

南極昭和基地の気球実験における観測器回収の可能性に関する検討

本田 秀之*・橋田 元**・森本 真司**・青木 周司***
山内 恭**・中澤 高清***

Feasibility Study for Recovering Balloon Payload at Syowa Station, Antarctica

By

Hideyuki HONDA*, Gen HASHIDA**, Shinji MORIMOTO**, Shuji AOKI***
Takashi YAMANOUCHI** and Takakiyo NAKAZAWA***

Abstract: Recovering a balloon payload is indispensable for an experiment of the cryogenic air sampling. A recovery operation, however, has never been made at Syowa Station, Antarctica. Therefore, we examined possibility of a payload recovery at the station. We simulated balloon trajectories and determined landing positions by using a typical flight pattern of the cryogenic sampler and the aerological data obtained at the station for the summer seasons of 1988-1996. The results indicate that at least 40% of all landing positions were within 60km from the station for each summer and the distance between the landing position and the station varied with time smoothly. Variations in the surface wind condition were also examined for the same periods, and we confirmed that there were three to six chances to preform such an experiment for each summer. Sea ice conditions around the station were surveyed using satellite images and it was found that the sea ice was quite stable throughout the summer for the last 10 years. We are finally convinced that it can be possible to recover a payload using a helicopter at the station.

概 要

成層圏大気のクライオサンプリング実験にとって、装置の回収は必要不可欠なことである。しかし、従来の昭和基地における気球実験では観測器の回収が行われたことはなかった。そこで、実験に先立ち、装置回収の可能性について検討を行った。1988年から1996年の夏季に昭和基地で観測された上層風データに、クライオサンプリングの典型的な飛行制御パターンを適用することにより、装置の航跡シミュレーションを行い、着陸地点を求めた。その結果、各夏の時期に昭和基地から60km以内の位置に装置が着陸することが少なくとも40%はあること、昭和基地から着陸地点までの距離が時間とともにほぼ滑らかに変化することが分った。同じ時期の地上風についても調べ、この実験を行うチャンスが各夏の時期に3回から6回あることが確認された。さら

*宇宙科学研究所

**国立極地研究所

***東北大学大学院理学研究科

に昭和基地の周りの海水についても人工衛星画像によって調べ、過去10年間夏の時期の海水がきわめて安定していたことが明らかになった。これらの結果から、我々は最終的に昭和基地におけるヘリコプタを用いた装置の回収は可能であると判断した。

重要語：実現可能性の検討、観測器回収、航跡シミュレーション、気球、南極

1. はじめに

大気球を用いたクライオサンプラーによる成層圏大気採集実験は、採集装置の回収が不可欠である。南極昭和基地では、これまでも大気球を用いたさまざまな実験が行われてきたが、観測装置の回収が必要な実験は一度もなかった。今回、昭和基地における初めての本格的な回収を伴う大気球実験を計画するに当たり [1]、我々はまず、観測器回収の可能性について昭和基地の定常気象観測で得られた上層風データを用いて調査を行った。装置の回収にはしらせ搭載のヘリコプタを使うことを予定したため、その規定行動範囲内にどの程度の割合で装置を降ろすことができるかについて特に詳細な検討を行った。また、大気球打ち上げの可否を左右する地上風についても検討した。さらに、着陸予想地域の過去の海水状況に関しても、衛星画像等を利用して調査を行った。

2. 上層風データによる航跡シミュレーション

あらかじめ決められた大気採集実験用飛行制御パターンに、観測された上層風データを適用することにより、装置の航跡シミュレーションを行った。用いた風データは昭和基地のレーウィンゾンデ観測で得られたものであり、現地時間の午前3時と午後3時に毎日取得されたものである。このうち1988年から1996年(29次から36次隊)の12月20日から翌1月31日までの8期間、それぞれ約80組の風データを用いた解析を行った。一般的に言えば、昭和基地の上層風は12月から1月にかけて最も弱くなる。また、この時期の風向は対流圏中層から成層圏下層にかけて弱い西風が卓越し、それより上層では高さとともに東風が強まるような分布をしている。このため、装置を回収するにはこの時期が最も適していることになる。

