
セッション4 「流域診断の方法論」

「物質循環と人間活動のインターフェースについて」

総合地球環境学研究所 和田英太郎

(現在：海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター)

紹介いただきました和田でございます。私のタイトルは「Interface between material cyclings and human dimension」ということで、簡単に言えば、物質循環に関しまして新しい指標とか環境容量をつくれぬかということ、ずっと仕事を進めております[図 1]。お手元には話す内容の資料が配られていると思いますが、この順番に沿ってやるのは実際のデータをお見せすることが多いものですから、これは参考として見ていただければと思います。

最初のほうは少し簡単に、最初の5～6枚は流れのイントロダクトリーなものとして説明させていただきます。これがタイトルでございまして、その下のほうに我々のプロジェクト、皆様ご承知のように、

「Multi-disciplinary research for understanding interactions between humans and nature in the Lake Biwa-Yodo river Watershed」[図 2]。プロジェクトリーダーが和田でございまして、そのほかにコアメンバーとして、もう皆様ご承知と思いますが、谷内、脇田、原、田中、陀安。陀安は今司会をしておりますが、そういう面々が顔ぶれとなって5年間のプロジェクトをやっております、大体年間8,000万円というのはドルにすると幾らだかちょっとわかりませんが、そういう形でやっております。

このプロジェクトでは4つのワーキンググループがあります[図 2]。昨日から今日にかけて、ソーシャル・アンド・カルチャーシステム・ワーキンググループというのが中心になって話が進んできておりますが、そのほかに、私どものマテリアル・サイクリング・ワーキンググループというものが動いております、実際の自然界のエコシステムの物質循環をやっております。新しいインディケーターとか、キャリングキャパシティーの新しいコンセプトを導けないかといったようなことをやっておるわけでございます。

これは、それをやっているコアワーカーの一部でございまして、かなり若い人たちがいろいろなところで動き回っているということになります。

これをまずやるときに、私どもは安定同位体というのを使っております。これはまた後で詳しく説明しますが、キャリングキャパシティーとしては、例えば湖の中の溶存酸素の、18とか17、あるいは水のデュテリウム含量というのを非常に詳しく測って、R/P レイシオ（光合成、生産と呼吸の比率）を出すと、湖の中の使える溶存酸素量が1年間に例えば34万トンあるが、そういうのが1つの環境基準にならないかとか、そういったようなことをやっておりますし、それからここにいろいろ書いてありますが、同位体比のマップを使って自然界の物質の動態を描き出して、それについて指標の意義づけを行うと、3、4、5については後で説明いたしますが、ここではこういうことをやるのだということです[図 3]。

そういうことをやって新しいインディケーターをつくったら、それを社会文化のほうのシステムのワーキンググループに持ち込んで、そこでもって一緒に住民に知見を披露して、それで新しい展開を図るのがセカンドステップでして、今はファーストステップとセカンドステップを一緒にやっています。主にファーストステップですが、セカンドステップも一緒にやるという形で動いておまして、それを最終的にはGISに乗せて、もう少し機能性を持たせるというような考え方で動いているわけでございます。

