

地球シミュレーターが描く将来の水環境

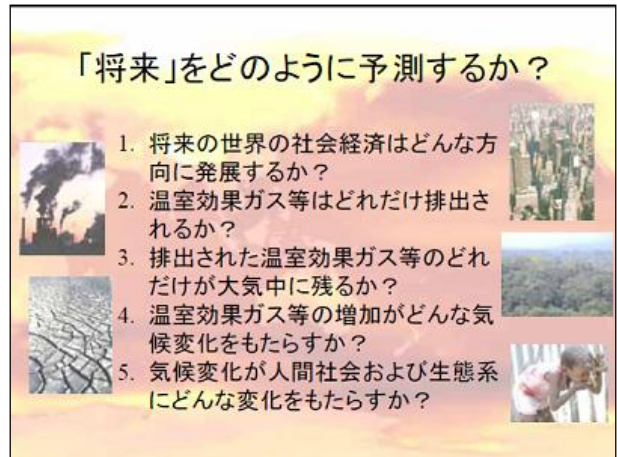
国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室長 江守正多

私は水の専門家ではありませんが、地球温暖化の将来予測をするコンピューターを使ったシミュレーション研究を専門しているなかで、水のことも当然扱っております。その観点から今日はお話させて頂きたいと思います。

「将来」をどのように予測するか

まず、「将来を予測する」と一言で言いましても「私はこうなるような気がする」と言っているだけでは、誰も信じてくれませんので、根拠が必要になります。しかも温暖化の話は人間活動から話が始まり、気候の変化を通じて、最終的に人間活動にどのように返って来るかということを、順番にステップを踏んで話をしなくては いけません。つまり、「将来の世界・社会経済がどんな方向に発展するか」ということから話が始まります。

「将来」をどのように予測するか？



1. 将来の世界の社会経済はどんな方向に発展するか？
2. 温室効果ガス等はどれだけ排出されるか？
3. 排出された温室効果ガス等のどれだけが大気中に残るか？
4. 温室効果ガス等の増加がどんな気候変化をもたらすか？
5. 気候変化が人間社会および生態系にどんな変化をもたらすか？

ところが、当然そんなことはわかりません。将来 100 年にわたって、色々な国がどのように発展して行って、国際関係がどうなるかがコンピューターで計算してわかるならば、私は温暖化の予測などしてないで、会社を興したり、株を買ったりして、大もうけしていると思います。

ですから、予測をするためには様々なパターンを考えます。例えば「経済重視で行ったらどうなるか」、あるいは「もっと環境配慮型に行ったらどうなるか」といったシナリオをいくつか考えまして、それぞれについて温暖化の予測をするという方法をとります。

それぞれのシナリオについて、将来 100 年くらいの間に、「経済が発展しているパターンの世界であれば、世界全体として、二酸化炭素をどういうふうに出すのか」、「別の世界だったらどうか」という、それぞれの排出量のシナリオを描きます。次に、その排出された気体のうち、どれぐらいが大気中に残るかを考えなくては いけません。現在、人間が石油・石炭を燃やして出している二酸化炭素のうち、半分弱が自然によって吸収されています。これが将来 100 年にわたって、自然による吸収量と大気中に残る量を、それぞれのシナリオについて計算します。すると温室効果ガスが将来 100 年、「こういう社会の発展パターンの場合には、大気中の濃度がどうか」というのが出てきまして、今度はそれを前提として、「気候がどのように変わるのか」を予測します。ここは私自身がやっている部分ですので、後ほど説明します。それが出て来ると、今度は「人間社会を見据えた時、どんな影響をもたらすか」という予測をすることになります。こういう順番で話が一巡します。

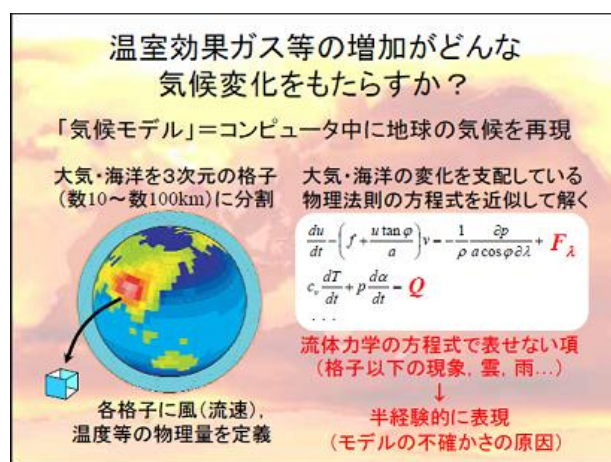
先日アル・ゴアと共同受賞でノーベル平和賞を受賞した IPCC(気候変動に関する政府間パネル)という国連の活動がありますが、その報告書は、こういった一連の作業を行うことによって、「将来

