

記念講演

地球環境問題と生態系変動



和田 英太郎

京都大学 名誉教授／総合地球環境学研究所 名誉教授

今日の私の講演は「地球環境問題と生態系変動」という、非常に大まかなタイトルになっていますが、①地球環境問題の現状、ローマクラブ成長の限界、40年後、気になること、②生態系その応答と観測（海洋、陸域）・シミュレーション、③ $3\text{CO}_2\text{-N}_2\text{O-CH}_4$ モデル、④琵琶湖水系、⑤近未来の下水道——の構成でお話をさせていただきます。

1 地球環境問題の現状、ローマクラブ成長の限界、40年後、気になること

図-1は、1945年から現在に至るまでの大気中の二酸化炭素の濃度を示したものです。炭酸ガス濃度の測定は1948年ハワイのマウナロアで開始されたわけですが、二酸化炭素濃度はこの50年間上昇を続けています。

1972年、有名なローマクラブの提言が出ました。このまま人口増加を続け、エネルギーや資源を使い続けていくと、人類はどうなるかという問題について、ローマクラブは2030年頃に人の社会は破綻するだろうと予測しました。この予測に対しては、喧々諤々の議論が起こりましたし、そんなことを言うと経済が発展しなくなるという強力な、カウンターパンチ的な意見もありました。

その後、1970年代にはオイルショックがありました。私もトイレットペーパーを買うのに駆け回った記憶があります。

1980年代にはオゾンホールが発見されました。

そして1989年にペレストロイカが始まり、1990年を境として政治の中心が冷戦構造から地球環境問題に徐々にシフトしていきました。それを受けてWCRP、IGBPなど物理、化学、生物学などの国際共同研究が始まりました。それがリオサミットの開催された1992

とすると、50年後に人口がものすごく増えて食料やエネルギーの奪い合いになるとわかっているにもかかわらず、それがわかっている時点で対応することをしないで放っておこうということになります。進化論から考えると、地球上の生物には環境が変わってから適応するという仕組みが組み込まれているわけです。生態学を専門とする何人かの研究者に聞くと、「たぶんそうかも知れない。人間はあらかじめ起こりうる変化に対して準備してちゃんと対応していくというようにはできていない。刹那的に来年のことしか考えられないようにできているんじゃないか」と言います。

ですから、異常気象や台風、集中豪雨、竜巻など極端現象が起こると、少しは考えられるようになりますが、それが起こらなければまだまだ大丈夫だろうと10年20年は考えさえしないところまで流されていくのでしょうか。つまり、ヒトは長期的視点を持てるのか、という事が私が気にしていることの一つです。

二つ目に、二酸化炭素の放出量があります。ちょっと前までは二酸化炭素の放出量は6 Gtでした。このときは半分が空気中に残り、2 Gt くらいを海が吸収し、1 Gt くらいを陸が吸収していました。残りについては植林などで対応しようというかたちになっていたのですが、今はペレストロイカなどで東側諸国をはじめいろんな国の発展が進みエネルギーを使う生活が変わったことで、あつという間に放出量は8 Gt/年になってしまいました。

しかし、海は2 Gt 強の二酸化炭素を吸収できませんので、空気中に貯まる二酸化炭素の量がどんどん加速されて増えています。今、二酸化炭素の地球平均濃度は400ppmで、場所によってはそれを超えるようになりました。それが550ppm、600ppmになると、平均気温が2℃上昇するのではないかとわれていますが、それはもう防げないという状況になっているようです。この問題は沢山の有機物を含む下水処理にも大きく絡んでくると思っています。

三番目。実質的にとても気になるのが人口増加の問題です。国連人口基金によると、世界人口が60億人になったのは1999年10月12日で、70億人になったのがそれから12年後の2011年10月31日です。この調子で行くと、2023年には80億人に達してしまいます。こういう単純計算ができますが、そのときにインドも中国も生活レベルがアップしますから、この二つの国が10億人ずつ生活レベルを上げると実質100億人くらいの人口と同じ状態になってしまいます。世界人口は2042～2052年にマキシマムが来るだろうとされていますが、そこをどうやって潜り抜けるかが、大増殖を続けているヒトのあり方の第一課題になるのではないかと思います。ただし、政治の世界ではこの問題はとでも考えられず、来年の予算や数年後のことが大事だという状況になっています。

人口がどんどん増えると、食料とエネルギーの需要が増大し、肥料が増産され、米の収穫量が上がり、有機物が増えます。エネルギーを使うと二酸化炭素が増えますし、食料の増産をするとメタンと N_2O が増えます。そういう仕組みになっています。

地球が温暖化しているのは二酸化炭素のせいではないという意見もたくさんありましたが、昨年あたりから、9割以上の研究者が炭酸ガスのせいであるという方向に傾くように

なってきました。人間というのは地球上で進化してきた生き物だから長期的な予測ができないのかというと、そうではなく、例えば国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）はアセスメントレポート5（AR5：第5次評価報告書）で100年後、数百年後の長期的な予測を行っています。二酸化炭素排出量や蓄積量、気温などについて、世界中の20か30の研究者グループが少しずつ違うシミュレーションを行って似たような結果を得ています。

AR5は、このように気候変動に関する最新の科学的・技術的・社会経済的な知見および評価が盛り込まれ、昨年9月を皮切りに2014年にかけて承認・受諾される予定ですが、AR5では2100年に平均気温が4.8℃上昇し、海面水位が82cm上昇するに違いないという予測を立てています。

その意味では、人口のマキシマムが2050年前後だとすれば、我々はこの100年くらいをどう乗り切るか、今真剣に考えなければならぬところに来ていますし、そのような中長期のことも結構人間は考えられる。人間というのは他の動物と違い、環境に適応するだけでなく、将来のことを考えた動きもできるはずだと私は思っています。そこに、「ホモ・サピエンス」、知恵のある人という学名をつけた所以があるのではないのでしょうか。ある種の期待論、楽観論をもって、これからは進んでいくことがとても大事だろうと考えます。

AR5では、ただ単に地球全体のことを評価するのではなく、食料安全保障、都市域、農山漁村域、主要経済部門およびサービス、人間の安全、生活および貧困などで章が個別に立てられているほか、アフリカ、ヨーロッパ、アジア、極域、小島嶼など地域別に章が立てられており、地域によって種類や度合いが大きく異なる気候変動の影響と適応策がこれまで以上に具体的かつ詳細に言及されるものと考えられます。更には、北方林の移動も考慮に入れるようになりました。温度が上昇すればという条件で北方落葉樹林や針葉樹林が300年後さらに北に移動する事が予測されています。このような計算が、今は十分できるようになってきているわけです。

