

## 第32回 環境サイエンスカフェ

テーマ 【シリーズ：気候変動の影響(5)】

温暖化が陸の生態系に与える影響—モデルシミュレーションが示すもの—

講師 伊藤 昭彦さん

(国立環境研究所 地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員)

日時 2016年3月16日(水) 18:30~20:00

会場 サロン・ド・富山房 Folio 参加者 48名



### 1 はじめに

1

2016年3月16日 サロン・ド・富山房 Folio  
第32回環境サイエンスカフェ(日立財団)

シリーズ：気候変動の影響(5)

## 温暖化が陸の生態系に 与える影響

—モデルシミュレーションが示すもの—



国立環境研究所 地球環境研究センター  
伊藤 昭彦

皆さん、こんばんは。国立環境研究所地球環境研究センターから来ました、伊藤昭彦と申します。まず日立財団には、今日、このような機会をいただきまして、大変ありがとうございます。お礼を申し上げます。

私は茨城県つくば市にある国立環境研究所で働いています。それに至るまでの自己紹介的なことをしますと、みかんで有名な愛媛県の出身で、名古屋大学農学部で森林のことをやっている林学科を卒業しました。そのころから森林には大変興味があったわけですが、当時は、地球温暖化

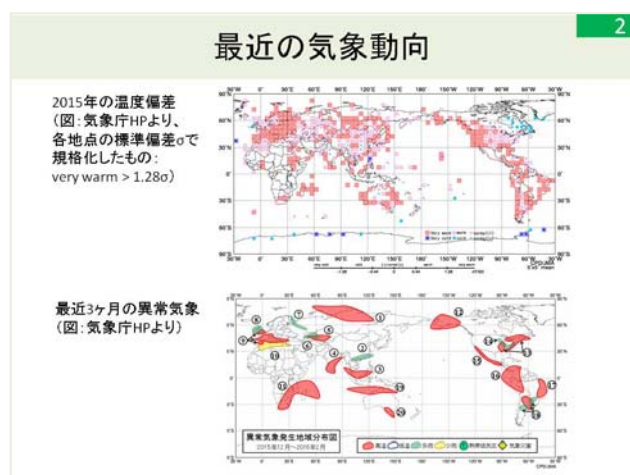
が大きな問題というわけではなく、林業をやりたいかったというのがそもその発端でした。

ところが、ご存じの方はご存じのように、林業は当時から流行の産業ではなく、ちょっと斜陽化していると言われ、林学科の中でも別な局面を拓く、新しいテーマを見つけなければいけないと言われていました。その頃、地球温暖化などの地球環境変動に森林がどういうふう効いているかを明らかにすることが新しいテーマではないかといわれ、テーマに選びました。名古屋大学の中でそういうことをやっている人もいましたが、私は特にモデルシミュレーションをやりたいのが個人の希望としてあり、そういうモデルのシミュレーション研究をやるにはどこかいいか、指導教官の先生に相談したところ「それなら筑波大学に行きなさい」と言われました。筑波大学に及川先生という教授がいて、その方が当時の陸域のモデルのシミュレーションの第一人者でした。そこに行って5年間修業し、自分のモデルを作って学位を取りました。その頃のテーマは今とほとんど変わらず、地球が温暖化したとき陸の生態系の炭素循環がどう変わっていくかについて、非常に簡単なモデルを使ってシミュレートするというのをやりました。

学位を取った後は、横浜にある海洋研究開発機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology: JAMSTEC) にポスドクで行きました。主に海洋の研究をやっている機関ですが、皆さんも「しんかい 6500」や「ちきゅう」という大きな観測船のことを聞いたことがあるかもしれません。そこには小さいながらも陸の研究をやるセクションがあり、5年半ほど勤めました。そこで海のことも勉強しつつ、陸の研究を行った後に、現在、つくばにある国立環境研究所に来た次第です。いろいろなところを流れてきましたが、ここに拠点を置いて自分の研究を進めているところです。

今日はシリーズ「気候変動の影響」の第5回ということで、前回までにサンゴ礁や海の話が聞かれたことと思います。第5回は最終回と聞きましたが、温暖化が陸の生態系に与える影響ということで、森林や草原など比較的身近な生態系にどういった影響があるかについての研究をご紹介しますと思います。ここに出られた方は温暖化の話は何回も聞かれたかもしれませんが、最初に基礎的なところをおさらいしておきたいと思います。私は研究畑にいたもので、一般の方に分かりやすく話すのは逆に難しいところがあります。分からない部分がありましたら、遠慮なくご質問していただきたいと思います。

## 2. 地球気象の現状

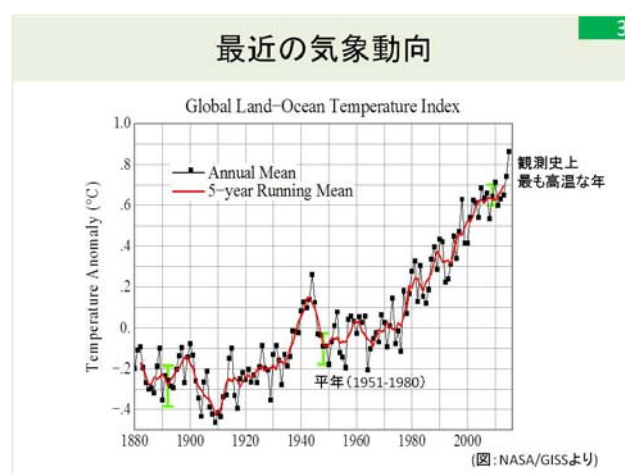


温暖化をめぐるのは、毎年のようにニュース等で暖冬や猛暑のことを耳にされるとと思います。温暖化はかなり身近に実感として感じられるようになったのではないかと思います。昨年 2015 年は観測史上最も暖かい年だったと言われています

(図2)。この図は、お手元の資料にはなくすみません。今朝取ってきたすぐ新しい図です。気象庁のホームページから転載してきたものですが、2015年、世界の気温がどうだったかを示したものです。

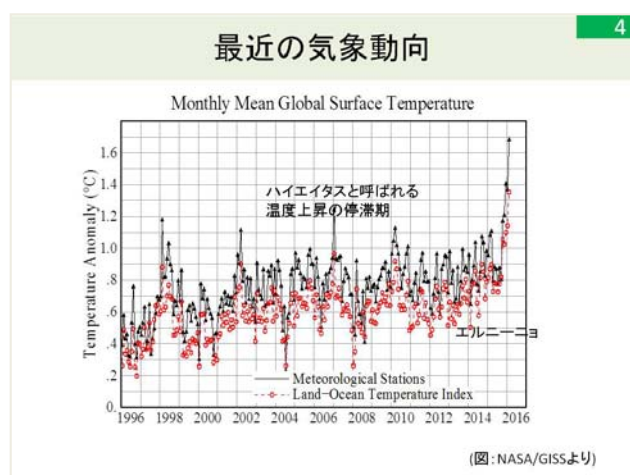
図では茶色になっていますけれども、茶色になっている部分、しかも大きな四角で書いている部分は、例年(平均値)より飛び抜けて暖かかった年になります。実は青い印、つまり温度が低かった場所も示してはいますがほとんど出てきません。地球上の陸の部分の多くが飛び抜けて暖かかった年であることを示しています。これが 2015 年の状態です。特に、ヨーロッパやアメリカなどで陸の温度が非常に高かったのが 2015 年です。温暖化だけではありません。聞かれたこともあると思いますが、太平洋のこの赤道の部分の海水が温くなるエルニーニョ現象の発生も加わった上で、このような世界的に温度が高い状況が出てきたということです。

下の図が過去3カ月間の異常気象です。2015年12月から今年2月までの間に世界でどういう異常気象があったかを示しています。本当は赤ですが、茶色のところが異常な高温があった地域です。本当は青い地域もあって低温の部分が出てきてもおかしくありませんが、この期間そういうところはなく、ほぼ至る所で温度が高くなっています。こういうデータを見ると、確かに温暖化は進みつつあるのではないかと実感されてきたのではないかと思います。



1880年から2015年まで毎年の地球の平均気温を並べたものです(図3)。1951年から1980年をゼロとした場合のずれを示しています。これより

も高いところは、この期間よりも温度が上がった場合で、逆にこちらは低かったこととなります。これを見てもらうと一目瞭然で、この時点に比べ温度がどんどん上がってきています。近年は0.6℃から、去年は最も暖かくて0.8℃近く温度が高くなっています。先ほど言いましたエルニーニョの影響も加わったものですが、今までと比べ飛び抜けて暖かかったのが昨年でした。もちろん、それまでも暖かかった年はあって、1998年の強いエルニーニョ年もありましたが、それを大きく更新する暖かさになりました。(人間活動の影響が軽微だった)産業革命前に比べて温度がどうだということがよく言われますけれども、1℃近く上がってしまったのが現在の状況です。最近十数年間のデータをもう少し詳しく見てみたいと思います。これがこれですけれども、先ほどの図をよく見ていただきますと、ここで温度が止まり気味の時期があり、最近1、2年になってまた上がっています。



詳しく月ごとに見ていくとこうなります(図4)。先ほどと同じところ、NASA (National Aeronautics and Space Administration: アメリカ航空宇宙局)のGISS (Goddard Institute for Space Studies: ゴダード宇宙科学研究所)から取ったものですが、このように2000年から2012年ぐらいまでは、実は温暖化が止まっていたハイエイトス(温暖化の停滞現象)と呼ばれている時期です。もしかしたら、何回か前に話した(国環研の)塩竈さんが関連する話をしたかもしれませんが、気象学的には非常に面白い現象があった時期です。本当はモデルで予測すると、この時期は温度が上がっていておかしくなかったのですが、なぜか温暖化が一見止まっていたような時期

になりました。それが去年ぐらいからまた上がってきたということになります。

温度がなぜ上がらなかったか。いろいろなことが言われていますけれども、エネルギー(熱)が比較的深い海中に逃げていたという説が有力です。それもいつまで続くのかが問題でしたが、ついに去年ぐらいにそれが止まって、また温度が上がり始めたということになります。エルニーニョの一時的なものなのか、それとも温暖化の再加速が始まって、どんどん上がっていくのか、まだ予断を許さないところです。もしかしたら、これからさらに温暖化が進む時期に入った可能性があるという人もいます。このように温度が上がっていくと、容易に考えられるようにいろいろな影響が及びます。私たちの生活もそうですし、農業や海、陸の生態系など様々なものに影響が出てくるのが考えられます。



私たちの身近な中で温度に応答する生物現象の一つが、桜の開花です(図5)。気象庁などが、測候所などで50年以上ずっと定点観測していますが、記録を見ていきますと、この50年間で桜の咲く時期が5日ほど早まっていると言われています。これも気象庁からお借りしてきたものですが、1961年から1970年までは、4月1日には桜の開花がここまで(日本の南西部)しか進んでいませんでしたが、1998年から2007年になると、これくらい(北関東から信州・山陰)まで来ています。4月1日時点で関東などがすっぽり入る北のほうまで桜が咲くようになりました。その分だけ地球の温暖化が影響しているのではないかとわれています。もちろん温暖化だけではなく、都市域などはヒートアイランド現象の影響もあるかもしれ

ません。都市化によって、コンクリートなどで覆われたところでは温度が上がりやすくなりますから、そういった別の要因によって温度が上がっている場所もあります。しかし、そういったものも込みにしても、全体的には温度が上がって、桜が咲く時期が早まっているということなどが言われています。これは一例です。