用いられた航跡予測プログラムは、1995年より始めた昭和基地における回収予備実験 [2] [3] [4] や、1997年の2~3月にスウェーデンのキルナで行った ADEOS 衛星(みどり)搭載の ILAS センサ検証実験の事前検討でも使用されたもので、航跡あるいは着地位置の決定精度は1~2km程度と見積もられている [3]。

図1は今回の航跡シミュレーションに用いた気球の飛行制御パターンであり、観測器重量、放球作業の容易さ、本実験に必要とされる最高高度、飛行制御に要する時間などを考慮し、気球容積を30,000m³として決められたものである。装置の上昇時には標準速度300m/minを適用し、最高高度30kmに到達した後30分間水平飛行させ、次にヘリウムガスを抜きながら高度20kmまで125m/minで下降させた後、気球を切り離して装置をパラシュート降下させる。飛行時間を短縮するために、装置の下降中のみならず上昇中にも試料採集を行うような飛行制御パターンとなっている。その結果、装置の総飛行時間は4時間となった。

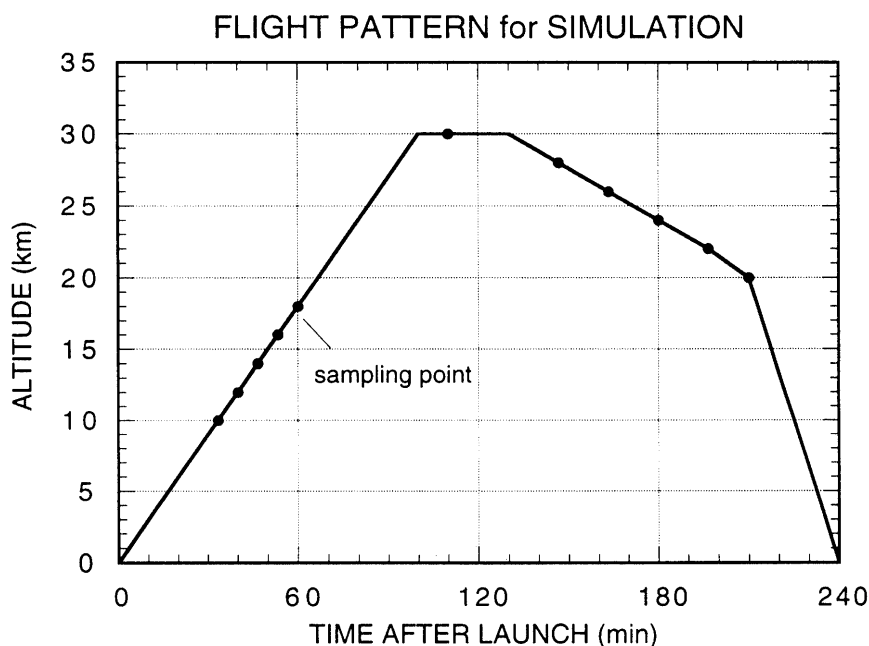


図1. 装置の航跡シミュレーションに用いられた気球の飛行制御パターン. 装置は毎分300mで上昇し、高度30kmで30分間の水平浮遊後毎分125mで緩降下し、高度20kmで切り離す. この間、上昇中に5か所、水平浮遊中に1か所、降下中に5か所で大気のプロ集を行う.