数年前に発表されたAR4では、地表気温が今後100年間で平均4.8℃上昇し、海面水位が82cm上昇すると推定されました。台風等が発生すると、海面水位にその分が加重されますから、海面と同じところにある世界のほとんどの大都市はどうなるのでしょうか。また、10年単位で海水のpHが0.02下がるとされました。pHが下がると、サンゴが溶けやすくなります。そういったことがあることを念頭に置いた対応策が必要になってくると思われるます。

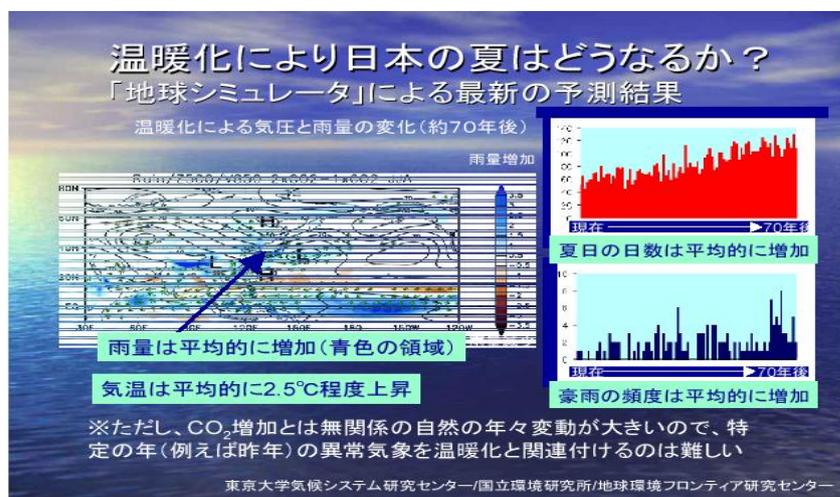
ここで、なぜ地球温暖化が起こるのかの復習をしてみます。太陽から6,000Kの輻射で紫外線、白色光、赤外線が地球上に達して暖められ、暖められた地表面から赤外線として熱が放射されます。その熱を温室効果ガスが吸収することで、宇宙空間へ熱を逃がさなくなります。その結果、局部的に地表面を覆っていた氷を溶かし、海面水位が上昇し、全体として地球が温かくなっていくわけです。

そのことを踏まえながら、この数十年いろいろな観測とかシミュレーションが行われました。例えば、近年の大気気温上昇について詳しく調べると二酸化炭素による温室効果を考慮しませんが、実際とモデルの温度はかなりの差がありますが、二酸化炭素の効果を考えると、過去150年間の気温変化は実際とモデルがピタリと一致します。特にここ30年間の気温上昇は上手く説明できます。地球の気温上昇は炭酸ガスのせいであるという根拠は、実はこの点だけなのです。太陽の研究者たちは「太陽活動のせいだ」と主張していましたが、だんだん炭酸ガスのせいだという見方が大勢を占めるようになってきました。

これだけ地球温暖化について危機感を抱くようになったバックグラウンドにはもう一つ、石油をどんどん消費することに基盤を置いた文明をどこまで続けるのかということがあります。石油が枯渇すれば、その次は核エネルギーに行くのか。感覚的にそんなスッキリしないような文明の状態になっているのはまずいのではないかという考え方があるだと思います。

すなわち、石油をどんどん消費することに基盤を置いた現在の文明を続けていった場合、気温が高まり、地表面を覆っていた氷が溶け、白いところがなくなっていきます。もちろん、シベリアに住んでいる人たちにとって温暖化はいいじゃないかという見方もあるのですが、良く知られてきたように氷河が溶けて後退してしまうことになります。温暖化による影響で大きいものの一つに海面上昇がありますが、この要因としては海水の熱膨張が挙げられます。それによって海面が年間3mmくらいずつ上昇しており、氷河、氷帽が減少し、海水温度も上昇しています。海水温度が上昇すると、この頃日本でも多いのですが、真夏日が多くなったり、豪雨の頻度が高くなったりします(図-2)。大型台風が増えてきて、台風の数は減るのではないかと予測されています。最近の台風はどうもシミュレーションどおりになっており、いよいよ極端現象の始まりなのかどうか——。研究者によって意見は違うと思いますが、気象関係では素人の私は、直感できっと始まったんだろうと思っています。

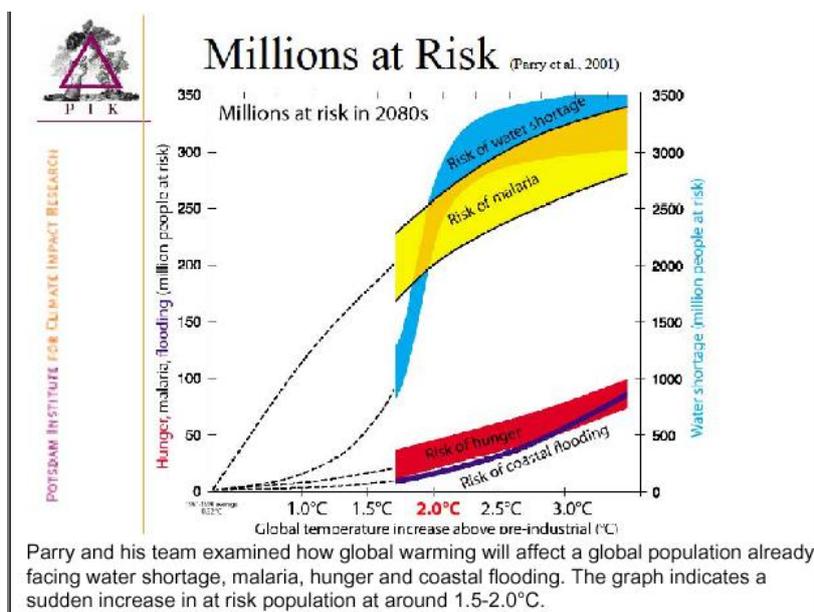
図-2 地球シミュレーターを使った我が国気象グループの成果



いろいろなモデルを用いて生態系の調査研究も進められていますが、地球温暖化によって水循環が変わり、棲み場所も変わり、エサが増えてくるタイミングも変わってくるわけですから、生態系も大きく変わります。その結果、鳥類が 12%、哺乳類が 23%、両生類が 32%絶滅する可能性があります。これは、非常に大袈裟な見方だと捉えることもできるわけですが、とにかく言えることは、土地利用も含めて人間活動の影響で生物種の大量の絶滅が起こる可能性があるということです。生物種の大量絶滅というと、白亜紀に隕石が落下して恐竜が絶滅したという話がありますが、その次の「第六の大量絶滅期」が今起きつつあるのではないかという認識が広く世の中に伝わっていますし、それを踏まえて COP10 として数年前に名古屋で生物多様性の国際会議が開かれた経緯もあります。

