

成層圏フロンティア

——オゾンホールと成層圏飛行船——

南極にできたオゾンホールのは、
世界中に大きな衝撃を呼び
原因となったフロン規制に向けて、
世界規模での動きが巻き起こっている。
だがオゾン層の保全には、
現状の規制だけで十分だという確証はどこにもない。
まだまだ今後の研究に負う部分が大きいともいえるだろう。
地球をとりまく大気についてのデータや研究は、
将来さらに重要になってくるテーマのひとつといえる。
同時に高空を調査するための技術は、
新たな技術的可能性をも数多くはらんでいる。
今回は、オゾン層破壊の実態に目を向けるとともに、
成層圏に滞留して、さまざまな仕事をする事ができる
成層圏飛行船の話題をレポートしてみる。

写真：アポロ11号から見た地球

オゾンホールが南極以外の上空に できる日は来るのか？ 発見からフロン規制発効までの 経緯と現状を追う

南極上空のオゾンにできた穴は、季節の移り変わりとともに大きくなったり、少し縮まったりしながら、徐々に拡大の方向に向かっているといわれる。これまでに南極のほかに、北極でもオゾンホールに近いオゾンの低濃度が報告されており、オーストラリア上空などでもオゾンの減少が観測されている。やはり地球全体でのオゾン減少は着々と進行しているのだろうか。オゾン層の破壊状況と、よくいわれるようなフロンガスとの関係の全貌を、過去の経緯をふりかえりながら、もう一度見直してみる。

オゾンホール出現

おかしい、機器が狂っているんじゃないのか。南極昭和基地・越冬隊のメンバーは、不安を感じながらその数値をみつめていた。オゾンがしかるべき量の半分しかない。しかも地上20 kmのもっとも濃いオゾン層で激減していることを計測結果は示していた。もし機器の故障であるなら、一年間、孤立無縁の極寒の世界に籠ってせつせと積み上げてきたデータが、すべてゴミになってしまうのである。

だがそうした心配とは裏腹に帰国後にチェックした観測機器には、どこにも異常はなかった。どうにも腑に落ちない気持ちのまま観測から約2年後の1984年、ギリシャで開催された国際シンポジウムで、隊員であり気象庁・気象研究所の研究員である忠鉢繁氏は、機器の誤りかもしれないことをほのめかしつつ、このデータを発表することとなった。もしデータが正しいとすれば、かなり異常なことが起こっているはずだった。

この発表の翌年の1985年、英国のジョー・ファーマン博士が、衝撃的な論文を発表した。南極での観測データをもとに書かれたこの論文では、オゾン減少が最近に限ったものではなく30年近くも前から着々と進行してきており、とくにこの10年で約半分にまで減少してきていることを述べていた。そしてその原因はフロンガスが分解された時に出る塩素がオゾンと反応してしまうことにあるという。

ファーマン論文以前からも米国NASAの観測衛星ニンバスは長年にわたってオゾン観測を行ってきたが、こうした現象を発見するには至っていなかった。というのもそれまでのニンバスのオゾン観測では、一定基準値以下の数値は計測ミスなどの不良値として捨像されていたからだった。ファーマン論文

を受けて、ニンバスの保存データをチェックする作業が行われた。はたして観測衛星は南極でのオゾン減少を記録していた。とりわけ春には南極上空のオゾン濃度が極度に薄くなって、穴があいているかのように見える。穴は南極大陸全土を覆ってあまりあるほどの大きさである。この穴のように見えるオゾンの薄い部分を米国のジャーナリズムはオゾン・ホールと名付けた。

