

特別講演会「地球温暖化と海洋」 開催報告

昨今、集中豪雨や干ばつ、異常高温などの異常気象や巨大台風などの極端現象の発生が急激に増え、その背景にある地球温暖化への社会の関心が一層高まっています。最近の地球温暖化の停滞（ハイエイタス）現象とあいまって、特に地球温暖化と海洋の関係が注目されるようになりました。海洋は地球温暖化に伴う熱を吸収する一方で、エルニーニョ現象のように、吸収された熱を一時的に大気に吐き出す機能も備えています。こうした役割を担う海洋の分布は一様ではなく、それが地球温暖化傾向の地域特性にも反映しています。

このたび、地球温暖化モデル予測の世界の第一人者である米国プリンストン大学の眞鍋淑郎博士が来日される機会をとらえ、博士が現在最も力を注いでおられる地球温暖化と海洋の関係について講演を頂く特別講演会「地球温暖化と海洋」、及び、海洋と気候変動の研究において世界の指導的立場にある海洋研究開発機構の山形俊男博士も交えた対談「眞鍋淑郎×山形俊男」を下記の通り開催しました。

日時：2017年10月31日（火）13時30分～15時30分

場所：笹川平和財団ビル 11階国際会議場

主催：笹川平和財団海洋政策研究所

後援：東京大学大学院理学系研究科、国立研究開発法人海洋研究開発機構

参加者数：約180名



■プログラム：

13 時 30 分～14 時 30 分：特別講演「地球温暖化と海洋」

眞鍋淑郎博士（プリンストン大学）

14 時 40 分～15 時 30 分：海の未来に向けた特別対談「眞鍋淑郎×山形俊男」他

山形俊男博士（海洋研究開発機構）



■プロフィール

眞鍋淑郎博士

1953 年に東京大学理学部地球物理学科を卒業、1958 年に学位取得後、1997 年まで 40 年にわたり米国海洋大気庁・地球流体力学研究所で気候研究に従事。大気・海洋結合大循環モデルを開発し、初めて気候研究に適用した先駆者である。特に地球温暖化の二酸化炭素濃度倍増実験で世界的に知られる。1988 年には北半球で温暖化が先行すると発表し注目を集めた。プリンストン大学客員教授や地球フロンティア研究システム地球温暖化予測研究領域長を務めるなど、後進の指導も精力的に行ってきた。ブループラネット賞、ボルボ環境賞、朝日賞、ベンジャミン・フランクリンメダル、米国気象学会ロスビー賞、米国地球物理学連合ウィリアム・ボウイ・メダルなど受賞多数。米国科学アカデミー会員。

山形俊男博士

1971 年に東京大学理学部を卒業後、九州大学助教授、東京大学教授・理学部長/理学系研究科長、地球フロンティア研究システム気候変動予測研究領域長などを歴任。エルニーニョ現象の発生機構の解明やインド洋のダイポールモード現象の発見、予測など、海洋と気候変動の研究において世界の指導的立場にある。2012 年に東京大学を定年退職。現在、海洋研究開発機構特任上席研究員、笹川平和財団海洋政策研究所特別研究員、京都大学特任教授、南京情報科学技術大学荣誉教授などを兼務。米国気象学会スベルドラップ金メダル、国際海洋物理科学協会プリンス・アルバート I 世金メダルなど受賞多数。フランス海洋アカデミー外国人会員。2004 年紫綬褒章受章。

■開会

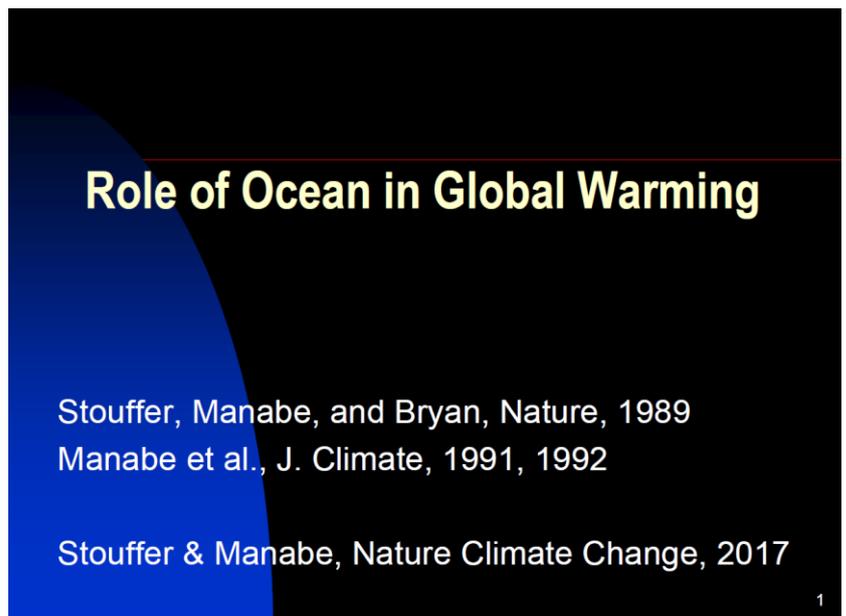
(司会) 笹川平和財団海洋政策研究所海洋研究調査部 海洋政策チーム長 角田智彦

(開会挨拶) 笹川平和財団海洋政策研究所海洋研究調査部長 古川恵太

■特別講演：「地球温暖化と海洋」

眞鍋 淑郎 博士 (プリンストン大学 上席研究員)

今日は、温暖化と海という題で話をさせていただいて、大変光栄に思っています。大学では地球物理学教室があって、主として私は気象学を専攻したのですけれども、やっけていて思ったことは、大気と海の関係というものが切っても切れない関係であると。それで、温暖化というのを大気と海洋の相互作用による現象であると考えますと、これが、考えれば考えるほど、研究すればするほど実に面白いのです。

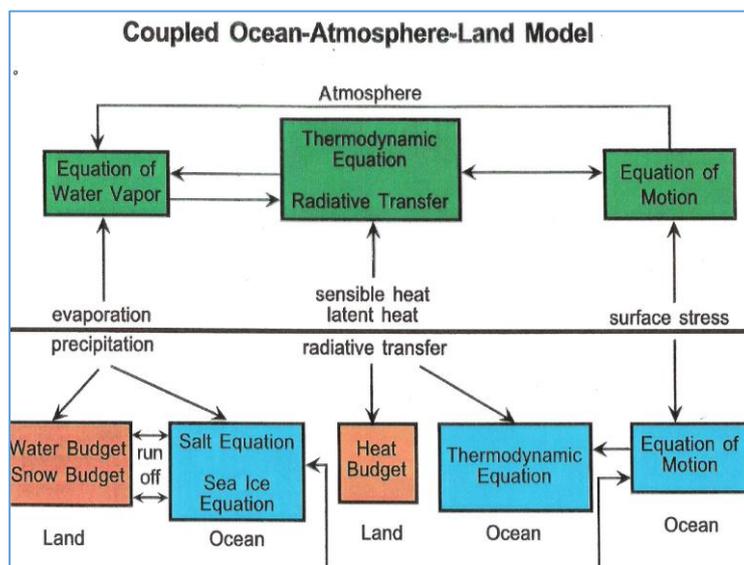


だから、海の温暖化の役割というのを研究するのに、大気・海洋結合モデルというのを開発して、温暖化の気候変動というものが、海と大気の相互作用で一体どういうメカニズムで起こっているかということの研究してきました。今日はその話をしてみたいと思います。

この問題を研究するには、大気・海洋結合モデルというものを使います。1960年の中ごろから友達のカーク・ブライアンという人と一緒に米国海洋大気局の地球流体研究所で温暖化の開発を始めたのですけれども、本当に使い物になるモデルをつくるにはとても時間がかかりました。今日は、まず大気・海洋結合モデルというのが一体どういうものかということから話をさせていただきます。

最初のスライド [スライド2] が大気・海洋結合モデルというものの概要を示したものです。これは全部物理法則。だから、大気・海洋結合モデルというのは、もともと物理法則に基づいてつくったものです。でも、最初のはしりは、と申しますと、私が大学院に入ったころちょうど数値天気予報というものがプリンストンで研究が始まって、大学院に入ったときに非常に感銘を受けて、それから天気の数値予報というものを研究する。それを始めていくうちにだんだん、特にアメリカに移ってからは、その数値予報モデルを発展させて、そして気候のモデルにして、それを使って研究することとなりました。

数値天気予報のモデルは、皆さん、よくご存じだと思います。というのは、毎日の天気予報をご覧になるとわかるわけですが、流体力学の運動方程式、熱力学の式、水蒸気の連続の式という、そういう物理法則を使って、そして天気がどういうふうに変っていくかというのを予測する。



だから、毎日、全世界の観測ネットワークを使って、まず初期条件、現在の天気の状態はどうかと。それを入力して、それをこういう緑のボックスがありますが、ああいうものを使って、そして細かく小さなステップで応用をします。それを24時間やったのが1日天気予報ですね。1日予報。このごろは数日ぐらいでも、なかなかよく予報が当たります。

だから、僕がアメリカで日本の天気予報を毎日見て、日本の天気というのは実に面白いのです。いろいろなことが起こって、しかもものすごい大雨が降ったり、台風が次から次へ出てきたり。今でもアメリカの天気予報よりも日本の天気予報に興味があります。見てみると、台風が来ても来なくても、風速の予報だとか、雨の予報だとか、そういうものが実に見事に出てくる。雨の降っている領域が西から東に向けてずっと移っていくところが見事に出てくると。それで、雨量がどう変わるか、そういうのも全部予報で出てきますよね。それから、風がどのぐらい強くなるか、24時間の雨量はどうなるか、雨域が西から東に向けてどのように動いていくか、全部出てくる。

あれは全部数値予報のモデルから出てきているのです。ウェザーキャスターは、まるで自分が全部見通したように言っているけれども、あんなものは全部デジタルに出てきたものですが、それを見せるのが実に上手ですね。手に取るようにわかるのです。これがいわゆる数値気象予報です。初めは全然当たらなかったですけども。

昔、僕が学生のころは、まだ勘で天気予報をやる、経験則でやるという考え方ですけども、僕は思うけれども、我々の分野などはそんなになんないけれども、天気予報の社会に対する貢献というのは大変で、本当はノーベル賞を与えてもいいと僕は思うのですが、それほどさように、今、天気予報というのは素晴らしくなってきたと。

それと同じようなモデルを今度は海でやって、黒潮の蛇行などもこれからどんどん予測ができます。山形さんが今一生懸命にやっておられますが、海でもまた、黒潮の蛇行から何から全部、運動方程式で計算して出すというような時代になってきました。



