



平成15年度（第12回）ブループラネット賞  
受賞者記念講演会

---

財団法人 旭硝子財団

**THE ASAHI GLASS FOUNDATION**

## 目次

---

受賞者紹介	
ジョン・E・ライケنز博士、F・ハーバート・ポーマン博士.....	1
記念講演	
「21世紀における環境問題への挑戦と自然への畏敬の念」.....	3
受賞者紹介	
ヴォー・クイー博士 .....	18
記念講演	
「環境保護一人々の苦しみを軽減し持続可能な開発に不可欠な条件」.....	20
ブループラネット賞 .....	27
旭硝子財団の概要 .....	29
役員・評議員 .....	30

# 受賞者紹介

ジーン・E・ライケンス博士（米国）

Dr. Gene E. Likens

生態系研究所理事長兼所長



F・ハーバート・ボーマン博士（米国）

Dr. F. Herbert Bormann

エール大学名誉教授

## 受賞業績

『小流域全体の水や化学成分を長期間測定して、生態系を総合的に解析する世界のモデルとなる新手法を確立した功績』

ジーン・E・ライケンス博士

### 略歴

1935 1月6日米国インディアナ州ピアストンで生れる  
1957 マンチェスター大学卒業  
1962 動物学で博士号取得（ウィスコンシン大学・マディソン校）  
1963 ダートマス大学 生物学講師、同年助教授  
1969 コーネル大学 生態学科準教授、  
1972～83 同大学 同学科 教授  
1983～93 ニューヨーク植物園副園長  
1983～ 生態系研究所 理事長兼所長  
1984～ エール大学生物学部教授  
1985～ ラトガーズ大学 Graduate Field of Ecology 教授  
1981 全米科学アカデミーのメンバーに選出される

### 主な受賞歴等

1993 Tyler Prize (with Dr. F. H. Bormann)  
1994 Australia Prize for Science and Technology  
2001 National Medal of Science

F・ハーバート・ボーマン博士

### 略歴

1922 3月24日米国ニューヨーク州ニューヨークで生れる  
1941 アイダホ大学入学 入隊のため中退  
1946 ラトガーズ大学に入学、1948年卒業  
1948 デューク大学入学、植物生態学で博士号取得（1952年）  
1952 エモリー大学助教授  
1956 ダートマス大学植物学科助教授、  
1962 同大学 同学科 教授  
1966～92 エール大学森林生態学部生態系生態学科教授  
1992～ 同大学 名誉教授 兼 上席研究員  
1973 全米科学アカデミーのメンバーに選出される

### 主な受賞歴等

1992 International St. Francis Prize for the Environment  
1993 Tyler Prize (with Dr. G. E. Likens)

現在まで40年にわたる「ハバード渓流域生態系の研究」(Hubbard Brook Ecosystem Study)は、ポーマン博士の着想から始まりました。1960年当時、ダートマス大学のポーマン博士は、ニューハンプシャー州ホワイトマウンテンの米国森林局ハバード渓流域実験林(HBEF)のロバート・ピアス博士(故人)に、「HBEFの渓流域を出入りする水の量とその中の栄養分を測定できれば、渓流域全体の栄養分収支を明確にできる」という考えを述べて、研究の構想を話し、ピアス博士から「素晴らしい考えだ」と励まされました。この単純ながらも広く応用できるモデルにより、小流域の試験から、森林の生態系と地球上の大きな生物地球化学的循環との関係を定量化することができるようになります。

陸水学が得意の若い科学者ライケنزが、61年秋にダートマス大学生物学部に加わり、彼の心からの賛同を得たので、ここに、森林生態学者のポーマン博士と水生生態学者のライケنز博士という素晴らしい組み合わせが誕生しました。

ライケنز博士が、地質学者のノイエ・ジョンソン博士(故人)に参加を求め、また、63年に米国科学財団から研究資金を受領できたので、本研究が始まったのです。こうして、60年代にポーマン、ライケنز、ピアス、ジョンソン4博士が、生態系と生物地球化学的研究とを推進するグループの中心として活躍しました。その後、絶えず研究成果をあげて、現在では60名を超える研究者が参加しており、これまでに1,200篇の論文が発表され、6冊の書籍が出版されています。

主要な研究成果を次にまとめますと、

本研究は、生態系の自然をそのままに、あるいは人為的な試験を加えて、系内の栄養物循環を総合的に評価する新たな方法を提供しました。

観察、実験、さらにコンピューターモデルに基づいて、広葉樹森林のバイオマス蓄積カーブを作成しました。この結果は、森林が二酸化炭素を吸収する速度を予測するのに役立っています。

小流域の研究から、大気汚染、木材伐採、氷害、気候変動が生態系に及ぼす影響を評価できることを明らかにしました。

森林伐採により、川の流量が大いに増大するばかりでなく、その栄養分濃度も伐採前の40~50倍にまで上昇すること、流れが伐採前に戻るまでにほぼ10年かかること等を明らかにしました。これらの結果は、森林管理に関して国レベルの大きな議論を引起しました。

北米の酸性雨の発見。

63年以来の連続的な降水の化学分析結果は、北米における化石燃料の使用と雨・雪の酸性度の増加との間につながりがあることを実証しました。この発見により酸性雨に関する世界で初めての国際シンポジウムが開催され、米国では90年に大気汚染防止法が改正されました。

また、酸性雨は森の土壌からカルシウムを溶出し、このカルシウムの溶出は土壌の養分を奪うので、森林と水生生態系を大きく傷める原因であることを明らかにしました。

また、両博士は、研究の当初から、セミナーや書籍の出版等により科学の成果を一般市民へ分かりやすく知らせ、政策へ反映されるように努めてきました。

## 21世紀における環境問題への挑戦と自然への畏敬の念

ジーン・E・ライケンス博士

F・ハーバート・ボーマン博士

序

2003年度ブループラネット賞受賞の榮譽に浴し、大変光栄に存じます。「私たちの惑星 = 地球を人為により引き起こされる崩壊から守り、未来の世代のためにすばらしい自然を持続させよう」という旭硝子財団の目標を表しているこの賞を頂くことは、生態系がどのように機能しているのか、また、人間活動が生態系、ひいては人間社会にどのような不利益をもたらすのか、という課題を40年にわたり研究してきた私たちにとって、ことのほか意味深いものです。

厳しい環境の宇宙を高速で飛行する衛星から見れば、青い惑星・地球は温和で穏やかなものに見えます。しかし、それは見た目だけのことであり、実際には、大気圏、水圏、地球圏、および生物圏の間で常時交換作用が行われ、惑星の表面は非常に動的なものなのです。あらゆる生命は直接、間接的に、太陽エネルギーによって引き起こされるこの交換作用に依存しています。そして、私たちの惑星が年月を重ね、究極の運命に向かって動いていくのにともない、長い時間をかけて、新しい条件に適応するよう進化を遂げているのです。(図1)

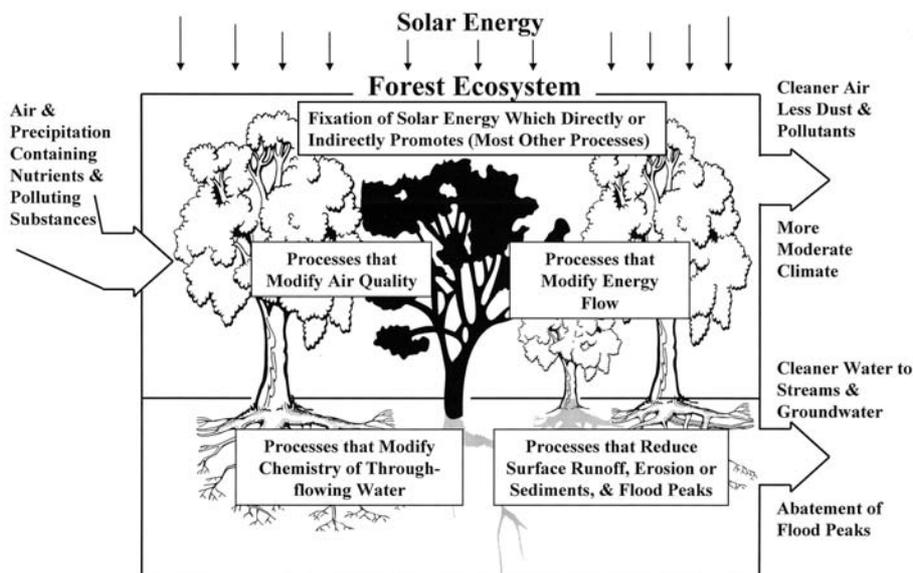


図1. 森林生態系が生態系の機能と生物地球化学的サイクルを調整するために利用する太陽エネルギー (Bormann 1985の一部変更)

