

MU レーダーから PANSY へ

東京大学大学院理学系研究科 佐藤 薫

私は料理が好きだ。特に菓子作りには自信がある。ゼリー液を氷水に入れてかき混ぜながら、だいぶ粘性が高くなってきたなとつぶやいていたりする。菜箸をツーツと走らせて渦のできる様子を観察し、ついレイノルズ数を推定したりしてしまう。最近京大の工学部女子のアウトリーチ用ポスターを見る機会があり、「自分が理系と思うのはどんなとき」というアンケートの答えに「日常会話でもふつうに数字や理系用語を使ってしまうとき」と書かれてあったのを見て大いに共感した。その昔、自民党の某女性大臣が、「女が男社会で生きるためには、マージャンかゴルフができないといけない」と話されていた。私はマージャンには興味が湧かない。雀荘のたばこの煙で白い空気がなじめなかったし、母にかけごとなんかしちやいけませんと教育されてきた。ゴルフを始めたころの父のウエストが（たぶん筋肉がついたせいで）みるみる大きくなっていったのを見て、ゴルフにもよい印象がない。私は手先を使うのが好きで、料理だけでなく刺繍・裁縫も好きだし、ピアノを弾くのも楽しいし、半田づけも得意だ。それからきれいなものにも目がない。リバティの花柄は素敵だと思うし、はかない台風のような極低気圧が衛星画像に現れるととてもうれしい。私は女子だから男子社会の中でも女子らしく生きるしかないのだと自分にいい続けて、気づくともう 50 歳直前である。昨年度自民党最後の補正予算で認められ、9 月の見直しでも生き延びた（ご支援くださった先生方、本当にありがとうございます）南極昭和基地大型大気レーダーの今年度建設に向けて、意気投合した仲間とともに、大勢の研究者や技術者の協力を得て、明るい学生達にも囲まれ、時々くじけそうになりながらも、とにかく前傾姿勢で頑張っている。

京都大学の気象学研究室での博士課程は私のこれまでの人生で一番楽しかった時代だ。私は研究室にとっても温かく迎えられた。向川均さんと同じ部屋だったが、訪問した初日にはすでに机があり、ロッカーには向川さんの字で「佐藤」と書かれた紙が差し込んであった。指導教官の廣田先生はやさしく、ときに厳しかった。それは違うのではないだろうかと思うこともあったが、なんでもストレートに伝えてくださるのは大変ありがたかった。当時女子を斜に見る人は多かったが正面から見てくれるかたは少なかったからだ。セミナーもコロキウムも充実していて、夢中で勉強をし、研究をした。セミナーが表現力豊かな関西弁が多かったのも心地よかった。たとえば、余田成男先生の「ビヤーツ」と波が伝播してなどという表現には驚いたが、すぐ慣れた。おかげで今でも私は東京弁でのディスカッションに違和感がある。廣田先生との 1 対 1 のディスカッションは年に 2 回か 3 回だったが 1 回あたり 5 時間ぐらいかけてくださった。充実した議論をすると時間が経つのはあっという間だなと、にこにこしておっしゃっていた先生の姿は今でも鮮明である。

気象学研究室にも超高層電波研究センター(当時)にも著名な外国人研究者が入れ替わり立ち替わり滞在されていた。私は論文原稿を持ってディスカッションをしていただいたり、信楽に案内してそのお礼にと英語を直していただいたりするのが常だった。正直に言えば、京大にもハラスメントはあったと思う。でもシビヤに感じないほど充実した良い環境で研究ができた。私の研究者としての原点はここにある。MU レーダーで観測した鉛直風スペクトルの形状を山岳波の位相変調で解釈できると考え至った時は身震いがしたし、世界初の大型大気レーダーによる台風観測のデータを解析させてもらった時は、その普通でない重力波の特徴に感動した。山田道夫さんと当時とても新しかった wavelet 解析法を重力波に適用した理論研究も行った。