温暖化の進行に伴って、熱帯で発生しているデング熱の媒介する蚊が日本にも来るようになりまし、リンゴの生産地分布も北上することになります。最近まではリンゴ栽培地域の分布移動も徐々に起こると思っていましたが、極端現象によりリンゴがみんな落下し、一気に現在の地域がダメになってしまう可能性もあります。その理由の一つとしては、前線が日本の上に位置することが多いことです。というのは、太平洋が温められ水蒸気となったエネルギーが前線のある場所で集中豪雨になったり台風になったりするのです。幸か不幸か、日本はそういう場所に位置しているわけです。悪く言えば、集中豪雨や台風が多い国となりますが、逆に言うと、風と水に渡される太陽エネルギーが集中しています。加えて火山もたくさんありますから、そういう意味では自然のエネルギーが集約されている特異な国であるとも言えるわけです。

先ほどから地球の平均気温が上昇するという話をしてきましたが、図-3には平均気温が2℃上昇するとどうなるかを示しました。図-3は Parry ら (2001)



これは 2001 年 Parry らによって発表されたものですが、大気二酸化炭素が 550 ppm になると、上水道の整備や作り直しなどが間に合わず、世界の総人口 70 億人のうちの 35

億人が水不足に見舞われます。また、マラリアを媒介する蚊が北上しますから、マラリア罹患者が3億人に達し、作物が不作になり、飢える人が1億人になります。二酸化炭素濃度が550ppmを超えると2℃気温が上昇する、そのところを「2℃臨界点」と言ってきたわけですが、これはもう防ぐことができない。地球の二酸化炭素平均濃度はだいたい400ppm、CH₄とN₂Oを入れると430ppmくらいになるのですが、平均気温が2℃上昇する550ppmは簡単に超えてしまうだろうというのが、一般的見解になりつつあります。

以上が、地球環境問題について、特に温暖化についてどういう現状になっているか、そして私自身が気になっていることなどです。

2 生態系その応答と観測（海洋、陸域）・シミュレーション

次に、これに対して科学技術がどのように対応し、どのように発展してきたかを紹介します。

図-4は、私が以前勤めていた、海洋に関する基盤的研究開発、海洋に関する学術研究に関する協力等の業務を総合的に行う独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）にある地球シミュレーターという大型計算機です。

図-4 JAMSTECの地球シミュレーター

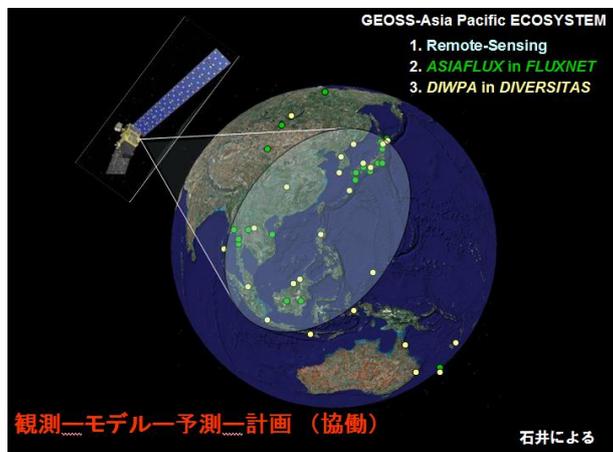


今から3年前に神戸に、「京（けい）」という、1秒間に10の16乗回計算するスーパーコンピュータが作られました。それを用いて今まで予測できなかった集中豪雨等のモデルさえも作れるようになってきました。コンピュータ技術は日進月歩で、神戸に「京」ができたときは世界第一位のスーパーコンピュータだったのですが、去年（2013年）は4位になっています。

衛星やフィールドステーションも整備されてきています。図-5がそれを示したものです。ASIAFLUXと緑色で示しているのが、炭酸ガスの出入りを林冠で観測しているフィールドステーションで、黄色は生態系の変動を地道に観測している場所です。これはアジア

だけに限定していますが、全世界にこのような観測点が整備されています。

図－5 人工衛星と地上観測点 (JAMSTEC 石井励一郎氏による)



このように衛星で観測してパルクで状況を把握し、モデルで計算をし、さらに現場でそれを確認するという三位一体的な情報が収集できるようになり、予測精度も今は大幅に上がってきています (図－6)。衛星データはもう机の上でパソコンを使って見られるようになっており、今、世界中の森林のどこで火事が起きているか、すぐにわかるようになっています。

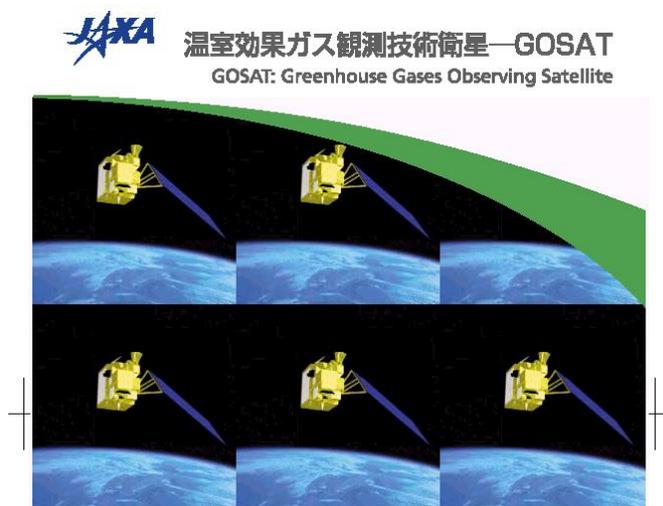
図－6 三位一体の観測 (衛星、地上、モデル)



図－7は、日本の環境省が打ち上げた GOSAT (Greenhouse Gasses Observing Satellite) という温室効果ガス観測技術衛星で、この衛星による観測でどこの国がどれだけ CO₂ やメ