今年はどうなのか。春先が非常に暖かでしたので今年もかなり早く咲くのではないかと考えられる方もいるかもしれませんが、予想した結果を2つほど引用してきました。上が日本気象協会さんのもので、下がウェザーマップさんのものです。一言でいうと、1998年から2007年までの平均的ラインとそれほど変わりません。3月31日時点で東京は咲いています。3月25日がここですから、恐らく来週末には桜が咲いてしまうということですね。この2つの図は同じような感じですが、よく見ていただくと、ウェザーマップさんのほうが3月20日ごろ、横浜でいち早く咲いてしまうなど、微妙な差はありますけれども、大きく見ると東京は3月25日ごろには開花する予想になっています。言いたいことは、温暖化の影響によって桜などの開花時期が早まっているし、徐々にほかの生き物にも影響が出つつあることが徐々に見えてきているのではないかとということです。

### 3. 生態系への温暖化の影響

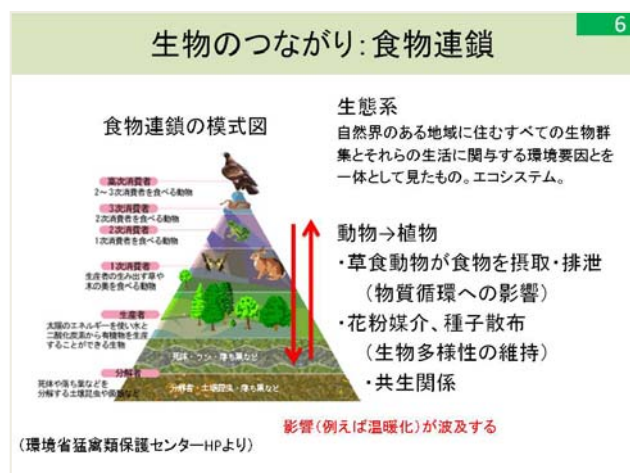
今日は陸の生態系に対して温暖化がどう影響するかお話ししますが、大部分は植物の話になります。皆さんの中には動物により興味がある方がいらっしゃるかもしれませんが、今日は私の専門である植物についてメインに話をさせていただきます

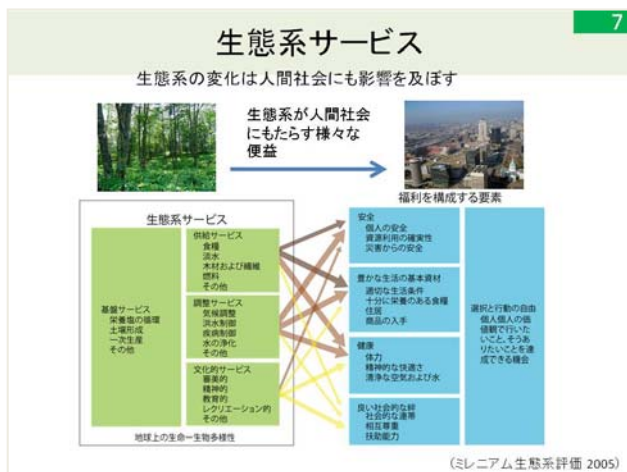
ます。なぜ植物について話すかといいますと、生態系の中で植物が特異で重要な役割を果たしているということがあります(図6)。教科書的な図で申し訳ありませんが、生態系の中で食物連鎖が行われ、そこで植物が基盤的な物質生産を行います。光合成によってバイオマスを作り、それを草食動物や肉食動物が食べていくことによって生態系が成り立っています。

私たちの視点としては、まず植物を見るのが、生態系が安定しているか、あるいは正常に機能しているかを考える上で重要になります。土台となる植物がうまくいっていれば、植物に依存する動物やその他の生物も上手くやっていけるだろうと期待できるわけです。しかし、見方によっては(食物連鎖の)上の方にいるホッキョクグマや猛禽類など、高次の捕食者、高次の消費者が重要であるという方もいらっしゃいます。なぜかという、この動物がいるかないかによって、この下の部分の土台がしっかりしているかどうか全体が分かるとも考えられるからです。

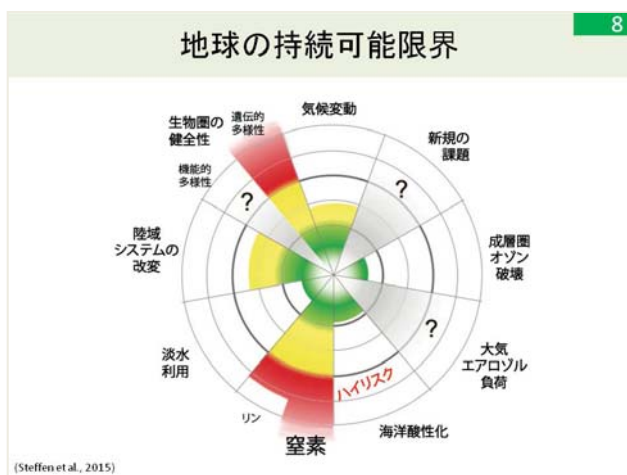
生態系は、言うまでもなく生き物同士のつながりによってできているため、生態系の中の生物の相互作用などを見ていくことが、重要な観点になります。ある部分が変わると、その影響が生物を介して他の部分にまで波及していきます。例えば植物が変わると、それを食べる動物や枯死物を利用する微生物など様々な生き物に影響していきます。実は、動物が変わると植物に影響するという逆のパターンもあります。動物は植物に依存して生きているだけではなく、植物を食べる活動によって生態系の成り立ちを変えていることもあります。例えば、ミツバチなどが花粉を媒介することで植物の生活(繁殖など)を支えていることもあります。つまり、植物だけを見ていけばいいわけではなく、本当は全体を見なければいけません。これが生態系を見る上で重要であると同時に難しいところにもなります。

生態系は生物学の中でも非常に面白いテーマで、私たちの生活にも非常に重要な役割を果たしています。もしかしたら「生態系サービス」という言葉を聞かれたことがあるかもしれません。私たちの生活は生態系からいろいろな恵みを受けます。それを2005年ごろ(註:ミレニアム生態系評価において)、生態系サービスという言葉でま





とめたものです(図7)。例えば生態系が生産、消費を行うことを通じて、私たちの社会は生態系から様々なものを得ています。例えば、空気をきれいにする浄化機能であるとか、生物が作ったバイオマスを、木材や食べ物などとして享受しています。または水をきれいにする機能やレクリエーション機能もあります。緑地や国立公園、世界の自然遺産みたいにレクリエーションができる場所も生態系は供給してくれます。それによって私たちの豊かな生活が維持されていることがあります。もちろん、東京みたいに非常にたくさん遊ぶところがある都会もいいのですが、たまには公園や山に出かけることで自然に触れる楽しみを得られると思います。そういったところから生態系のいろいろな恵みを得ています。それをもう少し考えてみますと、生態系が変わってしまうということは、私たちの生活にも間接的に影響が及ぶこととなります。ですから、私たちの生活を考える上でも生態系の変化を考えていかなければならないことが重要になります。



気候変動や生態系の問題は、近年徐々にクローズアップされてきています。地球の持続可能性限界という考え方が最近注目されており、いろいろな環境問題についてまとめられています(図8)。気候変動の問題や生態系・生物圏の問題、陸域システムの改変。これは森林破壊などを指しています。さらに水の問題、あるいは窒素・リンなどの栄養塩の問題があり、これは河川や湖沼の富栄養化問題とも関連してきます。あるいは海洋酸性化、エアロゾル、成層圏オゾンの問題などです。そういった環境問題と、社会の持続可能性との関係をまとめたものがこの図です。

異なる環境問題について色分けで示されています。緑の部分は今のところ社会が持続可能な範囲で比較的安全であることを示しています。黄色のところは、そろそろ黄色信号がともってきて、持続可能ではなくなり将来的には深刻な問題が起こりそうな問題であることを示しています。赤いところは既に持続可能な領域を踏み越えてしまい、私たちはかなり危険な領域にまで入っていることとなります。図を作った人の主観が多少入っていると思いますが、一番危ないのが窒素やリンの(過剰利用に関する)問題です。農地で肥料を使ってしまうと、肥料の中の一部の窒素やリンが湖などに流れ出し、例えば湖の富栄養化をもたらしてしまいます。私が住む茨城県でも、つくば近くの霞ヶ浦という湖で富栄養化が進み、異臭を放つアオコが発生したりしています。こうした深刻な問題はもちろん日本だけではなく世界全体で起こっている話です。それだけではなく、生物圏の健全性の問題があります。森林破壊などによって生物の多様性が失われたところなどで、こうした生態系の衰退に関する問題が起こっています。気候変動の問題については、作成者の判断では黄色信号の真ん中ぐらいまで来ており、先ほどの温度上昇のカーブと照らし合わせていただくと分かりますが、危険領域に差し掛かっていると言えるでしょう。

最近の温暖化問題に対する社会の対応はどのような状況にあるのでしょうか。ここにいらっしゃるような方はたぶん意識が高い人が多いでしょうから、ご存じだと思います(図9)。1997年、気候変動枠組条約の第3回締約国会議(Conference of the Parties 3: COP3)が開かれ、京都議定書が採択されました。京都議定書に参加した国には一定

## 温暖化問題の動向 9

1997年 気候変動枠組み条約COP3 京都議定書  
1990年比6%削減:2008-2012年 (森林吸収源、CDM、JI)  
→ 目標達成

(2013年以降の京都議定書延長には参加せず)

2015年 11月までに適応計画を策定  
気候変動枠組み条約COP21 (パリ協定 => 温度上昇を2°C未満に)  
2013年度比26%削減:2030年度(政府原案)

2020年以降の温室効果ガス削減に向けた我が国の約束草案は、エネルギーミックスと整合的なものとなるよう、技術的制約、コスト面の課題などを十分に考慮した裏付けのある対策・施策や技術の積み上げによる実現可能な削減目標として、国内の排出削減・吸収量の確保により、2030年度に2013年度比▲26.0%(2005年度比▲25.4%)の水準(約10億4,200万t-CO<sub>2</sub>)にすることを目標とする。

「日本の約束草案(平成27年7月17日、地球温暖化対策推進本部)より」

の温室効果ガスの排出削減義務が課せられました。先進国では全体的に 5%を削減することになり、日本は1990年を基準として6%を削減することになりました。結果的にはこの目標は達成され、2008年から2010年の間に6%以上減らすことができました。直接の排出量を減らしただけでなく、例えば排出権取引や森林吸収源などのメカニズム(と呼ばれる方法)も使うことで達成しました。

それが終わって次のフェーズを考えるということで、2015年11月から12月、パリでCOP21が開かれました。ニュースになったのでご存じの方もいらっしゃると思いますが、そこでパリ協定が採択されました。このパリ協定では、地球の温度上昇を産業革命前と比べ2°C未満に抑え、そのための努力を最大限行うことが決まりました。2°Cといっても既に1°C近く上がっているといいましたので、残りはその半分しかないわけで結構厳しい目標です。しかも、人によっては1.5°C未満にすべきだという人もいます。この1.5°C、2°Cの目標が達成できるかどうかは、研究者の間でも人によって意見が分かれています。「ぜひとも達成しなければならぬ」と積極的な人もいれば、「とても無理だ」と言う人もいて、まだ予断を許さないところです。とにかくそういう目標について国際的に合意し、それに向かって走っているのが現状です。

そのために日本は現在何をしようとしているかというと、安倍政権では、2030年までに2013年度比で26%排出削減を行うことを目標にしています。これがパリのCOP21に提出した日本の目標です。京都議定書の時は6%だったのに対し、今回のパリ協定では26%削減しなければなりま

せん。これは(京都議定書の時に使われた排出権取引や森林吸収源のように)いろいろな方法を組み合わせて用いることで達成しようということですが、温暖化対策は重要な問題であると同時に、すぐに難しい問題が出てきます。考えていただくと分かりますように、この目標を達成するために原発を動かすことがいいのか、悪いのかという話になれば、そこで侃々諤々(かんかんがくがく)の議論になり、そこで話が発散しがちになる場合もあります。とにかくこの26%削減に向け、私たちは走っているのが現状です。

## 自分の問題意識 10

- ◆ 温暖化が進むと陸の生態系(植物、動物、その他の生物)にどのような影響が起こるだろうか?
- ◆ 生態系が変わると、人間社会にどのような影響が及ぶだろうか?
- ◆ 生態系の変化は、温暖化の進み具合を変えるのではないだろうか?

