

第20回 KOSOMOS フォーラム

21世紀の新しい環境観

「大気と人」～海、大地との関わり～

日時 2009年12月13日（日）

午後1時00分～午後4時30分

場所 ベルサール飯田橋

【基調講演】

【講師】

和田 英太郎 氏

（独立行政法人海洋研究開発機構 物質循環研究プログラム特任上席研究員、
京都大学名誉教授）

(司会) 皆さま、本日は、第20回 KOSMOS フォーラムにお越しいただき、誠にありがとうございます。開会に当たりお願い事ですが、本日はたくさんの方にご来場いただいております。お座席には限りがございますので、お荷物はひざの上またはお足元をお願いいたします。携帯電話をお持ちの方は、電源をお切りいただくか、マナーモードに設定していただきますようお願い申し上げます。私、本日の司会進行を務めさせていただきます北川と申します。どうぞ最後までよろしくようお願い申し上げます(拍手)。

それでは、大変長らくお待たせいたしました。ただ今より、第20回 KOSMOS フォーラム、「大気と人 ～海、大地との関わり～」を始めさせていただきます。この KOSMOS フォーラムは、これまでの分析的・還元的な科学ではなく、統合的・包括的視点でさまざまな問題にアプローチすることを目的に、毎年テーマを定めて議論を積み重ね、こととして7カ年目となります。今年度のテーマは、昨年度に引き続き、「21世紀の新しい環境観」でございます。今回は、「大気と人」と題し、「海、大地との関わり」について幅広い議論をいただきます。

それでは、基調講演を開始いたします。ご講演たまわりますのは、独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 物質循環研究プログラム特任上席研究員、京都大学名誉教授、和田英太郎先生です。それでは、和田先生、どうぞよろしくお願いたします。

(和田) 皆さん、こんにちは。本日基調講演をやらさせていただきます和田です。私が今所属している研究室は、衛星画像を使ったりリモートセンシングとか、あるいは JAMSTEC にあります「地球シミュレーター」という大型のコンピューターを使いまして、生態系のモデルを作っております。今日は21世紀の新しい環境観というものを持つために、技術的にはどういう情報がわれわれの手元になりに簡単に入手できるようになったか、また、そういう状況の下で、われわれはどのような新しい21世紀の環境観を持つことができるかという点について話題提供をさせていただきたいと思っております。

1. 21世紀の環境観—その確立の時代へ

○私の話は、1番目は、今、衛星画像とかモデルで、どういうことが分かっているのか、またそれに関して、私どものグループには海洋と陸域の両方を研究している者がおりますので、両方の生態系について

21世紀の新しい環境観
一海・大地・大気とヒトの関わり

地球環境化—地球システムの理解と観測 (GEOS) の時代

1) 21世紀: 技術的進歩によるヒトが地球環境の理解を深めた時代

- ・ 観測技術の発展: 100km 50m 1km / ペタコン (500m)
- ・ リモートセンシング—衛星、RFI, Chla, POC2, Nitrate, 光合成有効放射 (PAR)

観測の範囲

- ・ 海洋大気圏と太平洋
- ・ 海の生物圏など

観測の精度

- ・ 観測: ユーラシア20年衛星観測 日本緑化衛星 観測網

2) 観測対象: 大気と陸域生態系の両方

- ・ 二酸化炭素・メタン・窒素化素

3) 観測の頻度

- ・ 生態系のレベルで観る—食物連鎖をアミノ酸代謝の同位体分析で観る
- ・ 頻度で観る

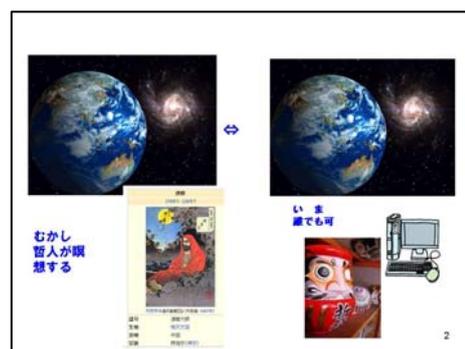
常に進化しながら、新しいパラダイムを構築してゆく—21世紀の新しい環境観

例を挙げながら説明したいと思います。

2 番目の話は、大気と生態系がどういう関わりがあるのかという点に注目します。今、COP15 で炭酸ガスの放出規制の話が国際的に行われていますが、温室効果ガスとしては、二酸化炭素 (CO₂) ばかりではなく、メタン (CH₄) とか亜酸化窒素 (N₂O) も考慮しなければいけません。二酸化炭素は化石燃料を使うことによって出てきます。人口が増えると生活のためのあらゆる意味でのエネルギーが必要になります。一方、人口が増えると食料もたくさん要るようになります。食料は分解しやすい有機物で、糞とか食べ残しの形で地球の表面にばらまかれます。そうしますと、有機物が急速に腐る(分解すると)と局部的に酸素のない所ができて、そこで分解すると最終生成物として二酸化炭素ではなくてメタンが生成してしまいます。また有機物中の窒素がアンモニウムとなりこれが好気に酸化される時と酸化で生成した硝酸が酸素のない所で窒素ガスに還元される途中で亜酸化窒素 (N₂O) が出てきます。メタンと亜酸化窒素は二酸化炭素同じように温室効果があるものですから、「温室効果ガス」といわれており、地球の温暖化についてこれらのガスを含めて考える必要があります。そのようなモデルが現在どの程度まで分かるようになってきたか。まだこれは発表されていないものを無理矢理借りてきたのですが、そういうところをご紹介しますのでいただきます。

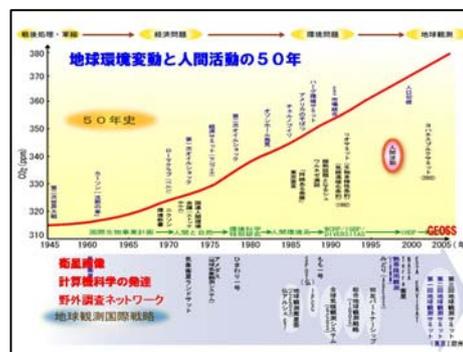
私は「自然界における窒素・炭素の安定同位体比の変化から生態系の構造や物の流れ」を研究しているのですが、世の中を生き物のレベルで生態学者は見ます。最近ではDNAの解析によって親子関係とか進化の研究もします。いわゆる DNA ワールドの研究です。一方、安定同位体比の変化を調べる Stable Isotope の世界 (S I ワールド) では目的とする生物や物質の食性解析や生成経路を調べてゆきます。最近では、アミノ酸などの分子のレベルでもものがどういうふうに生物の体の中で動いているのかという、いわゆる生理生態学に踏み込むような研究も始まっています。3 番目として、窒素・炭素の同位体比というもので食物連鎖を見るとどんなことが分かるのかといったようなお話、この三つの話をさせていただきます。

○まず、最初の話ですが、昔は達磨大師みたいな非常に頭のいい方が、宇宙はどういうふうになっているのだろうと、環境観とはどういうものであろうかといったようなことを考えることができて、われわれ



れ凡人はととてもとてもそういうことは思いもよらないという、そういう時代であったわけです。しかし、最近はパソコンを駆使できるようになりました。パソコンからの情報によって、今、世界中で森林火災はどこで起こっているのかというようなことが画像でもって、いっぺんに分かります。また、人工衛星から見た地球の姿といったようなものが一目瞭然の写真の形で、その気になればすぐ手に入ります。このような進歩は、達磨大師ではなくても、われわれに親しいだるまさんでも、パソコンを持っていればこういう宇宙のことを考えられるような情報を入手できる時代になったことを意味しております、別の表現では広域に渡って情報が社会化したというような言い方もできるわけです。そういう空間を広くした情報が皆さんに平等に伝えられる、そういう時代に入ったということです。だから、自分の部屋の中にもアジア全体を見ることができし、地球全体も見ることができ。見ることができても考えるのは嫌だということではもう済まない。何かそれぞれの個人のレベルで環境観というのは持てるのではないか。いや、持つべきではないか。そういう時代に入ったのがこの 21 世紀の初頭であろうと言えます。本日のフォーラムもこのような背景で行われるようになったのか、なというのが私の側からの見方です。

