

JARE44 オゾンホール観測

Ozonehole Observation by the 44th Japanese Antarctic Research Expedition

国立極地研究所 佐藤 薫

Kaoru Sato, National Institute of Polar Research

第44次南極地域観測隊に参加し、宙空系観測隊員として昭和基地で越冬した。目的は大型大気レーダーの予備調査とオゾンホールの観測である。どちらの仕事も、宙空だけでなく気水圏にもかかわるので、両グループ合同のオペレーションという位置づけで行った。もちろん、限られた人数の観測隊員ですべての観測を行うのであるから、私も自分の専門以外の観測のオペレーターとしての役割も担うことになった。それぞれ思い出深い仕事であったが、ここではオゾンホールの観測を中心に紹介しようと思う。この観測の一部は、一緒に越冬したNHKにより私たちの越冬中に放送されたので、ご記憶の方もいらっしゃるかもしれない。

参加の動機

まず、越冬することになった経緯を簡単に述べたい。それは、現在、極地研の江尻全機先生を中心として、宙空・気水圏の両分野の合同プロジェクトとして進められている南極大型大気レーダー計画 PANSY (Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar) に関連する。昭和基地に八木アンテナ約1000本からなるアレイアンテナを建て、約50MHzの電波を使って、地上1kmから500kmの高さの大気を精密観測し、まだその大部分がベールに包まれている南極の大気科学を徹底的に研究しようという画期的な計画である。大型大気レーダーは国内や赤道では京都大学を中心に実現されているが、南極という通常の人間活動から隔絶された地域での建設やオペレーションを考えると、検討課題は少なくない。私もこの計画のコアグループの一人として実現に向けての検討を進めるうち、南極経験者に話を聞くだけでなく、実際観測隊に参加して、じかに昭和基地の自然とオペレーションを知る必要を強く感じるようになった。参加にあたり不安がなかったわけではない。最も心配だったのは、40人ほどの閉ざされた越冬生活に自分が耐えられかということであった。でも、私をよく知ってくださっている先輩方からいただいた言葉は、「ぼくは佐藤さんについてはなにも心配していない。それより、越冬に行くのなら、これを

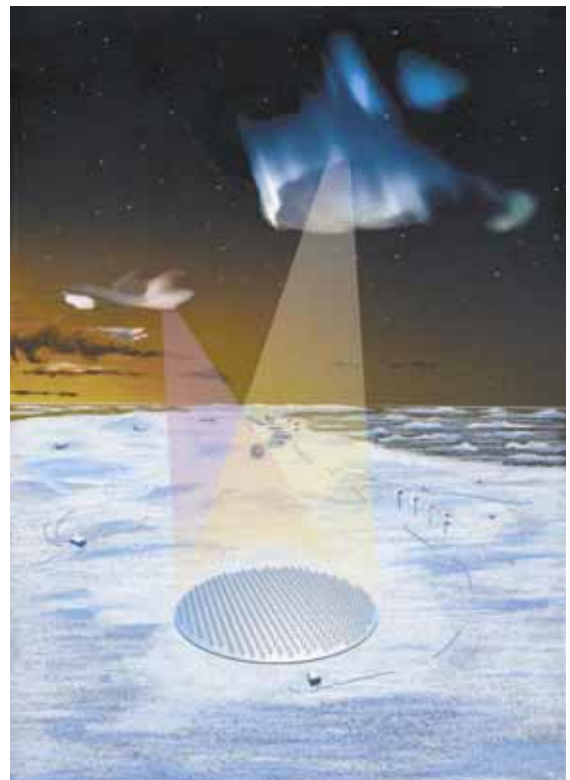


図1：南極昭和基地大型大気レーダーのイメージ

図1：南極昭和基地大型大気レーダーのイメージ

してきたといえる観測をしてきなさい」ということであった。これで前向きに考えることができるようになった。女性であることについては、先輩方に話を聞いていたので、不安はほとんどなかった。そして、観測するのならばターゲットはオゾンホールにしようと思った。オゾンホールは、人間活動のもっとも強烈な負の産物ともいえる大気現象である。太陽からの有害な紫外線を吸収し、地上生物を守ってくれているオゾン層が破壊される現象だ。1980年代はじめのオゾンホールの発見に大きな貢献をした昭和基地で、現在の最先端技術を用いて徹底的に観測しようというのである。