図2は、航跡シミュレーションによって得られた装置の着陸位置の分布である。中央が昭和基地で上が北を表す。しらせの大型ヘリコプタが回収のために装置をスリング輸送する際には、しらせから半径30nm(約56km)以内を安全行動範囲とする内規があるため、我々は半径60kmを回収の目安と考えた。この図によれば、年によって着陸位置の距離の分布はかなり異なるが、半径60km以内に入る割合は、1988年から1989年にかけては82%、以後45%、52%、65%、45%、55%、84%となり1995年から1996年には73%となっている。特に1994年から1995年にかけてと、1988年から1989年にかけては上層風が弱く、80%以上の着陸位置が60km圏内に入っていた。全体的に見れば、昭和基地を中心として西側に着陸する可能性の方が、東側に着陸する可能性に比べて高いこともわかった。

図3は、着陸位置を昭和基地からの距離と方向に分割して、それぞれがどのように変化しているかを時系列で表したものである。着陸位置の昭和基地からの距離は、不規則ではあるが10日から20日の周期で変化を繰り返している。これを見ると、昭和基地近傍での回収が可能となる期間が毎シーズン必ず3回から6回はある。着陸位置の昭和基地からの距離の変化傾向を詳しく見ると、回収に適した日は急速に訪れ、しかも1~3日程度と長続きしないため、上層風の変化傾向をきめ細かく調べて、実験の好機を逃さないようにしなければならないことが分かった。

昭和基地にいくら近くても、大陸縁辺部のクレバス地帯や氷山の上、あるいは海氷状態が悪い地帯など危険な場所に装置が着陸した場合には回収が困難である。このため、さらに図4に示した危険地帯を除いた場所に降下させることができる場合のみを選び出した例を図5に示す。各シーズンの左の棒グラフは図2をまとめたもので、昭和基地から半径60km以内、120km以内、それ以外で分類してある。なお、実験ではヘリコプタでの回収範囲を越えないように飛行制御を行う予定であるが、万一60kmの範囲を超えた場合にも、しらせや雪上車も考慮に入れ、回収には最大限の努力を払うこととした。一方、右の棒グラフは、左のグラフから図4に示す危険地帯に着地する場合を分離したものである。この結果から、図1に示すような飛行制御を行った場合、ヘリコプタによる装置の回収が可能な日は、低くても40%程度はあることが分かった。ただし、大気球の放球には地上風が弱い

