

## 第27回 環境サイエンスカフェ

テーマ 温暖化の過去と未来 —異常気象と不確実性—  
 講師 塩竈 秀夫（しおがま ひでお）さん（国立環境研究所 地球環境研究センター）  
 日時 2015年6月10日（水）18：30～20：00  
 会場 サロン・ド・富山房 Folio  
 参加者 47名



日立環境財団 環境サイエンスカフェ  
**温暖化の過去と未来：異常気象と不確実性**



塩竈秀夫（国立環境研究所・地球環境研究センター）

1

### 本日の内容

- **19世紀後半から** 現在までの気候変化
  - 変化しているの？
  - 人間活動は関係あるの？
  - 極端現象（異常気象）は温暖化のせいですか？
- 将来の気候変化
  - どうやって予測するの？
  - どのくらい変化するの？
  - どのくらい予測に幅があるの？
  - どうやって幅をへらすの？

気候変化によってどのような影響が出るか、対策をどうするのかという話は、本シリーズのほかの講演にお任せします。

2

こんばんは。国立環境研究所の塩竈と申します。今日は、「温暖化の過去と未来—異常気象と不確実性—」というタイトルで話をさせていただきます。

本日の内容（図2）なのですが、19世紀後半から現在までの気候変化の話を中心にします。私のタイトルが多分悪かったのですが、質問の中の多くが、1万年とか数万年とか数億年の気候を教えてくださいという人が大勢いらしたのですが、残念ながら、私は専門外で分かりません。知らないことを知ったかぶりしてしゃべるのもいやだなと思って、サイエンスカフェの講演録を見ていたら、東大の多田先生という方が、当時の回に参加され

た方はおられますか。お、すごい。常連さんがいっぱいいるんですね。

この方がもうすでにそういう話をされていて、しかも5回のシリーズでやられていて、私はちょっと読んだのですが、すごく勉強になりました。多分皆さんの質問の答えはほとんどここに書いてあると思います。ホームページからたどって見ていただくと、すごく面白いと思います。

ちなみにたどっていくと、ちょっと上のほうに江守正多という人が温暖化の話をしていまして、ここで出てくるスライドがいくつかかかっているのですが、その人は私の上司ですので、私がコピーしていると言わないでください。江守さんが使

っているスライドの一部は私が作っていますので。

話の後半は、将来の気候変化に関して、どんな予測がされているかという話をします。今回のサイエンスカフェのシリーズは気候変動の影響の話ですが、この後は素晴らしい研究者がシリーズで出てきますので、私はその人たちのイントロだと思っただいて、まずどういう気候が変わるかという予測をしているかという話を、それによってどういう影響が出るか、じゃあ対策をどうしたらいいかという話も、このシリーズの後の人にお任せします。

本講演を理解する上での必要な考え方

- 「Aならば必ずB」という決定論だけで語ることができる自然科学の領域は、実はそんなに広くはありません。
- 気候変動を理解する上では、カオス、不確実性、可能性、確率、相対的寄与度といった概念が重要です。

3

サイエンスカフェの常連の方にはひょっとしたらもう、釈迦に説法なのですが、高校までの理科とか数学ですと、必ず答えのある問題を解くのですね。Aならば必ずBであるという問題を解くのですが、それだけで語れる自然科学の領域というのは実はそんなに広くありません。一部の数学とか一部の物理学だけです。(図3)

19世紀後半以降の気候変動：  
人間活動の寄与はどれほどか？

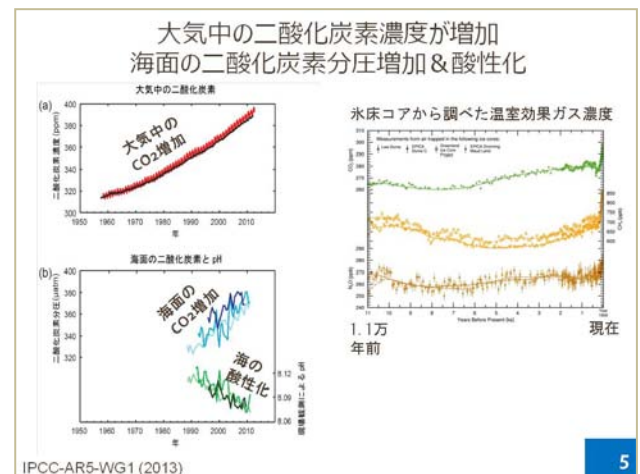
4

自然を相手にする以上は、カオスだったり不確実性だったり、相対的寄与率、これは温暖化です

かそれとも違うのですか、というイチゼロの答えではなくて、温暖化の割合はどれだけですといった確率的な言葉で語るようになってきます。

まずは 19 世紀後半以降の気候変動に関してお話をします。人間活動の寄与はどれほどか、また太陽とか火山の寄与はどれくらいかという話をしていきます。(図4)

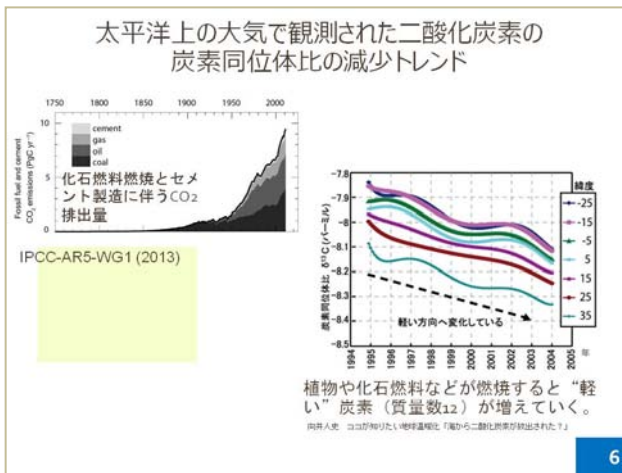
よく皆さん聞かれているように、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は観測がずっとありまして、どんどん増えてきているということが分かっています。先ほど古気候の話はしないと言ったのですが、1枚だけみせると、氷床の中にある氷の中のガスを調べてやると、昔の温室効果ガスの濃度がどれくらいあったかというのが分かりまして、1万1千年前はこれくらいだったのが、ここ100年くらいでこの上昇速度で増えています。(図5)



こんなに大気中に CO<sub>2</sub> が増えていたら、海はどうなるのか気になります。海の中に取り込んでいる CO<sub>2</sub> の濃度も増えています。CO<sub>2</sub> を取り込んでいくと、海が酸性化するはずですが、実際に酸性化しているという観測データもあります。

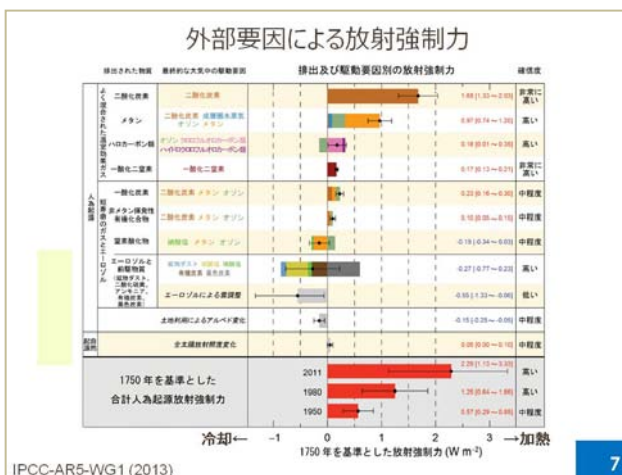
人間がたくさん石油や石炭を使ったりして、化石燃料を燃やして、それによって CO<sub>2</sub> がたくさん出ていることは分かっています。エネルギー統計などを使ってやると、過去にどれだけ排出してきたということも推定することができて、年々どんどん増えていることがわかります。

この増加分が本当に大気中にたまっているのか。大気中の濃度は確かに上がっているけれど、これが人間活動のせいだという証拠は他にもあるのか、というと、例えば、これは炭素の同位体比の観測データでして、化石燃料などが燃焼すると、



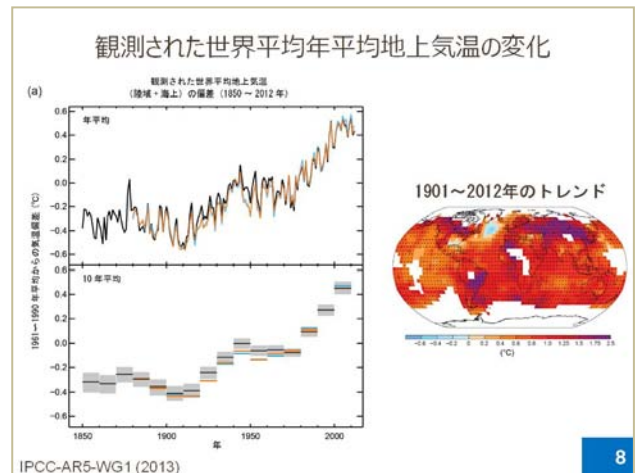
比較的軽いC12 というものが大気中に増えていきます。そうすると C13 という炭素の同位体の比率がどんどん下がっていくはずですが。観測してやると、実際にそのように下がっていている。(図6)

外部要因が地球を加熱・冷却する力を放射強制力というのですが、放射強制力に関しても二酸化炭素に関してはかなりよく分かっている、すごく加熱します。(図7) 石炭を燃やしたときなどに出てくるエアロゾルというのがあるのですが、それはいろいろな種類があって、さまざまな効果があるのですが、トータルすると逆に地球を冷やすようにききます。



それらの人間活動による放射強制力を足し合わせてやると、1950年代ぐらいから暖めようとする効果が高まっているというふうに考えられています。

じゃあ暖める効果が高まったら、実際に暖まっているのかというのが気になりますね。まず地上付近の気温の観測データを見てみましょう。(図8)



それがこの絵でして、年平均した世界平均した年平均地上気温の変化です。多分この後、私は全球平均気温と口走るときがあると思いますが、それは業界用語で世界平均気温という意味ですので、頭の中で変換してください。その世界平均気温が、上昇が早まったり遅まったりはするのですが、どんどん上がってきています。

ではそれが地球上のどこで暖まっているのかというと、右の絵ですが、赤く塗られているところは、1901年から2012年のトレンドが正のところですよ。暖まっているところですよ。白い所は観測データが十分でないところですよ。見ていただくと分かりますように、観測データが十分にあるところは、ほんの一部を除いて暖まっています。

たまに温暖化って実は都市化を見ているのではないか、という方もおられるかもしれませんが、確かに東京とかポイント、ポイントでは都市化の影響はすごく大きいのですが、世界で見ただけ暖まっているのが、海の上に都市はありませんので、都市化の影響ではないということが分かります。