研究に間接的に必要な仕事も行った。博士 1 年のときに作った観測データのノイズ除去ソフトは超高層電波研究センターの深尾昌一郎先生の目にとまり、MU レーダーの標準ソフトとするからと大型計算機利用費として 40 万円をいただいた。これは深尾先生の全くのご厚意だったのだが、自分の力で稼いだ最初の研究費といえるかもしれない。この研究費を使って 1 枚 420 円ぐらいかかる MU レーダー観測データの時間高度断面図を沢山書けたのはとてもうれしかった。また、博士 3 年のときに、当時使われ始めたばかりのワークステーションを使って、現在では気象関連のメジャーなメールリストとして利用されている ymnet を、同じ研究室の菅田誠治さんや東大の沼口敦さん、沖大幹さん達と立ち上げた。メールで茶飲み話をしながら、みんな 1 日 14 時間ぐらい仕事をしてきた。このメールのやり取りは、今でいえば twitter みたいなものだろうか。助手の塩谷雅人さん、酒井敏さんとはグラフィックパッケージ(電腦ライブラリ。命名は酒井さん)制作の仕事と一緒にさせていただいた。私は

MU レーダーのデータ解析上の必要性から色塗りソフトと対数軸の描画ソフトを作った。電腦ライブラリは、現在の MU レーダーのクイックルックにも使われているソフトウェアである。この間女子であることは忘れていた。

しかし、世の中は女子にはそう甘くなかった。就職の壁である。同世代の男子が次々と就職が決まる中、私はいつまでたっても決まらなかった。だから今のポスドクの人たちの気持ちは私には痛いほど良くわかる。このつらい時期にいかに頑張れるかが君の人生をきめるんだよと励まして下さったのは住明正先生である。佐藤さんは今不幸なんです、だからつらいのは仕方がないといって慰めてくれたのは高橋正明先生であり、なんとかしてあげてよ〜と周りの方に言って下さったのは中島映至先生だ。

そうして、博士号取得後 5 年目にして京大に助手として採用していただいた。MU レーダーでもっと研究がしたいと思った。数人のグループで申請して、共同利用者としては破格の 3 週間の連続観測を認めていただいた。このデータは私の宝物である。これによって慣性周期近くに卓越する重力波ピークの発見、永戸久喜さん・廣田先生と共に以前存在を明らかにしていた中間規模波動のきれいな事例解析(山森美穂さんとの共同研究)、重力波解像水惑星大気大循環モデルによる理論研究(高橋正明さん、熊倉俊郎さんとの共同研究)ができた。3 番目のモデル研究は会心の作であり、このスタイルは今につながっている。大気力学の著名な理論研究者である Tim Dunkerton さんに声をかけていただいて、夏休みのたびにシアトルの彼の研究所を訪問するようになったのもこのころである。

MU レーダーも面白かったが、他の緯度も知りたいと思った。最初に着目したのは赤道である。重力波の周期の長いほうのカットオフは慣性周期である。これは極で 12 時間、日本で約 20 時間、赤道では無限大である。だから、赤道では重力波でも周期が長くてスケールの大きなものが存在する。MU レーダーのような 1 分間隔のデータでなくても、1 日 2 回のラジオゾンデデータで重力波の解析がある程度できるのである。この解析を長谷川史裕さんと一緒に始めた。松野太郎先生の赤道波理論では説明できない特徴が出てきて、二人で大いに考え込んだ。これが Dunkerton さんの目にとまり、時差とインターネットを駆使した 1 日 2 交代制の共同研究が始まった。彼は解析結果を説明するかもしれない 10 ページに亘る式だけの FAX を送ってきた。私はそれを数日かけて正しいことを確認し(1 か所、マイナーな間違いがあったが)、これを使うと重力波の運動量フラックスがうまく推定できることを思いついた。そして、内部重力波ならこうだけど赤道捕捉波だったらどうか、ついでにケルビン波や混合ロスビー重力波も解析しちゃいましょうなんてことになって、赤道下部成層圏の準 2 年周期振動の駆動は、20 年間信じられていた混合ロスビー重力波とケルビン波のメカニズムでは全然たりなくて重力波が大事、というよりむしろ重力波が主であるという結論に、一気にたどり着いた。

そのころ赤道大気レーダーの構想が超高層電波研究センター(旧)からでていて、私もインドネシアのジャカルタに出張する機会をいただいた。現地の若者たちに重力波の力学とレーダー観測についての講義をするのが目的だった。にわか勉強のインドネシア語で自己紹介をしたりして楽しい時を過ごした。そして、空を見上げると中緯度とは全く異なる青空と雲があった。粘りつくような空気にふれて自分の研究している熱帯の大気を満喫した。その後、学生の吉識宗佳さんと極域重力波の研究を始めるのだが、極域の大気も見てみたいと自然に思ったのは、この体験があったからである。