温暖化すると、どうなるか」という報告をしている訳です。

気候変化予測の不確かさの原因

私が具体的に関わっております、「温室効果ガスの増加によって、気候がどのように変わるか」という部分に関しては、一言で言いますと、コンピューターの中に地球の気候を再現したようなものを用います。これが我々の商売道具です。実際の地球を使って、何回も温暖化させたり、させなかったりという実験をする訳にはいかないのです、代わりにコンピューターの中で、いわゆるシミュレーションをしています。

もう少し詳しく説明しますと、まずここで地球の大気、それから陸や海をコンピューターで計算できるようにするには、柵目に切る必要があります。それぞれの柵目には、その場所での風や温度がずっと並んで配置されていて、そこで難しい物理の式を計算する。その式については説明しませんが、要するに大気の流れとか海の流などどうやって変化するか。「こっちが気圧が高くて、こっちが気圧が低かったら、どのように風が吹くか」とか、「温度が高いところから低いところに風が吹いたら、低いところが温まる」といったことが、数学の言葉で書いてあります。



これをコンピューターを使って解きます。そうすると、物理の方程式をコンピューターを使って解きますので、よほど正確に将来のことがわかりそうな気がしてしまいます。実際それなりに物理的な計算がちゃんと行われていますが、正直に白状しますと、実はここにわざと赤に色を変えて書いてある部分がありまして、これは、ちょっと自信がない部分なのです。地球の気候は非常に複雑なため、現在の科学的な知識、あるいはコンピューターの能力でそれをすべて正確に計算することは、残念ながら出来ません。ですから、例えば「雲が、どういう時に、どれくらいできるか」は、平均的な温度とか湿度という条件から、過去の経験に照らして合うように、また理論的にも部分的には正しいように、式を作ってやっています。

実は、こういう気候モデルは、世界の 20 くらいの機関で別々に作られています。別々の研究者がこういうものを作りますと、人によって半経験的に近似した部分が違ってきます。そうすると、出て来る答えも少しずつ違って来てしまうということがあります。わざわざこんなことを白状したのは、皆さんがこういったコンピューターによる温暖化の結果をご覧になるうえで、ぜひこういう部分があることに気をつけて見て頂きたいと思うからです。

「将来、地球の気温が何度上がりますか」ということは、温暖化について最初に知りたいことだと思います。今回の IPCC の予測の下と上をとって行きますと、これから 100 年くらいで 1.1～6.4℃、地球の平均気温が上がると言われています。1.1～6.4℃ですから、ものすごい幅があります。1.1℃だったら良いかもしれないけれど、6.4℃だったら大変です。

この内訳を見てみますと、その幅のうちの半分くらいは、最初に仮定したいくつかのシナリオによる違いです。つまり将来の社会経済がどのように発展していくかわからないので、幾つかのシナリオを考えてありましたが、それによって出て来る温度上昇の答えも、幾つかの違った答えが出てきます。これは当たり前です。社会経済がわからなかったなので、このようにしたのです。

残りの半分ぐらいが、先程言いました、我々がコンピューターで解いている方程式の中にある、ちょっと自信がない部分によって生まれた幅です。例えば、同じ二酸化炭素の濃度の変化を与えて、世界中の別々のグループが計算すると、日本・イギリス・アメリカなど、それぞれのグループの答えは、そのシナリオごとに異なってきます。「そんなのは基本的なことなので、もっとしっかり調べろ」と言われそうな気がしますが、このような“不確かさの幅”は、裏を返せば信頼度の幅であるともいえます。つまり、これだけバラつきは出たけれども、例えば20℃だと言う人はいなかったし、マイナス10℃と言う人もいなかったと。誰が計算してもある程度の幅の間にいくものだ。ただピタリとは当たらない、ということをよく理解して見て欲しいということです。

ただ、こういう話ばかりしていると、せっかくスーパーコンピューターで物理の方程式を計算しても、「なんだ自信がないんじゃないか」と言われてしまいますので、もうちょっと自信がある方の話をしたいと思います。