人間社会は、狩猟・採集から宇宙旅行の時代へと発展する間に、大陸の氷河による浸食等の作用のような地球そのものを変化させる大きな力を持つに至りました。人口が増え、人類の保有する技術が増大していますが、これらは21世紀にはさらに加速するとみられます。人間活動の拡大にともなって、本来の自然が辺境に追いやられるにつれて、人間が作り出した新しい環境 すなわち人間社会のさらなる成長や、少なくともすべての人間が求める尊厳の維持が困難になる環境 に直面して、人間社会が崩壊するまで環境劣化はどのくらいの期間続くのだろうか、と、心ある人たち、学者、科学者、一般人、実業家、神学者、詩人たちは疑問を抱くようになりました。

成長の限界や持続可能なシステムという概念については、あらゆるところで論議されています。そこで出された考えを評価するためには、世界の自然系が、どのように機能しているのかについてのいっそう多くの情報が必要であることが明らかになりました。しかし、これは、科学のみにとどまらず、経済学、社会学、政治学を網羅しなければならない大変複雑な作業です。しかも、構成要素が一つ変わることによって、その影響が生態系全体に波及するシステムであることを、理解しなくてはなりません。世界が実際にどのように機能しているかを理解する際に、科学は「イエス」か「ノー」の答を出せるはずだという一般的な考えを応用するわけにはいかないのです。

ヴァーツラフ・ハヴェルは、これをさしてモダン・エイジ「近代」と呼んでいます。「近代」とは、人間が世界を支配するという人間中心主義の信仰の時代です。この信仰とは、世界は人間が把握できる限られた数の法則で支配され、自らの利益になるよう合理的に方向づけができる、とするものです。「近代」において科学技術の目指すところは、世界の普遍的な理論を見出すことであり、それによって、世界の繁栄を解明する普遍的な鍵を見つけることにあります。この枠組みでは、自然は、売買され、操作を加えられる商品とされており、このことによって、世界がいかに機能するかを最終的に支配する自然発生的なプロセスがどのような影響を受けるかについては、ほとんど配慮がなされていません。

「近代」は、化石燃料に閉じ込められていたエネルギーを利用する技術開発とともに始まりました。それまでの人類の歴史において、化石燃料によるエネルギーは、太陽エネルギーだけに依存していた人間を解放し、活動の範囲を飛躍的に広げました。人類にとって最上の時代と多くの人々がみなしているように、この「時代」に実現した人間の偉業は枚挙に暇がありません。科学技術の発展によって、18世紀には夢想だにできなかったことが次々と成功しました。世界のあらゆる場所に人間の驚くべき活動基盤が築かれ、医学や農業が目を見はる進歩をみせ、現在、産業革命の時代を経て、情報革命の時代へと推移しています。物質的な側面に限れば、多くの人々はこれまでになく質の高い生活を享受していると言えます。

このように人間に豊かな恩恵を与える一方で、この地球の環境を変化させ、地球上の数多くの生命の存在を脅かす力が出現してきました。人間の幸せという狭い視点から見ると、これは「近代」に対する自然のしっぺ返しであると考えられるでしょう。多くの人々は、今日の環境劣化のレベルでさえ、すでに人間の将来を脅かしていると懸念しています。

地球の過去にはなかったことですが、種の一つである人類が、この惑星の資源を独占して利用するようになりまし。その人類は今や63億人を超え、今後50年間ほどで80億人から100億人に達すると見込

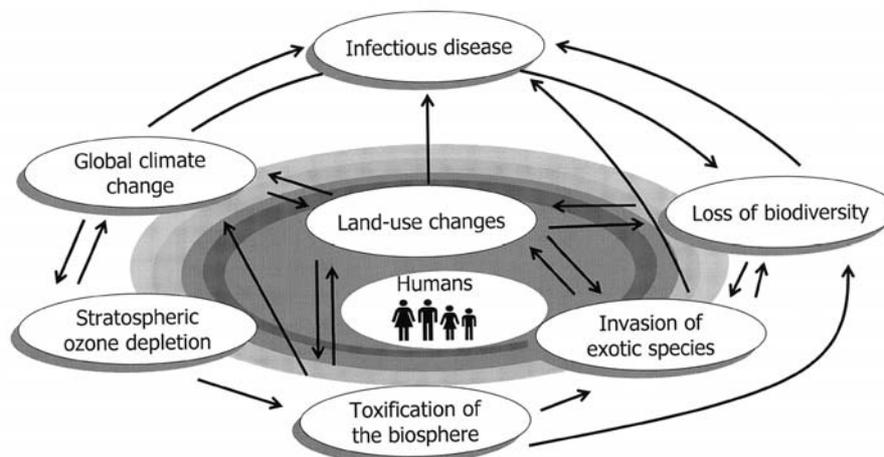


図2 . 人間が加速した環境変化における主要構成要素間の相互作用 (Likens 1994の一部変更)

まれています。これだけの数の人間が、どこで、水、きれいな空気、および滋養ある食糧を、適切な量だけ、しかも手頃な価格で手に入れられるのでしょうか。地球全体で人間の数が増え、活動や交流が増大していくときに、富、自然資源さらに生活の質はどのように配分されるのでしょうか。こうした疑問に応えるために、21世紀には主要な環境問題に進んで取り組まなければなりません。

人間が加速した環境劣化（図2）、例えば地球の気候変動、生物圏への毒性物質の拡散、感染症と外来種の蔓延、生物多様性の喪失、そしてとりわけ地球全域に広がる土地利用の変化が深刻なものとしてあげられます。これらが相互に関連し、また人口増加や人間活動の拡大にともなってその劣化が加速しているため、人間社会の存続も含めたあらゆる種の持続は、大変深刻な状況に陥っています。

自然界を構成する単位である生態系に関する研究は、生態系機能と環境問題およびその変化を見ていく上で、非常に重要な「視点」を提供しています。現在、（生物圏全体、地域、景観などに代表される）大規模な科学情報に対し大きな需要があります。それは、広範囲にわたる環境問題とその管理には、しばしば大規模な調査で得られた情報を応用する方が、より現実的であるからです。

1960年、F・ハーバート・ボーマン博士はロバート・S・ピアス博士宛の手紙の中で、生態系の機能ならびに大気圏、水圏と生態系との関わりを研究するために、小流域の生態系を対象とすることを提案しました。

そして、ジーン・E・ライケンス博士と植物生態学者であるボーマン博士が参加し、異分野の能力を持つ二人が加わってはじめて、小流域の研究手法が現実的に機能し得たのです。

水生生態学者であるライケンス博士は、生態系研究の経験と精力的に活動するエネルギーにより、複雑で多領域に跨る研究を如何に進めるかについて、洞察し発展させました。

40年前、自然の景観の研究をするために、私たちは小流域の生態系を対象として研究を開始しました。この研究では、大気圏、地圏、あるいは流域の生態系さらには水圏の間の関連性を直接的に測定できました。