今までの特に日本の学問の事情からしますと、ソーシャルサイエンスとナチュラルサイエンスは非常にセパレートしています。これを一緒にやらないと地球環境問題は解決の方向に行けないということがありまして、そのためにこれはつくった図であります[図4]。ナチュラルサイエンスというのは、例えばエコロジーとか、生物地球科学とか、陸水学とかいろいろあって、今まではそれぞれの専門のジャーナルに論文を投稿して、それで通れば「はい、それでおしまい。よく仕事をしました。あなたに給料をあげましょう」という状況になっていたわけです。ところが、実際の地球環境問題ではそれは困る。そういう成果を新しいヒューマンソサエティー、人間社会のほうの評価に役立てるようにしてくれないと困る。では、すぐに両方抱き合わせにして一人の頭の中でやれるかということ、非常に困難が伴います。それで、普通の今までの成果から新しいインディケーターを導き出して、それを人間社会の要因といろいろと組み合わせながら、新しい評価システムというのですか、指標システムをつくっていく。その指標システムというのは非常に感度がよくならなければいけない。なぜ感度がよくならなければいけないかといいますと、変化を検出しなければいけないわけです。今世界で一番はっきりしている変化は、空気中の炭酸ガスが380ppmあって、毎年1ppm強増える。簡単に言えば350分の1、多めに見て0.3%の変化が毎年起こっているわけです。この0.3%の変化を確実に検出するためには少なくとも0.01%の精度で自然界を見るというのが1つのやり方になります。そういう意味でのハイセンシティブティティーとシグナル・ノイズ・レイシオが非常に大きい安定同位体比を使うことになります。そういうことを考えながら、同位体の技術がどこまで使えるかといったようなことを今試みていることになります。そのインディケーターの変化の関数系としては、土地利用とか、流域の人口密度、トータルの人口、あるいは食料の輸入度がどうなっているかといったような、人間社会の非常にメインなところにそのインディケーターを結びつけて新しい指標をつくるということを今やっておるわけでございます。

安定同位体の技術というのはどんなものか。実はこの話を始めると皆さん、「非常にわかりにくい、何であんなことをやっているんだ」というふうに多くの場合言われます。それで、あちこちへ行って話すと、特にこの専門でない人のところで話をすると、「おまえの話はよくわからなかった」といっておしまいなのです。それでは非常に困るので、検出感度のいい新しい方法を導入することが今非常に重要なのだということをまず強調しておきたいと思います。それは、従来の測定法を幾らやっても従来の結論しか出ません。それで、今、一体調査をどのようにやればいいのかというところは、実は物質循環に関しては行き詰まっているのです。そういう意味では、非常に検出感度のいい方法を取り入れて、それを翻訳して世の中に伝えるということを考えています。

生元素、我々の体をつくっている水素、炭素、窒素、酸素、あるいは硫黄というのは安定同位体を持っています。これは元素の核の中の中性子の数が違うということで、重さが違うのです。重さが違うと

いうことは、生化学反応とか化学反応が起こったときに、質量数の大きいほうがゆっくり反応します。軽いほうが早く反応する。この違いを自然界でどういうふうに行っているかを見ておいて、物質循環系のいろいろな状況を解析していくということになります。ですから別の言い方をすれば、普通は窒素循環とか炭素循環という言い方をしますが、これは重い窒素の循環を見ているのだ、あるいは重い炭素の循環を見ているのだ。重い窒素と云ったら N15 なのですが、普通のやつは N14 で、そっちのほうの循環を見ながら、軽いほうと相対化させて見ていく。そういうふうにご理解願えればと思います。この変化が、人間が C 4 植物のトウモロコシをどれだけ食べているか。あるいは富栄養化、水質汚濁、それからもっと汚れると脱窒とかそういうものが起こりますが、そういうものによって著しく変化します。例えば N14 と N15 の比率、あるいは C13 と C12 の比率。その変化を見ていくということの例をお話ししたいと思います。

それで、皆様に安定同位体に非常に親近感を持ってもらうために、体の中にどれだけあるかというのをつくりました。これはシンボルマークです[図 5, 6]。昔、私は民間の三菱化学という企業に勤めていたのです。スポンサーは一橋大学を出た社長なものですから、同位体をどうやって説明するとわかってもらえるか。1年に1回社長が来るのですが、わかってもらえないと研究費がもらえません。それで、苦心してこの図をつくったのです。体重が 50 キログラムだとすると、我々の体の中には C13 は大体 1% ありますから 137 グラム。O の 18 は水がありますので 68 グラムとか、O の 17 が 12 グラム。N の 15 は 5 グラム、デュテリウムは 1.5 グラム。合わせると 225 グラムぐらい持っている。これは平均的な値で、ここにいる皆様方の髪の毛の同位体比を測ると、人によって全部違います。なぜならば、厳密に言えば食べているものが違うからです。そういうパラメータを使うことによって、ある水系、あるいはある都市の中で、日本などは典型的な例ですが、モンスーン・アジアの稲作地帯に外国の、特にアメリカが多いのですが、食料がどのぐらい入ってきているかというのを個人のレベル、あるいは集落のレベル、あるいは近畿地方、関西というレベルで評価することができます。