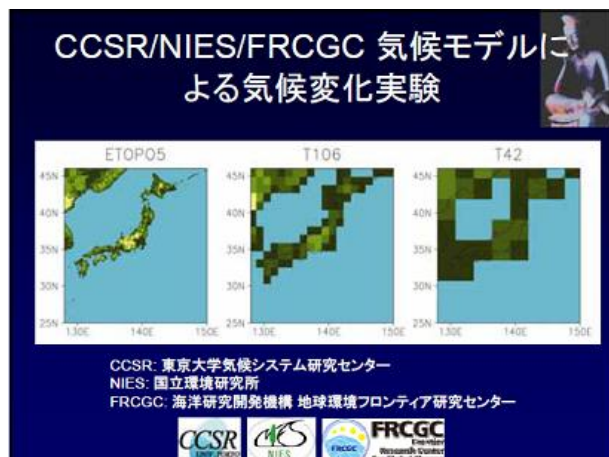
地球シミュレータの完成

「平均気温が何度上がるか」という絶対値をピッタリと当てるのは難しかったのですが、例えば、「地球のどの場所で温度が上がりやすいか」「どの場所で温暖化すると雨が増えるのか」「どの場所で雨が減るのか」「どんな異常気象が増えるか」といったことに関しては、いくつかの条件を満たすと、我々はある程度自信をもって皆さんにお話ができます。

先程言いましたように、我々はコンピューターの計算を全て正しいと思っていませんので、出てきた計算結果を、なぜそうなるか、ちゃんと理解して説明が出来るかを検証します。さらに自分達の計算結果だけではなく、他のグループの計算結果でも同じような傾向が出ていることなどを調べて、「コンピューターの中でこのように予測されたけれども、確かに現実の地球の中でも起きそうだ」と、コンピューターの世界と現実の世界が繋がったものだけをお伝えするようにしています。口の悪い人は、「コンピューターの予測は、どうせ計算なんだから信じなくてもいい」と言いますが、そうじゃないことを、ぜひ理解して頂きたいと思います。

2002年に神奈川県横浜市に、巨大なスーパーコンピューター「地球シミュレータ」が完成しました。数十メートル四方の体育館のような建物の中に、スーパーコンピューターがずらっと何百台も並んでおりまして、それぞれがケーブルでつながって、ひとつの非常に大きいコンピューターになっています。完成当時世界最大、最高速で、アメリカのそれまで最高速だったコンピューターを何倍も追い抜かしてしまいました。普通、世界最大のスーパーコンピューターは、アメリカの核兵器の計算に使われているのですが、日本は温暖化なんていう悠長なことに使うために作ったと、皆びっくりしました。その後どんどん他の国のコンピューターに抜かされて、現在は十何位か、二十何位かになってしまいました。それでも温暖化の計算をするコンピューターとしては、世界でまだ1番か2番の非常に大きいコンピューターです。

先程計算をするために地球を細かく升目に切ると言いましたが、コンピューターが大きくなると、より細かく切れるようになります。したがって、より細かい、より詳細な現象について研究することができます。我々は、「東京大学気候システム研究センター」「国立環境研究所」「海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター」という 3 つの研究機関で協力して、完成当時世界最高の細かさを持った気候モデルを開発しました。



どれくらい細かいかと言いますと、右側が地球シミュレータが出来る前の普通のスーパーコンピューターで計算していた時の日本の地図で、一辺 300km くらいの升目になっています。真ん中が、地球シミュレータで計算している時の日本の地図で、一辺 100 km くらいです。そうすると、脊梁山脈らしきものがある、日本海側と太平洋側はそれで区別されています。瀬戸内海は、まだないですね。

せっかく世界最高速のコンピューターで計算したのだから、もっと 1km とか、何百メートルとか、「うちの裏庭が温暖化したらどうなるんだ」といった具合に教えてくれたらいいと思いますが、残念ながら温暖化の計算は過去 100 年・将来 100 年について膨大な量の計算を何本も行います。大気も海も全部その中で計算します。実際この細かさで、地球シミュレータの一部を使って、1 ヶ月間計算機を回しっ放しにすると、100 年分の答えが出て来ます。

20～21 世紀の気候変化

〈地球シミュレータの動画画面を使用して解説〉

これは気温の変化を表しています。その場所の 1900 年ごろの気温を基準にして、赤い部分が温度が上がる場所、青い部分が温度が下がる場所になっています。そうすると、どこか 1 箇所を見てもらいますと、赤が出たり消えたり、青が出たり消えたりします。これは、いわゆる気候の自然の変動です。“ゆらぎ”といいますか、温暖化しようがしまいが、気候は「たまたま今年はこの気圧配置になったので、この場所が暑い」、あるいは「別の年は寒い」ということがあります。しかし、放って置くと赤がどんどん増えて来て、青が全然見えなくなってしまう。さらに黄色の部分は、6℃より温度が高い温度上昇を表しています。

