



環境儀

NO. 28 APRIL 2008

国立環境研究所の研究情報誌

森の息づかいを測る 森林生態系のCO₂フラックス観測研究



独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/>

A man with grey hair and glasses, wearing a dark brown suit, white shirt, and patterned tie, stands in a lush green forest. He is looking upwards and to the right. The forest floor is covered with dense green vegetation. Several glass enclosures, likely for scientific research, are visible in the background and foreground. The text is overlaid on the right side of the image.

森林のCO₂吸収と放出。
より正確な科学的知見を得るために、
樹木だけではなく、
草や土壌に至るまで森林生態系の全体を
観測することが求められています。



地球温暖化問題の解決のために世界が協力して採択した京都議定書は2005年2月16日に発効し、温室効果ガス削減の第一約束期間が今年からスタートしました。日本は、この5年間の年平均で1990年比マイナス6%という温室効果ガス削減の国際約束に向けて、義務のある削減の本番に突入したのです。

国立環境研究所では、これまで多くの分野に及ぶ地球温暖化に関する研究を続けてきました。環境儀でも「地球温暖化の影響と対策No.2」、「海の呼吸No.6」、「最先端の気候モデルで予測する『地球温暖化』No.19」、「地球環境保全に向けた国際合意をめざしてNo.20」と最先端の研究成果を掲載してきました。

地球温暖化問題は全球的な規模で起きている現象で、その研究もあらゆる分野に及びますが、まだまだ解明されていない問題も多く残されています。たとえば森林がCO₂の大きな吸収源であることは広く知られていますが、季節、地域、森林生態系の違いによる実際の状況はよく分かっていません。本号では、これまで継続的に観測することが難しかった森林規模のCO₂吸収・放出量の観測に苦小牧、天塩、富士北麓で取り組んだ「森林生態系炭素収支モニタリング」プロジェクトを中心に紹介します。

C O N T E N T S



森の息づかいを測る

森林生態系のCO₂フラックス観測研究

Interview

研究者に聞く P4 ~ P9

Summary

日本から アジア地域の観測サイトに
みる炭素収支 P10 ~ P11

研究をめぐって

急速に充実する森林のCO₂フラックス研究
..... P12 ~ P13

「森林生態系炭素収支観測研究」のあゆみ

..... P14

日本は国土の2/3あまりが森林です。しかしながら、森林がどのくらいのCO₂を吸収・放出しているかなど、実際のフィールドワークから森林全体のCO₂収支を直接調べた例はあまりありませんでした。地球温暖化問題の高まりの中、今回は、森林のCO₂収支観測プロジェクトチームをまとめた藤沼康実さんにお話を伺いました。



藤沼康実 / 陸域モニタリング推進室長

森林をまるごと観測する - CO₂フラックス研究

1. 研究のはじまり - フィールドワークから

まず、研究者になったきっかけからお願いします。

藤沼：私は、もともと植物の生育や栽培などに関心が強かったです。組成やメカニズムを探るサイエンス系ではなく、技術面、つまりテクノロジー志向でした。ですから、大学時代は実験室にこもるというよりは、野外のフィールド調査が好きで、夏休みなどほとんど畑の中で暮らしていたといってもよいほどでした。

国立環境研究所では、当初どのような研究に携わっていたのですか。

藤沼：私が入ったのはまだ国立「公害」研究所という名称の頃でしたが、当時は各分野でいっせいに大型の実験施設を作った時期でもありました。植物部門でも、植物の環境制御実験施設(ファイトロン)という施設ができたばかりでした。この施設は、簡単にいうと大

規模な空調付きの温室ですが、さまざまな環境を作ることができる、世界でもトップクラスの施設でした。大気汚染が大きな問題になっていた頃で、私は、ファイトロンで大気汚染の植物への影響を研究していました。汚染された空気の中で植物がどのように反応するか、あるいは植物がどのくらい大気汚染を吸収できるのかなどの両面からの研究です。

2. 森林の炭素収支 - 長期モニタリングの道

さて、今回の研究は、「森林生態系のCO₂収支を調べる」ということですが、森林全体から探るということでかなりの規模の研究ですね。

藤沼：森林の炭素収支を調べる際、樹木などの葉で行われる光合成からCO₂吸収をとらえる研究はこれまでも多く行われてきました。もちろん、これも必要なこ

森林のCO₂の吸収と放出

植物は光合成により大気中のCO₂を有機物にします。この有機物のうち、およそ半分は植物体の生命活動を維持するエネルギー源として利用され、その結果、数日から数週間後には再び葉や幹、根などを通してCO₂として大気に戻ると推定されています。残りは葉や枝、幹そして根など植物の体として固定されます。しかしこのように植物中に固定された有機物も、やがて落葉や落枝、枯死木や枯死根として土壌に移行します。土壌表層にたまった落葉などの分解しやすい有機物は、土壌微生物により数カ月から数年間で分解されCO₂となって再び大気に戻っていきます。分解しにくい木質成分を多く含んだ残りの有機物は、土壌の中でさらに数十年から数百年(高緯度地域)という長い時間をかけて分解され、やはりCO₂として大気に戻ります。

このように、大気から生態系へ移行した炭素は、異なるタイム

スケールをもったさまざまな循環過程を経て再びCO₂として大気に戻っていきます。一般に「森林のCO₂固定量」と呼ばれるものは、「大気から生態系へ移行する炭素」ではなく、それから「生態系から大気へ戻る炭素」を差し引いたものです。ですから、実際の「森林のCO₂固定量」は植物が光合成により大気中のCO₂を吸収した量の数分の一から数十分の一に過ぎません。大気と生態系の間には、毎年膨大な量の炭素を交換しながら、わずかながら生態系中に炭素量が蓄積していくという関係があるのです。

生態系の中で、光合成による大気中のCO₂の固定、植物の呼吸によるCO₂の放出、土壌中の有機物分解によるCO₂の発生などは、環境の変化に対する応答が異なります。気温の上昇や降水量の変化などの気候変動は、これらのバランスを変化させ、結果的に「森林のCO₂固定量」に大きな影響を与える可能性があります。その影響を定量的に評価するために、生態系内の炭素循環プロセスを多面的・統合的に理解することが不可欠となっています。



とですが、CO₂収支を測るためには、森林生態系全体から考えることが重要です。まず樹木があって林床には草や笹などが生えています。これらも光合成によりCO₂を吸収したり、呼吸によって放出もします。土壌中ではモグラやミミズなどの地中生物も呼吸していますが、それ以上にたくさんの微生物が活動し、CO₂を放出しています。この吸収と放出の関係は森林の立地条件によって大きく変わってきます。