これは同位体比のあらわし方です。デルタ値というのを使いますが[図 7]、これは数字がプラスのほうに大きければ N15 あるいは C13 が多いというパラメータである。ただ、相対測定をやるものですから、検出感度が非常によろしいというところがミソである。現在、生態学の世界で精度がものすごく高い方法は、この安定同位体の測定技術と、DNA のシーケンシングです。DNA のシーケンシングは、アミノ酸の配列、あるいは核酸塩基の配列を 1,000 個やれば 1 個も間違わないでやれるということろまで来ていますから、そういう意味では測定精度が 10 のマイナス 4 乗であることになります。

人間の髪の毛の炭素の同位体比を測ると、あなたは普段どれだけトウモロコシ型の食物連鎖の上に依存しているかというのがわかるのです。例えばこのアイソトープパーソンの体重が 25 キログラムだとします。片一方の型は年中、分子の数は同じだがトウモロコシを食べている。もう片一方は小麦とかお米、リンゴという C 3 植物を食べている。そうすると、分子の数は同じで水の量も同じだとしても、体重が 30 ミリグラムぐらい変わってきます[図 8]。これの典型的なのはアメリカとか南米で、トウモロコシとかが家畜にもものすごく使われます。それから、南米はトウモロコシ以外にシュガーケインを砂糖として使います。ですから C13 が非常に高い食文化圏になります。これに対して、モンスーン・アジアとかヨーロッパは牧草。モンスーン・アジアはお米ですから、ほとんどトウモロコシは入ってこなかった

状態にあったわけですが、日本の場合には戦後それが入ってきた。この差を、この指数の感度がよければ秤だけで測れるわけですが、実際には質量分析計という機械によって、比率を精度よく測ってその傾向を見ていくこととなります[図 9]。

そのパラメータを出してみたのがこれで、日本人、東京とか大阪の人というのは、こっちが炭素の同位体比。C13 が右のほうに向かって高くなります。それから、上のほうに向かってN15 が高くなる。これが現在の日本人の平均値。これが現在のアメリカ人の平均値。それから、ここにあるのが江戸時代の日本人の髪の毛です。それで、一番高いところからこういうふうに線が引けるのですが、アメリカはトウモロコシの影響が非常に強いものですから、マイナス 17 プロミリぐらいのところに来ます。それに対して江戸時代の人にはマイナス 21.5 プロミリぐらいのところ。現代の日本人はマイナス 18 プロミリのところ。これを内分すると7対3になって、平均的な日本人は大体トウモロコシ系の食料の影響を7割受けている。そうではない、お米や魚系のほうは3割であるということは、これを人間社会の食料の動態に結びつけると、輸入食料が日本の場合には平均的には6割から7割であるといったような結果になります[図 10]。

それをさらに琵琶湖ー淀川水系で見ていきますと、ここに沖の島というのがあります。これは琵琶湖の中の島です。その人たちはこの辺に来ますし、独身で下宿している学生さんはコンビニエンスストアで食料を買うことが非常に多いものですから、トウモロコシの影響をすごく受けるわけです。アメリカの食料の影響を受けてちょっと高くなりますので、こういう差が出てきます。それから、大阪の人はこちらにある。ヨーロッパの人はここになって、一番低いのがモンゴルの草原にいる人です。モンゴルに行くときよくわかりますが、トウモロコシなんてまだ全然ありません。肉と小麦しか食べていない。そういうことになりまして、こういうパラメータを個人のレベルから集落のレベル、あるいは水系のレベルというふうにしていくと、こういう食料のC4 植物への依存度の指標として、ミクロからマクロにかけての指標として使える。

