

## 〈海外研修報告〉

# 北米における酸性雨の問題\*

近藤 隆之\*\*

## 1. はじめに

富山県では、職員の国際的視野を広げるために、職員海外研修制度があり、毎年約10名が海外諸国の関係機関等へ派遣されている。筆者も平成元年10月21日から3週間米国及びカナダを訪れ、北米における酸性雨の問題及び化学物質による環境汚染問題について調査する機会を得た。

北米では1970年代から酸性雨による森林、湖沼等の生態系への被害が重大な環境問題となっている。今回の研修では、北米最大の酸性雨監視網 NADP (National Atmospheric Deposition Program) の中央分析室として化学分析を一手に引き受けている Illinois 州政府の State Water Survey Research Center と、湖沼の酸性化などが深刻なカナダのカナダ連邦政府環境省 (Environment Canada) 及びオンタリオ州政府環境省 (Ministry of the Environment) を訪れた。

また、北米における化学物質による環境汚染問題として Silicon Valley における地下水汚染問題や五大湖の汚染問題があげられる。この問題を調査するため、それぞれ California 州政府の State Water Resource Control Board 及びカナダ国立内水面センターの The National Water Research Institute を訪れた。

ここでは、今回の研修で見聞した各機関の環境汚染問題への取り組みのうち、北米における酸性雨の問題について簡単に紹介したい。

## 2. Illinois State Water Survey Research Center (ISWSRC)

ISWSRC は、Chicago から南へ約 200 Km 離れた Illinois 大学の町 Champaign にある。研究所は大学のキャンパス内にあり、広々とした自然に囲まれとてもいい環境であった。現在は235名のスタッフで、水質、大気、気象に関する調査研究を行っている。

また、ここは NADP の中央分析室として、毎週全米約200の測定局から送られてくる酸性雨試料の化学分析を一手に引き受けている。ここでは、分析化学部長の Dr. Peden から酸性雨試料の採取法、分析及び NADP の調査結果概要について説明して頂いた。

NADP は、大気降下物が農地、森林、湖沼などへ及ぼす影響を調査する目的で、1978年に State Agricultural Experiment Stations の North Central Region によって組織された酸性雨監視網である。1982年から Hawaii や Puerto Rico も含む米国全域に監視網を広げ、現在約200地点で測定を行っている。



写真1 ISWSRCにて Dr. Peden

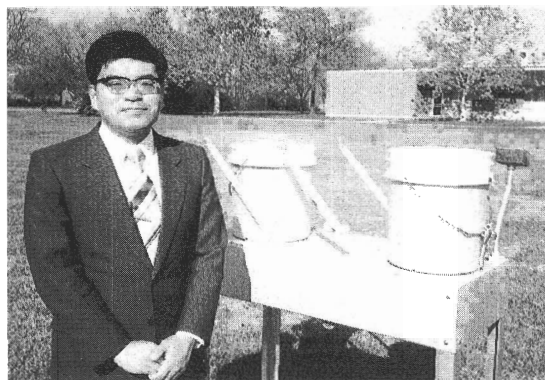


写真2 Aerochem Metrics Model 301 自動採取装置

\*Problems of Acid Rain in North America

\*\*Takayuki KONDO (富山県公害センター) Toyama Prefectural Environmental Pollution Research Center

各測定局は、その地域を代表する値を得るため、局所的な人為的汚染源の影響を受けない地点に設置されている。試料採取には、Aerochem Metrics Model 301 (写真参照) 自動採取装置を使用し、湿性降下物および乾性降下物をバケツに分別採取している。湿性



写真3 CAPSにて 右からPinault氏, Hirvonen氏, 筆者, Helie氏, Wiken氏



写真4 ARBにて 右からDr. Ried, 筆者, Dr. Lulis

降下物については1週間単位、乾性降下物については8週間単位のサンプリングを行っており、それぞれ火曜日の午前9時を基準として試料を交換している。交換した試料はpH、導電率を現地で測定した後、中央分析室であるISWSRCに送られてくる。