タン、水蒸気といった炭酸ガスを排出しているかを確実に掴めるようになっていきます。

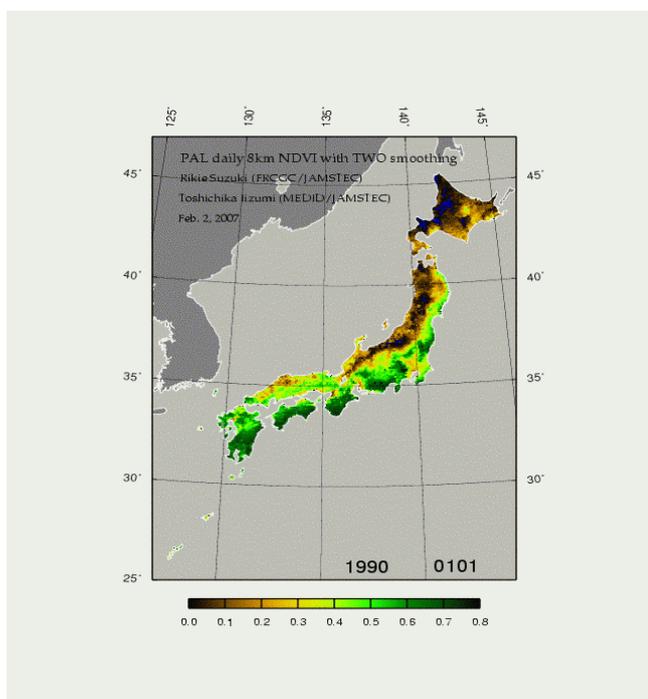
図－7 JAXA-GOSAT



この衛星を打ち上げる前に、それを計算するモデルができており、全球に渡って大気中の二酸化炭素の月変化の分布図も作られています。

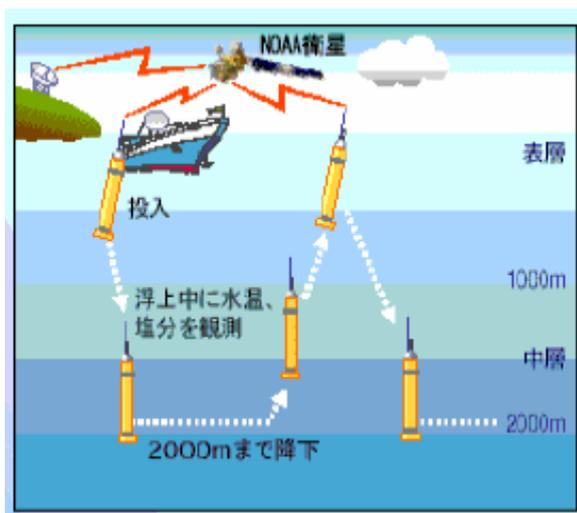
衛星画像をもとにアルゴリズムで行うと、木の葉が何時芽を出し、いつ最盛期になっていつ落葉するかの状況が測れるようになります。JAMSTEC の鈴木 GL は日本全体を対象として、8 km グリッドで落ち葉がどのように落ちるかをアニメ化しております(図-8は1990年のある時期の例)。こういう図を見ながら、私の場合、例えば琵琶湖がどうなっているか、琵琶湖のいろいろなものを調べることも行っています。

図－8 JAMSTEC 鈴木力英氏提供



海域の調査については、皆さんご存じかも知れませんが、文部科学省、国土交通省、気象庁、海上保安庁が共同で推進している「アルゴ計画」というミレニアム・プロジェクトがあります。水深 2,000m まで降下した観測用のブイが自動的に浮上、降下する仕組みになっており、そのブイが沈むときと浮上するときに水温とサリニティ（塩分濃度）を測り、それを衛星に中継して世界中の海域の温度分布を一度に測ります（図-9）。

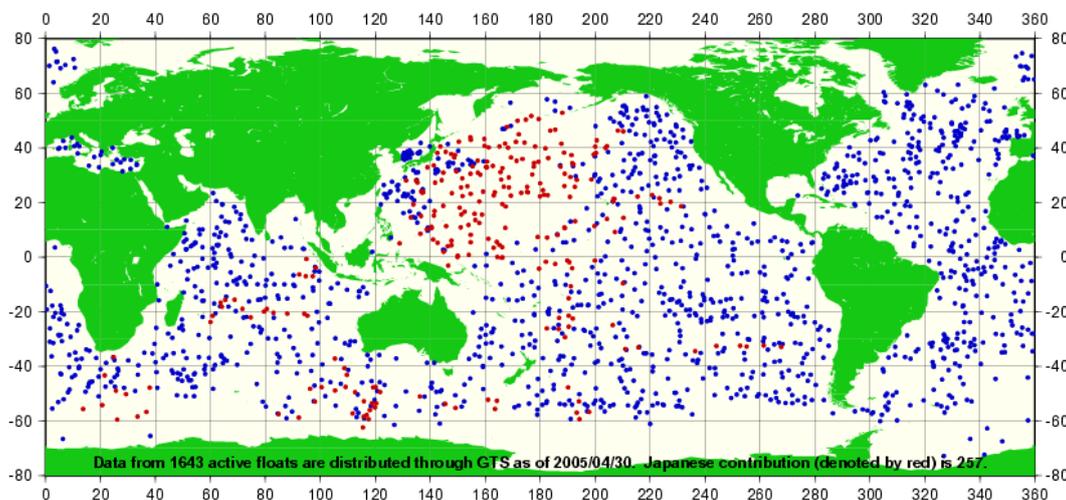
図-9 アルゴ計画のフォローとの動き



昔は、北から南まで3ヵ月くらいをかけて航海し、採水器を降ろして水温や塩分濃度を測定していましたが、今はそれを同時に測り、その数値を衛星に伝え、モデルでもって、海の水の運動がどうなっているのか、海水温が温まっているかどうかを見ることができるようになっています。

図-10 に、観測用のアルゴフロートの配置を示します。赤色が日本が担当しているところです。アメリカが主導で実施している取り組みですが、ブイは 500 km に 1 個の割合程度で配置され、これがどんどん増えているのだと思います。

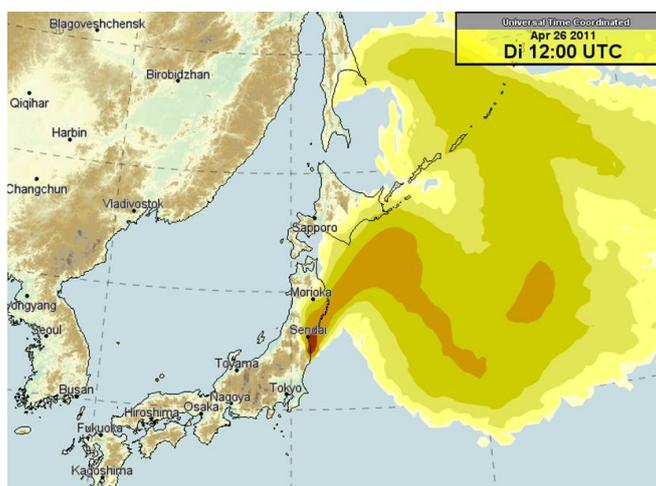
図-10 アルゴフロートの分布



こうしたシミュレーションはどのような意味合いを持つのでしょうか。

図-11 は、2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、福島第一原発事故が発生したときに、放射能がどのように飛んでいったか、ドイツ気象局が発表したものです。