北極海は氷が消えて、非常に温度が上がる。あるいは陸の上も雪が消えて少なくなる場所は、特に温度が上がる。陸の方が海よりも、温度が上がりやすいといった特徴があります。2100 年になると、非常に暑そうに見えます。こうなりたくないと思って頂きたいです。

続きまして、今日は水の話でしたので、降水量の変化です。雨とか雪の降り方が、青が今度は増える色です。水ですから。そして赤が減る色です。

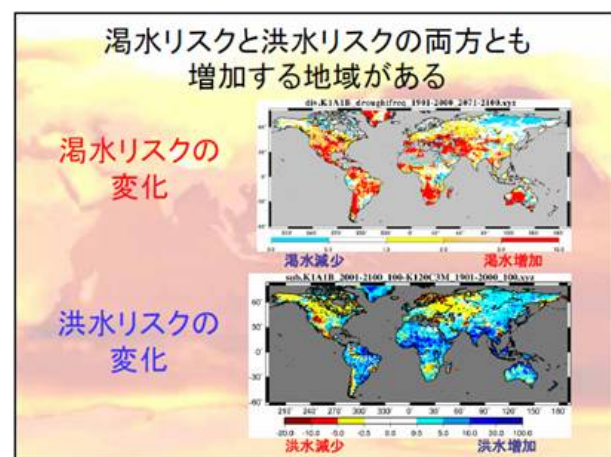
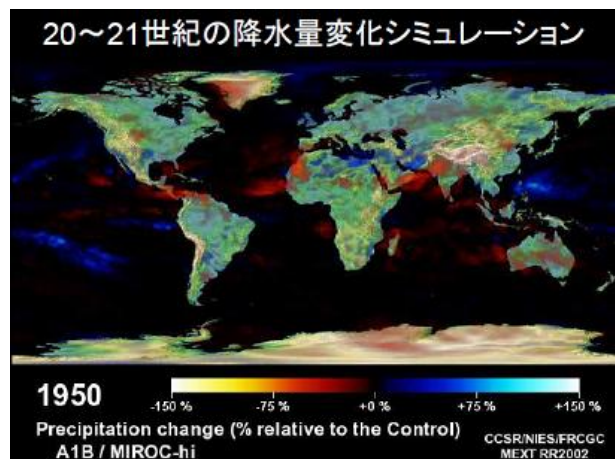
その場所で 1900 年頃に降っていた平均的な量に比べて何パーセント増えたか減ったか。これもある 1 箇所をずっと見て頂きますと、赤が出たり消えたり、青が出たり消えたりします。降水量の自然な年々の変化は、気温の変化に比べても非常に大きくなり、その年によって偶然たくさんになったり偶然少なくなったりします。

そうすると、例えばある場所である年に起こった大雨が温暖化によるものかということは、すぐには見分けがつかないことがお分かり頂けると思います。2050 年くらいになりますと、中高緯度はどうも平均的に青い。それから熱帯太平洋も青い。一方で、この亜熱帯。亜熱帯は、熱帯で雨を降らして上昇した乾いた空気が降りてきて、砂漠とかがある、もともと雨の少ないところですが、そういった緯度帯では赤いところが多い。非常に大雑把に言いますと、元々雨が少なかったようなところが、温暖化すると、さらに雨が減ってしまうという傾向が予測されています。

さらに土壌水分といいまして、土の湿り気を表したものです。やはり青が増える色、赤が減る色です。土の湿り気は少し考えたらわかると思いますが、当然雨が増えると増えます。ところが土の湿り気は、雨によって湿って蒸発によって乾くという変化をしていますので、蒸発が増えると乾いてしまう訳です。温暖化しますと一般的に言って、地面からの蒸発は増えようとしています。そうすると雨が増えるところは地面も湿るんですが、雨が減るところ、あるいは増えないところは地面がどんどん乾いていくという傾向にあります。例えばアマゾンや北米の一部は乾いていってしまう。河川の流量なども、これに併せて減ることを意味しています。