たとえば、森林が密の場合と疎の場合では、日当たりも違い光合成量も変化します。また気温や水分などの環境、さらに樹齢によっても違います。このような関係を全部調べて森林全体のCO₂収支を観測する必要があります。しかも、森は生きていますから、その収支は朝、昼、晩でも、季節によっても変わります。ですから、そうした変化を毎日、毎月、毎年連続してモニタリングすることが大切です。

なるほど。たいへんな作業になりますね。

藤沼：そうです。森全体のデータを集める必要がありますから、とにかくモニタリングしてデータを積み重ねなければなりません。こうしたプロジェクトは自然

相手ですから短期間では成果は上がりません。一方、多大な経費がかかり、予算がつきにくいのです。

この研究分野に対する風向きが大きく変わったのは、1997年12月の京都議定書の採択がきっかけでした。CO₂吸収源としての森林が注目され、1999年に予算がつかしました。

地球温暖化問題の高まりから初めて本格的な研究ができるようになったんですね。

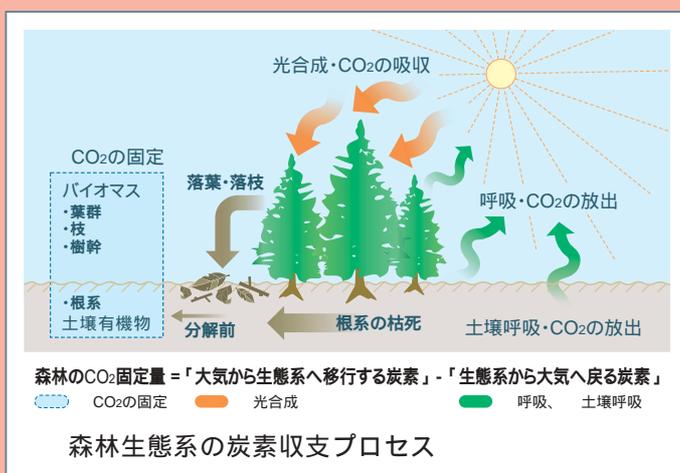
藤沼：実は、森林生態系全体規模の研究としては国際生物学事業計画(International Biological Program : IBP、1965～1974)という世界中の森林や耕地などの生産性を調査した国際プロジェクトがありました。日本も参加しましたが、それ以来ですから実に30年ぶりということになります。

3. 観測地を探す - カラマツの森林

予算がつかしました。いよいよ研究ですね。

藤沼：まず観測地の選定です。観測には、均質な森林がフラットに広がっていると非常に都合がよいのです。日本中を探し回り、苫小牧にあるカラマツ林を選びました。大がかりなプロジェクトですし、大規模の森林での観測研究は久しぶりとあって全体をデザインできる経験者が見あたりませんでした。そこで、研究所内だけでなく広く外部の林学・生態学や気象学の研究者などに集ってもらい、まずどのような観測をやるべきかの意見交換、さらに将来の研究の発展を見通し、それを念頭に置いた観測システムを整備することから始めました。

まず初めにやったことは観測地点まで電線を敷いたことです。観測システムが安定的に使えるように、実



炭素換算

草木などのバイオマス(乾燥重量)は、一般に半分が炭素量といわれています。「炭素換算」とは排出されるCO₂の中に含まれる炭素の重量のことで、CO₂排出量を表すときに国際的にこの数値が使われています。

CO₂ 1kgを炭素換算すると、

$$1 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 = 1 \times 12 (\text{Cの原子量}) \div 44 (\text{CO}_2の分子量) = 0.273 \text{ kg} \cdot \text{C}$$

となります。

つまり、1kgのCO₂には、273gの炭素が含まれているということです。

周期表の一部、元素記号の左の数字は原子番号、下は原子量。炭素の原子量は12、酸素のそれは16であることがわかる。					0
					2He 4.0 ヘリウム
6C 12.0 炭素	7N 14.0 窒素	8O 16.0 酸素	9F 19.0 フッ素	10Ne 20.2 ネオン	

に6km、しかもすべて地中埋設です。おかげで、初年度の予算の半分近くが飛びました。

どうして、そんなに経費のかかる電源を引かなければいけないのですか。それも地中埋設なのでしょう。

藤沼：観測サイトは人為的な影響を受けないところですから当然電気はありません。多くの項目を長期間継続して観測するためには、安定した電源の確保が不可欠です。そのため、電線を敷いての観測は、この分野に携わる研究者全員の希望でもありました。それと地中埋設は、景観上や電線が野生動物に噛まれたり、倒木での断線を防ぐなど保安対応のねらいもありました。それらの整備が行われ、研究がスタートしたのは2000年の初夏でした。

4. 苦小牧の観測 - 台風の襲来

苦小牧での観測はいかがでした。

藤沼：樹齢40余年のカラマツが広がる100haの植林地に、高さ40mと25mの2つの観測塔を建て、渦相関法(コラム参照)を用いて1年間のCO₂フラックス(移動量)を調べました。まず、それを簡単に紹介します(図1)。

図1は2001~2003年のCO₂フラックス(樹木など植物の光合成によるCO₂吸収量(GPP)と植物や土壤微生物の呼吸によるCO₂放出量(RE))を示しています。

Memo

GPP = 光合成によるCO₂吸収量
RE = 呼吸によるCO₂放出量
NEP = 正味のCO₂の固定量
すなわち、GPP - RE = NEPである

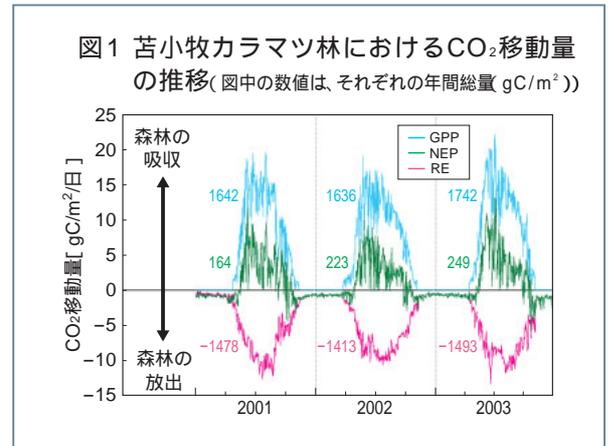


苦小牧観測サイトに建てられた40mタワー。ここでCO₂フラックスを観測しました。

雨により渦相関法が使えない場合もあります。その時は補完式を用いて温度や日射量から森林の正味のCO₂吸収量(NEP)を推定しています。結果は、すべての数値が夏に大きく冬に小さいという季節変化の傾向をはっきり示しています。太陽の光の強さの影響が大きいGPPは初夏にピークとなり、一方、温度の影響が大きいREは盛夏がピークとなります。両者の差であるNEPは、初夏にピークを迎えます。しかしこれらの値は年々変化します。

