たしかに気温が上がってきています。これを今、世間では地球温暖化と言っていますが、本当に最近の気温の上昇が温室効果ガス増加による地球温暖化なのかどうか、そこが実は大きな問題です。

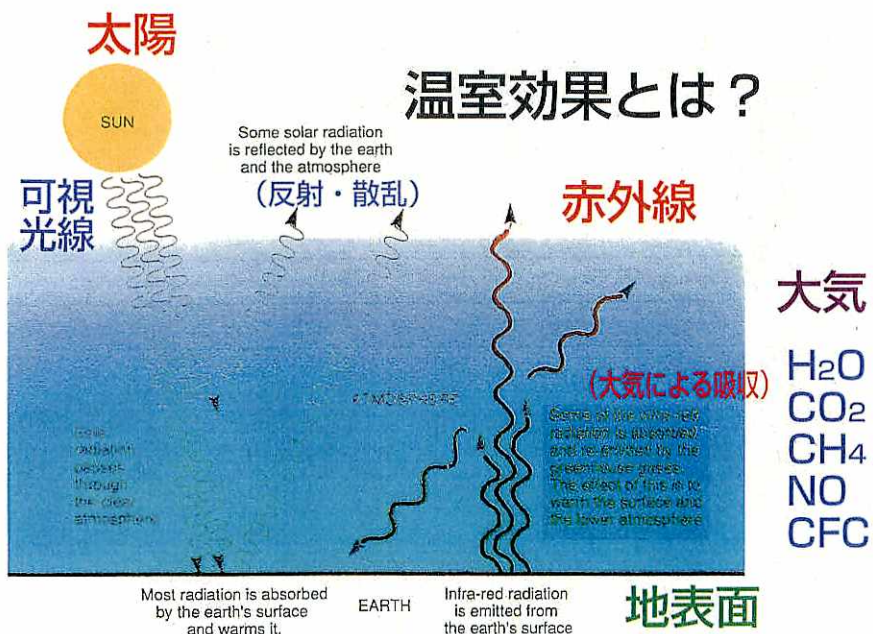
## <温室効果とは>

では、温室効果とは何か。簡単にお話したいと思います。

図2のとおり、大気中の炭酸ガスやメタン、亜酸化窒素、それからオゾンホールで問題になっているフロンなどが人間の活動で増えています。これらの気体は総称して温室効果ガスといわれています。地球の大気を暖めているもとは何かというと、もちろん太陽エネルギーです。しかし太陽エネルギーは可視光線といわれている短い波長の光が中心ですが、この可視光線は直接には大気を暖めません。大気を素通りして地面を暖めます。暖められた地面が今度は大気を暖めるというのが一番大きいプロセスです。そのときに今度は地面から放出されるエネルギーは太陽エネルギーと違って波長が長い赤外線です。赤外線ストーブのあの赤外線です。温度によって強弱がありますが、その赤外線を上記の温室効果ガスが大気中で吸収します。一部は宇宙に向けて放出されますが、吸収によって一部は地表面に戻ります。この戻る効果は炭酸ガスが増えることによって強くなります。即ちこの効果によって地表付近がより温かくなってきます。これが温室効果といわれるものです。

ところで、温室効果ガスといえば、炭酸ガスと思われませんが、大気中で一番大きな温室効果ガスは何かと聞かれたら、実は炭酸ガスではありません。非常に身近な水蒸気が一番大きな温室効果ガスです。ここで複雑な問題がからんできます。水蒸気の量は非常に大きく変化します。たとえば海の上や湿った地表面から水が蒸発して水蒸気になります。水蒸気はわずかな表面の状態が大きく変わります。したがって、人間活動により炭酸ガス等の増加が、水蒸気をどう変えているか、これが大きな問題です。水蒸気が大気中に増えると温室効果がますます強くなります。ところが、たとえば水蒸気が増加して雲が増えると、雲は太陽の日射をさえぎる効果が

図2



ありますから、入ってくるエネルギーが減り、逆に温室効果を結果として抑える方向に働く可能性があります。こういう具合に水蒸気の振る舞いの非常に複雑であることが今大きな問題となっています。炭酸ガスが増えたら温暖化するという単純な話ではなく、いろいろな他のプロセスもからんできます。それら全体の結果としてどうなるかということも考えながら温暖化問題を考える必要があります。

### <炭酸ガスの変化>

図3は、ハワイのマウナアロアで観測された1955年から2000年までの大気中の炭酸ガスの濃度変化です。炭酸ガスの増える様子がよくわかります。このように地球のいろいろな現象あるいは状態を地道に観測するということは非常に大事です。この観測により炭酸ガスが一方向的に年々増えているということがわかりました。この原因は明らかに人間活動であります。実際これと人間が使用している化石燃料の石炭、石油を燃やすことによって生ずる炭酸ガスの量と比べるともちろん若干違う面がありますが、かなりよく合います。炭酸ガスの増加の原因は人間活動だということになりました。

図3

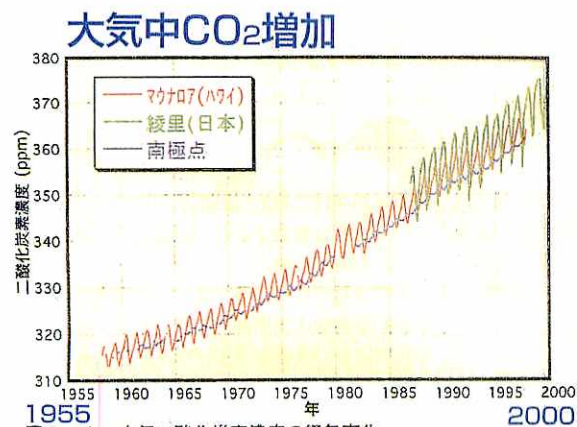


図3-1 大気二酸化炭素濃度の経年変化  
マウナロア、綾里、南極点における大気中の二酸化炭素月平均濃度の経年変化を示す。観測データは、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)、米二酸化炭素情報解析センターが収集したデータを使用した。

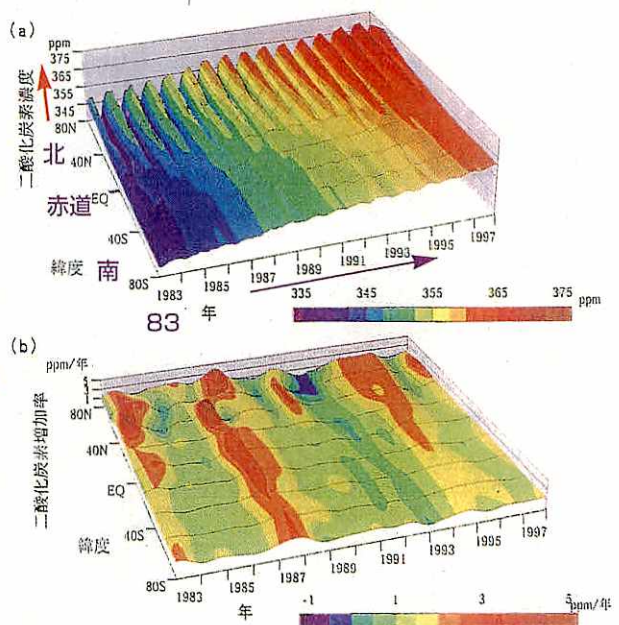


図3-2 緯度別の大気二酸化炭素濃度(a)と濃度増加率(b)の経年変化  
WDCGGが収集した観測データから作成した緯度別に平均した大気中の二酸化炭素月平均濃度と濃度増加率の経年変化を示す。

図4は、南極の氷床コアから過去の大気中の炭酸ガス濃度や気温がどのように変動したかという図です。一挙に時間スケールが先ほどの100倍から1000倍になって一番右が40万年前です。過去40万年間、地球は10万年程度の周期で氷河期と間氷期を繰り返しています。ちなみに現在は間氷期のまだ一部だといわれています。一番上の炭酸ガスだけを見ると、炭酸ガスは増えたり減ったりしており、これは12万年ぐらいの周期で起こっています。過去においても炭酸ガスは大変動しています。この40万年間の変化では、人間活動の影響は関係ないですが、一番少ない時で200ppm、多い時で280~300ppmですから、100ppmぐらいの大変動が起きています。ところが現在は過去40万年の記録からすると明らかにスケールアウトした値となっています。

ですから、明らかに最近の炭酸ガスの変動は、自然の変動ではなく、人間が増やしている可能性が高いのです。しかもそれは少なくとも過去40万年、自然が経験したことのない炭酸ガスの増加であるということです。状況証拠的には人間活動により炭酸ガスなどの温室効果ガスが非常に増えているということが明らかなのです。

図4

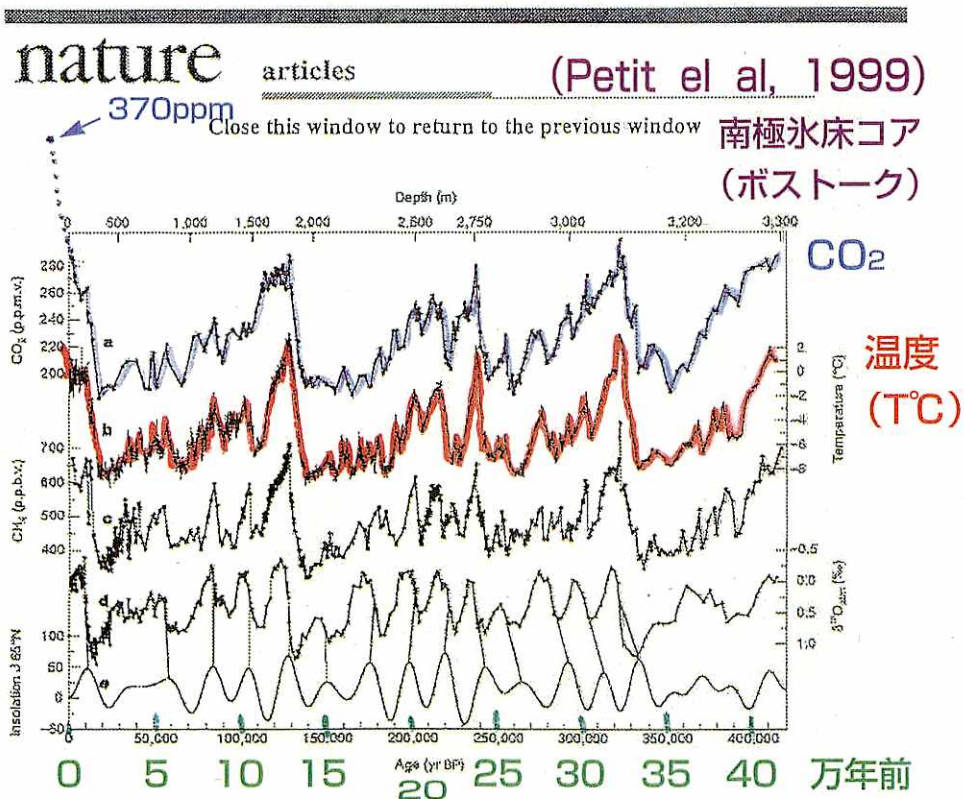


図5は、過去1000年の炭酸ガス、メタン、亜酸化窒素の濃度の推移を表わしたものです。これらのものも全部1850年頃から、ちょうど産業革命の頃から急激に増えています。よって人間活動によって温室効果ガスが確実に増えているということはもう間違いありません。

今の温室効果ガスは、やはり人間活動と密接にリンクしています。図6はひとつの推定例ですが、産業革命が始まった頃から化石燃料、特に石炭の使用が最近では石油も含めて急激に増えています。ところが、過去の人間活動を調べると、その前にも若干増えています。ちょうど16