これはパネルディスカッションのコーディネーターの沖先生のグループで計算された、先程の気候変化のシミュレーションを元に、温暖化による渇水の増加、洪水の増加を表した地図です。上の図で赤い色が、温暖化すると渇水が増えるところ。水が足りなくなる可能性が高くなる。逆に、下側の図で青いところが、洪水が増えるところ。よく見ると、渇水が増えて、かつ洪水が増えるといった、上の図では赤くて、下の図では青いところが何箇所もあります。

これは不思議でしたので、その理由を調べました。詳しい説明は省略しますが、「温暖化した時の平均的な雨の増え方」と「温暖化した時に、特に強い雨がさらに強くなるかどうか」という図を見比べる



と、「平均的な雨は増えないけれども、強い雨は増える」という場所があることがわかります。そうしますと、平均的な雨が増えないと、蒸発は増えようとするので、そういうところでは、平均的には乾いてしまい、水不足になります。ところがそういう場所でも、一度雨が降る時には、今までよりもっと強い雨が降るので、同時に洪水の起こりやすさは増えてしまいます。

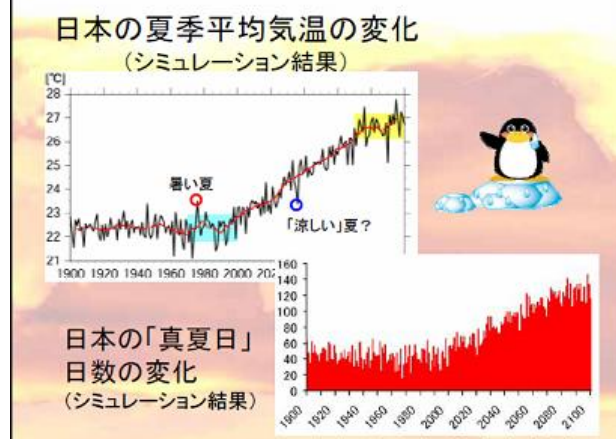
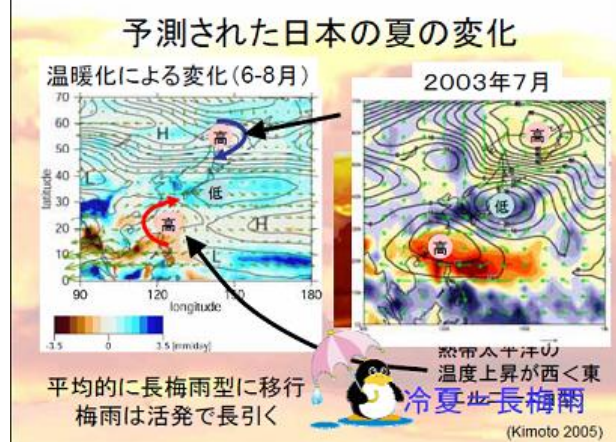
つまり、こういった場所では温暖化が進むと、基本的には乾いていきますが、たまに降る雨は、今までの大雨よりも強い大雨が降るということになります。「温暖化すると、雨の降りが極端になる」という言い方をするのは、全ての場所でそうなる訳ではありませんが、そうなる場所も出ることがシミュレーションの結果を詳しく調べても出てきます。

予測された日本の夏の変化

それでは日本についての話をしたいと思います。温暖化した時の特徴的な気圧の変化パターンは、冷夏で長梅雨だった 2003 年の天気図に似た気圧配置になります。オホーツク海に高気圧があって、日本の上は梅雨前線が居座って低気圧である。南側の高気圧がなかなか上がってこない。温暖化した時の気圧の変化は、これによく似たパターンになるのです。つまり温暖化すると、平均的に冷夏で長梅雨という気圧配置のパターンが増えるのではないかというのが、我々の予測です。これは我々だけではなくて、やはり地球シミュレータを使って別に予測を行った気象庁のグループも同じような結論を出しています。

そうすると、冷夏なんだから、温暖化しても、日本は夏はそれほど暑くならないのかなと思うと、そう世の中は甘く出来ておりません。温暖化しますので、やはり暑くなります。例えば日本の夏で平均したシミュレーションの中での年々の気温変化を見ると、1970 年代のある年に記録的な暑い夏があります。これは気圧配置としては猛暑で空梅雨のパターンです。温暖化が進むと、たまに猛暑のパターンが来ると、過去の記録的な夏を破る新記録が出ます。さ

らにどんどん進んで行きますと、例えば2030年代のある年は、気圧配置としては冷夏で長梅雨です。冷夏で長梅雨なので、「今年はここ数年に比べると随分涼しいね」と言っていますが、よく見ると、平均気温は昔の記録的に暑い夏と同じくらい暑い。つまり温暖化が進んだ時の冷夏は、今の猛暑と同じくらい暑い。平均気温で見ると、そういうことになります。この時に真夏日の日数は、当然どんどん増えていって、100年後には夏が今より2ヶ月くらい多いような感覚になります。



