

## 地球環境研究最前線

—シベリアでの温室効果ガス観測—\*

井上 元\*\*

### 1. はじめに

環境研では「シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバック」の研究を行っている。シベリアは二つの点で注目される。一つは北半球高緯度地帯の二酸化炭素の季節変動にシベリアのタイガ地帯の森林が大きく寄与しており、二酸化炭素のミッシングシンクの候補の一つである。陸域での二酸化炭素の変動をどのように観測すればこの問題に迫れるかは、今一つ良く分からないが、1年半前から航空機による空間分布の測定や、高度分布の季節変動を測定している。もう一つの対象は西シベリアの大低地にひろがる湿原からのメタン発生である。アラスカやカナダのデータは有るが、最大の湿地であるシベリアでの測定が全く無い。これまでの航空機による測定に加えて、渦相関法による測定を94年の夏から開始する予定である。興味有るデータが始め理解は深まりつつあるが、温室効果のフィードバックという将来を予測するところまでは未だまでである。ここではこの観測を開始するに至った経緯やエピソードなどを紹介したい。

### 2. シベリアでの研究の動機

シベリアで温室効果気体の研究を始めることになったのは、幾つかの契機が重なったためである。すべては、1990年、国立公害研究所が国立環境研究所と名称を変更し地球環境問題に本格的に取り組むことになり、新設された地球環境研究センター（以下、地球センターと略す）の地球環境モニタリングを私が担当する事になった時に始まる。正直に言って環境研は地球規模の大気、海洋、陸域の研究実績に乏しかった。「モニタリングをテコにして何か特徴のある地球環境研究を始めなくてはならない」という責任を感じていた。

大気中の温室効果気体のモニタリングステーション

の位置を見るとほとんどが離島などにあり、都市から離れているだけではなく、植物の影響も無いところを選んでいいる。ユーラシア大陸は全く空白である。衛星写真でみるとシベリアはアマゾンやアフリカなどより面積としては大きな森林地帯である。ここでの二酸化炭素やメタンの観測を行い、大気と森林や湿地との相互作用を研究すべきではなからうか。丁度ゴルバチョフの改革が進んでいる時期でもあり、可能性は十分あると私は思った。モニタリングのプログラムについて助言を頂いていた名大（当時）の樋口敬二教授は「シベリアの凍土が融けると大きな変動が起きる。誰かがこの研究をやらねばならない」と説いておられた。温室効果気体のモニタリングで協力を頂いている東北大の中澤高次教授によれば「仙台沖で航空機観測を定期的に行っているが、どうもシベリアの影響を強く受けているようだ」との事である。地球センターの西岡秀三さんも IPCC の関係でソ連の研究者との交流も深く、「シベリアの凍土地帯が温暖化でどうなるか、面白いテーマだ」と積極的であった。私と一緒にモニタリングの仕事始めていた人達は徐々に真剣に考えるようになっていた。だがソ連（当時）にこの分野の知り合いがいるわけではない。西岡さんに教えてもらったロシア側の研究者に手紙を書きまくった。

他方、地球センターのモニタリングの一項目である航空機によるモニタリングは、大きな暗礁に乗り上げていた。予算は適度にあるのだが、国内には満足できる大きさの航空機がない。「航空機観測では出来るだけ多くの項目を測定し、その相互関係を求めることにより初めて理解が深まる。目的とする項目だけを測っては予想されたデータが出て終りで、発展や深まりがない」というのが私の信念である。小さな飛行機で数項目をチョロチョロと一年に一回程度測るぐらいなら最初からやりたくない。NASA の DC-8 とまでは言わないまでも、YS-11 クラスの飛行機が欲しい。広い範囲を高度を変えながら飛びたい。当時、民間会社が国内で YS-11 を購入しレンタルする案もあったが、

\* A frontier of global environmental research—  
Observation of greenhouse gases over Siberia.

\*\* Gen Inoue, 国立環境研究所.