図-11 ドイツ気象局による



このような図を皆さん欲しがったわけですが、私自身パソコンでアクセスしてこの図を見たときにつくづく思いだしたのが、1969 年にアポロ 10 号が月世界に行ったときにテレビに送り込んできた地球の映像のことです。そのときの映像は私自身も非常に興奮して見ていたのですが、あのときに世界中の人にグローバルにもものを見るということが刷り込まれたような気がするのです。その結果、グローバルな情報が非常に重要になってきた。環境情報もグローバルに捉えた情報がそのやり取りにおいて、一般化すると言ったような一つの新しいフェーズに入っているのではないのでしょうか。

そのような一つのシミュレーションモデルを用いて、日本近海、西部北太平洋のクロロフィルの状況が年間を通じてどうなっているかを、20 km グリッドで描くことも JAMSTEC の地球シミュレーターを使って北大の山中康弘教授らによって開発されています。2011 年 3 月 11 日に三陸沖のクロロフィルが南のほうに延びてきたところに放射能が入り、そこから放射能がコウナゴに行ってしまったのだと思いますが、そのような状況も見ることができるようになってきました。

いろんなシミュレーションモデルの事例を紹介していますが、モデルを用いた海水の大循環を示したものです。海水はグリーンランド、イギリスの近くで水深 4,000m まで潜り込み、南極海で潜り込んだのと合わさってインド洋、太平洋へ行き、それが浮き上がるのに 1,500 年から 2,000 年かかるという大循環を行っているわけです (図 12)。海水の潜り込むところは最も大気二酸化炭素を吸収します。すなわち、海水が深海に沈んでいるところで、最も多くの二酸化炭素が溶け込みます。海洋には大気二酸化炭素量の 50 倍くらいの量が溶けているのですが、海水の上下混合がないところは成層化していて二酸化炭素の濃い空気と

接していても浅いところに少しだけ溶けるだけです。人間は海洋を掻き回すことができません。このため、海域では年間 2 Gt 強しか二酸化炭素を吸収しません。

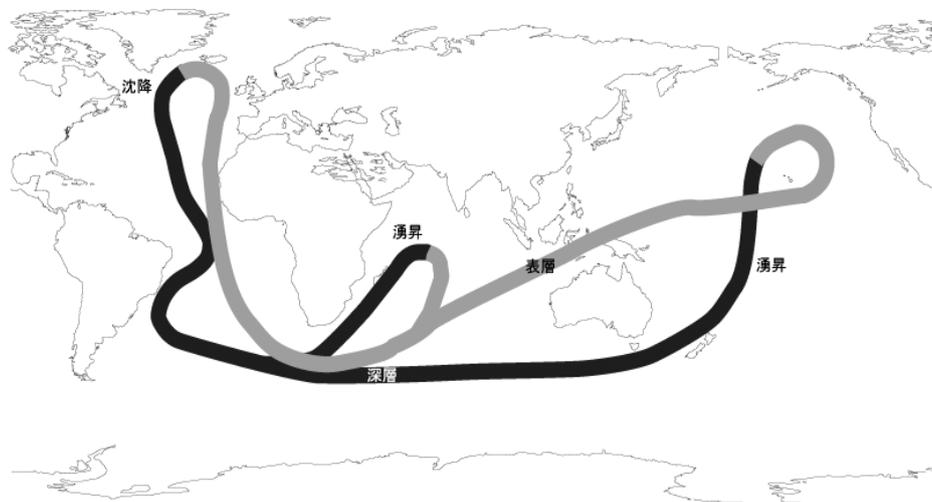
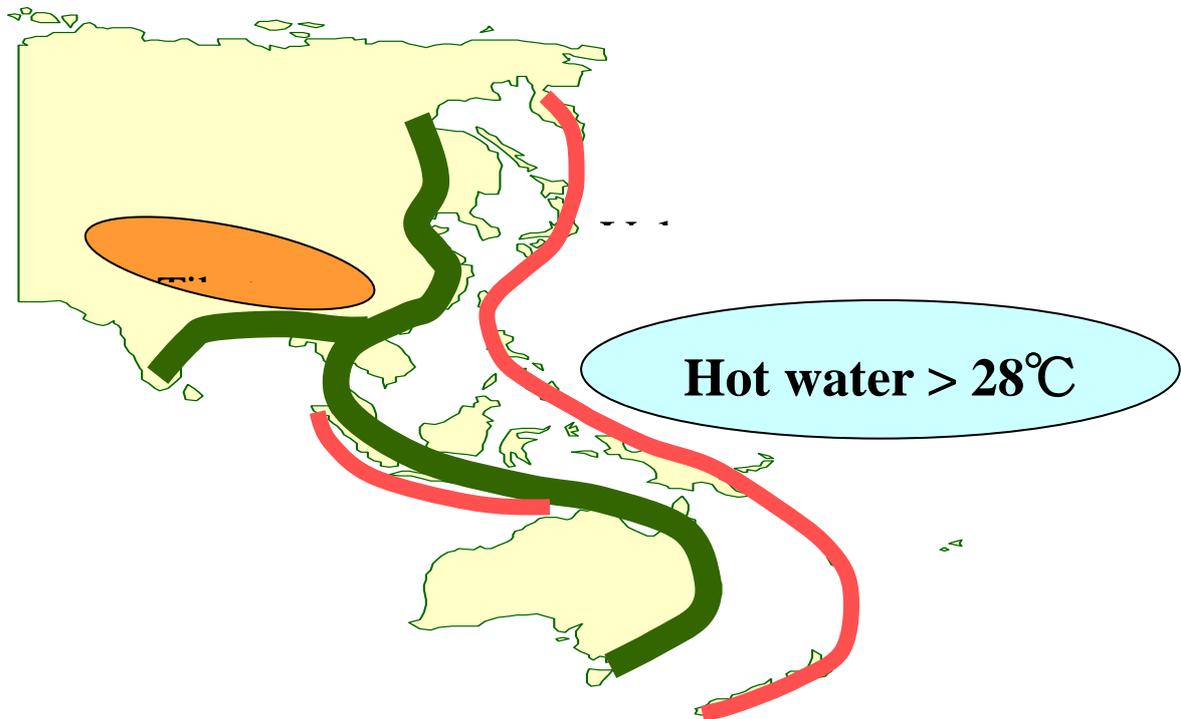


図-12 海洋深層水の大循環 クロ帯：深層流、灰色：表層流

海洋の場合 10 年毎に pH が 0.2 ずつ下がるというお話をしましたが、2099 年には南極海と北極海の一部であられ石と言う炭酸カルシウムが溶けてしまうだろうといわれており、pH が下がることで、冷たい海のアラゴナイト（あられ石）を作る翼足類、冷水サンゴなどの生物たちが絶滅するかも知れないと考えられています。今後の 100 年を考える上では、そういうことも頭の中に入れておかなければなりません。