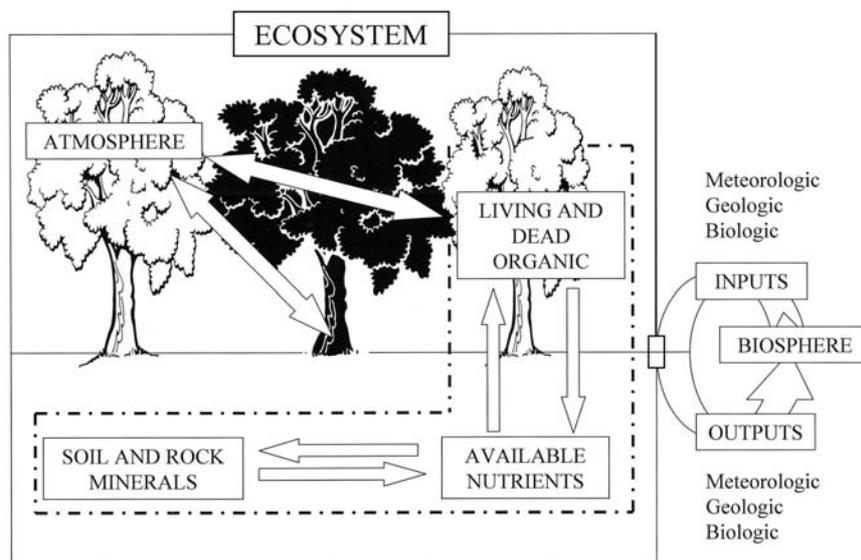


図3. 陸生生態系における栄養素の相関。生態系への流入と流出は気象学的、地質学的な力、および生物学的媒介で生じる（Bormann and Likens 1967; Likens and Bormann 1972）。生態系内における主たる蓄積場所と交換経路を示した。栄養素は、ガス相ではあまり存在しないことから、生態系の境界内において、利用可能な栄養素間、生きているあるいは死んでいる生物間、そして一次及び二次鉱物成分間を絶えず循環する等、システム内で循環を形成する傾向がある。生態系の境界を越える流れは、個々の生態系を周りの生物圏と結びつけている。（Bormann and Likens 1967を一部変更）

このことから、生物圏がこれらの関係にどのような影響を及ぼしたのかを評価できました。空気と水の質、森林の成長と持続性、および複雑な自然の景観の中で、生態系の構造と機能に関する重要な疑問に対して答を得ることは困難なことです。流域の生態系を研究する手法は、このような問題に取り組む重要な「切り口」になると信じていました。

この難問に対して、まず何か類似のものに例える手法により対処することにしました。ちょうど医師が患者の血液や尿の化学的性質を測定して診断するように、流域から流出する水に含有される化学物質を利用できるのではないかと考えたのです。そのためには、流域の生態系に入ってくるあらゆる化学物質を、同時に、かつ定量的に分析する必要がありました（図3）。

このような流入・流出の測定により、その生態系の栄養収支（質量収支）を算出することができました。そこで、科学では実験が強力な道具なので、流域規模での実験をいくつか組み合わせて、流域およびその景観の環境に関するいろいろな疑問について定量的に検討することができました。この流域研究手法を用いて、ハバード渓流域生態系の研究を開始したのです。

自然に生じた小規模（12haから40ha）な森林生態系への流入物を測定することによって、大気が、雨、雪、粒子状物質、ガスおよびそれに伴う化学物質の流入を通して、森林とそれに連結する流水の生態系に如何に影響を与えているかを知りました。大気が、遠く離れた場所での人間活動から発生する汚染物質を帯びていることを、早くから認識したため、私たちのこの研究の結果は非常に重要なものとなりました。

流出する流水中の物質を、化学的・水文学的に測定することによって、流域の生態系を通過する水が生態系によってどのように変化するのか、また反対に、生態系がどのように変化するのかを特定することができました。流出水の分析は、人体の血液や尿の分析のように、生態系の「健康」を示す尺度になり、この測定により生態系の基本的な機能について詳細を知ることができました。流出水はその地方と地域の水圏に連結していることから、流出水を測定することにより、地方の生態系の管理状況が、それに繋がる地域の生態系に及ぼす影響を評価することができました。排出されるガスは、地球規模の大気の循環と連結しています。大気圏、水圏、生物圏を結び付け、これらを生態系管理へと総合的に取り扱うことにより、地方、地域、および地球規模での計画とその開発を考えることができました。この手法の価値について、1967年に初めて発表した科学論文の中で次のように説明しました。

「...イオンが風化作用（岩石鉱物の崩壊）により放出される速度は、生態系からの正味の損失速度に、生物相と枯れ木、枯葉のような有機残留物中に蓄積される正味速度を加えたものと等しいはずです。」...「したがって、環境が乱されていない、比較的安定した陸生の生態系からのイオンの正味損失量は、その生態系における風化量の目安となります。」

「人間の活動によって損失が加速すれば、もっと具体的に言えば、人間活動によってある地方の循環パターンが阻害されれば、その地方の生態系のある要素は、系内での「蓄積」が減少するので、その結果その生態系での生産性が抑えられ、ひいては人口を抑制します。」

## ハバード渓流域生態系の研究の主要な調査結果

ハバード渓流域生態系の長期にわたる研究から、驚くほどではないにしても、非常に興味ある成果を数多く得ました。その内のいくつかを列挙します。

小流域の調査方法と、ハバード渓流域生態系の研究のために開発した測定方法とを用いて、環境が乱されていない北部広葉樹林生態系における流入 - 流出収支を定量化しました。流入物が流入することによって、近隣や遠隔地に存在する森林の内部機能が、この流入物の影響を受けることを実証しました。この生態系からの流出物は、大気や水の流れを通して結び付いている無数の近隣や遠隔地の生態系からみれば流入となり、また、森林が、それと結び付いている水生生態系と大気に、影響を及ぼすことを明らかにしました。森林の皆伐という実験的な環境攪乱によって、一連の生態系プロセスに変化を生じさせたところ、生態系

がこの攪乱に対して応答することがわかりました。まず、生態系からの流出物に対して生物的なコントロールが失われ、伐採後の時間が経過するにともない、この生物的なコントロールが徐々に回復しました。森林伐採による生態系への重要な影響は、蒸散量（木の葉からの蒸発）が極端に減少したことであり、蒸発する水への変化、水蒸気としての損失、表流水、土壌中の水分減少、激流の増加など、水文学的な記録についてとても考えられないような変化を伴ったことです。予測通り水文学的データばかりでなく、微生物の活動へも大きな影響が見られたことは大きな発見でした。微生物による分解、特に硝酸化プロセスの加速により、水素イオンと硝酸塩イオンが大量に発生し、その結果、流出水中へ栄養物が極めて多く流れ込みました。樹木を伐採し、強制的に植生を消失させることにより、この系は時間の経過とともに侵食されやすくなりました。その他にも、厳しい土壌凍結や氷雪の嵐による被害など、気象の変化により、流域の生態系から水流へと硝酸塩の損失が進みます。このように北部広葉樹林生態系の構造、機能、成長について私たちが行った実験と理論的考察に基づき、森林伐採と森林を長期的に管理するための議定書が作成されました。

北米における「酸性雨」は、ハバード渓流域実験林で発見され、それは酸性（pH 5.2未満）の雨、雪、みぞれ、あられ、霧、雲の水分と、酸性にする力を持つガスおよび粒子が直接地表に降下したもの（アシッド・デポジション）であることがわかりました。現在ではアシッド・デポジションが、ヨーロッパやアジアを含む世界の広範な地域で大きな環境問題になっていると認識されています。ハバード渓流域実験林での長期データにより、アシッド・デポジションが及ぼす生態系への影響がよく理解されるようになりました。後に、この重大な環境問題に対する、政治上の解決策立案に役立つ情報を提供することになります。その一つが、米国で初めて酸性雨を規制することになった大気汚染防止法1990年修正案の成立のために必要とされた情報でした。