○右図は、有名なキーリングという方が 1948 年からハワイのマウナロアで大気中の二酸化炭素の濃度を測定して、ずっと経時変化を測ったものです（赤線）。この観測は、彼が言いだして始めたのではなくて、International Geophysical Year の一環の調査研究として要請され、始まったことのようにですが、キーリングさんのすごく偉いところは、

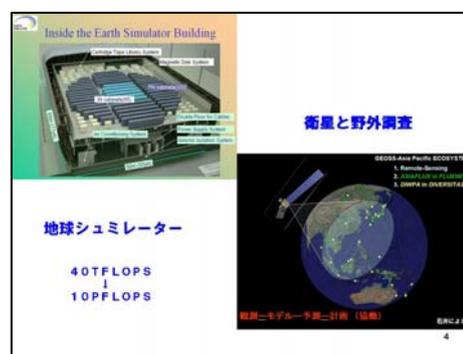


観測当初の時代も今でも測定精度が全く同じだったことです。昔は古典的な水銀マンメーターで測る方法でしたが、その測定精度が極めてよい方法を採用したのです。だから赤線で示したきれいな増加曲線が 50 年を通して定量的に見られるようになったわけです。その間にローマクラブとかオイルショックとかいろいろな社会的な事件がありました。上段に示したように、世界の中心課題は戦後処理から経済、今は環境に変わってきています。x 軸の上を示した国際共同研究については、WCRP や IGBP から、地球の現状をより性格によく知らなければいけないということで、「グローバル・アース・オブザベーション・システム・オブ・システムズ (Global Earth Observation System of Systems)」という国際共

同研究がこの数年間動きだしています。その成果から、地球をもっとみんながよく理解し、環境問題を対等にみんなが議論出来るようにしなければいけないということで、地上観測網や海洋観測網が非常に整備され、更に人工衛星の情報がどんどん取れるようになり、コンピュータの進歩に伴う予測数値実験も急速に発展しました。

この50年で何故色々な予測が』可能になってきたかという、衛星画像と図の下に書いてありますけれど、これと、計算機科学で数値シミュレーションをやるという技術がものすごい勢いで発達したからです。衛星によって、空間的な広がりを持って地球全体や地域あるいは町の情報が取れるようになったということが一つ。しかもそういう情報を使って数値計算がどんどん発達しましたものですから、モデルを作っているいろいろな予測ができるようになったわけです。私が生態系モデルに関係したのは、JAMSTEC に移った6年前からなのですが、衛星画像と数値実験は地球環境変動の研究にはすごく強力な手法になっています。こういうものがこの30~40年で進歩した結果、地球をもっと詳しく調べていろいろな情報を世の中に流すことが可能になり、初めて将来に堂対応するかなどの議論が可能な時代に入ったということを強調しておきたいと思います。

○左図が JAMSTEC に現在ある地球シミュレーターで、大きさは今半分になったのですが、機能は数十倍になったはずです。右の図は人工衛星があって、いろいろなフィールドステーションで衛星のデータを検証するような所が地球上に300ぐらいあります。現在はかなりの精度で広い空間に渡って色々なことが見られるようになってきたわけで、これがこの30年の間にもものすごく変わった点です。



○ここにおられるみなさま方は、こういう地球温暖化問題に関心がある方ばかりですので、もうご存じとは思いますが、気候変動の概要がここにまとめてあります。今、温暖化ガスというのは、メタンとか亜酸化窒素も入れると現在二酸化炭素換算で435ppmです。ppmというのは100万分の1というこ

気候変動 概要

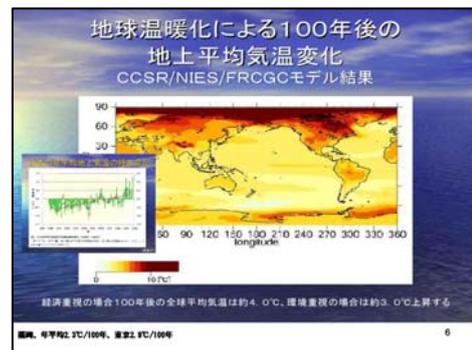
・基本的にIPCCの研究成果と一致

- (1) 大気中CO₂は、産業革命以前の280ppm以下から、現在380ppm以上に上昇。その他の温室効果ガスを含めると、CO₂換算で425ppmに相当。
- (2) 化石燃料の燃焼だけでなく、森林の伐採・砂漠化など土地利用の変化も温室効果ガスの増加に寄与している。
- (3) 上記のCO₂濃度は、少なくとも過去42万年における最高値である。
- (4) 現在、石油・自動車業界などで一つの「目標値」として議論されている550ppm CO₂以下に抑えられる可能性は低いとされている。
- (5) 20世紀に、地球の平均気温は約0.6℃上昇し、日本は約1.0℃上昇した。
- (6) 21世紀の地球の平均気温(全球平均)は、1.4(1.1)~5.8(6.4)℃上昇すると予測される。
- (7) 北極海の水も減少している

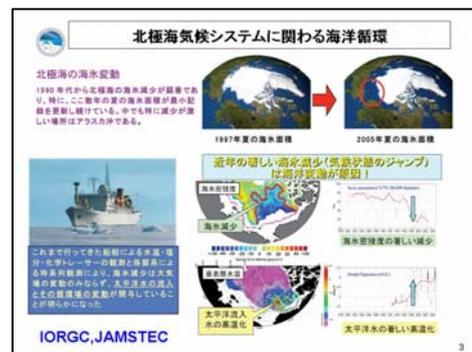
1 ppm: 1 part per million, 100万分の1

とで、 1m^3 の大気中に 1cc のガスがあると 1ppm ということになります。550ppm 以上になると平均気温が 2°C 上がってしまうのではないかとされていますから、あと 100ppm ぐらいの増加させる余裕があるのだけれども、喫緊にこれをどうするのかというのが、われわれが思っている以上に深刻な問題であろうと、そういうふうになってきています。実際には地球の平均気温がこの過去 100 年に 0.6°C 上がっています。

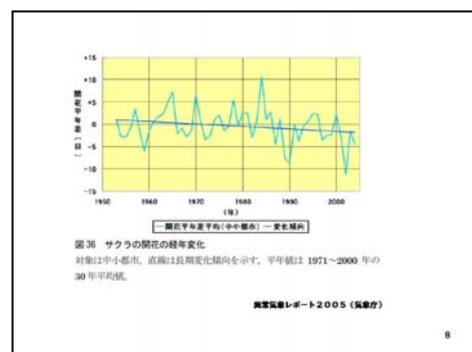
○右の図は 100 年後の気温上昇の予想を図示したものです。環境重視の場合でも、その上昇は 4°C と予想されています。北極域の温度上昇が顕著です。特に北の方は、氷が溶けると地表が全部黒くなりますので、反射率が悪くなってすごい勢いで温度が上がります、大きな問題が生じそうになっているわけです。過去 100 年では、全世界で 0.6°C 、東京などは都市化してコンクリートで覆われていますから、平均温度で見ると 100 年に 3°C ぐらい上がってしまった結果となっています。