© 1994 日本気象学会

われわれユーザー側の予算が不足で維持できない。困り果てていたところ、私の研究室に来ている STA (科学技術庁) フェロシップでロシアから私の研究室に来ていたマクシュートフ君が「僕の友達のお父さんは大きな飛行機で観測をやっています。連絡して聞いてみましょうか」という耳寄りな情報をもたらした。「よし！ 今晚電話してくれ」という風に話は進んでいった。

### 3. ロシアとの交渉

環境研の所外はシベリアでの研究を促す雰囲気であったが、所内では必ずしもそうではなかった。「ロシアで観測研究など出来るはずがない」と頭から決めつけ、むしろ妨害に走る人すらいた。好意的な人でも「大変だぞ、途中で投げ出すことになるぞ。政治情勢が変化したらどうする？」という具合であった。幸い少数のトップの人達は大変好意的であり、私は最後にはトップの判断で GO! になると確信していた。とにかく現地に行って見て来ること、カウンターパートの候補と話をして来ること、社会制度や習慣の違いによる誤解が生じないよう、詳細な情報を集めることが必要である。制止を振り切るようにして単身モスクワ、シベリアに出かけたのは、1991年10月のことであった。

後で気心が知れる仲になってからであるが、航空機観測のカウンターパートである中央大気観測所の副所長のカタトフさんがウオッカを片手に語った。「実はこんなに早く共同観測が可能になろうとは思っていません。イタリアの代表団は団長、契約責任者、科学者グループ、技術スタッフ、通訳と10人以上で数日も滞在し議論した。だが、2年経った今でも未だ交渉を続けている。君は一人で来て飛行機の隅々まで詳しく見て廻り、夜遅くまで議論し、一人で全て決めて帰って行った。日本のシステムはこんなに効率よく出来ているので、現在の経済的成功を達成したのだろう。」私は「日本の官僚的なステップを踏まなかったために、こんなに早く共同観測が実現したのだ」と詳しく説明したかったが、解く必要のない誤解もあっていいと考え直して「そうかも知れない」とつぶやいた。

話は前後するが、日本人の働きについてはもう一つエピソードがある。航空機観測の資材を3トン近くモスクワに送り、航空機に搭載することになった。モスクワの飛行場の一角にある建物に荷物が山積みされた。全てわれわれ自身がベニア板と角材で梱包して送り出したものである。ロシアの人達は梱包を解くのに2日はかかるかと思っていたらしい。ところが我々3人

が電動ドリルで開けまくり、半日で済ませてしまい、午後から航空機への搭載を始めると言い出したのである。思いもかけない展開に彼らは慌ててしまった。

ロシアではプロジェクトのリーダーはお茶でも飲んでいられるか、せいぜい作業を見物しているのが普通らしく、私が先頭に立って梱包を解いて行くのに驚いていた。「なんとチーフだ！ 重要なことを一人で決めるのにも驚いたが、それが自分達研究者もやらないような机の下に潜っての汚れ仕事までやる。カルチャーショックだった」と後でロシア側の研究者や技術スタッフの人達に何度も言われた。日本では何でもない自然な姿なのだが、研究者は高度の仕事、力仕事や汚れ仕事は支援スタッフというのがロシアの姿である。

何人かの人には「ロシア人は契約についての考え方が違う。事情が変わったから出来ないとか、値段が上がったから二倍払ってくれなどと平気で言い出す。打ち合せのたびに文書を交換し確認した方がよい。」と忠告された。幸い、CAO (Central Aerological Observatory) や PI (Permafrost Institute) の人達とはそのようなトラブルは起こしていないが、明かに隙あらば沢山せしめようという人達もいない訳ではない。通関や手荷物の荷重超過については不快な思いを何度も経験した。官僚的な融通の無さにも振り回されることも有った。しかし、ロシア人は愛すべきお人好しという感じを私は持っている。議論が大好きで僅かの節約にしかならないことでも延々と議論する。ところがそれに熱中する余り、大きな所でミスをして大損をしたりする。

### 4. 初めてのシベリア観測

第一回目の西シベリアでの観測はチュメニを起点にして行う事になった。1992年7月のことである。チュメニという都市はそれほど大きな都市ではないが、日本ではチュメニ油田の名で知られている。実際には「ここではいくら掘ってもきれいな地下水しか出てこない」そうで、「日本では油田で有名だ」と聞いて地元の人には驚いていた。ここは西シベリア大低地の南西の端であるが、北に2時間以上飛行しても未だ湿原が続く。世界で最大の湿地とは言え、東京から札幌の距離を飛んでも同じ様な光景が続くのも、実際に見て実感する驚きである。湿原は実に多様である。隣合った湖の色が黒や淡茶色などと全く異なっていたり、緑の水草や茶色の水苔などが、ちょうど金星の写真の赤を緑に塗り替えたような模様をなしている。飽きることなく、声