それはなぜですか。

藤沼：森林のCO₂固定量は森林植物の光合成能力と、森林生態系の呼吸とのバランスによって決まります。



渦相関法とは

森林や農耕地など陸域生態系が吸収・放出するCO₂の量を測定する手法の一つで、群落の上での空気中の微小な動きに連動したCO₂濃度の変動を、非常に高速な応答性を持った3次元超音波風速計とCO₂分析計で計測し、その関連性からCO₂フラックス(単位面積当たりのCO₂の移動量)を計算するものです。

この手法は広い空間でも少数のセンサーから代表値を取ることと全体の動きが把握できる他、以下のような長所があります。

- CO₂フラックスをほぼ直接的に定量できる
- 数分から数年という広いタイムスケール変動の把握が可能
- データを得る上で省電力化、および人的労力の軽減
- 長期無人観測やアクセスの困難な場所での観測が可能
- 一方短所として、水平方向に輸送されるCO₂の量が観察できないため傾斜地

や複雑地形ではその影響を受けやすい

大気の動きが安定した状況では渦拡散によるCO₂の輸送が起こりにくく計算式の適用に不適切な条件となる

などがあります。そのため、連続した観測データから、計算に不適切な条件下のデータを検出・除外し、信頼性の高い時間帯のデータをもとに欠測期間の補完処理を行うなど、信頼におけるデータを得るためには現在でも高いスキルとそれぞれの観測値に即したノウハウの集積が必要となっています。

渦相関法に用いられるCO₂分析計には大きく分けて 閉鎖型のセンサー部にポンプなどで空気を外部から送り込んで分析するクローズドバス型と 開放型のセンサーにより設置した場所のCO₂濃度を直接分析するオープンバス型、の2種類があります。国立環境研究所のフラックスサイトでは、より信頼性の高いデータを取得するためのノウハウを蓄積するために、両方のシステムを長期にわたって並行して稼働させ、技術的な検証を行っています。



したがって、年ごとに太陽の光の強さや温度などの気象条件は異なるために、決して同じ結果にはなりません。

なお、図では表していませんが、吸収したCO₂を炭素に換算して1年間の合計を計算すると、光合成によるCO₂吸収量は16.3～16.4tC/ha/年、正味のCO₂固定量は1.6～2.5tC/ha/年となりました。計算結果に幅があるのは、呼吸によるCO₂放出量の計算(光合成の起きない夜間のCO₂放出量を元に呼吸を温度の式として表し、これを用いて昼間の呼吸量を推定します。)や正味のCO₂固定量の推定部分における不確実性を考慮に入れているからです。得られた1年間の値は、北米の温帯の落葉広葉樹林での観測例と同程度でした(表1)。

これが、苫小牧での最初の成果ですね。

藤沼：実は、この観測の半年前から、プロジェクトチ

ームの梁主任研究員が、直接、土壌呼吸の通年観測を始めています。土壌呼吸はまだ解明されていないことが多いのです。その中で複数の大型チャンバー(写真1)を使用した通年観測、しかも土壌呼吸の細分化(土壌と根に分けて)観測は、当時としては世界的にもあまり例のない研究でした。観測はフタが自動開閉する16個の大型容器(チャンバー)を使いました。観測時には数分閉じ、その間チャンバー内のCO₂濃度上昇から土壌呼吸を算出するしくみです。これを1時間間隔で行いました。観測値は微生物呼吸のみを測る区(チャンバーの設置位置の土を掘り、根を取り除き、再度土を戻す)と、根+微生物、いわゆる土壌呼吸全体を測る区(何の処理も行わず土壌にチャンバーをかぶせる)を比較しました。この差で根の呼吸が分かります。

細かい配慮が必要ですね。

藤沼：このようにして調べた結果、土壌からのCO₂の放出量は炭素換算で9.6tC/ha/年と推定できました。具体的な推移は図2のようになります。土壌呼吸(速度)は、夏季に多く、冬季には極めて少ない値を示しています。地温との相関も高く、温度の上昇とともに高くなっています。ただ、土壌水分との相関は見られませんでした。北米などの先行研究では、土壌呼吸は水分

表1 森林生態系の炭素固定量(観測例)

気候帯・森林	NEP tC/ha/年	GPP tC/ha/年
亜寒帯・落葉広葉樹林(カナダ)	1.3	10.2
冷温帯・落葉広葉樹林(日本)	1.8	8.0
温帯・落葉広葉樹林(米国)	3.7	11.1
温帯・落葉広葉樹林(イタリア)	4.7	10.1
熱帯・常緑広葉樹林(ブラジル)	1.0	24.4
熱帯・常緑広葉樹林(ブラジル)	5.9	30.4

写真1 苫小牧フラックスサイトに設置された大型チャンバー



(左：土壌呼吸(Rs)、右：微生物呼吸(Rh))

観測センサー

森の木々を通して上昇してくる大気中のCO₂濃度を測定 (低)

空から森に下降してくる大気中のCO₂濃度を測定 (高)

観測センサー

オープンパス型CO₂濃度変動計

クローズド型空気採取口

3次元超音波風向風速計

森林がCO₂を吸収している場合には、群落から上空へ向かって輸送される空気に含まれるCO₂濃度は、上空から下向きに輸送される空気比べて低くなります。この様子を塔に設置されたセンサーで高頻度で観測し、積算することで時間帯ごとのCO₂フラックスを算出します。

微気象学的方法によるフラックス観測の原理と、渦相関法によるフラックス観測センサー

の制限の影響を受けることが多いのですが、東アジアの温帯では降水量が多いため、水分の制限が影響しにくいことが、この違いを生み出していると予想されました。

次に、これまでの森林と間伐して光の通りをよくした場合の1年間の比較観測を始めました。条件を変えてCO₂フラックスがどのように変わるかを見たかったのです。ところが、観測を行っていた2004年9月、北海道を直撃し全道に大きな被害を及ぼした台風18号のせいで森林や施設がめちゃくちゃになり、実験は不可能になってしまいました。北海道大学の有名なポプラ並木の半数以上が倒壊したことがニュースで報じられましたので、ご記憶の方もいると思います。研究自体はその後、場所を富士北麓に移し進めています。