図5 (a) 3種類がよく混合されている温室効果ガスの大気中濃度

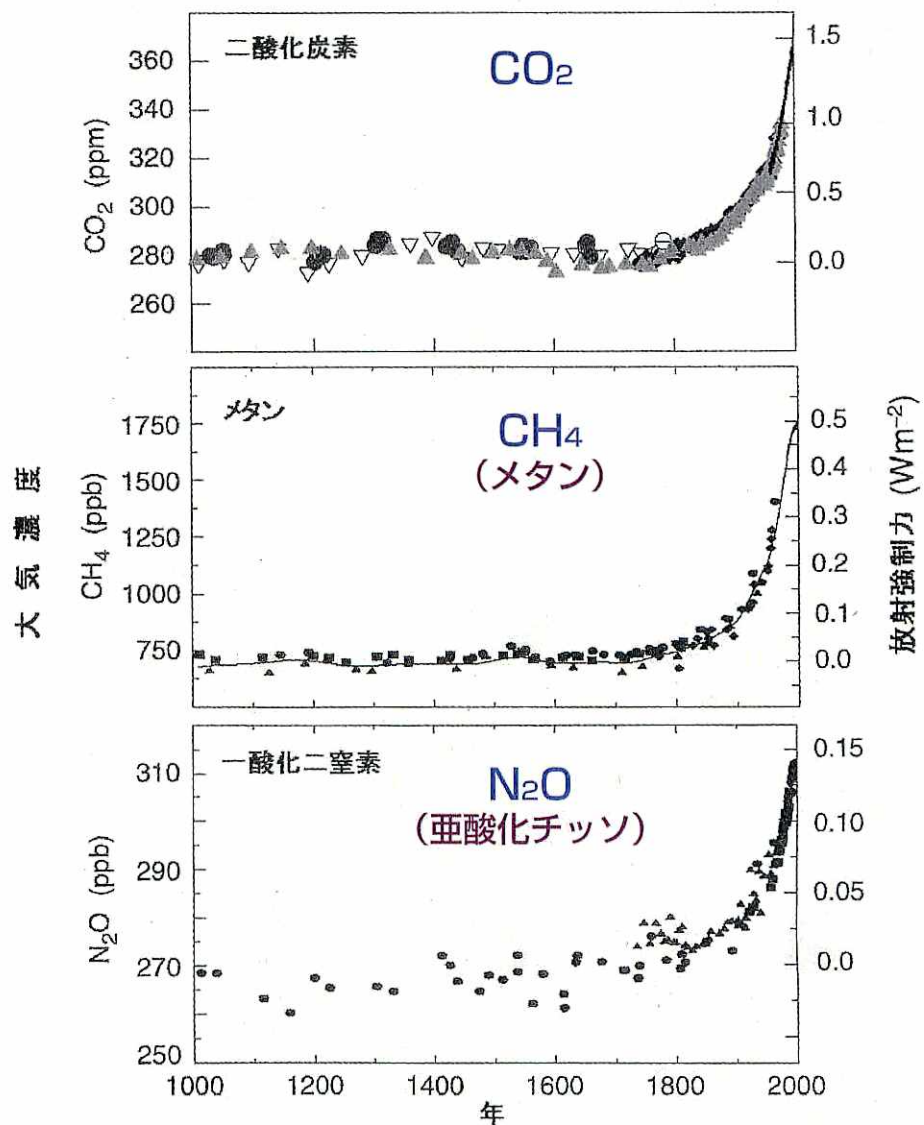


図6

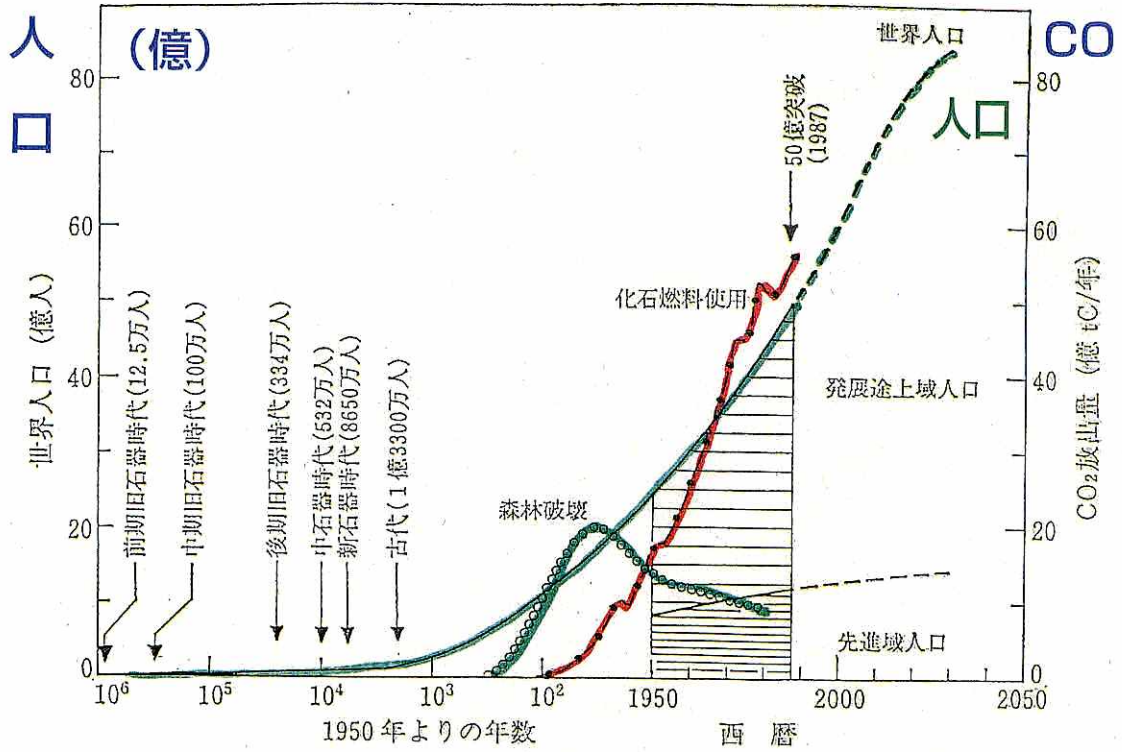


図 4.1 地球上における人類の活動 (内嶋編)

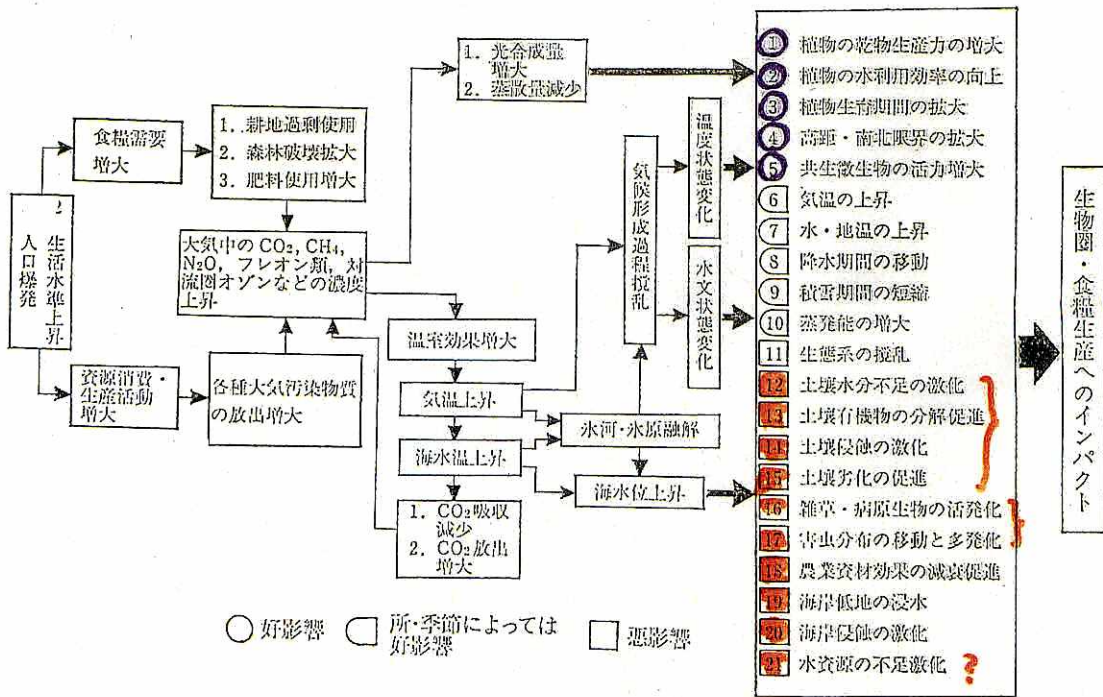


図 4.13 大気組成と地球気候の人為的変化の生物圏および農業生産への影響 (内嶋, 1988)



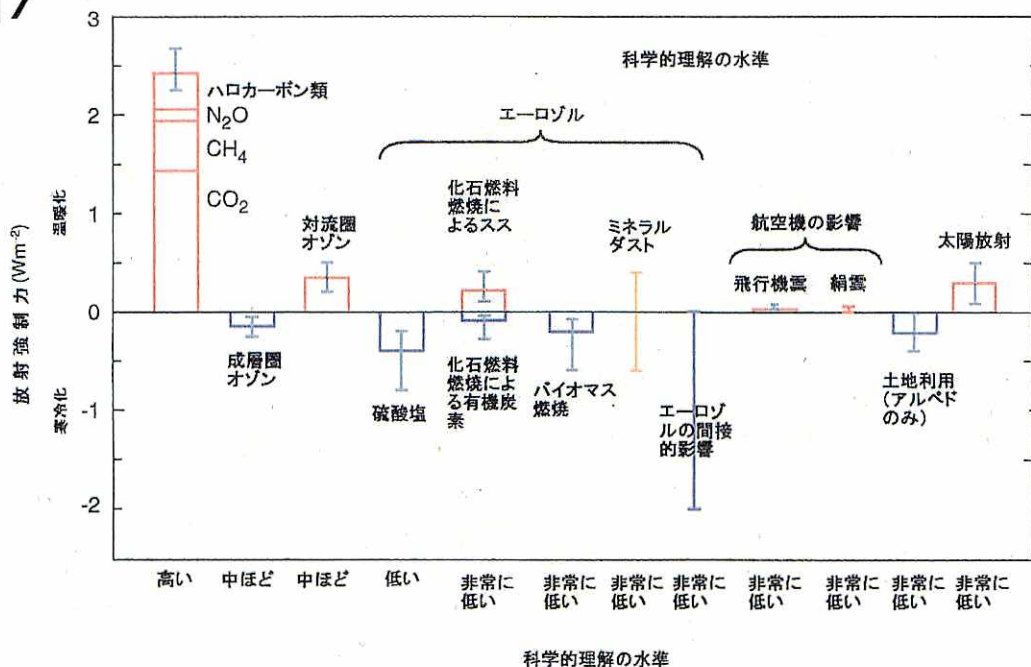
世紀から18世紀の中世の頃です。これは何かというと、ヨーロッパを中心とする森林破壊によるものです。森林を伐採してその跡を街や農地にするといった人間活動が特にこの数百年、活発に行われています。もちろんヨーロッパだけではなく、特にヨーロッパを中心にまず起こりました。その時にやはり炭酸ガスが増えているということがわかります。しかし、森林破壊が治まってくると同時に今度は石炭、石油の使用量が急激に増えてきています。それと人口の増加は、非常に対応するというのがよくわかります。

### <地球の気温の変化>

さて問題は、地球の気候はどうなっているかということです。そこが実は大きな問題です。人間活動により、地球を暖めるという温室効果だけなのかということです。地球の大気中のいろいろなプロセス、特に人間活動が関与しているプロセスが、地球の大気を暖める方向、あるいは逆に冷やすほうに向かわせているのか、そのことが問題となっています。

図7は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が、今年まとめた新しい報告書からの引用です。1750年から2000年までの過去250年間でどのような物質を人間は大気につけ加えているか、それが加熱の方に働いているのか、大気を冷やす方向に働いているのかを示したものです。冷やす方向とは、具体的にはその物質が増えることによって、ひとつは太陽からのエネルギーを反射させてしまうことです。反射率が高くなることは、要するに入ってくる量が減ってしまうということです。そういう効果を持つものは、エアロゾルと言われている大気中のダスト、ほこり、塵等です。宇宙、人工衛星から見ると、非常にダストが多いところは白っぽく見えます。白っぽく見えるということはそれだけ反射しているということです。