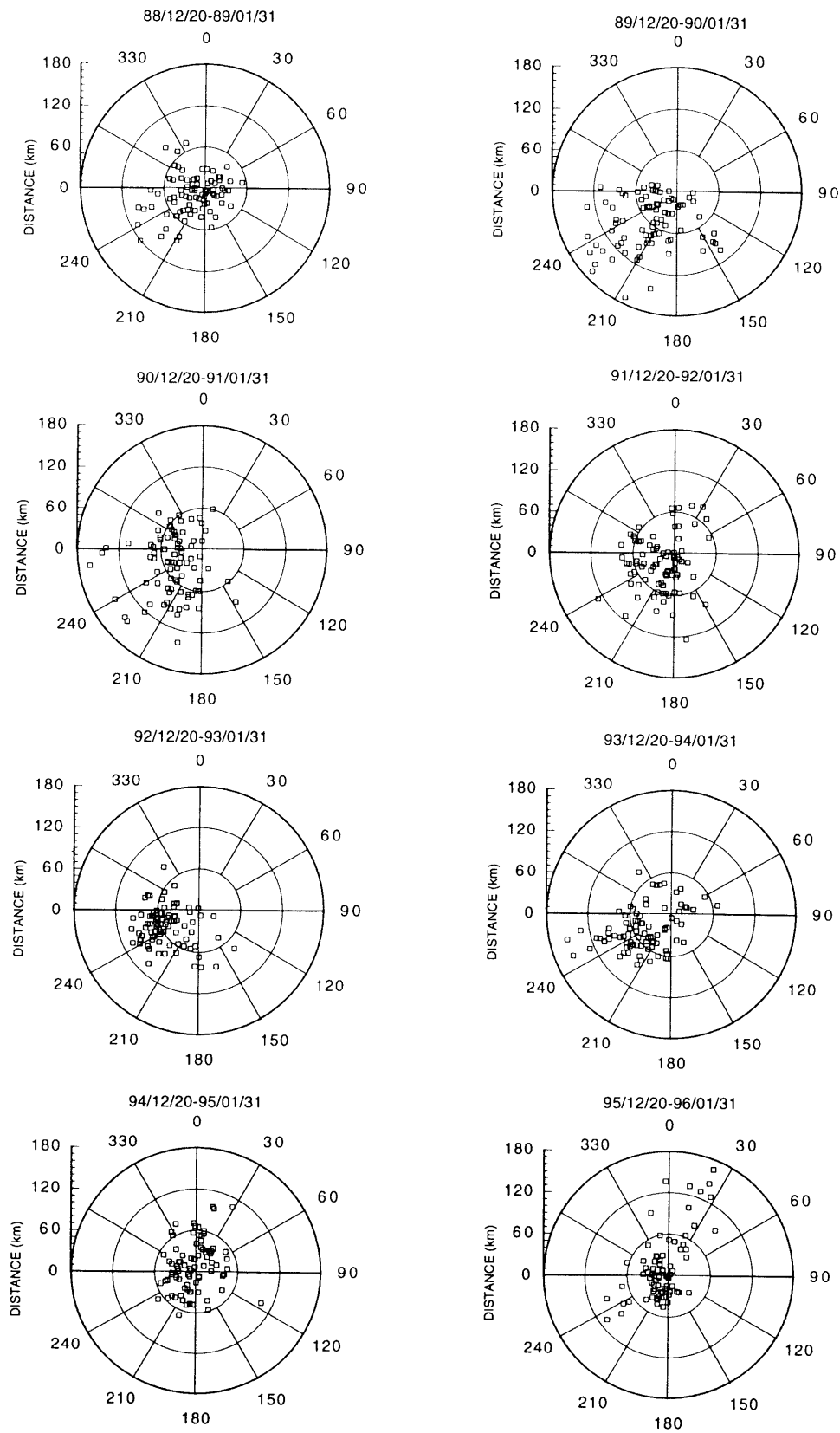


図2. 航跡シミュレーションにより求められた装置の着陸位置の分布. 図の中央が昭和基地で0が北を表す. 飛行制御パターンは図1で与えられたものであり, 風データは1988年から1996年の12月20日から翌1月31日までの8期間に昭和基地のレーウィンゾンデ観測で得られたものが用いられた.

ことが必須条件であるため、このことも考慮に入れなければならない。幸い、次に述べるように地上風が弱い日は上層風も弱い傾向があるため、この割合はそれほど低下しない。したがって、昭和基地において装置を回収可能な範囲に着陸させることができる確率はかなり高く、かつそのような日が周期的に巡ってくることを確認できた。

3. 過去8年間の地上風の日々の変動

大気球放球作業にとって地上風の条件は厳しく、通常でも最大4m/秒程度の風速が限界である。参加者の大部分が放球作業未経験である今回の気球実験では、この条件はさらに一段と厳しく、最大3m/秒程度が限界風速となる。そこで、実験の可能性を探るため、過去の地上風も調べることにした。昭和基地におけるレーウィンゾンデデータの中から地上風のみを選択し、風向と風速の時系列としたものを図6に示す。地上風は一日の内でも時間変化が大きいため、1日2点のデータだけでは詳しい解析をすることは難しいが、少なくとも地上風速の変動の傾向は着地予想位置の変動の傾向に大いに相関があるように見える。このことは地上風が弱い時期には、上層風も弱い傾向にある事を示唆している。また、地上気象観測データを詳細に検討すると、昭和基地では一旦風が止むと風速0の状態が何時間あるいは数日も続き、一旦風が吹き始めると比較的強い風が数日間続くことも分かった。これらのことから、地上および搭載機器の準備作業中から上層風の変化傾向を調べ、風を読むことに本実験の成否がかかっていることがわかる。