5. 天塩での実験 - 樹木を丸ごと掘る

北海道・天塩でも観測をしていらっしゃるんですね。苫小牧との比較などはできましたか。

藤沼：苫小牧から1年遅れの2001年夏から研究を開始しています。しかしCO₂フラックスについては土壌などの立地条件も違いますし、ここでは森林を伐採して新たにカラマツを植林し、その成長過程を通した炭素収支機能を調べるという苫小牧とはコンセプトの違う研究を行っていますので、直接比較はできません。

ここではまず樹木を種類別、大きさ別に数本根こそぎ掘り出し、その全部を量するという肉体的にもハードな研究をしましたのでそれを紹介します。

具体的にはどのようなものですか。

藤沼：従来から、木の材木としての量(材積量)は胸高直径(地面から1.3mの木の直径)と木の高さ(樹高)



樹木を丸ごと測るため、根の一本一本まで丁寧に掘り出す。

が分かれば、材積量が推定できるという経験式がありました。しかし、これは林業としての材木量を量るためのもので、枝や根、葉など商品にならないところは含まれません。CO₂吸収という観点からは木のすべてが対象となり、全体を調べることは非常に重要なことです。こうしたデータを積み重ねていけば、それぞれの樹木全体の炭素蓄積量が分かります。日本には林業データが充実していて、全国各地の森林が把握されていますから、それに当てはめていけば、全国の森林の炭素蓄積量も推定できます。そのための基盤ともいえる研究です。

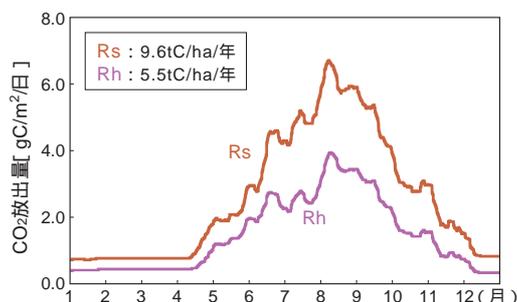
実際の作業はたいへんそうですね。

藤沼：そうですね。3種類の樹木で胸高直径別(30~40cm、15~20cm、10cm前後)にそれぞれで計5~7本の木について調査しました。高さが15mを超える木もあります。大型重機を使ったり、根の泥を落とすのに放水銃を使ったり、さらには乾燥も必要です。現地作業だけでも40人のスタッフが1週間かかり、その後の乾燥は1年もかかりました。

図3がその結果です。広葉樹と針葉樹では葉量が大きく違い、樹木全体から見ると葉の割合は広葉樹で2~3%、針葉樹でも10%程度と小さいことがわかります。

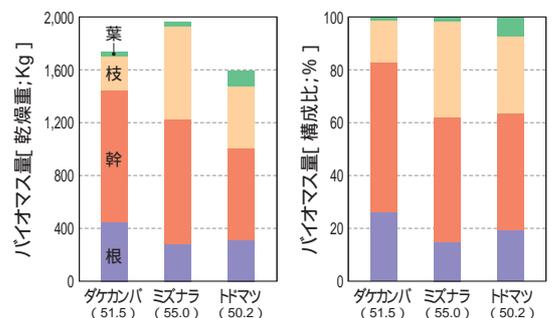
また、材として経済価値の高い幹が樹木全体としてみると約1/2に過ぎないことがわかりました。

図2 苫小牧カラマツ林における土壌からのCO₂放出(2003年)



Rs：土壌呼吸(植物根+微生物) Rh：土壌呼吸(微生物)

図3 北方3樹種のバイオマス量の比較



樹種名下の()内数値は胸高直径 (cm) を示す。北大天塩研究林で調査



6. アジアフラックスネットワークへの貢献

苦小牧には多くの研究者が集まったそうですね。

藤沼：実は森林のCO₂フラックスの研究は、欧州や北米に比べアジア地域は遅れています。圧倒的にデータが少ないのです。「これはいけない。何とかしよう」と1999年9月にアジア地域の観測研究ネットワーク；アジアフラックス(AsiaFlux)が発足し、わたしども地球環境研究センターに事務局が置かれました。苦小牧サイトの立ち上げとAsiaFluxの発足がほぼ同じ時期になり絶好の機会でした。そこで、苦小牧サイトで行う研究課題を募集しました。私たちのプロジェクトも所外の研究者が参加することで幅が広がりますし、やってくる彼らにとっても研究環境のよい場所はほしいわけです。たくさんの研究者が集まりました。

フラックス関係の研究者が中心ですね。

藤沼：基本はそうですが、他にも大気関係、植物の生理生態、造林関係などさまざま、集まった研究の題目だけでも30を超えたほどです。この研究で博士号を取った院生も数人おり、若い研究者も育てたことになります。苦小牧サイトにおけるカラマツ壮齢林の観測は台風の影響で不可能になりましたが、山梨県・富士北麓に拠点を移して観測を行い、AsiaFluxへの貢献は続いています。

7. 新たな取り組み - 研究の今後

今回は野外研究が中心ですが、フィールドワークだからこそ見えてくるものや、野外活動での苦労話などをお願いします。

藤沼：富士北麓でも、観測地周辺の4haのどこに、どのような木がどのくらいあるのか、下草もどのくらい生えているのか、人海戦術で全部調べています。こうした地道な努力の積み重ねがあって初めて、そこにどのくらいの炭素が固定されているかの正確なデータを把握することができます。

とはいえ、研究上はいろいろな障害もあります。木を丸ごと掘り出すサンプリング調査も、複数の関係機関に説明し、許可を得ることが必要ですが、これがなかなか一筋縄ではいかないのです。今回、ようやく10本の伐採許可が下りて喜んで始めたところ、そのうちなんと3本も芯が腐っていました。しかし「3本追加します」と簡単にはいきません。再度、説明し、許可を得なければなりません。こんな試行錯誤の繰り返しが続いています。

この分野の研究は、まだ発展途上の段階で、肉体をフルに使う研究の基盤づくりに加え最先端の研究も行わなければなりません。まさに走ったり止まったりしているのが現状です。しかし、私たち以外の研究グループでもこうした観測は始まっています。連携を進めて、森林のCO₂収支を詳細に比較できる地域を点から面へ、そしてそれをアジアへも広げ、具体的な社会貢献をめざし、今後も、一步一步研究を続けています。