会場：さっきの右の地図で下がっているところがありますが、あれは北欧ですか？

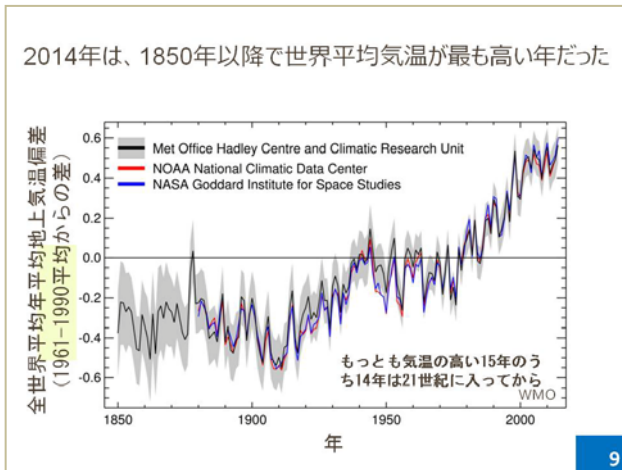
塩竈さん：ごめんなさい、地図が見えなくなっていますね。これは北大西洋です。

会場：北大西洋。海？

塩竈さん：海です。いろいろな理由があると思うのですが、一つは温暖化が進むと、メキシコ湾流

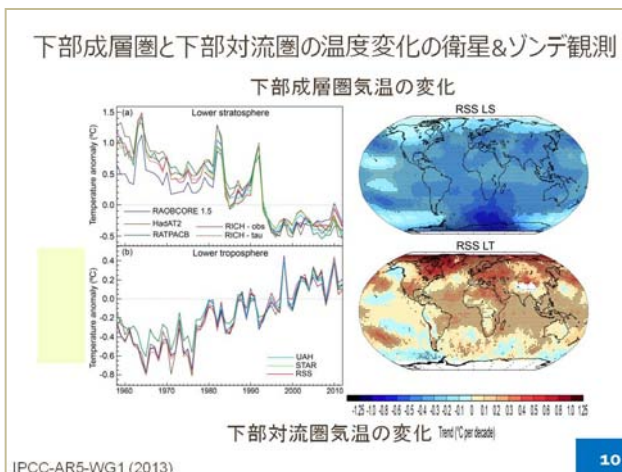


でこちらに持って行く熱量が減ってくるということをおっしゃっていて、その影響が見えているかなというふうに思います。ただ、メキシコ湾流とか、深層循環という、ここで水が海の深いところに沈み込んで、それが南極まで行って、それに関連して、メキシコのところから暖かい水がヨーロッパのほうに行くという流れが、観測的に弱まっているかどうかは実は難しく、まだそれほど十分な観測が上がってきていないということだそうです。



ちなみに2014年は1850年以降で、世界平均気温がもっとも高い年でした。(図9) もっとも気温の高い15年の内14年は、21世紀に入ってからです。じゃあ残り1個はいつかという、1998年で、これはとても強いエルニーニョがあった年です。

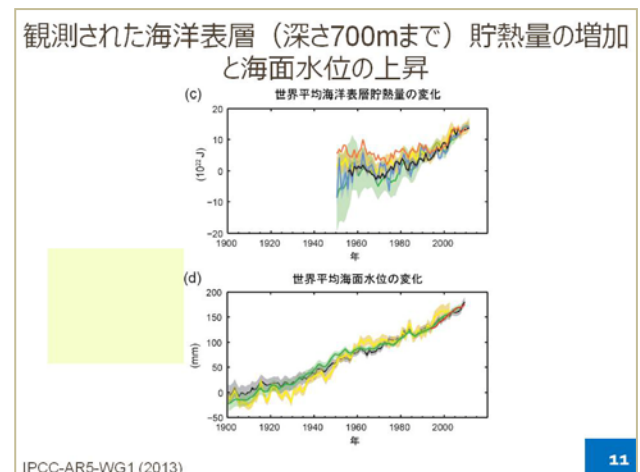
今は地上の気温の話だったのですが、それでは大気のもっと上のほうはどうかという話をします。(図10) この左側のデータは、気球を上げて大気観測をしたり、人工衛星から大気温度を観測したりしているのですが、そのいろいろなデータから



見たときの、下部対流圏、大気の割と下のほうの温度の変化を見ています。どんどん上がっていきすね。こう見るとかなり広い範囲で赤くなって上がっていることが分かります。

逆にCO<sub>2</sub>が増えると、成層圏では20キロとすごく高い所ですが、冷えるということが理論的に予想されています。実際観測データを見てやると、やっぱり冷えています。こう見てもとても広い範囲で冷えていることが分かっています。

では空のことや陸のことは分かったので、海はどうなのかというと、上の絵は世界で平均した海にどれだけの熱量がたまっているかというもので、観測データがだんだん上がって、海に熱がたまっていることが分かっています。(図11)



海に熱がたまると、水が膨張します。膨張すると、海面の水位が上がります。また地上の温暖化が進むと、氷床や氷河など陸の上にある氷が溶けてきますので、それが海に流れ込むとそれも水位を上げる働きをします。では本当に水位が上がっているかというのを、世界中で調べて平均してやると、このようにどんどん水位が上がっていることが分かります。

ということで、大気中の二酸化炭素は増加を続けていて、エネルギー統計や同位体観測などから化石燃料の燃焼等による二酸化炭素の濃度増加は確かである。二酸化炭素が増加すれば、対流気圏、海洋は加熱され、成層圏は冷えてくることが分かっています。(図12)

大気、海洋、などさまざまな独立した観測データから、温暖化、成層圏の寒冷化が示されています。従って、人間活動によって温暖化が進んでいるのは間違いないと。ここで皆さまが納得してい

ら、いずれ上がってもいずれ戻るから、それはしようがないよねという話になります。じゃあこれは内部変動だけで起こり得たかどうかというこの問題を、気候変動の検出と呼びます。

### まとめ

- 大気中の二酸化炭素濃度は増加を続けている。
- エネルギー統計や、同位体観測などから、化石燃料（石油、石炭、天然ガス等）燃焼等による二酸化炭素濃度増加は確か。
- 二酸化炭素濃度が増加すれば対流圏、海洋は加熱される。
- 大気、海洋、陸面などの様々な独立な観測データから、温暖化（成層圏は冷却化）が示されている。
- したがって、人間活動によって、温暖化が進んでいるのは間違いない。

完

12

ただくと、ここでビールを飲めるのですが、私もこれでは納得しません。(図 13)

### そうは、問屋が卸しませんぜ

- 大気・海洋などの気候システムでは、人間活動によるCO<sub>2</sub>濃度増加などの外部強制力がなくても、地上気温などが変動する。
- このように気候システムの中で自然に発生する変動を内部変動と呼ぶ。
- 観測された気候変動は、内部変動だけでは起こりえなかったといえるか？
- この問いを「気候変動の検出 (Detection)」と呼ぶ。



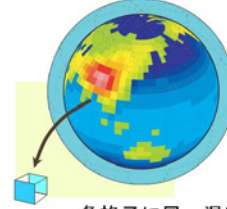
13

ここで起きる疑問は何かと言うと、人間活動によるCO<sub>2</sub>濃度増加ではない要因でも気候変動が起きるのではないかということです。大気、海洋などの気候のシステムという言い方をわたしたちはするのですが、気候システムでは、人間活動によるCO<sub>2</sub>濃度増加など、外部強制力、外部からのいろいろな、暖めようとか冷やそうとする力が働かなくても、地上気温などが変動します。

例えば、「あれ、今日は暑い日だ。明日は寒い日だ。」と言いますよね、そういうのは内部変動です。有名なエルニーニョとかラニーニャも内部変動です。ああいうのは外から力を加えなくても、気候システムの中で勝手に起きて、それが気温を上げたり下げたりします。このように気候システムの中で自然に発生するものを内部変動と呼ぶのですが、観測された気候変動は、内部変動だけで起こり得なかったと言えるのでしょうかという疑問が起きます。内部変動だけで起こり得たのだった

### 全球気候モデル (GCM)

大気・海洋を3次元の格子 (数10~数100km) に分割



各格子に風、温度等の物理量を定義

大気・海洋の変化を支配している物理法則の方程式を近似して解く

$$\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{u \tan \phi}{a} \right) v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{\lambda}$$

$$c_p \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

...



14

内部変動がどれぐらいの幅で変動したかを調べるのに、もちろん観測データからも内部変動の大きさなどを見積もったりするのですが、それ以外にも全球気候モデル GCM (Global Climate Model) とされるものを使って研究されます。(図 14)

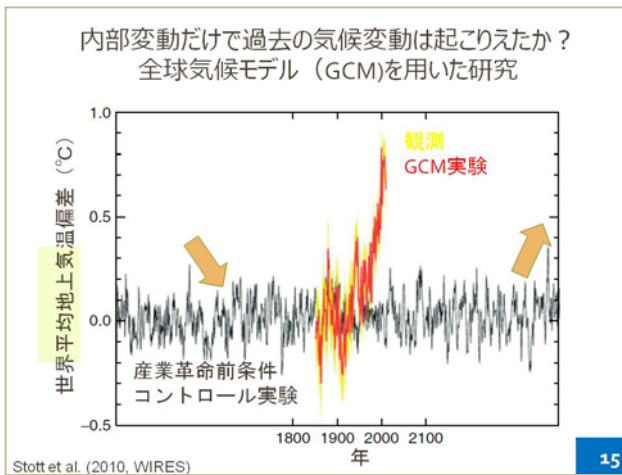
これは大気、海洋などを3次元の格子に切って、数10キロとか数100キロとかに切ってやって、その中で大気、海洋の変化を支配している物理法則の方程式を解くものです。

これは運動に関する方程式です。これは熱に関する方程式、ものすごくたくさんの数式があるのですが、コンピューターを使って解いていきます。そうしてそのシステムに二酸化炭素濃度の増加などという外部要因を与えて、エネルギーのバランスを解いていくことができます。そうすると、気候がちょっとずつ変わって、100年先にどういいう温度になっているかというようなことがわかります。

この絵の赤い線は計算機実験の結果で、黄色い線の気温変化の時系列観測データとほぼ重なっています。(図 15) ここで示しているのは世界の平均気温の変化の時系列です。それに対して黒い線が、ある GCM のよって計算された結果です。外部要因を全く変えずに、1950年ごろの外部要因、CO<sub>2</sub>濃度とか太陽活動もそのままにしておきます。それで気温がかなり大きく変動していることが分かります。これが内部変動による変動です。

例えばこの時期を見ると、10年20年ぐらいの

とかエアロゾルは 19 世紀の状況で止めておいて、太陽活動とか火山噴火だけを入れて自然起源外部要因実験というのもやってあります。こういういろいろな実験をやることで、それぞれの要因の寄与を見積もって、それを観測データと比較しています。(図 17)



スケールでどんと気温が下がっている部分もありますし、逆にどんと上がっているときもあります。これを千年、二千年、三千年とやって、いろいろな GCM でこういう計算をやってやっても、先ほどの観測されたような高い気温上昇を再現することができません。ですので、内部変動だけではこんな温暖化は起こり得なかったという推測がされます。

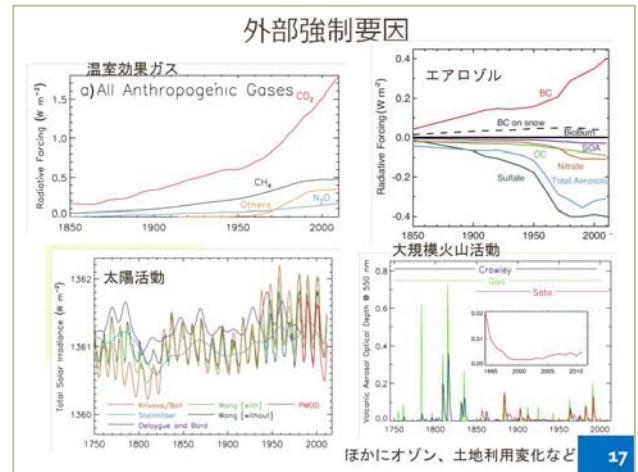
次に、気候変動が検出されて、内部変動だけでは説明できない、説明できるとしてもものすごくその確率は低いということになったら、その変動はどのような外部要因によって生じたかという疑問が起きます。