昭和基地では夏は太陽が一日中出ているため、日本ほど一日の気温の日較差が大きくない。さらに、周囲は大部分雪や氷に覆われているため、三陸大気球観測所で見られるような風は観測されない。しかし、夜間に特に気温が低下した場合にはしばしば北東風向のカタバ風の影響を受ける。ただし、これは気圧場にも関係するので、予測はかなり難しい。しかし、一般的に言えることは、放球作業は夜間よりも昼間の時間帯を選んだほうが、カタバ風の影響は受けにくいと思われる。また、放球作業では定常気象部門の人員の応援を受け、レーウィンゾンデと同一周波数のテレメータ電波を使用したり、装置の追跡を依頼することもあるため、定常観測時間に食い込まないような時間帯に気球実験を行う必要もある。着地後のヘリコプタによる回収作業との兼ね合いもあり、放球は午前中に行う計画を立てた。

4. 過去の海水状況

昭和基地周辺は主に、東側は大陸氷床、西側は海水である。大陸の沿岸部はクレバスが散在し、また露岩地帯もあるため、装置を着陸させる場所としては適当でない。従って、我々は沿岸部を除いた大陸氷床上あるいは海水上を回収可能地域と考えた。さらに、しらせから30nm(約56km)以内をヘリコプタによる回収範囲としていることも考慮に加えた。なお、しらせによる海上回収も想定して準備を行った。さらに、大型ヘリコプタの回収作業可能範囲外に着地した場合には、その地点がリュツオ・ホルム湾内あるいは大陸氷床上であれば越冬期間中に雪上車で回収を試みることも考えた。

大陸氷床の地形は年々の氷床流動を勘案しても大きく変化することはない。これに対し、海水の状況は年によって大きく異なる。また、上で述べたように回収地点が昭和基地の南西海域となる可能性が高い。そこで、過去の海水状況を調査して、実験実施時期の海水状況を検討した。

リュツオ・ホルム湾の海水変化に関しては、山内と瀬古が1987年から1990年までの4年間のNOAA画像を詳しく解析している[5]。これによると、回収可能範囲に含まれる定着氷が流出して開氷面となる現象が、1987年7月と1988年6月に発生している。1991年以降の状況を調べるため、昭和基地でデータを受信しているMOSS-1画像(1991年、1992年、1993年、1995年)、JERS画像(1994年)を検討した。1991年以降、このような海水流出は1994年にも発生している。また、衛星画像の受信開始以前の各越冬隊報告によれば、同様の流出が1968年、1977年、1980年、1981年、1984年にも生じている。1987年、1988年、1994年に関しては、8月以降の厳冬