図-13 はアジアを示したものですが、緑色の線は森林が存在可能な地域が南北に続いているところです。赤道を越えて森林地帯が続いているというのは、世界でもこの地域だけです。南北アメリカはテキサスで切れていますし、アフリカはサハラ砂漠で寸断されています。また、火山帯が続いています（赤線）。火山があるということは、新しいミネラルが千年置きとか数百年置きとか間欠的に出てきますから、そのミネラルによって森林が保護されることとなります。さらに南シナ海周辺には沢山の島があり、地球の歴史時間で海水面が上がったり下がったりし、これらの島が大陸と繋がったり、離れたりしたことが島の生物進化の空間スケールを大きく変え生物が多様化しています。更にこの東南アジアでは Gondwana 大陸と Laurasia 大陸が混じっている地域でもあって、両方の大陸で深化した生物が交じり合い、この地域は生物多様性に満ちています。また地震や津波などジオフィジカルな問題があって、安全ではないという特徴を持つ地帯でもあります。

図-13 東アジアの特徴



私は今まで地球温暖化枠組条約を中心に紹介してきたわけですが、今後は温暖化だけではなく、安全を志向する、あるいは持続性を志向することが重要になってくると思われれますから、地震や津波、火山活動といったジオフィジカルなイベントと生物多様性を含めた地球問題の枠組が必要になってきます。その意味合いから、上記に挙げたアジアの風土の特徴を踏まえた枠組をアジアから発信していく必要があるのではないかとこのことを言いたいがために、図 13 をお示しした次第です。

ここで再び「最近気になること」に戻らせていただきますが、最近、1972年にローマクラブの要求に応じて地球はどうかを執筆した一人であるヨルゲン・ランダース氏が『2052』という本を出しました。それによると、「地球の生物圏はローマクラブが予想したとおり動いている。地球は2030年くらいに危ない(世界的な経済崩壊と人口の急激な現象)のではないかと」というようなことが書かれています。また、「人類はやはり遠い将来のことは考えられず、数年後までのことしか考えられないというやり方で来ているのではないかと。そのやり方を変えることが必要なのではないかと」ということを警告しています。現状は決して楽しい状況ではないのですが、逆にいうと、そういう状況であるからこそ、ホモ・サピエンスとしての利点をいかに発揮できるかが問われている面白い時代に入りつつあるのだと考えることも出来ます。

食料やエネルギーをめぐる奪い合い、殺し合いが起こるといった状況を防ぐためには、富めるところからそうでないところにいかに物を流すかというシステムの構築がとても重

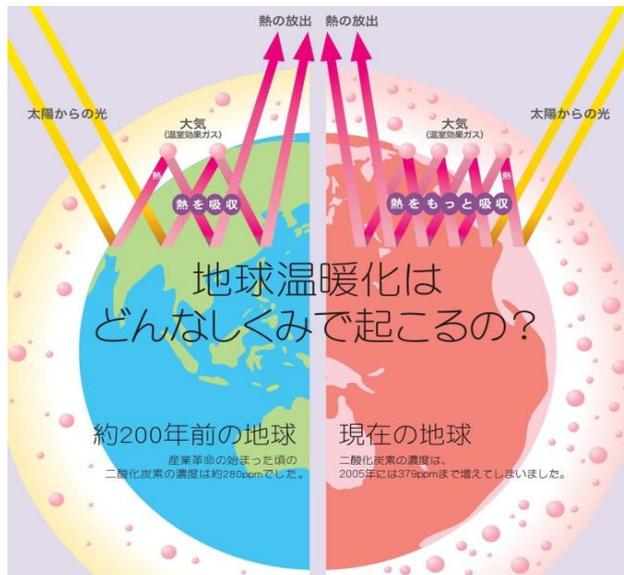
要になってきます。貧乏なところにお金を渡さないと移民してしまいますから、かえってまずい事態になるとする見方が多くなっています。

この点で私は非常にオプティミストで、そういう事態を防ぐために貢献できるのが、自然が豊かな国に住む日本人ではないかと思っています。

3 $3\text{CO}_2\text{-N}_2\text{O-CH}_4$ モデル

先ほど地球温暖化について色々申し上げましたが、あらためて炭酸ガスやメタン、 N_2O が増えると、なぜ地球が温まるかのしくみを図-27 に示しました。地球温暖化に対して二酸化炭素が60%、メタンが20%、一酸化二窒素が6%寄与しています(図-14)。