これから、今 60 億の人口が 80 億以上になろうとしています。恐らくトウモロコシに依存することが世界中でどんどん増えてきますから、この全体がどんどん高いほうにシフトしていくという時代にこれから入ろうとしているわけです。こういう食料の動態というのは統計的にやればいいのですが、このパラメータの利点は、個人のレベルから地方の地域のレベルまで、あるいは国のレベルまでできるパラメータであるということが統計的なデータとはひと味違うという点です[図 11]。

それから、これは例えばモンゴルの川とか、それから琵琶湖に流入している小さな川です[図 12, 13]。そういうところに行って上流から下流にかけて、水をくんでフィルターで濾過するという操作をすることによって集められる懸濁物、あるいは川の中の堆積物、なかなか取りにくいのですが、そういうものを集めて同位体比を測定します[図 14, 15]。さらに窒素の同位体比を縦軸に置きます。横軸は、人間活動によって、Nはどれだけ domestic sewage などの形でその河川水に流れ込んできたかという量になりますし、これは非常に単純に言えば、流域の人口密度などにも対応いたします。そうすると、うんと上流では空からNが降ってきます。雨の中の成分とか、あるいは窒素固定で。だから最大 3 より低い値になります。それから、人間が食べている食料の平均値から類推しますと、domestic sewage は 6 のところにあります。ローディングがだんだん高くなって、人口密度が増えるに従ってデルタ 15Nは単純なミ

クシングカーブで上がっていきます。あるところまで上がるとカーブが寝だします。寝て、どんどん汚れがひどくなっていくと、川の中に酸素のない部位ができて、脱窒が起こります。硝酸から窒素ガスができる。そのときに、N14の硝酸のほうが早く窒素ガスになって、N15の硝酸はゆっくりとなります。ということは、川の中のN15の含量がぐっと高くなっていく。こういうものに対して、現在の汚濁処理というのですか、domestic sewageの処理のやり方ですと、「この辺ぐらいまでは人が住んでいいんじゃないですか。それ以上になるとドブ化して、非常に臭いものが出て嫌な環境になりますよ」という意味での環境容量みたいなものを出せるのではないか[図 16]。

これは、バイカル湖に注ぐセレンガ川というのがモンゴルにあります。モンゴルの川は全部バイカル湖に流入するのです。最初何でモンゴルの川をやったかという、バイカル湖はアジアの水がめみたいなものですから、汚すと大変だということがありまして、それで、ウランバートルのあるあたりとか、まだデータを出していませんが、この辺のセレンガ川の流域 10 点以上、大体 15~16 点をカバーしています。そこと、それからこれは琵琶湖ですが、ここに西の湖という内湖があります。ここに小さな水系があるのですが、この両方について上流から下流まで試料をとって、一体どうなっているのかというのを見た結果が次です[図 13, 15, 16]。

こんなでかい川と小さな川を比較すると、何で比較できるんだとよく言われますが、上流は空から、あるいは窒素固定でNが入ってくる。下流に行くに従って人間活動の影響が強くなる。全く同じパターンなわけで、一つの土俵で見ることができます。そうすると、セレンガ川の方はこういうところへ来て、この黒いやつは蛇砂川と琵琶湖です。先ほど予想した、これは強引に書いたのですが、こんな感じの図になるだろう。今のような排水処理しかしていないところは、平方キロメートル当たり数百人から 500 人ぐらいの人口密度以上になると、実際行ってみればわかりますが、小さな川はものすごく汚れてしまって、なかなか生活環境としては容認できないという状況が生じてまいります[図 16]。この辺のデータは全部カナダとかヨーロッパの川のデータでございますし、これの1つのミソは、かなり乱暴ですが、世界中の川を1つの図の上に乗せられる。それである種の評価をやってしまうことができるというメリットがあります。