私が訪れたときも、サンプリング済みのバケツが入っている黒いコンテナが各地から送られてきていた。ここでは、試料中の各種イオン成分や金属成分の分析が手際よく行われていた。また、分析終了後の試料は冷蔵庫で5年間保存しておくそうである。

NADPのデータはカナダ側の監視網データなどと共に米国環境保護庁のデータベースADS (Acid Deposition System) に集められ解析されている。1985年の湿性降下物のpH年平均値、硫酸イオン年間湿性降下量の分布パターンを図1、図2に示す。これによると、米加両国にまたがる東部地域に低pHの地域がみられ、最もpHが低かったのはOhio州CaldwellのpH 4.16であった。また、硫酸イオン湿性降下量は東部地域が多く、pHの分布パターンと良い一致を示している。

Dr. Pedenには、昼食もかねてIllinois大学のキャンパスを案内して頂いたが、当日はインディアンサマーでとても暖かく、木々も紅葉してとても美しかった。途中、大学の石炭火力発電所を見学させてもらったが、2年前に日本製の脱硫装置が設置されており、日本の技術が米国の環境保全に一役買っていた。発電所でIllinois州産の高硫黄石炭をお土産に頂いたが、とてもいい記念になった。

### 3. Environment Canada

Environment CanadaはConservation and Pro-

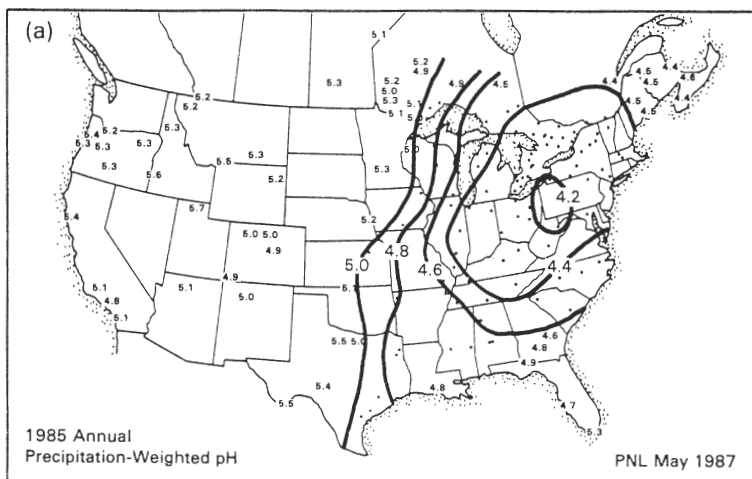


図1 1985年のpH年平均値

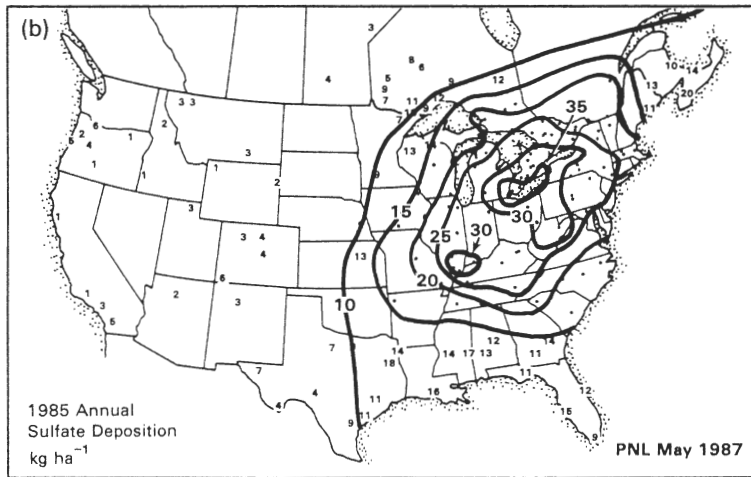


図2 1985年の硫酸イオン年間湿性降下量 ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

tection Service (CAPS), Atmospheric Environment Service (AES), Canadian Parks Service よりなり、約13,000人の職員を擁している。今回は、このうちCAPSとAESを訪れた。