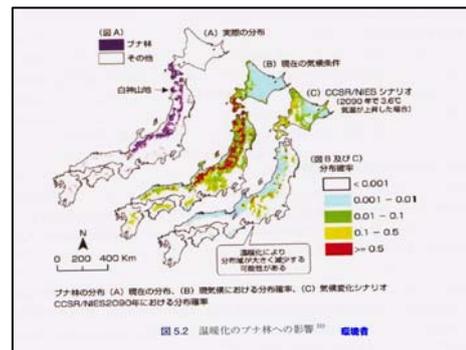
○右図は JAMSTEC の研究船が毎年北極海の調査に行っておりますが、夏に氷がたくさん溶けています。1997年と2005年を比べると大きな差が見えますが、こんなに溶けてしまった理由は、よくよく海洋学的に調べると、温かい水が流れ込んできているといったようなことも理由になっているようです。一時これは大騒ぎになりましたけれども、ことしあたりはまだあまり騒がれていないといったような感じではありません。



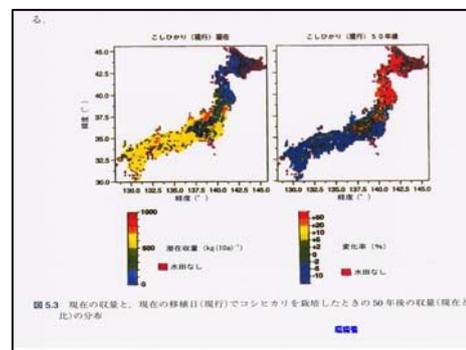
○この右の図は、皆さんに例として示したのですが、植物に関係したことで桜前線が少し早くなってきているのではないかとといったようなことがあります。



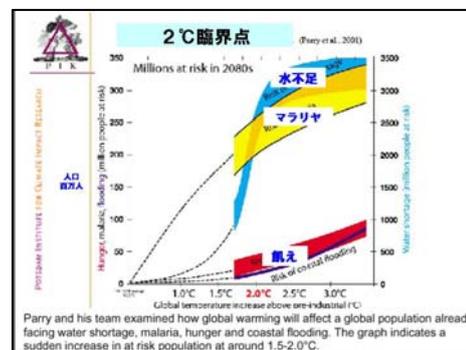
○それから日本の有名なブナ林、(白神山地などは有名なブナ林で、京都大学の生態学研究センターや東北大野生生態学者が研究しております)の現在の分布と、温暖化により分布が大きく減少する可能性を图示しております。赤い所はブナ林があってもいいという地域ですが、温暖化で気温が上がると、100年ぐらいたった2090年ごろになると生息域がほとんどなくなってしまわないかといったような予測もなされています。



○右図は気温が上がるとコシヒカリの増収率が東北地方とか北海道の方が多くなるということを示したものです。この赤い地域がプラスの増収率を示しています。他にも氷河が溶け後退した写真など、いろいろな現象が視覚的には起こっているわけです。本当にそれが温暖化のせいかどうかという議論はさて置いて(これはもう専門家に任せればいい)、現在の人間活動は、とにもかくにも石油文明に依存しすぎているところから其の是非を視野に入れ、21世紀の新しい環境観というものを、いろいろな情報を手に入れながら、個々のレベルでつくっていくということが大事なのだらうと思われま



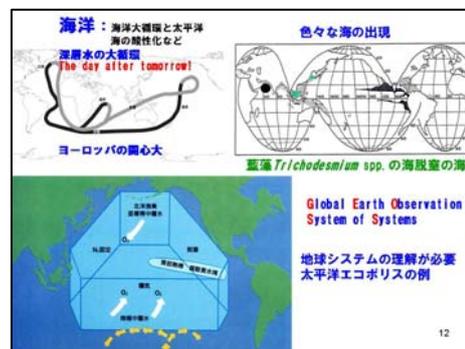
○平均気温が2°C以上上昇すると、右図に示したように、急激に水不足の人が30億ぐらいになったり、数億の人たちが飢えるとか、温暖化で熱帯域が北に移動し、例えば、マラリアが増えるとか(実際にそういう蚊が増えているという話もあります)、が予測されています。したがってこのような事態になることを伏せくためには、2°Cの上昇以下に抑えようとするのが不可欠であると多くの人々が考えるようになったのです。



○ここで視点を変えて、温暖化に関連させて、海とか陸のシステムとして、どんなことが

重要事項として考えられているかということ、非常に新しい知見ばかりではございませんが、ご紹介したいと思います。

海の場合には海洋の大循環と二酸化炭素の吸収などと酸性化の問題があります。特に最近では海洋の酸性化ということが注目されています。すなわち、空气中に二酸化炭素が増えてくると平行して海に溶け込むわけです。そうすると、二酸化炭素が溶けてゆくと、ラムネと同じで水の pH が下がっていく。そうすると炭酸カルシウムが溶ける、そういう問題があります。



他方、これは皆さんあまりご存じではないかと思いますが、北大西洋で水が 4000m まで潜って、一部インド洋で上がって、更に太平洋へ来て上昇する。深層水の大循環から見ると太平洋というのはこの水循環の終着駅で、2000 年ぐらいかかって北太平洋の表層から来ているわけです。冷たい水が深層から上がってくるため北部北太平洋は底から冷やされるため、カムチャツカの辺りは寒くてあまり人が住めない。一方北部北大西洋域はメキシコ湾流などの温かい海流がうんと高緯度まで行きますので、それなりに霧も出ますけれども、暖かい。だから同じ緯度でもヨーロッパ周辺はヒトが沢山すむことができます。

今から 1 万 2000 年ぐらいい前、最終氷期の終わりごろに、アメリカ大陸の五大湖あたりの氷河湖が溶けて北部北太平洋に淡水が流れ出し、湖お海域の塩分量が減り、海水が沈まなくなり、この真相循環が動かなくなってしまい、北大西洋域の寒冷化が進んだといったようなことがわかりました。このことから、二酸化炭素が大気中に増えると深層大循環が止まり、ヨーロッパが寒冷化する可能性が指摘されたりしました。このためヨーロッパの人たちはそういうことを気にして、温暖化に対してものすごくナーバスになっていることがあります。われわれ太平洋の方にいる人間は安全ですが、彼らの悩みと、どうして彼らが温暖化の問題に敏感になっているかを知っておく必要があるということです。

2000 年かかる深層大循環では深層水の終着駅は太平洋となります。このことを非常に単純化して別の側面から見ますと、水の流れの終着駅というのはごみが全部たまる所です。そのごみをどうやって処理しているかということ、例えば右図上野海洋の図の所の黒い海域では、100~1000m ぐらいいまで溶存酸素がなく、バクテリアは硝酸 (NO_3) の酸素原子を使って呼吸し、窒素ガスを作っています。すなわち脱窒が起こって窒素を大気中に戻してい

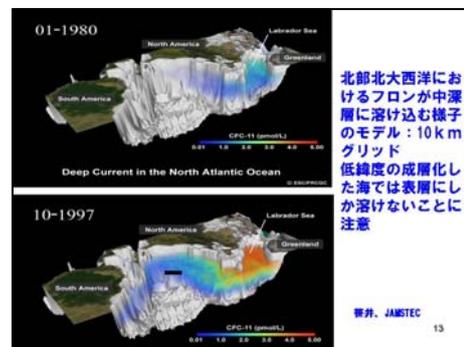
ます。このため、太平洋に、簡単に言えば空気中の窒素ガスがなくなるまで硝酸がたくさんたまってしまうようなことは起こりません。それから残ったごみはプレートテクトニクスで日本海溝みたいな所に入ってしまうということで、太平洋はごみ処理施設も完ぺきにやる。長い時間軸で見ると、太平洋は生元素の物質循環系を支えている。太平洋というのは広く、われわれの身近な海ですが、壮大なごみ処理施設（エコポリス）であるという見方もできるのです。