アシッド・デポジションのため、カルシウムその他の植物栄養素が、ハバード渓流域実験林の土壌から著しく溶出していました。土壌中の交換性カルシウム層は、アシッド・デポジションによって、過去50年間に半分も消失してしまいました。この栄養素が流出して、土壌の酸を中和する能力が低下した結果、現在の米国東北部の森林生態系は、以前考えられていたよりも、アシッド・デポジションの影響を受けやすくなっています。

観察とコンピューターシミュレーションに基づき、北部広葉樹林におけるバイオマス（生物生産量）蓄積モデルを作成しました。当時の他のモデルとは対照的に、このモデルは、森林伐採・皆伐を行うと、バイオマスが一度大量に失われ、その後、再び蓄積されることを示しました。このモデルを使って、北部広葉樹林の生態系について伐採等による攪乱、成長、定常状態期の動的挙動の経年変化を、実際と理論の両面から記述しました。

幅広く、多岐にわたる実験の結果から、流水生態系は、入ってきたものをそのまま通してしまう「テフロン・パイプ」のように機能するのではないことがわかりました。生態系は栄養素を摂取し、栄養素と有機物の加工処理を活発に行う場所なのです。溶質を流水にパルス状に短時間に添加しても、下流にいくまでに溶質濃度は急速にパルス状ではなくなります。この流入する溶質濃度の変動が減衰していく現象は、流水に存在する栄養素と有機物を保持し、加工処理する作用の結果であり、こうして小流域から溶質の正味の損失量が減少するのです。

私たちの同僚が開発したコンピューター・シミュレーションモデルを、ハバード渓流域生態系の研究の一部では、重要な研究・予測手段として応用しました。JABOWAモデルは森林成長シミュレーターであり、数多くの後発モデルの先鞭をつけたものです。森林の水文学をシミュレートし調査するために、BROOKモデルを開発しました。ALCHEMI、CHESS、およびPnET-CBCは、いずれもハバード渓流域生態系の研究や他所の研究でも、重要な生物地球化学的な研究手段となっています。

ハバード渓流域生態系の研究では、土地利用の変化により、相互に関連する水文学的生態系が、環境面で

大きな影響を受けることが実証されました。1969年から71年にかけて、ハバード渓谷にある、ミラー湖流域を貫通する州間ハイウェイが建設されました。その後、冬期に路上の雪と氷を溶かすために、この道路に大量の食塩（NaCl）が散布されるようになり、この付近の排水流と湖水中の塩分が、大幅にかつ継続して増大する結果を招くこととなりました。（現在、塩化物濃度は、排水流とミラー湖においてそれぞれ道路建設前の20倍、4倍に増加しています。）1千万トンもの食塩が冬期に米国内の道路に散布されるのですから、路上にまかれた塩分により関連する水生生態系の環境が受ける影響を、定量的に示すことは非常に意味深いことです。

ハバード渓流域実験林における長期測定で、特に実験的に人為操作を加えた系では、複雑な後遺症が長期間にわたり継続するという結果を得たことは、極めて意味のあることでした。一つの攪乱が一連の条件やその後に辿っていく軌跡を誘導するので、生態系のプロセスを総合的に見れば、それぞれの事象は、過去の事象の影響を受け、いくつかの先行した事象に積み重なっています。ハバード渓流域生態系の研究の長期間におよぶ生態学と生物地球化学のデータは、そのような後遺症の解明とともに、危機的問題の調査、予想を超えた事象の識別、新しい研究課題の設定、環境変化の検知、および意志決定者が必要とする知識について、継続して貴重な資料を提供してきました。ハバード渓流域実験林における生態学と生物地球化学上の長期間の記録は、毎年、新しい記録が積み重ねられることによって、さらにその真の価値を増しています。私たちの長期研究の例としては次のようなものがあります。

- 米国における有鉛燃料の排除にともなう鉛の排出量の低下は、降水中、およびハバード渓流域実験林の林床中の両方の鉛濃度が著しく減少したことと相関がありました。これらのデータの助けにより、米国における有鉛ガソリンの使用規制の効果を確認することができました。
- 不思議なことに、ハバード渓流域実験林における森林バイオマスの正味の蓄積が、1982年以来止まっています。これは酸性雨の複雑な影響の結果でしょうか。北部広葉樹林の生態系が成長しないということは、米国北部の森林帯の持続性とその伐採について深刻な意味を持つこととなります。この重要な疑問は目下進行中の大々的な調査のテーマとなっています。
- ミラー湖の長期間の冬季調査により、氷により被覆される期間が年ごとにかなり短縮していることが判明しました。この氷結期間の短縮は、地球の気候変動の明快な判定基準の一つとなります。
- 森林地帯の流水に枯れ木などで自然に形成された池は、流水生態系や生物地球化学上の特性に大きな影響を与えています。森林伐採による環境攪乱が原因となって、一度源流付近で自然形成された池が無くなると、それを回復するのに100年以上の歳月を要することがわかりました。
- 森林生態系において、皆伐後に安定状態へ復元する速度に関する初期モデルには、流域生態系から流出する水流中の溶質の測定値が含まれていました。硝酸、カルシウム、カリウムのようなイオンには、伐採後2年目に最大の正味損失ピークが見られました。その後、植生回復につれて水流による損失は少なくなり、溶解化学物質の正味損失は、それぞれのイオンに特有の速さで伐採前のレベル近くまでもどりました。森林伐採による生態系への影響を理解するためにも、また、将来の森林管理戦略を立案するためにも、これらのデータは明快で十分な情報を提供しています。しかし、ハバード渓流域実験林内で実施したこの試験的皆伐から何十年も経過した現在も、程度の差はあるものの、水流中のカルシウムなどいくつかの成分濃度に差異がみられます。長期間にわたり水中成分の収支分析から得た知見では、1965～66年の伐採の後遺症が、2003年の現在も生態系の機能に影響を及ぼしていることがうかがえます。

ハバード渓流域実験林での長年にわたる調査研究には、鳥の個体数とその動態調査、生態学の研究、流水・湖水生態系の生物地球化学的・水文学的研究[[www.hubbardbrook.org/research/current/projects/streams/stream](http://www.hubbardbrook.org/research/current/projects/streams/stream)]

\_99.htm参照]、および北部広葉樹林生態系のパターンとプロセス、実験生態系（サンド・ボックス “ Sand Box”）の研究などを含む多数の研究がありますが、それぞれの結果についてはここでは述べません。

## ハバード渓流域生態系の研究の運営管理

ハバード渓流域生態系の研究のような複雑な研究を、長期間継続するにあたっては、科学知識だけではなく、それ以外の要素も高い割合を占めます。40年という長期にわたって、高い研究成果を上げ、一貫性を持続させるためには、次のような特徴ある運営管理と明確な目標の設定が重要でした。

- (1) 研究に着手する時点で、研究と生態系の解析の指導指針となる概念的な生物地球化学モデル（図3）を設定し、一貫してそのモデルを使用しました。
- (2) 生態系を構成する要素（部分）に焦点をあてる帰納法的なアプローチではなく、系全体（生態系）を理解するように研究チーム内部で強く働きかけ、お互い納得しました。(3) 研究成果をまとめ、できるだけ早期に総合的な報告書を作成しました（[www.hubbardbrook.org/research/pubs/hbrbib.htm](http://www.hubbardbrook.org/research/pubs/hbrbib.htm)参照）。(4) 資金を途絶えることなく調達することは多くの場合困難ですが、長期研究の意識を持ち続けました。(5) 私たちの科学者チームに加わるように、多様な専門領域から優れた人材を勧誘しました。(6) ハバード渓流域実験林に住み込み、互いに協力して多くの時間を費やしてくれる献身的な研究者を得て、テーマを絞った小規模な研究チームを維持しました。(7) 新しい分析方法を開発した場合でも、新方法と「従来方法」を平行使用し、それぞれの結果を照合・比較してから初めて変更を加えるか、新しい方法に置き換えました。この手順により、長期データの中に「間違いの結果」が入り込むことを避けることができ、また、いかなる変更も注意深く記録しました。

私たちの研究が成功した主要因は、科学研究にこのような運営方法を取り入れたためであると確信しています。ハバード渓流域生態系の研究の実施と管理についてのさらなる詳細は、最初に発行した2冊の総合報告書の序に記してあります。

Likens, G.E., F.H.Bormann, R.S.Pierce, J.S.Eaton and N.M.Johnson. 1977. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag, New York Inc. 146 pp.