図7



人間活動によってダストが増えています。それが日傘効果で、入ってくるエネルギーを、減らす方向に働き、冷やす方向に働いています。しかし圧倒的に温室効果で暖まる効果の方が多いためです。縦軸のスケールはどれだけの（暖める／冷やす）大きさを持っているかということですから、大部分は温室効果を強める方向にいています。しかし一部は塵やダストが増えることによって、若干冷やす効果も増えています。その他には、地表面の状態を変えることによって反射の程度が変わるといった効果もありますが、グローバルには、あまり大きくありません。

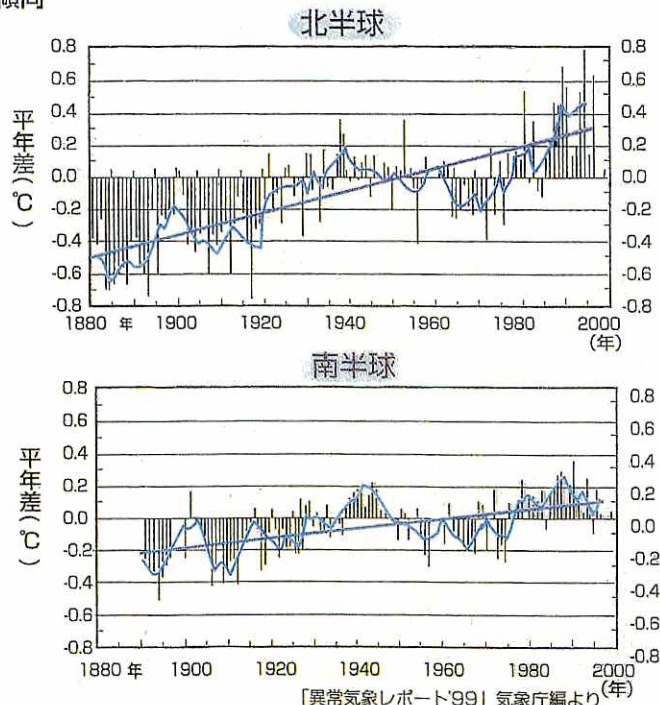
さて実際に地球の気温はどうなっているのでしょうか。図8は、（これも皆さんどこかで見たことがある図かもしれませんが、）過去約120年の半球ごとの気温の変動、年々高くなる傾向が非常に顕著です。1960年くらいの平均気温を基準として考えると、現在は+0.6℃~0.8℃、1880年ぐらいは-0.4℃ですから19世紀の終わりから現在までほぼ1℃程度気温が上昇しています。これは北半球です。南半球はあまり変わっていません。

図8

## 年々高くなる世界の気温

### 世界の気温変動

北半球、南半球の年平均気温の変化。グラフ中の折れ線は年による極端な変化を除いた平均的な変化。直線は100年間の傾向

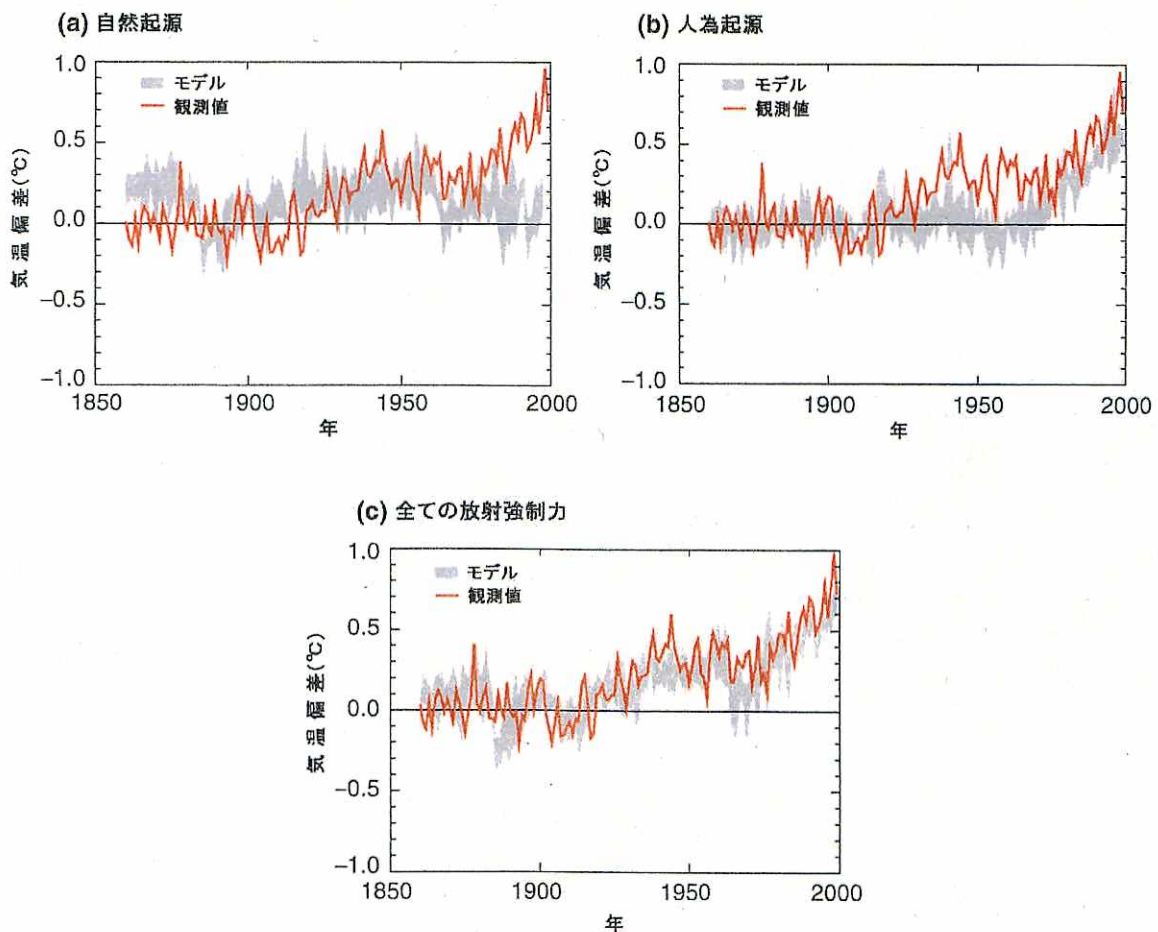


ここ100年間の気温上昇は、北半球で0.7℃、南半球で0.3℃。海は陸と比べると温まりにくいので、海の割合が大きい南半球では、気温上昇が小さいと考えられている

ただ地球全体の気温の見積りも怪しい問題がたくさんあります。観測点の少ない点や、データが正しいかどうか、いろいろあります。しかし、特に注目すべきことは、最近の上がり方が非常に大きく、最近20年間だけでいえば、20年間で1°C、1年間に0.05°C、そのぐらいの割合で上昇しているということになります。そういう意味では確かに気温は上がってきています。

図9も今年のIPCCレポートからの引用ですが、これは過去140年間、1860年から現在までの全球での変化です。これを見ても最近20年間の上がり方は明らかに大きいです。一方、1960年代、70年代付近は、炭酸ガスは確実に増えているのに、気温はあまり上がっていません。そこが温暖化問題で難しいところです。気温の上がり方は、産業革命が始まった頃から、全体として見れば確かに上昇していますが、よく見ると上がったたり一部下がったり、最近はまだ上がっているということで必ずしも1対1に対応していません。特に1960年代、70年代は、いったん下がっています。いわゆる38豪雪というのは、この付近で起こっています。あの頃は一部には氷河期に向かう地球というような本も出版されています。ちょうど38豪雪もあって、地球の気温も下がってきて、これから氷河期になるのではないかと真面目に言っていた人もいます。

図9



過去1000年から2000年の全球的な気温の推移を見るとほとんど変わっていないか、若干下がりがつつあります。そして、産業革命の頃から急に上がっています。ですから最近の気温の変化はやはり、人間活動が関係しているといえそうです。それまでの若干下がっている傾向は、地球の自然変動、あるいは、太陽活動の自然変動がたぶん関係しています。

ちなみに19世紀の終わり頃、ちょうど幕末の頃は非常に寒く、たとえば桜田門外の変の時は、大雪でした。19世紀には結構大雪の記録があます。その頃の気温は地球的にもかなり低く、小氷河期ともいわれています。その後、急激に上がっています。こういう図を見ると、状況証拠としては、温室効果ガスの増加と最近の気温の上昇、温暖化はやはり、かなり怪しい関係であると言えます。

しかし、すっきりとした説明が今でもできないのは、この地球の気候システムが、非常にやっかいなほど複雑だからです。たとえば図10は、気温の上昇傾向、過去20年間、1980年以降どこで特に気温が上がっているかということ（赤色は非常に上がったところ、青色はむしろ逆に下がったところ）を調べた例です。よく見ると、大陸高緯度、シベリア、アラスカ、カナダ、こういったところは非常に上がっています。一方、北大西洋や北太平洋というのは、むしろ下がっています。南半球から熱帯は全般的に弱いながら上がっています。特にエルニーニョが起る赤道太平洋域は、かなり上がっています。

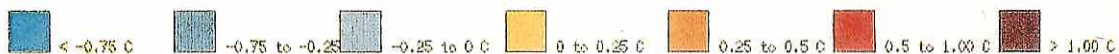
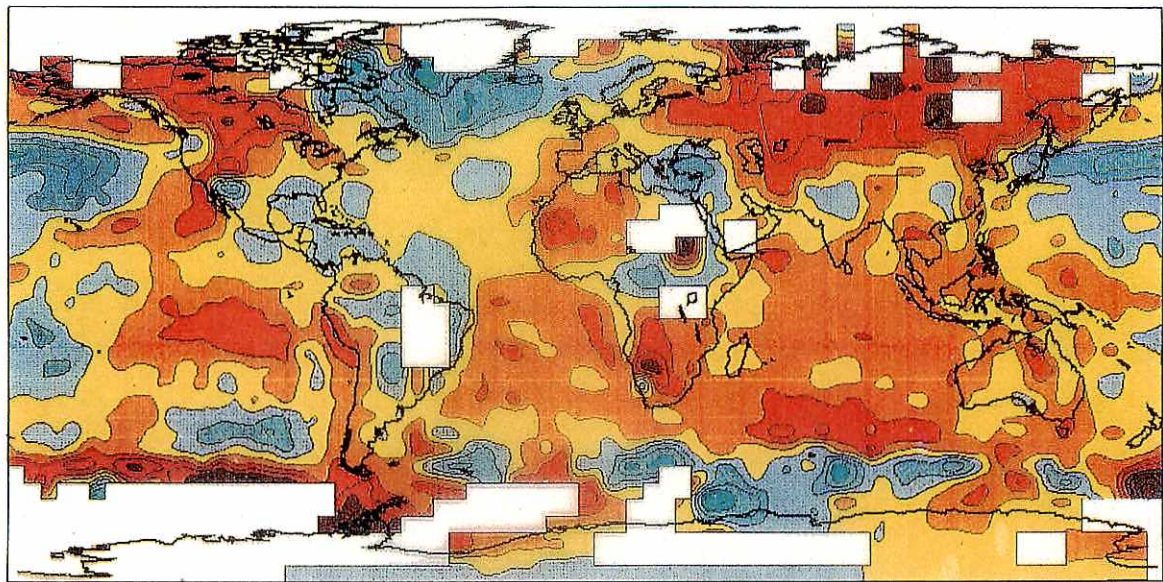
ただし海洋上は、いまだにデータの問題があります。観測データがそんなにたくさんないからです。最近の人工衛星のデータでやっと推定が確かになってきましたが、まだまだ不確定な要素があります。

大陸上は、実際の観測点からみると、特にシベリア付近を中心としてかなり確かです。白いところはデータがないため抜けています。全般的に温度が非常に上っており、特に中央シベリアは、この20年間、年平均気温で3~4℃、冬で見ると10℃ぐらい上がっています。10℃上がったといっても、シベリアはそもそも世界で一番低く、-50℃の世界です。-50℃の冬の気温が-40℃になったということです。しかしこのような分布も決して一様ではありません。ちなみにシベリアの気温が非常に最近上がってきている、温暖化しているということが、日本の最近の暖冬と密接な関係にあります。これは後ほどお話しします。