○それから、空気中に二酸化炭素が増えると、当然

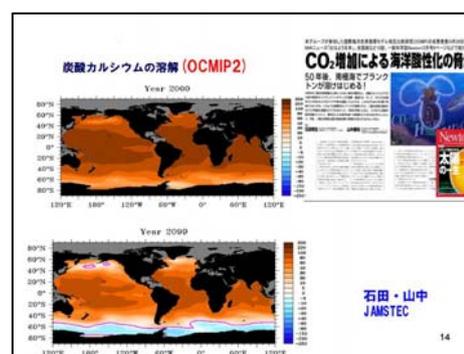
（人間活動で毎年 6Gt の炭酸ガスを出している。）と 2Gt ぐらい海に溶けます。では、すべての海に平均的に溶けるかということ、そんなことはありません。

右図はフロンがどうやって溶けるかというのを 1980 年と 1997 年を比較したのですが、下図の赤い所がフロンがたくさん溶け込んでいる所です。これは北大西洋で、先ほど申しましたように、表層水が沈んでいる。そういう沈む所に溶けて中深層にフロンとか二酸化炭素が運ばれることが観測やモデルから分かってきました。

すべての海に一樣にとけるわけではありません。例えば、南の海などの表面が温かくて上下混合がほとんどない海域では、二酸化炭素などは中深層まで運ばれないため実質的にはあまり溶けないわけです。海に二酸化炭素が溶けるといったようなことは、(大体こういうことは中学校の理科の知識だけで全部間に合うはずなのですが、)このようになっていることが、なかなか言われないと気がつかないといったようなことがございます。上の図は非常に細かい 10km のグリッドで世界中の海を、海洋の大循環と大気大循環モデルを組み込んで作ったものです。こういう図はスーパーコンピューターがないとできないのです。

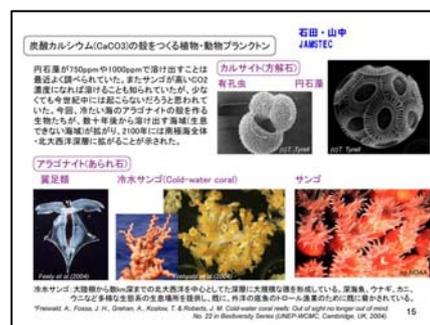


○右図は、大気から二酸化炭素の溶ける量が増えると pH がどういふふうに変わっていくかということ、今後 100 年間についてシミュレーションしたものです。下図の南極周辺の海域は 100 年後にアラゴナイトという炭酸カルシウムが溶けてしまう所である（青色の海域）。炭酸カルシウムというのは温度

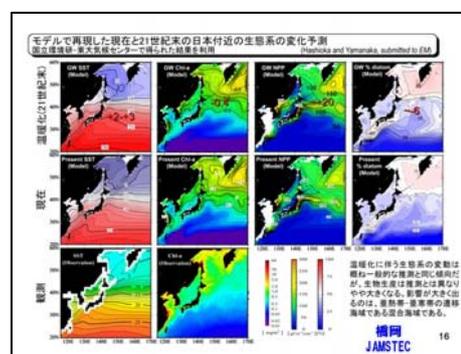


が低いほど溶けやすいのです。そういうこともありまして、海の酸性化が進むと、こういう南極大陸の周りや北極海の一部で溶けてしまう。詳しくは経時変化で、2050年、2075年、80、90年と、時間的にはこういう変化で起こりますよというモデルが作れます(Orrら、2005, Nature [435](#) 681-686)。

○従って、冷たい所にいるサンゴ(冷水サンゴ)、こういう炭酸カルシウムの殻を持っているものは、あと100年たつとみんな絶滅するのか。私は必ずしもそう思わなくて、生物もかなりしたたかですから、何か分泌物を出したりして自分を守るということを必ずやるはず。だから、科学・物理の計算だけでいかなんかとは思いますが、一応そのような絶滅が起こりうることを注意しておく必要があるし、これをモニタリングするシステムは絶対必要だろうと思われま(Orlら、2005, Nature [435](#) 681-686)。

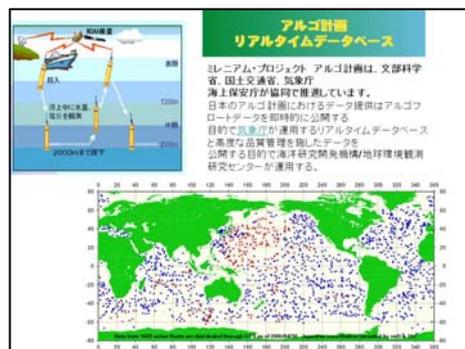


○右図は日本の近海は温暖化で100年後どう変わってゆくか?というのをいろいろモデルで試した例です。これは橋岡さんという、今、私どものところにいる若い研究者がやっているのですが、表面温度がどうなって、植物プランクトンの分布がどう変わり、植物プランクトンの生産力はどうか、それからサケ・マスにつながる珪藻は多くなるのか減るのかといったようなことを予測しました。表面水温は100年後2°Cぐらひは高くなるだろうとか、それからクロロフィルの量がちょっと減るかもしれない。北海道東方海域の生産は高くなるけれども珪藻はあまりいなくなるということでは、将来の漁業予測にこのような100年後のシミュレーションをちゃんとやっておくといったようなことは、非常に重要だろうと思われま(Hashiokaら、2009, Geophys. Res. Letters, [36](#), L20604)。さらに、地球シミュレータ上で開発されたオフライン高解像度海洋生態系モデルによる日本近海における植物プランクトン(クロロフィル)の分布を20km格子でもって、数日おきの変動を予め計算された「高解像度の気候シミュレーション(約20km格子)の結果」を利用して、海洋



生態系モデルで計算することも出来るようになってきています(北大山中康宏ら)。衛星画像によるデータがあるわけですから、そういうものと比べることで、研究室に居ながらにして、クロロフィルの分布がどういうふうに黒潮周辺で変化しているか、変動しているか?といったようなことも見られるようになってきたということです。

○それからこの数年前から始まったのは図に示したアルゴ計画です。アルゴフロートは自動的に深度2000mまでもぐり、海洋物理の人たちの非常に重要な情報源になっている、塩分量と水温を測って上まで上がってきた後、その情報を NORR の衛星に集約し世界に流すしくみです。世界の海に3000個あり、日本は赤色で示したで300ぐらい



を J A M S T E C が担当しています。3000個は500km x 500 kmに1個ずつに相当します。同時性のある情報というのが今すごく重要なわけです。観測船の場合、私の経験で言うと、西経155度線に沿って北緯55度から南緯15度まで行ったことがあります。3カ月ぐらいかかってしまうのです。そのため得られる色々な断面図は100日間に渡った時間のずれを含んだものになります。しかしアルゴ計画で得られた全海洋の温度・塩分量のデータにはこれまで不可能であった同時性があり、海洋物理のモデルは全部こういうデータを使うようになってきました。ロボット観測が一般化しつつあるといったようなことをご理解いただければと思います。

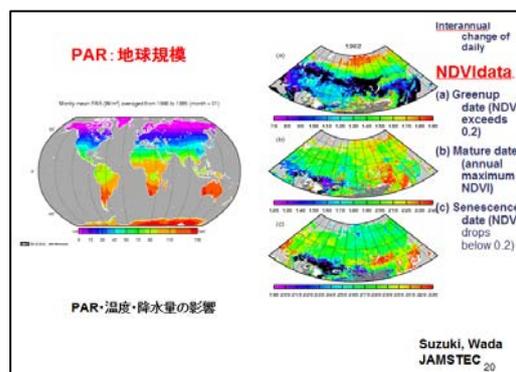
○その次が陸の方ですが、右の図は衛星画像と陸域の各種野外調査地を示しています。これらの調査地で得られたデータを衛星画像のデータと合わせ、陸域の木の葉の消長や二酸化炭素の出入りが広い空間に渡って観測できるようになってきたことを示しております。例えば私は京都にいた当時、琵琶湖の生態系の構造とその動態の研究をしていました。琵琶湖