もなく見入っている。気が付くとロシアの研究者もみんな窓に顔を押し付けるようにして見入っている。

われわれの使用している航空機はイリュージン-18といういささか古いものである。翼幅は40mもあり、旅客機としては100人乗りのものであるが、観測用に大幅な改造が加えてある。プロペラのエンジン（ターボプロップ）が4基付いており、プーンプーンと昔の飛行機を知る人には懐かしい音をたてる。若い人には「ナウシカの世界だ」といえば理解して頂けるだろうか。この大きな飛行機が何と高度 70 m の超低空飛行を行うのである。窓から外を見ていると直線飛行の時は新幹線が高架を走っているときの眺めに似ているが、旋回をするときは悲鳴をあげたくなる。頭の中では地上との間には 30 m 以上のクリアランスはあるのだと分かっている。「翼が樹に引っかかる！」という恐怖を感じるのである。のんびりと草を食べていた牛が驚いて走り始める。農家の人から「飛行機が落ちたようだ」と飛行場に電話があったと後で知らされた。70 m から数千mまで高度を変えながら観測を続け、貴重なデータをとることが出来た。

この観測の目的の一つは湿原からのメタンの発生量を求める事にある。地面に箱をかぶせ、その中のメタン濃度の増加を測定すれば、そこからのメタンの発生量が分かる。水田などからのメタンの発生量はどこでも均一なので、この方法でうまくいく。ところが、自然の湿原で測定すると僅かの場所の違いで10倍以上の違いが有る。主として水位の違いを反映しているのであるが、地表での測定では行動範囲の制限が有り平均の値を求めることが出来ず、大気からの観測を行う意義がある。

航空機には二酸化炭素、メタン、オゾン、水蒸気、二酸化硫黄、一酸化炭素などを機上で測定するための装置の他に、300近くの金属やガラスの容器に試料大気を採取して研究所の実験室に持帰り、機上では測定できない亜酸化窒素や炭素の安定同位体などを測定した。この航空機は観測専用機で、装置の搭載については日本で経験するような不必要な厳しさはない。それでも FID と呼ばれる水素を燃焼させて炭化水素を測定する検出器を搭載するについては、すんなりとは行かなかった。「タバコと同じ様なもの」と説明したが、「ロシアのタバコは机の上に山積みしても爆発しない」と抵抗された。結局水素ボンベでなく水を電気分解する水素発生器を搭載し、機内に水素が充満することの無いように処置して OK となった。エンジンから来る

周波数の高い振動や、特に低空を飛ぶときの低周波の上下運動などが、測定器に影響を及ぼすので、防振処置やテストを繰り返したが、実際に飛行して装置が正常に動くまでは安心できなかった。

## 5. シベリアでの生活

「食料が不足しているようだ」とか、「燃料がなくて帰れなくなるかも知れない」などと周りの人は心配してくれた。送り出すとき環境研のある部長は「死ぬなよ。無事に帰って来れば成果は問わないから」と激励してくれたし、同僚には「送別会」を開いてもらったのであった。実際にはそのような心配は全くなかった。確かに食料品売場には行列が出来たりする。われわれもその列に並んで肉を買ったりしたが、例えば隣の缶詰売場では客がなくて欠伸をしているのに、その店員は忙しい肉売場の手伝いをしようとしないのである。肉売場も客に待たせて申し訳ないという考えは、はなから無いので、マイペースで仕事する。客もなれたもので、苛々しているのは日本人の自分達だけと気づく。売場には見本の鳥が一羽置いて有るだけなので、ちょっと見ると物不足で僅かな商品に人が群がっているように見えるが、実際には無くなると奥からいくらでも出てくる。もちろん品不足は明かで、たとえば以前は安くてうまいグルジア産のワインがいくらでも有ったが、今は全く見あたらぬ。個人の家と呼ばれると保存していたワインが解説付きで出てくる。個人のストックはかなり有るようである。

私は日本の戦後を直接知っているわけではないが、その名残を記憶している世代にある。ロシアの現在は正に冷戦後の混乱にある。才覚のある人には大儲けをするチャンスであるが、普通の人々は生活を守るために必死である。1992年は年間10倍という超インフレであったため、現金取り引き以外には燃料も買えない。モスクワからの観測機の出発が何時間か遅れたが、これも乗務員に手当を飛行の前に出すか、後になるかというトラブルからである。飛行して帰ってくると貨幣価値が何割か減ってしまうのだから、些細な問題ではないのである。