この問いを気候変動の要因分析、アトリビューションと呼びます。(図 16)

**気候変動の要因分析(Attribution)**

- 気候変動の検出された (内部変動だけでは説明できない) なら、その変動はどのような外部要因によって生じたのか？
- この問いを、「気候変動の要因分析(Attribution)」と呼ぶ。
- GCMを用いて、過去の外部要因を与えた「歴史気候実験」を行うことで研究されてきた。
  - 自然外部要因 (太陽活動+火山噴火) 実験
  - 自然+人為外部要因 (温室効果ガス、エアロゾル等) 実験
- 内部変動のタイミングは、再現しようとしていないことに注意。

こちらでも GCM が活躍しまして、過去の外部要因を与えた歴史気候実験を行います。例えば温室効果ガスやエアロゾルとか、太陽活動や火山噴火などの影響を入れて計算機実験をします。全部が入った実験をやっています。さらに温室効果ガス



ここでの注意点ですが、これは内部変動がいつ温度を上げるか下げるかというタイミングは再現しようとしていません。タイミングを再現しようとすると、天気予報と一緒に観測データをモデルの中に入れてやらないといけなのです。観測された情報というのは。その情報を基に、1 週間、2 週間先というのを予測していくのですが、気候システムというのはカオス系と呼ばれるもので、初期値の情報というのは長い間持たないのです。ある時点での情報をもとに 10 年先、20 年先を予測するのが原理的に無理なのです。そこで、そのタイミングは、ここでは再現しようとしていません。

じゃあ何を再現するかと言うと、エネルギーのバランスなどで決まる、気温の状況など、平均的な 10 年など、ある程度の世界の平均をしたような状況を再現しようとしています。これは内部変動のタイミングを当てようというものとは、別の問題になります。

これについて、わたしの上司はこんな説明をしています。鍋に火を付けると、沸騰してぶくぶくと泡が出てきますね。あの泡がどのタイミングでどこに出るかを予測しようというのが内部変動のタイミングを予測する話です。けれど、それができなくても、鍋の温度が 1 分後に何度になるかということは、投入された熱量と、中の水がどれだけ熱を蓄えられるかという物理によって、エネル

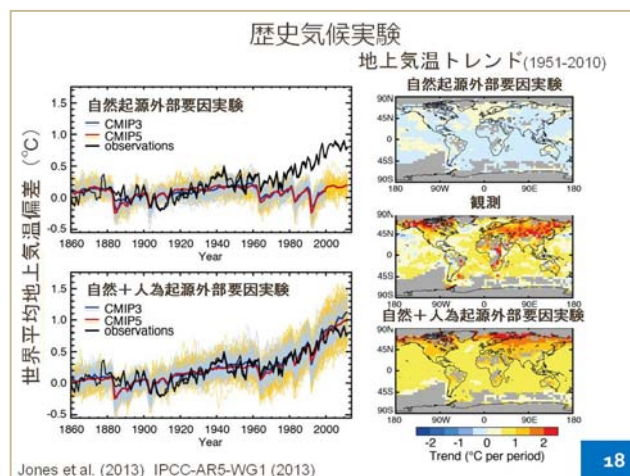


ギーのバランスの問題として解けるわけです。こんな考え方に近いもので解こうとしています。

与える外部要因ですが、例えば CO<sub>2</sub> の他にメタンとか N<sub>2</sub>O とか、こういった温室効果ガスと言われるものを与えてやります。図 17。さらにエアロゾルとしては、硫酸性のエアロゾルとかいろいろな種類のエアロゾルがあるので、それをそれぞれ与えてやります。

太陽活動に関しても、太陽から入ってくる日射量は、時間変化しているので、それも過去から現在まで与えてやります。さらに大規模な火山が噴火しますと、その火山灰が成層圏まで入ってしまいます。すごく高い所まで入ってしまいます。これは対流圏までですと、火山灰というのがすぐ雨と一緒に落ちて落ちるのですが、成層圏まで入ってしまうとそこは雨が降らないので、長い間滞留します。1年とか2年とか滞留して、その間日照をさえぎってしまいます。そうすると地上を冷やすように働くので、その火山灰がどこにどれだけ入っているかというような状況も入れてやります。

その実験の結果が左で、左下の絵の黒い線が観測された世界平均気温変化です。(図 18) 何かいっぱい線が引いてあって見にくいのですが、赤い線とか青い線がモデルで、自然起源と人為起源の外部要因を入れた実験です。このいっぱい線が引いてあるのは、いろいろなモデルが、いろいろな初期値から計算した結果の幅です。これを見ていただくと、観測された気候変化というのが、この幅の中にきれいに入っていることが分かるかと思えます。

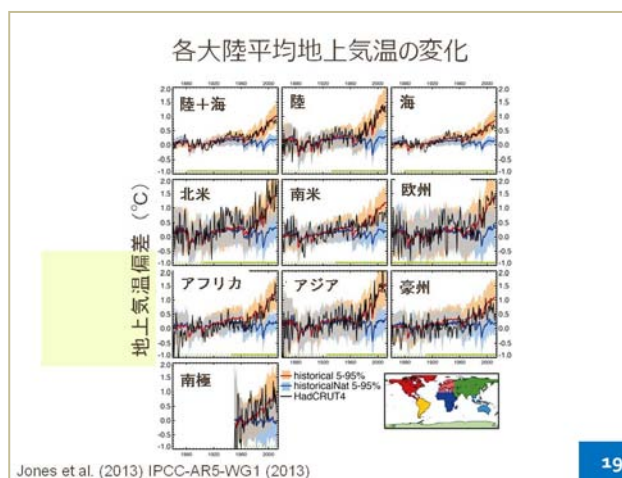


そのときの 51 年から 2014 年のトレンドを見てやると、観測されたものがこれで、自然と人為起

源を入れたものがこれで、よく合っているなど。こちらも例えば北半球の高緯度がよく暖まるというパターンが出ていることが分かります。

一方、太陽と火山は変化させるけど、CO<sub>2</sub> とかエアロゾルとか変化させません、人間活動のほうは変化させませんという実験をしてやると、この 20 世紀後半の温暖化というのを再現する事はできません。右の絵のように、ほとんど温度が上がりにません。

この絵を見るときに注意なのですが、この観測の後何か、ぽつぽつと何かすごく細かいパッチ状のものが見えますよね。下はモデル実験のほうは見えませんよね。これは上のほうには内部変動がある一つの、上がったりがったりという一つのパターンだけで入っているので、その効果が出てぽつぽつと今出てしまいます。ところが下のほうは内部変動のタイミングを予測していませんので、実験によって、上がったりがったりというタイミングもばらばらなのです。それを全部平均にするとゼロになってしまうので、このぽつぽつが見えなくなります。

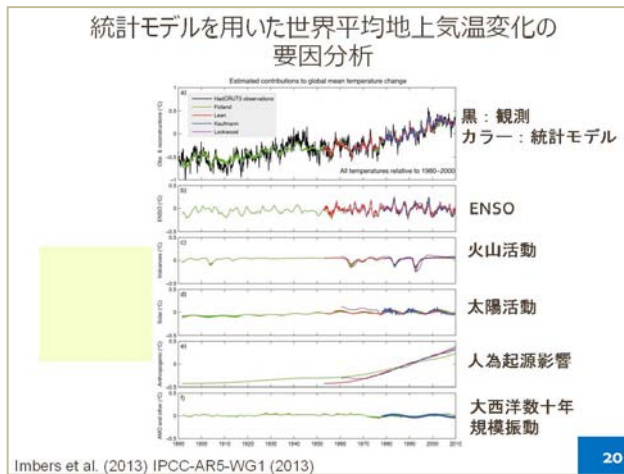


今のは世界平均気温でしたが、例えば陸だけだとどうなるか。黒い線とこの赤い範囲、全強制力実験が合っていますよという絵です。(図 19) 青いほうが自然起源だけの実験です。これを見てやると陸も海で平均した北米、南米、欧州、アフリカ、アジア、オーストラリアと。それぞれ大陸で平均した場合でも、やっぱり人間活動の影響がないと、20 世紀後半の温暖化というのは再現できませんということになります。

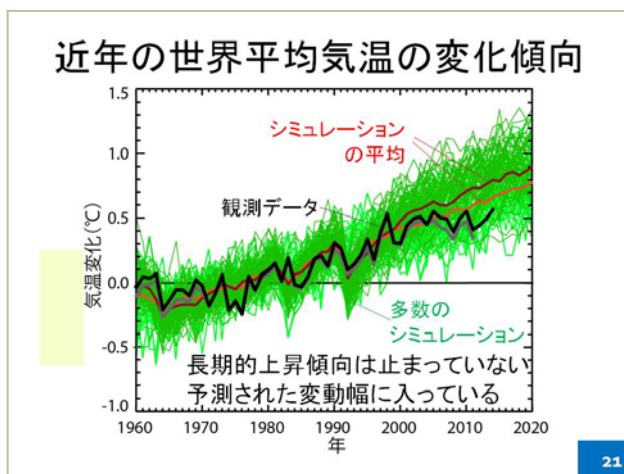
南極は絵が描いてないのですが、南極というのは昭和基地とか、本当に数少ない点でしか観測が

できていませんので、実はよく分かりません。

今までの話は全部気候モデル GCM というのを  
使った話で、そんな GCM なんて信用できるかと思  
われる方もいると思うので、そういう方のため  
に実はこういう研究もやられています。



(図 20) これは何かというと、世界の地上気温  
データが、この黒い線です。その下がエルニーニ  
ョの指標とか火山活動の指標、太陽活動の指標、  
大西洋数十年規模変動という、これも内部変動な  
のですが、そういうものの指標と、これはモデル  
から見積もってしまっているのですが、人為起源  
の放射強制力の変化が示してあります。これに重  
回帰分析ということを行います。これらの複数の指  
標が、どのくらいの寄与をすれば先ほどの世界の  
地上平均気温となるかを見積もるのです。こうす  
ることで、それぞれの内部変動や、自然起源の外  
部強制力だったり、人間活動による放射強制力の  
寄与を見積もるわけです。



それで見積もったのがこの絵 (図 21) で、この  
過去の大きい温暖化というのは人間活動の影響が

ないとやっぱり出ません。エルニーニョとかはあ  
る年は暑い、ある年は寒いとか効くのですけれど、  
長期で見るとあんまり影響しない。

火山活動は噴いた後は、数年間はすごく冷やす  
のですが、それもだんだん消えてしまいますし、  
太陽活動もある時期暖めたら、ある時期下げたり  
はするのですが、全体で言うとそんなに大きな変  
化をもたらさない。特に太陽活動はここ数十年、  
弱まるようになっていって、80年代ぐらいから弱  
まるようになっていまして、地上を暖めるような  
動きではないんです。