湖の研究をやる日にユーラシア大陸野植物の茂り具合はどうなっていて、日本列島全体でも植物はどうなっていて、琵琶湖の中の自分が水をくむ所というのはどういう位置づけに

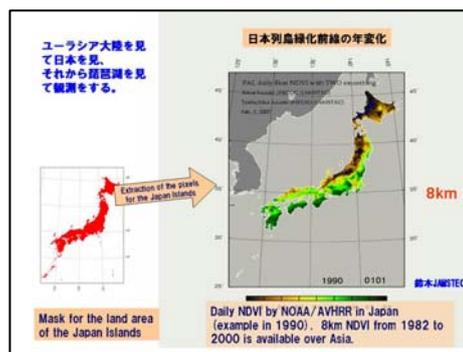
なっているのか。そこまで見ながら観測をやる、そういった観測もできるようになったと
いうことをご紹介しますと思います。

○PAR というのは “Photosynthetic Active Radiation” といって、植物の緑の葉っぱが吸った光の強さが一月ごとにどう変化したかを1月ごとに15～16年から20年、ずっと世界全体でデータを取って整理したものです(上左図)。上図の右図は、これはユーラシア大陸ですけれども、葉っぱがいつ出てきて、いつ茂って、そしていつ落ちたかというものを20年ぐらいずっと



と見ているわけです。これらの年々変化と気象条件野変化との相関関係を詳しく調べますと、葉が成長して落ちる、この変化が温度・水分量・光の量のどれによって支配されているかを各地域ごとに調べることが出来ます。その結果、植物の生産に温度が効いている、水が効いている、光が効いているということで地域を分けると、モンゴルなどは前二者の境目の地域に相当し、この境目にある所は温暖化によって生態系が一番影響を受ける所であるといったことが分かってきました。この研究は JAMSTEC 鈴木力英博士によって纏められている最中です。

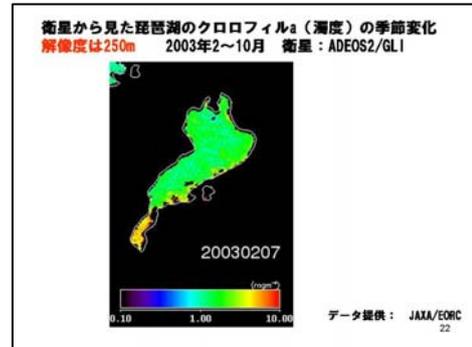
○それから桜前線というものを見たことがあると思います。右図は日本の緑化前線の年変化をアニメ化したときの1990年1月1日の状況を示しています(JAMSTEC, 鈴木力英博士による)で、図の下に日付が出ています。この図では、1990年の1年間について、どういうふうに緑化前線が変わっているのかを追うことができます。多分これ



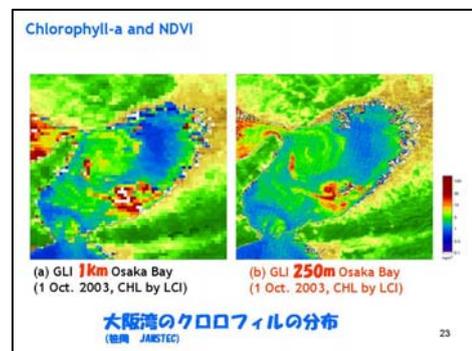
れは僕らの部屋だけしか持っていませんから、あまり見たことがないのではないかと思います。7月になると日本列島が緑に満ちています。そして9月からだんだん葉っぱが落ちだして、そして10月、11月になると葉っぱがどんどん落ちて、そして冬になると茶色になってしまうと。こういう状況の中で琵琶湖はどういうふうになっているのだといったよ

うなことを見ることも可能になってきたということです。こういうものは全部衛星のデータを使って得られるわけです。

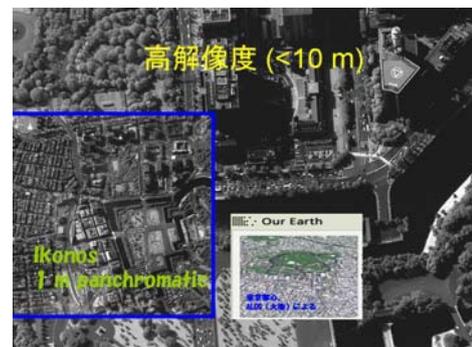
○これは JAXA に無理やり頼んで作ってもらったのですが、250m のグリッドで琵琶湖を見たものです。まだクロロフィルと濁度が分けられないそうです。両方入ってきてしまっているのですが、そうすると秋に琵琶湖が真っ赤になる日があるのですけれども、真っ赤になるのは台風が過ぎた後の状況です。このようにして、濁度とかクロロフィルの分布がどうなっていて、自分がサンプリングした所はどういう情報が取れたか？といったようなことを知りながら調査研究やれます。逆にこういう全体の情報からどこで観測しなければいけないかといったようなことが分かるようになりつつあります。今後の琵琶湖の研究は、観測をする人とモデルと作る人、あるいは衛星画像をやる人が一体化して進めていかなければいけないし、それができる時代に入ったということです。



○これは大阪湾のクロロヒル分布の衛星画像から求めたものです。左の図が 1km のグリッドサイズ、左図の小さい四角が 1km×1km という事です。これは右図の 250m のグリッドサイズで見える図とは全然違って、250m になると大阪湾内の渦が見えるようになります。



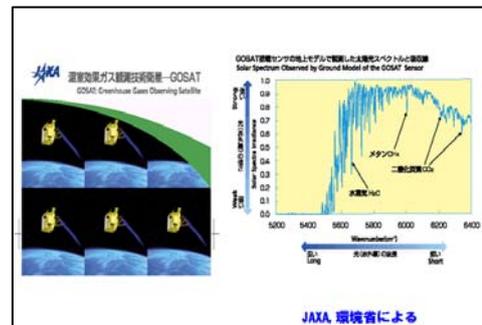
○これは今は民間の衛星で、一つのショットが 100 万円などという、すごく高い画像ですが、解像度 1m で写真が取れます (衛星 Ikonos の画像)。内挿された右のほうの図は、文科省が担当している ALOS 「大地」という去年 JAXA が上げた地上を三次元的に観測する衛星の写真です。これは皇居の辺りですが、そういうものも、使う気になればデータは蓄積



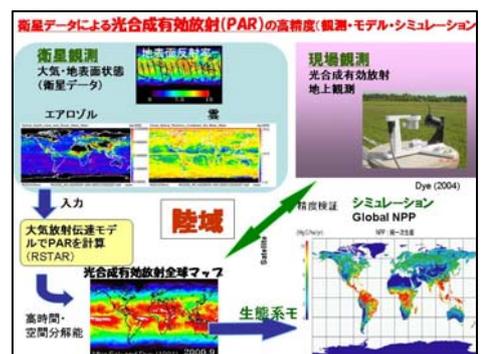
され始めているのです。

○それからことしの春だと思えますけれども温室効果ガスのモニタリング用の GOSAT

“Greenhouse Gases Observing Satellite” という衛星の紹介記事です。これは環境省が中心になって上げました。二酸化炭素やメタンのモニターをして、全世界のどこの地点がこれらのガスをどの程度放出しているかといったようなことがモニターできます、こういう情報というのは今後の温室効果ガスに関する国際会議で有効に使われるのだろと思われ



○右図は衛星のデータを組み込んで炭素循環モデルを作り、陸域の光合成活性を全球について求めるやり方を図式化したものです。衛星で観測し、そして光合成に必要な光がどのように時間変化しているか。光強度に対して、エアロゾルとか雲の影響の補正をします。こういうデータを使って炭素循環の生態系モデルを作ると世界のネット・プライマリー・プロダクション（一次生産、右下の図）が一応分かります。こういうことが既に動きだしていて、いろいろな方向に発展しつつあります。