ありがとうございました。

カラマツ

マツ科カラマツ属の落葉高木で、北海道や北日本から中部地方の高原まで幅の広い地域に見られるポピュラーな樹木です。現在、日本にあるカラマツは戦後の木材需要によって植えられた人工林がほとんどです。寒冷地や火山灰の痩せた土壌にも強く、北海道では人工林の30%強を占めています。若いカラマツは成長が早く樹木の密度が低いため、曲がりや割れが出やすく、さらにヤニも出るため建材などには不向きです。昔は炭釜の坑木として活用されていましたが、現在チップ材として使われています。

さて、中央～東シベリアの永久凍土に自生している森林はほとんどがシベリアカラマツです。これは、日本のカラマツと同じ属の別種ですが、北東ユーラシアの広範囲な地域を代表する植生であり、北米やヨーロッパの同じ緯度帯を代表し

ている常緑針葉樹林とは異なる特性を持っています。これまで、高緯度の森林植生での観測的知見の多くは欧米の常緑針葉樹林で蓄積されてきていますが、カラマツ林での観測データの集積により、従来のデータから類推できない情報が得られることになります。



日本から アジア地域の

亜寒帯から熱帯に至るまで多様な気候領域を持つアジアには、巨大な炭素蓄積を持つ北方カラマツ林や種多様性を持つ熱帯多雨林など、世界的に見ても重要な生態系が各種存在します。ここでは、アジアの各観測サイトと天塩、富士北麓サイトでの炭素収支研究の最新の結果を紹介します。

各種生態系で観測された炭素収支の季節変化に関するサイト間比較

アジア観測サイトのデータを収集して年間、月別に炭素換算で生態系純生産量 (NEP) の季節変化を表しました。NEPは植生の違い、気温と降水量の季節変化の差異を反映してサイトごとに特色あるパターンとなっています(図4)。

ロシア・中央シベリアから北海道にかけてのカラマツ林生態系(A)~(D)を比較すると、年平均気温が高くなるにつれて生育期間 (NEP > 0の期間) が長くなり、またNEPの最大値が高くなる結果が明らかに示されました。また、落葉樹林(A)~(E)と常緑樹林(F)~(H)との違いを比較すると、落葉樹林には明瞭な季節変化がありNEP > 0となる生育期間とNEP < 0となる非生育期間とで区別が見られました。一方で、常緑樹林でのNEPの季節変化の振幅は小さく、生育期間・非生育期間の区別は不明瞭であることがわかりました。

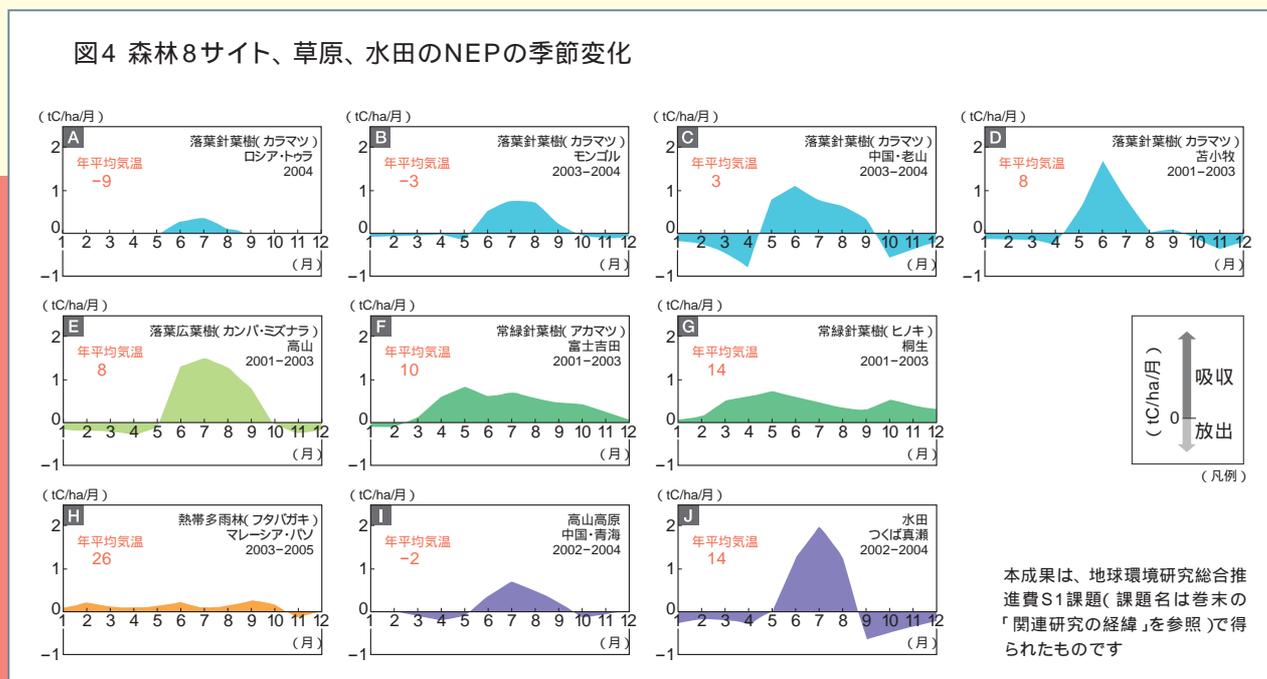
水田(J)においては夏季の耕作期間に大きなNEPのピークがあり、耕作植物の特性を示しています。本研究では、データの集約のみでなく、観測面での技術的連携を行い、データの解析手法についても整合性を高めた結果として、アジアにおける各気候帯、各種生態系のNEPの季節変化パターンを精度良く評価できるようになり、それぞれの特徴について高度な解析が可能となりました。(環境省地球環境研究総合推進費 2002~2006年度、「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の総合的炭素収支研究」から)

森林の成長過程を通じた炭素収支の長期観測

天塩サイトでは、2001年夏から森林の炭素収支を観測し、その後育林過程から炭素収支がどのように変動するかを観測しています。このため2003年1~3月に森林を皆伐し、10~11月にかけて2年生のカラマツ苗(約50cm)を1ha当たり2400本、計3万3000本植樹しました。

図5はその継続観測結果です。伐採前の針広混合林では、炭素収支も樹木や林床のササによるCO₂の吸収(GPP)と土壌や樹木・ササの呼吸(RE)は、ほぼ拮抗しており、その差分(NEP)は若干の吸収となりました(緑の部分は+側が放出、-側が吸収となります)。植林前の伐採跡地では、繁茂状態となったササによる光