Bormann, F.H. and G.E.Likens. 1979. Pattern and Process in a Forested Ecosystem. Springer-Verlag New York Inc. 253 pp.

## 長期研究

長期データは、酸性雨、森林伐採、氷雪の嵐、小流域での実験のための人為的な操作などに対して、生物地球化学的な反応や、回復がどのように進むのかを評価するために活用できます。このような長期記録は、生物地球化学的な反応の方向を見だし、さらに生態系の構造や機能に現われる複雑な変化を理解するのに極めて重要です。これらの定性的かつ定量的な記録は、環境問題を理解し、その解決に携わる政策決定者に対して証拠となる情報を提供します。

長期研究のうち、3件の例について少し詳しく説明します。

## 酸性雨

酸性雨（酸性になった雨、雪、みぞれ、あられ、雲と霧、そして酸性にする力を持つガスおよび粒子状物質等の大気中での降下物）の第一の発生源は、二酸化硫黄（ $\text{SO}_2$ ）、窒素酸化物（ $\text{NO}_x$ ）および粒子状物質を大気中に放出する化石燃料の燃焼です。 $\text{SO}_2$ と $\text{NO}_x$ は大気中でそれぞれ硫酸と硝酸に変化しますが、ガスそのものとして、また酸性にする力を持つ粒子状物質と共に、地表に戻ってきます。これらの物質が、陸生と水生の生態系の一部を酸性にし、結果的に種の喪失、カルシウムなどの栄養素の加速的な流出を引き起こします。酸性雨は、比較的最近になって問題視されるようになった環境問題ですが、現在では世界中に広まっ

ており、特に北米東部、北西ヨーロッパ、東南アジアの各地で深刻な問題となっています。

ハバード渓流域実験林で1963年6月に初めて採取した雨の標本から、その雨が酸性であることを知ったのですが、その後、その発生原因とそれが広範囲に生じている特性を見出すまで数年かかりました。酸性雨は、人間が世界の多様な生態系に押し付けている壮大な実験であると言えます。

産業革命以降の米国では、化石燃料の燃焼が増加するにともない、 $\text{SO}_2$ と $\text{NO}_x$ の排出が増加しました。最近、連邦政府の規制により、米国内の $\text{SO}_2$ と微小粒子の大気への排出は減少しました。対照的に、 $\text{NO}_x$ の排出は規制がほとんどないこともあって増大しています(図4)。

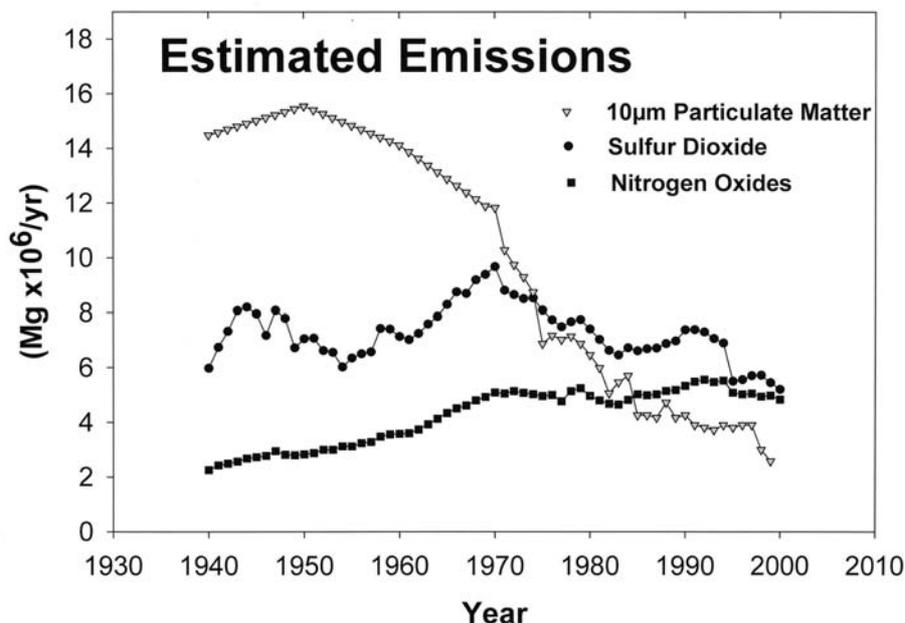


図4 . ハバード渓流域実験林の周辺発生源から排出される二酸化硫黄、窒素酸化物、粒子状物質(直径10 µ m)の長期的な傾向 (Butler et al. 2001; Likens et al. 2001の更新)

ハバード渓流域実験林の降水中の主要な酸は、1963年以来硫酸でしたが、今後10年程度経つと硝酸が中心的になると見込まれます。この変化は、それを受ける生態系に重要な、生態学的、生物地球化学的な影響をもたらすものと予想されます。

米国において、排出量と排出ガスの組成は、エネルギー需要の変化ならびに連邦政府や州の対応如何によって、今後も変化し続けることは疑いないでしょう。1960年代半ば以降の立法作業にかけたコストと苦悩を考えると、酸性雨と、今や酸性雨に対して過敏になっている森林や水生生態系に対して、法律の制定がどのような効果を発揮しているのかを評価することが重要です。

アシッド・デポジションの原因や分布、さらにそれが及ぼす影響については、1972年に北米におけるこの問題を確認したことを発表して以来、30年にわたって北米で精力的に研究され、議論が行われてきました。

粒子状物質の排出削減を主たる目的として、1970年に米国において大気汚染を抑制する連邦政府の規制が、強化、拡充されましたが、大気汚染防止法の1990年改正(CAAA)は、酸性雨問題に直接焦点をあてた、国家としての立法措置の最初のものでした。1995年まで $\text{SO}_2$ 排出は目立って減少することはありませんでしたが、この年に大気汚染防止法の第1段階が施行されるに及んで、米国内の排出量は、同法が目指す全削減目標の40%相当分減少しました。

ハバード渓流域実験林における長期データに見られる極めて重要な成果は、排気ガス( $\text{SO}_2$ )と降水中に

溶けた硫酸塩の濃度との関係を明確にできたことです。この論争を呼ぶ問題は、1980年代に、長期にわたるデータがないまま全米で議論されました。私たちは、降水と渓流水中の硫酸塩濃度が、ハバード渓流域実験林の風上にある発生源からのSO<sub>2</sub>排出量と、密接に関連していることを発見しました（図5）。

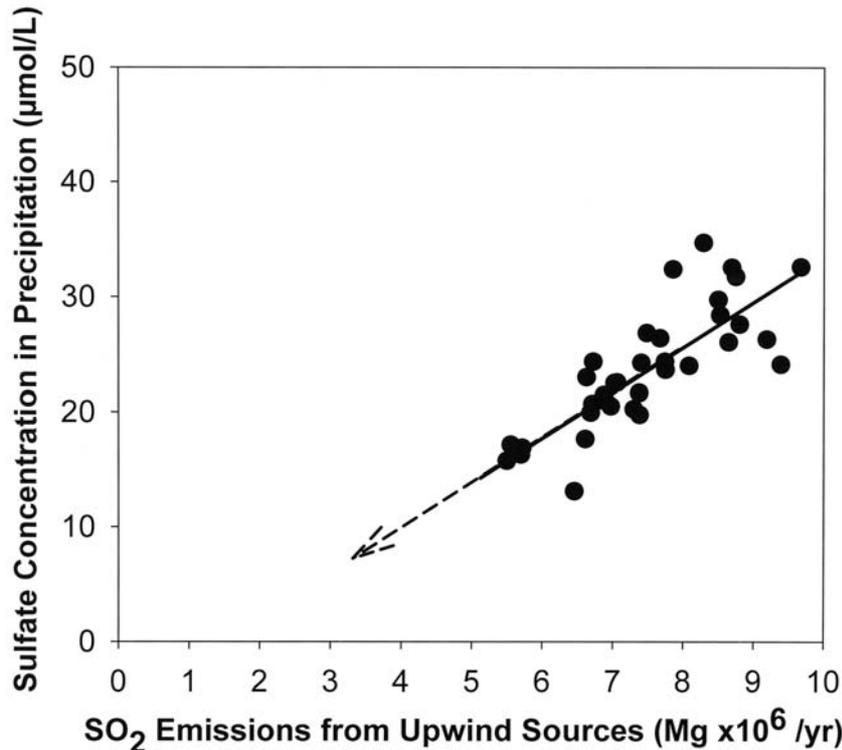


図5 . 二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) の年間排出量と、ハバード渓流域実験林における降水中の硫酸塩 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 濃度との対比 (Likens et al. 2001の更新)。