CAPSは、酸性雨や有害化学物質などによる環境汚染問題や湖沼、河川の水質保全、野生生物の保護などを担当している。Ottawa川を挟んで首都Ottawaの対岸のHull市にあるCAPSを訪れ、野生生物部のHelie調査官、工業計画部のPinault技師から酸性雨による湖沼、森林等の被害実態及び今後の対策について説明して頂いた。

また、AESはOntario州の州都Torontoの近郊にあたるDownsviewにあり、大気汚染と気象に関する業務を担当している。ここでは、上級顧問のDr. Brydgesから酸性雨調査の実態及び湖沼、森林等の被害実態について説明して頂いた。

### 3・1 National Sensitivity Assessment

カナダでは、酸性雨問題は米国からの“もらい公害”であるとの考えが強い。これは図3に示すように、発生源は米国側に多いにもかかわらず、そこから排出される汚染物質は南西の風でカナダへ長距離輸送され、酸性雨に対して感受性の高いカナダ東部地域に酸性雨被害がもたらされるというのである。

1980年における両国の人為的発生源からの汚染物質排出量は、 $\text{SO}_2$ については米国2,410万トン、カナダ480万トン、 $\text{NO}_x$ については米国1,930万トン、カナダ183万トンで、米国側の排出量がカナダ側に比べ $\text{SO}_2$ で約5倍、 $\text{NO}_x$ で約10倍多くなっている。

カナダ全土では約77万の湖沼があるが、そのうち約15万の湖沼がなんらかの生態系のダメージを受けてい

ると推定されている。カナダ連邦政府では1986年に土壌の化学的組成などをもとに、酸性雨が陸水生態系に与える影響を判断基準として、全国各地域の酸性雨に対する感受性をNational Sensitivity Assessmentとしてまとめている。酸性雨が湖沼などを酸性化させ、陸水生態系に被害を及ぼすか否かは、降水それ自身の組成もさることながら、その地域の土壌の特性も大きな要因となる。すなわち、酸性雨は土壌中の成分を溶解する過程で中和されるため、その土壌の化学組