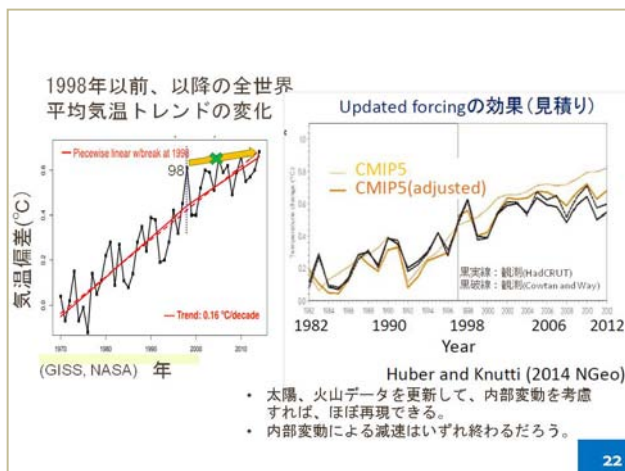
さらにここに来るような方ですと、地球温暖化  
の停滞とか、ハイエイタスというマニアックな言  
葉を聞いたことがある人がいるかもしれません。  
何かと言いますと、この観測データの 60 年代以降  
を拡大してみて、ごめんなさい、拡大図はちょっ  
と入れてなかったです。

何かと言いますと、2000 年代に入ってから、黒  
い線の温暖化が緩やかになっているように見えま  
せんか。地球温暖化の停滞と言われて、温暖化は  
終わったのじゃないかという話が出てきたのです。  
この色の書いてある線が 2 つあるのは気にしないで  
いただいて、これがいろいろなモデルの平均した  
気温の変化で、この平均したやつは上がっている  
のに、この観測は上がらない、IPCC は間違っ  
ていた、あいつらはうそつきだったという話は  
いろいろところで盛り上がりました。

実は、この平均値を計算するのに使っている各  
シミュレーションを全部プロットしたらこの緑色  
の線になります。内部変動などによってばらつく  
のですが、この観測データでシミュレーションの  
範囲内に入っているのです。だから外しているわ  
けじゃないですよ。外しているわけじゃない  
のですが、学者の常として、こういうちょっと  
何か傾きが変わったりすると、なぜか知りたくな  
るわけです。それでものすごくいっぱい研究が行  
われています。その話をちょっとしますが、その  
前に今の絵の見方を説明します。実はプロも含  
めてよく間違った見方をしてしまいます。(図 22)  
98 年からこの停滞が始まったと言われているの  
が、98 年ってエルニーニョですごく気温が上が  
った年なのですが、線形回帰直線って、何となくこ  
この気温偏差の一番大きな 1998 年の点から  
2014 年の点に線を引きたくなりますよね。数学の



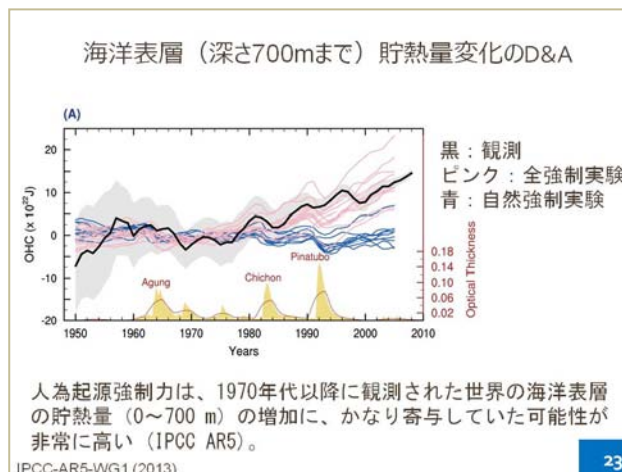
授業でそのように線を引いたらバツです。次の1999年から引くと、ものすごく温暖化していくことになりますので、温暖化が加速しているとかいう話になって、しまいます。



この長い期間のトレンドは、赤い波線です。赤い実線は98年より前に書いたトレンドと、98年以降のトレンドをつないだ線です。区別がつかまずでしょうか。多少98年以降トレンドが弱くなっているのですね。このぐらいの差を実は議論しています、ということをもっと知っていただいたうえで、じゃあこれは何で弱くなったかということに関してです。

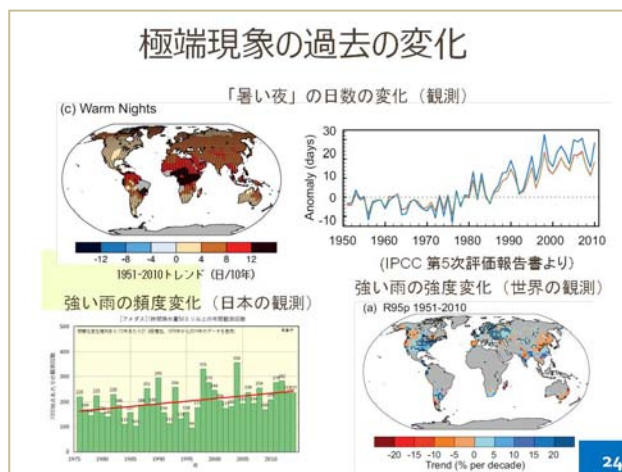
いろいろな研究があるのですが、みんなだいたいそうかなと思始めているのが、実はこのいろいろなモデルの実験は、太陽と火山のデータに関して、火山に関しては2000年以降の観測データというのが実験するときにはそろわなかったため、火山は噴火しない設定で実験をしています。また太陽も2005年までしかデータがなかったため、それ以降に関しては、適当な周期変動を入れていきます。ところが実際の火山は2000年以降もぽつぽつと小さい噴火がありました。また太陽に関しても、想定したものよりも、実際は弱くなりました。ですので、モデル実験では、火山・太陽による冷却効果を過小評価していたのです。

またこの時期、ラニーニャがいっぱいありまして、それも気温を下げる方向に働きます。そういうものをみんな考慮してやると、観測をよく再現します。ここまで全球平均気温の話ばかりしていましたが、海洋のほうはどうでしょうか。(図23) 海洋の深さ700メートルまでの観測された貯熱量(熱の蓄積量)は結構上がっていますね。時々火



山が噴くとそれで冷えるのですが、全体的には上がっています。

そのときに、自然起源と人為起源全部を入れた実験のデータというのが、全強制実験というこのピンクの線で、いろいろなモデルによってばらつきはあるのですが、全体的にこの観測の傾向を再現しています。じゃあ人為起源の影響を入れてやらないと、青い線の自然強制実験と書いてあるもので、こんな上がり方はしないということが分かります。というわけで、人為起源の強制力はこの温暖化に結構効いていたのではないかと考えられています。



(図24) 今日のタイトルに異常気象とつけてしまいましたが、この分野の研究者は極端現象と言います。何かと言うと、極端に暑いとか寒いとか大雨が降った、すごい干ばつだと思ってください。その過去の変化なのですが、暑い夜だと思ってください。暑い夜が10年間でどれだけ増えているか書いてあるもので、値はいいとして、見てもらうとどこも赤いですよね。要は暑い夜の頻度が増

えています。それを世界で平均してやると、こんな感じでどんどん増えているということが分かっています。

また強い雨はどうかといいますと、これは観測データが実はそんなに多くはないのですが、青い所が強度が強まっているところ、赤い所が強度が弱まっているところで、強まっているところ、弱まっているところがあるのだけど、平均すると強まっているところのほうが多いかなという感じです。日本などだとすごく観測データが充実していて、これは気象庁が出しているデータですが、強い雨の頻度というのは増えていっていることが分かっています。

現象及び傾向	20世紀後半に起きた可能性	人間活動の寄与の可能性
寒い日と寒い夜の頻度減少	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
暑い日と暑い夜の頻度増加	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
熱波の頻度が増加	いくつかの地域で可能性が高い	可能性が高い
大雨の頻度が増加	増加地域が減少地域より多い可能性が高い	確信度が中程度
干ばつの影響を受ける地域が増加	いくつかの地域で可能性が高い	確信度が低い
強い熱帯低気圧の数が増加	確信度が低い	確信度が低い
高潮の発生が増加	可能性が高い	可能性が高い

(IPCC 第5次評価報告書より) 25

今まで、IPCC って言いませんでしたか、IPCC という温暖化に関する研究論文を調べてきて、それをまとめて報告書を書く組織というか、そういう活動があるのですが、その報告書によりますと、極端現象の過去の変化に関して、寒い日は減っている可能性が多くて、それに人間活動が寄与した可能性は非常に高いです。(図 25) 暑い夜は増えていることは観測データから明らかで、またそれに人間の活動が影響した可能性は非常に高いです。

大雨の日に関しては、さっきみたいに増加地域は減少地域より多い可能性が高い。ただ人間活動がどのぐらい関与したかに関しては、人間活動の関与があったという論文もいくつかあるのですが、まだそんなに確信度が高いわけではありません。

それから、皆さんがすごく気になる熱帯低気圧、台風に関してなのですが、強い台風が増えているのだという人もいれば、いや分からないという人もいて、何で分からないかと言うと、人工衛星が

上がる前って、台風がどこにあるかって、船とかで運悪く遭遇した人しか分からないわけです。

人工衛星が上がってから台風がどこにあるか分かったのですが、それでもやっぱり難しく、観測データの問題もあって、強い台風というのが増えているかどうかというのは、実際よく分かっていません。高潮に関しては海面水位が上がっていますので、当然ひどい高潮の頻度というのは増えている可能性が高くて、人間活動の寄与の可能性も高いと考えられています。



次にイベントアトリビューションという考え方を説明します。これはあまり聞いたことがないのではないかと思います。これは私も中心メンバーとしてやっている研究です。大雨、大雪、干ばつなどの異常気象が発生すると必ず「これは温暖化のせいですか」と聞かれるわけです。下手をすると地震が起きても温暖化のせいですかと。もちろん違います。こういう質問の電話がしょっちゅう掛かってくるのです。そうすると毎回同じことを答えます。何かというと、異常気象、極端現象というのは、気候システムの中の自然な揺らぎ、内部変動によって生じます。このため、個別のイベントが人間活動だけのせいだということなどは、そもそも現実的に言えません。まず質問が違います、ということ、毎回答えるのです。


ずっとそう答えていたのですが、人間活動による気候変動が観測されたような強さのイベントの発生確率や強度をどの程度変えていったかというのは、評価できるのではないかと、ということ考えた人がいます。大雨が降りました、この大雨 1 回が人間活動のせいかどうか分かりません。ただ、そのようなイベントの発生確率が変わっているか



どうかを評価しようという試みです。(図 27)

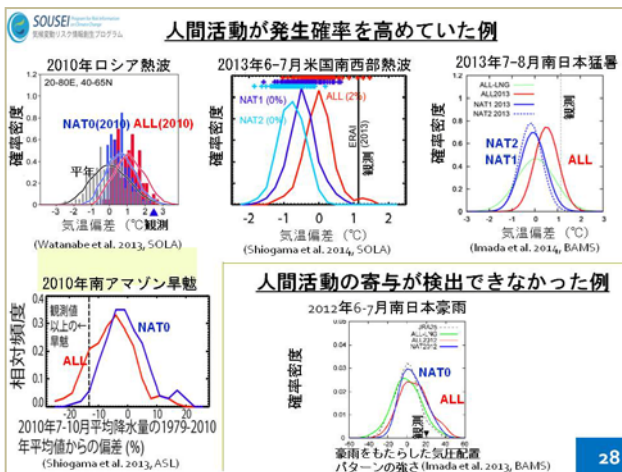
**イベント・アトリビューション**  
—これは、温暖化のせいですか？—

- 熱波、大雪、大雨、干魃などの異常気象が発生すると必ず聞かれるのは「これは温暖化のせいですか？」
- 異常気象は、気候システムのなかの自然な揺らぎ「内部変動」によっても生じる。→ 個別のイベントが、人間活動だけのせいだと言うことは、原理的に出来ない。(これまでの専門家の回答)
- 人間活動による気候変動が、観測されたような異常気象の発生確率や強度をどの程度変えてきたかは定量評価できる。→ **イベント・アトリビューション** (新しい取り組み)