オゾンホールのメカニズム

オゾンは主に熱帯の成層圏（高度約 15km から 50km の大気）で生成される。これが極に向かう大規模な大気循環によって中高緯度の成層圏に運ばれて地球全体を取り巻くオゾン層が維持されている。オゾンを運ぶ大気循環は冬に強くなるので、本来、極域では春にオゾンが最も多いことになる。しかし、近年の南極では、オゾンが豊富になるはずの春にオゾン破壊が起こり、オゾン層に穴が開いたような状態になる。これがオゾンホールである。オゾン破壊は人間が作り出したフロンを原因物質として起こる。極域にだけ現れるのは、極夜期の低温のため発生する極成層圏雲と呼ばれる雲が、オゾン破壊をもたらす光化学反応の触媒となるからである。極成層圏雲は何も知らなければピンク色に輝いて見えるただの美しい雲だ。オゾンホールはオゾン破壊物質が消費され尽くす9月の下旬から10月下旬に最大となったあと、徐々に低緯度からのオゾンが流れ込んできてオゾンホールが埋まり、オゾン層は回復する。私たち44次隊が越冬した2003年のオゾンホールは過去最大規模（面積では2000年に次ぐ2番目。破壊量としては過去最大）となった。



図2：2003年7月25日に現れた極成層圏雲

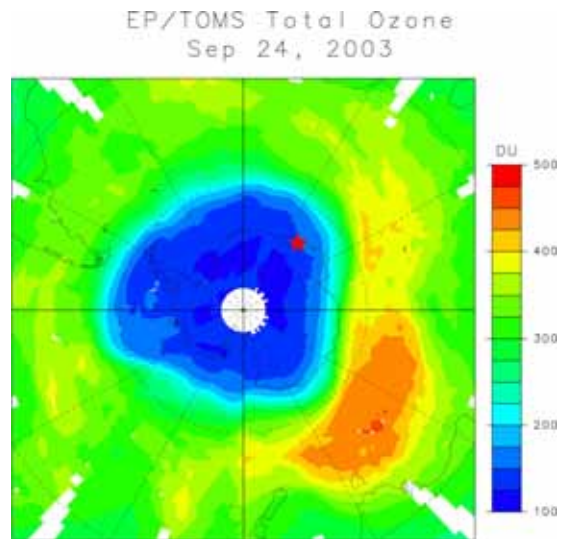


図3：2003年9月24日に最大となったオゾンホール

国際共同観測 Match

はじめ考えた観測は、オゾン層の回復期に的を絞るものであった。理由のひとつは、回復期に関する観測や研究があまり行われていないことであり、もうひとつは、オゾンホールの生成期の研究には、昭和基地1地点での観測では限界があると考えたからである。オゾンを含む空気は、冬季に成層圏に現れる極夜ジェットといわれる強い西風に乗って移動する。オゾンホールの研究には、光化学反応だけでなく、このような風による輸送も考慮する必要がある。たとえば、昭和基地で前日よりオゾンが減ったと観測されたとする。それは、昭和基地上空で壊れた可能性もあるが、どこかでオゾンが壊された空気が輸送されてきたのを単に捕らえただけという可能性もあるのだ。