図-14 温室効果ガスが増えると地表からの赤外線を吸収し温暖化が起こる
図の右側 (JAMSTEC 稲富素子氏による)。



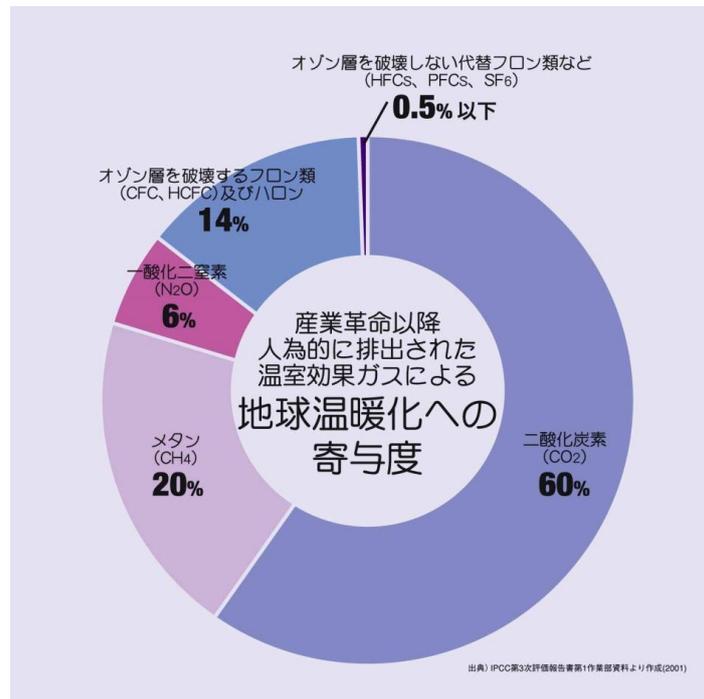


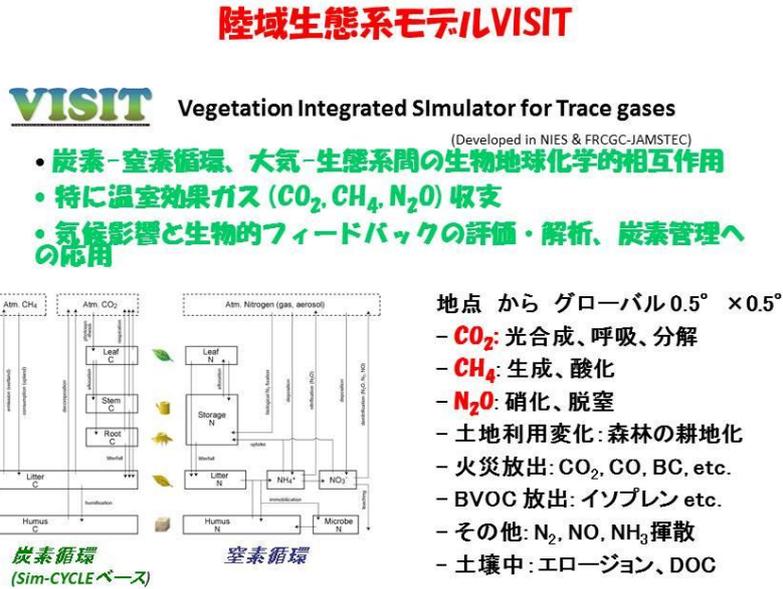
図-15 JAMSTEC 稲富素子氏による

メタンと N₂O が合わせて 26%、全体の 4 分の 1 強温暖化に寄与していますから、これらのガスの放出源となる下水道が大きな問題だと個人的に思っていますが、ここでは下水道によるメタン、N₂O 放出を含めない、地球全体における二酸化炭素、メタン、N₂O の収支がどうなっているかを簡単に見てみます。

お示しするのは、私が JAMSTEC に在籍していたときに陸域生態系プロセス研究チームの稲富素子さん、伊藤明彦さんが計算した陸域生態系モデル「VISIT (Vegetation Intergrated Simulator for Trace gases)」です。

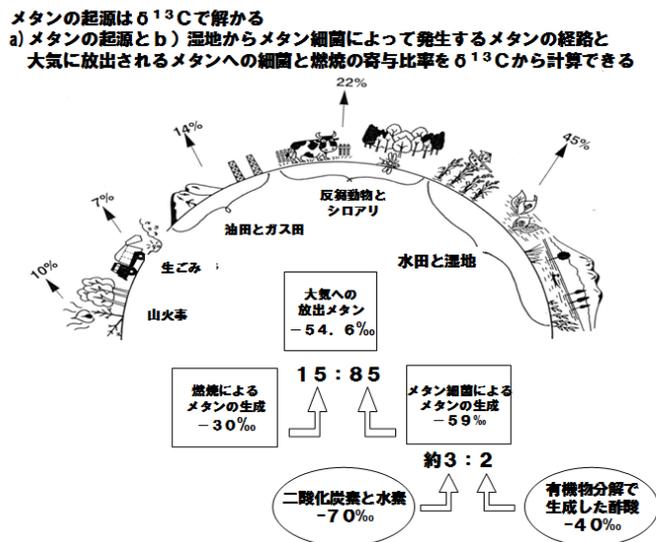
図-16 のようなデータは世界中で公表されており、このようなデータを集めてきて簡単な収支計算を計算機でするわけです。計算そのものは非常に単純ですが、かなりねちっこくデータを収集して計算するというのが、モデルを作る上での一つの特徴になっています。人間活動において二酸化炭素の出し方はいろいろ違います。植生分布、水田分布、湿原分布、土壌分布があり、これらのデータを全部集めて計算すると、地球上で炭酸ガスが光合成でどのくらい吸収されているかがわかります。地球全体では 9.6PgCO₂/yr が吸収されている計算になります。

図-16 陸上生態系モデルの骨格 (稲富、伊藤による)



メタンは、今まで家畜由来と湿地帯由来が多いのですが、植物起源のメタン放出もあります。加えて土壌がメタンを酸化させます。地球上のメタンの発生源図 17 のようになります。

図-17 地球上のメタンの発生源



N₂O は硝化脱窒が起こると発生します。下水道も多量の N₂O 放出を示しますが、グローバルスケールではこれまで詳しいデータが無いため無視されています。N₂O の硝化・脱窒の起源の違いは二つの窒素の同位体比と酸素の同位体比を測り事によって区別できるようになりました。

これらのデータから、地球の全陸域の二酸化炭素の光合成による吸収、土壌からのメタン酸化を合わせた炭酸ガスの吸収量を割り出し、放出量を差し引くと、計算上は 1.8PgCO₂/yr の温室効果ガスの吸収ではなく放出になっている状態です。

植物による吸収 9575Tg/年 + 好氣的土壌によるメタンの酸化 31Tg/年

—湿地からのメタンの放出 228Tg/年 — N₂O 放出 22Tg/年

= 1.8PgCO₂/年の放出

(但し CO₂1 分子に対して CH₄1 分子は 25 倍、N₂O1 分子は 298 倍の温室効果がある。

計算は稲富、伊藤による。)

上記の計算は 1990 年代のもので、放出となっているが、2000 年ごろから吸収に変わる。ここで、2100 年までの全温室効果ガスの影響を計算してみますと、2000 年代までは温室効果ガスは、陸上全体としては吸収の方向で行きますが、2100 年頃になると、永久凍土が溶けて CH₄ が急激に放出される計算になっています。

4 琵琶湖水系の窒素・炭素同位体比による解析

これまではグローバルな話でしたが、ローカルになるとどうなるか——。琵琶湖—淀川水系を例に挙げてみましょう。

琵琶湖は窒素の同位体比が最も高い湖です。窒素同位体比が高いということは、N₂O がたくさんできているということです。

琵琶湖—淀川水系（蛇砂川から琵琶湖まで）（図-18）の N₂O 同位体比を測っていくと、内湖である上流の西の湖の辺りで同位体比が変わり、NO₃ から N₂O が作られているのがわかります。



図-18 蛇砂川—西の湖—琵琶湖水系

図 19 は蛇砂川から内湖である西の湖、琵琶湖北湖、南湖、宇治川、淀川、大阪湾までの堆積物の窒素・炭素同位体比のマップを示しています（灰色の線）。黒の直線は比較として示した岩手県大槌川—大槌湾水系の堆積物の窒素・炭素同位体比のマップです。琵琶湖北湖と西の湖の窒素同位体比が N_2O, N_2 生成によって高くなっています。