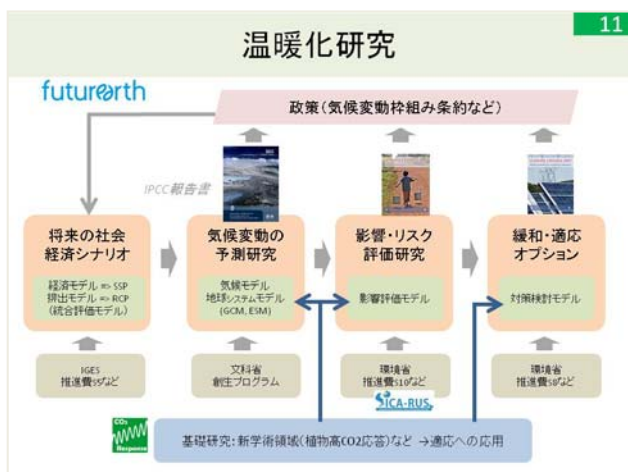



人工衛星から見た地球(NASA/Blue Marbleより)

温暖化は大きな社会問題になっていますし、すでに多様な分野の人が関わるようになってきました。1人の人間がすべての分野を把握することができないぐらいに大きくなっています。私の問題意識としては、温暖化が進むと、私の分野である生態系がどう変わっていくのか、あるいはそれによって人間社会にどのような影響が及ぶのかということです(図10)。もう少し話を進めると、生態系が地球全体で変わっていくと、生態系から気候へのフィードバック(反作用のようなもの)が働き、温暖化を加速したり、あるいは和らげたりするなど、温暖化の進み具合を変えるのではないかと考えられています。そういう問題意識で研究しています。

#### 4. 温暖化の影響の予測

私がかかわっている温暖化研究の枠組みを簡単にまとめたのがこの図です(図11)。温暖化の研究は複雑化していますが、ざっくりと単純化した流れ図です。まず、将来どういう社会になるかという経済シナリオが作られます。将来の経済成長や



人口動向などのシナリオを立て、次に、それに基づいて温暖化がどのように進むかという気候モデルを用いたシミュレーションが行われます。日本でいうと、気象研究所、JAMSTEC、東京大学大気海洋研究所など、いろいろな機関がこうした気候変動の予測研究を行っています。将来の温暖化がどう進むかというシナリオができると、それを用いてどう影響が起きるのか、各分野の研究者が様々な影響モデルを用いてシミュレーションします。その結果、例えば農業生産、病気の起こり方、生態系などについての将来変化がシミュレーションの結果として出てきます。その影響を踏まえ、その影響を緩和するあるいは適応していくにはどうしたらいいかという政策的・対策的なところを専門に考えていく研究者・機関もあります。

私たちはこうした流れの中で研究しています。もちろん1人が全部をやるのは無理です。それぞれ分業し、気候モデルをやる人は気候モデルを地道に高度化していき、精度のよい予測ができるようにしますし、社会経済をやっている人たちはより良い現実的なシナリオを立てて、将来の予測をしていこうとしています。私はこの中で影響評価の部分から始め、多少は予測研究などにも協力しているのが現状です。社会経済のシナリオや適応緩和のオプションを考えることは社会経済の専門家の得意分野です。私ではなかなか理解が難しいですし、ましてそれで先端的な研究をするのは無理で、先ほど言いましたように、大きなプロジェクトの中で分業してやっているのが現状です。

図を見ていただきますと、いくつかのモデルが出てきます。将来を予測する場合、社会経済には社会経済のモデル▽温暖化をするには気候のモデ

ル▽影響やリスクを考える場合には影響評価モデル▽適応緩和オプションを考えるためには対策検討のモデル——と、至る所でモデルが出てきます。モデルといわれてもピンと来ないという人もいるかもしれませんが。一言でいうと、ある現象のダイナミクスや関係性を数式で表現し、単純化して扱えるようにする数学的なモデルです。複雑なものを単純化して扱わないと、ややこしい問題はなかなか扱うことができませんので、様々な分野でモデルを用いたシミュレーション研究が行われています。

## なぜモデル研究が必要か？

### 総論

- 断片的な知見や観測データを補完/統合し全体像を示す
- 感度実験により重要性が高い変数・パラメータを特定する
- 多数のシミュレーションを実施して不確実性の幅を求める
- 時間的・空間的スケールを拡張し予測を行う

### 各論:温暖化研究では

- 地上フィールド調査から衛星観測をつなぐ
- 森林破壊とその防止(REDD)による温暖化緩和を評価する
- 気候予測シナリオを用いて影響・リスク評価を行う
- 地球システムモデルで生物学的フィードバックを評価する
- 温暖化対策(バイオ燃料増産など)の影響を評価する

温暖化研究でなぜモデルを使う必要があるのか(図12)。総論としては、温暖化には種々様々な要因が関わってきますので、断片的なものを全体像にする必要があるためです。一見別々なものを全体としてつなげて考えられるようにできるというのがモデルの一つの利点です。

また、こうしたモデルを立てると、多数のシミュレーションをすることができます。シミュレーションの中で条件を少し変えてやると、それによって得られる答えが変わってきます。今日いただいた質問の中にも、「パラメータを変えると、異なる結果が出てくるのではないかと」と質問されている方がいました。ご質問の通りで、私たちが使っているモデルの中でもいろいろなパラメータ(モデルの振る舞いを特徴付ける設定値)を使っています。そのパラメータの値を変えると、将来の温暖化による影響の起こり具合などが変わって来たりします。モデルのパラメータをどう決めるか、あるいはそのモデルを使ってどういうシミュレーションにいくのかが、私たちの研究でも重要な勘どころになってきます。モデルの役割として、多

数のシミュレーションを行って不確実性の幅を求めるものがあります。また、野外で行われているのは時間的に限られた、あるいは狭い領域での実験ですが、その成果を地球全体のシミュレーションにより拡張して地球全体での温暖化影響が評価できるようにする、空間的なスケールの拡張を行うというのもモデルの非常に重要な役割になっています。

もう少し細かいところで言いますと、地上で行われた生態系の部分的な調査データをモデルによってつないでいく、あるいは将来の温暖化の緩和機能など、温暖化の対策の評価にもモデルが使われます。あるいは影響やリスクを評価したり、フィードバックを評価したりするところにもモデルが使われています。こちらも温暖化対策、バイオ燃料の増産などの影響を評価するなど、今日は全部お話しできないと思いますが、こういった温暖化のさまざまな局面で生態系のモデルが使われています。

## 温暖化の影響 IPCC報告書

13

**Intergovernmental Panel on Climate Change**  
(気候変動に関する政府間パネル)

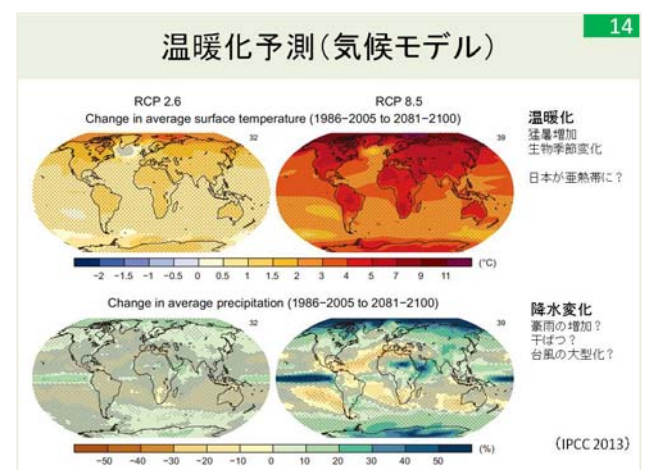
- × 研究所やプロジェクト (ではない)
- 世界中の多数の研究者が参加する地球温暖化に関する科学的知見を集約する活動

- ・事務局はスイス・ジュネーブ
- ・世界気象機関(WMO)と国連開発計画(UNEP)によって1988年に設立
- ・ほぼ5年に1回報告書を発表(2013-14年)
- ・日本の研究者も多数参加

私の研究の紹介に入る前に、どういうところまで分かっているのか、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) がまとめた報告書のハイライトをお話ししたいと思います(図13)。IPCC については聞かれたことがあると思いますが「気候変動に関する政府間パネル」と言います。UNEP (United Nations Environment Programme: 国連環境計画) などが中心となって設立し、気候変動に関する科学的な知見をまとめ、約5年に1度レポートとして刊行している団体です。もちろん日本から何人もあるいは幾つかの機関が参加して成果を提供し、将来の温暖化がどのように進むか、あるいはそれによってどういう影

響が起きるかなどについて数千ページに及ぶレポートを作成しています。政策担当者向けのサマリーとして数十ページの要約版を作りますので、少なくともそれは読んでくれると思いますけれども、現在の科学的知見ではここまで分かっていることを提示して政策に役立ててもらおうと考えています。私たちの研究は、論文を書くことももちろん重要ですが、その論文を IPCC のレポートに引用していただいて、なるべく政策に役立ててもらおうことが戦略的には重要なところになります。

詳細な話になりますけれども、IPCC は第1、第2、第3の3つの作業部会から構成されています。第1作業部会が将来の温暖化の予測や温室効果ガスの収支を科学的にまとめていきます。第2作業部会はそれを踏まえて、どういう影響、リスクが起きるかをまとめます。第3作業部会はそれをさらに適応していくあるいは緩和していくための社会科学的な研究をまとめます。今回の話は、主に影響について関係する第2作業部会に該当する分野になります。



第1作業部会がまとめた温暖化の予測です(図14)。有名な図なのでご覧になった方も多いかと思います。上の2つが将来の温度上昇です。2081年から2100年までの20年間の平均で、現在と比べ何°C上がるかを示しています。図が2つあり、左には「RCP2.6」、右側には「RCP8.5」と書いてあります。やや専門的な話になってしまいますので要点だけを言いますと、RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6と8.5の違いは将来の温暖化がどの程度まで進んで安定化するかという違いです。将来、温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)やメタンの濃度がどれくらいのレベル



に達するかというところが、RCP2.6、8.5の違いとなっています。

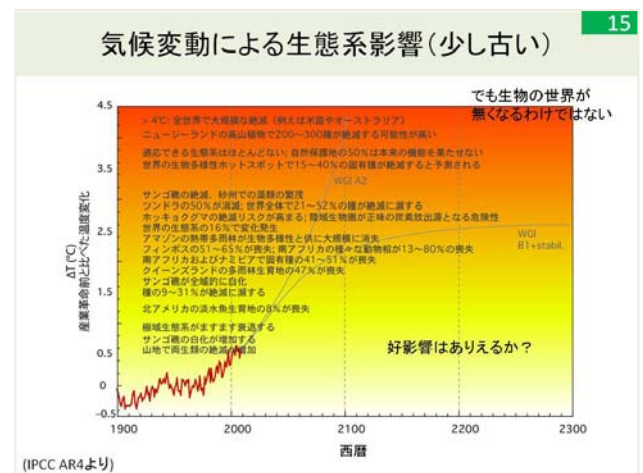
RCP2.6は、温暖化対策（緩和策）を非常に頑張っ、なるべくCO<sub>2</sub>やメタンを出さないようにし、2050年ぐらいをピークにして、その後は温室効果ガス濃度を減らそうというシナリオになります。逆にRCP8.5は、そういった緩和策をそれほど講じないため、石炭などを使ってCO<sub>2</sub>を出すことで温度上昇は進むだろうけれども、それに適応していこうというものです。温度が上がったときには健康被害や農業被害が起きるかもしれないけれども、適応策を打つことで何とか乗り切っていこうというのがRCP8.5のシナリオです。