図4 森林8サイト、草原、水田のNEPの季節変化





観測サイトにみる炭素収支

合成でCO₂の吸収は行われましたが、値は約1/3に減少しました。しかし、REは樹木がないにもかかわらず値は2/3の減少に留まっています。これは、太陽光が地表にまで届くようになって地温が上昇し、土壤呼吸が増加したものと考えられます。その結果、生態系として大きくCO₂を放出することになりました。

植林でササは皆伐したのですが、植樹の2年後にはさらに繁茂状態となり、針広混合林当時のCO₂吸収値の2/3程度まで回復しました。また、REは伐採跡地の値とあまり変わらず、結果として生態系からのCO₂の放出は減少しつつあります。

植樹の3年目になると、カラマツ苗は樹高も約1.5mに成長しましたが、バイオマス量は繁茂するササに比べ極めて少なく、カラマツ幼樹がCO₂の吸収に貢献しているとはまだ言い難い面があります。しかし、カラマツはその特徴から今後急速に成長することが予想され、本観測林が再植林によるCO₂の良好な吸収源として観測されるのもそう遠い先ではないと考えられます。

富士北麓林での炭素収支観測

(1) 2006年1～12月の観測結果から

富士北麓サイトは、富士山の山梨県側の標高1100m前後、150ha規模で広がるカラマツの人工林にあります。このサイトは地形的に単調で植生としても均一な上、森林管理の履歴が十分に把握されているため、群落スケールでの森林CO₂収支観測についての技術的な評価を目的とした研究を実施する上で好適地です。サイトの中央部4haを対象とした毎木調査では、全樹種の個体密度は435個体/haでカラマツは全体の

90%弱を占めていました。苫小牧サイトと比較すると、個体密度は約1/2と低いのですが、その分1本あたりの大きさが大きいという構造的な違いがあります。

このサイトで渦相関法により2006年1月から12月までのCO₂フラックスを観測しました。1月から4月上旬までは、カラマツの落葉期にあたり、森林からのCO₂の放出が見られますが、4月上旬の展葉期からCO₂収支は大きく吸収側に傾き、6月をピークに、落葉期となる10月までCO₂の吸収期間が続きます。このような季節パターンは落葉針葉樹であるカラマツ林の典型的な特徴と言えます。現時点ではデータの蓄積期間が短くデータの検証途上にあるため精細な比較はできませんが、苫小牧での結果と違いを比較解析していくことで、カラマツ林のCO₂収支を支配している要因について多くの情報が抽出できるものと期待しています。

(2) カラマツ林とアカマツ林の炭素収支の比較

富士北麓サイトのカラマツ林近隣のアカマツ林では、森林総研がCO₂フラックスの観測を行っています。この2つのサイトの結果を比較することにより、同じ気候条件のもとで、異なるタイプの森林でのCO₂フラックスの環境因子の変動に対する応答特性の違いを評価することが可能になると考えられます(図6)。このような観測は世界的にも貴重なものであり、生態系の数値モデルの高度化に非常に重要な情報を提供することになります。現時点では、観測データの検証が完了していないため、精細な定量的比較はまだ行われていませんが、概算値では両サイトの年間のCO₂収支には大きな差がないものの、吸収・放出の季節性には著しい違いがあることが明らかとなっています。

図5 北海道・手塩サイトのCO₂移動量の推移
(図中の数値は、それぞれの年間総量(gC/m²))

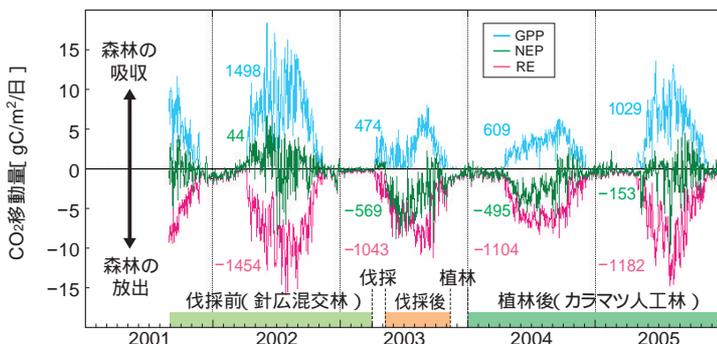
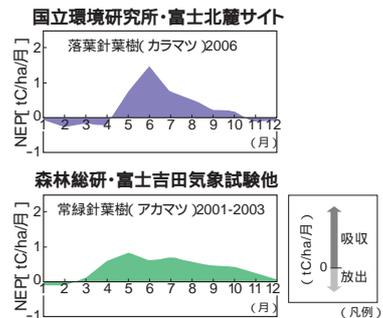


図6 CO₂フラックスの樹種による違い



アカマツのデータは、図4より引用しました

急速に充実する森林

1990年代半ばから、世界各地で陸域生態系のCO₂吸収に関して長期的な観測研究が実施されており、FLUXNETという南は種の多様性を持つ熱帯林までの広い気候帯にまたがってさまざまな植生が分布しているため、世界中の研究者

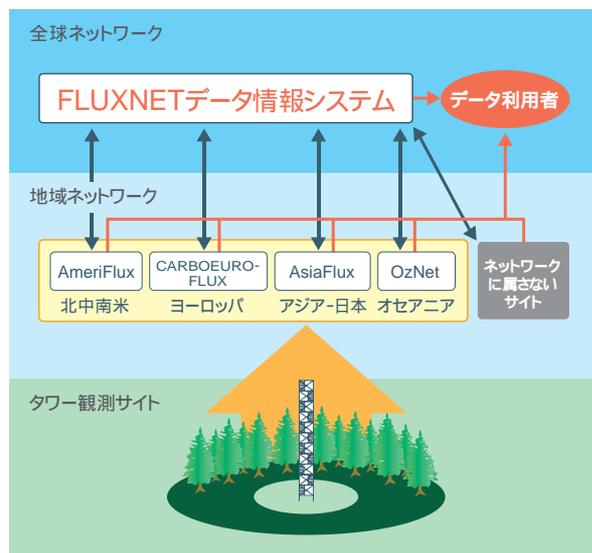


世界では

1990年代の初めごろ、地球化学、植物生理生態学、気象学などの研究者の間で、地球規模の二酸化炭素の収支の解明とその気候変動による影響の評価のためには、大気と陸域生態系間のCO₂交換の観測データの集積とそのモデル化が重要であるとの認識が高まり、学際的な研究グループによる大気・陸域生態系間のCO₂交換プロセスに関する大規模な研究プロジェクトが行われるようになりました。