大気中で生ずる硝酸塩（酸性雨をもたらすもう一つの陰イオン）も、NO<sub>x</sub>の排出量と相関関係にあります。さらに、ハバード渓流域実験林で観察された、渓流水中の硫酸塩の濃度の低下と、渓流水中の塩基性陽イオン（カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウム）の減少には、強い相関関係（r<sup>2</sup>=0.76）がみられます。塩基性陽イオンは、ハバード渓流域実験林の生態系の酸中和能力やアルカリ度を制御するので、これは重要な発見です。

長期にわたる研究の結果から、大気汚染に関する政策と、連邦政府の法律立案に必要な知識基盤が大幅に進展しました。例えば、

連邦政府による法律施行の結果、二酸化硫黄SO<sub>2</sub>の排出量の変化は、ハバード渓流域実験林における降水と渓流水中の硫酸塩濃度変化と、線形の関係にあります。したがって、SO<sub>2</sub>排出量の減少は、環境を酸性にする硫酸塩の生成を直接的に減少させるでしょう。

ハバード渓流域実験林において、降水の酸性度が低下したことを実証するためには、18年間にわたる継続的研究が必要でした（図6）。

ハバード渓流域実験林における降水中の水素イオン濃度は、1960年代半ばの約90 μ eq H<sup>+</sup>/リットルから、1980年代後期の55 μ eq H<sup>+</sup>/リットルに減少しました。しかし、現在の数値でも、依然として、降水が汚染されない場合（約5 μ eq H<sup>+</sup>/リットル）と比較して、酸性度が8倍も高いものです。

ハバード渓流域実験林の降水中では硝酸が主要な成分になってきており、今後、SO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>の排出が現在以上に規制されることがなければ、2010～2015年には、硝酸が降水中の支配的な酸になると予測され

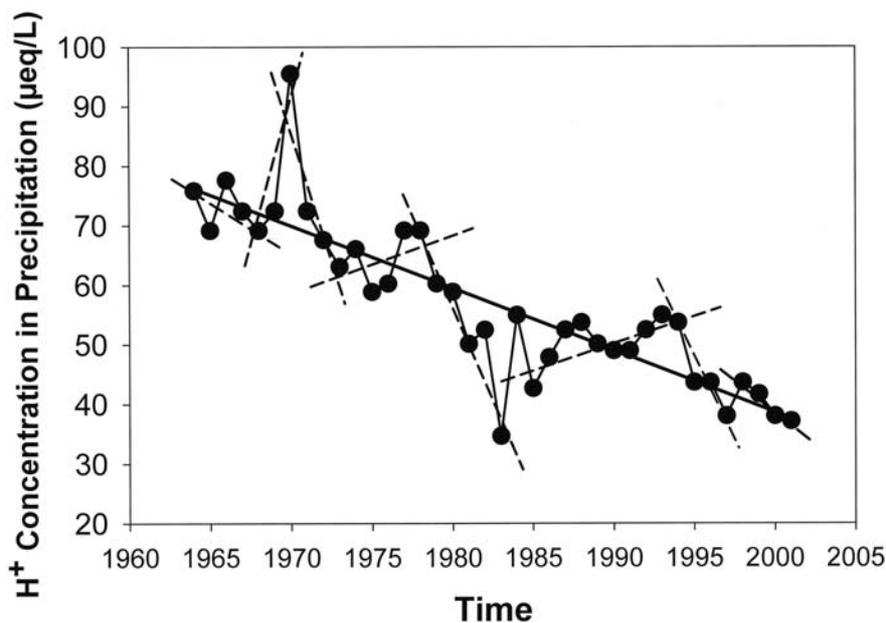


図6 . ハバード渓流域実験林における降水中の水素イオン濃度の長期的変化

ます。

アシッド・デポジションによって、カルシウムとその他の植物栄養素が、ハバード渓流域実験林の土壌から目立って減少してきています。

- アシッド・デポジションによって、土壌中の交換性カルシウム含有量は、過去50年間に半分も消失してしまいました。この消失のため、生態系の生物学的生産性が損なわれることも考えられます。
- 土壌の酸に対する緩衝能力がこのように低下した結果、森林生態系は、以前に考えられていたよりは、ずっとアシッド・デポジションの影響を受け易くなっています。

ハバード渓流域実験林は、降水中の化学物質について長期の良質なデータが記録され、主要な発生源の「風下」に立地し、地元大きな汚染発生源がないことなどの理由から、米国東部の大気汚染物質の重要な監視場所となっています。

ハバード渓流域実験林において、生態系に対するアシッド・デポジションの長期的影響を実験的に検証するため、流域全域に、人為的な操作を加えることに着手しました。1998年、ニューヨーク州アディロンダック山脈 (Adirondack mountains) から、天然のケイ酸カルシウム鉱石 (珪灰石) を採掘し、粉碎、ペレット化して、ハバード流域実験林の流域生態系にヘリコプターで投下しました。この操作では、過去50年間に生態系から減少したと推定されるカルシウム量と同じ量を投下しました。渓流水と土壌の化学物質、樹木の生育、動物の個体数、微生物活動およびその他の生態系の構造と機能に関わる側面に対して、実験としてのこの人為操作が及ぼす効果について、向こう50年以上にわたって研究する予定です。

#### 伐採などの森林環境への攪乱が流域規模の生態系の動態へ及ぼす影響

流域全体に対する実験的人為操作は、ハバード渓流域生態系の研究にとって有力な解析手段となっています。同僚のW・ルイスは、「流域での操作は、今日でこそ生物地球化学者の研究手法の中で、標準的な地位を占めるようになってきていますが、1960年代には、押し付けがましい、恐らくは、やりすぎとさえ見なされました。周知のように、(実験的)人為操作は、発見のスピードを大きく加速させます。これがハバード渓流域生態系の研究が成功した秘訣の一つです。」と発言しています。隣接する流域をデータ比較の対象