## 6. 観測結果

最後に夏の測定結果の特徴を述べておこう。シベリアの大半は永久凍土地帯と呼ばれ夏でも地下は凍っている。それでも日中の気温は30°C近くまで気温が上昇し、地表面から 2,000 m 近くまで熱対流でかなり均一

にかき混ぜられる(混合層)。ここでは地表面の植物による光合成のせいで全体的に二酸化炭素濃度が低くなる。シベリアは高緯度で白夜に近く、11時になっても外でなら本も読める。だから夜間の放射冷却で冷える時間も無いのではないかと予想していたが、実際には太陽が傾くと気温も下がり始め、明け方には強い接地逆転層が現れる。そのため夜間の植物の呼吸で放出された二酸化炭素が下層に溜り、その濃度は著しく高くなる。しかし驚いたことに上空では、1,800 m まではバックグラウンドよりも数 ppm 濃度が低いままになっている。夏のシベリアは無風状態が続くことが多く、前日の状態が残っているのである。気温が上がるに連れ逆転層が解消し対流が始まると共に、植物は光合成で二酸化炭素を吸収し再び均一な低濃度になっていく。このようなサイクルを繰り返していると、植物が固定した分だけ混合層の二酸化炭素の濃度は下がって行く。

混合層とその上の自由大気とは日常的には混じり合わないが、時に積乱雲中と同様な(必ずしも雲の発生を伴わないが)強い上昇気流が起り、混合層の低濃度二酸化炭素の大気を大量に自由大気中に運搬する。そのために例えば 7,000 m の高度を水平飛行していると、時々低濃度の二酸化炭素の地帯を通過する。この時にはオゾンの濃度は低く、水蒸気が高いので地表面から輸送された大気であることがわかる。また、前線や低気圧のような中規模の擾乱でも混じり合いをおこす。これらの解析は現在進行中であり、その結果は追々気象学会などで発表して行くことになる。

## 7. 将来に向けて

未だまだ不十分な点も多いが、現在までは年毎に観測のレベルを上げつつ、計画された成果を上げている。その理由のひとつは、ロシア側の研究者の力量が高いことである。われわれは大気微量成分の測定は出来るが、航空機で気温を測ること一つとっても経験は無かった(飛行機は高速なので観測点の気温は高くなる)。地表面温度や位置もロシア側でとっている。不足

分を日露の双方が補いあって大きく前進できた。もう一つの理由は、双方の参加者の熱意と誠意である。宿泊施設や食事など、日本で行う観測に比べ不満は多かったが、参加者は「探検だと思えば天国」と好意的に耐えてくれた。ロシア側も最善を尽くしてくれたからである。

いまロシアの70人乗りの最新鋭機を観測用に改造し、日本とロシアとの合弁会社が購入・維持管理・運航しようという話を持ち上がっている。第一のメリットは初期投資額と維持費が安いことである。この方式であれば、日本で小型機を借りる予算で大型機が使用できる。第二に、ヨーロッパで開発されたエンジンをターボプロップに改造したものを使用しており燃費がよく、機体はロシアの開発したものであり過酷な自然状態で操縦性能が抜群である。観測用の改造はこの航空機を開発したところが行うので完璧である。第三に、これを運航するのはテストパイロットで、航空機観測の経験が豊かである。先に述べたように高度 70 m でも、台風の目の中でも安心して乗っていられる。第四に、既にわれわれは1993年にはロシアの観測機を仙台に持ってきて運航した実績があり、日本国内での運航に問題はない。ロシアの CAO とアメリカの NASA とは緊密な関係にあり NASA も巻き込んだ共同観測ならば米軍基地でも使用できそうである。

既にヨーロッパでは共同で大型の観測用航空機の導入が進んでいると聞く。わが国では航空機観測に関心を持つ人達が増えているにもかかわらず、大きな一歩が踏み出せないでいる。この新鋭機の導入はわが国のこの分野の研究を加速する魅力ある企画であると思うのだが、どうであろうか。この場を借りて関心のある方の賛同を求めたい。

[編集委員会より：この原稿は、つくば研究学園都市の科学技術庁研究交流センターが発行している壁新聞、"Science Communication" に、1993年末から1994年初めにかけて著者が連載されたものを元に、著者において多少の加筆をしていただいたものです。]