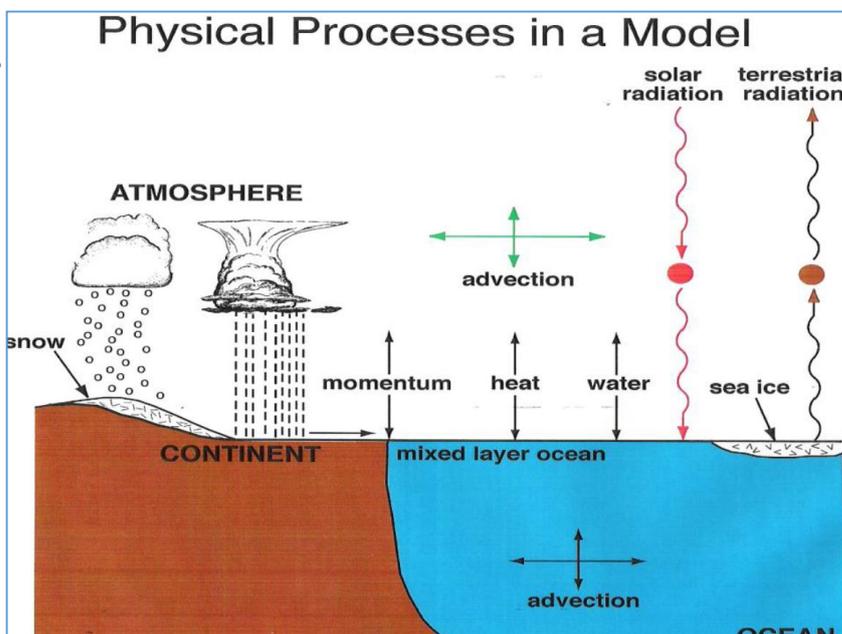
さっき言った天気予報のモデルというのは、上のグリーンのボックス [スライド 2] で表したものが、この使った物理法則です。それから、海の予報はこのブルーのボックスで、それが相互作用をして、インタラクションしているわけです。

それから今度は、予報などをやったときに大雨が降ったのはどこか、それから、このごろは予報も凝ってきて、河川流量からどこで洪水が起こるか、だからここは避難しなさい、というような予報が出てきましたね。それは茶色の水収支モデル、それから熱収支のモデルと。これを全部くっつけて一つにしてやったのが大気・海洋結合モデルです。

スパコンが今どんどん速くなっていますから、僕が今から 30 年前に今日の話もやったのですけれども、30 年前に比べて、計算機の速さは恐らく 1,000 倍ぐらい速くなっています。今よりも 1,000 倍遅い計算機でいろいろとごちよごちよやっていた話を今日お話しするということになるわけです。

そこで、大気・海洋結合モデルは、先ほども申し上げましたように、1965 年に始めて、カーク・ブライアンとやって開発したのですが、1970 年ぐらいになると、一応格好ができたのです。ところがやはり思うように、特に海の循環がよく再現できない。それで、まだあと 20 年かかって、1980 年代の終わりぐらいになって、この結合モデルなら気候の予報に使ってもいいというような段階になってきました。その話は全部はしよらせていただきまして、今日お話しするのは、80 年の終わりごろにやった気候予測の話をしたと思います。

これ [スライド 3] が大気・海洋結合モデルの入った現象です。いろいろなプロセスの絵、漫画を描いた図です。まずモデルに何が入っているかと。一番大事なのは太陽の光ですね。太陽がピカッと。そうすると地球を加熱する。それがこの solar radiation と書いてある部分です。ところが今度は、赤外放射を出すわけです。放射を出して冷却効果がある。その加熱と冷却効果がちょうどつり合って維持されているのが気候であると。



ところが、温室効果ガスがあると、その冷却効果が弱まってくるわけです。温室効果ガスをたくさん入れれば入れるほど冷却の効率が悪くなっていくのです。だから、それが温暖化のメカニズムでありまして、温室効果ガスを増やすと、温室効果ガスが直接加熱しているわけではなくて、冷却効果の効率が悪くなるから温暖化が起こるわけです。その効果がモデルに入っています。

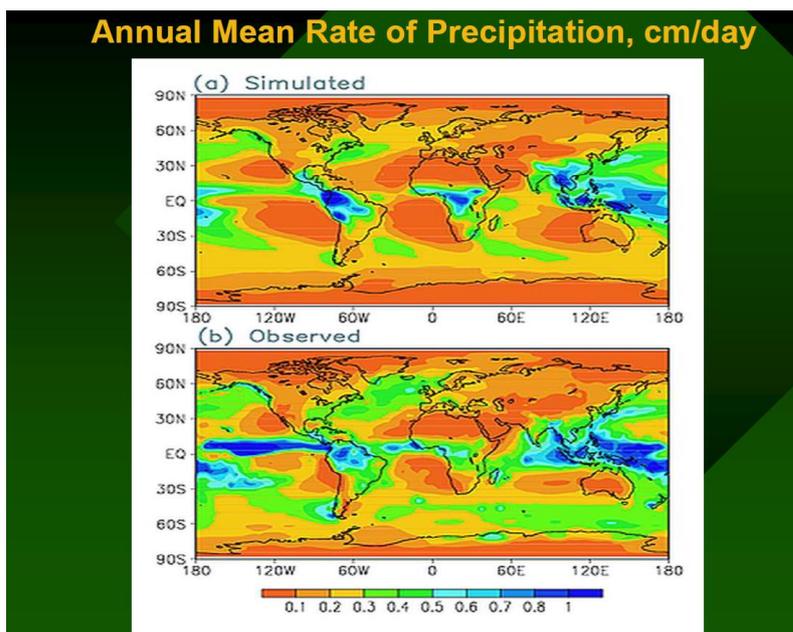
それから、大気の大循環がありますから、空気の循環が熱や運動量だとか、そういうものをぐるぐる運んでいると。それから、海にも海の大循環があります。海水を混ぜているわけです。大循環で混ぜている。そして、大気と海の間では水蒸気を交換し、熱を交換し、運動量を交換していると。大気モデルは、今度は水蒸気を累積して、飽和に達したら雨になって降ってくると。それがここに入っています。

それから、地面の温度が低いときには降水は雪になって降りてくる。それがちゃんとモデルに入っております。そして今度は、雨が降ったり、雪が降ってそれが解けた場合には、それが土壌を湿らせると。ところが、余った水は河川に流出をしてどんどん流れていくと。それで、それが海に流れ込めば、今度は海の塩分が減る。そうすると、それがまたこの海洋循環に影響を与えると。そういう具合にできているわけです。

この大気・海洋結合モデルがどういうふうになっているかと、この漫画一枚で表現しているわけです。先ほどのボックスから見るとごちゃごちゃしていますが、これもごちゃごちゃしてないわけではないのだけれども、そういうわけでありませう。

だから、どういうことかという、温暖化の研究というのは、計算機の上で仮想地球をつくると。そして、その仮想地球というものが十分リアリスティックであれば、そのモデルを使って計算機の上で数値実験をやると。実際に温室効果ガスを大気に入れて、それでどう気温が上がるかというのをやるのは大変ですけれども、計算機の上でやるならいいですね。だから、そういう仮想地球で数値実験をする。それにはモデルが実際の気候というものを十分再現していなければならないというわけですね。それが十分实际的であれば、今度はそれに二酸化炭素をそろそろと入れて、それで温度がどうなるか、雨がどう変わるか、ストームがどうなるか、干ばつはどうなるか、洪水はどうなるか、そういうのを全部調べていくのです。これが温暖化実験、あるいは予測と言ってもよろしいのですが、そういうわけです。

これ [スライド 4] はモデルで再現した雨の分布です。上がモデルで再現した雨の分布。下は観測の雨の分布です。水色のところが雨のたくさん降ったところで、茶色がかったところは雨があまり降らないところです。上と下を比較していただきますと、完全に合っているわけではありませんけれども、例えば西太平洋の雨の分布だとか、アフリカ、東太平洋の雨の分布など、モデルが見事に再現しています。



それから、アメリカの南カリフォルニア、メキシコの北のほう。それから、サハラ砂漠のところは雨が降っていません。モデルも観測もそうです。それから、中央アジア、アラビア砂漠、ゴビ砂漠等のところのモデルは、雨が観測と同じように降っていません。

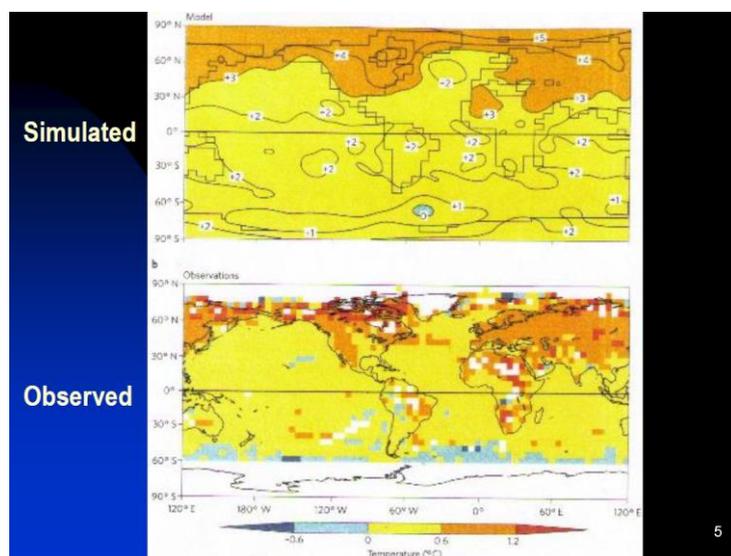
このぐらいはモデルでも実際の雨の分布を再現するのです。これで温室効果ガスをどんどん増やして、これがどのように変わるか、それから、砂漠の乾いたところの分布がどう変わるか、雨の量がどう変わるかというのを調べる。これが温暖化予測、温暖化実験なのです。

さて、いよいよ戻ってきますけれども、今から約30年前、1989年に出した論文なのですが、そのころ温暖化予測をやったのです。そのころ温室効果ガスの増加というのを見ると、大体年に1%ずつぐらい温室効果ガスが増えていた。今も大体そのぐらいで増えているのです。そのぐらいの割合で増やしたときに温度がどう変わるかという話を今日はしてみたいと思います。

そこで、その温度変化に海はどういう役割をしておるかということです。その話を同時にしてみたいというのが今日の話の概要です。

この上側にあるやつ [スライド5] が1989の結果で、温室効果ガスを1%ずつ増やしていったら、それを70年間やりますと、温室効果ガスの量は倍増になるのです。だから、70年間を時間積分して、温度がどのように変わるかというのを示したのが上側の絵でございます。大体、茶色のところが黄色のところよりは温暖化の大きいところ。これを見ますと、北半球では少なくとも温度の上がり方は、緯度が高くなるほど大きくなっています。北極海が一番大きい。そしてユーラシア大陸、それから、北米大陸では北東のほうのところ特に温暖化が高いことがわかります。