## 図10

### 気温変化 1981-1990

A SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES wrt 1951-80



#### <気温上昇の原因>

さて、そこで問題は、気温の上昇の原因は何か。先ほどから言っていますように、温室効果ガスの増加であろうと推測していますが、いろいろな考え方が今でもあります。ひとつはこのような気温変動は自然の変動だという考え方です。地球は過去何十万年間、大変動を繰り返しています。炭酸ガス濃度も大きく、100ppm前後に上がったり下がったりしています。ですからその一環と考えるのも良いのではないかと今でもこのような考え方があります。

一方、炭酸ガスがどんどん増え、温室効果ガスも増えています。それから最近100年間の気温も、全体として見ると一方的に上がっています。そういうことを考えると人間活動の影響ではないかと考えられます。しかし、よくよく見ると必ずしもうまく合わず、難しいのです。世界の気象関係のいろいろな学者が集まって、どう評価するか、コンピュータのモデルや、観測データも駆使しています。今年まとめたIPCCの報告書では最近の温暖化には、人間活動がかなり関係しているといえそうだとされています。もちろん自然の変動もあります。ですから、日本の気温の変動など、特に地域的な変動となると、全球的な傾向のメカニズムとは違いますから、難しいところです。

現在我々が住んでいる地球の気候は、いろいろな要素が関係しており、全部含めて、気候のシステムという見方をしていますが、この気候システムはさまざまなフィードバックがからんだ非常に複雑なシステムです。フィードバックというのは、たとえば先ほど少し言いました水蒸気と炭酸ガスとの関係です。炭酸ガスが増えることによって水の循環も変化し、降水や蒸発などが影響を受けます。そして水蒸気の濃度にはねかえってきます。水蒸気が増え温室効果をより加速する方向に行くか、あるいは減って温室効果を減速する方向に行くか、そういうものをフィードバックといいます。要するに相互に関連したプロセスと因果関係であり、これによって温室効果ガスの増加は、気温の変化を確実に起こしているのですが、それに関連した大気の循環や気候の分布そのものを変えていきつつあります。

その中でもとくに、降水量、あるいは降水量、蒸発量を含めた水の循環が、グローバルに、あるいは地域的にどうなっているのか。これはいろいろなフィードバックがからんでいるため、まだきちんとした答えがでていません。ちなみに世界の研究者が集まって今年まとめられたIPCCの報告書は、800ページぐらいありますが、その中で水の循環や降水量の変化に関する報告は、ほんの数ページ程度しかありません。しかし、実は水循環は我々にとって非常に重要です。生態系にとっても、農業にとってもそうですし、いろいろな生活の面で水は大事です。ですから温暖化で水がどうなるかということは非常に大事です。特にこの日本海側では、雪はどうなるのか。それがどうも一番の問題なのです。

ひとつの例ですが、図11は1860年から現在にかけての全球の気温変動と、それを最近のコンピュータモデルでうまくシミュレートした例です。炭酸ガスの増加の量がわかっていますから、それによって地球の気温をシミュレートするとかなり多めに評価されてしまいます。実際の気温変動と比べると若干多めになっています。

なぜ炭酸ガス、温室効果だけでの推定では合わないのか。それは、先ほど言いましたようにダスト、大気中の塵やほこりが増えることによる日傘効果等により、日射が押さえられるからです。それを加味すると、実際の変動とよく合ってきます。これはひとつの例ですが、温室効果だけではうまく説明できないということがいえます。

# 図11

152—3 温室効果気体の増加と地球温暖化

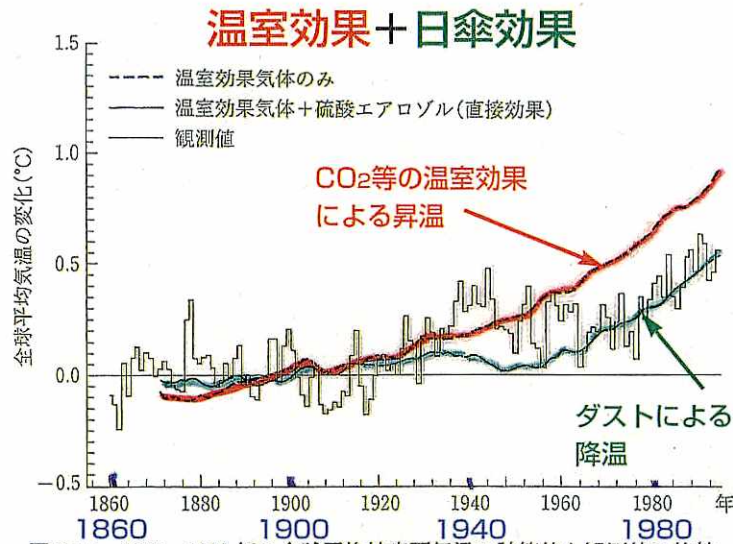


図 3.15 1860～1990年の全球平均地表面気温の計算値と観測値の比較 (Houghton et al., 1996 から引用)。気温は1880～1920年の平均値からの偏差として表されている。

## <将来予測>

最近はいろいろな見積もりをコンピュータを使ってしておりますが、この先どうなるかということが多くの方の関心だと思います。人間活動が今後いろいろなかたちで続きますが、たとえば炭酸ガスが今後増えた場合気温がどうなるかというのが、図12で、これもIPCCの今年の報告から引用したものです。ただし、温室効果ガスがどう増えるのか、減るのか、減ることはたぶんないと思いますが、という将来予測は人間活動そのものを予測しないといけません。どのくらい炭酸ガスを放出するような社会であるのか、それを技術力でどれだけ抑えられるのか。あるいは抑えない場合はどうなるのか。いまのところ、いろいろなシナリオを考えざるをえません。IPCCは、いくつかのシナリオを考えています。科学技術が非常に進んで、しかも行政に反映してもっとも抑えた場合、そういうことをせずに今のまま野放しの場合、いろいろな状況を調べています。たとえば最も炭酸ガスの放出が抑えられた場合が一番下の450という線ですが、横軸に2000年から2300年まで示されています。放出量はいろいろなパターンで、多分これからの技術の進展次第で減っていきます。減り方も技術によっていろいろ違います。現在(2000年)は炭酸ガス濃度は約370ppmですが、世界的に南北問題も解決し、最も炭酸ガス濃度が抑えられた場合のシナリオは2100年では約450ppmとなります。また、野放しの場合のシナリオは、約1000ppmで、現在の約3倍です。これは人間が結局決めることですが、これだけの大きな不確定性があります。IPCCは非常に骨の折れる仕事をしており、それぞれのケースで気候がどうなるかを調べています。いくつかのシナリオによる炭酸ガス濃度の将来予想により、とりあえず全球、地球全体を平均した気温の推定を行ってみたというのが、図13です。

図12

いくつかのシナリオによるCO2変化と気温変化

(IPCC,2001)

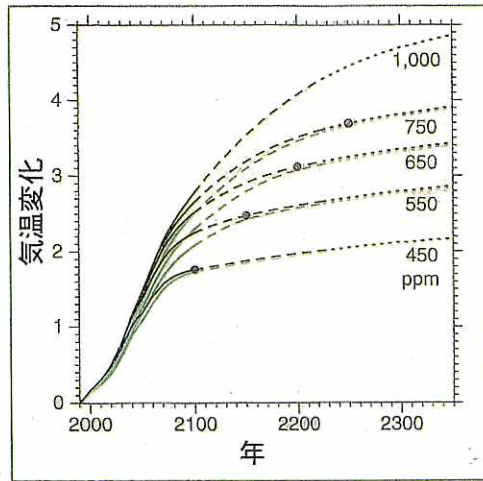
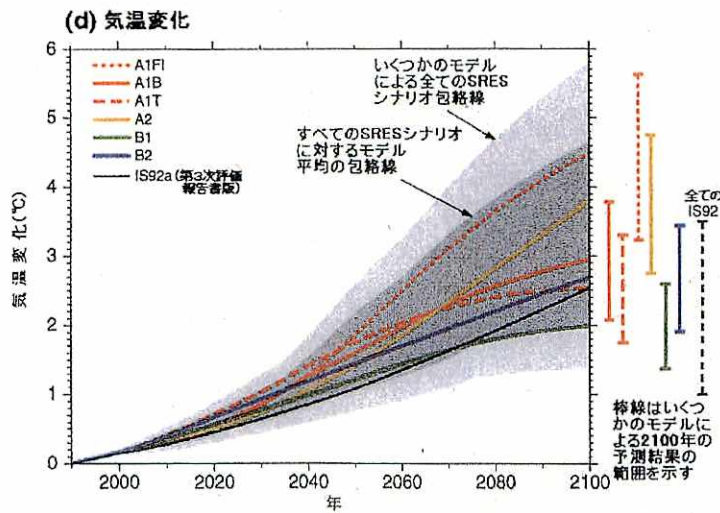


図13



現在、スーパーコンピューターを使用した一番信頼できるモデルは、アメリカ、ヨーロッパ、日本等十何箇所かありますが、そのモデルの結果を全部合わせて、平均した場合どのくらいの気温になるか。先ほどのいろいろなシナリオがありますが、2000年のレベルをゼロとすると、2100年には一番低いシナリオで1℃ぐらいの上昇です。100年間で1℃です。

しかし一番高い見積もりは、全球で6℃です。決して日本での気温ではなく、全球です。全球で数℃ということは、場所によっては10℃となるなど、もっと上昇します。これだけのばらつきがあります。今後の人間社会が、これをいかに技術的に低く抑えられるかが、温暖化防止という意味での問題だと思います。



気温分布がどうなのかの推定図は図14です。2070年ぐらいのレベルの予測ですが、先ほどのシナリオにもとづく予測です。温室効果ガスの増え方はいろいろありますが、A2はあまり抑えなかった場合、B2は比較的抑えた場合です。パターンで赤いところ、すなわち北極域を中心として高緯度地方の温度が高くなっています。熱帯や低緯度はあまり影響を受けません。なぜ北極の温度が高くなるかという、北極海の氷が溶けるとますます反射率が小さくなるからです。白い氷は太陽エネルギーを反射します。氷がなくなってくると、太陽エネルギーをますます吸収し暖かくなります。それから、大陸のシベリア等には雪がありますが、雪が消えると、地面がエネルギーを吸収しやすくなり、気温はますます高くなります。これもフィードバックです。このようなフィードバックが関係して高緯度が非常に高くなっています。南極があまり高くないのは、南極の高緯度は、溶けても溶けても氷だからです。ですから反射とかいう形では変わらないのです。モデルではそのようになっています。

問題は水がどうなるか、要するに降水です。これはIPCCも非常に自信がありません。

**図14** 2つのシナリオ (A2, B2) による2070-2100の年平均気温変化 (大気海洋結合モデルによる推定) IPCC (2001)

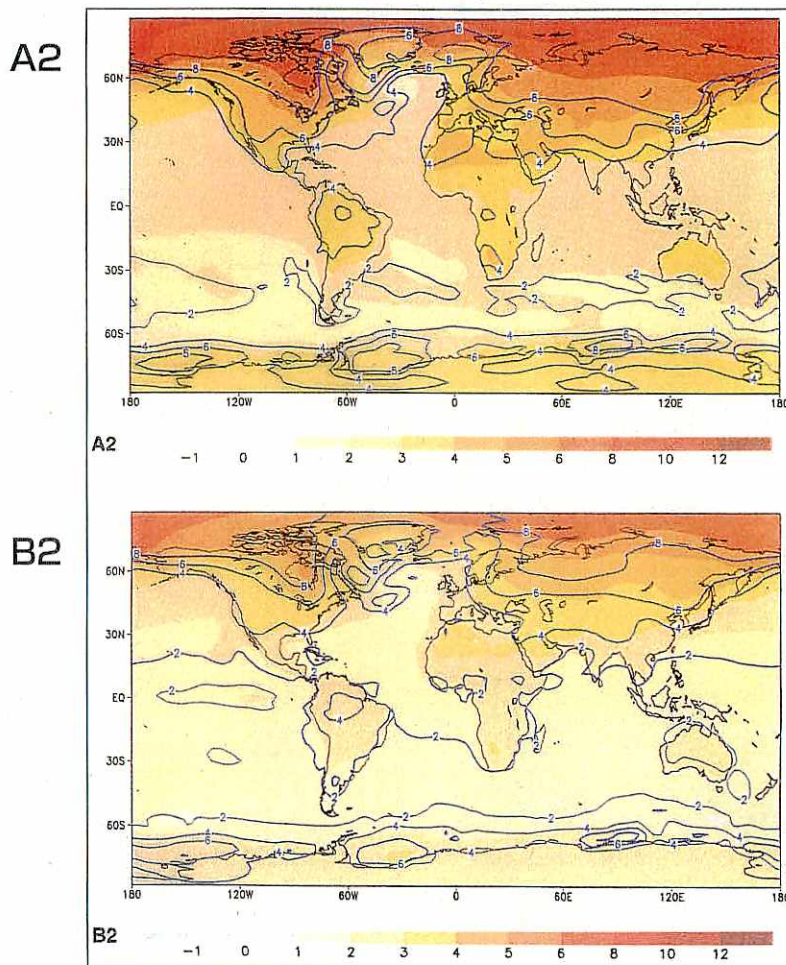


図15はモデルの違いと季節の違いを4つのボックスに分けています。

全般的に青系統の色が、雨が多くなります。赤系統の色が雨が少なくなります。エリアで見ればなんとなく雨が多くなります。しかし、一方では一部雨が減るところがあります。熱帯とか一部では減ります。これも実は大きなクエスチョンがあります。これは1個ずつモデルを見ても、ものすごく違います。この議論はまだまだ問題があります。