これが2番目です[図 17]。

それから3番目は、最近よくわかったのは、琵琶湖は小さな川が非常に汚れているのです。小さな川の下流に行くと、いわゆるヘドロ、スライムみたいなものがたくさんたまっております。上流はちょっとした丘とか山ですから、途中の下流の平原のところのプレーンのところは地下水がどんどん湧昇しています。土壌の中でアンモニアがどんどん硝酸になりますから、下流のほうは水の中に domestic sewage の影響も含めて、硝酸がうんと高い状態になっています。ヘドロというのは英語にないと思うのですが、その硝酸がヘドロのたまっているところに入っていくとセミアネロビクなところで脱窒が起こって、硝酸からN2Oがたくさんできてしまう。そういうシステムが最近至るところにあるのではなかろうか。二酸化炭素、メタン、N2Oは温室効果ガスという地球を暖める効果がものすごく高いガスでございます。今は炭酸ガスで騒いでおりますが、2050年になると4割はN2Oとか、メタンとか、フロンによって温度上昇が規定されるのではないと言われていたぐらいです。あと20年たつと時間とともにN2Oとかメタンの発生にうるさくなってくるわけです[図 18]。

これはN₂Oを集めて、N₂Oの中の酸素とか窒素の同位体比を測るということをやっているわけです[図 19]。

これは模式図で、下流のスライムのたまったところでどんどん硝酸からN₂Oができる。どうもそういうシステムを我々はつくってしまっているのではないか。これはインディケーターというよりも、そういうシステムを知らず知らずのうちにつくってしまっている。そういう問題の提起をしておくということになります[図 20]。

そういうスライムを、この40～50年のあたりに内湖とか、小さな川の下流とか、琵琶湖の沿岸にため込んでしまったのではないか。これをうんときれいにするのをかなり真剣に考えなければいけないというのが1つ。それから2番目は、琵琶湖というのは非常にN₁₅が高くなっています。どうしてN₁₅が高くなったのかというのを、簡単に説明します[図 21]。

この40年間にコアで見ると、緑色のところを見てもらえればいいのですが、N₁₅がこう4プロミルぐらい高くなって、琵琶湖というのはN₁₅が非常に高い湖になっています[図 22]。これ[図 23]は、我々のグループで琵琶湖をぐるっと回って、百数十本ある川のうちの40河川ぐらいからいろいろな試料をとって窒素の同位体比を測りますと、赤丸のところと黄色丸のところが高くなっているというように、野洲川とか姉川とかという大きな河川ではなくて、都市型の小さな河川がものすごく汚れています[図 24]。そういうところのN₁₅含量が高くなっている。その辺のところ非常に大きな原因があったのではなかろうか[図 25, 26, 27]。

そういうことで、よく我々の社会システムグループは住民参加とかそういうものが非常に重要であるということを使うわけです。もしそれが非常に重要だとすれば、物質循環系の方にそのひずみが出ていなければいけないはずだ。出ていないのだったら別段今までどおりでいいじゃないかという言い方も言えないことはないわけです。やってみますと、今までトップダウンでやっていたところから落ちこぼれていた小さな川が琵琶湖の全体像に対して非常に大きな影響を与えているのではないかということが物質循環のほうからわかってきた。

そういう意味で、琵琶湖をこれからきれいにしていこうと、これまでうんと努力してきたわけで、ちょっと途方に暮れた面もあるわけですが、そういうときに非常にきめの細かい、ミクロからマクロにかけて琵琶湖をきれいにするという形でのシステムが動き出さなければだめだろうといったことが1つの結論として出てきたということでございます。

ちょっと中身が中途半端になってしまいましたが、インディケーターと、それからこういう住民参加に結びつくような物質動態の結論が出たといったようなところが現状でございます[図 28, 29]。どうもありがとうございました。