見ていただきますと、RCP 2.6の場合でも、北極など高緯度部分では温暖化が進みやすく2～3℃程度は昇温してしまいます。全地球的には1.5℃ぐらいは上がってしまうのではないかとわれています。温暖化が強く進むRCP 8.5の場合には（高温を示す）真っ赤になっています。低いところでも3℃、高いところになると5℃から7℃以上の温暖化が進むことが予想されています。日本なども現在と気象条件が大きく変わってしまい、亜熱帯に近い温度になってしまうのではないかと考えられています。どちらにいくのか、あるいはその中間ぐらいにいくのかはまだ分かりませんが、先ほど言った2℃目標がもし達成されるとすると、こちら（RCP 2.6）に近い状況になるといわれています。しかし、それができなくなってしまうと、こちら（RCP 8.5）になってしまうかもしれません。私たちとしてはどちらの可能性も考えつつ、4通りぐらいのシナリオを立てて考えています。

下に書いてあるのは、降水量という雨の降り方の違いで、温暖化が進むと大気動きが活発化し、アジアなどでは雨が増える場所が多くなります。単に平均的に増えるだけではなくて、例えばゲリラ豪雨や台風など、局所的に集中する雨なども頻度や強度が増える可能性があるといわれています。もしかしたら、台風の数そのものは減るけれども、一つ一つが大きくなる大型化・強力化を予測している人もいます。そういうことがあると、災害被害の起こり方にも変化が出てくるので、雨の降り方も重要になります。

本題に近づいてきました。温度が上がってくると、いろいろなところに影響が出ると言いました。

やや古い図ですが、分かりやすかったので出しています（図15）。IPCCの前の第4次報告書で、温度が上がっていたときに生態系にどう影響が出そうかまとめた図です。見ていただきますと、現在までの温度の上がり方を示して、これが将来の上がり方を示しています。0.5℃、1.5℃、2.5℃、3.5℃、4.5℃となっています。0.5℃以上、現在の状況でサンゴの白化であるとか、極域の生態系、例えば、北極や南極などにある高緯度の生態系が衰退する可能性が示されています。ここでは山地の両生類の絶滅リスクが増加することなども書かれています。



もう少し温暖化が進んでくると、例えば、生物の多様性などにも影響が出てきて、南アフリカでは固有種（その地方だけに生息する種）の41%から51%が消滅するなどの記載があります。これは、いろいろな人の研究結果をまとめたものなので、人によって判断が分かれるかもしれません。少なくともIPCCの前のレポートはこうしたまとめがなされています。アマゾンの熱帯多雨林の大規模な消失、ホッキョクグマの絶滅リスクの増加などが指摘され、最終的に3℃、4℃上がっていくと、適応できる生態系はほとんどなくなってしまうなど、恐ろしいことも書かれています。こうしたさまざまな影響が起こり得るのですけれども、当時の研究例を並べたようなものであって、本当に起きると確約しているものではありません。不確実性が大きいことに注意して見ていただきたいと思えます。

これに関連するような質問があったのでお答えしておきますと、一つは「良い影響があり得るか」ということです。生態系にとって悪いことばかり

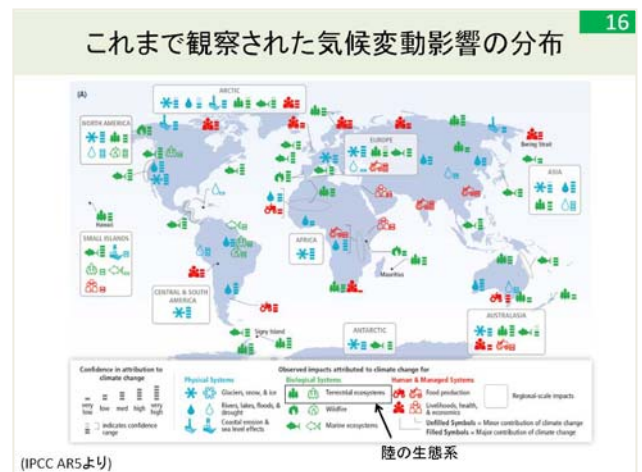
ではなく、もしかしたら良いことも起こるのではないかと質問された方もいます。基本的には、現在と変わってしまうのは生態系にとってはあまり好ましいことではありません。一見良い影響と思われるのは、将来温暖化すると冬の寒さが和らぎ、温暖な南にいる生き物が分布を広げることができるといったような、ものによっては、生息域を拡大して数が増える生き物などもあるかもしれないことです。

もう一つ、将来的には多かれ少なかれ大気中のCO<sub>2</sub>濃度が増加し、植物の生長は概して良くなります。つまり光合成の生産力が高まりますので、一時的には植物にとって良い影響なのかもしれません。ただ、それが食物連鎖などを通じて動物などに伝わったときに、本当に生態系全体で見て、良いのか悪いのか即座に判断できないところがあります。一見良い影響も生じるかもしれませんが、個人的には悪い影響が確実に多いと思っています。

もう一つの質問ですが、生態系への影響がどんどん進んでいくと、地球の滅亡ではありませんが、「生物の世界がめちゃくちゃになってしまう」「人類が減ってしまうのではないかと危機意識で質問された方もいます。しかし、生態系にとってみれば4.5℃、5℃上がったとしても、地球全体の生き物が全て死に絶えることはまずありません。地球の歴史の中でも、温度がそれぐらい高かった時期（例えば恐竜が生きていた時代）はあったはずですが。温度が上がった状況でも生き残った生物が適応してすみかを広げ、今とは全く異なる形になるでしょうけれども、生き物の世界は続くと思っています。ただ、その中に人間が残っているかどうかは分からないところです。野生の生き物は進化して環境に適応して生きていく力があるので残るでしょうけれども、人間の社会がこのまま続くかどうかについては後ほど懇親会場で皆さんの意見を伺いたいと思います。

## 5. 生態系への地球温暖化による影響の予測

IPCCの最新の第5次報告書に出てきた気候変動によるこれまでの影響の分布図です(図16)。細かい図なので説明を補足しないといけません、水域や海洋の生態系、火災であるとか、人間社会に対する影響などが書かれています。ここに書か

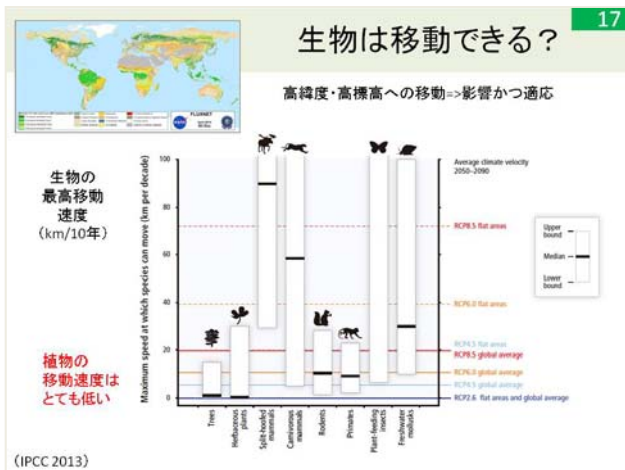


れている森のマークのものが今までに観測されている陸の生態系への影響です。様々なところでこうした影響が起こりつつあります。ここでマークの横に四角が重なっていますが、四角の数が多いほど、その情報が確かであるということです。四角が4つ重なっているようなところは影響がかなり確からしく見つけられるということです。

かなり特殊な場所と思いますが、南極半島の先端にある島やオーストラリアですね。あるいはこうした北半球の最果てにあるシベリアでは生態系への影響が既に見つかっているか、見つけられつつあります。他のところでも、信頼度はやや落ちてきますが、生態系への影響が起こりつつあるというのがIPCCの取りまとめです。それがどういう影響なのかは、ケース・バイ・ケースで異なります。かなり深刻な生態系全体の衰退なのか、比較的軽微で種の構成がわずかに変わっていくものなのかはケース・バイ・ケースです。既に見つけられているものだけで、こういう状況になっています。

生き物への影響になると、生き物が住みやすい場所を求めてどんどん北へ動いていったり、標高が高いところへ移動していったりすることが考えられると思います(図17)。前の報告書までは示されていませんでしたが、今回の新しい報告書ではいろいろなデータをまとめ、生物の分布がどれくらいの速さで動けるかについて一つの図にまとめています。ご存じのように、生き物は野外で生きているわけですので、暑くなったからといって冷房を入れるわけにもいきません。現在いる生き物が適応していこうとすると、より涼しいところに分布地を変えるのが一番確実かつ直接的な方法

ということになります。



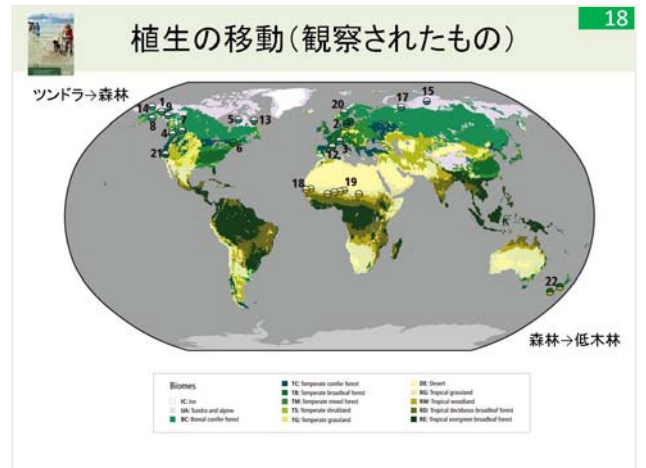
しかし、動きやすい生き物と動きにくいものがあります。植物などは根を生やして生きているわけですから、もちろん動くことができません。分布を変えることができるとすれば、自分の種子をより遠くの涼しいところに飛ばして、そこで新たに子孫が生き残ることで、それを繰り返すことで北に動いていくことになりませんが、速度は非常に遅いものとなります。

植物が動く速度です。黒いところがもっともらしい速度で、見ていただきますと、ゼロ km/10年（ディケード）と書いてあります。10年間で何km移動できるかを示しています。植物は1km動けるかどうかというところです。もちろん、今生えている植物はそこから動けませんので、種を飛ばしやすいものでも1km程度になります。

逆に、動物は相当速く動くことができるのが分かります。トナカイは北極海沿岸を周遊しており、10年間で80km以上も分布を変えることができます。温暖化していくと、自分のすみかを素早く北のほうに移すことができます。チーターみたいな肉食動物は50~60km動かすことができます。リスやサルなどの小型の哺乳類は10年間で10km動くことができます。チョウなどは長距離を移動して飛ぶものもいれば、かなりローカルに生きているものもいるなど、かなり幅が大きいのですが、ものによっては素早く動くことができますし、ローカルに生きているものはなかなか動くことができません。これはデータが少ないため、まとまっていないようです。一番右に書いてあるのは淡水の貝類です。川や湖で水（流）に乗って動くことができるため、比較的速い速度で分布地を移動で