最後に、グローバルな話をしますが、海面の水位は氷が溶けて上がると思っておられる方も多いと思いますが、実は海面上昇の予測の見積りの半分ほどは、海面の水温そのものの上昇によります。温かい水は冷たい水に比べて膨張しますから、その分だけ水位が高くなります。その効果がほぼ半分です。後の半分が、ヒマラヤ、アラスカ等の山岳の氷河です。

100年後の海面水位も、図16のようにシナリオではばらつきがあり、高い見積りでは1m、少ないものでは10cm。平均40cmくらいです。さんご礁の国等が問題にしていますが、40cmで結構問題になります。日本でも一部問題になっているかもしれませんが、まだあまり大きな議論にはなっていません。

## 図15

### 2つのシナリオ (A2, B2) による降水量変化 (1071-2100)

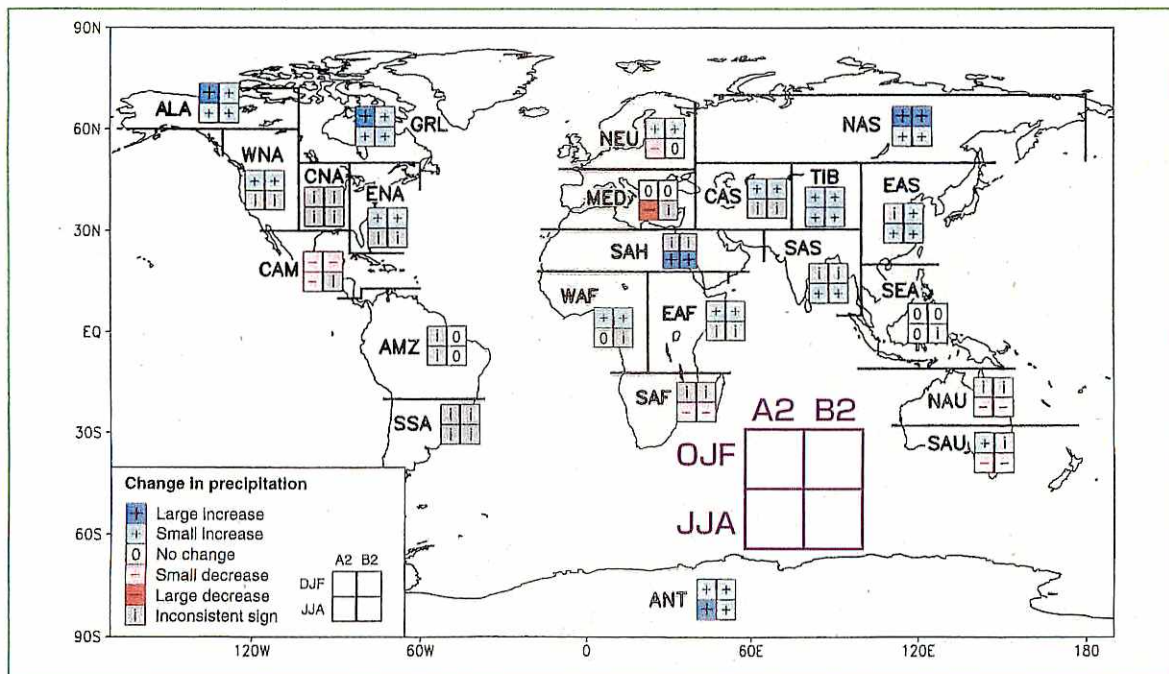
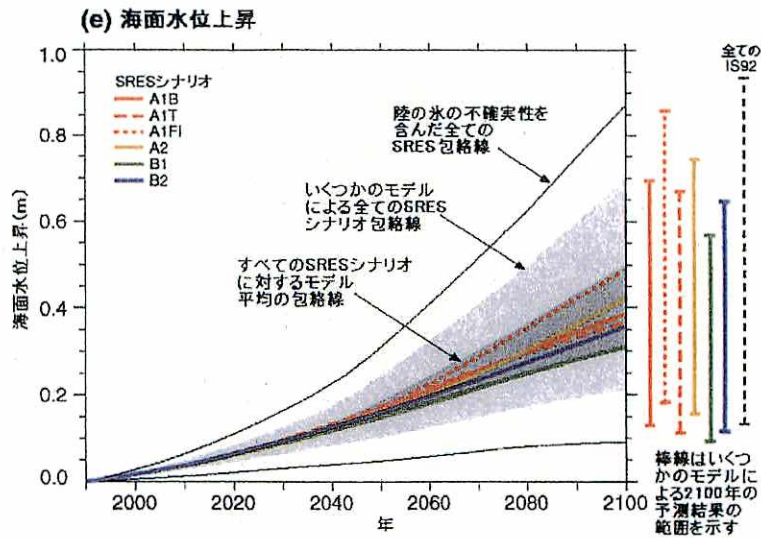


図16



<日本における気温の変化>

さて今までグローバルな話をしましたが、では日本はどうでしょう。日本の最近の、気温の変化を見てみましょう。

皆さん実際に体験していらっしゃると思いますが、気温が異常に高い日が最近多くなっています。特に90年代、この富山でも、夏に38℃、39℃と結構高くなったと聞いています。これは具体的にはフェーン現象が増えたということですが、それが多くなっています。冬の寒い日も減ってきています。その関係で雪も減っています。

図17は、過去100年間の日本のいろいろな地点で平均した最高気温と最低気温の変化です。青線は最低気温の変化ですが、最低気温が最近非常に上がってきています。最高気温も上がってきていますが、上がり方は最低気温ほどでもありません。これはいわゆる都市気候が関係しています。都市が大きくなってくると、それによって都市の温度が高くなります。この効果も入っていますが、特に最低気温の上昇は、この効果がかなり入っています。東京を見ると非常に上がってきています。これは明らかに都市気候ですが、その効果を除外しても、また小さな田舎町を含めた平均でも、やはり最低気温は上がっています。

これはやはりグローバルな、大規模な気候変動の一環だろうと思われています。

<日本海側における気候の変化>

ところで最近の日本も温暖化です。冬の雪の減少もそうです。降水量の変化がいろいろ議論になっています。富山の方がよくわかっておられるように、最近雪が降りません。日本海側は、顕著に気温と降水量が相関しています。暖冬小雪。それと寒冬多雪。これらは非常に対応しています。ただ最近の数10年間をみると、特に1987年（昭和62年）昭和の終わり頃ですが、それ以降、暖冬がずっと持続して、降雪量が非常に少ないです。87年以前のレベルに比べて寒冬多雪かどうか問題ですが、去年は久しぶりに寒冬多雪に戻ったような感じでした。

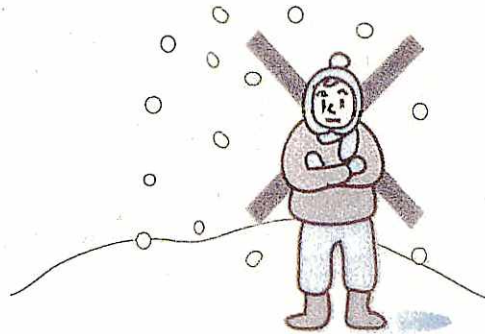
図17

## 高くなってきた日本の気温

### 気温変動による影響



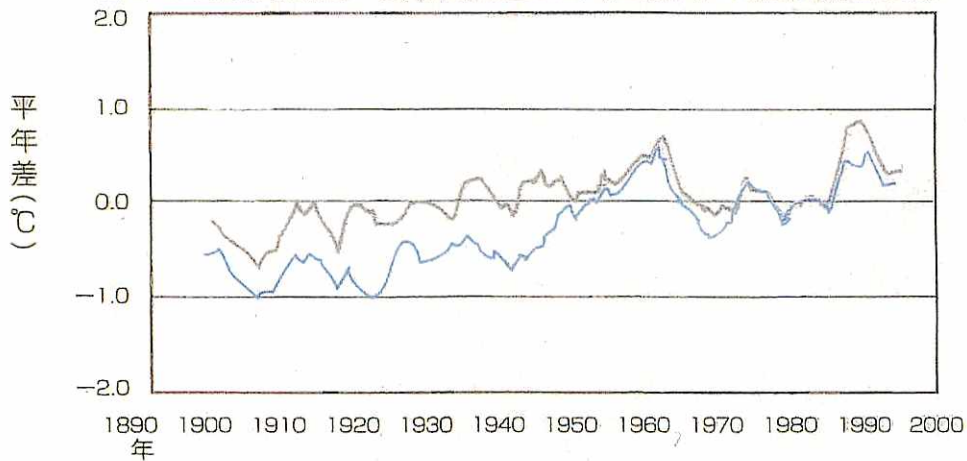
異常に気温が高い日は  
90年代に集中している  
(夏だけに限らない)



異常に気温が低い日は  
最近ほとんどない

### 気温の変化

日本の日最高気温・日最低気温の年平均の平年差の経年変化



黒い線は日最高気温、青線は日最低気温。年による細かな高低は平均化してある。  
平均値の期間1961年～1990年(「異常気象レポート'99」気象庁編より)

最高気温より最低気温の上昇率が高い。  
現在は「暑くなった」というより「寒くなくなった」といえる

富山の過去数10年間のデータを見てみましょう。

図18は、富山の1955年から2000年までの冬の降水量と気温です。

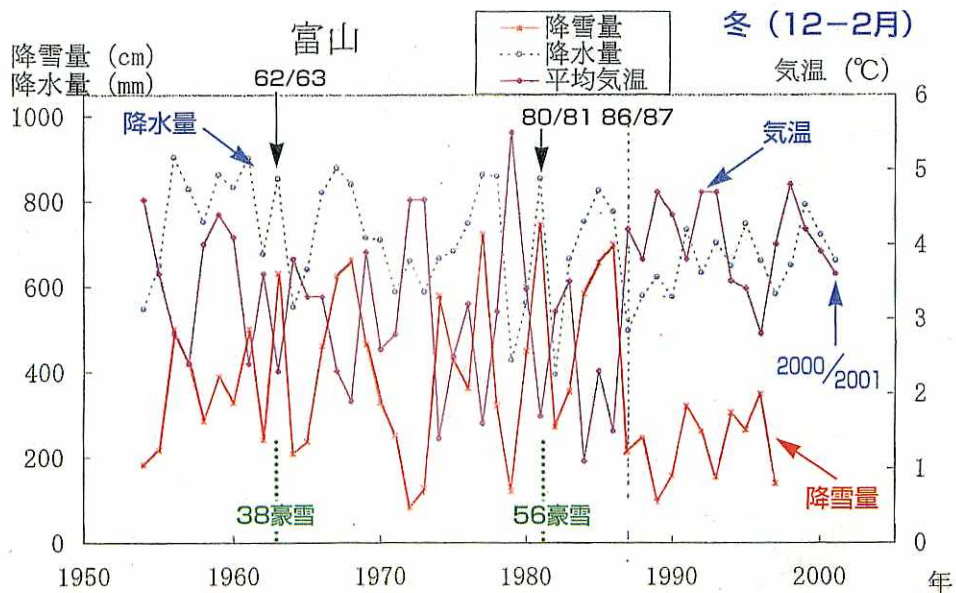
気温が紫の実線です。気温が1987年以降ずっと高くなっています。昨年は若干低いです。