それから、もう一つ言えることは、陸のほうが海よりも温暖化は大きいと。残念ながら、このころのモデルは粗くて、日本列島はメッシュが粗過ぎて入ってないのです。どうもすみません。今のはそんなことないですよ。今は天気予報のモデルと同じように、細かいメッシュでやっています。



それで、なぜ温暖化が緯度が上がるに従って大きくなるかといいますと、暖かくなってくると海氷が減るのです。現に今ものすごい勢いで減っています。海氷が減る。それから、雪解けの季節が早くなる。だから、雪の量も陸面ではどんどん減る。そういうわけで、海氷が減ることによって高緯度で、海氷は何をするかという、太陽の光を反射する。雪も太陽の光を大きく反射すると。それがだんだん北のほうに北半球で寄っていくと、高緯度の海氷の

面積も小さくなるし、雪の面積も小さくなる。だから、温暖化は高緯度になるほど大きいと。

ところが陸の上では雪は海氷よりもっと低緯度のほうに出てきますから、それもどんどん後退していくのです。だから温暖化というのは高緯度になるほど大きいと、こういうわけです。

でも、よくご覧になるとわかるけれども、大西洋の北部だと、あそこで温暖化がうんと小さくなっていますね。これは後で説明しますが、海の影響が非常に効いているのです。それが今日の話の核心なのです。

今度は、どのように変化しているのだろうか。過去数十年間の温暖化というものを、過去数十年間に温度がどのように変化したかという分布を出したのがこの下のほうの絵 [スライド5] なのです。ただ、もともと変化の大きさは、上の絵のほうが下の絵よりも5倍ぐらい大きいのです。そこで、それが同じに見えるように、ちょうど茶色と黄色の境を、下のほうは5分の1にしてやると、このような結果になるのです。うまくカラーを調節して比較できるようにしたわけです。

そうしますと、これはなかなか合っているじゃないかと。驚くべきだと。自分でもびっくりしたのです。だから、この間「Nature」に論文を書きましたから、「Nature Climate Change」というのですけれども、それをご覧になってください。それにちゃんと出ています。温暖化はでたらめだと言う人もいるけれども、それほどでもないぞと、こう言ったのですけれども。

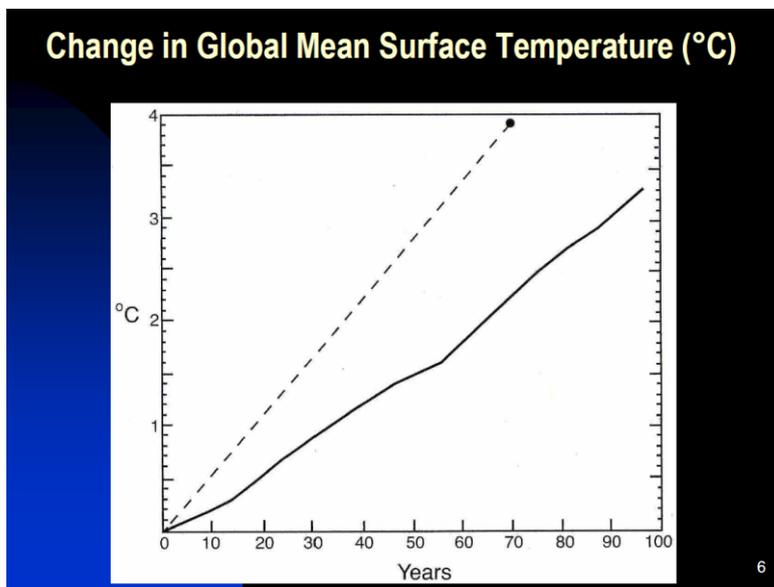


でも、一つ驚いたことは、南半球を見てください。今の説明によれば、南半球だって海氷はあるのです。冬になったら海氷は、なんと南緯55度ぐらいまでずっと下に広がっていくのです。それが、夏になると海氷というのは南半球でずっと減っていく。そして、南極大陸のそばまでずっと後退するのです。それでまた冬、わっと出てくるのです。だから、アルベド・フィードバックというのですけれども、海氷による温度の変化の増幅作用というものは南半球にだってあるはずなのに、なんと、上で見ても、ちょっとブルーのゼロの円があって、南半球で、南極環海で一つも温暖化していないのです。

だから、我々が1989年に論文を出したときには、結合モデルでやったのはいいけれども、あれはまゆつばだよ、とは言わないでも、そう言う人がたくさんおりました。ところが、驚くなかれ、この南の過去数十年を見ると、観測も南極環海で一つも温度が上がっていないのです。ひょっとすると、むしろマイナスに、温暖化どころではなくて冷えたのではないかということなのです。

特に海洋力学者の間に、この結果に対して疑問を持っている人がいるのですが、だんだん観測を見ていると、でたらめではないのではないかという。我々は、我々のモデルでやったらこうなったのだ、とこう言ったのですけれども。だから、南半球と北半球の温暖化のコントラストというものが実に驚くべきことであって、半球で全く違うのだと。こういうのが我々の論文の結論だったのです。

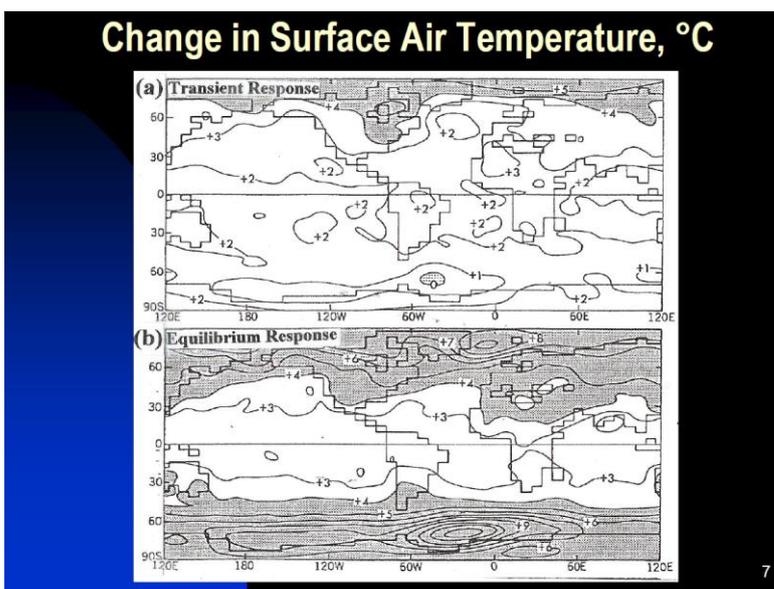
そこでこれ [スライド 6] を見ますと、地球の全球平均した温暖化というのは、ここは時間で、10年、20年、30年、40年、50年、60年、70年たちますと、福利で1%で上げていくと、ちょうど倍になるのです。この黒い実線で示したのが70年までの温暖化で2.2度ですね。70年で2.2度温度は上がるのです。だから、これが恐らく今世紀の中ごろか後半ごろかの状況ですね。



ところが、時間を十分与えて、大気と海洋が平衡状態になるまでCO₂の倍増実験を行った場合には、なんと温暖化は4度に近い、3.8度にもなるのですね。この状態を **Equilibrium Response** というのですが、そうなるのです。

そうすると、平衡状態になるまでは海が温暖化を遅らせているという結論になるのです。だから、実際の温暖化は、遅れがなかった場合に比べて、約60%から65%ぐらいしか暖まらない。それで、遅れがない場合に比べると、約倍増したところで30年ぐらい温暖化が遅れるのです。

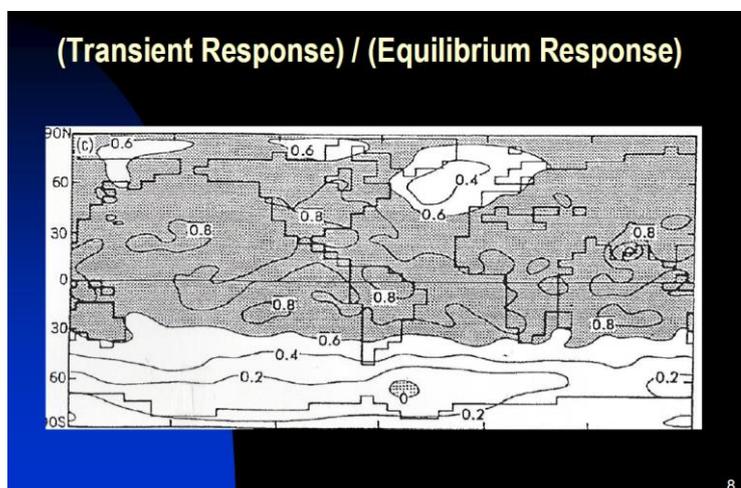
では、それは一体どのように遅れているかというのを示したのが次の絵 [スライド 7] です。これをご覧になりますとわかりますけれども、上のほうが、先ほどお示した絵なのだけれども、ちょっと位置が微妙に違ってきますので、これは先ほどのやつで、南のほうはひとつも暖まっていません。下のほうは、遅れがなかったときの温暖化はどうかということなのです。



そうすると、北半球を見てみますと、値は小さいけれども、高緯度になるに従って温暖化は大きくなる。上のほうは、遅れによって、南極環海ではひとつも暖まらないと。ところが、遅れがない場合は、南極環海で非常に大きな、特にウェッデル海の外のところでものすごい温暖化が起こるのです。この場合は、温暖化の **Polar Amplification** というものが起こっていると。南も北も起こっていると。ところが南は、海の影響によって、上に示すように、ほとんど実際には温暖化が起こっていない。観測でも起こっていないと。こういう話であります。

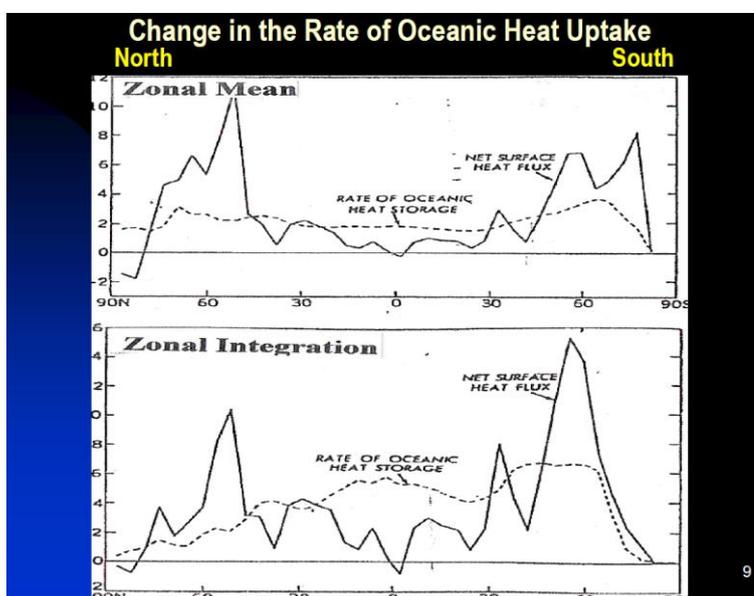
この [スライド 8] を見ますとわかりますが、南極環海では、70 年目で倍増の時間でたった 20% しか温暖化が起こらないと。もう一つは、北部大西洋でも温暖化はひとつも起こらないわけです。なぜこういうことが起こるのかというのがこの次の話になります。