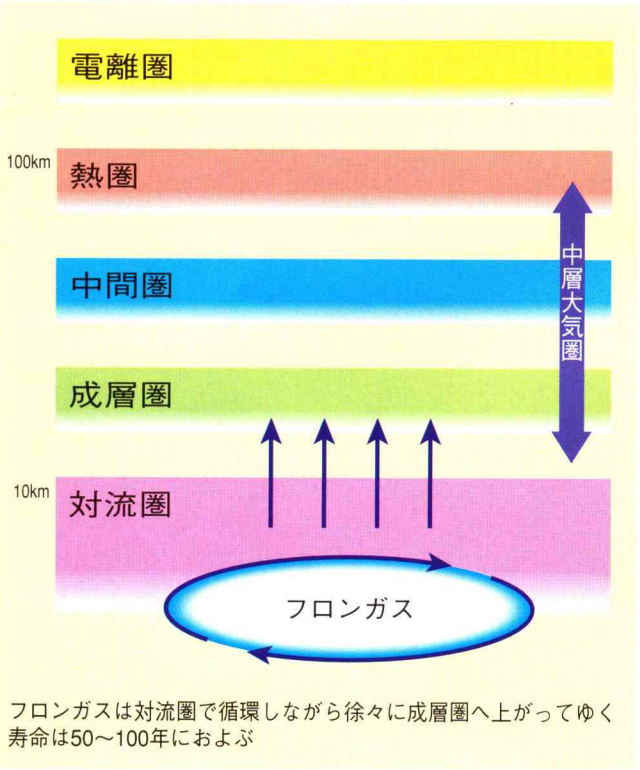
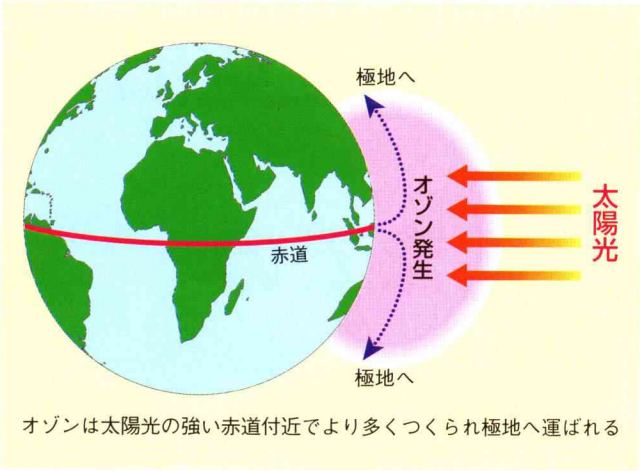
フロンガス主犯説が明らかに

フロンガスがオゾン層を破壊する危険性があることは、1974年の時点でシャーウッド・ローランド博士と、研究生のマリオ・モリーナによって予言されていた。米国ではそれ以来、科学者による活発な論争が重ねられ、1978年にはスプレー製品へのフロンの使用が禁止される処置がとられていた。

しかしフロン擁護論側の指摘によれば、フロンが塩素に分解されてオゾンを破壊するのは高度40 km以上の上空であり、オゾン層のある20 km前後の成層圏下部では破壊的な反応は起こらないはずだった。フロンガスへの規制が実施されたにしても、それはあくまでも目に見えない危機への準備のはずだった。そうした背景のもと、観測衛星のデータがオゾンホールの存在を実証したことは、大きな衝撃につながった。

とはいってもオゾンホールの原因が本当にフロンガスなのかどうかについては、まだ確実な証拠がなかった。酸素原子3個からなるオゾン分子はさまざまな形で他の物質と結び付きやすく、その減少が必ずしもフロンによるものとは特定できなかったのである。火山説や太陽活動説など、フロン意外の説も提示されていた。

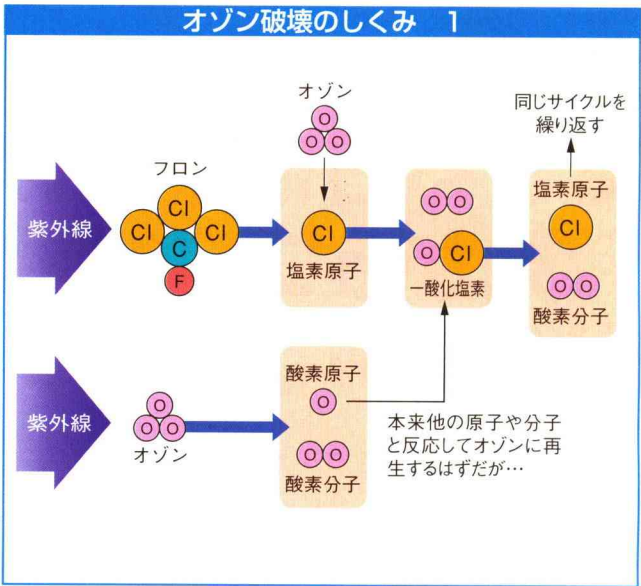
米国はそんな中で1987年に高度20 kmの飛行が可能な偵察機U-2を改造した成層圏観測機を飛ばし、南極上空の空気を



調査した。その結果、オゾンが減少しているあたりでは通常の数百倍もの一酸化塩素が発見される結果となった。そして一酸化塩素の多いところでは、オゾンはそれに反比例して少なくなっていたのだ。オゾン破壊がおこるメカニズムについては、さらに時間が必要とされるが、オゾンホール其主要な原因がフロンガスであることは、これで決定的になった。それだけの量の塩素が存在している原因は、フロン意外には考えられなかったのである。