ところが、2001年の夏頃、ドイツを中心とした南極で初めての国際共同のオゾンホール観測を行うが、日本も参加するかという話がきた。この計画は、2000年11月のアルゼンチンでの国際学会に参加した際、初めて聞いて、「行くことになったらぜひ声をかけてほしい、昭和基地も貢献できるかもしれない」と話しておいたプロジェクトだった。これが、NHKの南極大紀行などで紹介されたドイツ、フランス、イギリス、アメリカ、アルゼンチン、オーストラリア、そして日本の7カ国9基地をむすぶ南極初のオゾンゾンデネットワーク観測 Match である。Match 観測はドイツのアルフレッドウェゲナー研究所が考え出した手法で、複数のステーションでネットワークを組み、風に流されるオゾン層の空気を追いかけるように、オゾンの観測機（オゾンゾンデ）を次々と気球で打ち上げて、オゾンの破壊量を調べるものである。同種の観測は、北極では1996年から数年にわたり行われており、これまで考えられていたオゾン破壊メカニズムでは、現実の半分程度しか説明できないといったショッキングな結論が出されている。では、北極よりオゾン破壊の激しい南極はどうか。それが6月中旬から10月中旬に行われたこの共同観測の目的であった。

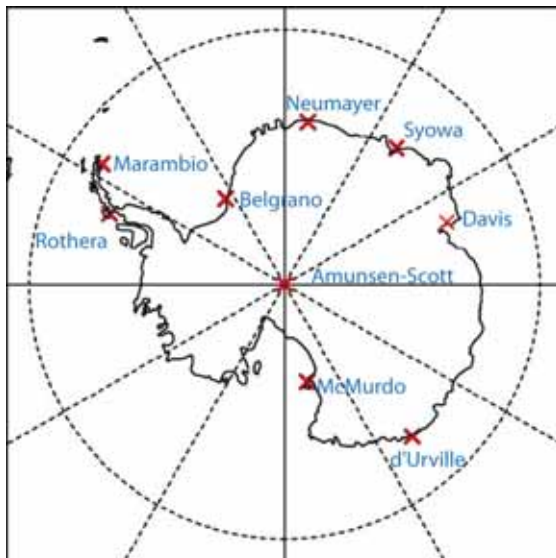


図4：国際共同南極 Match 観測

オゾンゾンデは通常の気象観測に用いられるラジオゾンデにくらべ大変高価である。極地研では Match 観測用にオゾンゾンデを20機用意することにした。するとアルフレッドウェゲナー研究所が、あと30機送るから昭和基地でうちあげてほしいと言ってきた。願ってもないうれしい申し出だったので、受けることにしたのであるが、すぐにそれが大変な仕事であることがわかった。外国で購入された新しい観測機材を譲り受けるにあたり、免税の手続きには多くの書類が必要だったのだ。ドイツのプロジェクトリーダーと書類作成に関するメールのやり取りを数ヶ月にわたり何度もした。根気の要る地味な作業であったが、無事手元に観測機が届いたときには、これによってドイツの観測本部との信頼関係が築けたような気がした。

オゾン層回復期の観測

オゾン層回復期の観測は、昭和基地オリジナルのものである。昭和基地の限られた人数で行うことを考慮し、手間のかかるオゾンゾンデ観測を1日1回、比較的簡単なラジオゾンデ観測を1日1回とし、これを Match に続く10月中旬から12月中旬の2ヶ月にわたって行うことにした。時間的に密に観測して、さまざまな時間スケールの波動や渦が大気中に混在する中、どのようにオゾン層が回復するかを調べようという発想である。そして、もうひとつ、これまで観測されていない高度領域のオゾンを測るという目的で、高度40kmまで届く高高度気球と呼ばれる大気球の観測も10日に一度程度入れることにした。私には大気球観測の経験はなかったが、私たち44次隊では、夏期間に南極周回気球(PPB)と呼ばれる高高度気球よりも大きな大気球を4回上げることになっており、三陸の宇宙科学研究所(現宇宙航空研究開発機構)の大気球観測所での訓練も受けることになっていたため、この計画は無理のないように思われた。宇宙研大気球グループの松坂幸彦さんの学位申請の公聴会を聞いて、彼のアイディアのパッキング放球法(気球尾部を風呂敷に包んで小ぶりの気球の形で打ち上げ、空中でコマンドにより風呂敷を解いて気球を展開する方法)ならばできるかもしれないと思ったのがきっかけである。これには、通常のオゾン観測に使われる ECC と呼ばれるゾンデだけでなく、高い高度で精度のよい光学式のオゾンゾンデも同時に打ち上げることにした。光学式オゾ