日本の上だとか北半球の大部分の場所、北部大西洋を除いては、温暖化というのは大体、遅れはたった 20%。0.8 になっていますから、20% ぐらいがずっと。だから、この辺では遅れが大体 15 年ぐらいなのです。70 年の段階になったら遅れが見えないのです。だから、陸も海もやはり 0.8 ですね。海のほうが特に遅れるとは出ていないのですが、そういう話です。



それでは、どうしてこういうことが起きるかというので、次の絵 [スライド 9] をお見せします。これで見たいのは、南は普通の対流と逆なのです。でも、それは最近になって始まったので、昔はこれでおかしくなかったのですが、今は北と南をみんな逆にプロットしていますから注意してください。こちらは南緯 90 度、向こうは北緯 90 度です。縦軸には **Rate of Oceanic Heat Uptake**——熱が大気から海に向かって行く大きさです。

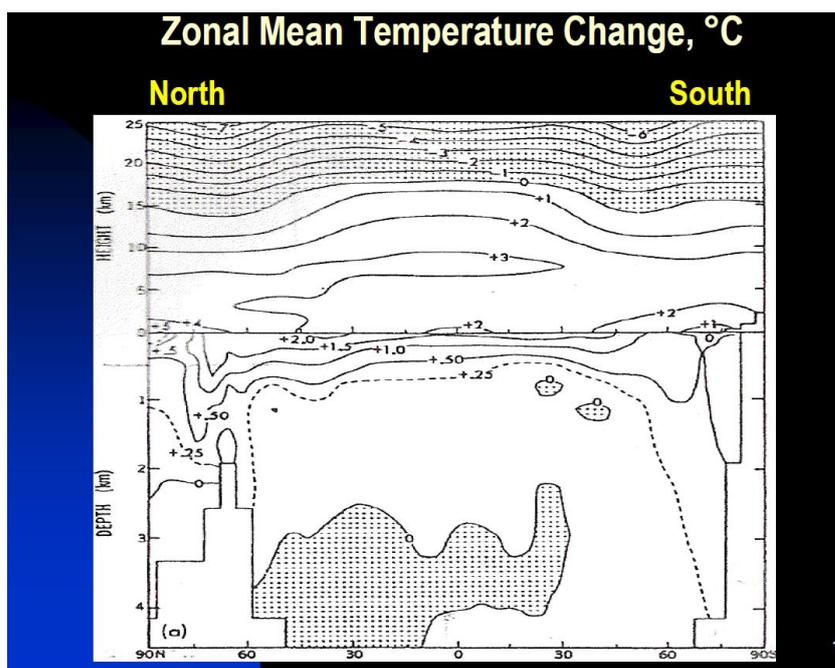
北緯 60 度、50 度のところを見ますと、海がうんと熱を吸っていると。太平洋はあまり北までいきませんから、主として北部大西洋で海が熱を吸っていると。これはどういうことかという、南から湾流がこう来て、北部大西洋まで行って、それで、暖かい、塩辛い水が低緯度からぐっと来て、北へ向いて行ったらそこで冷える。



だけど塩分が高いから密度が増えて、結局沈んでいくわけです。そして、その後ずっとこう沈む。だから、対流で北部大西洋では非常に深くまで混ぜると。海が熱をたくさん吸っているのはそういうわけです。それから、一番南のほうでマキシマムがありますが、あれはウェッデル海とロス海の辺で熱をうんと吸っております。

そこで、これを東西の等緯度でぐるっと積分しますとどうなるかというのが下のほうにあります。そうすると、南極環海ではすごい量の熱を吸っているのです。これを見てもわかります。一体、南極環海で何が起きているのかということなのです。

それで次の絵[スライド 10]を見ますと、この絵は説明を必要としますが、こちらが南で、こちらが北です。この横の線の上は大気の変化です。下は海の温度変化です。普通の緯度では、深いところでは大して温暖化はまだ起こっていない。大体、上の 500 メートルぐらいに限られているのですが、大西洋の北と、それから一番深くいっているのが、ウェッデル海とロス海で温暖化が深く penetrate しているということがよくわかります。

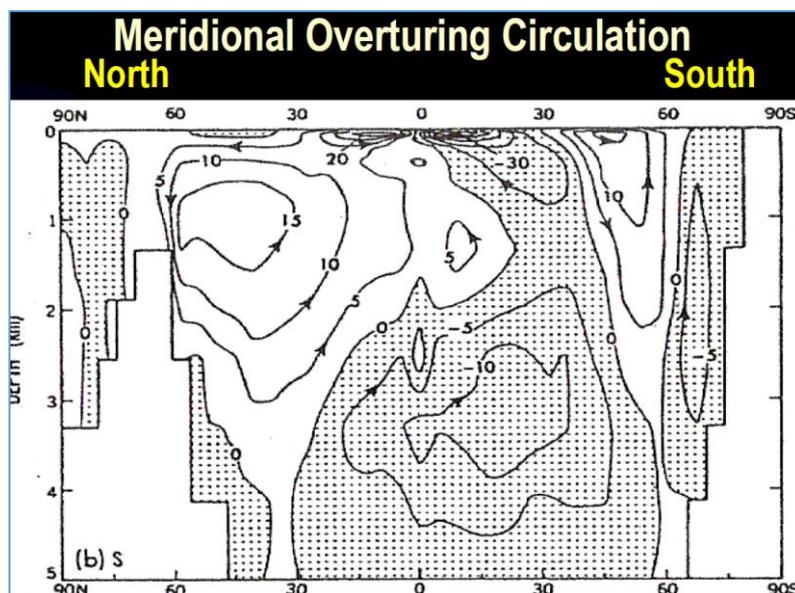


でも、先ほど見せたように、一番大きく海が熱を吸っているのは南極環海なのです。どういことが起きているのかというと、南極環海では、例えば、先ほど申し上げましたけれども、南極の海氷がどんどん北に向いて広がって行って、海の水というのは塩を含んでおりますから、その水が凍ると塩を析出して、そして氷ができます。そうすると、塩分が上がって重くなります。そうすると、冷たい水であるのですけれども、とにかく周りの水よりは重くなって、それが沈んでいくと。それが一番大きな対流のメカニズムとなります。

ところが、それをやっているとき、塩辛い水がどんどん下に降りていくではないですか。塩が。そうですね。そうすると、しばらくすると、海の成層がそれでも安定なのに、ますます安定になって、対流は止まってしまう。だから、それだけでは説明にならないのです。なぜ対流がこんな深いところまで入っているのかということを説明しなければならない。こういうわけです。

これを見るとわかるのですが、この対流が深く入っていく根本的な理由は、南極環海というのがぐるっと回っているのです。ところが、ほかの緯度は大抵大陸が横切っていて、海の両側に大陸があるのです。ところが南極はぐるっと回っている。これと関係があるのです。

ここでいわゆる海の鉛直循環というのはどうなっているかというのを調べてみますと、南極環海をご覧になりますと [スライド 11]、60度の辺で下から深いところからぐっと水がわき上がっているのです。そして、それがこう行って、こう曲がってくると。大体30度ぐらいまで入っているのです。この南極環海は、ものすごい西風が吹いているのです。そうすると、南極周海流というのがずっと流れてぐるぐる回っているのです。そうすると、



こういう、東に向いて海流が流れているのです。その海流にコリオリ力が働いて、南半球はコリオリ力の向きが北半球とは逆ですから、こう進んでいくのです。普通は風によって、風成循環というのですが、それはそれほど深くまでは絶対に行かないのです。ところが、3キロ下までぐっとまた沈み込んでいる。それからぐっと上がってくる。それは、南極環海というものがぐるっと回っていることと関係があるのです。それを詳しく説明するのは海洋力学の細かな話になりますので、省かせていただきます。

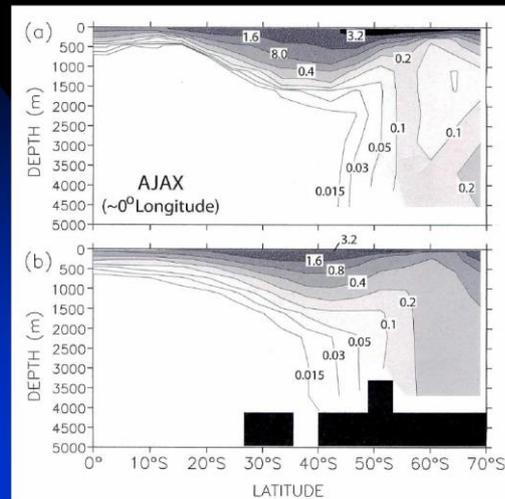
そして、深いところに上がっていれば、塩辛い水が下に向いて塩がどんどん降りていったけれども、今度は塩辛い水をその深い湧昇流がぐーっと上を向いて運んでいくのです。そうすると、上から対流で塩分が下に行くけれども、湧昇流で塩分を上を運ぶと。その両方がびたりとやって、対流が起こり続けることができる。ところが湧昇流がなかったら、しばらくしたら塩辛い水が下にたまってそれでおしまいと、こういうわけです。では、なぜそんなところに湧昇流があるかというのが、元はと言えば、南極周海流がぐるっと回っていると、こういうことなのです。

それで、今度はだんだん話がまた元へ戻ってきて、深く塩も混ぜるし、熱も混ぜる。そうすると結局、元はと言えば、南極周海流がぐるっと回っているために対流というものが深いところまで行く。そうすると熱も深いところまで行く。そうすると、南極環海の温暖化というものが起こらなくなる。だから、北半球と比較して、南極環海はぐるっと回っているために非常に深い対流というものが起こるのだと、こういうわけでありませう。

この南極環海というのは、いろいろな議論がありますけれども、今から4000万年ぐらいに大体開いたのです。ドレーク海峡というのがあるのですが、南半球の先と、それから南極海に出るパーマー半島というのがありますが、その間がこう開いたのです。