南極上空で生じた急激な破壊

なぜ高度20km前後では起こらないとされていたフロンガスの

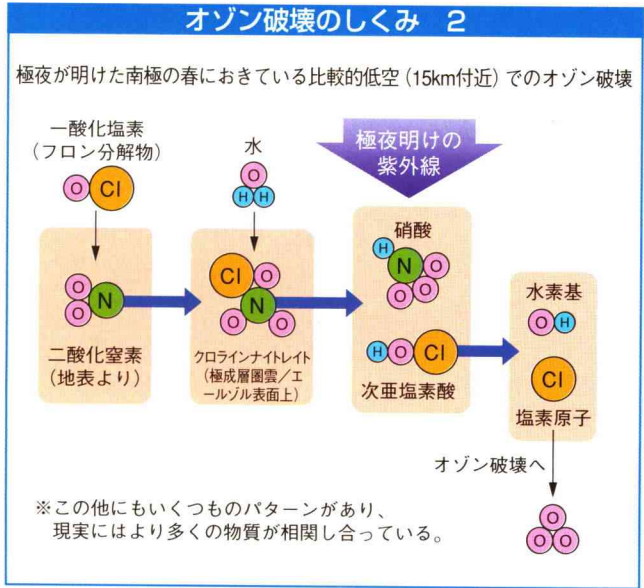


分解が進んでいたのだろうか。この疑問に答えるものとしてクロズ・アップされるようになったのが、「極成層圏雲」と呼ばれる成層圏にできるエアロゾルの存在だった。どうやらこのエアロゾルを構成する固体粒子表面に春の太陽が当たり、さまざまな光化学反応の連鎖によって窒素酸化物、塩素酸化物などの反応が促進され、予想外の一酸化塩素を放出させることになったらしいことが分かってきた。

一酸化塩素は塩素ガスがオゾンの原料でもある酸素の原子とくっついてしまったものだが、これがオゾン層に対して破壊的な作用をおよぼすのは、1個が1個を破壊するというようなものではなく、連鎖的にオゾンを破壊していく性質があるためである(チェーンリアクション)。一酸化塩素という物質はそれ自体が不安定で、酸素と出会うと一酸化塩素中の1個の酸素と外部の酸素1個が反応し、酸素分子(O_2)と塩素ガスに分解してしまう。ここでいう外部の酸素とは、むしろオゾン起源のものである。さらに放出された塩素原子はふたたびオゾンと反応し、一酸化塩素にもどる。こうしてフロン起源の塩素は次々とオゾンの間を渡り歩きながら破壊活動を繰り返していくことになる。1個の塩素原子は、成層圏にある間に約10万個のオゾンをこわすことになるという。まさしくオゾンの殺し屋ともいふべき破壊力である。

さらに南極の秋から春にかけて発達する「極うず」といわれる一種の偏西風が極周囲の大気を孤立分離させることも、南極でとくにオゾン層破壊が顕著となるメカニズムを形成していると考えられている。北極でも南極のオゾンホールに近いオゾンの低濃度域が観測されているが、南極大陸上空にとくに顕著なのは「極うず」のためだと考えられている。