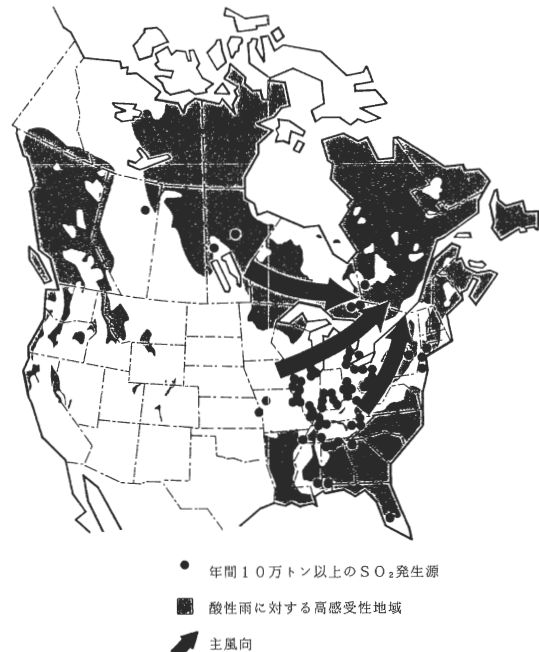


図3 北米における $\text{SO}_2$ 主要発生源と酸性雨に対する高感受性地域

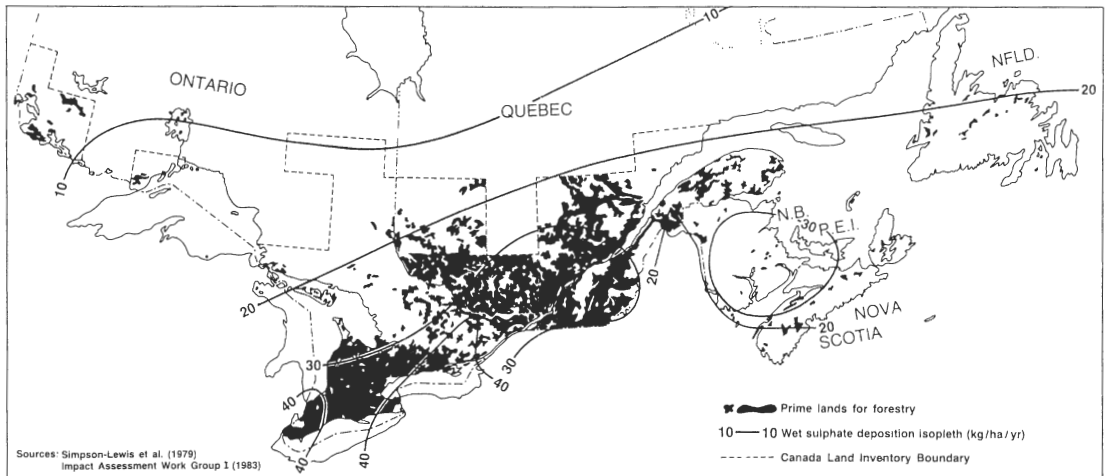


図4 カナダ東部地域における林業適地と硫酸イオン年間湿性降下量

成が、また、接触時間や接触面積を左右する土壌層の厚さや土壌粒子の粗さなどが、陸水の酸性度を決める要因となる。これらを総合的に判断して、各地域の酸性雨に対する感受性の評価を行っている。

これによると、酸性雨に対する抵抗力が弱い（高感受性）地域は、先カンブリア代の地層が主体のカナダ東部地域及び中央北部地域を中心に広がっており、全国土の46%を占めている。また、酸性雨に対する抵抗力が中程度の地域は21%、強い地域は23%であり、残りは泥炭地域が8%、氷土地域が2%である。州単位では、酸性降下物の高濃度汚染地域である東部地域のQuebec, Newfoundland, Nova Scotiaの各州で、酸性雨に対する抵抗力が弱い地域が州の半分以上を占めている。

### 3・2 カナダ東部地域における農林業適地

カナダにおける森林被害としては、Quebec州南部のサトウカエデの枯死やNew Brunswick州からNova Scotia州にかけての海岸地帯におけるカンバの木の早期落葉や葉の黄変などが挙げられるが、現在酸性雨との関連について精力的に調査が進められている。

このように森林被害がみられるカナダ東部地域で、林業地及び農業地としての適地の実態が調査されている。林業地としての適地の調査結果を図4に示す。点線より下が調査区域で、これより上はほとんど利用に適さない地域である。また、カナダでは酸性雨が環境に影響を及ぼすか否かの指標として、硫酸イオンの年間湿性降下量  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  をその目安と考えており、これを上回る地域では、酸性雨被害が生じるとしている。このため、硫酸イオンの年間湿性降下量も同時に

示してある。

林業の適地は地図上で黒く塗られた地域であるが、これは調査地域内の7%にあたる。そして、そのうちの96%までが硫酸イオンの年間湿性降下量  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  以上の汚染地域内にある。同様に、農業の適地は調査地域内の5%で、そのうちの84%までが硫酸イオンの年間湿性降下量  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  以上の汚染地域内にある。このように、カナダにおける最も生産性に富んだ地域である東部地域で、林業適地や農業適地の大部分が高濃度汚染地域内にあり、これからもカナダの酸性雨問題の深刻さがうかがわれる。

### 3・3 Canadian Acid Rain Control Program

カナダでは酸性雨問題が深刻であるため、発生源対策に積極的に取り組んでいる。これまで、米国との交渉で米加両国共同の発生源対策をとるよう申し入れてきたが、米国はこれに応じなかった。このため、カナダは単独で発生源対策に取り組むこととなった。カナダ連邦政府は1984年にOntario州など東部7州と共

表1 カナダ東部7州の二酸化硫黄排出量削減計画

Province	1980		Emission Objectives (tonnes)
	Base Case (tonnes)	Reductions (tonnes)	
Manitoba	738,000	188,000	550,000
Ontario	2,194,000	1,164,000	1,030,000
Québec	1,085,000	485,000	600,000
New Brunswick	215,000	30,000	185,000
Prince Edward Island	6,000	1,000	5,000
Nova Scotia	219,000	15,000	204,000
Newfoundland	59,000	14,000	45,000
TOTAL:	4,516,000	1,897,000	2,619,000
To be apportioned:		319,000	2,300,000