27

私はよく、たばこを吸う人と吸わない人の肺がんの発生確率に例えます。実は私は去年肺がんの疑いで1回検査をやってしまして、そのときは「たばこを1度も吸ったことがないのに、なんだよ。」と思いました。結局、問題なしでよかったですけど。肺がんは、たばこを吸おうが吸うまいが、罹るときは罹ってしまいます。それは運が良いか悪いかという話なのですが、けれど、たばこを吸えばその確率が高くなるということは研究できるわけです。そういうデータがいっぱい出てきている。



そのアイデアを拝借します。(図 28) 海の海水温とか氷の状況とかをモデルに与えてやった上で、いろいろな初期値からたくさん計算をしてやります。この場合は 100 例とか計算しています。大気の中の内部変動というのが勝手におきますので、同じ外部状況を与えているのに、気温が高くなる例もあれば、逆に平年より気温が低くなるような例も出てくるのです。だけど全部たくさん集めてくると、こういう赤い線で書かれているような、

確率分布となる。さらにもう 1 種類の実験をやりやります。CO<sub>2</sub> とかの濃度を 19 世紀の状況に止めてやりやります。火山とか太陽活動は、過去のデータを入れてやりやります。海水温とか氷からは、温暖化の影響を抜いてやりやります。温暖化前の状況を仮に作ってしまいます。それでたくさん実験をすると、内部変動によって温度が上がったり下がったりするのですが、そのときは確率分布、頻度分布が青い線になります。2013年の日本は非常に暑かった。その観測データ右上図の黒線です。人間活動の影響がなくても、このぐらいの温度偏差が起きた可能性というのはわずかにあります。ですが温暖化するとこの確率分布はちょっと右に寄ります。ちょっと右に寄るだけで、実はこの観測値を超える確率がものすごく増えます。これが分かりました。

温暖化したときに確率分布が横にずれることで、異常気象の発生確率というのはすごく上がってしまう。ということで、温暖化によってこういう熱波の発生するリスク、確率が上がったのではないかと評価ができます。これがイベントアトリビューションと言われるものです。

これはロシアの熱波とか米国南西部の熱波や日本の熱波とかに関しても、人間活動の影響がありました。左下は、2010年の南アマゾンですごい干ばつがあったのですが、干ばつの発生リスクというのは、全部入れているやつで高まっていっているのが分かります。温暖化によって風の吹き方のパターンが変わるのですが、それによってこういうことが起きます。

逆に何でもかんでも温暖化のせいにしたりはできません。2012年の南日本で豪雨があったのですが、これに関しては全部入れた実験と、自然起源しか入れていない実験で、ほとんど確率分布は変わりません。このときは、温暖化があろうがなかろうが運が悪ければこういうことが起きるのですねということです。起こる可能性はほとんど変わらなかったということです。

ここまでのまとめです。(図 29) IPCC の政府決定者要約を引用してきたものですが、気候システムの温暖化には疑う余地がありません。今見せた証拠というのは本当に、ほんのごく一部で、ものすごく証拠はいっぱいあります。気候に対する人為影響は大陸海洋が温暖化したり、世界の水循環



## ここまでのまとめ

IPCC WG1 (2013) 政策決定者要約より

- 気候システムの温暖化には疑う余地がない。
- 気候に対する人為的影響は、大気と海洋の温暖化、世界の水循環の変化、雪氷の減少、世界平均海面水位の上昇、及びいくつかの極端現象の変化において検出されている。
- 1951年から2010年の世界平均地上気温の観測された上昇の半分以上は、温室効果ガス濃度の人為的増加とその他の人為起源強制力の組合せによって引き起こされた可能性が極めて高い。

29

が変わったり、雪氷が減っていたり、海面水位が上がったり、あといくつかの極端現象の変化も検出されています。

1951年から2012年の世界平均地上気温の観測された上昇の半分以上は人間活動によるものである可能性が極めて高いのではないかと考えられています。

ここまでの過去の話で、ここから将来の話をします。その前に1回質問とか入れたほうがいいですか。何か質問がありましたら。

会場：ヒートアイランドの影響についてちょっとお伺いしたいのですが、ネット上での知識なものですから、何とも言えないのですが、名古屋大学の先生だったと思うのですが、都市を人口で分類して、大都市と小さな都市との温度をそれぞれ個別に測ります。そうした場合に大都市ほど温度変化の上昇が大きいと。小さな都市は温度変化があまりないと。

要するに全体的に見れば温度は上がっているのですが、その比率を見たら、明らかに都市化による影響のほうが大きいのではないのか。炭酸ガスの影響というのはせいぜい3割程度で、ヒートアイランドによる影響が7割程度ぐらいあるのではないのかというデータとか、ネット上の配信を見たことがあるのですが、そういう話は聞いたことはありませんか。

塩竈さん：都市化の影響というのも実はすごく研究されています。例えば東京とかですと、ものすごく効いています。全球の温暖化かつ、ヒートアイランドの影響で、暑くなっている、それは

間違いないです。問題はその比率と、もう1個、それって都市だけのデータを集めてきていますね、中都市、大都市とか。だけど世界で見たときに、先ほど見ていたように、海洋のデータとか都市じゃないところのデータもいっぱいあるんですね。そういうのも含めて、全世界で平均すると、都市化の影響というのはそれほど大きくないだろうという調査が出されています。

会場：評価が分かれているということですか？

塩竈さん：分かれているのではなくて、後者が主流です。いろいろなスケールをごっちゃにしちゃいけないのです。

会場：NASAか何かのデータでやっていましたけど。世界のデータを全部寄せ集めて、それで人口が例えば1万人の都市だったか、分けてそれ以上の都市とそれ以下の都市と、それぞれ個別に温度、トレンドを見ているのです。全体としてここはトレンドが上がっているのだけれども、明らかに都市のほうが大きいと。

塩竈さん：その論文を私は見ていないので、評価できないのですが。例えばそういう検証は実は他にも色々やられていて、その方だけではなくて、私の知っている限りでは、世界平均したりすると都市化の影響はそれほど大きくないという結果が多いと思います。その方の論文を私は知らないなので、評価できませんが。

会場：気候システムの温暖化には疑う余地がないということで、近年は温暖化の上昇が穏やかになっているということが書いてあって、ハイエイタスについて触れている点ですが。私は2001年の第三次報告の温暖化について見てみたのですが、そのハイエイタスによって、見事に予測がはずれているのです。

そこでお伺いしたいのが、二酸化炭素の他にも水蒸気のほうが、温暖化ガスの効果として大きいのではないのかという意見もありまして、モデル自体がまだまだ地球科学から見ると、まだ分からない要因とかたくさんあって、とても予測できるような、科学水準にないのではないかと私は思って

いるのですが、その辺はいかがでしょうか。

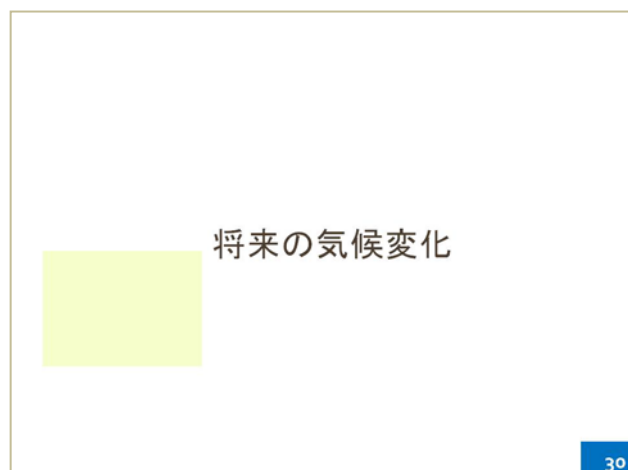
塩竈さん：懐疑派と言われる人の典型的な質問の例で、多分僕は50回ぐらい答えていると思うのですが（笑）。ネット上にそういうのがいっぱい転がっているのは知っています。図21で、モデルのシミュレーションの幅に観測が入っています、という話を先ほどしたのです。また、水蒸気が入っていないというのはよくある誤解で、水蒸気は気候システムを決める上でものすごく大事なので、考慮しています。モデルの中で計算しています。

会場：先ほど言われたように、10年20年先の海洋の温度なんて、まだ予測できる水準にないのではないですか。半年先のハイエイタスも、エルニーニョもラニーニャも半年先の対応というのは予測できない状態ではないですか。

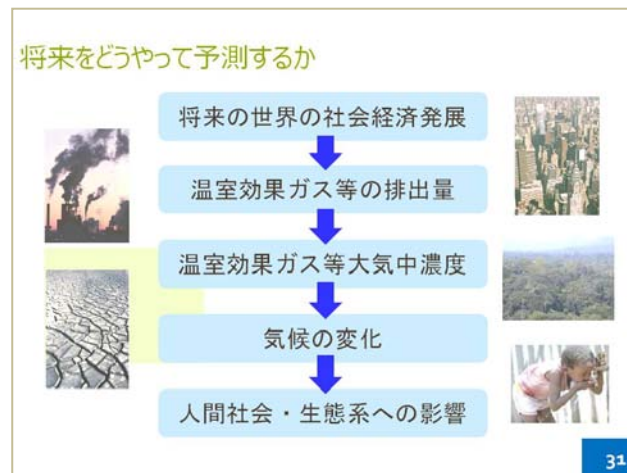
塩竈さん：先ほどお話したように、それは初期値を与えて解く方法では難しいということです。それとはまた別で、エネルギーのバランスで決まる温度の上昇というのは計算できます。水蒸気の量というのは、それこそ温度で決まるのです。それによってフィードバックの大きさも決まってくるのですね。

会場：海洋は関係ないのですか。

塩竈：海洋もあるのですが、海洋などの温度によって、水蒸気の量は決まる。その温度は何で決まるかと言うと、エネルギーのバランスで決まってくるのです。それに関してはある程度のことには答えられるという話です。



では、続きのお話をしましょう。将来に関してどうやって予測するかという話なのですが、まず将来の社会経済がどうなるか。これが予測できれば私は大金持ちになり得るのですが、1年後の予測でも大変でしょうが、100年後なんかというのは予測できないわけですね。（図31）

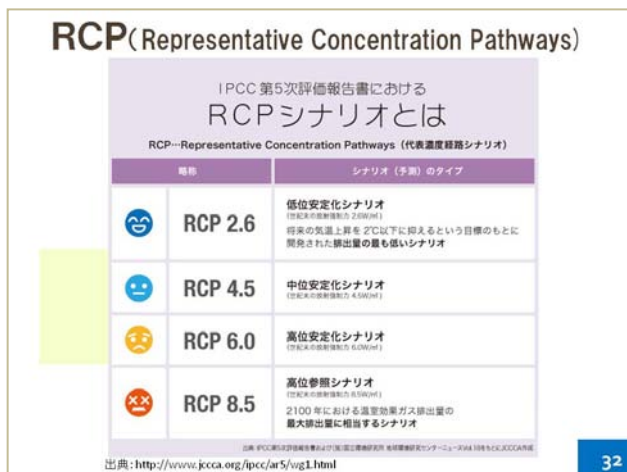


じゃあどうするかと言うと、こういう場合、こういう場合、といっぱい想定を作るのです。こういう社会経済だったらどうなるかというシナリオと言う意味ですが、ストーリーを作ります。いろいろなストーリーを作って、そのときの幅を見てやるということを行います。