きるようです。

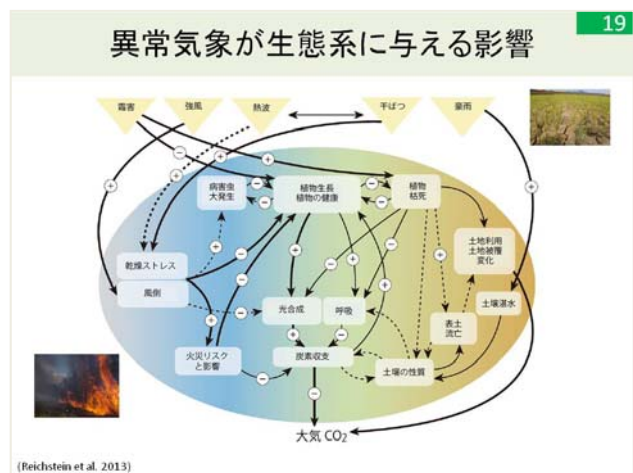
生き物によって動く速度が違うのは、実は相当に重要なことです。今、生きている動物であったとしても、餌やすみかとしている植物の場所は固定されているわけなので、植物も一緒に動いてくれないと、動物だけが動いても生活できず死に絶えてしまいます。こうした移動のミスマッチが起こると、その生態系が結局は衰退してしまうかもしれません。こうしたことが全体のリスクになることが考えられます。



生き物の移動が起こっているかどうか、実際の観測例が幾つか出てきています（図18）。IPCCの報告書に載っているものですが、図にバックグラウンドで描いているものが、現在の植物がどういう分布をしているかで、熱帯林や亜寒帯林、温帯林などが色分けされて書いてあります。その中に幾つか「○」があり、「○」の上の半分の色が現在の生態系の種類を指します。下半分にはどういものが新しく移動してきたかを示しています。北のところは、上は白でツンドラという北にある荒れた草原みたいなどころですが、今、そこに緑色が入ってきていることを示しています。緑色は、例えば低木林や亜寒帯林です。こうした樹木が北のほうに拡大しつつあることが、シベリアや北ヨーロッパ、カナダ、アラスカなどで見つかっています。先ほどの温暖化の予測図などで見ていただいたところで、こうした地域は温暖化が進みやすくなっていました。そういったところではツンドラに、より南のほうの樹木が既に入りつつあることが観察されています。

同じように、今は砂漠のところにも低木林が生えてきているところもあります。ニュージーランド

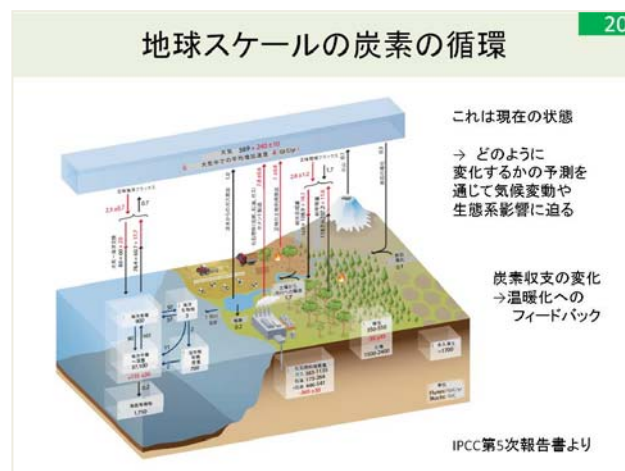
はやや特殊で、森林だったところが丈の低い別の低木林に置き換わりつつあります。これは何を意味しているかはまだ分かりませんが、降水量が減少することによって、今まで森林だったところに低木が生えてきていることも考えられます。ニュージーランドなどは放牧をしていますので、もしかしたら動物の影響などもあるかもしれません。そういう変化が見つかりつつあります。



異常気象は生態系にも影響を与えます(図19)。温暖化していくと、温度が徐々に上がり、降水量も変わっていきますが、時々極端な気象現象も起こります。例えば霜の害や強風、熱波、干ばつ、豪雨などがあると、生態系に強いダメージを与えます。平均して10年に1度、20年に1度程度起こるものであっても、気候変動により昔より起こりやすくなる可能性があります。昔30年に1度だったものが10年に1度になると、生態系が十分回復できずダメージが深刻化することがあります。例えば台風などで強風が吹くと、樹木がなぎ倒されますし、倒れた木が燃料になって火災のリスクが高まることもあります。その結果、生態系から炭素が失われてCO<sub>2</sub>が大気中に放出されることが考えられます。こうした極端現象も生態系に大きな影響を与えます。影響の連鎖は非常に複雑です。これを見ていただくと、かなりネットワークが複雑になっていることが分かっていただけると思います。その中でも、私たちは生態系の中でどうことが起こっているか、そのメカニズムを理解することで将来の温暖化に伴う極端現象の影響を見ていこうとしています。ここから徐々に私の研究の中身である、地球スケールの炭素循環の話に

入っていきたいと思います。これがなぜ重要かといいますと、生態系は地球の炭素循環の中で重要な役割を果たしているからです。

## 6. 地球の炭素循環



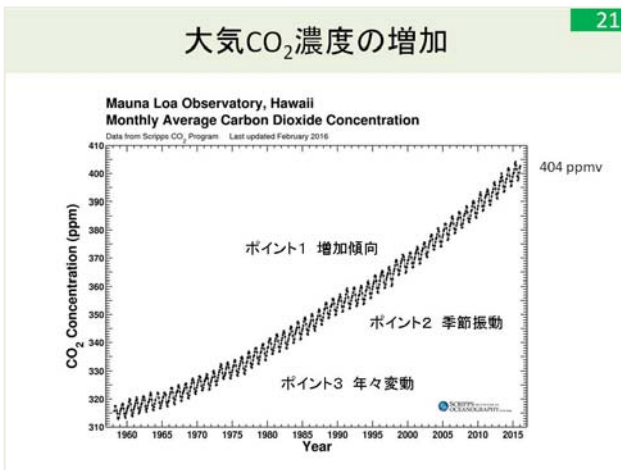
地球の炭素循環の概要をまとめたものです(図20)。IPCCの報告書から引用したものです。地球の炭素循環で温暖化に関連する要素ですが、人間が化石燃料を使って、それを大気中に放出している部分はもちろん重要です。生態系は炭素循環の中でどういう役割を果たしているかという、大気から光合成によってCO<sub>2</sub>を固定し、それによってバイオマスを作ります。そのバイオマスは、動物などが食料として利用したり、枯死物が土壌の材料になったりします。動物や植物あるいは微生物からの呼吸によって、年間で見るとほぼ同量のCO<sub>2</sub>が大気の中に返されています。

こうした生態系をめぐる炭素の動きは、実は地球の炭素循環の中でかなり大きな割合を占めています。別な言い方をすると、生態系の炭素の収支(バランス)が変わると、大気中の二酸化炭素にも影響が及びます。例えば、CO<sub>2</sub>を吸収することによって温暖化の抑止が生じますが、森林火災による放出が増えてしまうと、その分だけCO<sub>2</sub>を放出して温暖化を加速することにもなりかねません。生態系の成長だけでなく、炭素の動きを見ていくことが重要で、そのモデルを使って研究していくことが今の一番大きなテーマになっています。

大気中のCO<sub>2</sub>濃度の上がり方は、図をご覧ください。方もいらっしゃると思いますが、これはハワイのマウナロアで観測された大気中のCO<sub>2</sub>濃度の連続的な観測データです(図21)。見ていただきま

## 大気CO<sub>2</sub>濃度の増加

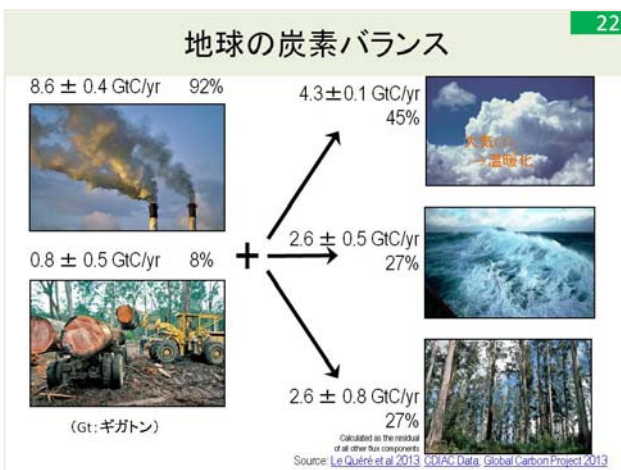
21



すと、50年ほど前は315ppmでした。ppmは大気の体積の100万分の1という割合を示しています。当時315ぐらいだったのが、今は400を超えています。2016年2月のデータを取ってきたものですが、その時点で404ppmとなり既に90ppmぐらい増加しています。私が研究を始めたころは350ppmといわれていましたが、既に50ppm以上増加してしまいました。この図は増加傾向だけを示しているだけではなく、ギザギザのような季節変化があることが2番目に重要なところです。後でお話ししますが、陸の生態系がCO<sub>2</sub>を吸収したり、放出したりすることで季節的な濃度変化が生じています。陸の生態系は大気中のCO<sub>2</sub>濃度にそれだけ影響を及ぼすポテンシャルがあると、言っても良いでしょう。

## 地球の炭素バランス

22



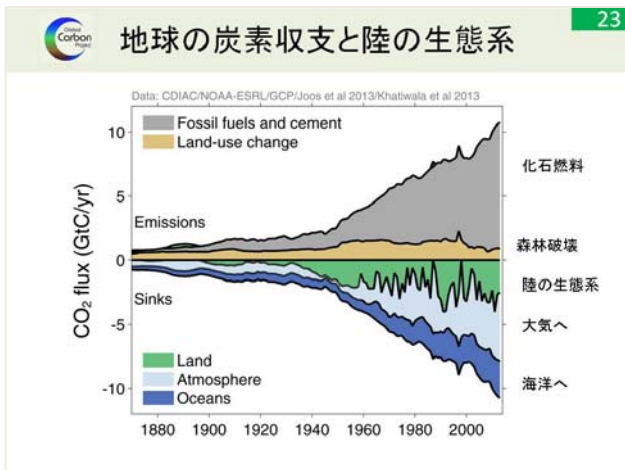
地球の中での炭素のバランスを示したものです(図22)。グローバル・カーボン・プロジェクト(Global Carbon Project: GCP)という地球の炭素の研究の取りまとめをしているプロジェクトで出されたレポートから引用したものです。ご存じ

のように、CO<sub>2</sub>濃度が増加しているのは人間による化石燃料の消費や森林伐採などが主要な原因ですが、その中でも化石燃料が92%、土地利用変化・森林伐採8%とそれぞれ寄与しています。そのようにして出された炭素は大体9.4ギガトン(注:ギガトンは10億トン)ぐらいです。化石燃料で8.6ギガトン、土地利用変化・森林伐採で0.8ギガトンです。それが現在の状況ですが、そのうち約半分弱の45%が大気の中に残ります。これが先ほどお見せしたようなCO<sub>2</sub>の増加として現れ、温暖化の主たる原因となっています。残り55%はどこに行くのかというと、一部は海洋に吸収されています。海に溶解し、炭酸塩などになって海に吸収されるのが27%、残りの27%の部分が陸上に吸収されます。森林や土壌の炭素の中に27%分が吸収され、陸の生態系がある程度は温暖化の進行を和らげているということを意味しています。