同で、酸性雨の主要原因物質である硫酸イオンの年間湿性降水量をカナダ全土で  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  以下にすることを目標とする Canadian Acid Rain Control Program を策定した。この計画の主な内容は次のとおりである。

- ① カナダ東部7州において、二酸化硫黄の排出量を1994年までに1980年当時の450万トンから230万トンへ約50%削減する。(各州の削減計画を表1に示す)。
  - ② 乗用車及びトラックの排出窒素酸化物量の削減。乗用車及び小型トラックについては、1987年9月の新車から67%削減。大型トラックについては1988年2月の新車から50%削減。
  - ③ 低硫黄石炭の利用促進、汚染物質各種排出防止技術の研究開発。
  - ④ 酸性雨による生態系への影響や効果的な排出抑制策をとるための調査研究の促進。
  - ⑤ 米国発生源からカナダ東部への二酸化硫黄の移流量を2百万トン(1980年レベルの50%)以下にする。
- ⑤の対策は米国の協力がなければ達成できないが、

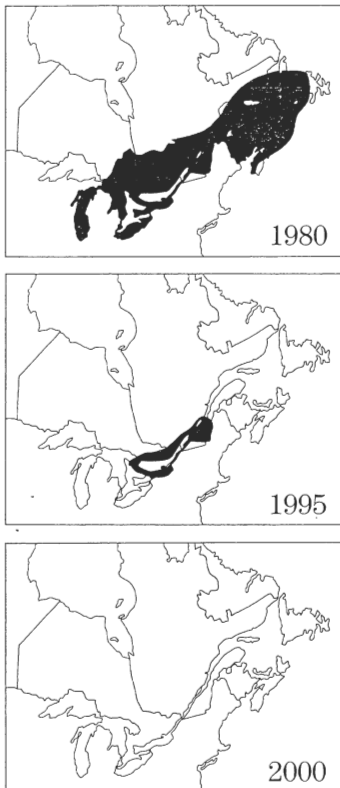


図5 硫酸イオン年間湿性降水量  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ 以上の地域の縮小予想図

米国においても1989年にブッシュ大統領が、今後10年間で二酸化硫黄の排出量を半減する大気浄化法を発表した。もし米国がこの計画を実行すれば、図5のように汚染地域は縮小し、2000年までにはすべての地域で、目標値の硫酸イオンの年間湿性降水量  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  以下が達成されると予想されている。しかし、Dr. Brydgesは「酸性雨との戦いは21世紀も続くであろう」と悲観的であった。

#### 4. Ontario Ministry of the Environment

Ontario Ministry of the Environment では、酸性雨の総合的調査のため設立された APIOS (Acidic Precipitation in Ontario Study) の Coordinaion Office 及び酸性雨のモニタリングを担当している Air Resources Branch (ARB) を訪れた。

APIOS は1979年に長距離輸送大気汚染物質の発生源、大気中での反応、その環境に及ぼす影響について調査する目的で設立され、現在、酸性雨のモニタリングや湖沼、森林等の生態系被害調査、発生源対策に取り組んでいる。Coordination Office は Tronto にあり、約15人のメンバーで参加機関間の調整を行っている。ここでは、Coordinator の Dr. Chan から APIOS の事業概要について説明して頂いた。

ARB は105名のスタッフで大気汚染に関する調査研究を行っており、また、APIOS に参加して約50の測定局で酸性雨のモニタリングを行っている。この酸性雨監視網は先に述べた NADP について大きく、州独自でこのように大きな酸性雨監視網をもっているのは北米では Ontario 州だけである。ここでは Dr. Lulis と Dr. Ried から酸性雨試料の採取法、分析法及び調査結果概要について説明して頂いた。