北米では85の研究チームからなるBOREAS (Boreal Ecosystem-Atmosphere Study)が中心となり、1994年と1996年にカナダで大規模な集中観測を実施しました。また、1996年にはヨーロッパでEUROFLUXが活動を開始し、欧州の18のサイトで共通の手法によるCO₂フラックスの長期観測が始まりました。EUROFLUXはその後、より広範な炭素循環研究プログラムを包括したCarboEuropeとして発展しています。1996年にはアメリカを中心にAmeriFluxというフラックス長期観測のネットワークが設立され、北米を中心とした多様な生態系で観測が実施されるようになりました。

1997年に京都で開催されたCOP3(国連気候変動枠組条約第3回締約国会議)では、陸域生態系による炭素固定量を評価しこれを国別排出量から差し引くことが合意されました。これにより、陸域生態系の炭素固定量を科学的根拠を持って推定するために国際的な観測網の整備の必要性が高まりました。さらに、地域的な観測ネットワークの連携を図り、世界的なネットワークに発展させるために1998年に世界のフラックス研究者のワークショップ(FLUXNET 1998)がアメリカで開催され、ここから始まったFLUXNETがその後、国際的なネットワークとして観測データの共有や統合解析のとりまとめなどを行っています。現在では400を超すサイトがネットワークに登録されています。



フラックスネットワーク概念図



米・オークリッジ国立研究所にあるFLUXNETのHP (http://daac.ornl.gov/FLUXNET/)

のCO₂フラックス研究

国際的なネットワークが構築されつつあります。一方アジアはシベリアの大規模な炭素蓄積を持つ北方カラマツ林から、から注目されています。そしてアジアでのCO₂フラックス観測研究は、日本を中心に今まさに広がっています。



日本・アジアでは

日本の研究機関や大学でも、CO₂フラックス観測研究は実施されていました。産業技術総合研究所が1993年から岐阜県の高山市の森林で実施しているフラックス観測は世界的に見ても貴重な長期観測データです。しかしながら、1990年代までの多くの研究は短期的なものであったり、観測項目が偏っていたりしたため、長期的に体系的なフラックス観測データを集積することの必要性が国内で議論されるようになりました。

1998年には国内のフラックス観測関連研究者により「フラックス研究会」が設立され、このメンバーを中心に1999年にAsiaFluxが発足しました。その後、韓国のKoFlux、中国のChinaFlux、タイのThaiFluxなど各地で地域的なネットワークが立ち上がりました。AsiaFluxでは定期的にワークショップを開催し、情報交換を行うとともに、最近ではトレーニングコースによる若手研究者の育成にも力を入れています。

アジア域での急速なフラックス観測研究の広がりによる情勢の変化を受け、AsiaFluxと日本の研究コミュニティの関わり方を見直すために2007年には日本の研究コミュニティによるJapanFluxが発足し、AsiaFluxの傘下ネットワークとして活動を開始しています。またJapanFluxは韓国のKoFlux、中国のChinaFluxとCarboEastAsiaというプログラムを開

始し、データ共有による統合解析の高度化と、技術交流を進めています。

国立環境研究所では

国立公害研究所が国立環境研究所へと1990年に改組され、地球環境研究を推進する組織として、地球環境研究の総合化、地球環境研究の支援、および地球環境モニタリングを推進する地球環境研究センター(Center for Global Environmental Research, 以下CGER)が発足しました。CGERは地球環境モニタリング事業として、地上ステーションや船舶、航空機による温室効果ガスの長期的観測を推進してきました。

1997年のCOP3以後、地球環境モニタリングの一環として、温室効果ガスフラックス観測をはじめとする森林生態系の総合的観測研究が開始されました。今回紹介した研究はこれをベースに進められたものです。

また、1999年のAsiaFluxの発足以後、CGERにAsiaFlux事務局が設けられ、データベースの整備やワークショップの支援、ニュースレターの発行などネットワークの運営に貢献しています。

さらに、今回の研究の現場となったサイトは、学術研究のプラットフォームとしてだけでなく、一般市民を対象としたCO₂フラックス観測研究の実際の現場を紹介する舞台としても利用してきました。



タイ・チェンマイで開かれた2006年のアジアフラックスワークショップ



サイエンスキャンプ(富士北麓(左)、カラマツ記念植樹(北海道・手塩(右))

「森林生態系炭素収支観測研究」のあゆみ

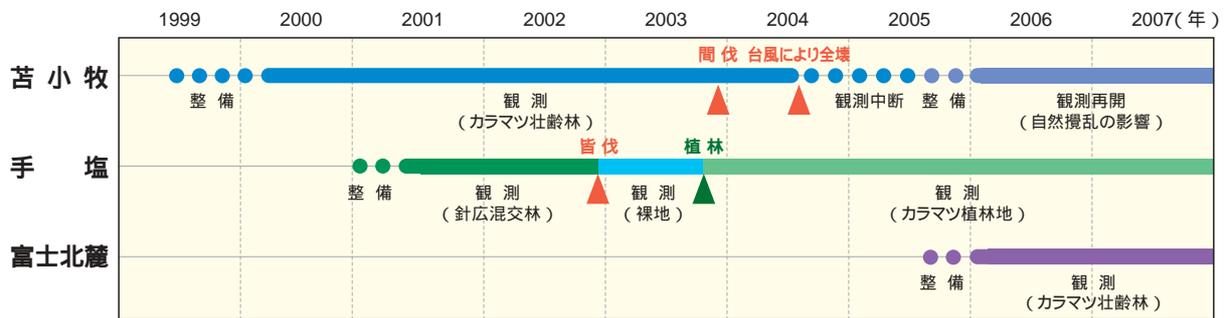
地球環境研究センターが推進する地球環境モニタリングプロジェクト課題「森林生態系炭素収支モニタリング」を基盤として、以下の観測研究が推進されてきました。

[モニタリングサイトの活動経緯]

1999年に国立環境研究所地球環境モニタリング事業として「北方林における温室効果ガスフラックスモニタリング」が採択され、翌年3月にかけてカラマツ林を対象とする観測サイトを北海道苫小牧国有林に整備し、同年7月から苫小牧カラマツ林(苫小牧フラックスリサーチサイト)での観測が始まりました。