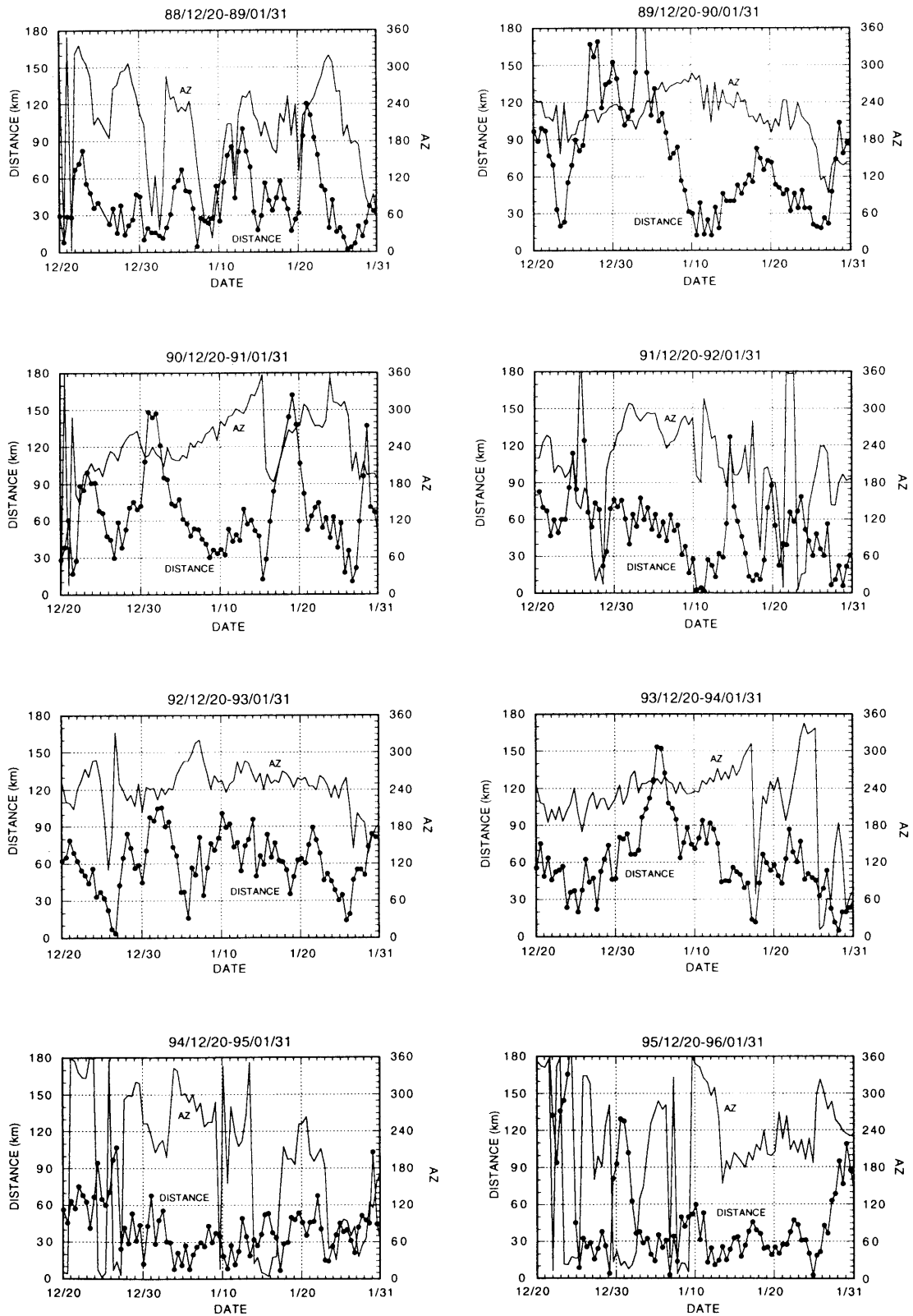


図 3. 航跡シミュレーションにより求められた装置の着陸位置の昭和基地からの距離と方向の変化。用いられた風データと飛行制御パターンは図 2 と同じである。

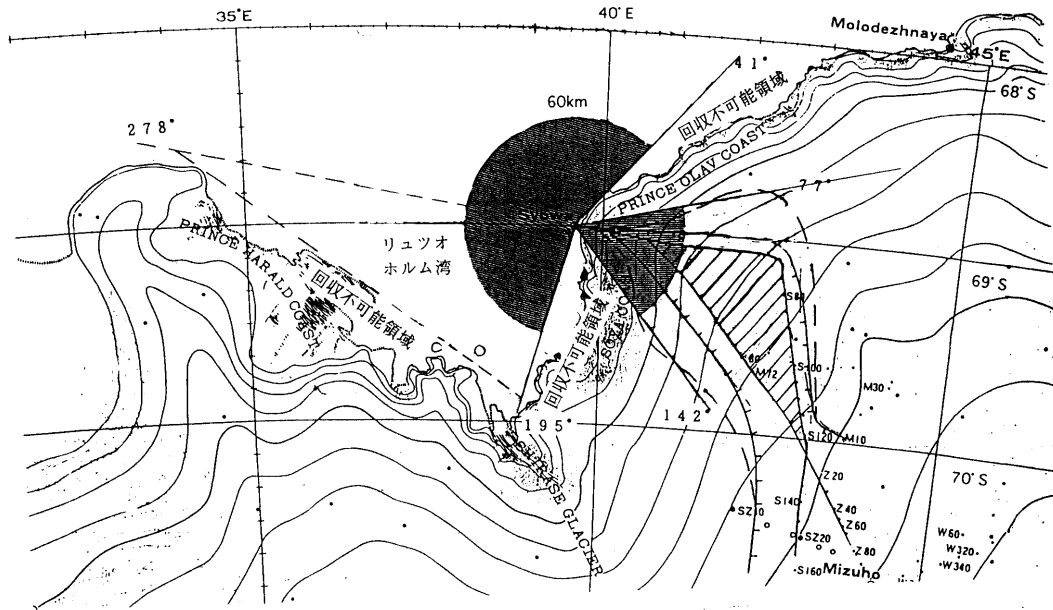


図4. 昭和基地周辺の装置回収可能地帯と不可能地帯。半径60km以内の範囲(陰部分)はヘリコプタによる回収可能範囲を示す。