として、これほど大規模な実験的人為操作を長期にわたって遂行できたのは、確かにハバード渓流域生態系の研究が成功した要因の一つであり、科学者冥利に尽きるものでした。

森林伐採が引き金となって環境条件が変化し、その変化と相互に関連しながら、生態系の働きに驚くほど次々と変化が生じることを発見しました（図7）。

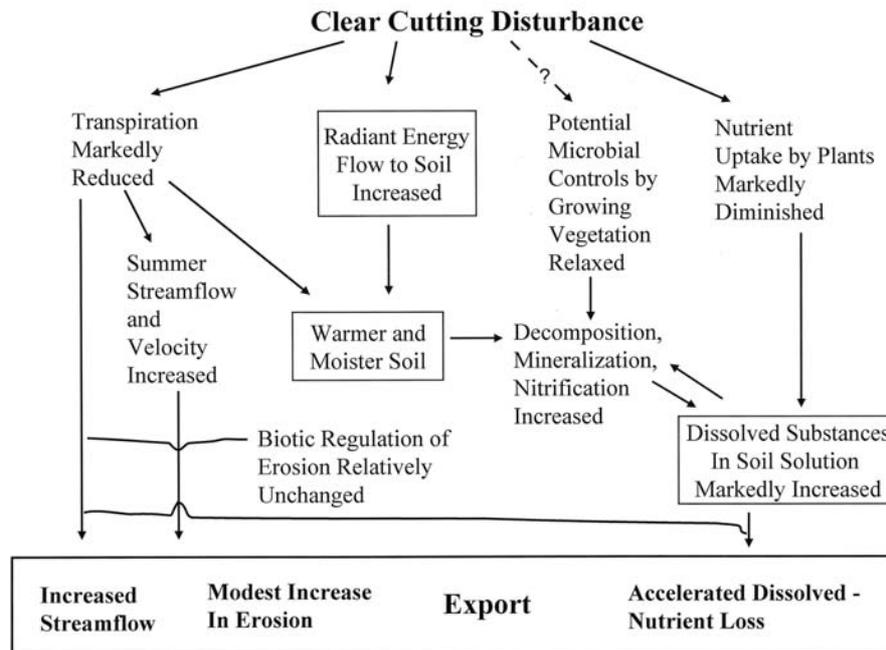


図7 . 北部広葉樹林生態系での伐採後2年間の水文学的、生物学的な応答。伐採プロセスの間、浸食による土壌の損傷はほとんどみられない。線で囲われた四角内にある応答は、攪乱が実施された後、生態系内にある資源利用の可能性が目立って増加したことを示す。（Bormann and Likens 1979の一部変更）

流域2は1965～66年にかけて森林伐採されました。伐採された樹木はすべて伐採現場に放置され、1966年、1967年、1968年の夏期には、除草剤が播かれました。この実験的操作の結果、分解、鉱化作用、硝酸化作用などの微生物が主体となる働きが加速し、蒸発水の大気への散逸を担う生態系の働き（葉から蒸発する蒸散）は目立って減速しました。手を加えない以前の森の中では蒸散していた水が、液体の水となったため、溪流の流量は大幅に増加し、生態系から流出していきました。以前には樹木により途中で遮られ、一部が大気へと逆反射されていた太陽光エネルギーは、林床まで到達して土壌を温めました。微生物の活動が増加したことに加え、伐採されて樹木による摂取量が大きく減少したことから、土壌の水分中に溶解した物質（栄養素）の濃度は激増しました。北部広葉樹林の生態系において、実験的な皆伐が引き金となった相互作用は、生態系の働きが複雑なことを示しています。この生態系のもつ複雑さについては、各々の実験において、一つの疑問に答が得られると、新たに二つまたはそれ以上の疑問が生まれることからますます深く実感しています。

### 気候変動の影響

現在、環境科学のなかで最も深刻な問題の一つが、地球規模の気候変動の速度とその影響を、どのように判定するかという点です。特に私たちの場合、ハバード渓流域実験林でも気候が変化しているのだろうか、もしそうだとすると、気候変動による生態系の構造と機能への影響はどのようなものだろうか、という疑問が生じます。

湖水の熱収支の変動は、気候の長期的変化を反映します。湖面が氷で覆われる期間は、北部温帯に存在する湖の年間熱収支の重要な要素であることから、その期間の変化を、気候変動の重要な尺度として利用することができます。ミラー湖に関しては、1968年以降、氷の「IN」と「OUT」の日付を記録した信頼性の高いデータがあります。このデータの誤差は、「IN」の日付で±2日、「OUT」の日付で±1日です。したがって、ミラー湖の記録は、期間の長さや質において、極めて稀で優れたものです。ミラー湖が氷で覆われる期間は、過去36年間に年間約0.5日 ( $p < 0.016$ ) という速度で短くなっており、現在では、湖面が氷で覆われる日数は、1967年当時の日数より19日ほど少なくなりました(図8)。

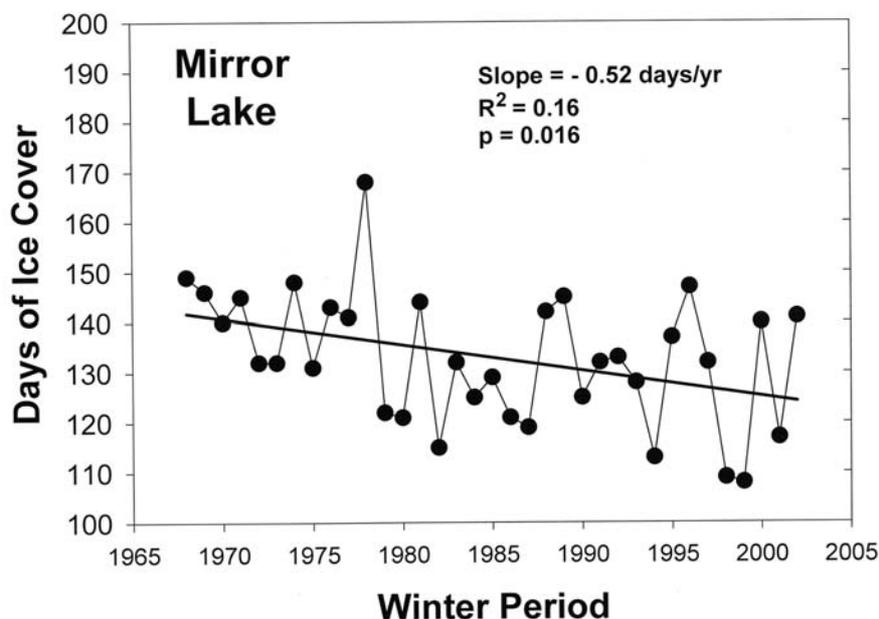


図8 . 1967年以降のミラー湖の年間氷結期間 (Likens 1999を更新)

ミラー湖の湖面が氷で覆われる日数のこの減少傾向は、氷が解ける時期が早まった(「OUT」の日付の早期化)結果であり、これは過去36年間のハバード渓流域における春の気温の上昇と、春の曇り日数の増加とに相関関係があります。

ミラー湖の氷結日数の長年にわたる記録は、地球の気候変動を議論する上で重要な資料となり、私たちの地域が確実に温暖化の過程にあることの証左となります。湖水の氷結日数の減少は、世界の他の湖でも観測されてきています。ハバード渓谷で現在研究中の重要な課題は、気候変動が地方の水生と陸生の生態系にもたらす生物学的な影響です。

### ハバード渓流域生態系の研究の今後

未来を予測することは、不可能とは言わないまでも極めて難しく、まして現在のような不確実性の時代には、その困難の度合いも高まります。それでも、長期間にわたる化学物質の記録と水文学的な記録、ならびにハバード渓流域実験林において、米国農務省森林局から提供された堅固な調査研究施設は、ハバード渓流域生態系の研究プロジェクトにおいて、研究と研究員を引き付ける磁石でしたし、今後も同様であろうと思われれます。生態系の構造とその機能、あるいは生物地球化学的な研究において、興奮するような課題や研究の機会に事欠くことはありません。私たちが過去40年間取り組んできたいくつかの生物地球化学的な難しい問題には、今後も引き続き取り組んでいくつもりです。窒素サイクルの動態(大気中窒素の固定、脱窒および生態系内での保持)、風化作用の詳細な研究、アシッド・デポジションの影響、その他新たに生じる疑

表1 . 今後の生物地球化学的研究の主要課題 (Likens 2003の一部変更)

1. What are the specific effects and relationships of the increasing size of the human population on the biogeochemical flux and cycling of elements, and the effects of forcing functions often incongruent in space and time?
2. What controls fluxes of N and P to and from natural and human-dominated (cities, agricultural) ecosystems?
3. What is and what controls C sequestration in diverse ecosystems (e.g. forest, ocean, lakes, wetlands) on variable temporal and spatial scales?
4. What controls weathering rates, and what are the fates of the weathered products, including nutrient loss in terrestrial ecosystems?
5. What are the quantitative interrelationships between hydrology, ecology and biogeochemistry?
6. How can a better synoptic understanding of the biogeochemical flux, cycling and interaction of elements among air, land and water (including ocean) systems be achieved?
7. What are the critical linkages and feedbacks among major nutrient and toxic element fluxes and cycles?