熱を大量に受け取る赤道付近から、熱を反射・放出する極



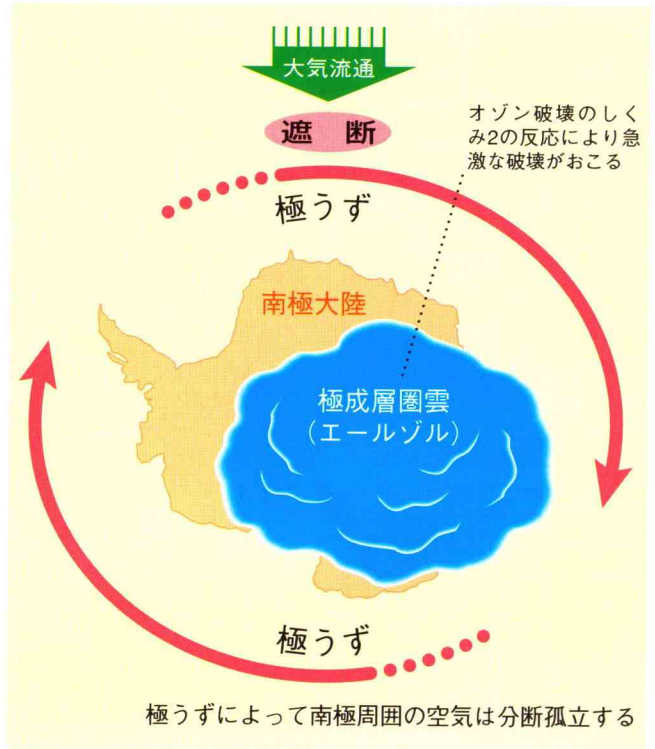
付近へは、大気の大循環と表層海流などによって熱の移動が起こる。成層圏のオゾンも赤道付近でより多く生成され、大気循環によって極地に運ばれているらしいと考えられている。「極うず」は、こうしたオゾンの流れも断ち切ってしまうというわけだ。また一方でうずの弱い時期の大気循環はフロンも極地に届ける働きをしている。世界中で放出したフロンは、大気循環によって、南極に運ばれ、その上空の特殊な状況によって、急激なオゾン破壊をまねいているのである。

さらには、炭酸ガスなどの対流圏では地球温暖化につながるガスの増加が成層圏では逆に熱の放出を促し、「極成層圏雲」の発生を促進しているという説もあるようだ。いずれにせよ、オゾン層破壊のメカニズムやデータについては、今後の研究に期待する部分が大きいと考えられそうである。

規制は進んでいるが……

フロンガスは、正式名称をクロロ・フルオロ・カーボン（塩素・フッ素・炭素の化合物）といい、自然の状態では存在しない人工物質である。塩素やフッ素の数の違いによってさまざまなものがあるが、概して沸点が低く、油脂を溶解しやすいなどの特徴をもつ。さらに化学的に安定で爆発なども起こしにくいという人体への毒性がまったくないなど、使用にあたっての安全性が高い物質だった。こうしたフロンの性質は、1928年に発明されて以来あらゆる工業分野で受け入れられ、冷蔵庫用の冷媒をはじめ、精密機械や半導体などの洗浄、プラスチックの発泡材、スプレー用ガスなどとして、幅広く使われてきた。世界の年間フロン生産量は100万トン以上といわれている。

米国の成層圏観測機が飛んだ1987年、オゾン層破壊に対する危機感は一気に高まり、「オゾンを減少させる物質に関す



るモントリオール議定書」が採択されることになった。議定書は1989年に発効となり、先進国では1996年の特定フロン（オゾンの破壊効果が高いもの）全廃を定め実施してきたのに加え、2020年までには代替フロン（水素原子を含んだ対流圏内でこわれやすいものと塩素原子を含まないもの）も撤廃することを目標としてはいる。しかしこの規制もあくまで先進国に適用されたものであり、途上国では特定フロン全廃は2010年とされており、代替フロンのもっとも遅いもので全廃は2040年である。またこれまでに排出した1500万トンを超えるフロンも、50～100年は分解されずに大気中に残留していくことを考え合わせれば、事態はけっして楽観的ではないといわれている。使用過程での回収技術も開発され、大気中への放出量が減っているといっても、それで安心というわけにはいかないようだ。

危機への認識

生物進化の歴史のうえで、陸上に植物が上がってきたのは約5億年前、動物は約4億年前だとされている。地球ができたのが46億年前で、生物が生じたのは40億年前だとすれば、30億年以上の長い時間を、生命は海の中で暮らしていたことになる。この期間に酸素とオゾンがつくりだされた。オゾンのもとになる酸素は海中の植物が生まれてはじめてつくられるようになったが、その酸素からオゾン層がつくられるのに約20億年がかかったという。生命が海に潜っている期間の3分の2におよぶ時間をかけ、海中の植物たちは地上の生命を保護する傘を