1998年は、低いときもありましたが、雪はあまり降りませんでした。

赤は降雪量です。降雪量は、毎日降った雪を積み重ねた降雪水量で、積雪深とは関係ありませんが違います。これは87年以降低くなります。まだデータが記入されていませんが、昨年は若干増えています。その前、1981年の56豪雪の時は降雪量に直しますと、約800cmです。

その前の38豪雪も含め、それ以外でも結構多かった年があります。何年かごとに大雪になるようです。それが87年から減りっぱなし、気温は逆に上がりっぱなしです。点線は、水に直した降水量です。雨を含めた降水量変動が、冬には若干減っていますが、雪ほどの減り方ではありません。このことは、雪のかわりに雨が降り、降り方も冬型で降ったというよりも、低気圧の影響で、降雨が増えたのだと思います。降水量で見た場合と、雪で見た場合は違うということがはっきりします。同じ傾向は他の地点の新潟、高田、北陸の地域でも大体同じようなパターンが見えます。

図18

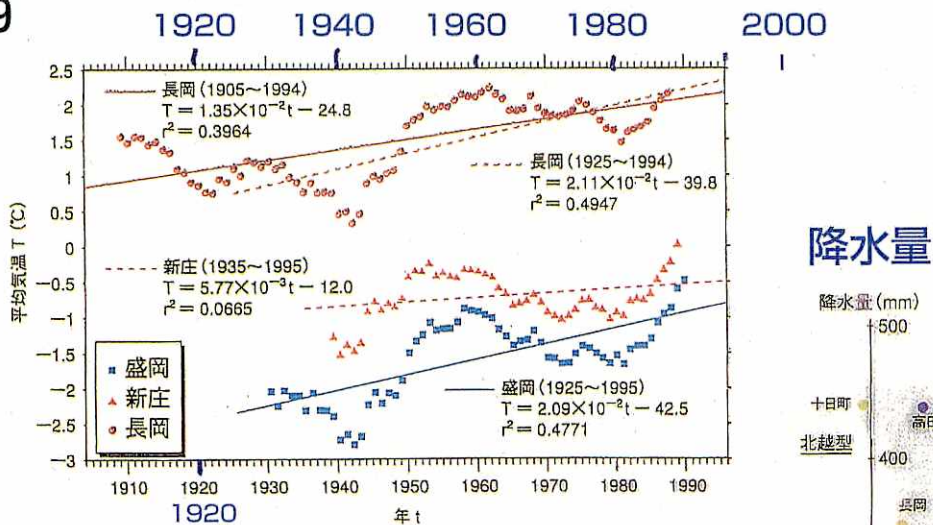


<日本海側の降雪の変化>

次に、日本海側の雪の特性を考えてみたいと思います。

図19は1900年から2000年までの長岡、新庄、盛岡の気温変動です。長岡は富山とほとんど同じ変動パターンです。図20は縦軸が冬の降水量で雪の時は、雪です。横軸は気温です。プロットしてあるのは地点です。いろいろな地点（富山、高田、長岡、東北の新庄、北海道）の冬の降水量と気温がプロットされています。雪になるか、雨になるかという境目の気温は、その月の平均気温に直すと大体3℃です。実際に降るときは、2℃や1.5℃ぐらいですが、月平均では大体3℃より低い辺りで雪が降ります。北陸や上越の大雪は降水量が多く雪が多いことに対応していますが、雪になるかどうかのすれすれの気温で大雪が降ります。ですからそれぞれの地点の気温が少し上がれば、この3℃を超えてしまい、もう雪でなくなってしまいます。北陸上越は、そういうマージナルな雪国であります。

図19



図II 長岡、新庄、盛岡における寒候期(12、1、2月)の平均気温の十年移動平均値とその回帰直線(図中の式は、気温の上昇率のみを表している)  
(中村,1999)

- データ期間
- 1931 - 1960 = ●
  - 1941 - 1960 = ○
  - 1951 - 1960 = ⊙
  - 1951 - 1980 = ⊕
  - 1954 - 1980 = ⊗
  - 1958 - 1980 = ⊘
  - 1967 - 1980 = ⊙
  - 1971 - 1980 = ⊕

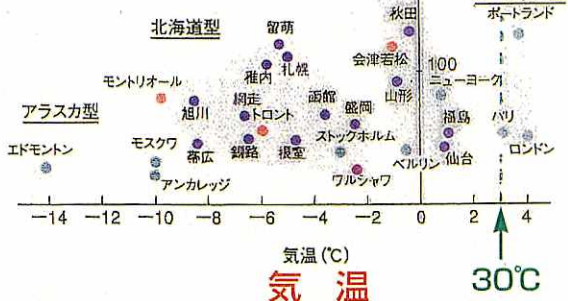


図20 図I 世界各地の1月の平均気温と降水量(原田ほか,1988)

一方、東北型は気温が低いですから、少々気温が上がっても雪が降りますが、東北地方はもとも雪の量が少ない地方です。北海道はどんなに温暖化しても、当面雪ですが、雪の量は非常に少ないです。

結局、北陸地域が温暖化することによって、雪の変動が最も顕著にあらわれています。そういうぎりぎりのところの雪国です。このような所は、世界にも他に例がありません。

ですから富山を含む北陸地域は、今後温暖化によって劇的に気候が変わります。87年以降の気候で皆さんは経験されていますが、この状況が今後続く可能性があります。しかも降水量そのものが気温と密接に関係があります。決して気温と降水量は独立ではありません。それが日本海側の雪の大きな問題点です。

実際にそれを示すのが、弘前大学の力石先生が数年前に調査された結果です。

図21は冬の気温と降雪量、雪として積もった量の相関です。2つの相関関係を求めると、雪が増えて気温も上がるというのは、ここでは青になりますが、実際に気温が上がったら雪が消える場合は赤です。ですからほとんど日本は赤です。一部北海道の東の方には逆にほんの少し青の点があり、弱いながら気温が上がると逆に雪が増えるというところが一部あります。

しかし点の大きさは、相関の強さを示しており、あまり相関は強くありません。

富山を中心として北陸三県、それから新潟から山陰まで、非常に大きな赤マークがついています。これは気温が上がると雪が消えるという相関です。過去数10年間の統計が非常に強い関係がみられます。これは皆さんにとっては経験的に当たり前ですが、冬型が弱まると気温が上がります。それは単に気温が上がって雪が雨になるだけではなく、降水のメカニズムそのものが変わります。ですから日本海側は特に温暖化にとって、非常に大きな問題を含んでいます。

ちなみに最近の冬の降水量、雪の量と考えてもよいですが、この変化の傾向は図22のように赤が減少しているということですが、この地域は数十年間でずっと減っています。北海道はあまり減っていません。ちなみに気温そのものが一番上がっているのは、北海道です。しかし、降雪量という形で見ると、北陸が圧倒的です。

先ほどの図を時系列に日本海側全体をグラフにしたのが図23です。

これは1955年から1995、6年までのものしかありませんが、1987年を境に降水量も降雪量も減っていることが、非常に明らかにわかります。棒グラフは降雪量です。圧倒的に数10年間の平均に比べて減ってきています。折れ線グラフは気温です。気温は上がっています。気温と降水量の相関図がはっきりと示されています。年々で見てもそういう関係があります。

これで見ると自然変動であると思いますが、この10数年間の気温の上昇と降水量の減少は、並ではありません。もっと長い時系列が必要となりますが、過去100年間ぐらいいをみても、こんな暖冬少雪傾向はなさそうです。

図22

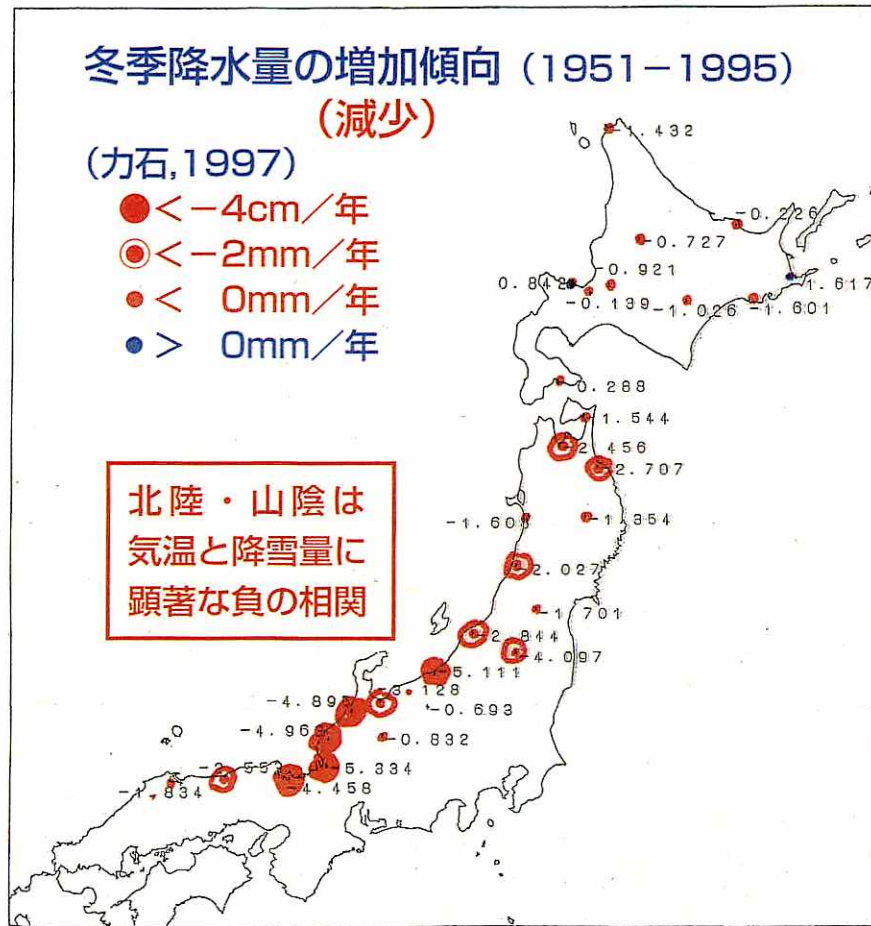


図3-8 冬季降水量の増加率 (1951-95年). 単位はmm/年.