○ここまでは二酸化炭素とか炭素循環のことしか対象としていなかったのですが、去年・今年あたりからメタンとか N_2O も全部入れなければ駄目だということになりました。それを始めたということですが、その前に今までのことをまとめると、地球や地域環境の観測が先端技術を駆使できる時代、誰もが入手

パート1のまとめ
21世紀の新しい環境

常に変化しながら、新しいパラダイムを構築してゆく。

- 地球や地域環境の観測が先端技術を駆使できる時代に入った。
技術開発によるヒトが時空間の壁を突破した時代となり、個人がパソコン上でグローバルな情報を取れるようになった
- ヒトの社会はその歴史上初めて観測から予測モデルの構築そして社会への伝達と社会システムの形成に至るハードルを越えることに挑戦し且つそれを可能にしようとしている。

27

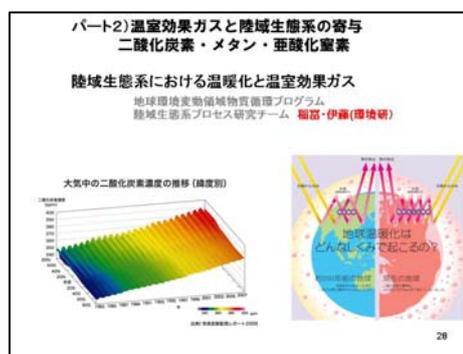
できる時代に入った。そういうことでは、部屋に居ながらにして空間的に広がりのある情報を得られ、予測モデルも作れますので、ヒトが時空間の壁を突破した時代となったわけ

です。合意形成とか環境観というものに対して、誰でも同じ情報を持って、会議に参加できる時代になったということが非常に重要なのではないかと、そういう思う次第です。

ですから、ヒトの社会はその歴史上初めて観測から予測モデルの構築、そして社会への伝達と社会システムの形成に至る議論をできるようになったはずだと。ただし人間社会は複雑ですから、私が頭の中で考えるように、上手くやれるかどうかは別ですが、やれるような準備はもうできつつあるということ、皆さまにお伝えしました。

2) 温室効果ガスと陸域生態系

○2番目に、炭酸ガスばかりではなくて、メタンとか N_2O がどうなっているかを考えます。以下は主に JAMSTEC に在籍した稲富素子博士によってなされた成果です。図の左は 1983 年から 2007 年まで、これは緯度・経度と二酸化炭素の濃度分布を示したものです。ここが赤道ですが、北の方ほど炭酸ガスが多い。また右の図は温室効果を解説した模式図で、200 年前と今を比べると、空气中にメタンとか N_2O とか CO_2 が多くなって、地球から放射された赤外線を吸収し、このため温暖化が進んでいるという理解を模式的に示しています。

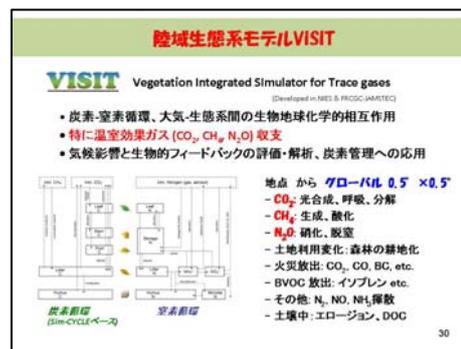


○各温室効果ガスの温暖化に寄与している割合は、炭酸ガスが 6 割、メタンが 2 割、それから一酸化二窒素が 6%、フロンがまたどんどん増えていますが、代替フロンを使っていますので 14%は長期には減る方向にあります。意外なことに世界が騒いでいる二酸化炭素の寄与率は高々 60%である。人口が増えても我慢すれば化石燃料の消費は減らすこと



はできるかもしれませんが、食べ物の量はほとんど減らせません。金持ちでもお金のない人でも食べるもの野両派は大体決まっていますので、食料の分解で生成するメタンとか N_2O は減らすことができなくて、今後、増える方向にあることを強調しておきたいと思います。

○すべての温室効果ガスを含む、「VISIT」という、“Vegetation Integrated Simulator for Trace gases”モデルは環境研と JAMSTEC に 所属する伊藤明彦博士によって開発されました。炭酸ガスばかりではなくてメタンとか N_2O とかほかのガスもみんな考えましよう。そのためには炭素循環ばかりでなく窒素循環も、このモデルに組み込まれています。



モデルの中身はどんなふうになっているか。大まかにはグリッド毎に収支計算をやっているだけだと思って下さい。それでグリッドサイズが 50km×50km ぐらいのメッシュでもって数値モデルを作っていく。そして植生分布とか、水田がメタンを出すものですから、それから湿原、土壌の分布、それからどれぐらい窒素がエアロゾルとなって飛んで、あるいは雨でもって上空からもたらされているかといったようなことをやる。モデルとしては A1 という、予測モデルをやるときは一番環境に留意したシナリオで計算をやるということになります。

2) のまとめ

先ず「ネット・エコシステム・プロダクション (Net Ecosystem Production: NEP)」とあって、これは光合成の量ではなくて、光合成をやった葉っぱが落ちると葉っぱが分解してしまいます。ネットに残るのは、幹が太るとか、土壌に有機物がたまるかと、そういうネットプロダクションですが全球で、9.6Pg (10^{15} , Gt) となります。人間が出しているのは大体 6Gt (6Pg) ぐらいです。

それに対してメタンというのは水田とか沼沢地から出てくる。それから植物が出す。あるいは地面の表面で酸化される。また メタンは反芻動物の家畜 (牛とか羊) が出すのです。そこで、メタン放出量を、植物が出す量、水田とか湿原が出す量、反芻動物は出す量、メタンが土壌の表面で微生物によって酸化されて二酸化炭素になる量等を全球の陸域について全部計算しその地理的分布を求めておきます。

一方、 N_2O がどれぐらい放出されているか。 N_2O というのはアンモニアが酸化されて硝酸になるときにもできますが、多くは硝酸が還元されて窒素ガスになるときに出てくるのです。畑に非常に肥料をまくものですから、硝酸ができて、それがまた還元されて N_2O が出てくる。これを計算すると、1990年代には 21.8Tg/年ぐらいの量になる。Tg (テラ

グラム) というのは 10^{12} で、Pg (ペタグラム) が 10^{15} です。大体地球全体の話はこういう単位でもって記述することが一般的です。

これらを纏めると、**温室ガス効果の収支の評価**が出来ます。式としては

$$[\text{CO}_2]\text{NEP} - 25 \times [\text{CH}_4]\text{EMIT} - 298 \times [\text{N}_2\text{O}]\text{EMIT}$$

1990年代には光合成で二酸化炭素は $9574.8 \text{ Tg CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 吸収されました。それからメタンがいろいろな所から出てくるからそれはマイナスになります。更にこれから酸化でもってメタンを減らされる分が吸収に相当するわけです。N₂O もソースになるからマイナスです。今、これを全部入れて常識を計算するとどうなるかということ 1990年からここ10年ぐらいは、 2 PgCO_2 を陸域生態系は放出していることとなります。上の式の中の係数25と298は炭酸ガスへの換算係数で、メタンは1分子あたり温室効果が二酸化炭素の25倍、亜酸化窒素は298倍になります。1990年代ではこの収支は $1.8 \text{ PgCO}_2/\text{年}$ の放出ですが、21世紀初頭に吸収になりしばらく吸収が増加した後、減少し、2100年に収支ゼロになり以降再度陸域は放出になるという結果出ています。この計算には都市部は入れておりません。