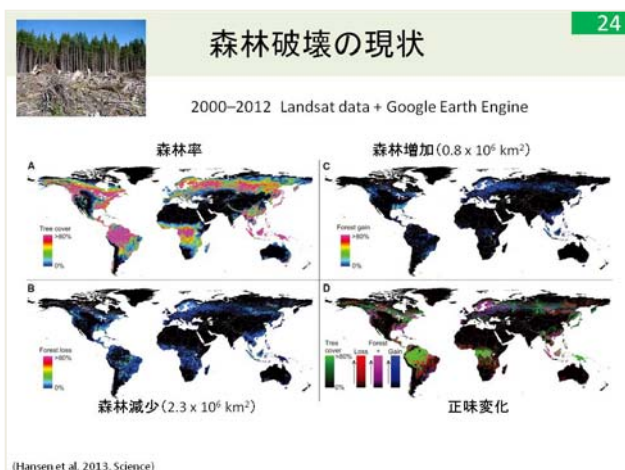
現在の状況を分かっているところまで示したのですが、実はプラス・マイナス(±)が付いた数字も書かれているのが一つポイントです。放出量についてはプラス・マイナス0.4とか0.5です。大気の部分の評価の精度が高くプラス・マイナス0.1。陸のところはプラス・マイナス0.8ということで、エラーバーとも呼ばれる推定の不確実性が非常に大きいのです。なぜかということ、陸の生態系は場所によって働きが違う、不均一性が高いため、陸域全体でのトータルの収支を評価することが難しいことを示しています。2.6というのは全体の差し引きをすると陸の吸収がそれぐらいになるはずということですが、その中でもエラーバーがかなり大きい部分であり、それを小さくするよう生態系の炭素収支をよりきちんと押さえて行こうというのがもう一つの私たちの重要な研究のテーマになっています。

地球の炭素収支と陸の生態系の変化です(図23)。化石燃料が放出され、森林破壊によって炭素の放出された分、残りの部分がどこに行くかということ、先ほどお見せしたように、陸と大気と海洋に吸収されるということを示しています。陸の部分は非常にギザギザしていますが、エルニーニョが起こった年や寒かった年などに炭素の収支が変わりやすいということです。時間的な変動も大きいのが炭素収支を抑える上で難しい点の一つとな

っています。



先ほど森林破壊も炭素の放出源となっていることをお話ししました (図 2 4)。これは地球の森林破壊の現状をまとめたものです。現在の森林はアマゾン・アフリカ・東南アジアの熱帯林、あるいは高緯度域の北方林にたくさん残されていますが、現在、南米や東南アジアなどでは急速に森林破壊が進んでいます。もちろん植林によって増えている地域もありますが、全体としてそれを上回る勢いで森林減少が進んでいます。森林が破壊されると、そこで樹木がなぎ倒され、その一部が分解されて炭素の放出源となって、大気 CO<sub>2</sub> 増加の一因となっています。こうした量を押さえていくのも重要な使命と思います。



私のモデルを用いた研究についてお話ししたいと思います (図 2 5)。先ほどもお話ししたように、モデルを使った研究は有効ですが、そもそもモデルとは何か、もう一度おさらいしておきたいと思っています。モデルは「小さな尺度」というのが語源だそうです。尺度はモードですが、そのモードか

**モデルを用いた研究** 25

model 語源は「小さな尺度(mode)」

辞書的な語意: ひな形、原型、模範、単純化したもの  
生物学事典: 種々の対象や関係を同一領域や他領域における既知の構造との類比関係において模写・模倣・抽象したもの

日常でのモデル: ファッションモデル、プラ(スチック)モデル、モデルルームなど

- 研究には様々な「モデル」が用いられる
- ・実験データへの回帰式(統計モデル)
  - ・理論から導出された数理モデル
  - ・複雑な事象の枠組みを取り出した概念モデル
  - ・高性能な計算機でシミュレーションを行う数値モデル

ら来ているのがモデルだそうです。辞書的には「ひな型」「原型」「模範」「単純化したもの」となっています。いろいろな意味で用いられることがありますが、例えば、統計的なモデルや理論から抽出された数理的なモデルなどがあります。高性能な計算機で行う数値シミュレーションモデルなどもあります。

**7. 陸域生態系の炭素循環シミュレーション**

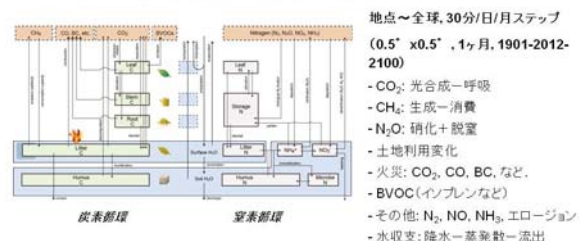
私たちが用いているのは専ら数値モデルで、シミュレーションを行うためのモデルです (図 2 6)。いきなり専門的なところに入ってしまって恐縮ですが、これが我々の研究所で開発しているモデルの概要を示したものです。Vegetation Integrated Simulator for Trace gases の各頭文字を取って、「VISIT (ビジット)」と呼んでいるモデルです。このモデルを温暖化研究に使っているわけですが、その用途の1つとして先ほどからお話ししている陸域生態系と大気間の温室効果ガス、特に CO<sub>2</sub> のやり取りをこのモデルを用いて定量的にシミュレートするというをやっています。

**私たちが開発しているモデルの紹介** 26

**VISIT Vegetation Integrated Simulator for Trace gases**

(Developed in NIES & JAMSTEC)

- モデルの指向性
- ・大気-生態系間の生物地球化学的相互作用
  - ・特に温室効果ガス交換を重点化 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) → 大気変動の解明に
  - ・温暖化リスク評価 & 生物学的フィードバック評価



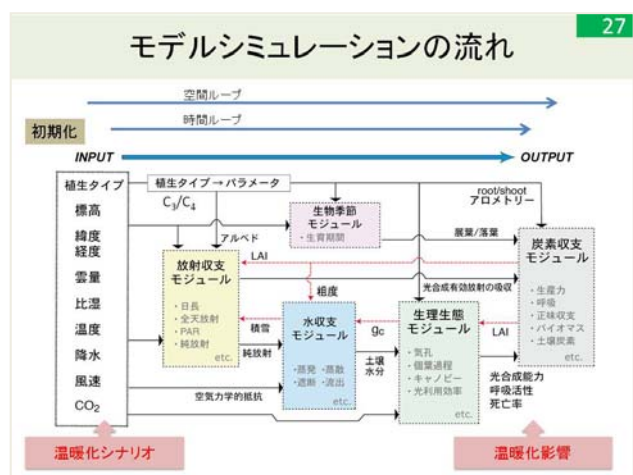
このモデルの概要を示したのがこの図です。パッと見ていただいても、理解していただくのはかなり難しいのですが、「炭素のプール」というのが左側に書かれています（注：このようなモデルの構造は生態学的な知識に基づいて決められています）。炭素のプールは、植物の葉っぱや幹、根っこの部分あるいは土の中の分解されていないリター（枯死物）と呼ばれている落ち葉や枯れ葉の部分であるとか、その下にある土壤有機物などです。その中に貯められている炭素を表すのが、この四角で書かれている部分です。いろいろ矢印が書かれています。それらは炭素の流れを示しています。例えば、植物が光合成によってCO<sub>2</sub>を吸収するフロー、呼吸によって炭素を放出するフロー、微生物が呼吸して出すフローなど一つの炭素の流れをモデルの中で計算してシミュレートするわけです。右側に書かれているのは、同じように窒素や水の循環など、生態系の中で行われる各種物質のやり取りをモデルの中で表現しているものです。そういうシミュレーションを行うことによって、生態系の中にどれくらい炭素が貯められているか、あるいはどれくらい炭素を吸収するのか——などについて評価できます。こうしたシミュレーションの実際を説明して欲しいという質問も幾つか寄せられています。実際どういう流れでシミュレーションされているのか、エッセンスだけでもお話ししておきたいと思えます。

やる必要があります。例えば、計算の対象となる場所の標高や緯度・経度、温度、降水つまり雨の降り方、CO<sub>2</sub>濃度などです。こうしたものは外からデータとして与えてやる必要があります。地球全体をシミュレーションする場合には、地球全体でのデータが必要になりますし、ある特定の場所でシミュレーションする場合にはその場所の詳しいデータが必要です。そうしたお膳立てというか、まず入力データの準備が大事で、それを用いて生態系の中でどういう働きがあるのかを一つ一つ順序を追って計算していきます。

今日は時間の都合で全てを説明できませんが、各場所でのエネルギーのやり取りをまず計算し、次に水収支としてその場所での水のやり取り（降水、蒸発散、流出など）を計算します。そうすると、その生態系でどれくらい水を使うことができるかが計算されます。エネルギーや水を計算し、それに基づいて、植生がどれくらいの生理的な活性を持っているかを計算します。後ほど1つだけ例をお見せしますが、いろいろな研究に基づいた数式を用いて、ある場所での光合成や呼吸の能力、光利用効率などを計算し、最終的にその場所での炭素収支を計算していくこととなります。

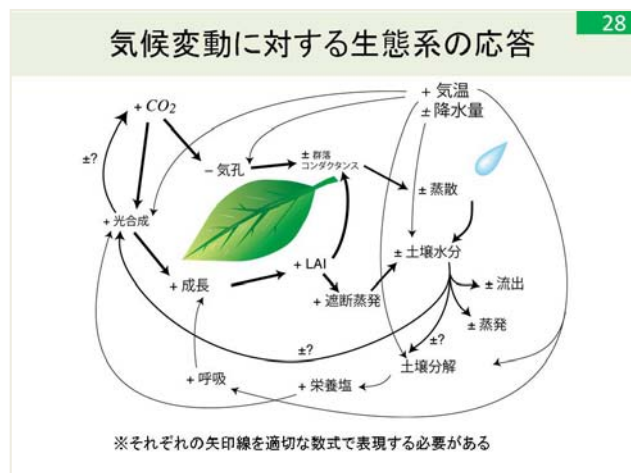
計算の入力から出力までの流れを「時間のループ」「空間ループ」と書いています。100年間を計算する場合には、1年間の計算を100回繰り返し、1000年間やる場合には1000回繰り返すことになります（注：その間の気象条件はデータに基づいて変わっていきます）。しかも地球全体でやる場合には、世界全体を格子に切って計算しますが、格子ごとに1点1点これを計算していきます。世界で100万点あれば、各点で異なるデータを用いて同様な計算を100万回繰り返します。

モデルの初期化に関する質問を寄せられた方もいます。「どうやってこのモデルを初期化するのか」。初期化というのはテクニカルな問題ですが、非常に重要で、その場所の初期条件がどうものであったかをきちんと与えてやらなければ、その後のシミュレーションは正しく行えません。例えば、2100年のことを知りたい場合、実はシミュレーションそのものはかなり昔の1901年からスタートさせ、200年間分の気象条件や土地利用などのデータを時系列に沿って与えて、過去から現在を経て最終的に将来予測を行います。初期化する場合



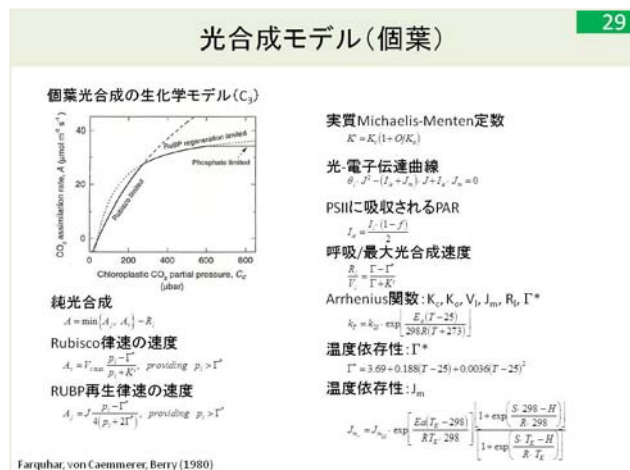
先ほどのような概念的なモデルを、コンピューターで実行可能なプログラム化してシミュレーションを行うわけですが、実際にはまず入力するデータが必要となります（図27）。生物がどのような環境条件で生きているかをデータとして与えて