ンゾンデは、東北大で開発されたもので、この観測は、東北大の岡野章一先生、福西浩先生、村田功さんの研究グループ、宇宙科学研究所の大気球グループとの共同研究という形で行われた。ほとんど手作りのこの観測機の作成および調整には半年以上の期間を費やした。このように、44 次隊のオゾン観測は、オゾンホール生成期（国際共同 Match 観測）とオゾン層回復期の 6 ヶ月にわたるゴム気球観測、そして、回復期の高高度気球観測という 2 種類の観測により構成されていた。いま考えるとなんと欲張りなとも思うのだが、とにかく、準備を間に合わせ、しらせに積み込み、成田を発ったのである。

昭和基地には魔物が住んでいる

昭和基地に到着して、夏作業が始まった。私たちの隊では、NHK がオブザーバーとして加わり、放送 50 周年の南極初のハイビジョン放送を 1 年間行うということで、そのための建物（放送棟、アンテナ、発電機小屋）の建設が主な作業となった。それと並行して、PPB4 機の観測が行われた。PPB は宇宙研の大気球グループの 3 名が中心となり、宙空、気水圏、気象、機械の越冬隊員も参加する大掛かりな観測である。100m にもなる長さの大気球にボンベ 160 本分のヘリウムを充填し、ローラー車という特殊な車両で徐々に立ち上げ、数百キロもの観測機を打ち上げるの



図 5：JARE44 夏の PPB 観測

である。私の作戦は、PPB 観測がおわったあとで、宇宙研の大気球グループの指導の下、越冬中に 5 回行う予定の高高度気球観測の練習を行うというものであった。私たちは成功を疑っていなかった。ところが、2002 年 12 月の末に行われた最初の PPB 観測では、観測機を残して気球だけが飛んでいってしまうという思いがけない結果となったのである。上空を周回して観測を終えたあとに気球と観測機を切り離すため動作するはずのカッターが、誤動作したのだった。2 機目の PPB は、考えられる可能性を排除する対策がなされ、無事、観測機をぶら下げて気球が上がっていったかに見えた。が、成層圏に到達する前に落ちてきた。これらは日本では一度も起こったことのない予想外のトラブルだった。私たちは昭和基地には魔物が住んでいると冗談で話し合った。そして、PPB と同じタイプのカッターコマンド回路を使っていた高高度気球の練習放球も失敗したのである。結局、その夏は、誤動作の原因はわからなかった。そして、明らかになったことは、パッキング放球法が使えないこと、その結果、高高度気球放球の難易度が一気に上がったことであった。緊急のグループ会議を開き、宇宙研の並木道義さん達は、放球方法を伝授してくださったが、昭和基地を発つとき、ヘリコプターの前で私の耳元でささやかれたのは、2 機成功したらいいほうですよという言葉だった。私は自分の置かれた状況を理解するまで時間がかかったが、とっさに思ったのは、これは放球グループの人たちには黙っていようということであった。失敗して当然なんていう意識を持ったら、成功するものも失敗してしまう。とにかくベストを尽くしてみようと思った。観測は 10 ヶ月も先なのである。考える時間はたっぷりある。

そして、オゾン観測が始まる前の 5 月まで遊んだ。ピアノを弾いたり、調理の手伝いをしたり、夜遅くまで仲良しの隊員達とビール片手におしゃべりしたりして、楽しい時間をすごした。そして、前からやってみたかった昭和基地の気象解析を始めた。まず、1 次隊から 43 次隊までの 1 時間毎（初期のころは 3 時間

毎)の昭和基地の地上気象データを気象隊員の協力も得て整理した。それから、過去の観測隊報告からブリザードのデータを手作業でパソコンに入力した。8次隊の建てた歴史ある観測棟で、ひとりデータを眺め、解析していると、過去の観測隊の夏作業の様子や、越冬生活がありありと想像できるような気分になった。