これらの結果を環境重視の A1 のシナリオに関係させますと、今後、植林とか何とかが盛んで樹木が育ちますから吸収に行く。2100年ぐらいになったときに、ひょっとすると永久凍土などが溶けだすと、この時期、爆発的にメタンなどが出てきて、正のフィードバックが起こって温暖化を加速する可能性がある。稲富さんの成果は最新のほやほやのモデルですから、小さいところはいろいろ問題があるのかもしれませんが。各国のモデルでもまた違ったものが少し出てきますけれども、定性的にはこういうことである。こういうところまで二酸化炭素以外のものも全部入れて計算する時代に入りました。陸域炭素循環生態系モデルの研究は始まって~8年ぐら経ったと思いますけれども、やっとそメタンとか N₂O も含めたようなモデルが全球的にやれるようになってきたということをお知らせしておきたいと思います。

3) 新しい視座—食物連鎖を C/N 安定同位体効果で見る

○3番目の話題は、私の専門ですが、分子のレベルから、一番初めに言いましたように、DNA で見るとはなく、生物種で見るとはなく、われわれ動物のアミノ酸の代謝系が体の中でどういうふう動いているのかを食物連鎖に沿った炭素・窒素の同位体効果で見られるのだろうという話をしたいと思います。食物連鎖というものが自然界の色々な生態系

にあって、例えばモンゴルですと、牧草から家畜、オオカミ、人間にまで続いているわけです。その他の生態系ではトラとかワシとか、食物連鎖のトップにいろいろな生き物がいるわけです。連鎖の頂点にいる動物たちというのは、そこにいる植物が作った必須アミノ酸とか、あるいはその他のアミノ酸、あるいは重金属、後者は還元しないと生物は使えませんから、そういうものを非常にうまく効率よく使って、食物連鎖が維持されるような方向で進化したのであろうと思います。

(パート3)

自然界の視点
分子のレベルで見る一食物連鎖をアミノ酸代謝の同位体別で診る

分子のレベルの世界の食物網から3R (Recycle, Re-use, Reduce) をまなぶ。

作業仮説

●ここで各種生態系の食物連鎖は植物が環境から獲得した必須アミノ酸や必須金属を効率よく使って、連鎖の生物量を最大化する方向で進化した。

●したがって植物の獲得した必須化合物の量が連鎖のトップまでの代謝系を規定している可能性がある。すなわち食物連鎖上の同位体効果に反映される可能性がある。

37

○ 安定同位体の存在

水素を1とすると、重さが12の炭素 (^{12}C) と13の炭素 (^{13}C) があります。窒素も重さが15の窒素 (^{15}N) と重さが14の窒素 (^{14}N) の両方があります。体重50kgの人ですと、重い方の炭素は137g、重い方の窒素を5gぐらい持っています。重いものだけを全部合わせると225gぐらいわれわれの体の中にはこの重い同位体が入っています。この重い同位体はどこか

炭素・窒素の安定同位体とは何か？
何処にあるのか？
答え：人の体の中にもある。

食物連鎖に沿って重い窒素や炭素は濃縮される。
この濃縮の程度からある動物が食物連鎖の何段階にいるかが分かる。
バイカル湖沖の例を次に示す。

38

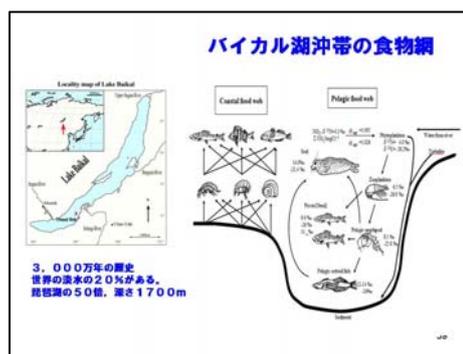
から来たのか、という、われわれが食べている食料から来ているわけです。どういうものを食べているかによって、同位体比は微妙に違ってきます。例えば南北アメリカみたいにトウモロコシを家畜が非常に食べる場所は ^{13}C が高くなって、髪の毛の炭素同位体比を精密に測るとアメリカに住んでいる人と日本に住んでいる人の差は簡単に分かります。ヨーロッパに住んでいる人は牧畜で、アメリカとはまた全然違う。日本人は魚をよく食べますので、魚を食べるところは ^{15}N が高くなる。重い同位体 (^{15}N とか、 ^{13}C) は食物連鎖に沿って濃縮されるからです。よくものを食べると重金属が濃縮されるというのと同じような現象だと思っていただければいいのです。ただ、窒素や炭素の場合には濃縮のされ方が決まっているものですから、濃縮の度合いによって、何度「食う・食われる」の過程を何度経たかということが簡単に分かります。

○バイカル湖の例を示しますと、沖帯では植物プランクトンからエピシュラという動物プランクトン、よこえびのマクロヘクトパス、それからカジカのゴルムヤンカと、きれいな

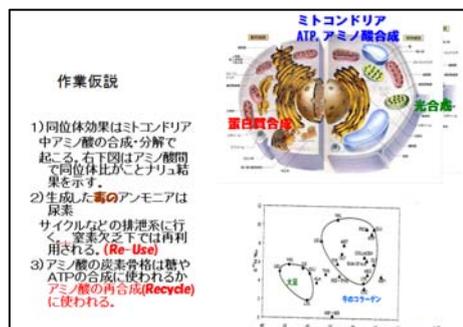
鉛直方向の食物連鎖ができております。これら各種生物の炭素・窒素同位体比を精密に測定し2次元の図に描きます。

横軸に炭素の同位体比、(^{13}C の量)、縦軸に ^{15}N の量を取ると、こういう食物連鎖に沿って直線が近似できる： $Y = 2.52 X + 75.9$ 。この直線が近似できるというのはどういう意味かということ、植物を食べる

植食性の動物、それを食べる動物との間の濃縮のされ方が皆同じだということです。濃縮のされ方が皆同じで直線になるのだとすると、アミノ酸の代謝系の物の流れが非常に複雑だけれども、ある特定の食物連鎖野中の動物同士のアミノ酸代謝の動態はきっとすごく似ているのだろう、相似形になっているのだろうと考えられます。実際の濃縮の機構は非常に複雑ですが、ここでは単純化して、簡単に聞いていただければありがたいと思います。



- アミノ酸の代謝というのはどこでやっているかというと、細胞内のミトコンドリアという顆粒ところでやっています。このミトコンドリアというのは ATP を作る場所です。さて、アミノ酸が分解されると窒素と炭素骨格に分かれてしまうわけですが、その炭素をもう一度アミノ酸を作るのに使うリユース・リサイクル系がちゃんとできて、それが駆



動しているのです。そういう再利用するということが体の中でもものすごくよく行われているということが想像できますし証明されています。ここで述べているのはまだ確定した話ではないので、定性的にご理解いただきたいと希望いたします。

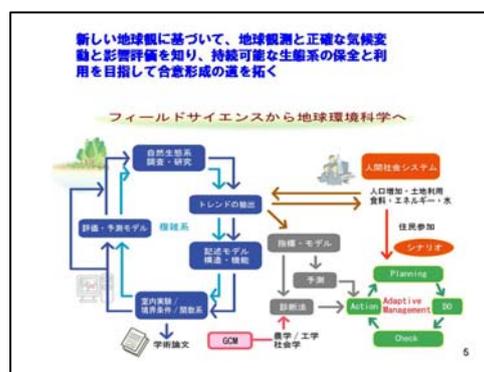
それから、窒素の非常に少ない外洋の暖水海みたいな海域に行くと、生物から窒素が海水中に排泄されると、それをバクテリアが食って、さらにそのバクテリアをせん毛虫というものが食べて、それがまた動物プランクトンに食われるという、出されたNをまたリユース・リサイクルするといったようなことが起こります (JAMSTEC Aida らの私信)。

さらに、代謝マップをよくよく見ると、生体内アミノ酸代謝では炭素骨格をリサイクルしていて、貧窒素生態系では窒素をリユース・リサイクルしているといったような形で、生態系の食物連鎖の生物量というのは贅肉がない非常にスリムな状態となっているのでは