吉識さんとは WMO のラジオゾンデ観測データのうち北極と南極の使えそうな地点のデータをすべて解析した。南極では昭和基地のデータが最も欠損が少なくきれいだった。そして、昭和基地のデータが他国の南極基地に比べて良く似ていること、つまり代表性が高いことも分かった。これは日本人としてうれしいことだった。しかし当時は、私自身が南極に行こうとは、ましてや今進めているような大型大気レーダーのプロジェクトを立ち上げようとは夢にも思っていなかった。ポスドクのころ、気象学会の女性評議員として女性会員の実態アンケートを取る機会があった。女子はフィールドには向かないのでデスクワークでできる研究スタイルを選んだほうがよいと言われたという回答があった。確かにその通りかもねと思ったくらいである。それに私は女子としても運動能力と腕力のなさには自信があった。そのころ尾池和夫先生の学生だった東野陽子さんが日本初の女性越冬隊員として 39 次南極観測隊の任務を全うし帰国された。帰国後の談話会で南極氷などごちそうになりながら話を聞いて、私でもちょっと無理すればいけるのかなという気になった。電子ピアノもあるというのも心強かった。そして縁というのは面白いもので、極地研への異動が決まった。

異動後、極地研での最初のセミナーで「無理だと思いますが、南極にも MU レーダーのような大型大気レーダーがあると面白いと思います」とまとめておいた。南極にはカタバ風・オゾンホール・極成層圏雲・極中間圏雲・

オーロラと中低緯度にはない興味深い固有の大気現象が存在する。このうちオゾンホールや極中間圏雲は人間活動とも密接に関連しており、地球気候の現状を理解し将来を予測する上でもその観測と監視は重要である。セミナーの後、江尻全機研究主幹がぶらりと私の居室に来られて、「僕はできるのではないかと思う、その夢を検討してみなさい、僕がバックアップするから」とおっしゃった。これが南極昭和基地大型大気レーダー計画 (Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar, PANSY) の始まり、2000 年 3 月のことである。4 月には、PANSY の相棒となる京大時代から知り合いの堤雅基さんが 40 次隊の越冬から帰ってきた。堤さんは「南極は行く所じゃない。佐藤さんはどうして極地研に来たんだ。僕は極地研をやめる」と憤慨していたが、大型大気レーダーを検討しようと思うと話すと、それなら残ってもいいと言ってくれた。MU レーダーの設計が博士論文のテーマだった夫の佐藤亨氏にも話をしたら乗ってくれた。大型大気レーダー技術をよく知る亨氏と南極で MF レーダーを建てた堤さんと MU レーダーを使ってサイエンスをしてきた私が組めば、よいチームになるのではと思った。そして 5 月に大宮の自宅で泊まり込みの勉強会を行い、PANSY レーダーの仕様をほぼ決めた。

心配だったのは私がこんな大それた計画を推進してよいものかということだった。つまり大きさに言うと世界はついてきてくれるかということだ。それで、2000 年は世界中を堤さんと旅した。成層圏国際プロジェクト SPARC の会議がアルゼンチンのマルデルプラタで開かれ、そこで初めて PANSY レーダーの構想を大型大気レーダー研究者仲間に話した。Bob Vincent さんや Marv Geller さんがそれはとても面白い、サポートしましょうと言ってくれた。アルゼンチンの帰り、ペルーで亨氏と合流し、大型大気レーダーの生みの親である Ron Woodman さんを訪ねてヒカマルカレーダーを見学させていただいた。ここでも PANSY 構想の講演をしたが、Woodman さん自らがスペイン語同時通訳をしてくださった。Woodman さんは南極初の ST レーダー (中型大気レーダーとも呼ぶべきか) を南極半島のマチュピチュ基地に設置され、世界初の南極 PMSE (極域中間圏夏季エコー) の観測に成功されていた。越冬中、苦勞して立てたアンテナポールが夏になって凍土が溶けて全部倒れてしまった話などとても参考になった。2001 年 3 月には北極のスバル島のロングヤービンに出張の機会があった。ここには、世界初の大型大気レーダーである SOUSY レーダーがマックスプランク研究所の Juergen Roettger さんにより移設されていた。ドイツにあった時はうまく動いていたレーダーが低温のため動作がおかしくなった話や、凍って膨れるので支柱は防水しなければならないとか、強風による振動を抑えるためにアンテナのエレメントにロープを入れると効果があるなどの話を伺った。ちなみに PANSY は SOUSY を意識してつけた名前である。PANSY は SOUSY の妹分。フランス語で「考える」という意味を持つ。こうして手ごたえを得たので、政府を説得するため PANSY の重要性を提言として出してほしいと、SCOSTEP や SPARC、IAMAS 等 学術組織のトップにいらっしゃった Vincent さんや Geller さん、Kevin Hamilton さんなどの研究者達にお願いした。具体的な作文では現生存圏研究所長の津田敏隆先生にも大変お世話になった。PANSY は 5 つの主要学術組織からの提言をいただいているが、この中で特に IUGG からの提言は 4 年に 1 度、10 件程度しか出されないもののひとつであり、大変名誉なものである。