■モントリオール議定書に基づく規制スケジュール						
物質名	先進国に対する規制スケジュール			途上国に対する規制スケジュール		
附属書A グループI 特定フロン	1989年以降 1994年 1996年	1986年比 全	100％以下 25％以下 廃	1999年以降 2005年 2007年 2010年	基準量比 全	100％以下 50％以下 15％以下 廃
附属書A グループII ハロン	1992年以降 1994年	1986年比 全	100％以下 廃	2002年以降 2005年 2010年	基準量比 全	100％以下 50％以下 廃
附属書B グループI その他のCFC	1993年以降 1994年 1996年	1989年比 全	80％以下 25％以下 廃	2003年以降 2007年 2010年	基準量比 全	80％以下 15％以下 廃
附属書B グループII 四塩化炭素	1995年以降 1996年	1989年比 全	15％以下 廃	2005年以降 2010年	基準量比 全	15％以下 廃
附属書B グループIII 1,1,1-トリクロロエタン	1993年以降 1994年 1996年	1989年比 全	100％以下 50％以下 廃	2003年以降 2005年 2010年 2015年	基準量比 全	100％以下 70％以下 30％以下 廃
附属書C グループI HCFC	1996年以降 2004年 2010年 2015年 2020年	基準量(キャップ2.8%)比 100％以下 65％以下 35％以下 10％以下 全 廃 (既存機器への補充用を除く)		2016年以降 2040年	2015年比 全	100％以下 廃
附属書C グループII HBFC	1996年以降	全	廃	1996年以降	全	廃
附属書E グループI 臭化メチル	1995年以降 2001年 2005年 2010年	1991年比 全	100％以下 75％以下 50％以下 廃 (必要不可欠な農業用を除く)	2002年以降	基準量(1995年から1998年 までの平均)比 100％以下	

資料：環境白書

あらかじめ準備したことになる。しかも5億数千万年前のカンブリア紀以前までは、生命はきわめて単純な海の藻に代表されるようなものばかりだった。20億年かけてオゾン層が生じ、その後に「カンブリア爆発」といわれる急激で多用な生物の進化が起こったことは、まさにグッド・タイミングだった。

生命の歴史というスケールで見れば、「爆発」の直後といっていっくらの時期に生命は陸上に上がっている。オゾン層が準備されて、はじめて可能になった快挙だったはずだ。

こうした気の遠くなるような歴史を経て作られたしくみを、われわれは100年もかけずに壊してしまおうとしている。この事実を誰もが厳粛に受け止めるべきであろうことに、おそらく異

論はないだろう。

今後、懸念されるのは、いうまでもなく極地以外の上空でオゾン減少がおこってくることである。文中では分かりやすさを重視したため、オゾン破壊のメカニズムのごく一部のみを紹介するにとどめたが、そのしくみは複雑でいくつもの段階に分かれており、総体としての結果を予想するのがなかなか難しいようである。だがもし、悪夢が忍び寄ってくる日が来たとしたら、われわれにはいったいどんな防御策が与えられているのだろうか。後半では、その対策のひとつとして研究が進む成層圏飛行船の開発状況を取り上げてみる。

[取材協力：国立環境研究所]

オゾン層の観測と保全活動に可能性を秘める成層圏飛行船

米国は軍用機を改造した成層圏観測機を飛ばして、オゾン破壊とフロンガスとの関係を実証したが、成層圏の観測やオゾン層の保全活動には、より長期滞在ができ、しかもその航空機自体が環境破壊要因を持たないものが望ましい。そこで有望視されているのが高度20kmに達することのできる成層圏飛行船である。しかし、その開発はまだ端緒についたばかりであり、将来の動向もまだ未知数であるという。オゾン層保全に可能性を秘める成層圏飛行船とはどんなものなのだろうか、その実態と可能性をレポートしてみる。

フロン塩素を無害化するノウハウ

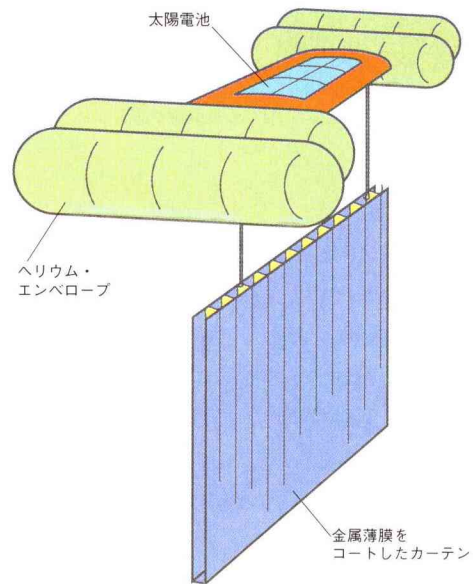
南極をはじめ全地球規模で進行しているオゾン減少が、フロンガス起源の塩素によるものであることが、今日では確実視されるようになってきたが、オゾン破壊は化学過程と大気の力学的な運動が相関し合っている複雑な現象であり、観測活動も進んできたというものの、フロンの影響を正確に把握するには、まだまだデータ不足であるといわれる。