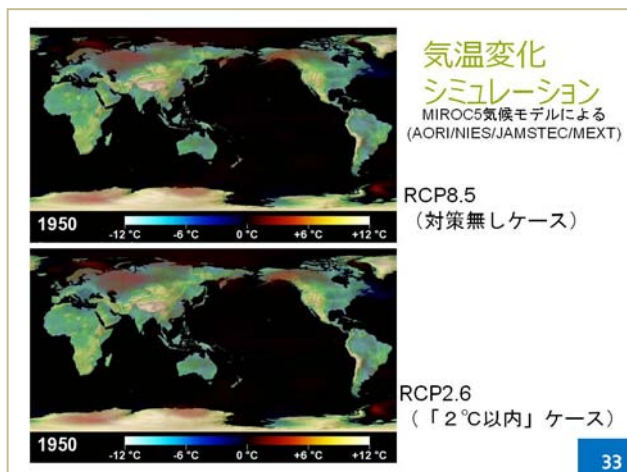
これはあり得る社会の幅でもあるのですが、別の言い方をすると、じゃあどの社会をめざしているかという選択肢でもあるわけです。そういう選択肢が、いくつか作ってやると、社会経済がこうなっていて、そのときの発生仕方がこうなっているみたいなのを想定していけば、温室効果ガスがどれぐらい出るかということが推定することができます。

そうするとさらにそれが森林とか海洋にどのぐらい吸収されるかというようなことも計算してやると、温室効果ガスの大気中濃度というものを計算することができます。それは先ほどのGCMというのに与えてやると、気候の変化を計算できる。そのときの気温や降水の変化を使って影響評価をしていきます。モデルの中にはこの排出量から濃度を計算するところまでGCMでやるものもあります。地球システムモデルというのですが、そういうものもあります。

前回のIPCCに向けたGCM実験では、あまりCO<sub>2</sub>濃度が増えないシナリオからすごく増えるシ

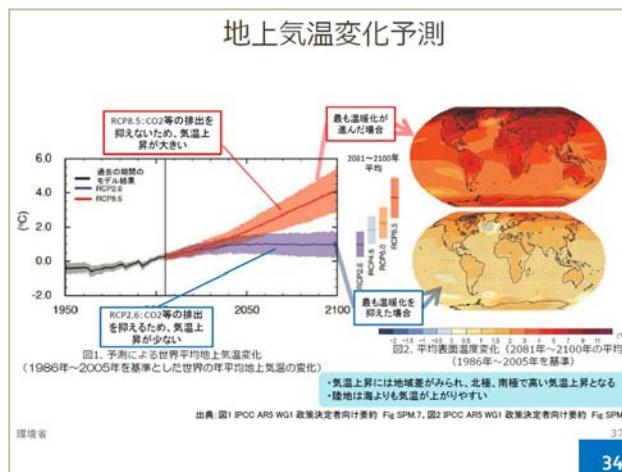


ナリオまで、4つの排出シナリオを用いました。(図 32) そのシナリオを使って、うちの GCM を使って、気温変化のシミュレーションをしたものがこれです。(図 33)



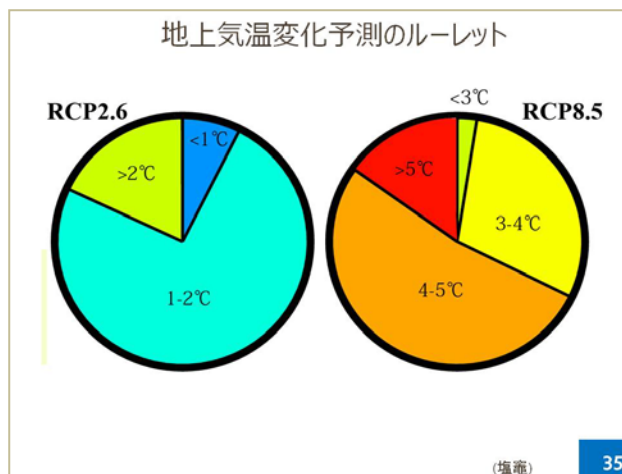
上が RCP8.5 というとても温度が上がるもので、下が RCP2.6 と言われる、温度上昇を 2 度以内を目指すためのケースです。2035 年とかこれぐらいだと、両者ではほとんど区別がつかないと思うのですが。このぐらいでだいぶ差がつかってきましたね。上はものすごく上がっているけど、下も上がっているのですが、それほどではない。2100 年まで行くと、相当差がつかってしまうと。与える社会経済の想定によって、どのぐらい温度が上がるかというのは随分違います。それをいろいろな研究機関がいろいろな GCM を使って計算をしてやった結果がこれです。(図 3 4)

青い線が RCP2.6 で CO<sub>2</sub> の排出量を抑えた実験。赤い線が RCP8.5 という CO<sub>2</sub> の排出量がどんどん上がってきた実験です。RCP8.5d だと 4 度も上がりますが、RCP2.6 だと 2 度以内に収められます。



マップで見るとこんなに違いますね。ところで、ここで幅があるのが分かりますか。まず先ほどから言っていた内部変動のばらつきがあります。また、モデルも完璧ではありませんので、同じ CO<sub>2</sub> とかの想定を与えてやっても、幅が出ます。その幅を見ています。

この幅を、もっとイメージしやすくするために、(図 35) 先ほどの 2100 年付近の温度変化の確率をルーレットの形で示してみました。RCP2.6 というのは、1 度以下で温度上昇が収まる確率というのもこのぐらいあるのです。一番可能性が高いのは 1 度から 2 度です。2 度以上の確率もこのぐらいあります。RCP8.5 だと、3 度以下の確率はほんのちょっとあります。3 度から 4 度、4 度から 5 度、5 度以上というふうになっています。



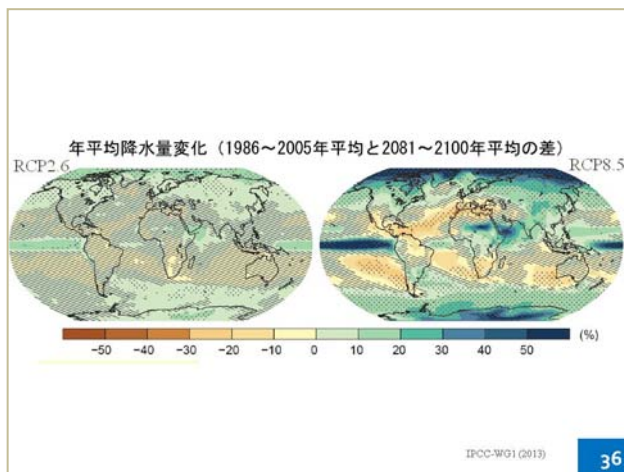
排出シナリオというのは、われわれがどのような社会経済を選ぶかという選択肢でもあります。どちらがいいですかと。RCP2.6 がいいなと思うと、CO<sub>2</sub> を削減するコストがかかります。じゃあ、RCP8.5 がいいなと思うと被害がいっぱい出ます。



さあ、どうしますかという選択肢なのです。

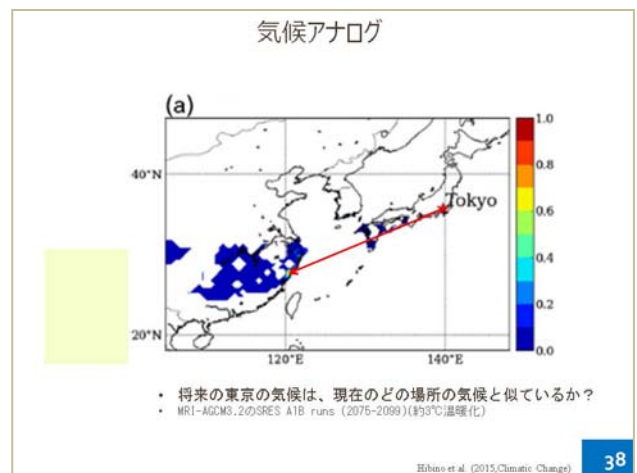
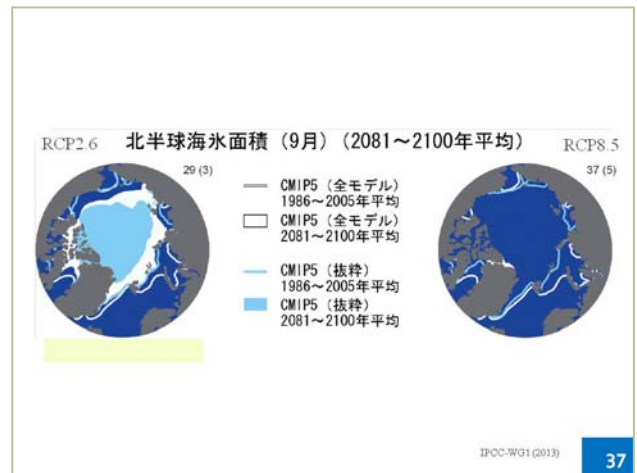
中にギャンブルが強い人とかですと、この絵を見せると「いや、俺はピンポイントでねらせる」という人もいます(笑)。素晴らしい。その自信が私も欲しいのですが。実はこのルーレットは、われわれはどちらがいいかを選ぶだけで、玉を投げることもできません。それは神様がもしいるなら、神様が勝手にやって、しかもその結果をすぐには教えてくれないのです。100年後にじわじわ結果が分かってくるのです。「あれっ、3℃だと思っていたのに、実は5℃でした」というようなこともあるのですね。後から分かってくるのですね。

じゃあそういうものだと思ったうえで、われわれはどうするか、どちらを選択するか。そういう情報を基にどちらを取るかという判断をしなければいけません。



これは年平均の降水量の変化で、RCP2.6だと、8.5に比べて変化はとても小さいです。8.5で見ていただくと、青いところが年平均の降水が増えるところで、茶色いところが減るところです。北半球の高緯度とか熱帯では増えるのですが、亜熱帯とかの中緯度は減るところが多いとか、日本は増えるか減るかぎりぎりのところで、どちらかよく分からないところだったりします。(図 36)

9月には北極海の海水が一番少ない時期なのですが、現在の氷の量というのが、モデルの実験ですが、この青い線です。RCP2.6だと、2100年には水色の塗ってある範囲まで減ってしまいます。RCP2.6でも、結構減ってしまうわけです。8.5の場合、海水がありません。これは間違いじゃありません。消えてしまうのです。そのぐらいの温暖化になります。(図 37)



もうちょっとイメージをつかんでもらうのに、(図 38) 気候アナログというものがあります。将来の東京の気温と雨の降り方は、今のどの場所に似ているかを調べたものです。将来の世界平均気温が 3℃上昇したときの東京というのは、中国の今のこの南部ぐらいに似ていますよということを示しています。九州を飛び越してしまっ、こんなところまで行ってしまいます。