には、1901年の条件で2000回、3000回を繰り返して計算し、1901年の状態で安定な状態を作り出しています。同じ気象条件を何回も使って、そこでの平衡状態を再現し、そこからスタートして200年間の計算を行って行くという手順です。本当は1901年ではなく、もっと前から始めたいのですが、それより前になると初期化用のデータがなかなか手に入らないため、1901年の状態からスタートしています。温暖化の影響予測をする場合には、こうした気象条件に温暖化の予測シナリオを入れてやり現在と比較することで、将来の温暖化影響が評価されることになります。



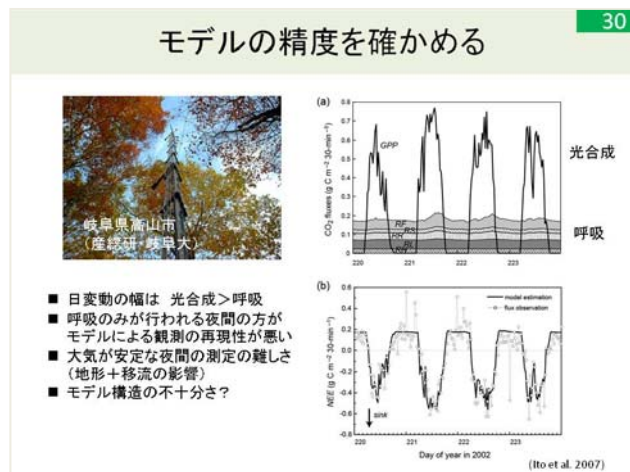
実際に行われている計算はかなり複雑で、説明しているとかなりややこしい話になります(図28)。例えば、二酸化炭素濃度が上がっていくと、光合成能力が増強されたり、植物の表面にある気孔という小さなガス交換を行う穴がちょっと閉じぎみになったりします。そうすると、植物から失われる水の量が減っていくといったことなども計算します。温度が上がると、光合成に影響が生じますが、実は土壌の分解や植物の呼吸量にも効いてきます。そういうことなどを一つ一つ数式で表し、最終的に生態系のシミュレーションを行うことになります。

このような説明でもかなり漠然としていて、どういう作業を行っているのかイメージしづらい方が大部分ではないかと思います(図29)。こういう感じで数式を作るという例として、光合成という一番ファンダメンタル(基礎的)な部分を示しました。まず、植物の葉っぱ1枚の光合成から考えます。CO<sub>2</sub>をどの程度吸収するのかを、この数式で表しています。かなり専門的な話になります



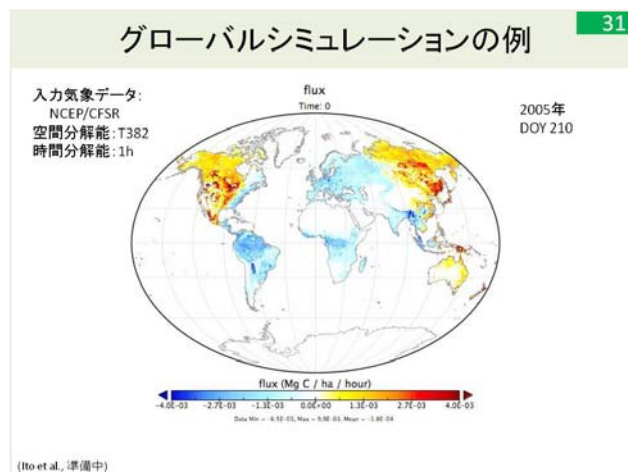
が、それを行う酵素の活性であるとか、あるいは光をどのように吸収し、どう光合成に利用されるか、あるいはそれがどんな温度依存性を持っているかなどをすべて数式化して計算していくわけです。こういった数式をどんどんつくって行って、それをコンピューターの中にプログラムとして取り込み、シミュレーションを行っていくのが私たちの作業になります。これは一つのサンプルで、呼吸や分解など、それぞれについて同じような数式を立てていき、解いていくことになります。ここまでがモデルの説明です

モデルを用いてシミュレーションを行うことも大事ですが、モデルの精度を確かめることも同等以上に重要です(図30)。それは観測データと比較することが必要で、例として岐阜県の高山でシミュレーションを行って精度確認を行った例をお見せします。落葉広葉樹林という種類の森林ですが、そこで先ほどのモデルを動かしてやると、例えば光合成が1時間ごとに計算され、呼吸量についても出てきます。その差し引きとして、この森





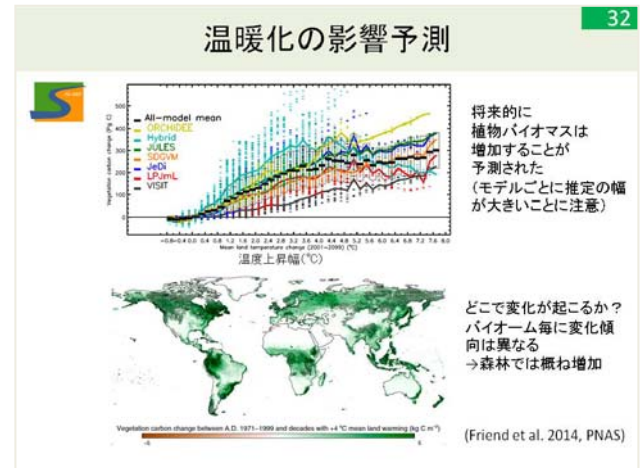
林が  $\text{CO}_2$  を吸収しているかを示したのが下の図です。この森林では観測タワーが建てられていて、タワーの上に空気中の  $\text{CO}_2$  濃度を測る機械が付いています。 $\text{CO}_2$  濃度のデータから、森林がどのくらい炭素を吸収しているか観測しているわけです。その観測した値と、先ほどのモデルのシミュレーションによって黒線で示された結果を比較することで、どれくらい推定精度が出ているかを見ることができます。そういう作業を多数の場所で行うことによって、モデルの検証を積み重ねていくこととなります。



これは1カ所での例ですが、地球全体のシミュレーションはこういう感じになります(図31)。地球上の陸域全てを1時間間隔で計算しています。赤いところが光合成で、 $\text{CO}_2$  を吸収しているところです。日が当たっているところは吸収し、夜に日が当たらないところは呼吸だけをして放出する、そういった過程を地球全体でシミュレーションするようになっています。これだけ細かいシミュレーションをしているモデルは世界でもなかなかありません。私たちの研究の先端的なところではないかと思っています。こうしたモデルのシミュレーションを行い、全体のトータルを積算することによって陸域の生態系が全体として  $\text{CO}_2$  をどれくらい吸収、放出しているか、見ることができます。これは2005年の例で、近年の状況がどうなっているかという再現シミュレーションです。

次に、それを将来にわたって予測することが温暖化影響評価では必要になります(図32)。温暖化の影響評価では、気候モデルによって予測された将来の温暖化の結果をデータとして用います。世界のいろいろな研究機関のモデルが、同じ手順

でシミュレーションを行った例を並べて書いたものがこの図です。横軸が現在に対して何度温度が上がったかを示しています。縦軸が現在に対して植生が  $\text{CO}_2$  を吸収してバイオマスにどのくらい炭素を貯め込んだかを示しています。これがプラスになっているということは、大気から  $\text{CO}_2$  を吸収

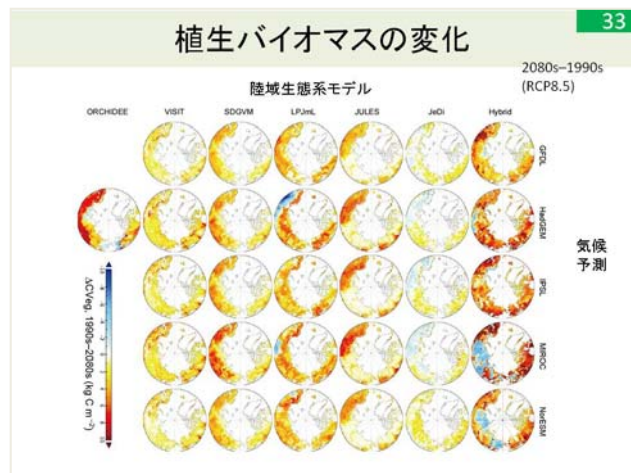


して、陸域の植生が太ったというか、炭素を貯め込んだことを示しています。いろいろなモデルの結果ですが、どのモデルも将来的にはバイオマスが増加しています。 $\text{CO}_2$  濃度や温度が上がり、それによって生育条件が良くなるなどが原因で、生態系への炭素のストックが増えていくこととなります。

もう一つ重要なのは、異なる線は異なるモデルによる結果で、それが必ずしも一致していないという点です。一番低い値を示すこの灰色の線が私たちのモデルの結果です。高い値を示すモデル、この黄色い線が **ORCHIDEE** (オーキディー) というフランスのモデルです。あるいはすごく上に行って、また下がるのは **Hybrid** (ハイブリッド) という英国のモデルです。またドイツのモデルであるとか、いろいろなモデルがありますが、モデルによって応答が違ってきます。使ったデータが違うわけではなく、入力する気象データはみんな共通のもので、にもかかわらず、生態系のモデルが違うと異なった結果が出ることがしばしばあります。

見ていただくと、 $4^\circ\text{C}$ 上がったときには、比較的低い応答を示す私たちのモデルでは100ペタグラム(単位としてギガトンと同じ)になっていますが、高いものになると、その3倍以上の値が出ています。ですから、同じデータを使ったとしても、

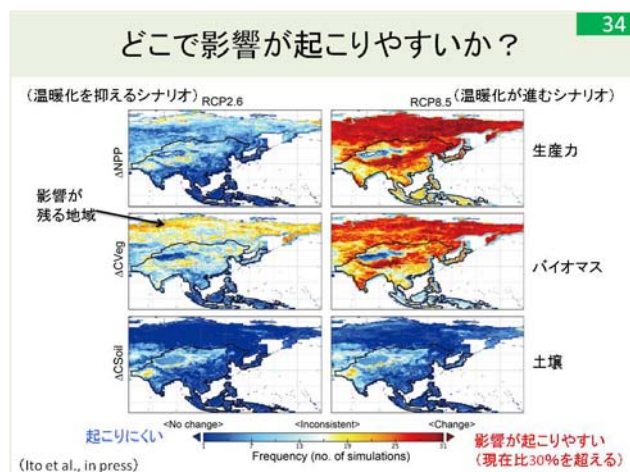
生態系のモデルによって何倍も違う結果が出ている状況です。前の質問にあったかと思いますが、モデルによってパラメータが違うことで、かなり異なる結果が出ているというのが現状です。こうした不確実性を減らしていくのが次の重要なステップになります。



最後ですけれども、これが先ほどお見せしたいろいろなモデルでの結果が、世界でどういうふうな分布になっているか示したマップです(図33)。地球を北極の真上から見た図です。このあたりがロシア、こちらがカナダです。私たちのモデルはおとなしめでしたが、炭素の量が比較的増えにくく、カナダで若干増える程度というものでした。

しかし、モデルによっては大幅に増えて、炭素の増加量が激しい、例えば、ORCHIDEEのようなモデルもあります。こうしたものはシベリアなどで炭素プールがかなり増えていることを予測しています。また Hybridなどは、「すごく増加する」だったり、逆に「減少する」というようなものもあって、気象条件がちょっと違うだけで、かなり異なった影響を予測するモデルもあります。生態系モデルだけではなく、想定する気象条件の選び方によって影響評価の結果がかなり変わってくるということで、このような不確実性をどう考えていくかについても、今、極めて重要な研究課題になっています。

そうした不確実性をまとめて表せないかと試したのが私の結果ですが、先ほどお見せした結果をまとめ、多数のシナリオとモデルを用いた結果がどのぐらい一致しているかカウントして示しました(図34)。図が赤いところは影響が起りやすい、つまり先ほどお見せした何十の結果がよく一