Simulation of CFC, Dixon, Bullister et al., 1996

というわけで、現にいろいろ喧々がくがくの議論があるのです。海洋力学者は、結局このモデルはメソスケール（中規模現象）の解像をしていないから駄目だと言っているわけですが、実際にこれは [スライド 12] 同じモデルを使って CFC のトレーサー、このごろは高精度な計測もありますから、トレーサーを測ることができる。

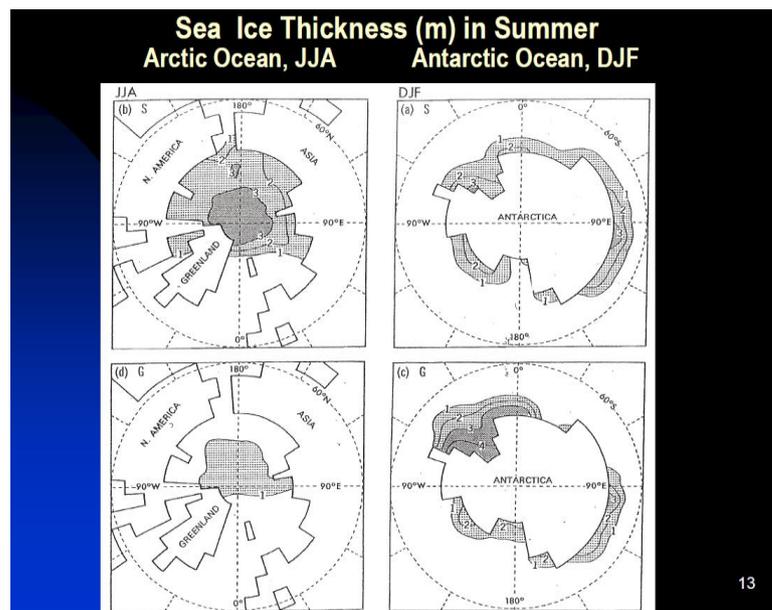


12

そうすると、南極環海で観測と同じように、CFC が深いところまで入っていく。だから、恐らく僕のモデルは、メソスケールは全くリゾルブされていないけれども、でたらめではないと。またその話をやると、またそれも長くなりますので、ここで勘弁させていただきます。そこで、言うとならば、南極環海が暖まらないのは、深く水が混ぜて暖まらないのだというのが結論であります。

それで、今度面白いのは、海水はどうなのかと。ここで海水をご覧になりますと [スライド 13]、左のほうが夏の北極海の海水です。先ほども申し上げましたが、海水がどんどん減ると。北極海ではどんどん減っているのです。3メートルの厚さがあったのが1メートルに下がります。だから、夏の海水はどんどん減っていくと。

これがまた非常に大きなもので、シロクマが困っているという話が漫画でよく出るのを見ますが、海水

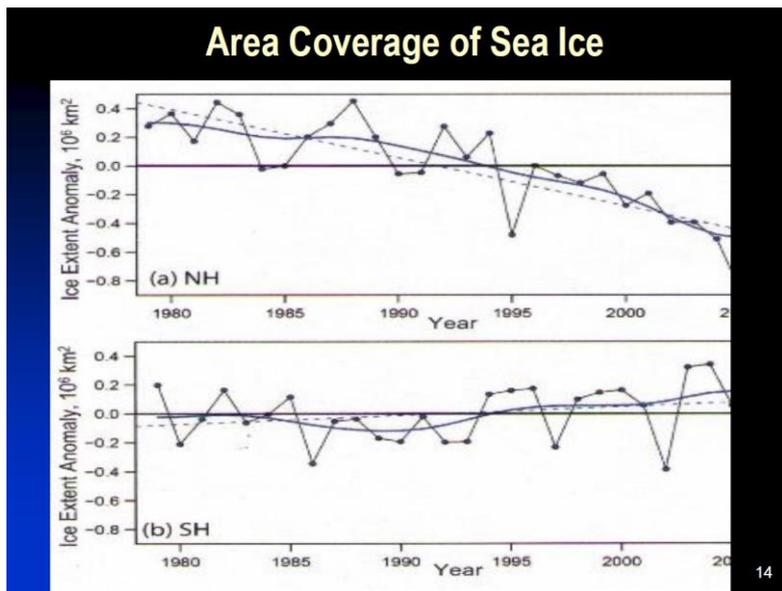


13

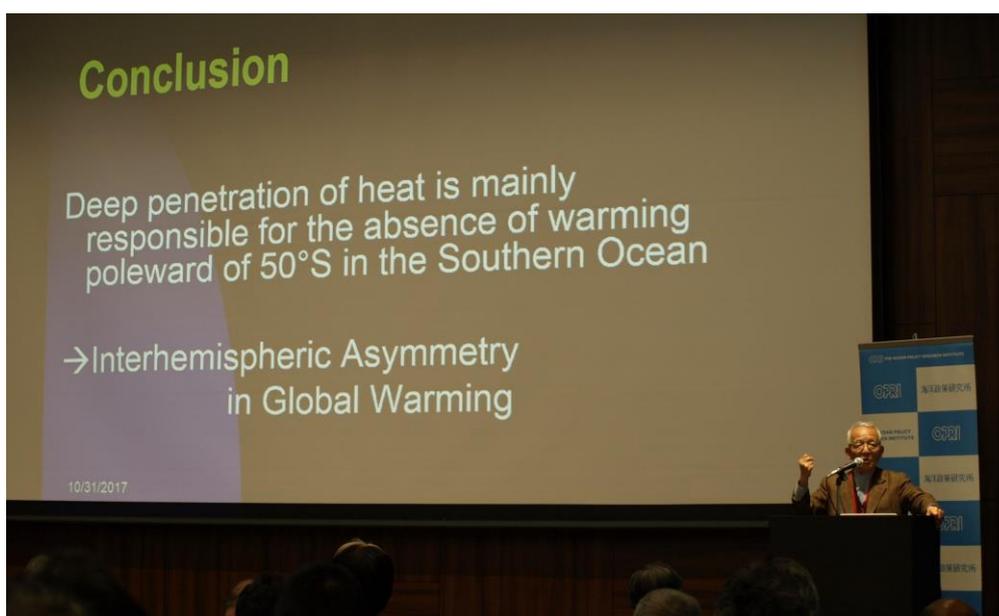
氷はどんどん減る。でも、ロシアのプーチン大統領は、ああ、それは素晴らしい、北極海にはたくさんのナチュラルリソースがうずもっておる、と。だから、プーチン大統領は非常に期待しているのではないのでしょうか。それから温暖化も起こるし、それは凍土が解けるといふこともあるけれども、でもロシアに住んでいたらやはり、温暖化が一番北で上がるのですから、僕はやはり温暖化があったほうがいいのではないかと個人的には思います。一概に温暖化を目の敵のように言うけれども、悪いことばかりでもないのです、その点も考えに入れておいてもいいかもしれない。

それから、南半球はどうかというと、これは南半球の夏の分布ですから、その海氷なのです。ほとんど変わってないのですが、驚くばかりのことは、ウェッデル海で海氷が厚くなるのです。これは驚くばかりの事です。ウェッデル海でどんどん厚くなってくる。でも、冬のほうを見ても、やはりウェッデル海で厚くなるのですが、ほかのところの海氷は、温暖化が起こっても二酸化炭素が増えてもひとつも海氷は変わらない。それは観測にも同じようなことが起こっています。これも我々のモデルがでたらめでないという一つの証拠だと思います。

これ [スライド 14] は観測の年平均の海氷域です。北半球の海氷は、年に大体2.5%ぐらいずつ減っています。南半球は、年に約0.5%ずつ上がっています。少なくとも定性的にはモデルの方向と全く一致しているわけです。南半球では少しずつ増えている。でも、南半球の南極圏以外はほとんど変わっていません。北半球の北極海ではめちやくちやに下がっているのに、南のほうではほとんど変わってないと。



これまでお話ししたのは、温暖化における海の役割。特に南極環海というのは非常に面白い。ところが、南極環海というのは、実は炭素循環です。絵は1枚しかありませんけれども [スライド 16]、これから炭素循環の話をさせていただきます。



どういふことかといいますと、大体、大気
の二酸化炭素の量というのは毎年 1%ずつ
上がっていくと言いました。この実験で 1%
ずつ上がっていくと言いました。そして、現
在これまでのところは、石炭・石油などを燃
やして大気中に放出した二酸化炭素の約半
分は海が吸っているのです。海が吸わなかつ
たら大変。半分は海が吸っている。これが海
の非常に大きな役割なのです。

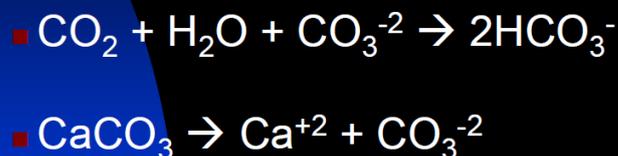
ところが、海は吸っているのだけれども、どうやって吸っているかという、炭酸ガスの
ガスとして吸っているのではなくて、乖離している、**dissolution** なのです。乖離している
ものは何かといいますと……、これがありますが、これはあまり変に話をすると良くないの
ですけれども、やらせていただくというのは大事なことです。ここで CO₂ と H₂O が
ありますね。これが炭酸イオンを使って HCO₃ のこれになるのです。



そこで僕は考えたのだけれども、これは我々、**Sarmiento** とやっているのですが、僕はそ
のころ共同研究したけれども、つんぼ棧敷で、何が起きているかよくわかっていなかった。
だけど、こうやって少しずつ炭酸イオンというものを深海でつくるのです。だけど、やはり
それを上にもっていかないといけないのだけれども、ということを考えてみると、最近思い
当たったのは、南極環海で深く混ぜていると、深海でできた炭酸イオンというものが海の上
半分に運ばれていく。そうすると、二酸化炭素が来ても、ある程度はそのサプライで、まだ
そういう **dissolution** が起こると。

ただし、この実験でやると、本世紀の後半ぐらいになると、50%ずつ取っていたやつが、
大気中の二酸化炭素をどんどん増やしていても、海の取るパーセンテージが横ばいし始め
るのです。もうこれ以上、海の吸収は増えなくなるというのは、炭酸イオンがだんだん不足
して、こういうことが起こるらしいというのです。

Disolution of CO₂ into Ocean



Sarmiento et al., 1998, Nature

16

ですから、これがエネルギーのポリシーというものに非常に大事になる。というのは、今世紀の後半ぐらいになってくると、海が今までのようにどんどん吸ってくれなくなると。だから、それまでにいわゆる化石燃料を何とか使わないで、そして、できるだけオルタナティブ・ソースエネルギー、風力だとか太陽光だとか、そういうものをどんどん使うようにする。そういう体制を、あと 50 年はあるから、その間に必死になってつくっていくと。そのほうがクリーンエネルギーだと。