また同じものを降水量で見ると、降水量の変化は年々の変動が激しいのですが、それでも少し増える傾向があります。夏の日本の降水量は、変動が激しいながらも、温暖化すると少し増える。豪雨の日数をシミュレーションの中で数えると、さらに明瞭な変化が見えまして、これも年々の変動が大きくて、豪雨がない年もありますが、豪雨が多い年が温暖化が進んだ後に集中する。

これは理屈から考えましても、温暖化すると大気中の水蒸気が増えます。温かい空気の方が、水蒸気をたくさん含みますので、同じような強さの低気圧が来ても、周りに水蒸気がたくさんある分だけたくさん雨が降る。それだけを考えましても、平均的に強い雨が降りやすくなることが説明できます。ですので、温暖化すると豪雨が増えるのは、かなり確からしいです。それから、「台風がどうなるか」といつも聞かれますが、これはなかなか難しく色々説があります。少なくとも今言えることは、台風 1 個あたりがもたらす雨は、大気中の水蒸気が増えることにより、平均的に増えると思います。

他にも色々な影響が懸念されまして、例えば農業への影響も出るでしょうし、今日の話題にもなるであろう水不足の問題。水不足はもちろん温暖化だけが原因ではなく、人口の増加や貧困の問題等があると思いますが、場所によっては温暖化・気候変化によってそれが悪化するかもしれません。熱帯伝染病の危険性も高まりますし、熱中症は今年も多かったです。それから強い雨が降るので、洪水の問題が出てきます。それから、海面がジワジワ上がって行きますので、そこに台風の強いのが直撃したりしますと、高潮の危険性が増える。

そういうことを考えますと、やはり温暖化は避けたいということになります。

どれくらい排出量を減らせばよいか。

最後に、「どれくらい温室効果ガスの排出量を減らすと、温暖化が止まるか」という話です。最近色々ところで話がありますので、ご存知かもしれません。ここでは温室効果ガスの中でも二酸化炭素だけについて言いますが、温暖化をとめるためには、まず大気中に増加している温室効果ガスをどこかで、もう増えないようにして、濃度を安定化させたい。そのためには、どれくらい出していいかといいますと、大気中の濃度は、「人間が出した量」と「自然が吸ってくれる量」の差ですが、二酸化炭素が増えないところでは、「出した量」と「自然が吸う量」が同じにならなくてはなりません。逆に言うと、自然が吸ってくれる量しか出してはいけないというのが、ここから先の世界です。そうすると最初は少し増えても仕方がないかもしれないけれど、そこからギュッと減らして、どこかで半分、たとえば 2050 年ごろには半分にして、そしてさらに、どんどん半分以下にまで減らし続けていかないと、大気中の温室効果ガスというのは増え続けてしまいます。これは当然大変なことですが、この時温暖化はだいたい止まってくれます。ただ、海面の上昇はさらにジワジワと続くと言われております。

私からは、

「温暖化の予測には不確かさがありますけれども、いくつかよく調べて、確かにこうなりそうだということに関して、我々は解説しています」

「世界の多くの地域に関して、洪水のリスクの増加、いくつかの地域では、洪水・渇水がともにリスクが増加することが計算から予測されて、理屈を考えてもそうなります」

「日本の夏は長梅雨型が増加するものの、気温は上昇しますので、真夏日日数とか豪雨頻度は

増加すると予測されます」

「大気中の二酸化炭素濃度が安定化するためには、いずれ排出量を大幅に削減する必要があります」

ということをお話しました。

皆さんご存知の通り、来年から京都議定書の約束期間が始まりまして、日本は6%基準年から減らさなければいけません。そこでどのくらい現実には減っているかといいますと、逆に 8%ぐらい増えています。だから大変だと言っておりますが、実際に温暖化を止めるためには 6%ではなく、今出している量より 60%くらいの排出量を減らさなくてはいけないということになります。

これは当然すぐではなく、例えば 50～100 年かけてですが、そういう世界、二酸化炭素をほとんど出さないような新しい文明を、これから我々は目指していかなければいけません。そのことは、最近例えばサミットのようなところでも、各国の首脳が正確に理解して、議論が始まっているところであります。

私からの話はこれで終わらせていただきます。どうもありがとうございました。