致していることを示しています。逆に青いところは、そういった影響が起りにくいことを示しています。今までのいろいろなモデルやデータの推定幅を考えたとしても、大きな影響は起りにくいだろうということを示しています。これは生産力やバイオマス、土壌の炭素などいろいろなものについて見ていますが、例えば温暖化が起りにくいシナリオ (RCP2.6) であったとしても、シベリアなどではかなり影響が残る地域が出てきます。逆に RCP8.5 という温暖化が強く進むシナリオだと、バイオマス、生産力についても大きな影響が起る可能性が非常に高くなります。こうした多数のモデルのシミュレーションをまとめることによって不確実性を考慮し、どういうところが影響が起りやすいか、起りにくいかを切り分けをしているのが先端の部分の研究だと思います。

質問の時間があまり取れなかったかもしれませんが、まとめに入ります(図35)。気候変動によって生態系にはさまざまな影響が生じることが予想されています。パリ協定で定められた 2°C (抑

**35**

### まとめ

- ◆ 気候変動によって陸域生態系には様々な影響が生じることが予想され、パリ協定で定められた2°C目標が達成されたとしても完全に影響を無くすことはできない可能性がある
- ◆ 生態系の性質・挙動を模したシミュレーションモデルが開発されており、温暖化の影響評価研究に用いられている(ただし、まだ不確実性が大きい)
- ◆ 生態系の変化を通じて人間社会にも波及的な影響を及ぼす可能性があり、今後も更に研究を進める必要がある

制) 目標が達成されたとしても、先ほどこの図でお見せしたように、気候変動の影響が残る地域はありますので、陸については完全に影響を無くすることはできない可能性があります。私たちの研究としては、生態系の挙動をより精緻にシミュレートするモデルを開発しているところです。それを用いて温暖化の様々な影響評価を行っています。ただし、先ほどお話ししたように、まだ不確実性が非常に大きいところがあります。

生態系の変化が今回のテーマでしたが、最初にお話ししたように、生態系サービスの変化を通じて、人間社会にも波及的な影響が及ぶ可能性があります。そういった重要性を念頭に置きつつ、今後もさらに研究を進める必要があります。

私の話は以上です。ご質問がありましたら、よろしくお願ひします。

#### 《質疑応答》

Q1：貴重な話をありがとうございました。モデルの決めた方について質問します。自然界に自然現象はたくさんあると思います。今日の発表の中では、植物の表面の気孔をモデル化に入れているとのお話がありました。現在の気温だったら影響が出るモデル、将来気温が上がっていったら、平均気温が上がった時に初めて有意な影響が出る現象などがあると思います。そういった点で、モデルの中に組み込む数式ですとか、周辺の条件をどのように決めているのか教えていただけますでしょうか。

伊藤さん：ご質問、ありがとうございます。

私たちの研究でキーとなるところで、実はどういう現象を対象にするか、どういったプロセスをモデルに取り込むかという選択は、モデルを作る研究者や研究グループのエキスパートジャッジ（専門家の判断）といたしますか、その現象をどれくらい重要だと思って取り入れるかは研究者やグループによって方針、基準が異なります。

私たちのモデルでは、少なくとも今まで野外で観測されている現象あるいは研究室での実験などでの操作実験により、重要性が示された現象についてはなるべく取り入れることにしています。いろいろな要素をごちゃごちゃと取り入れてしまう

と、モデルが複雑化し、挙動が安定しなくなります。少なくとも光合成や呼吸のような植物の生理的な裏付けがあるものについては取り入れるようにしています。それがあやふやな要素については保留し、将来もう少しデータが出てきたら取り入れるか判断することになっています。ほかのモデルではそうでない場合もあって、とにかくいろいろなものを取り入れる方針でやっているところもあるかもしれません。グループによっていろいろあると思います。

Q1：今は影響がないけれども、気温が上がった時に初めて影響が出そうだと思われるようなこともモデルに入れるものなのでしょうか。

伊藤さん：仮説として影響が出そうなものがあれば、取り入れていきたいという方針です。今日は全然お話ししませんでした。北のほうにある永久凍土は現在、年間を通じて凍っていますが、将来的に解けて地中の炭素が分解されて放出される、またその場所の水循環や炭素収支が変わることが仮説としていわれています。

そういうものについては、いろいろ実験的な研究が行われていますので、現時点では影響が顕在化しなくても、将来的にそれが起こるだろうと思われ、かつ潜在的に重要であればモデルに取り入れて評価できるようにしようと考えています。重要そうなものであれば、今起こっていなくても取り入れるということです。起こるかどうかも分からない現象については、残念ながら、私たちの予測能力の限界といたしますか、モデルの中に取り入れることができているものもあるかもしれません。

Q2：どうもありがとうございました。

最後のほうのスライドについてお伺ひします。温暖化の影響予測で、温度が上がれば上がるほど、バイオマスの量が増えるという話と、どこで影響が起りやすいかという話、生産力が上がる、バイオマスが増えるといわれて、これは単純に見る限り、「何だ、いい傾向なのね」という、いわゆる生態系のピラミッドの中で、比較的下位に属している植物相ですね、バイオマスが多ければ、安定するのかなという、そういう感覚を持っているの

ですが、そのへんはどうですか。

伊藤さん：解釈が難しいところで、トータルとしては確かにバイオマスが増加しますが、必ずしもすべての場所が増加するわけではありません。大きく増加する場所と、逆に減少するような場所が現れてきますので、減少するような場所については生態系が衰退するかもしれません。場所によって起こり方が違うのが一つの解釈です。

生産力については、おおむね増加するのではないかと考えていますが、生態系にとって本当にいいことなのかどうか。生態系を利用する人間の視点から見ると、良いことのように見えますけれども、その生態系の健全性にとって本当に良いことなのかどうかは即断できません。CO<sub>2</sub> や温暖化に対して感度が高い生き物と、感度が低い生き物があります。感度が高いものは非常に得をするけれども、感度が低いものは、それに追いやられて衰退してしまうということがあります。トータルとして見れば、その生態系は良くなっているように見えますが、陰で損をしている生き物がいたりするなど、いろいろなことが考えられてきます。

Q 2：局地的にすごい変動があって、全体から見ればいいように見えるのですが、逆に局部的にはものすごく変なところが出てくるのかなという、そういう気がしました。

伊藤さん：おっしゃる通りで、全体が均等に応答するわけではありません。よく言われるのは、アマゾンなどの熱帯林で気候変動が進むと、乾燥化して衰退してしまうのではないかとのお話もあります。ローカルに見れば全体の傾向とは違うことが起こりえます。

Q 2：火災が多くなるなど、最近よくあります。分かりました。どうもありがとうございました。

Q 3：今日の説明の最初のほうでお話があった件です。2000 年に入ってから CO<sub>2</sub> の量は確実に毎年増えていたと思いますが、ハイエイタスということで 10 年程度温度上昇が停滞したというか、原因としての推定が海による影響だというお話をされたかと思いますが。原因の推測についてもう少

し細かく教えていただけるとありがたいのですが。

伊藤さん：専門外という言い訳になりますが、同僚などから話を聞く限りでは、海の中層に当たる水深 1000 メートル、2000 メートルの深いところに逃げていく熱の量が今までのモデルでは過小評価されていました（海洋は大気よりも熱をため込む容量が大きい）。実は、考えられていたよりも多くの量が下のほうに逃げていったので、その分だけ大気の温まり方が遅くなり、この時期温暖化が一見止まったように見えたということです。

ただ、なぜこの時期に起こって、それが最近終わり、また温度が上がり始めたように見えるのかについての深い物理的なメカニズムはまだ分かっていないのではないかと思います。海洋の大循環や、PDO (Pacific Decadal Oscillation) という太平洋の 10 年規模変動など、いろいろなことが関与しているといわれています。しかし、本当のメカニズムについては研究のホットなところではないかと思えます。

Q 4：現在のモデルで数式がいろいろ取り入れられたところがあると思います。シミュレーションをした結果をご覧になられて、何かまだ入れなければいけない検討要素を感じられているかどうか。あるいは作られたモデルでシミュレーションされた結果の整合性の総合評価みたいなことをどのようにされているのか、教えていただければと思います。

伊藤さん：ありがとうございます。私たちもモデルシミュレーションをいろいろやって、観測データと比較しているのですが、難しい場所や時期があることが分かっています。過去にはどのモデルでも再現できない時期があったりします。一例の図ですが、黒い線が観測と整合する線で、緑の線は複数のモデル推定を示す線ですが、1992、93 年はどのモデルも再現できていない時期になっています。

これについてはいろいろ考え方があります。この時期は、火山噴火の後で大気中に火山灰がまき散らされ、大気の散乱光が増えて光合成量が増すメカニズムがあると言われていますが、今のモデルではそういったことが上手く再現できていませ

ん。そのような大気のちりやエアロゾルの影響は今のモデルではきちんと表現できていません。

もう一つ、長期的な変動については、モデルのシミュレーションを検証するデータが十分に無いこともネックです。10年間とか、100年間の変動が本当に正しいかどうかはなかなか観測値で検証できていません。それを表現するためには、生態系の中の炭素だけではなく、(より長い時間で循環している)窒素やリンなどの栄養塩の状況まできちんと見なければいけないといわれていますが、そういったものについては今のモデルは弱いです。もしかしたら、10年間、100年間のシミュレーションでは、今のモデルはかなり外れているものがあるかもしれません。もちろんいろいろな実験データや観測データに基づいて随時直していきいますが、そういうところはモデルの課題になっています。

Q5：記憶があいまいで申し訳ありません。小麦というのが、C<sub>3</sub>かC<sub>4</sub>か忘れてしまいましたが、確か、あの時こうなると、同化作用(光合成)が盛んになって食糧が増産するということでしたけれども、いろいろと細かく同化作用の実験をしたところ、温度が高くなると窒素分などエネルギーを必要とするため、逆に増産にはならないという報告があちこちで出ていたような気がします。

実際に細かく同化作用の、今おっしゃったリンや窒素の消費も考えて、そういうモデルの中に細かくそういうところというのは取り入れられているのですか。実際の実験、農業試験場とかそういうところでやっている細かいところの実験がどのように採用されているのか。バイオマスの増加はあまり期待できないような感覚で、うろ覚えしていたのですが、良い傾向のような話に見えてしまいますので、細かいところを教えてくださいたいと思います。

伊藤さん：先ほど、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>とおっしゃいましたが、コムギはC<sub>3</sub>植物で、大気CO<sub>2</sub>の増加には比較的大きく反応します。農業が行われているような農地の生態系と野外の生態系はかなり条件が違うので、農地で得られた実験結果をそのまま野外の生態系に適用するのは難しい部分があります。農地の生態系で増加しなかったとしても、野外では挙

動が異なるのはよくある話ですので、それは話を分けて考える必要があると思います。

実際、農地では既にたくさん肥料を投入しており、灌漑で水も十分与えているので、CO<sub>2</sub>濃度が上がった場合は効果が表れやすい可能性があります。一方、野外の生態系では窒素などいろいろなものが制限要因になっていますが、逆に土壌が深いなど農地より制限がかかりにくい条件もありますので、今のモデルでは比較的影響が大きく出ている場所もあるのではないかと思います。ただ生物の世界は非常に複雑で、生物の競争であるとか、相互作用まで考えると、それが足を引っ張って、言われたように、もしかしたら、本当はモデルで単純に予測したようには効かないのかもしれないと分らないと思います。

司会：どうもありがとうございました。

炭素循環の話は、COP21で2°C目標の温暖化ガス削減というのにも直接効いてくる重要なものですけれども、モデルによって結果が大きく変わる難しいものだということがよく分かりました。ぜひより精度を上げて、温暖化ガスの削減にはっきりとした提言ができるようなものにしていただきたいと思いました。

以上