そういう意味で、この炭酸イオンの問題というのはこれから大問題で、山形さんに聞くと、2021 年から 2030 年にかけて IOC が ocean observation の decade for sustainable environment を発足させようとしています。

それから、これが酸性度などにも関係する。そうすると、海洋の環境がどう変わるか、徹底的に世界的に観測するということがますます大事になってくると。そうすることによって、将来のエネルギーポリシーというものがどういうふうに行くべきであるかということです。

だから、温暖化で予測しても、まだ今の段階で海洋の生物化学サイクルのモデリングというのは、こう言うては悪いけれども、我々の物理モデルに比べると、はるかに見劣りがするのです。だから、そういう意味で、ぜひ International UN Decade of Ocean Observation for Sustainable Development というのを大いに世界で協力してやっていただきたいというのが私の最後のメッセージであります。どうも。



■特別対談「眞鍋淑郎×山形俊男」

眞鍋 淑郎 博士（プリンストン大学上席研究員）

山形 俊男 博士（海洋研究開発機構特任上席研究員）

（山形博士） 本日は、皆さん、お忙しいところ、ありがとうございました。台風が来ているのでどうかと思ったのですけれども、とてもよい天気になって良かったと思います。今日は、海の未来に向けた特別対談ということで、眞鍋先生に地球温暖化について、海の温暖化がいかに重要かをお話いただきました。実際、この30年間で地球大気中の二酸化炭素の濃度は、350ppmから、今や410ppmに近づいています。先ほどの眞鍋先生のお話にありましたように、先生は随分昔、30年も前に毎年1%ぐらい濃度が増えると大胆に仮定しまして、二酸化炭素倍増実験をやらせまして、その結果が定性的に非常にその後の観測に合っているという話がありました。

実際、私も昨日の夜、計算してみたのですが、この30年間で大体0.6%から0.7%ぐらいで二酸化炭素濃度が増えているようです。そういうことで、極めて的確にシミュレーションされたのだなと。それで、このままいくと30年後には500ppmぐらいになる。今世紀末には、驚くなかれ、670ppmぐらいいくのではないかと。ビジネス・アズ・ユージュアルというか、対策もなされず、そのままいってしまうとこのぐらいになりそうです。



眞鍋先生は、30年前に非常に的確に大気・海洋の大循環モデルを用いてそれを説明され、その結果として南極周極海域の重要性を指摘されました。あのあたりは西風が強くて、海流がぐるっと地球を一周して回って、南極周極流というのがあります。それが同時に鉛直の循環系もつくる。そして、対流による沈降を継続して活発に行わせているというお話もありました。ある意味では海が熱を効率良く深いところに運んでくれている、大気を冷やしてくれている、つまり温暖化を緩和してくれているのです。逆に言うと、海が暖まって、効率良く熱を海の深いところに運び込んでいくということ、それを見事に説明されました。南極海は、そういう意味で鉛直の混合が非常に活発であることが重要なのだというお話でした。

私はずっとエルニーニョとかダイポールなど熱帯の気候変動の研究をやってきたので、それで、先生のお話を聞いていて、熱帯はどうかと考えました。熱帯はかなり違うのです。熱帯では地球温暖化はむしろ逆に海の混合を抑えてしまうのです。つまり、海の表面が暖まると、非常に薄い表面の層がすごく温度が高くなってしまいますので、下の冷たい水との間に温度成層ができて、安定してしまい、風が吹いても簡単に海水の上下混合ができないのです。加えて、熱帯では風が非常に弱いですね。そういう意味で、熱帯は非常に薄い表層の海水

温度が上がってしまいます。特にインド洋では海洋表層の温暖化が非常に進んでいる。それがいろいろな悪さを引き起こすこととなります。そんなふうに先生のお話を私は熱帯もちらちらと眺めながらお聞きしていました。それで南極海との違いは非常に面白いなど。混合が非常に活発な海と混合が弱い海の違い、低緯度の海と高緯度の海との違い、それから、南半球と北半球の違いですね。

同時にまた先生は、二酸化炭素濃度を倍増した場合の最終的な大気と海洋の平衡状態、すなわち **Equilibrium Response** のお話と、それに至る過渡的なプロセス、すなわち **Transient Response** のお話をされ、そして、温暖化に関して海洋循環の存在のために数十年の遅れが起きることを示されました。数十年の遅れ、これは実に面白い。主に海洋の表層から 500 メートル、700 メートルぐらいまでのところが密接に関係していると思います。そうすると、その遅れというのは何が起こすのでしょうか。海には中層循環というのがあります。この時定数が 50 年とかそれぐらいのタイムスケールなのです。恐らくそれが地球温暖化の遅れを決めているだろうということです。その 50 年ぐらいの時定数。それから、もっと長い時定数もありますね。つまり、海氷の絡む問題とか深層の循環が絡む時間スケールですね。南極に沈み込んだものが返ってくる、そういった時定数です。これは恐らく数百年から 1,000 年とか 2,000 年のタイムスケールです。そういう幾つかの違った時間スケールの **transience** といいますか、それが大気海洋システムにはある。私ももともと海洋学者ですので、そんなふうに見ていました。そういうものもいろいろ表れていて、面白いなと思ったわけです。

大気平均温度は、この 100 年で大体 0.7 度ぐらい上がったというのが IPCC のレポートで示されています。地上気温はもっと高く、0.8 度ぐらい上昇しています。海面水温は 0.5 度ぐらいしか上昇していないと。まさにその差がディレイのことなのだと思うのです。北半球では 0.5 度ほど、南半球では 0.48 度ぐらい。まさに南半球のアシメトリーというのもここに出ていると思います。



1950 年代のレベルで、モデルの上ですけれども、もしも海をなくしたようなことをやってしまったら、この地球はどうだったのだろう。そんなことは現実的にできませんけれども、そうすると、恐らく北半球の温度というのは、20 度とか 30 度とか上がるというのもしえるのかなとおもいます。海というものがやはり地球の温暖化を緩和してくれている、和らげてくれている。最終的に全部海水が蒸発してしまえば、そのようになるでしょうけれども、そ

それは遠い、遠い先の話で、そうなるとは限りません。そんなこんなで先生のお話を聞きまして、海の重要性というのを私もよく理解できたと思います。

会場からのご質問の中に幾つか非常に興味深いものがありました。まず、ハイエイタスですね。地球温暖化に関しては、巨大エルニーニョが1998年にありまして、1999年ぐらいから2010年ちょっとくらいまで、十数年間にわたって、一見、地球温暖化が止まったように見えたということです。これをハイエイタス——地球温暖化の減退とか停滞とかいうのですけれども、それを受けて、地球温暖化というものはないのではないかと、世界では眞鍋先生を批判するいろいろな人たちがいます。それ、見たことか、温暖化はうそだ、と。しかし、この問題は既に解決しています。この十数年、熱帯太平洋の中央から東太平洋にかけて冷たい水がわいている状態、つまり、ラニーニャ現象に近い状態がずっとあって、熱冷まし効果を熱帯がやってくれていたとことです。太平洋は非常に広いですから、その効果を入れると、ハイエイタスが説明できるのです。その効果を入れないと、大気の温度がどんどん上がってしまうということです。

それから、次の質問はなかなか難しいのですけれども、今年の集中豪雨と地球温暖化との関係についてです。これは温暖化との間には私らが専門にする気候変動があつて、さらにお天気の話があります。だからこれは簡単ではないのですけれども、眞鍋先生、如何でしょうか。

(眞鍋博士) 今、海のことに関心があつたので、今日は夢中になって海の話ばかりしましたが、実は、水循環というのがまた昔から面白くてしょうがないのです。恐らく、人間の生活というものに対する影響から言うと、水の問題が一番。



それで、いろいろ質問があつたのですけれども、集中豪雨の話ですが、熱力学の方程式にクラウジウス・クラペイロンの式というのがあります。皆さん、ケミストリーを取られた方はクラウジウス・クラペイロンの式を覚えておられると思います。専門家でなくても。これは、飽和蒸気圧というのが、温度が上がるにつれてどのように上がるかということを決める法則になりますね。試験で一生懸命になって勉強した覚えはあるのですけれども。それを見ると、温度に対して指数関数的に飽和蒸気圧というものは上がるのです。

そうすると、例えば台風に伴って起こる集中豪雨というものを考えてみられるとわかると思うのだけれども、集中豪雨が降るときはものすごい上昇気流がうわっと上がって、それが全部飽和しているわけです。だから、そのときに雨の降る強さというのは、温暖化になって温度が上がれば、飽和蒸気圧が上がり、それが上にぐわっと昇って、それで水を全部吐き

出してくるわけですね。そういうふうに考えてくださればいいと思います。

そうすると、集中豪雨の雨というのは、クラウドジウス・クラペイロンの飽和蒸気圧が温度によってどう変わるかに比例するわけです。そうすると、同じ強さのタイミングでも、仮に同じ強さの台風だとしますが、飽和蒸気圧が上がって、雨で全部降り下ろして、それでうわって行って、どこかに行って降りてくるわけですね。でも、上へ昇るときは全部水を落としてしまうのです。そうすると、落とす水が飽和蒸気圧に比例する。飽和蒸気圧は温度に指数関数的になるのだと。そうすると、将来、たとえ台風がひとつも温暖化で強くならなくても、ものすごい大雨はどんどん増えていくわけです。

だから、今いろいろ台風が温暖化でどうなるかと、これはまた長い話で、それには入りませんが、仮に将来同じであっても、雨の量はめちゃくちゃが増えてくる。だから、100年に1回起こっていた雨は10年に1回、10年に1回起こっていた雨は毎年起こるとか、こういうことが今起こりつつあるわけです。

だから、日本のこのごろの大雨の降り方というのはただではないのです。めちゃくちゃにうわーっと降って、あの梅雨末期の雨の降り方だって、このごろものすごいと思いませんか。だから、これは特に日本にとって大問題なのです。

(山形博士) どうもありがとうございました。ということで、地球温暖化が大気の水蒸気量に影響を与えつつあるのですね。

(眞鍋博士) はい。



(山形博士) そして雨の降り方を変える。雨の降り方を変えることは、季節の様相と申しますか、季節の表れ方も変えてくる。日本の梅雨前線というものが、しとしと降るような雨でなくて、熱帯のスクールのような状態になっていますよね。あるいは雪が少なくなるとか、あるいは雪が解けるのがいつもより1カ月も早くなってしまうとか、いわゆるそういう季節の表れ方にまで影響してくる。地球温暖化というものは非常に長期的なものですけれども、実際には季節の表れ方、そして季節というのは、もっと短く言うと、日々の天気から構成されていますから、そういったものにも影響を与えているという状況がでてきたということですね。