同時に国内の調整も始めた。相手は何と言っても南極であり、私は女性研究者人口比が世界最低かそれに限りなく近い日本の研究者である。女子にとって日本はある意味世界よりハードルが高い。自分のフィールド研究者としての能力も未知数である。そこで、まず、東大海洋研究所の木村龍治先生の研究室の協力も得て白鳳丸の観測を計画した。極地研気水圏グループのリーダーである山内恭先生は思い切って観測予算をつけてくださった。太平洋のまん真ん中を東京からニュージーランドのホバートまで行く航路で緯度 1 度毎に気球をあげて海洋上成層圏をスキャンするというちょっと冒険的な観測である。5 人のグループだったが、あれこれ考えて山森美穂さんを船上観測の責任者とし、私は国内対応を担当することにした。最初は放球失敗や受信不調が続いたが、ラジオンデメーカーの技術者と議論しながら、船舶通信でやりとりをして辛抱強く一つ一つ動作を確認し、ついに狙い通りの観測が始まったときの感激は忘れられない。山森さんは私のどんな指示にも応えて離れ業をやっている非常にタフな頑張り屋である。彼女もこの観測を通じて大きく成長したのではないかと思う。山森さんは幼いお子さんを 2 人抱えて長距離通勤で体力的にも大変なのに、前向き思考の芯がしっかりした研究者としてがんばっていて、私は彼女に会うといつも励まされる。私はこのミニ観測プロジェクトの成功により、自分にプロジェクトリーダーとして合格の単位を与えることにした。そして、PANSY は研究組織作りのための科研費も得て滑り出した。2002 年度のことである。

私の南極への足がかりは白鳳丸の出航の次の日に出発した 43 次隊である。当時京都大学博士課程 2 年生の吉

識さんに越冬してもらうことになった。吉識さんとも話し合っ、各季節、3時間ごとに10日間ラジオゾンデを打ち上げるという観測を計画した。昭和基地の緯度では慣性周期が13時間なので重力波の位相の時間変化を追うには3時間間隔の頻度が最低必要だったからだ。観測隊仲間に理解と協力を得ないと不可能な観測だったが、彼はそれを遂行した。吉識さんから送られてきた3月の集中観測のデータには重力波の位相の時間変化が見事にとらえられていた。極域は対流圏界面が低いので、時間高度断面図の2/3が成層圏であるのも面白かった。

私自身も44次隊で参加する話が持ち上がった。大型大気レーダー計画は極地研では冷ややかに迎えられていた。南極を知らないからそんな計画が立てられるのだとか、いまからやめることも視野に入れたほうがよいという意見もあった。水前寺清子さんの「三百六十五歩のマーチ」ではないが、毎週3歩進んで2歩下がるような日々だった。そもそも私自身も大型大気レーダー建設が可能であると最初から思っていたわけではない。観測隊経験者の方々の多くがそういうなら不可能なのかもしれないと思った。しかし一方で、藤井理行極地研所長のように「PANSYはフラッグキャリアになるからがんばりなさい」と励ましてくださる方もいた。結局、昭和基地のオペレーションを経験し自分で判断するしかないと思い、44次隊に志願したのである。1年越冬して、これは無理だと思ったら潔くあきらめるつもりだった。