長期にわたるゴム気球観測

Match 観測の始まる6月が近づき、オゾンゾンデの準備を始めた。放球と受信はそれぞれ放球棟と気象棟で行うことにしたが、オゾンゾンデの事前調整やデータチェックをするスペースが気象棟にはない。簡易な方法も考えられたが、精度を要求される観測で妥協はしたくない。それで、一人が調整作業を環境科学棟でおこなって電波を飛ばし、それをもう一人が気象棟で受信してパソコンでの作業を行うことにして、必要なデータは無線でやりとりをすればよいということを一晩考えて思いついた。Matchは24時間いつリクエストがくるかわからないので、2組に分かれ、私と気水圏の吉澤宣之さんを中心に、宙空の門倉昭さんと横山恵美さん、気水圏の橋田元さんを加えた5人で臨み、人手が足りないときには、気象隊員に補助をお願いすることにした。後半の回復期の観測は時刻を固定したので、吉澤さんと2人での作業となった。オゾンゾンデ観測の無線は、設営事務室等で聞かれていて、たまにになってしまう頓珍漢なやり取りは多くの隊員の笑いを誘っていたそうである。

NHKの撮影も何度か入った。NHKは、どんな作業も最初の1回をとりたがった。こちらも1回目はただでさえ緊張して、不慣れでストレスの多い作業となるのだから、撮影が入ることは正直しんどかった。でも、放球直前に起こった小さなトラブルの対応にNHKの人たちが協力してくれて助かったという場面もあった。最初の観測日には、オゾンゾンデの放球には難しい14m/s近い強風が吹いていた。何もこんなときにこんな風が吹かなくてもと思ったのだが、南極の厳しい自然をコントロールすることはできない。神経を集中し、デリケートなゴム気球が撮影のカメラに当たらないか気にしながら、風が弱くなる瞬間を捉え、放球棟から飛び出した。タイミングがうまく合って放球は成功した。思わず顔をほころばせてしまったところまでしっかり撮影されてしまったようだ。小島秀康隊長も見守ってくださっていた。その日は死んだように眠った。

オゾンホール生成期からオゾン層回復期までの6ヶ月に渡る気球観測は145回に及んだ。9割を超える成功率であったが、何度となくトラブルや失敗が起こった。原因は概して南極という特殊環境が影響したものがほとんどである。静電気や夏が近づいてからの熱によるトラブルは、それが原因と突き止めるまで時間がかかった。強風にも悩まされた。放球棟の中で気球にヘリウムガスを充填しゾンデを結んで準備ができたなら、気球を右手で、ゾンデを左手で持って構える。そして、放球棟から飛び出し、まず気球を、続いてゾンデを放す。その1秒未満の微妙なタイミングのずれが難しい。タイミングを誤ると気球とゾンデを結ぶ紐が切れて、気球だけ飛んでいってしまうのだ。平均風速は18m/s程度なのに最大瞬間風速28m/sという、つまり激しい乱流状態の放球は思い出に残る観測だ。紐が切れて手元から離れた気球がくるくる回転して目の前にしばらく留まっているのである。きっと今、私の目の前には渦があって、それにトラップされているのだろう、面白いことが起こるものだと眺めていると、次の瞬間、気球は突風に乗って猛スピードで水平に飛んでいき、数百メートル先のアンテナに当たってパァンと割れた。このときは、大切なゾンデが手元に残ったのを幸運と思った。でも黙って自然に好き



図6：強風時のオゾンゾンデの放球

放題されているわけにはいかない。気球とゾンデの間をゴムで結んだらどうかというのは気象隊チーフの江崎雄治さんのアイデアだ。このアイデアをもらい、風の音を聞きながら何度もイメージトレーニングをして、放球をついに成功させたときの興奮は忘れられない。江崎さんの「放球確認！」の言葉に、思わずガッツポーズをしてしまった。トラブルは厄介だが、ひとつずつ乗り越える楽しさもあった。