実際、温暖化は、IPCCのレポートによりますと、大気の水蒸気量は、今世紀の末には5%から25%ぐらい増えるのではないかということです。そうすると、熱帯の降水量が非常に増加します。先ほど言いましたけれども、熱帯で水温が上昇しています。熱帯は海水温が28度ぐらいを超えると、対流が組織化される。それが下降してくるのが中緯度ですね。間に入る現象もありますが、ハドレー循環が非常に強化される。そして、乾燥するところはめちゃ

くちや乾燥するというようなことが起きるのではないかということです。温暖化は気候の変化ですけれども、気候の変化が季節の姿を変えてきているといえるでしょう。

これはドラマチックですね。数日で半年分降ってしまうとか、すごい事が起きています、そういう状況に対応するため、どういうふうにインフラをつくっていったらいいかなどという問題も既にでてきているようですね。

(眞鍋博士) 一つ申し上げたいのは、今、山形さんが、季節の表れ方が変わる、と。やはりこれは日本の話に戻りますけれども、日本がどうなるかと。

そこで、一つ僕が考えるのは、山に積んだ雪ですね。日本は山国ですよ。至る所、山ですよ。そこには雪が積もるのです。そして、春になったらその雪が解ける。だけど、何が起きるかという、温暖化が起こると雪解けの季節が早くなる。だから、山の雪がもっと早く解けてしまうということなのです。それから、温暖化が起こると、冬の雪も一部は雨になって、前は雪で積んでいたのが雨になる。

そうすると、雪解けの季節が早くなるだけではなくて、夏になったときの渇水期の水のサプライというものが、だから水が不足する期間が長くなって、それから、春に雪解けで来る水が減る。それは、冬の雪の量が、垂れ流しで冬も全部水になっていく。山の上で止まっていたほしいのが、皆、垂れ流しで、海に垂れ流して、それで今度は、春は融雪の時期が早くなる。そうすると、結局、季節の水のサプライというのは、できるだけ満遍なく一年中あってくれればいいのだけれども、それが今までほどは思うようにはいかななくなると。これが非常に大事なポイントだと思います。将来それにどういうふうに適応するか。

(山形博士) ありがとうございます。農業にも非常に関係しますし、そういう意味では、国交省の任務もますます増えてきたということになると思います。

ところで、海洋酸性化の話も先生がされました。産業革命以前、海水の pH は 8.2 ぐらいでした。それが、現在は 8.1 ぐらいに下がってきた。でも、酸性化しているわけではなくて、海水はアルカリ性なのですけれども、酸性化の方向に向かっているという意味で、我々は海洋の酸性化問題と言っているのですけれども、将来、pH が 7.8、やはりまだアルカリ側なのですけれども、7.8 ぐらいになると、先生が先ほど話された CaCO_3 、つまり炭酸カルシウムですが、このよろいを着ているような甲羅のある生物がだんだん生きにくくなる、住みにくくなるということらしいのです。



この pH7.8 というのは大気中の二酸化炭素濃度が 640ppm ぐらいで起きるらしいのです。そうすると、このままいくと、今世紀の末ぐらいにはそのぐらいの状態になってしまいます。

そういう意味で、海洋酸性化というのが現実の重大な問題となってくるということです。

確か、アメリカのワシントン州だったと記憶していますが、カキ貝の幼生の調子が悪いというので、海洋酸性化対策についての法律を導入したそうですね。そういうことで、この笹川平和財団海洋政策研究所では、海洋危機監視——**Marine Crisis Watch & Action** というプログラムをつくりまして進めています。

(山形博士) ところで数値天気予報をやるにも、先生が言われたように初期値が重要ですね。初期値、つまり観測データが重要です。その観測のネットワークをちゃんとつくろうじゃないかということになっています。そういう観測の問題を 1950 年代の冷戦構造のもとでやろうとされた先人がいました。地球のお天気情報というのは、共産国も資本主義国も体制に関係なく人々みんなが必要としている。それで、1961 年にジョン・F・ケネディが国連総会で演説しましたね。やはり全世界で共同して大気の観測ネットをつくろうよと。それが **WWW (World Weather Watch)** ——世界気象監視に発展しているのですよね。

それにならって、**Marine Crisis Watch** というのをつくろうではないかということで、プログラムを展開していこうというわけです。

そういう意味で観測の重要性、これは天気の話でも、海洋酸性化に関してもそうですし、海そのものものについても先生が最後に言及されたように、6 月の国連海洋会議でユネスコの政府間海洋学委員会は「**International (UN) Decade of Ocean Science for Sustainable Development**」—持続可能な発展のための海洋科学の 10 年ということで、2020 年から 2030 年を目指して提案しています。そういうことがますます重要になってくるなと思います。



(眞鍋博士) 今の話に関連してですが、我々、気象学でラジオゾンデを揚げて、それで世界各国が観測していたと。そのころから、今度は海でもそういうものが欲しいと。ところが、驚くべきことが起こって、アルゴフロートという観測機器ができてきて、今、大気には負けないぐらい海の観測が進んでいます。アルゴ計画です。特に海の表面から、深さ 1 キロですか、2 キロですか、そのあたりまで自動観測していますね。

(山形博士) 水深 2 キロくらいまでです。

(眞鍋博士) そう、水深 2 キロまではアルゴフロートというブイが世界で何千も稼働していますね。結構精度もいいようですね。

(山形博士) はい。

(眞鍋博士) 精度もいい。驚くべきことが起こったのです。だから、気象学者が顔負けするような素晴らしいものができた。僕は、これはもう大変なことだと思っているのです。

それで、あまりお金がかかったら困るけれども、海でもいろいろ先ほどのものがありましたし、海でもいろいろ物理要素の変数だけではなくて、化学要素ももっと測ってほしいとか、そういうのがある。

でも人によっては、なぜ海でそんなにブイを入れて、それはぜいたくではないか、もう予算削減のころだからカットしたらいいではないか、と。でも、このアルゴというのは、世界が協力して、海の状態が手に取るようにわかってくるようになったのです。先ほどの黒潮の蛇行も、アルゴがあるからリアルタイムなものができるので、だから、そういう意味では、これをぜひ中断しないでほしいのです。



(山形博士) 非常にありがたいお言葉で、もし政府の方が会場におられましたら、よろしくお願いします。

本当にアルゴは、単なる物理データ、水温とか塩分とか、そういったものだけではなくて、生物化学のデータを取ると、バイオケミカル・アルゴというのが今は進んでいます。それには当然、民間企業などが深海で測れるセンサーの開発に努力しなければいけないし、産業界と一緒にやっていかなければいけないことです。

今 3,000 個以上のアルゴフロートが世界の海に入っていますけれども、それを今日の眞鍋先生のこの図面に描きますと、真っ黒になってしまうわけです。だから、ものすごくたくさん入っていると思うかもしれないけれども、実際地球の海は広いので、そこに 3,000 個入れてもほとんど無いようなものです。しかし、そういう技術開発もして、もっともっと増やしていくことが大切です。

日本は、以前は世界で 2 番目ぐらい多くのフロートを投入して頑張っていたのですがけれども、最近、予算カット、それから、グローバルな視点がどんどん失われて内向きになっています。それで、今は世界の 5 番か 6 番目ぐらいの貢献度ではないでしょうか。

ところで、今日、眞鍋先生はご自身の最も得意なところをあまりしゃべらなかったのです。侍で言えば、利き手が右腕だったら、右腕を縛り付けて、左腕だけで我々と戦ってくれているようなものです。先生は、我々の専門分野から見ると、地球の温暖化研究の歴史上の人物であり、その方を私は隣にして、こんな生意気を言っているのですけれども、歴史上で最初に温暖化の話をやったのは誰かという、驚くなかれ、フーリエ級数のフーリエなのです。フランスのフーリエが初めてやって、温室効果という、まさに温室、ガラスの効果とフラン

ス語で呼んでいました。

その後、小学校・中学校で、こういうコップの液体にごみを入れると光がすごく散乱しますよね。あのチンダル効果で有名なチンダルがやっているのです。それから、有名なノーベル化学賞を取ったアレニウスです。19世紀の人たちですけれども、この方がまさにCO₂倍増した場合の気温の検討をやっているのです。そのとき既に環境の問題、気候の問題をやっているわけです。

それから、現実の問題として人間活動との関係がかなりあるのではないかというので出てきたのがイギリスの人でキャレンダー、めくるカレンダーと同じような名前の方ですがけれども、そして真鍋先生たちが登場しました。

先生が最初にやったのは大循環ではないのですよね。鉛直の放射対流平衡モデルでした。そしてこの温暖化の科学大を地球規模で考えるのだということで、初めて温暖化の大気海洋大循環シミュレーションを導入したのが真鍋先生です。今日は、その後の海の重要性の話をやられたわけです。

真鍋先生の初期の歴史的なお仕事は非常に重要で、私もプリンストンにいたときにお世話になった方々ですがストリックラー博士やウェザラルド博士と真鍋先生の共著論文が温暖化科学のベースになったのです。

そして、同時に非常に興味深いこと、歴史の偶然性ですけれども、真鍋先生は、1958年でしたね、東大で学位を正野先生のところで取られまして、米国に渡って夢を実現する。当時の日本にはコンピューターがない。官庁の研究所はありましたけれども、官庁の研究所というのは現業が中心ですから、なかなか自由な発想で行える研究面でのリバティーというのはなかなかないと。恐らくそういうことで頭脳流出されたのではないかと。



真鍋先生はおっしゃらないのだけれども、真鍋先生の同期の方にお聞きしたのですが、「彼はよく言っていたよ、日本じゃ研究できないからな」とおっしゃっていました。真鍋先生の先生の正野先生という方は非常なリベラリストですから、そういうのを更にけしかけたのではないかなと思います。それで多くの気象学者がアメリカに渡りました。そして世界の気象学をつくった。真鍋先生もその中におられました。

それで、最初に当時はワシントンにあった大気海洋庁の地球流体力学研究所、これはフォン・ノイマンが設計したものですけれども、そこにご挨拶に行ったということです。大気海洋庁の偉い人、多分ウェクスラーのところだと思うのですけれども、ドアを開けて入ったと。そしたら、ドアからすつとにこにこして出てくるやつがいたとお聞きしました。今日の昼間確認したのですけれども、ウェクスラーにご挨拶に行った非常に若い研究者、すれ違って出て行った人が誰だったかと、キーリングなのです。キーリングというのは、マウナ

ロシアでずっと二酸化炭素の濃度を測って来た人です。彼は 1950 年代半ばぐらいから測っていたのです。その直後、まさに危機が来たわけです。今の日本とアメリカにあるような予算カットですよ。それで、あれは続けなければいかん、とキーリングが言って予算を取りに来て、ウェクスラーが認めたというわけです。それでにこにこして帰ったと。