##### 4・1 Countdown Acid Rain 計画

Ontario 州では、連邦政府の Canadian Acid Rain Control Program 計画をうけ、1985年11月に州独自の発生源対策である Countdown Acid Rain 計画を策定した。Ontario 州の二酸化硫黄の主要発生源は、Inco 社 (ニッケル精錬)、Ontario Hydro 社 (石炭火力発電)、Falconbridge 社 (ニッケル精錬)、Algoma Steel 社 (製鉄) の各社で占められ、この4社で州全体の約80%の二酸化硫黄を排出している。Countdown Acid Rain 計画は、石炭火力発電所に対しては脱硫装置の設置や低硫黄石炭の使用、精錬所に対しては製造工程から二酸化硫黄を回収するための硫酸製造プロセスの追加などを実行させることにより、この4社の二酸化硫黄排出量を順次削減させ、1994年には州全体の排出量を1980年当時の220万トンから89万トンへ

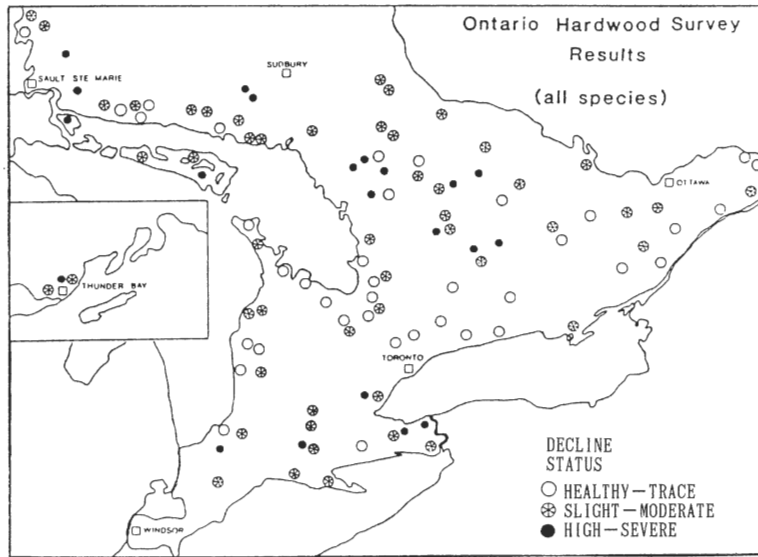


図6 Ontario 州の広葉樹林衰退調査結果

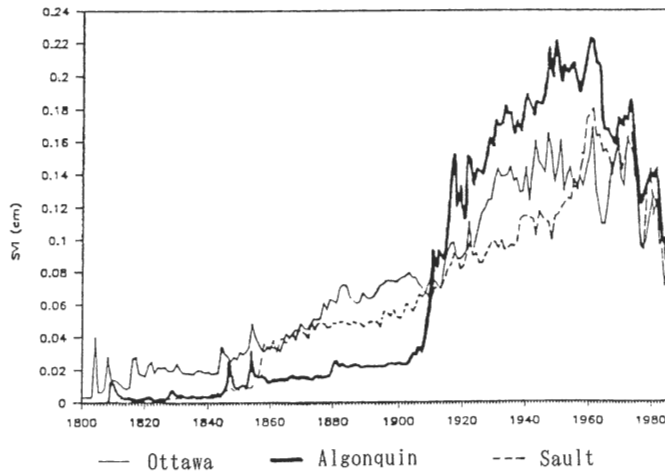


図7 年輪測定によるサトウカエデの成長率調査結果

約60%削減するというものである。

4・2 森林衰退

Ontario 州の森林被害の実態を把握するため、100地点の観察林を定め、広葉樹を対象に枯れ枝の量などを基準として、森林の衰退を3段階に評価している。結果は図6のとおりで、中程度の衰退から著しい枯死までの地域が南西部から Niagara, Muskoka 地域にみられる。一方、比較的健康な森林地帯が Huron 湖から Ottawa 地域に広がっている。このように森林の衰退地域と酸性降下物の多い地域の分布パターンとは直接関係が無いように見える。しかし、土壌の特性、特に石灰岩を多く含む土壌がこの樹木の衰退分布パ

ターンに重要な役割を果たしている。衰退の最も進んだ地域は土壌の感受性が最も強く、また、酸性降下量の多い地域である。

酸性降下物などの大気汚染物質は、樹木の成長率を低下させると考えられている。このため、Ottawa, Algonquin, Sault の3つの森林地帯で、年輪を測定することにより、サトウカエデの成長率の変化が調査されている。結果は図7のとおりで、3地域とも1960年頃までは成長率は増加しているが、これを境に成長率の減少がみられる。この傾向は、その他の北米の北東部地域でも同様にみられている。