ないかと考えられます。われわれが、サステナビリティの議論で「3R」と言っている Reduce, Reuse, Recycle のシステムが自然界の食物連鎖の不文律になっているのではないかと思います。このような 3R を哺乳類は体の中の代謝系に保持しており、自然界の食物連鎖と代謝マップというのは皆そういうふうには作られたのではないかと思います。人間もその中の一つの生き物ですから、3R を考慮した、すなわち地産・地消重要視することも再考の余地が十分あります。サステナビリティを同位体効果という面で一生懸命見ると、新しい視座が見えてくる可能性があるということをお伝えしたいと思います。

4) まとめ

○最後にまとめに入るのですが、特に環境科学の場合は、論文を書くだけではもう困る。一体世の中にどういう寄与が出来ているのか？を問われるようになって来ました。私の活躍した時代は、論文を書くことで良しと言われて、ある意味では非常に幸せな時代だったのですが、この 10 年はとてもそんなことだけでは駄



目で、論文を書いた上で、自然界を評価する指標とか、あるいは予測モデルを作って、これを社会に提案していくことが求められるようになりました。シナリオを提示により、議論が始まり、いわゆるよくいわれる「アダプティブマネジメント：順応的管理」すなわち PDCA サイクルを回しながら自然界の管理をしていくことに役立つ形での文理統合が求められるようになりました。この点に関して、われわれ自身も、かなり現実の対策実現に寄与する予測を提示することが出来るようになってきました。しかも、その予測は確率の高い、低いで評価できるようになるでしょう。専門化がある程度の確信を持って社会が求める予測が出来る時代に今入ったということを強調させていただきたいと思います。

○21 世紀の新しい環境観について、右図に纏めました。われわれの世の中というのはもう 1 年から 10 年ごとに変化している。例えば私が 1939 年に生まれたのですが、この 70 年の間に世の中はもう非常に変わりました。ライト兄弟の飛行機の成功はほぼ 100 年前の 1907 年なのです。2007 年には人工衛星が飛び交い、‘はやぶさ’の帰還が昨今話題です。これがあと 100 年たったらどうということになるのか、恐ろしいぐらいですが、とに

もかくにも新しいパラダイムなどと言っても、どんどん変わるものだといえるでしょう。多分、生物界というのは速度の速い遅いはあったかもしれませんが、年中変わっていくものだということを出発点として、これからのいろいろな事件に対応せざるを得ないのではないかという気がします。その時、絶えず生物界の不文律を見出しそれを遵守することが重要になると思われます。

まとめ

21世紀の新しい環境
常に変化しながら、新しいパラダイムを構築してゆく。

- 地球や地域環境の観測が先端技術を駆使できる時代に入った。
技術開発によるヒトが時空間の壁を突破した時代となり、個人がパソコン上でグローバルな情報を取れるようになった
(情報の社会化)
- ヒトの社会はその歴史上初めて観測から社会システムの形成に至るハードル越えることに挑戦しようとしている。
(合意の連鎖)
- 自然界の食物連鎖は地場の一次生産を反映した3Rの世界(Recycle, Reuse, Reduce)であろう(地産地消)。
ライオンと狼は何時でも腹が減っている。(自然に学ぶ)

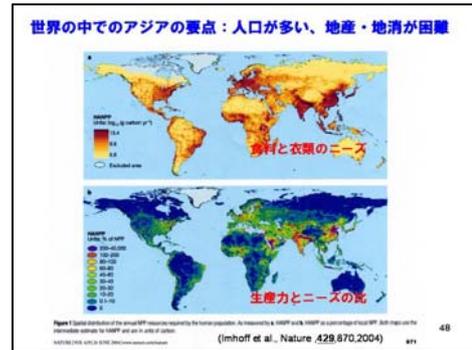
46

ここに書いてある地球や地域環境の観測が先端技術を駆使できる時代となりました。しかも誰でもパソコンがあればその成果の情報を得られる、そういう意味合いでは、環境の情報が今、社会化されつつあると言えます。今はアウトリーチとあって、業績の中にどれだけ社会に貢献して宣伝したかという評価がわれわれ研究者は問われるようになってきました。そういう知識が、専門家しか知らなくて一般の人は知らないということではなくて、みんな平等に、みんなが理解するようになって初めて議論ができます。情報の社会化によって、合意形成の筋道も、それは大変かもしれませんが、今後生まれてくるようになるはずであるという、極めてオプティミスティックな考え方を私は持っております。

それから、自然界の食物連鎖というのは、オオカミにしろ、ライオンにしろ、大体生まれた所のものを食べているわけです。どこからか輸入するなどということはありません。そういう意味では、地産地消という（これは先週、東大の土壌学教室に折られた和田秀徳先生から習ったものです）ことが大変重要な言葉になります。そういうふうに自然界では、動物はRecycle、Reuse、Reduceというものを生まれながらにやっている、それが自然界の食物連鎖である。僕はNHKのプラネットアースを見て分かったのですけれども、ライオンとかオオカミというのはいつでも腹が減っているのだなど。それぐらい生態系の食物連鎖というのはスリムに、贅肉を落とす形になっているのだといえます。例外的な生き物が人間なのですね。そここのところをどういうふうに今後解決していくかというのが、ある意味では極めて面白い、これからヒトにとっての大きな課題なのではなからうかと思う次第です。

〇ここでおしまいなのですが、まだちょっと時間がありますので、あと5分ぐらい、2枚スライドをお目に掛けたいと思います。

○ところで、われわれの住んでいるアジアというのはどういう所か。この上の図は、食料と衣類が各地域でどのぐらい要るのかというものです。このニーズは植物の一次生産力に依存するわけです。茶色の所ほど、人口の多い所ほど単位面積当たりの食料と衣類のニーズが高いわけです。地域ごとに、このニーズと植物の生産力との比を取ってやると(下図)、赤い所ほど外からものを輸入しないとやっていけないという地域です。今、64億人ぐらいいるうち、半分はアジアに住んでいるわけですね。インドや中国、日本が真っ赤になって、しかも前2者は、これから工業化がものすごい勢いで行われる。こういう状況に対して、われわれ日本人がどういうふうに対応していくかというのは、多分個人を超えたすべての人の大きな課題になるのだろうと思われま



○この図は多様性の視点からアジアを見たものです。右の図の緑色の線は森林がポテンシャルとして存続でき赤道を越えて南北に続いている所です。赤道を越えて森林が南北両半球に続いているのは世界でここしかありません。例えばアメリカ大陸ではテキサスで切れてしまっています。アフリカもサハラ砂漠で切れている。それから赤い線は火山帯がずっと続



いていることを意味します。火山帯がずっと南北に続いているということは、常に新しいミネラルが地表に供給されているという、極めて楽観主義的な考え方ができます。そうすると、火山の大爆発があっても、数千年すると実り豊かな森林になると、こういう場所です。すなわち常に新しいアルカリが溶岩として、どんどん出てきますから、酸性雨に対して強く豊かな森林になる潜在能力が高い地域となります。

それから、東南アジアの大陸部は昔のローラシア大陸で、ボルネオ島はこれとゴンドワナ大陸からなっています。二つの旧大陸が東南アジアでぶつかったのですね。ですから両方の進化の生き物がこの地域に生息しているということがあります。それから気象学的に見ると、東アジアは氷河期のときに氷河に覆われていない。だから琵琶湖なども五大湖と違って底まで凍結していませんし、非常に古い生き物が残っています。さらに東アジアは

生産力が高い。すべてをまとめると、東アジアは一番生き物の多様性の進んでいる場所であるといえます。そして民族的に見ても、北のロシア教から南のキリスト教、その間にすべての宗教がそろっているという、極めて人間の生活様式も多様な、そういう世界です。こういうものを背後地としてわれわれ日本人が生きているのだし、こういうものを守るために貢献する必要もあるのではなかろうかと思えます。

そういうことで、どうもご清聴ありがとうございました（拍手）。

ご清聴有難う御座いました。

47