だから、皆さん、キーリングのハワイでの二酸化炭素濃度の計測があるじゃないですか。季節変動でぎざぎざに高低を繰り返しながら炭酸ガス濃度が年とともに増えていく図です。データの昔のほうを見てください。観測値の点がないところがありますから。予算カットのため測られてないのです。こういうものは恐ろしいことで、非常に長期間きちっとしたファンディングをして、地球環境を監視していくというのは非常に重要だと思うわけです。

そのキーリング、ウェクスラー、そういったもの全体を見ている巨人、フォン・ノイマン、そして彼が選んだもう一人の巨人、それがジョー・スマゴリンスキー所長なのです。それで眞鍋先生にジョー・スマゴリンスキーの思い出をちょっと語ってほしいと思うのですが。

(眞鍋博士) 1958 年にアメリカへ移ったのですけれども、そのときに招いてくれた人がスマゴリンスキーという人で、ちょっと信じられないようなのだけれども、とにかく気象局でそういう気候のモデルをつくるという企画があり、それで、私は彼に最初に雇われた少数の一人なのですけれども、僕が大学院で書いた論文か何かを読んでくださって、来いというので行ったのですけれども、とにかくボスとしてはこんな素晴らしい人はいるかと思われるような方でした。

アメリカはあのころ科学研究にも力を入れて、ロシアに負けたらいかんとやっていたのですけれども、彼は、雑用も何も全部研究者にはさせず、おまえたちは研究に集中しろ、と言うので、私は雑用なんかこれっぽっちもやったことがない。そして、スパコンをウエザービューローから取ってきてくれるのですけれども、とにかくあのころは今のパソコンよりもはるかに何千倍も遅いので、三十何台にするとか、それでも大変なお金でしたよ。何百万ドルというカネで、それでどうやって交渉して取ってきたのか、ウエザーサービスの計算機よりもはるかにいいような計算機を 4 年ごとぐらいに取ってきて、そして、伸び伸びと研究をやらせてくれたのです。

それで、いろいろとアップ・アンド・ダウンはあるのだけれども、論文を書くときになると、自分が本当にコントリビュートしていなければ名前には絶対に出さない。本当に誠意ある方でした。ボスだからといって、全部の論文に名前を入れる、よくありますね、こういうことは一切ない。それで、みんなやってくれ、雑用は俺一人でたくさんだ、と言ってやってくれたのです。それで、最後のほうになると予算がきつくなっ



て、辞表をここに入れて、それでワシントンに交渉に行った。俺はいい人しか雇わない、だから欠員があっても予算を将来カットしないでくれと、こういう合意を取り付けてきて、今のアメリカでもとてもそんなことできないけれども、どうやって彼はそういうことをやったのか。だから非常にありがたいポストでした。だけど、みんなそう言うのです。アメリカの人など。あんなことはなかなかできないよと。だから非常に僕は幸運だったのだと思います。

(山形博士) 懐かしいものですね。私もスマゴリンスキー所長の退職のところまで地球流体力学研究所にいました。退職のパーティーにも呼んでいただき、かわいがっていただきました。全業績の論文を部屋に持ってきてくれて、私に、トシ、持っていけ、と。それを読んで、私も歴史を個人的に勉強したのですけれども、素晴らしい人だったなと思います。やはり研究所を見て、誰が親分なのかとすぐにわかるような方なですね。「人品卑しからぬ」といいますか、しかも研究もよくわかって、そちらのマネジメントも巧み、そして人々に自由にやらせる。

実際、アメリカの素晴らしいところは、世界的な大学者というのはマネジメントにほとんど関わってないことです。眞鍋先生もそう、それからヘンリー・ストンメルもそうです。あらゆる役職に就いてないですよ。ウォルター・ムンクもそうですね。クラウス・ウイルトスキもそうです。ここにいる眞鍋先生と同じです、だから、皆さんは眞鍋先生のご経歴を見て、主席研究員でずっといるので、ちょっと驚いたかもしれませんが、まさにそういう自由な背景でやる、そして伸び伸びと発想を伸ばしていくのだということです。そういうのを守るリーダー、研究所の長としてはスマゴリンスキーがいましたし、海洋大気庁のほうにはウェクスラーがいて、そしてまた彼らは政府に非常に影響力があった。彼らは恐らくフォン・ノイマンとの関係があるので、アメリカの非常にディープなところに触っていた方なのではないかと思うのです。我が国もできるだけそういう素晴らしい体制をつくっていくことも大切ではないかと思います。

だいぶ時間も押してきました。眞鍋先生は、ブループラネットプライズの第1回の受賞者ですね。先々週でしょうか、ブループラネット賞の第26回の受賞者が出ました。お一人は、ドイツのポツダム気候影響研究所の所長さんのハンス・シェルンフーバーさんですね。この方は、温暖化の2度C未満の目標を合意設定して、世界を動かした人です。

それから、もう一人の受賞者は、スタンフォード大学の生物学部のグレッチェン・デイリー博士で、彼女は、生物多様性と生態系サービスの理解、それを環境政策にどう生かしていくか。今日は生態系の話はありませんでしたけれども、そういったところにも地球温暖化が関係する。地球の変化も関係している。それから、いかに経済、投資とか融資にも関係付けるか、そういう非常に現実的なところにも切り込んだ方です。

今回の受賞者を見て、ブループラネット賞も研究開発のところの理解から、現実の社会との問題というところに随分入ってきたのだなと思いました。つまり、この地球は、我々のいろいろな人間活動がプレネタリー・バウンダリーというのでしょうか、地球という惑星の限

界、それも惑星の中でいろいろ持続可能を担ってくる自然界がその限界に近づいてくると。それを少し超えた部分もあるのではないかと。つまり、転換点——ティッピングポイント、後戻りできない点をちょっと超えたのではないかというところで、様々な活動が行われるようになりました。

そういうときに期せずしてアメリカでは、地球環境保全の大きな流れに反対する方が一番トップに就いたと。会場からの質問にもありました。これに関してちょっと一言、眞鍋先生、お考えをおきかせいただけませんか。地球環境問題が非常に重要な、みんなで守っていかなければいけない、しかも持続可能な経済活動をしなければいけない、そういうときにトランプ大統領が出てきてしまったということです。

(眞鍋博士) 今アメリカで、ちょっと想像もできないようなことが起こっていると。最近では、ある政府系の雇い人である科学者が講演するということになったら、おまえはやってくれるな、と。恐らく酸性化の話ではないかと思うのですが、研究発表をやってはいけないという命令が出たことがあります。

それ以外にも、例えば人工衛星の予算がいろいろ影響を受けています。例えば地球の外向き長波放射(アウトゴーイング・レディエーション)をモニターしたいのだと。そういう観測の人工衛星を大統領の命令でカットする。それ以外にもいろいろな決定がありますが。

それで、若い人の就職が大変でしょう。それから、若い人でその日暮らしでようやくプロポーザルを書いてやっている人は、プロポーザルを通すことが非常に難しくなってきた。しかもパリ協定からは脱退すると。

だけど、先ほども申し上げたように、大気汚染の問題だけではなく、本当に将来の二酸化炭素、エネルギーのポリシーには石炭や石油を燃やすということができるだけ早くやめることが非常に大事です。だけど、彼はそういうものをホームワークとして勉強することも全くなさそうです。だから、頭ごなしにそういうパリ協定離脱などの決断をどんどん下して、それで今度は政府で今まで良心的にやっていた人がみんな辞めていく状況です。空席が非常に多いですよ。そういうことが今アメリカで起こりつつあるのです。

今申し上げたことは正確かどうか知りませんが、僕の聞いた範囲ではそういうことを聞きました。これはまず大問題だと思いますね。

(山形博士) 一方で、世界の学術関係では、国際科学会議(ICSU)というのがあるのですけれども、それから、社会学者の団体である国際社会科学協議会(ISSC)というのがあるのですが、画期的なことなのですから、その両方が合体していこうということが先週、台北の総会で決まりました。これはまさに地球というものを守り、そしてサイエンス、科学者が象牙の塔にいてではなくて、実際に社会変革に貢献していこうというアクションです。そういったことで、全世界の科学者が融合して、行動して、アメリカのアドミニストレーションにも影響を与えてほしいなと思っています。



1 つだけ最後に、お訊ねしたいことがあります。カズオ・イシグロさんがノーベル賞を取りました。カズオ・イシグロさんのお父様は石黒鎮雄博士で、石黒鎮雄博士は日本海洋学会のメンバーでもありましたし、私の大先輩である東大理学部の海洋物理学の初代教授、日高孝次先生が非常にバックアップしていて、1957年にユネスコ奨学金で英国の国立海洋研究所

に行けるようにアレンジしたと、日高先生の伝記に書いてあるのです。カズオ・イシグロさんのお父さんは長崎県の出身ですけれども、1958年に東大の理学部で日高先生のバックアップで学位を取っているのです。眞鍋先生は、日高先生の隣の部屋にいた気象学の正野先生のところで学位を取られました。全く同じ年、1958年なのですよね。しかも自由にやれる研究の場というものを望んで、日本の官庁の研究所には、眞鍋先生は入らなかった、石黒さんは入っていて、やはり思うところがあり、お子さん、カズオ・イシグロさんがいるのにあえて辞めて、イギリスに行ってしまった。私はそこに基礎研究の自由を求める相似性を感じるのです。

カズオ・イシグロさんのお父様の石黒鎮雄さんは、海の波とか、長崎のあびきとか、湾における海水の振動の性質、そういったものを、電気回路に非常に強かったので、電気回路でアナログ・シミュレーションの装置をどんどんつくっていたのです。眞鍋先生は、いわゆるコンピューター・シミュレーションの方へどんどんいきました。そこにも何か歴史が不思議に交錯するようなところを感じます。先ほどのキーリングさんの話もそうですけれども、石黒鎮雄先生にどこかでお会いしたことはないでしょうか。

(眞鍋博士) 会ったことは……、記憶が明瞭にはないですね。

(山形博士) その辺はおぼろげになっていたほうが夢があるのかもしれませんね。

いずれにしても、歴史的な方である眞鍋先生に今日は来ていただきまして、いろいろなお話を伺うことができました。今日の前半のご講演の部では、全体としてのお話が非常に分かり易く、眞鍋先生のエンターテナーとしての技にますます磨きがかかっているのではないかと思います。今日ここに来られるちょっと前に 1,000メートル泳いでこられたそうですので、これからもご健康で頑張ってくださいと思います。二酸化炭素の化学の問題もいろいろやっておられるらしいので、海洋酸性化ですね、次はそちらの話も詳しくお聞きしたいなと思っています。

それでは、眞鍋先生に感謝しまして、拍手でもってお送りしたいと思います。どうもありがとうございました。(拍手)