44次隊での私の観測と生活は「極地」にまとめてあるのでそちらを参照していただきたい。様々な体験をし、多くのことを考えた1年4ヶ月であった。越冬が終わり2度目の夏を迎えたとき、私は、家族がいなければ、もう1年昭和基地にいなさいといわれたらいてもよいなあと思えた。そのぐらい南極の自然は面白かった。越冬中に過去44次隊分の気象データも統計解析して、40次隊に参加した堤さんが不平を言っていた訳もわかった。40次隊の夏は、悪天が続き寒くて風が強く、オペレーションが十年に一度の過酷さであったということだ。そして、PANSYについては「不可能とは思えない」という結論を得た。共に夏を過ごした建築専門の夏隊員にも意見を聞いたが、「できると思う」との答えだった。検討を進める価値はある。

帰国後、相変わらずPANSYバッシングは続いていたが、かまっている暇はなかった。検討事項は山ほどあったからだ。私が越冬から戻ってきた2004年、極地研では組織改革が行われていた。PANSYは気象学と超高層大気科学の2分野に関わる計画である。極地研では気水圏グループと宙空グループに関連する計画だが、この組織改革により分野横断型の研究計画が進めやすい仕組みができた。PANSYは開発計画として認められた。研究費は得たが、いつもプロジェクトは火の車であった。MUレーダーや赤道大気レーダーを製作した企業に開発協力を求めているのだが、大企業であるが故にともかくお金がかかる。でも、企業の技術者も私たちも会議の時は真剣そのものであった。

PANSYの技術的問題は大きく二つあった。一つは電力の問題。昭和基地では200kW弱の電力ですべてまかなわれている。これに対してMUレーダーの観測には230kW必要である。輸送できる油の量には限界があるので230kWは所詮無理な話だ。PANSYではアンテナをMUレーダーの倍の1000本強にして電力を半減する作戦をとったが、120kWではまだ不可能なのである。そんなとき、Bob VincentさんからE級アンプという効率のよい増幅器をつかったらどうかとアドバイスをいただき、検討することになった。携帯電話で使われている増幅器だが、これを大電力に応用するのである。この時点でPANSYはMUレーダーのコピーではなくなった。そして検討の結果、それは可能であるという結論になった。これによりPANSYの消費電力は75kWまで落とすことに成功した。これは「実現可能」な電力である。ドームふじ越冬隊が1年間に消費する油と同程度で実績がある。

もう一つは建設期間の問題。南極では1年間に野外での建設に使える時間は約1ヶ月である。比較的穏やかな1月以外は南極の自然が許さない。昭和基地のこれまでの最大瞬間風速は60m/sを超えており、50m/sを超えることはほぼ毎年起こる。10分平均風速で40m/sを超える気象擾乱は1年間に2回以上やってくる。このような強風に耐え、低温に耐える強さを持つ1000本強のアンテナとモジュールを1ヶ月で建てる必要がある。44次隊での参加によりオペレーションの厳しさを決めるのは量より重さであることもわかっていた。南極観測期間中、段ボールを山ほど(100のオーダーでなく1000のオーダーである)運んだが、そのたび箱に書かれてある重さを見るので、自分が持って運べる重さは18kgであることを知った。それでPANSYでは手で運ぶ必要のあるすべてのパーツを18kg以下にすることに決めた。現在のPANSYのアンテナ、基礎鋼管、モジュールはほぼすべてこの仕様を満たしている。ちなみにMUレーダーのアンテナは1本50kg以上ある。そして私たちは、PANSYレーダーは建設可能であるという確信を持つに至った。

最初の概算要求書は 2005 年に書いた。しかし、極地研から出て行くことはなかった。理由は大きく二つある。一つ目は、南極予算に比べて要求額が巨大であるために、予算要求の出し方が難しいことである。二つ目は、南極の貴重な夏を 3 夏占有する計画であったためほかの分野の研究計画とのすりあわせが難しいことである。また、いつ予算が付くかわからないし、永遠につかないかもしれないという不確定要因も大きく、南極観測計画に乗せにくい。そうして足踏みが 3 年間続いた。小さいけど大事な検討事項には事欠かなかったが、さすがに 2007 年に入るとやるのがなくなってきた。私は 2005 年に東大に異動したので、PANSY を極地研内で支えてくれるスタッフも必要だったが、その確保も難航した。東大での駆け出しの教授としての仕事に忙殺されて、つらさを感じる時間はわずかであったが、この頃は PANSY プロジェクトにとっては八方ふさがりの最低の時期だったと思う。もう PANSY は死んだふり作戦しか残っていないねと堤さんに話をしたのを覚えている。それが、2008 年、急に順風が吹き始めた。南極観測の仕組みが変わったのである。山が動くのを感じた。