フロンによるオゾン破壊対策としては、フロンの使用を制限するとともに大気中に放出しないような回収設備を充実させていくという方法がある。その一方で、現実には起こっていることのより正確な実態把握、そしてさらには、すでに放出してしまったフロンを処理するノウハウを模索することが考えられる。

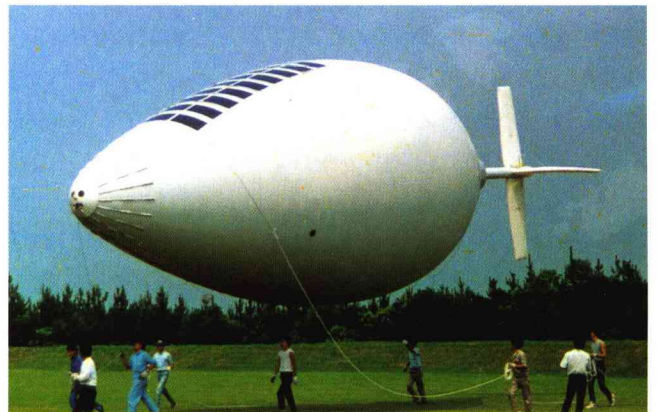
工業技術院・機械技術研究所の恩田昌彦計測制御研究室長らが共同で研究を進める成層圏飛行船の研究は、成層圏に長期滞在しさまざまな観測を行うことを可能にする。さらには、南極上空の成層圏で、フロンガスが分解されてできた塩素を処理する、いわゆるオゾンホール修復作業の構想も温められているという。

飛行船によるオゾン層の保護活動という発想は、1990年代はじめに米国のウォン博士によって最初に提案された。概要としては太陽電池を動力源とする飛行船から表面に金属薄膜をコートしたカーテンを垂らし、その表面に塩素原子を吸着していきこうというもので、5年間にわたって無人の飛行船を成層圏に滞在させ、活動をさせようという構想だった。

恩田氏らの共同研究で「環境保全への応用」を担当している国立環境研究所の井上元氏らは、このウォンの発想をより現実性の高いものにすべく検討を進めている。恩田氏によれば、膜を垂らすという方法は、化学的には適正であっても、直接塩素をキャッチしてまわるため効率が上がりにくく、相当数の機体が必要になるという。そこで井上氏らは、カーテンを垂らす代わりに金属ナトリウムを蒸発させて噴霧するという方法を考えた。ナトリウムは反応性の高い物質であるため、さま

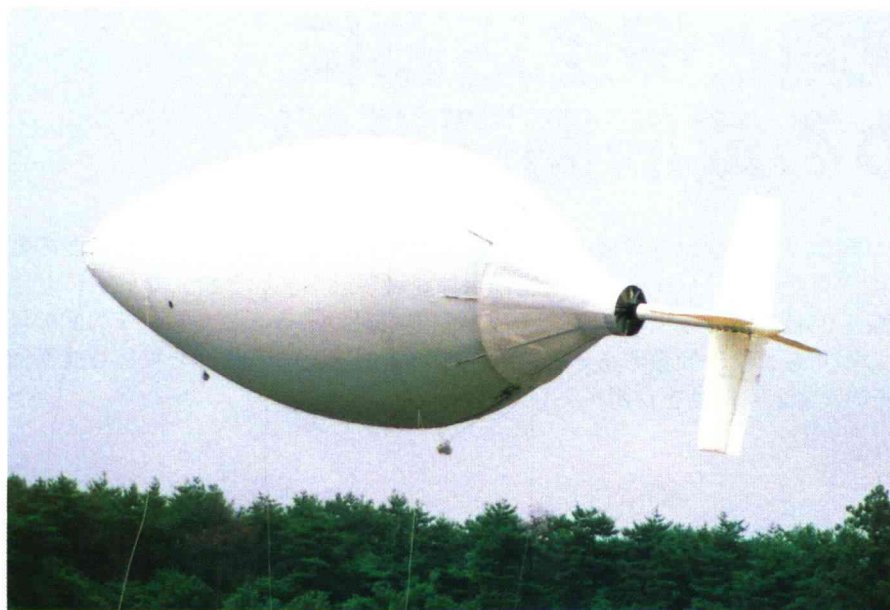


米国ウォン博士が考案したオゾンホール修復機のイメージ。



HALROPの縮尺模型。ミニチュア版ながら全長は約20mある。前面の黒く見える長方形は太陽電池。

ざまな形で存在する塩素と反応し、塩化ナトリウム、つまり食塩に変化させてしまうというわけだ。必然的にナトリウムは酸素とも反応するが比率からすればごく少数の塩素原子が悪影響をおよぼしていることから、塩素を無害化するにあたっては