図21

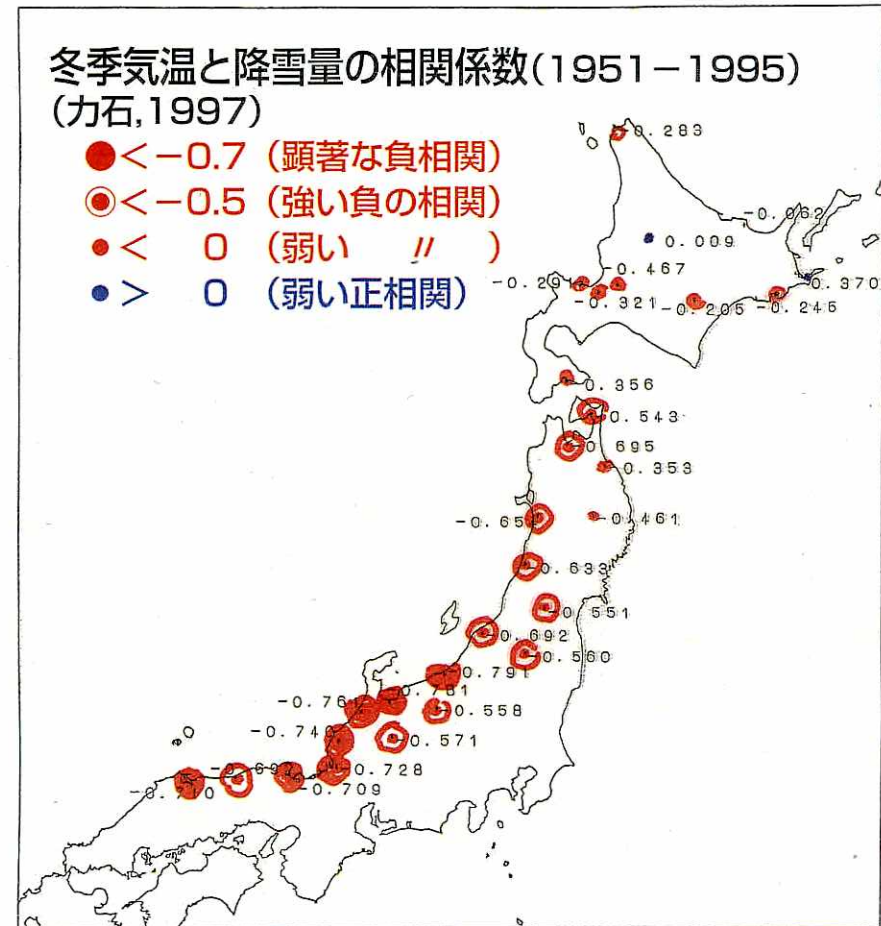


図3-13 冬季気温と冬季降雪量の相関係数 (1951-1995年)



図24 500hpa高度偏差

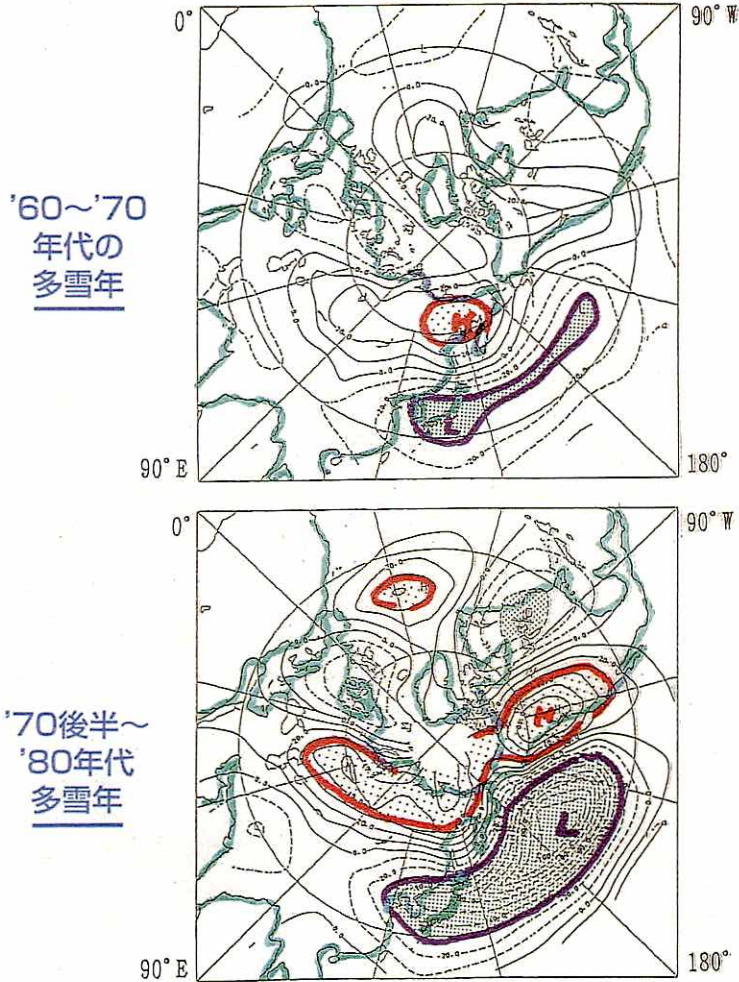


図6 多雪年前半5ヶ年(1963・68・70・74・75年)(上段)と多雪年後半4ヶ年(1977・81・84・86年)(下段)の冬季500hPaの500hPa等圧面高度偏差平均図

●は+30m以上    ■は-30m以下

図23

日本海側の雪(降水量)と気温の変動  
(西森.小林.安成,1998)

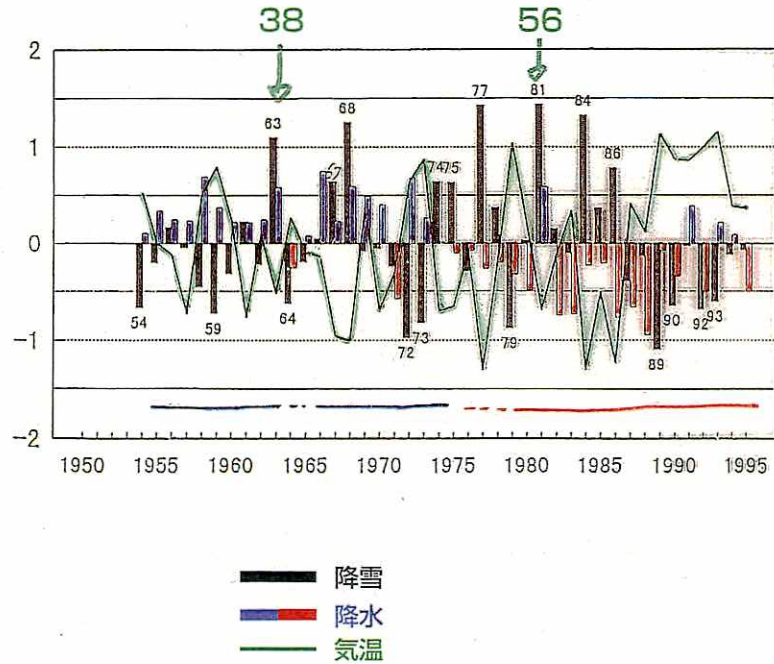


図1 日本海側地域の気温・降水・降雪の年次変動

ひとつ問題は、炭酸ガスは年々徐々に増えています。ところが日本の気温と雪は87年を境にして大きく変化しています。これは地球の気候システムの非常に複雑なところであるのか、それとも自然変動が同時に悪影響を及ぼしているのか、まだわかっていません。

実際に雪が大きく減るか、増えるかというのは、シベリアからの寒気団、いわゆる冬型の気圧配置が関係しています。

図24の上の図は、38豪雪の頃の雪が多かった頃の北半球全体の大気のパターンです。下の図は80年代、56豪雪の時の大気のパターンです。先程のものと明らかに違うことがわかります。違いは38豪雪の頃は冬のシベリア高気圧そのものが非常に強かったのですが、最近、80年代に入ってからシベリア高気圧はあまり強くありません。しかしながら大陸と海との間には気圧の差があり、やはり冬型です。大陸で気圧が下がらなくても、海で下がればいいわけです。たとえば、56豪雪の時には、アリューシャン低気圧が一段と深くなりました。そのために冬型が日本付近で強くなりました。これは引き型の冬型といい、押し型の冬型とは違いがでてきます。その後は、暖冬になっています。ですから大変大きく系統的に北半球の循環のパターンが変わってきています。

#### <今後の雪国の気候の変化>

それでは今後どのようなようになるか。

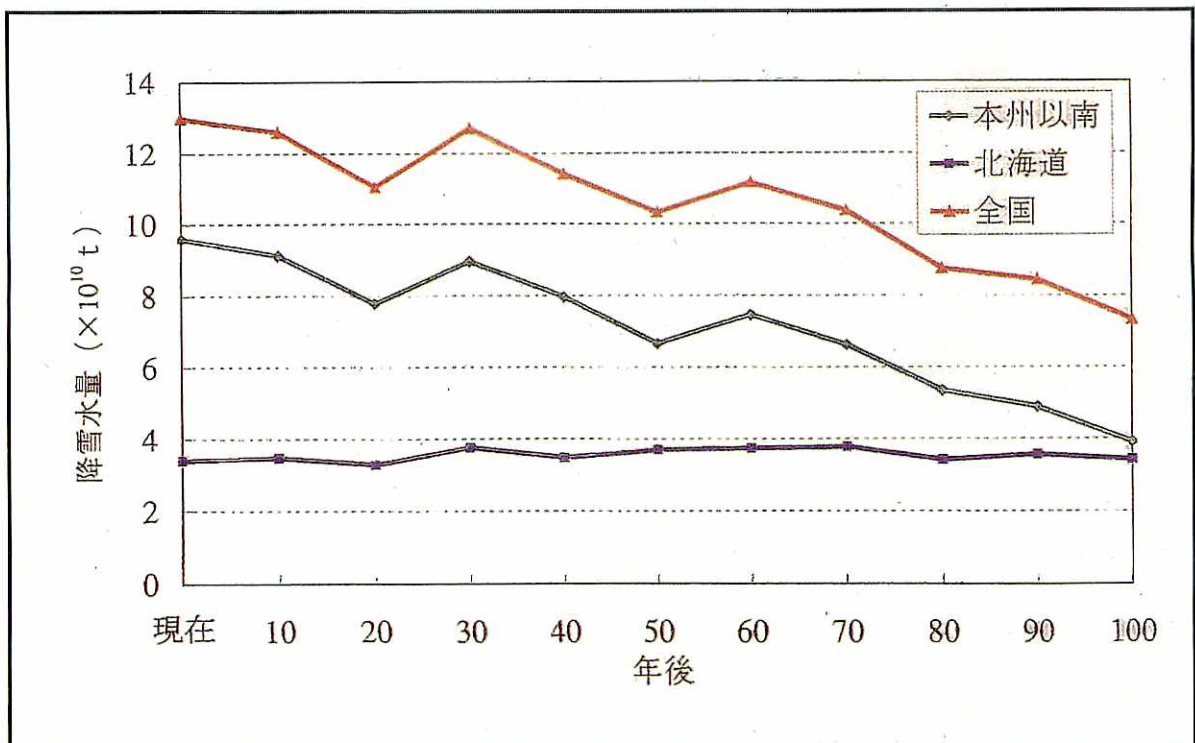
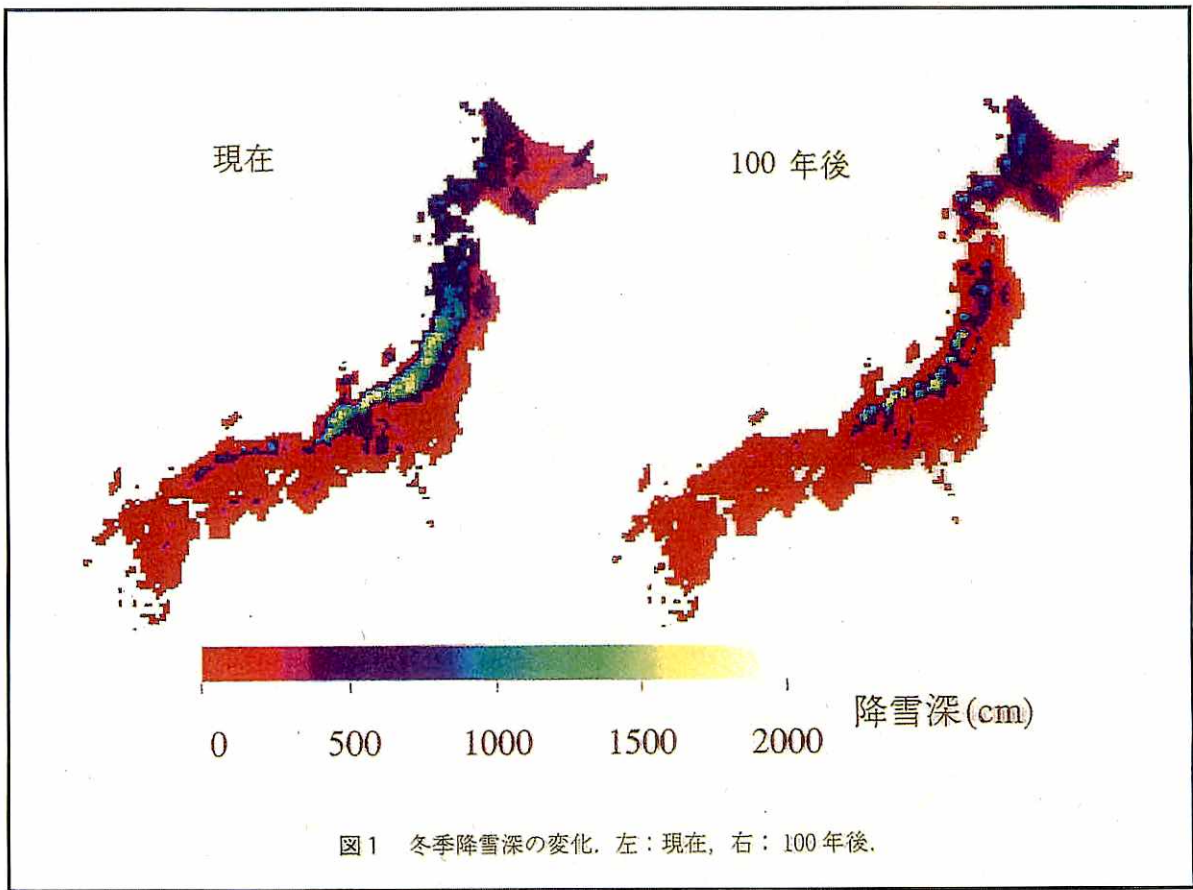
今後どのようなようになるかは、簡単に言うとうわからないということです（笑）。ただ、それでは話としてあまりにも申し訳ないので、一応、現在の最も信頼できそうなモデルを前提に、先ほど言いましたように炭酸ガスを減らしていった時に地球全体の気候がどうなるかというモデルの結果の日本付近だけを取り出してみます。