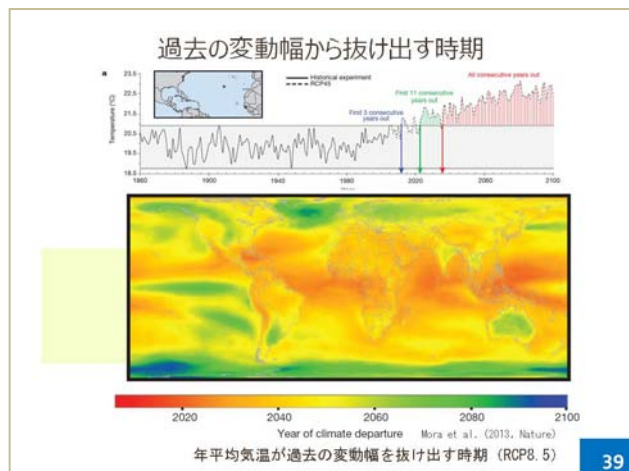
会場：上海？

塩竈：上海より南だと思います。

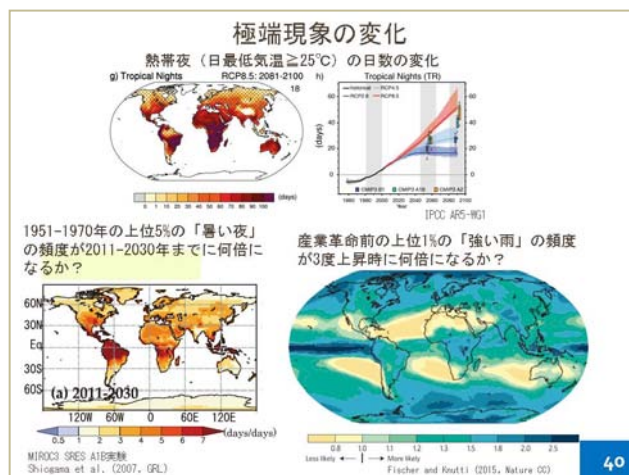
でも 100年後の話でしょうと。自分は生きていないし、関係ないや、子どもはちょっと、孫はごめんねと思うかもしれないですが、ひ孫かもしれない。実は、皆さんにも関係するのです。

(図 39) の上図は、ある一点での年平均気温変化の時系列です。過去の変動の最大、最小の範囲がこの灰色で塗ってあるところです。温暖化が進む

と、この範囲を超えてきてしまうのです。温暖化が進むと、過去の範囲内にはまったく戻れないときというのが来てしまうのです。



過去の範囲から抜け出すのはいつですか、というのを各地点で計算をしました。RCP8.5の場合、2030年か2040年頃になると過去に経験していない世界になります。皆さん何歳でしょうか。皆さんにお子さんとかお孫さんがいたら、何歳でしょうか。もちろん日々の雨などにしたらもっと内部変動の幅が大きくなるので、この時期というのは遅くなるのですが、年平均の気温で見ると、このぐらいで経験したことのない世界になってしまう。



極端現象に関してはどうでしょうか。左上図は熱帯夜の頻度なのですが、ここオレンジの部分が見えますか。一番高いところの100日、この辺は50日とかなのですが、これ50日になるのではなく、50日増えるということです。さっきの説明で確率分布がちょっと横にいったら日数がすごく増えると言いました。あれと同じで、温度が上がっていくと、こういう極端な現象の頻度というのは

ものすごく増えてしまいます。世界の陸上で平均しても、RCP8.5だと50日ぐらい日数が増えてしまいます。(図40)

これは、遠い将来の話だから関係ないやと思うかもしれないので、左下図は私の描いた絵なのですが、1951年から1970年代の間の上位5パーセントの暑い夜の頻度が2011年から2030年の平均で見た場合に何倍になりますかというのを計算したものです。日本付近だと3倍とかになるわけです。われわれも経験しますよと。

3°C全球平均気温が上昇すると、産業革命前の上位1パーセントの強い雨の頻度は、1.5倍が2倍とかに増えてしまいます。

将来、寒い夜の頻度は減ります。暑い日、暑い夜はほぼ確実に増えます。大雨の頻度も中緯度と熱帯湿潤域では可能性が非常に高いです。この理屈は簡単で、大気温度が上がるとそこに含むことができる水蒸気量が増えます。水蒸気が多ければそこで雨を降らすような雲や低気圧が来れば、当然降る量は増えます。したがって、おおざっぱに言うと、水蒸気が増えれば大雨が増えます。(図41)

現象及び傾向	20世紀後半に起きた可能性	人間活動の寄与の可能性	将来の傾向の可能性
寒い日と寒い夜の頻度減少	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い	ほぼ確実
暑い日と暑い夜の頻度増加	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い	ほぼ確実
熱波の頻度が増加	いくつかの地域で可能性が高い	可能性が高い	可能性が非常に高い
大雨の頻度が増加	増加地域が減少地域より多い可能性が高い	確信度が中程度	中緯度と熱帯湿潤域で可能性が非常に高い
干ばつの影響を受ける地域が増加	いくつかの地域で可能性が高い	確信度が低い	可能性が高い
強い熱帯低気圧の数が増加	確信度が低い	確信度が低い	どちらかといえば
高潮の発生が増加	可能性が高い	可能性が高い	可能性が非常に高い

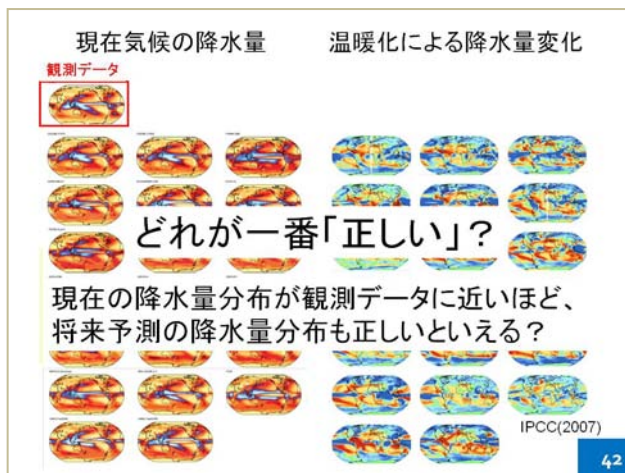
(IPCC 第5次評価報告書より)

大雨が増える一方で、実は干ばつの影響を受ける地域が増加するという可能性も高いです。大雨が増えるようになるのですが、ちょっと理屈は難しいので省略しますが、実は弱い雨とかが減ってしまうのです。降ったら土砂降り、後は降らないみたいな、すごく極端に言うとそのことなのですが、そういうふうな方向に進む傾向があります。

熱帯低気圧に関しても、水蒸気が増えるので、同じ低気圧だったら強い雨が降りそうに思うので



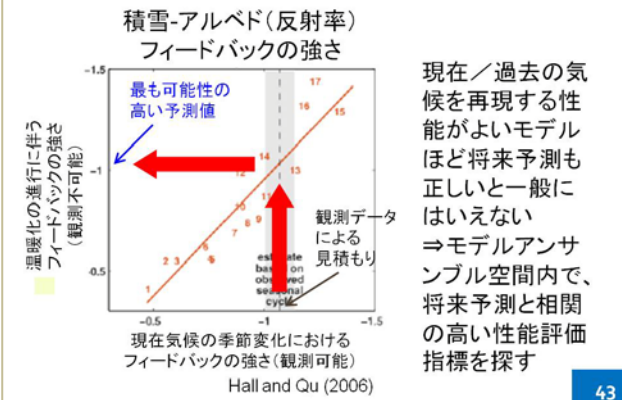
すが、これはちょっと難しくよく分かりません。海面水位が上がって高潮の発生頻度も当然増えると考えられています。



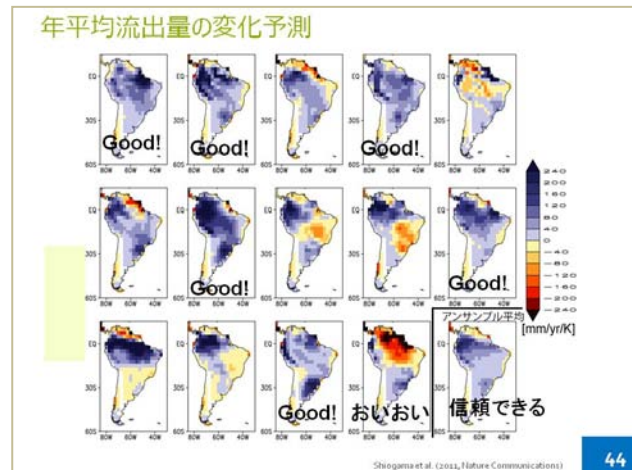
今までの話はたくさんのモデルの平均の話だったり、その幅の話をしていたのですが、ちょっとマニアックな話に入ります。(図 42) この左側、これは現在の年平均した降水量分布です。この青いところで雨が多いのだと思ってください。いろいろなモデルでこの絵を描いてやるとこんなふうになって、すごく似ているのもあれば、何かちょっと形が違うぞというのもあったりします。要は現在を再現する成績がモデルによって違うのです。みんな頑張って努力していますが、ある程度のところまで合うけれど、完璧ではない。将来の予測に関してこんなふうになっていって、ある程度そろっているところもあるけど、モデルによって違う結果を出すところもある。じゃあこの右の結果のうち、どれが一番信用できるのでしょうか。左側の現在の気候の再現成績が一番正しいのが一番予測も信用できるのでしょうか、という問題を実はここ 5 年ぐらい、みんなとても真剣に考えていて、多くの研究が行われていいいます。

例えば雪がどれぐらいのスピードで溶けるかということを知りたいのだったら、それに関係する量の、現在のシミュレーションの成績を付けなければいけないのだらうということが分かってきました。縦軸は温暖化に伴う積雪が減ることによって日射が入りやすくなって、温暖化が促進しますという、積雪フィードバックの強さです。(図 43) この一個一個の数字に書いたのが各モデルです。縦軸は将来にならないと正解が分かりません。横軸は、現在における春先に雪はどれぐらい早く溶

### 性能評価指標と将来予測



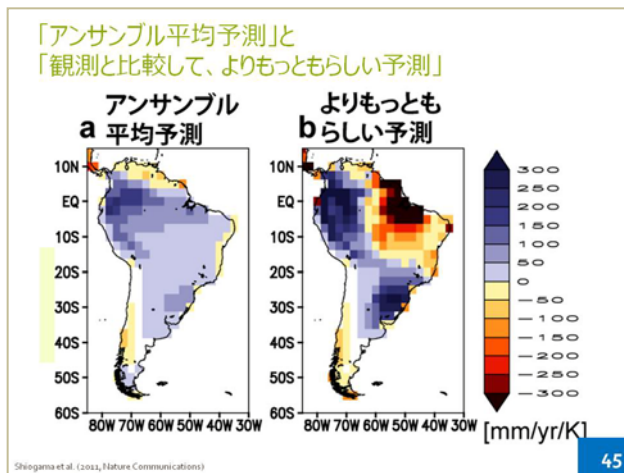
けて、それによって日射がどれだけ入ってくるかという指標です。こちらは観測可能な量です。両者に強い相関があるのが分かります。横軸に関しての観測データがありまして、その幅がこの範囲です。そうするとこの幅に入っているモデルのこの将来の予測というのが、より信頼性が高いと考えられます。