次いで2001年、北海道大学・北海道電力(株)との共同研究を北大天塩研究林で行うことが決まり、5～6月に北大天塩研究林に観測サイト(天塩CC-LaGサイト)を整備、7月から森林生態系の炭素収支観測研究を開始しました(既存林;針広混交林)。さらに既存林を皆伐し(2002年12月～2003年3月)、カラマツ苗の植樹(2003年10月)を行い、再植林カラマツのCO₂フラックス観測をしています。

一方2004年9月、苫小牧サイトが台風により全壊したため、代替サイトとして富士北麓カラマツ林を選定(同年12月)、2005年10月より観測サイトの整備、2006年1月から観測を開始しました。なお、苫小牧サイトは観測規模を大きく縮小して観測を再開しています(2009年3月で終了予定)。



[関連研究の経緯]

1. 地球環境研究総合推進費B-3「アジアフラックスネットワークの確立による東アジア生態系の炭素固定量把握に関する研究」(2000～2002年度)
2. 地球環境保全等試験研究費(地球一括計上)「地域規模の二酸化炭素排出・吸収源評価方法の開発」(2001～2003年度)
3. 地球環境研究総合推進費S-1「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(2002～2006年度)
4. 科学研究補助金「台風18号による自然攪乱が北方森林の炭素交換量および蓄積量に与える影響の評価」(2005～2007年度)
5. 科学技術振興調整費「次世代アジアフラックスへの先導」(2005～2007年度)
6. 地球環境保全等試験研究費(地球一括計上)「アジア陸域炭素循環観測のための長期生態系モニタリングとデータのネットワーク化促進に関する研究」(2007～2011年度)

森林生態系炭素収支モニタリング研究は次のスタッフ、組織によって実施されました(所属は当時、敬称略)。

< 研究担当者 >

地球環境研究センター 藤沼 康実、小熊 宏之、梁 乃申、高橋 善幸、鳥山 敦、中路 達郎、武田 知巳、平田 竜一、犬飼 孔、油田さと子、郷司 尚之、井手 玲子、中台 利枝

客員研究員 文字 信貴、鯉谷 憲(大阪府立大学)、山本 晋、三枝 信子(産業総合技術研究所)、原園 芳信(農業環境技術研究所)、松浦陽次郎、中井裕一郎(森林総合研究所)(共同研究機関に所在する客員研究員を除く)

共同研究機関 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター・農学部・工学部、北海道電力株式会社総合研究所、信州大学、静岡大学、北海道環境科学研究センター

協力機関 林野庁北海道森林管理局、苫小牧市水道部、山梨県森林環境部、富士吉田市、富士吉田市外二ヶ村恩賜県有財産保護組合、環境省生物多様性センター



地球温暖化の最大の要因とされる大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度の上昇を、生物を含む環境のダイナミズムの視点から解明するには、陸域および海洋の生物圏での炭素の収支が重要です。とくに観測とモデル化が求められているのは、植物が光合成により大気中のCO₂を固定する一方、呼吸や生命維持のエネルギー源として有機物を利用する過程でCO₂を放出することによる、大気と生態系との間でのCO₂の移動量(CO₂フラックス)です。

本号は、地球規模でのCO₂フラックスに大きく寄与する森林での観測研究を取り上げています。森林のCO₂フラックスの観測が本格化したのは1990年代に入ってからです。国立環境研究所では、1999年から、多くの分野の専門家を結集して観測研究を開始しました。

CO₂フラックス観測では、植物(樹木)の生理・生態学的な特性の理解、さまざまな装置を用いる観測、季節や年変動の把握が不可欠です。本号で紹介されているように、対象とする森林の選定、観測法の開発、広大な自然を相手にすることへの対応など、バイオリア研究としての取組みが数多くなされてきました。

この研究分野は、地球上のさまざまな気候帯に多様な森林があるため、多くの国の研究者がネットワークを組んで進める必要があります。世界ではFLUXNETという組織がつくれ、アジア地域ではAsiaFluxが組織され、国立環境研究所はその運営に大きく関わってきました。今後とも、この分野の研究を国内外の多くの機関と協力しながら発展させたいと考えています。

2008年4月
理事長 大塚柳太郎

環境儀 No.28

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2008年4月30日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当WG: 横内 陽子、藤沼 康実、高橋 善幸、増井 利彦
植弘 崇嗣、岸部 和美)

発行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029(850)2343

(出版物の内容) // 広報・国際室 029(850)2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 (株)環境コミュニケーションズ

〒107-0052 東京都港区赤坂9-1-7

『環境儀』既刊の紹介

NO.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究	2001年 7月
NO.2	地球温暖化の影響と対策 — AIM：アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年 10月
NO.3	干潟・浅海域 — 生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
NO.4	熱帯林 — 持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
NO.5	VOC — 揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
NO.6	海の呼吸 — 北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年 10月
NO.7	バイオ・エコエンジニアリング — 開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
NO.8	黄砂研究最前線 — 科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
NO.9	湖沼のエコシステム — 持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
NO.10	オゾン層変動の機構解明 — 宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年 10月
NO.11	持続可能な交通への道 — 環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
NO.12	東アジアの広域大気汚染 — 国境を越える酸性雨	2004年 4月
NO.13	難分解性溶存有機物 — 湖沼環境研究の新展開	2004年 7月
NO.14	マテリアルフロー分析 — モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年 10月
NO.15	干潟の生態系 — その機能評価と類型化	2005年 1月
NO.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
NO.17	有機スズと生殖異常 — 海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	2005年 7月
NO.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年 10月
NO.19	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	2006年 1月
NO.20	地球環境保全に向けた国際合意をめざして — 温暖化対策における社会科学的アプローチ	2006年 4月
NO.21	中国の都市大気汚染と健康影響	2006年 7月
NO.22	微小粒子の健康影響 — アレルギーと循環機能	2006年 10月
NO.23	地球規模の海洋汚染 — 観測と実態	2007年 1月
NO.24	21世紀の廃棄物最終処分場 — 高規格最終処分システムの研究	2007年 4月
NO.25	環境知覚研究の勧め — 好ましい環境をめざして	2007年 7月
NO.26	成層圏オゾン層の行方 — 3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	2007年 10月
NO.27	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	2008年 1月

『環境儀』

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、『環境儀』という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。『環境儀』に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年 7月
合 志 陽

(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字N.I.E.Sで構成されています。
N=波(大気と水)、I=木(生命)、E・Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。

ロゴマーク全体が風を切って左側に進むように動かし、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。