4・3 湖沼の酸性化

湖沼が酸性化して「死の湖」となる一般的な過程は次の様なものである。pHの低い春先の雪解け水などが緩衝能の弱い湖沼に流れ込み、pHが6.0以下になると“Acid Shock”により卵や幼魚が被害を受け始める。次に、pHが5.6になるとCrayfishなどの甲殻類がいなくなり、これを餌としているLake Troutが減少し始める。さらに酸性化が進むと水銀、アルミニウムなどの有害金属が土壌から溶け出し、成魚にも影響が及び始める。pHが5.3以下になると、抵抗力の強い

Yellow PerchやLake Chubを除く大部分の魚類がいなくなる。また、これらの水生生物を餌としている、水鳥やミンクなどの野生生物が減少する。

Ontario州では約6,500の湖沼のアルカリ度が調査され、酸性雨に対する感受性が調べられている。結果は、すでに酸性化したものが5.2% ( $\leq 0\mu\text{eq/L}$ )で、ここではほとんどの魚類は生存できず、また、貝や両生類も生存し得ない。また、酸性雨に対し極めて感受性の高いもの15.7% ( $0\sim 39.9\mu\text{eq/L}$ )、中程度のもの36.9% ( $40\sim 199\mu\text{eq/L}$ )、低いもの17.2% ( $200\sim 499\mu\text{eq/L}$ )、酸性雨に対し心配の無いもの25.0% ( $> 500\mu\text{eq/L}$ )であった。このように、すでに酸性化したもの、酸性雨に対し極めて感受性の高いものを含めると、約20%の湖沼が深刻な状態にあるといえる。

Ontario州における湖沼の酸性化の主要原因物質は硫酸イオンである。1,180湖沼の調査結果から、湖沼平均pHと硫酸イオン降下量との間には図8に示すように強い相関関係がみられた。また、州の北西部地域では酸性降下量は少なく、ほとんどOntario州のバックグラウンド値と考えられるが、この地域の湖沼調査では硫酸イオン濃度は極めて低い。このことから、Ontario州の湖沼の主な硫酸イオン源は大気からの降下物と推定されている。

湖沼の被害が最も著しいのは、Inco社やFalconbridge社が立地し、Ontario州最大の発生源であるSudbury地区である。しかし、工場の高煙突化やSO<sub>2</sub>排出量の削減により、この地域の酸性降下量は減少