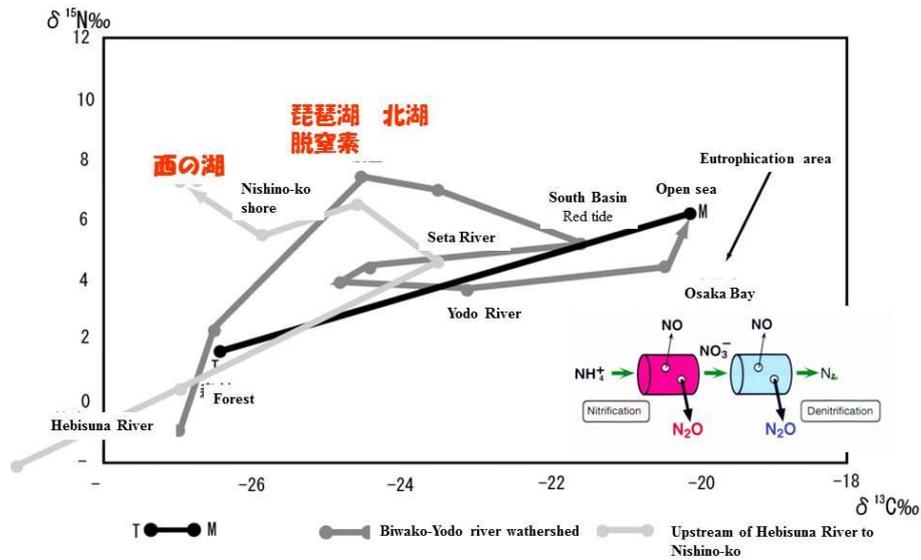


図-19 琵琶湖—淀川水系堆積物の窒素・炭素同位体マップ

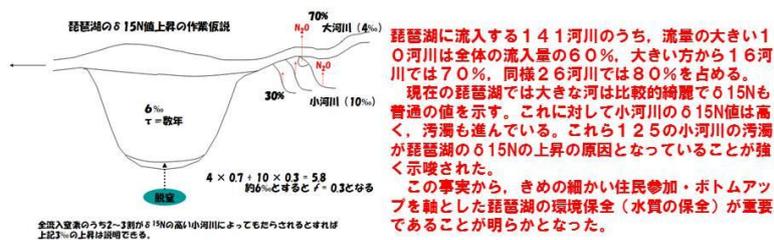


図-20 小河川で N_2O の発生により窒素同位体比が高くなる模式図

また、琵琶湖には 141 河川がありますが、そのうちの大きい 18 河川より小さい河川の汚れのほうが琵琶湖の汚れに寄与している事実を見て取ることができます (図-20)。その汚れ方と同位体比の上がり方を見ると、 km^2 当たりの人口密度で 400 人くらいのところは下水処理システムが整備されて問題はないのですが、100 人くらいの人口密度のところの水系では硝化脱窒が起こって河川が下水のような状況になっているのです (図-21)。

図-21 河川汚濁の新しい指標

詳しくは和田英太郎 (2008) *流域の健康診断:最近の動向と琵琶湖—淀川水系*. 環境と健康 21:13-23 を参照されたい。

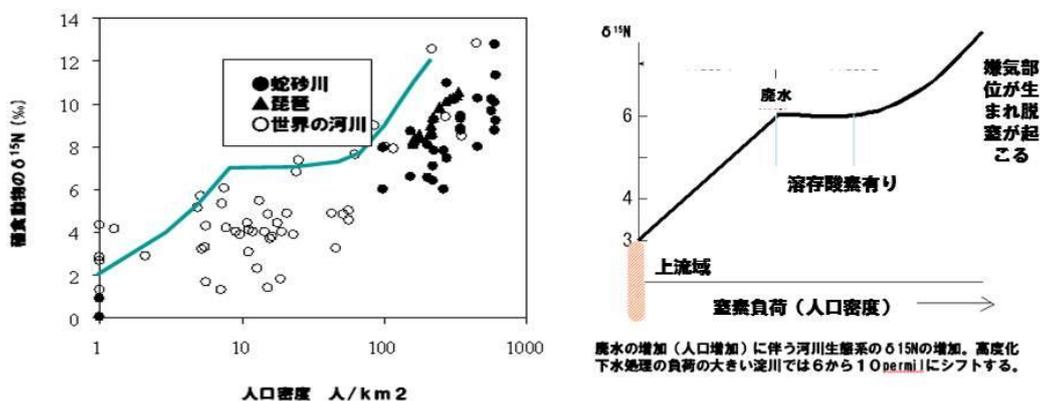


図 23. 河川汚濁の新しい指標： $\delta^{15}\text{N}$ と人口密度の関係

- 1) 河川への窒素付加の増加(人口増加)による河川藻類の窒素同位体比の上昇
- 2) 琵琶湖東岸 蛇砂川—西の湖-琵琶湖の例 白丸は世界の河川
人口が約 $100\text{人}/\text{km}^2$ を越えると嫌気部位が出来、脱窒が起こり $\delta^{15}\text{N}$ が増大するという環境容量を示している。 $400\text{人}/\text{km}^2$ は下流の高度化した下水処理システムが必要となる値として得られた。

5 近未来の下水道

最後に下水道について少しでも触れたいと思います。これは、私がいろんな文献やニュースの知見踏まえて「近未来の資源獲得を見据えた下水処理」としてまとめたものです。簡単に箇条書きに列挙すると、以下のようになります。

(1) 地下水硝酸汚染を浄化対象とする電気化学支援型自立的生物脱窒システム

固体腐植物質ヒューミンが、固体伝達物質として機能することを見出されている (Zhang & Katayama, Environ.Sci. Technol., 46, 6575, 2012)。固体腐植ヒューミンを利用した地下

水硝酸汚染を対象とした電気化学支援型自立的生物脱窒システムの創製が可能になる。

Zhang & Katayama, *Environ.Sci. Technol.*, 46, 6575, 2012

(2) バイオ燃料電池の開発

下水処理、余剰汚泥発生量の削減、電気エネルギーの回収、および二酸化炭素排出量の削減を同時に可能とする、次世代型下水処理システム（バイオ燃料電池）の開発を行うような研究の流れが始まっている。

(3) N_2O を消失させるバクテリアの探査

極めて高い効率で亜酸化窒素分解を行う亜酸化窒素消去能のある微生物を探索する。

(4) 硝酸イオンを選択的に水中から捕捉可能なイオン交換媒体の開発

イオン交換媒体をハイブリッド化し、硝酸イオンを水中から捕捉し、それをダイレクトに肥料として利用する。 T.Kubo et al., *Anal.Sci.*, 24, 1633-1636(2008)

このような技術開発を行い、これまで静脈系といわれる下水処理を生産系の中に組み込む事がやれるかどうか、特に都市部における N_2O 対策の鍵を握ると考えます。つまり、下水処理をどうするかは、今後の地球環境、地球温暖化にとって大きな問題なのだろうと思います。

最後は駆け足になりましたが、そのことをまとめとして私の話を終わらせていただきます。