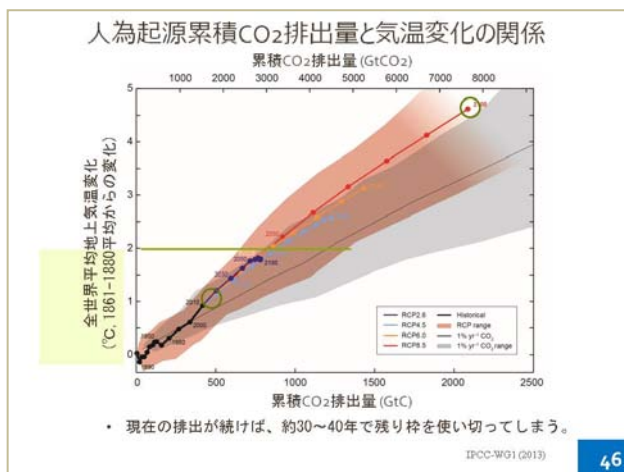
(図 44) は、14 個のモデルを使った 21 世紀末までの年平均水資源量変化予測です。青いところは水が増えますよ、赤いところが減りますよ、ということです。右下の図は 14 個の平均です。この絵を見て、みんなどれが一番信用できると思いますか。人間の習性として、平均が一番正しいのではないかと思う習性があります。平均が一番正しいなら、それに似ているモデルというのも、やっぱり正しい気がします。逆に、下段の右から 2 番目のような、ほかと全然違うモデルは、何か間違っているのじゃないのという気がしてきます。けれど、先ほどの研究の例のように、私もこの将来変化のばらつきと関係する現在の評価指標とい



うのを、うまいこと見つけてやる方法を考え出しました。その評価指標を使ってやりますと、(図 45) 実は仲間外れだと思っていたものが、一番正しい場合ということが分かりました。アマゾン川流域がものすごく乾燥化するという予測が実は、みんなとは違ったのだけど、一番もっともらしいということが分かりました。こういったことをいろいろやって、予測の信頼性を評価しようと努力しています。



最後に 1 枚だけ対策に関する絵を見せます。(図 46) 横軸はこれまでに人間がどれだけ CO<sub>2</sub> を排出してきたかという累積の量です。縦軸はどれだけ温度が上がるか、という変化です。累積排出量が多ければ、気温が高くなりますよねという絵です。



会場：だけど噴火だとかそういうことによって、炭素のウォーカー・フィードバックというのも地球にはあって、温度が高くなれば炭素の呼吸量も増えるのじゃないですか。だからいっぺんに出した累積がそのまま積もるのではなくて、循環して

CO<sub>2</sub> が固定化されるのじゃないですか。その量は見積もっていないのですか。

塩竈さん：ウォーカー・フィードバックってすごくゆっくりしたやつではなかったでしょうか。の数億年スケールの話に出てくるやつですよ。ちょっと古気候に詳しくないので、間違っていたらすみません。この図では、海にどれだけ CO<sub>2</sub> が吸収されるかとか、生態系がどれだけ吸収するかという炭素循環フィードバックはコミで考えています。

現在までの累積排出量はこの辺りです。国際社会はずっと喧々譁々やって、ようやく世界の平均気温の上昇量を 2 度以下に抑えるように頑張りましたということだけ同意できました。その値がここです。2 度というのはここです。現在の排出が続けば、残り 30~40 年で累積排出量の残り枠を使い切ってしまう。実は残り時間はそんなにないのです。

ただ、ひょっとしたら運よく CO<sub>2</sub> がたくさん出ても温度が上がらないのが本当の世界だったら、もうちょっと時間はありますし、運が悪くて CO<sub>2</sub> の排出量に対して気温がすごく上がりやすい世界でしたら、この時間というのは短くなってしまいます。どれが正しいかというのは、現時点では分からない。この真ん中の線というの、50 パーセント以下の確率で 2 度以下にできますよ、という線でしかありません。例えば、この飛行機は 50 パーセントの確率で落ちませんので、乗って大丈夫ですと言われた場合、どう思いますか。

会場：乗らない (笑)。

塩竈：まあちょっとそれは極端過ぎる例えでしたけど、そのぐらいの話なんです。現在の排出量はこの RCP の線に一番近いと思いますか？

会場：高いほう。悪いほうというか、高いほう。

塩竈：そうですね。実はこの RCP8.5 よりも排出量が高かったりします。もしこのまま排出削減が進まなければ、2100 年には、右上の丸になります。

というわけで、まとめます。(図 47) このまま温室効果ガスの排出し続ければ、さらに温暖化が進みます。気候変動を抑制するには温室効果ガス排出量の大幅かつ持続的な削減が必要です。ご紹介したように、過去の気候変動の要因分析とか将来予測に関する不確実性を定量化し、かつどう

にか減らせないかという努力をわれわれはずっとやっています。だけど、それでもやっている本人が言いますが、すべての不確実性が急に無くなったりしませんじゃあ完全に不確実性がなくなるまで待ってればいいのかというと、待っている間にもうさっきの累積排出量というのがどんどんたまって行って、対策が大変になる。ですので、不確実性を理解した上でどういう対策を打っていくのか、それをいつやるのか、いつ誰がどういう分担でやるのかという意思決定が必要になります。そこは政治の話でもありますし、有権者の判断でもあることです。以上です。(会場拍手)

### まとめ

IPOC WG1 (2013) 政策決定者要約より

- 気候システムへの温暖化には疑う余地がない。
  - 気候に対する人為的影響は、大気と海洋の温暖化、世界の水循環の変化、雪氷の減少、世界平均海面水位の上昇、及びいくつかの極端現象の変化において検出されている。
  - 1951年から2010年の世界平均地上気温の観測された上昇の半分以上は、温室効果ガス濃度の人為的増加とその他の人為起源強制力の組合せによって引き起こされた可能性が極めて高い。
  - 温室効果ガスの継続的な排出は、更なる温暖化と気候システム全ての要素の変化をもたらすだろう。
  - 気候変動を抑制するには、温室効果ガス排出量の大幅かつ持続的な削減が必要であろう。
- 過去の気候変動要因分析と将来予測に関する不確実性を定量化・低減しようという努力が行われている。
  - それでも全ての不確実性が消えることはない。
  - 待っている間に温暖化は進み、対策が間に合わなくなる。
  - 不確実性を理解した上で、緩和策・適応策の意思決定を行っていく必要がある。

47

### ◆実技応答

会場：成層圏でのオゾンホールは、これから拡大し続けてしまうのでしょうか。

塩竈さん：簡単化のためにオゾンの話はしませんでした。オゾンは回復していくと考えられています。

会場：イベントアトリビューションのスライドの次のグラフがいっぱい載っていたスライドなんですけれども。その次です。その右の下の図で、豪雨をもたらした気圧配置のパターンの強さというのがちょっとよく分からないのと、ここで言っている南日本豪雨のような、雨ですと地形的な効果とかそういうものが結構影響するのではないかと思いますので、それが上のほうの熱波とか単純な気温よりも、難しいんじゃないかという気がしていたのですけれども。

塩竈さん：おっしゃる通りです。これはやってみて難しかった例です。雨に関して、地形の効果が大きくて、地形の効果をこのモデルは150キロぐらいの解像度だったので、うまく出せなかったのです。それで、豪雨そのものじゃなくて、実はその時の気圧配置のパターンに関してだけ調べた例です。したがって、これはちょっと中途半端な例で、おっしゃるように豪雨とか洪水とか難しい。

会場：どうもありがとうございました。ちょっと遅刻してきたので聞きそびれたかもしれませんが、ハイエイタスそのものを再現できたモデルはあるのですか。

塩竈さん：はい。このたくさんある緑色の線がいろいろなモデルのいろいろな初期値から行った実験なのですが、いくつかのシミュレーションでは、再現できています。うちのモデルもたくさん実験すると、いくつかの事例ではハイエイタスが再現できます。そういうときは、太平洋十年規模変動というのがありまして、これも内部変動なのですが、それが全体で地球を冷やすような方向の変動をしているときは、ハイエイタスを再現できます。

会場：ではそれで確認できているから、熱が海の底に沈んでいるから、温暖化が停滞しているのだという解釈をすればいいのですか。

塩竈さん：うちのグループも含めて、そのような論文がいろいろ出ています。

会場：先ほど海洋表層の貯熱量の増加というところがありましたが、一時期温暖化の速度がちょっと緩やかなというか、下がった時期があって、そのときに表層だけではなくて、もっと深層のほう、海洋の下のほうで対流が起きて、それでちょっと下がったという傾向が見られたという話を聞いたことがあるのですが、このGCMの中にはその表層だけではなくて、海洋のもっと非常に深い層の対流のこともモデルの中には入っているのでしょうか。

塩竈さん：深い所も計算しています。深い対流が起きてという話は私は知らないのですが。1950年

から 1970 年頃の停滞に関しては、内部変動の効果もあるのですが、よく言われているのがこの時は第二次大戦が終わってからヨーロッパとかアメリカ、日本もですがすごく工業化が進んで、化石燃料をいっぱい使って、年齢によっては覚えていらっしゃる方がいると思いますが、公害問題がすごくひどくなっています。大気汚染がひどくなっています。大気汚染は前言っていたエアロゾルと言われるもので、大気中にすごく汚いガスがいっぱい出て、それが日射をさえぎって、今の中国とかがそうですし、昔の四日市もそうですが、お日様が見えないような状況が起きたわけです。そうすると日射をさえぎっているので冷えるのです。それが起きていたと言われていました。

その後、これはたまたまというので、車の排気ガスってすごくきれいになりましたよね。触媒の技術をどんどん開発して、それによってエネルギー消費は増えていて、二酸化炭素はたくさん出しているのに、エアロゾルは出ないという技術ができたのです。それがどんどん導入されると、それは大気汚染に関してはいいことだったのですが、その打ち消す効果が消えてしまうと、気温が上がってしまうということが起きたと言われていました。

会場：中国が出しているのがそうですか。

塩竈さん：そうですね。それはただ、一部のエアロゾルの排出に関しては、頭打ちしたかなというふうなことを言われています。今後どうなるか分からないですが、中国などが有利なのは、もうすでに欧米や日本が開発した技術をお金を出せば買えるのです。それは後から走っている人の有利な点で、お金を出せば周りの人が何年も掛かって開発した技術を、一気に入れられる。多分今後そうなんじゃないかなというふうに予想されています。

会場：いろいろなシミュレーションをやっておられるわけですけど、シミュレーションの時間はだいたいどのくらい掛かっているものなのか、あるいは規模とか、その辺を何か簡単な例で教えていただければと思います。どのくらいの時間が掛かるとか、何万グリットに切っているとか、多分、大変膨大な計算量になると思いますが。

塩竈さん：もちろんスーパーコンピューターと呼ばれるものを使っていて、これ 1 本計算、解像度によるのですが、あと使うスーパーコンピューターがどれかによるのですが、例えば 2~300 年の計算をするのに、1 カ月ぐらいですかね。もちろんそれ 1 本ではなくて、たくさんの計算を同時にやったりするのですが、解像度が高ければものすごく掛かりますし、解像度が低ければ 1 週間で終わります。それは目的によって使い分けています。

以上