高度な技の高高度気球観測

そして、いよいよ高高度気球のシーズンがやってきた。まず、すべての観測機材をそろえ、動作チェックを行う。高高度気球で打ち上げる光学式のオゾンゾンデは日本で何度もテストしたものなので、確実に動くはずだった。が、肝心の信号がでないという症状がいきなり現れた。久しぶりに扱ったので何か見落としがあるのだろうと何度も確認したがやはりおかしい。リチウム電池の電圧を調べてみると、あるべき値を示さない。長時間持たせるため電池を並列に半田付けしてあったため、微妙な電位差が生じて放電していたのである。物知りの門倉さんによれば、電池を並列に使うときには放電しないように半導体をつけるのが普通なのだそうだ。実は、ちょっとタイプが違うが予備のリチウム電池は沢山持ってきていた。出発直前に虫のしらせか急に心配になって買い込んでいたのである。半導体は、通信の山下和久さんが「ありますよ」と出してきてくれた。この人は電子パーツなら何でも見つけてきてしまう不思議な人だ。通信室は昭和基地の秋葉原と言われていた。電池の容量は日本にいる夫にインターネットで調べてもらって並列の個数を計算し、間違っただけで短絡させ、爆発しないよう慎重に半田付けをした。これは1回の観測で2時間ほどの作業だったが、半田付けは得意だったので苦痛ではなかった。むしろ、熱収縮チューブとケーブルの色あいを考えたりして、まるで刺繍をするような気分であった。ゾンデの準備はこれでできた。

次は気球である。私は大気球の経験はほとんどないので、経験の豊富な橋田さんがたよりであった。彼は何をやってもセンスがあり、要所要所で助けてくれた。顔に似合わず大変な力持ちで、缶詰の沢山はいった中ダンボールをさっさと運んでいってしまう。梱包に使われた木枠の始末も普通はのこぎり等を使うのだが、彼には必要ない。脚を使ってあっという間にちいさな木片に変えてしまう。ヘリウムボンベの作業も率先してやってくれた。私が宙空のレーダーのトラブルで基地から離れた小屋に何度もいかなければならなかった時も、帰ってくるころを見計らって、観測棟で黙ってお湯を沸かしてしてくれた優しい心の持ち主でもある。南極人とは彼のような人のことを言うのだろうと思った。そして、どのような仕事も観測隊のオペレーション成功という視点で損得を考えずに積極的に取り組む。門倉さんからも同じような姿勢が感じられた。とにかく観測隊の仕事は昭和基地に残された私たち36人で行わなければならないのである。お互いの個性を見極め、つべこべいわずに短所を補い合って遂行する、これは越冬中私が学んだもっとも大切なことであった。

高高度気球観測は北の浦の海氷上で行った。ここには、大きな氷山もなく放球作業に必要な広大な平原があった。放球方法が変わったので、当初予定していた気水圏、宙空、電離層、気象の観測系の隊員では足りず、庶務、医療、調理、衛星受信、航空、機械、環境保全、フィールドアシスタントなど設営系の人たちにも応援を頼んだ。明るくなって、多くの野外活動や、研



図7：高高度気球観測

修旅行、NHK の撮影が入る時期の人員確保は大変だった。観測の手順としては、まず、前日に NOAA の雲画像や天気図を見ながら高々度気球が放球可能な風 (3m/s 以下) になるかどうか予想する。そして、前夜のミーティングで観測の可能性をアナウンスし、当日は朝 7 時と 9 時に 2 回判断して、9 時の時点で海氷上に出かけるかどうか決めるのである。私は気象が専門なのだが、中緯度とは勝手が違い、迷うことも少なくなかった。放球することに決めると、全館放送をかけ、集まってもらう。そして、前もって準備していた、高高度気球、ヘリウム、光学オゾンゾンデ、電池、ゴム気球、ロープ、複数のポンベをつなぐ枝管、ガスホース、ビニールシート、脚立、旗、その他、必要な機材をそりと雪上車につんで出かける。ECC オゾンゾンデは室内の直前準備も必要なので、後からスノーモービルで運んでもらうことにした。11 月はじめに行われた 1 回目のトライは、久しぶりの大気球の放球で、かつ、手順が確立していないこともあり、手間取った挙句、気球が破れて中止となった。「やはり、」とショックだったが、夕方反省会を開き、よい練習になったとみんなと自分を励ました。そして、橋田さんとやり方を再検討して、次のチャンスを待つことにした。そして、2 回目のトライがやってきた。風も弱くベストコンディションになり、体もよく動き、見事に成功した。手順はすべて完璧で反省することは何もなかった。