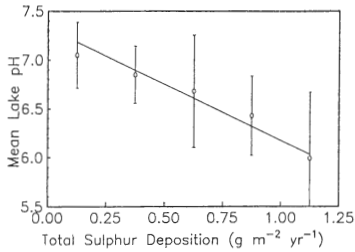


図8 Ontario州の湖沼平均pHと硫酸イオン降下量との関係

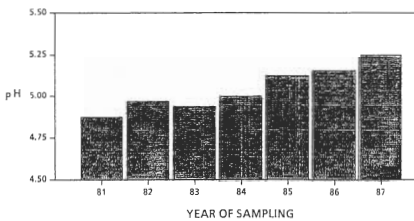


図9 Sudbury地区43湖沼の平均pHの経年変化

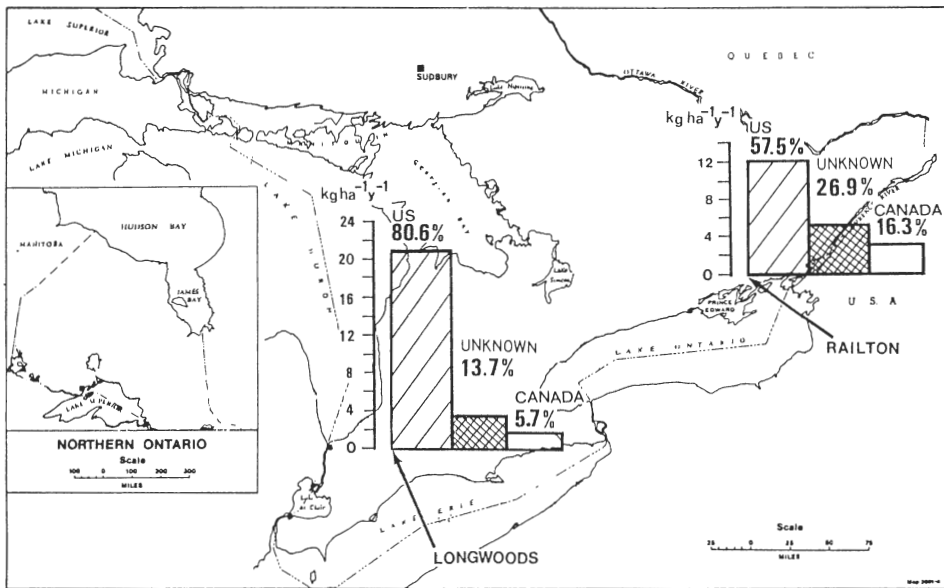


図10 Ontario州南部地域の湿性降下物中硫酸イオンの米国とカナダの寄与率

してきている。これを反映して Sudbury 地区の43の湖沼の平均 pH は図 9 のように改善がみられている。これは、酸性降水物の量を削減してゆけば酸性化した湖沼の回復が期待できるという実例であり、酸性雨被害に苦しむカナダには明るい話題である。

#### 4・4 APIOS 酸性雨モニタリング体制

APIOS は、Cumulative Network (28日単位サンプリング：測定局数37) 及び Event Network (1日単位サンプリング：測定局数16) の2つの酸性雨監視網をもっている。前者は州全域の酸性降水物の分布状況を把握するための、後者は米国からの汚染物質の長距離輸送の実態を調査するためのものである。各測定局は、その地域を代表する値を得るため、局所的な人為的汚染源の影響を受けない地点に設置されている。

試料採取は、湿性降水物については降雨感知センサーと連動した自動採取装置 (Cumulative Network ; M. I. C. Type A, Event Network ; Aerochem Metrics Model 301) を使用している。また、乾性降水物については、以前は NADP のように湿性降水物の自動採取装置で同時に分別採取を行っていたが、現在はローボリウムエアサンプラーによるろ紙法を採用している。

Cumulative Network から得られた Ontario 州の pH 平均値 (1981年～1984年) の分布パターンをみると、米国の工業地帯に近い南部地域ほど pH が低くなっている。また、Event Network の1981年～1983年の測定データを解析した結果からは、南部地域の湿性

降水物中硫酸イオンにはカナダの発生源よりも米国の発生源の寄与の方が大きく、図 10 に示すように Longwoods で80.6%、Railton で57.5% が米国発生源からの長距離輸送の寄与によるものと推定されている。

#### 5. おわりに

今回の研修の第一歩はサンフランシスコからスタートの予定でした。しかし、出発の5日前にあのサンフランシスコ大地震が発生しました。空港閉鎖は2日後に解除されたものの、旅行会社に問い合わせても市内の様子はまったく不明。なるようになれと腹をくくり、とにかく予定どおり出発しました。でも、現地は予想したような混乱はなく、市内は一応平静を取り戻していました。しかし、市の中心のマーケット通りでは壁が崩れ落ちて立ち入り禁止のビルも多くみられ、やはり大きい地震だったんだと実感しました。

このように今回の研修は波乱のスタートでしたが、各訪問機関に温かく迎えて頂き、また短い期間ではありましたが生の米国やカナダに接することができ、仕事以外の面でも得る事が多かったように思います。

研修先を選ぶにあたり、いろいろ助言頂きました兵庫県立公害研究所の玉置元則氏、奈良県衛生研究所の松本光弘氏、滋賀県琵琶湖研究所の熊谷道夫氏に厚くお礼申し上げます。

最後に本研修の機会を与えていただき、また種々のご配慮を賜りました当センターの石坂所長並びにその他の職員のみなさまに本誌上を借りて深く感謝いたします。