後方から見た縮尺模型。尾梁のつけ根に推進装置がある。

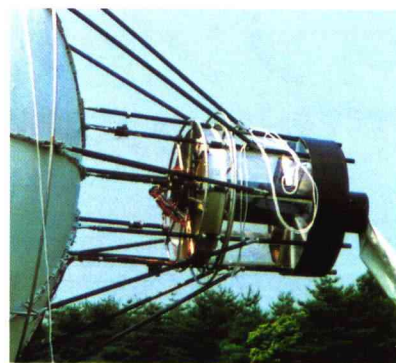
効果が期待できるという。

また、とてつもなく広い成層圏のどこでこの活動を行うかが問題だが、さしあたっては、急激なオゾン破壊が進んでいる極成層圏雲（前項参照）のあたりをその目安にできるという。雲のある位置は比較的つかみやすいことから、目標点も絞り込めることになる。活動期間としては、目安として10年オーダーでの滞在を考えているという。途中、帰還・交替はあるにせよ、飛行船を10年にわたって成層圏に滞留させ、塩素の無害化を続けることになるわけである。

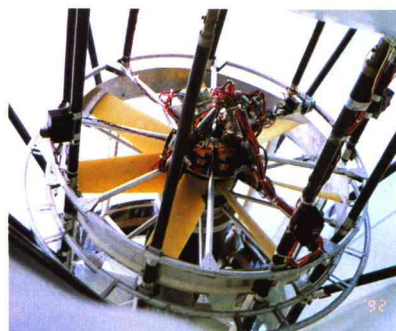
飛行船の動力源としては太陽電池が有力候補として上がっているが、活動の中で大きな比重を占める南極の冬の時期（夜）をどうやりすごすかが難しいネックになっている。かりに太陽電池を使って充電をするにしても、数ヵ月もの長い夜の間持続するほどの蓄電池を積み込むわけにはいかない。マイクロ波送電という方法も考えられているが、この技術もまだこれから解決されなければならない課題が少なくはない。そうなってくるとオゾン層に影響を与えない動力源としては燃料電池あたりが候補に上がってくる。燃料電池の場合も、積み込める燃料の量に限界はあるが、風速の低い南極の冬では燃料消費量が抑えられることから、10日前後に1度、回収・燃料補給することで、ミッションを果たしうる可能性が高く、期待度が大きいようだ。

ミニチュアによる実験

恩田氏らが中心になって作られた成層圏長期滞在型飛行船の構想のひとつにHALROPなるものがある。HALROPとは高層広域観測プラットフォーム（High Altitude Long Range Observational Platform）のことで、先に述べたように高層大気の組成や流れを長期間にわたって観測・測定しようというも



後方推進装置のカバーを外したところ。



推進ファンとその周辺。

ので、オゾン層保全計画もその延長上にある。

このHALROP構想の一環として、恩田氏は1993年にそのミニチュア版ともいべき全長約20mの縮尺模型を製作し、飛行させている。動力源は船体上部に乘せられた太陽電池（最大出力45W）とニッケル・亜鉛バッテリーを組み合わせて用い、船体としては繊維と樹脂膜を張り合わせた軟式構造に浮力材のヘリウムが詰められている。涙滴型の胴に続く細い支持梁と尾翼という外形は、従来の飛行船のイメージとは少し異なるものに仕上がっている。

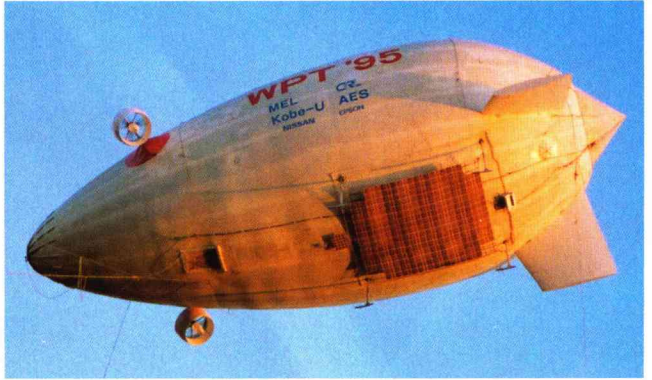
ミニチュア版とはいえ、20mというかなりの大きさだが、もしフルスケールの実証機をつくることになると、約200～300mにもなる。耐風性能を考慮すると、どうしてもこのサイズが必要になるという。大型タンカーに匹敵する大きさである。これまでのところ飛行実験に終始しているが、次の段階では縮尺模型でもうひとまわり大きな全長30mの機体によって上昇高度1000mのスペック達成を目標にしているという。