図 8 : 高高度気球観測

11 月の天気はあまりよくなかった。3 回目のトライは、あとで NOAA 画像をみるとよくこのような日に上げることを決断し、成功させたものだと思うような天気だった。風が最初の成功のときほど弱くなかったので、気球頭部を立ち上げた次の瞬間、気球は流れて横倒しになってしまった。あわてて気球を押さえる指示をだし、オゾンゾンデを気球につないで、気球の動きをみながら、気球尾部とアンカーをつなぐロープを切った。気球尾部は海氷面すれすれを走っていった。そして、気球は、風下で最初のオゾンゾンデを持っていた江崎さんに襲い掛かった。江崎さんは、足に絡まる気球を上手に

よけ、オゾンゾンデを地面に置いて (本人は放り出したと反省しきりであったのだがその判断がよかった) 一回転して逃れた。残りの遮光版、光学オゾンゾンデは無事に上がっていった。およそスマートとはいえない放球だったのだが、それでも、この気球は 40km を超え、正常なデータが取得できたのである。最初の成功と異なり、成功の感動よりも、怖いことをしてしまったという気持ちのほうが強く残った。橋田さんと危険回避の対策を議論し、4 回目のトライを迎えた。12 月になり天気のよい日もふえ、あたたかくなってきていた。しかし、風は高高度気球を放球できるほど弱くなることは少なかった。こんどはアンカーで固定せず、気球の立ち上げから連続的にオゾンゾンデを放つ方法をとった。気球頭部を保持する人たちは、気球立ち上げのため手を離れた直後、気球がからまらないよう速やかにその場を離れなければならない。後ろ向きに一回転して離れるといった少々大げさな動作が、南極の大空の下映えた。そして、気球はぐんぐん立ち上がり、オゾンゾンデが次々と上がっていったのである。理想的な放球だった。到達高度も 42km を超えた。そして、5 回目は強風で気球が破れて中止となり、6 回目も少々風が強かったが、ベテランの粘りで無事成功させることができた。結局 4 回の成功。2 回成功したらいいほうといわれた難易度の高い観測が 200% 以上の成功率で終了できたのだ。夜のミーティングで高高度気球観測終了の報告をしたとき、湧き上がるような大きな拍手をもらい、「佐藤さん、おめでとう」と声をかけてもらったら、それまでの苦労もふっとん

でしまった。

45 次隊が到着して、2 回目の夏が来た。45 次夏のメイン観測も大気球観測だった。気水圏のクライオサンプラーという 30km までの高さの空気を次々と採取する観測機を 2 機（実は橋田さんのメイン観測であり、45 次菅原敏さん、石戸谷重之さんの観測）、44 次の夏であげられなかった PPB が 1 機、そして、高高度気球が 3 機である。44 次放球班はもはやプロであったと思う。コマンドの誤動作問題を解決し、若手の飯島一征さんと共に再び昭和基地にやって来た並木さんの指示のもと、すべての作業に自信を持って取り組むことができた。それは、風待ちのすごし方までしかりであった。放球はすべて成功し、高高度気球にはパッキング方式が用いられた。気球に関するやりとりが無線でなされ、基地中に響き渡った。それは第 44 次日本南極地域観測隊の底力を南極の地に知らしめているかのようであった。