問(表1)などが今後も研究していく項目です。何十人もの上級科学者、学生、技術者が、ハバード渓流域実験林で毎年研究をしています。

今後少なくとも40年は、これまで同様研究を継続し、科学と社会にとって非常に重要なのに解明されていない疑問、そして長期のデータから、あるいはこの極めて貴重な渓谷に対する新たな攪乱から生じる疑問に答えようと駆り立てられるでしょう。

### 自然に対する畏敬の念

地球上のどこにおいても、いかなる文化や民族にあっても、全員ではないにしても多くの人の気持ちの中に、自然への深い畏敬の念があります。この畏敬の念は、自然の美しさと自然界の働きに対する感謝の気持ちに基づくものであり、芸術、文学、建築、あるいはあらゆる社会のタブーの中に表現されています。

私たちの仕事は、「自然への畏敬の念」という概念に、新しい重要な広がりを加えるものであると思っています。私たちと同僚との研究の成果は、過去40年間に1,200篇以上もの科学出版物として花開きました。これらの成果とともに、私たちの森林の景観に対する認識も変化しました。森林の景観は、現在も変わらず美しく壮大ですが、今日では、それ以上の意味をもっています。一見して静寂そのものの森ではありますが、底知れぬ活動に囲まれた感があります。その活動とは 何千リットルもの水、何トンもの化学物質が樹木の幹を上っていき、葉はエネルギー光量子を吸収し、水分を蒸発し、有機化合物の中にエネルギーを固定し、葉で作られた養分は成長点に送られ、捕食者である昆虫は、音も立てずに栄養分を僅かずつかじり取り、岩は風化して利用可能な栄養素となり、微生物は有機化合物を分解して栄養素を放出して再利用に供し、あらゆる種が自らの再生の役割を果たし、森の生態系は否応なく森の水流に新たに水を供給し、その水流が最終地点まで流れて行く途中で、流水生態系は水流中の栄養素と有機物を利用し循環し、その他、百万もの多数の現象が同時に発生していること を指します。

目に映る美しさは、潜在的な意識とよばれるスクリーンを瞬く間によぎる、見たことのない画像によって高められ、また抑制されることを実感するにつれて、私たちの美の概念も変わりました。自然界についての私たちの知識が多くなってきているとはいえ、地球のもつ奥深さと効率の良さを支えている未知の要素が、

まだ無数に存在しているのです。この状況は、ちょうどこの青い惑星が未知の天空を航行しているように、毎日続いているのです。私たちは、この広大な未知の自然界を尊重し、大切にし、変化を加えるにあたっては細心の注意を払わなければなりません。自然は、自らの働きのままに働き、その「働き」に、人間は全面的に依存しているからです。

持続性をはかるための手段を手にしようとするのであれば、「自然との戦争」を仕掛けることよりも、自然に対する謙虚さや畏敬の念を、日常生活に取り込んでいくことが重要です。消費社会から、J・H・ギボンズが言うところの「環境保全主義者の社会」に向けて、私たちの思考と行動を、大幅に転換しなくてはなりません。自然への畏敬の念には以下のことが含まれます。

自然の複雑さに対する畏敬の念

自然の回復力と脆弱性に対する畏敬の念

自然の構造と機能の変化に対する畏敬の念

自然が、きれいな空気、きれいな水、清潔で滋養ある食糧、その他多くの恵みを与えるために絶えず私たちのためにしていることに対する畏敬の念

自然の偉大なる再生力を保全することへの畏敬の念

## 引用文献

- Bormann, F. H. 1985. Air pollution and forests: an ecosystem perspective. *Bioscience* 35(7):434-441.
- Bormann, F.H. 1996. Ecology: A personal history. *Annual Review of Energy and Environment* 21:1-29.
- Bormann, F.H. 2000. On respect for nature. *Northern Rockies Conservation Cooperation News, Autumn 2000, No.13. (P.O.Box2705, Jackson, WY83001)*
- Bormann, F.H. 2001. Confronting the environmental debt. *Mimeo. Library, Yale School of Forestry and Environmental Studies.*
- Bormann, F. H. and G. E. Likens. 1967. Nutrient cycling. *Science* 155(3761): 424-429.
- Bormann, F. H. and G. E. Likens. 1979. Pattern and Process in a Forested Ecosystem. Springer-Verlag New York Inc. 253 pp.
- Butler, T. J., G. E. Likens and B.J.B. Stunder. 2001. Regional-scale impacts of Phase I of the Clean Air Act Amendments: The relation between emissions and concentrations, both wet and dry. *Atmospheric Environment* 35(6):1015-1028.
- Likens, G. E. 1994. Human-Accelerated Environmental Change--An Ecologist's View. *1994 Australia Prize Winner Presentation. Murdoch University, Perth, Australia. 16 pp.*
- Likens, G. E. 2000. A long-term record of ice cover for Mirror Lake, New Hampshire: effects of global warming? *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27(5):2765-2769.
- Likens, G. E. 2003. Biogeochemistry: Some opportunities and challenges for the future. *Biogeomon Special Issue, Water, Air and Soil Pollution: Focus (In Press)*
- Likens, G. E. and F. H. Bormann. 1972. Nutrient cycling in ecosystems. pp. 25-67. *In: J. Wiens (ed.). Ecosystem Structure and Function. Oregon State Univ. Press, Corvallis.*
- Likens, G. E., T. J. Butler and D. C. Buso. 2001. Long- and short-term changes in sulfate deposition: Effects of The 1990 Clean Air Act Amendments. *Biogeochemistry* 52(1):1-11.

## 謝辞

これまで40年間、ハバード渓流域生態系の研究に対して、多くの学部学生、大学院生、博士課程終了の研究者、研究技術者、そして多くの同僚から協力を頂き感謝いたします。生態系研究としての本研究は、協力、信頼、交流の賜物です。これに加えて、協力頂いた研究者仲間の科学的な才能と熱意のお陰で、本研究が長期にわたって成功を収めてまいりました。なかでも長期にわたって仕事を共にした、指導的な研究者の方々の名をここに記して、感謝の意を表したいと思います。

Bernard T. Bormann [USDA Forest Service]; W. Breck Bowden [Univ. Vermont]; Donald C. Buso [Institute of Ecosystem Studies]; Margaret B. Davis [University of Minnesota]; Dr. Charles T. Driscoll [Syracuse University]; Christopher Eagar [USDA Forest Service]; John S. Eaton [Institute of Ecosystem Studies (故人)]; Timothy J. Fahey [Cornell University]; C. Anthony Federer [USDA Forest Service]; Donald W. Fisher [USGS]; Peter M. Groffman [Institute of Ecosystem Studies]; Richard T. Holmes [Dartmouth College]; James W. Hornbeck [USDA Forest Service]; Noye M. Johnson [Dartmouth College (故人)]; C. Kent Keller [Washington State University]; Gary M. Lovett [Institute of Ecosystem Studies]; C. Wayne Martin [USDA Forest Service]; Robert S. Pierce [USDA Forest Service (故人)]; Nick Rodenhouse [Wellesley College]; Don Rosenberry [USGS]; Thomas Sherry [Tulane University]; Thomas Siccama [Yale University]; Franklin Sturges [Shepardstown College]; Deane Wang [University of Vermont]; Kathleen C. Weathers [Institute of Ecosystem Studies]; Robert H. Whittaker [Cornell University (故人)]; Thomas C. Winter [USGS]

この間、米国国立科学財団、アンドリュー・W・メロン財団、メアリー・フラグラール・ケアリー慈善信託基金および連邦環境保護局から、多くの研究資金援助をいただきました。