オゾン層の保全の話題を中心に展開してきたが、成層圏飛行船の用途は、それだけにはとどまらない。この新たな飛行船技術が実現すれば、気象調査や地球環境観測にはじまり、エネルギー・鉱物資源探査、森林調査、水産資源調査など、人工衛星に頼っていた部分をよりローコストで担うことができるようになる。同様に地上交通や船舶の監視などにも有効だと考えられる。

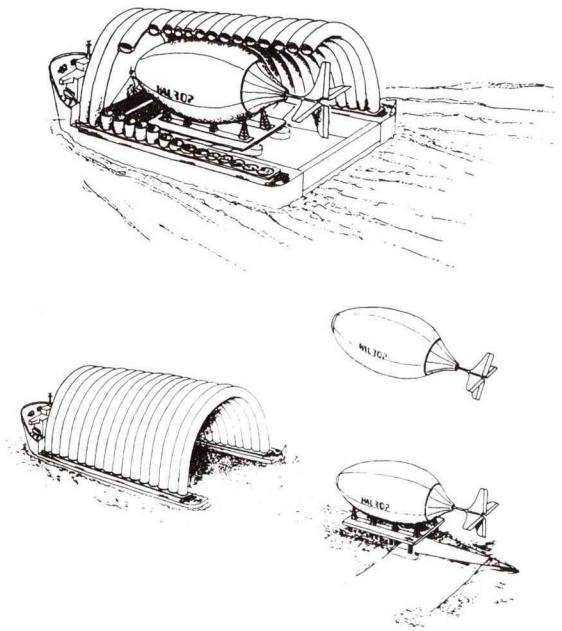
通信分野でも、大きな可能性を秘めている。低軌道～中軌道衛星を使った衛星携帯電話の話題は当誌でも取り上げたが、



マイクロ波送電による推進実験。地上から送られたエネルギーで飛行船のモーターを回している。



飛行船下面に取り付けられたレクテナ（マイクロ波を受取る部分）。



海上移動基地とHALROPの海上からの離昇イメージ。

これらの衛星の代わりに成層圏飛行船を中継に使用できるという。すでにサービス開始を目前に控えた衛星携帯電話に比べると、少し立ち遅れてはいるが、特定地域に限定すればコストパフォーマンスの高い移動電話網を構築できる可能性を秘めている。インフラとして電話網を敷設するのが難しい途上国での電話普及に有効な手段となりうるだろう。

太陽光発電基地としての可能性もあるという。衛星軌道上に太陽光発電所を建設する発電衛星の研究は当誌でも以前取り上げたが、それと同じような発電設備が飛行船でも可能だという。雲の上の太陽が陰らない位置に浮かんで、太陽電池で発電した電気をマイクロ波で地上に送るというわけだ。

現状、これらの用途のうち、環境関連を目的とするものには科学技術庁が、また通信に関連するものについては郵政省がバック・アップし、プロジェクトが組まれている。

飛行船基地の有力候補・メガフロート

さて全長200～300mのフルスケール版実証機が製作されたとすると、その発進・回収拠点をどうするかということになる。発進はどこからでもできると考えられるが、回収はその大きさ

からして海上が望ましいだろうと考えられているようだ。仮に海上で回収したとすると、海面上に低空で係留して港まで曳航することになるが、港を通過するというのは、船舶の航行とぶつかりあって難しい面もある。そうした配慮から老朽化したタンカーを改造し、海上移動基地を作ろうという発想もあるようだ。また長期的な設置が許可されればだが、タンカーにとどまらず、沖合にメガフロート（鋼製浮体構造物）で基地を設けようという構想も出されているようである。

地球環境を守り、通信環境を向上させるHALROP海上基地がいつの日か起動する時がやってくるのだろうか。あるいは、そうした設備を必要とする日を迎えずにすむだろうか。成層圏飛行船も含め、より早い時期にオゾン層破壊の実態が詳しく把握できる技術が開発されることを切に願いたい。

〔取材協力・写真提供：工業技術院・機械技術研究所、国立環境研究所、(財)産業創造研究所〕