日本付近の気温はどうなるか、あるいは、降水量はどうなるか、という予測があります。特に気温は、降水量よりはまだ信頼できます。農林水産省の筑波にある農業環境技術研究所が、日本の水資源、特に雪に関連した水資源を予測しており、結果は雪としての水資源はかなり減少しています。これは今の話でわかると思いますが、その結果を少しお見せします。

図25（上）は、現在の冬の最大降雪深の分布図で、日本版のナショナルジオグラフィックに引用された井上さんと横山さんの結果です。青は雪が多いところで、もっと多いところは真中に少し黄色のところがあります。これが100年後の2100年ごろには、簡単に言うと、平地の雪がほとんどなくなります。ただし山の方は若干残ります。北海道は少し減りますが、減り方はそれほどでもありません。

図25（下）は降雪深で、時系列で見ますと、北海道では雪として降る量はほとんど変わりません。若干増えるかもしれません。ところが本州以南は大幅に減ってきています。基本的には北陸、東北の減り方が顕著です。どのくらい減るかと言えば、10乗トンの単位で、現在は12から13ですが、100年後には7ですから、ほぼ半分になります。雪密度としては、ほぼ半分になる。という予測です。

図25



それから河川です。

図26は、年降雪水量の推移を示したもので、細かい国土数値情報を用いて、分布が内挿してあります。流域ごとの河川流量ですが、雪がどれだけ河川に流れ込むか、流域での流量の変化というのを表しています。

石狩川は10のユニットが8になります。しかし、たとえば、信濃川は9のユニットが4に、利根川は2が1.5になります。もともと利根川は、信濃川に比べると融雪が入る量が少ないです。しかし、やはり利根川も減ります。筑後川はほとんど変化がありません。信濃川からおそらく神通川も、非常に大きな減り方になります。これも予測の精度をあげる必要があります。私が特に問題としているのは、雪の分布が山と平野で違うということです。

図26

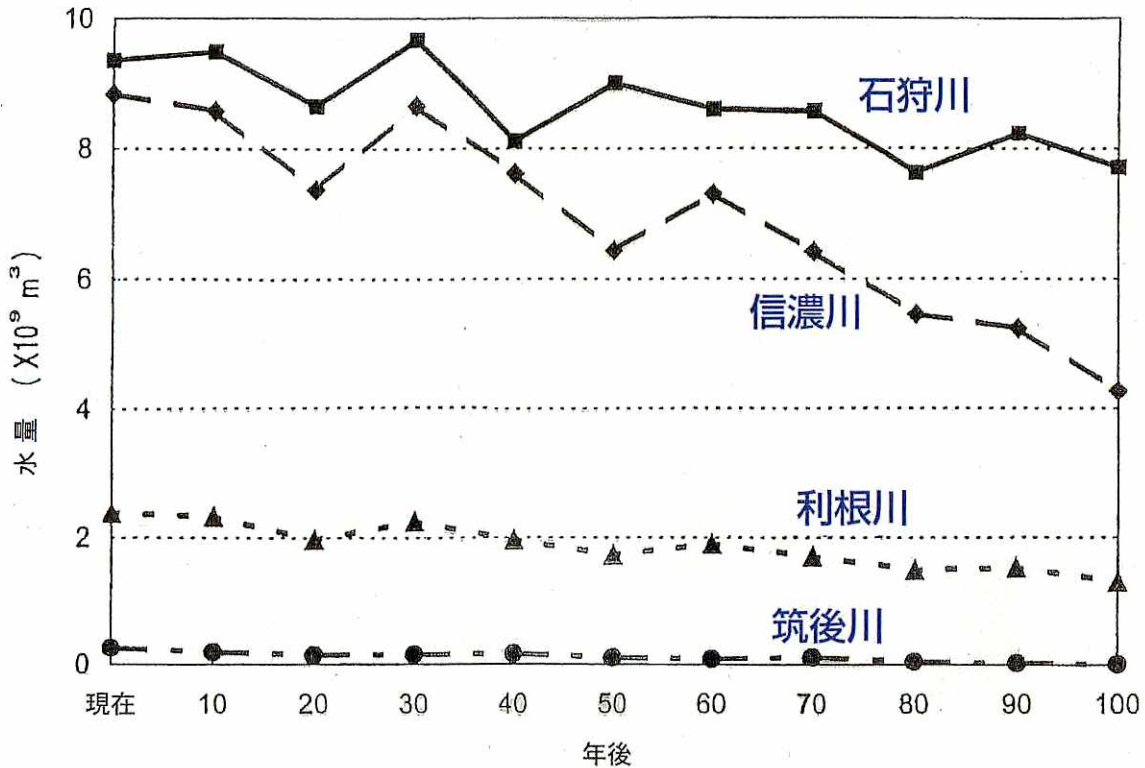


図1 地球温暖化時における国内主要河川流域への年降雪水量の推移。

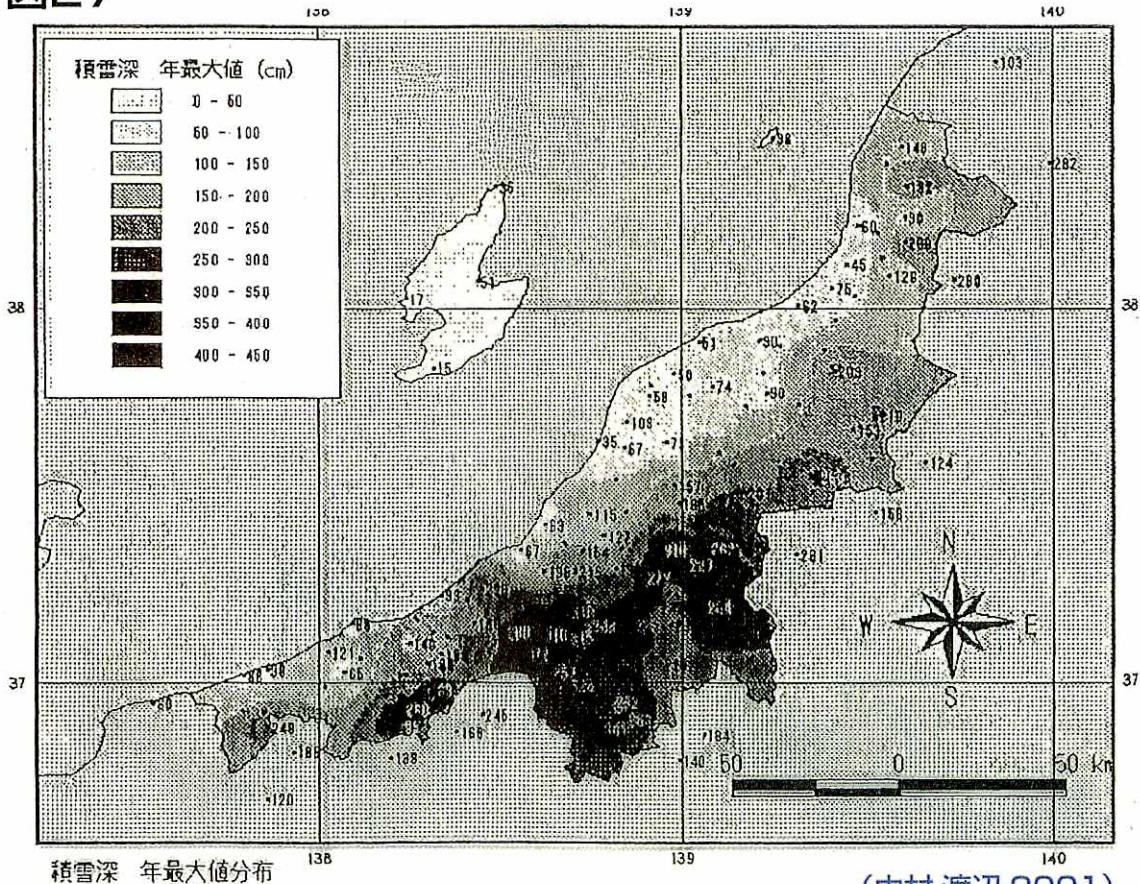
図27は新潟県の例です。新潟県の、2000年、2001年の積雪深度です。一番多いところでは4m以上あります。この分布は冬型が弱まることによって、あるいは冬型のかわりに低気圧が頻繁に近づいてきたときには、どうなるかについてはまだほとんどわかっていません。今のところ予測はほとんどされていません。問題点を指摘すると、80年代の後半以降、ちょうど暖冬

になって以降、気温が一段と上がっています。そして冬型の気圧配置が弱くなっています。

しかし、一方で低気圧が頻繁に通過するようになりました。そうすると北陸、東北では、気温が上昇して、特に平野部に降雪量、降水量が明らかに多くなりました。北海道は気温が上がっているが、低気圧が全般的に北寄りなために決して雪は減っておらず、むしろ増えているという傾向があります。

実際に今度は冬型が弱まって本州に低気圧が頻繁に通過する可能性があります。温暖化すると全般的に偏西風のルートが南に下がってきます。そうすると冬型にならなくても低気圧が頻繁に通過、これによる降水域というのは当然あります。平地は雨でも山は雪になるということは十分にありえます。

図27



結論に近くなってきますが、なぜ温暖化問題では日本の冬の雪、雨の問題が非常に重要なのでしょうか。夏の降水も当然変わると思いますが。特に雪国に関しては、雪と生態系、農業の問題があります。現在のブナ林にしてもそうですが、雪国の生態系、あるいは植生、過去1万年から1万数千年、氷期以降基本的にいわゆる冬型のパターンで、冬は大雪で雪国であるという前提で適応してきた植生です。雪の下で春まで我慢して、春から夏に生長するパターンの植生がいくつもあります。そのようなものは、雪がなくなると、逆に雪の防護がなくなってしまう。このように生態系への影響が大きいと考えられます。

また、雪の水は、春から夏への稲作の水田農業にとって重要なかんがい水です。それから雪氷災害はどうなるでしょうか。温暖化しますと、雪は山でのみ降る可能性があります。そうすると雪氷災害のパターンは当然変わるといような問題があります。

人間は1万年から数千年間、縄文以降、文化をいろいろつくってきましたが、基本的な気候環境は冬に相当な雪が降る、ということがいろいろな形で前提になっています。それが急激に雪がなくなってくると、いろいろな考えも文化も変わらざるをえません。あるいは変えざるをえません。

今後、特に雪の降り方、雪の溶け方、それからその分布については、まだ温暖化がらみでは信頼性の高い予測はほとんどされていません。今後どうなるか、さらにどうすべきか、大きな課題です。

今日は、問題提起というか、問題があるということを指摘したにすぎませんが、この辺で話を止めたいと思います。

どうもご静聴ありがとうございました。