南極観測は公募制になった。PANSY のような不確定な大規模計画も受け入れる仕組みができたのだ。重点研究観測である。PANSY はようやく水を得て泳ぎだすことができた。PANSY の観測計画書は予算の見通しが無いという点において低い評価を受けたが、サイエンス、実現性などは高い評価を得た。そして、南極観測中期計画について乗ったのである。予算獲得のめどが立たないので、2010 年度からの 6 カ年計画は 7 通り作った。つまり初年度に予算が付いた場合、2 年目に付いた場合、...、そして付かなかった場合である。

PANSY はその 7 通りのどれにもならなかった。2009 年度に自民党最後の補正予算で内定したのである。そのあと政権が変わったり、補正予算ゆえに当初計画をかなり前倒ししなければならなかったりして苦難の時は続いたが、2009 年度に生存圏研究所から極地研に異動してこられた中村卓司さんという新しい強力なメンバーも得て、2009 年 10 月に今年度出発の 52 次隊からの PANSY 建設が決まった。現在 3 週間に 1 度の戦略会議、1 ヶ月に 1 度の企業との技術連絡会議を定期的に行い、作業を着実かつ確実に進めている。52 次隊では堤さんが越冬副隊長として、山内さんが総隊長として PANSY 建設を指揮する。

振り返るに、一般論として、予算獲得の見通しの無い大型計画の実現までの検討は、よほどの情熱と不安を感じない鈍感さを持ち合わせないと続かないと思われる。私の場合、根がオプティミストなのが幸いしたと思う。当時の日本の政策では予算獲得の確率はほとんどなかったが、数十億規模の研究ができない時代はいつか終わり、PANSY のようなボトムアップの大型研究にも予算が付く日が来るのではないかと、思い続けられた。十年間はけて平坦な道ではなかった。困難に出会うたび、励ましの言葉をいただいたり、企業の技術者の方たちの心意気を感じたりして乗り越えてきた。特に、MU レーダー、赤道大気レーダーを実現させてこられた加藤進、深尾昌一郎両先生には常に適切なアドバイスをいただき助けられた。極地研での組織や南極観測の改革はタイミング的に PANSY には幸いした。PANSY も実現できるような仕組みを考えてくださった極地研の先生方には感謝の念に堪えない。いつも見守ってくださった廣田先生にも感謝している。

十年というのは悪いことばかりではない。PANSY が行き詰まっていた 2006~2008 年には高橋正明さん、渡辺真吾さん、河谷芳雄さん、富川喜弘さん、宮崎和幸さんとグループ (KANTO グループ) を作り、高解像モデルを使っただのグローバル大気研究を行って、地球気候研究における PANSY の位置づけを明らかにできたし、PANSY の高解像観測とモデルとの協同がスムーズに行える態勢が整った。十年前学生だった人たちは成長して、現在 PANSY の底辺を支えている。PANSY レーダーの建設において大きく想定外だったのはケーブルであった。特に電源ケーブルは 1kg/m の重さがあり最長 250m もある。PANSY のケーブルの長さのはべ 102km、本数は 4700 本にのぼる。その敷設は気の遠くなるような作業だ。敷設検討は南極越冬を何度も経験されている山岸久雄先生が先導してくださったが、PANSY 若手メンバーの富川喜弘さんと西村耕司さんは、これに基づきケーブル全数敷設可能という作業工程表をあっという間に描いてしまった。53 次隊は私自身も夏隊で参加して PANSY の完成を見届ける予定である。PANSY の最終評価はこの大型観測器によりどれだけの科学プロダクツが出せるかによって決まる。私のサイエンスリーダーとしての仕事はこれからだ。観測終了の 14 年後にみな PANSY をやってよかったねと笑顔で語り合える時がくるとよいと思う。

(参考文献)

PANSY ホームページ <http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp>

佐藤薫, JARE44 オゾンホール観測, 極地, 79, 26-34, 2004.