方位角で41度-77度と142度-195度間、および195度-278度で囲まれた海岸線および内陸部は、立ち入り危険なことから回収不可能地帯とした。

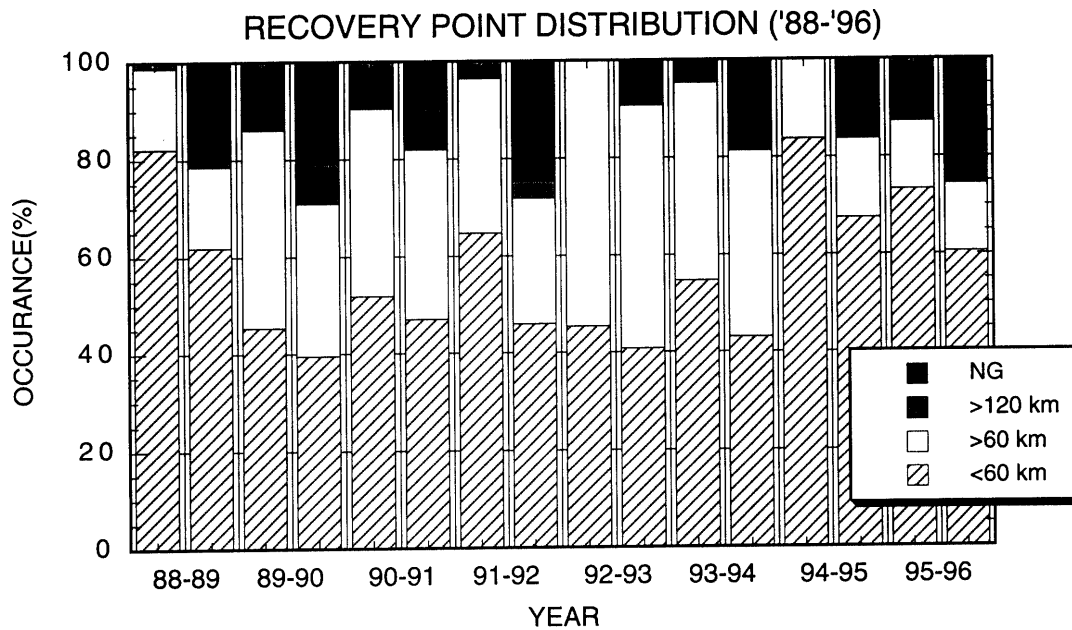


図5. 航跡シミュレーションにより求められた装置の昭和基地からの着陸距離のヒストグラム。各時期の左側の棒グラフは全ての事例を距離別に分けたものであり、右側の棒グラフは回収不可能な場所(図4参照)に着地する場合を分けて考えたものである。

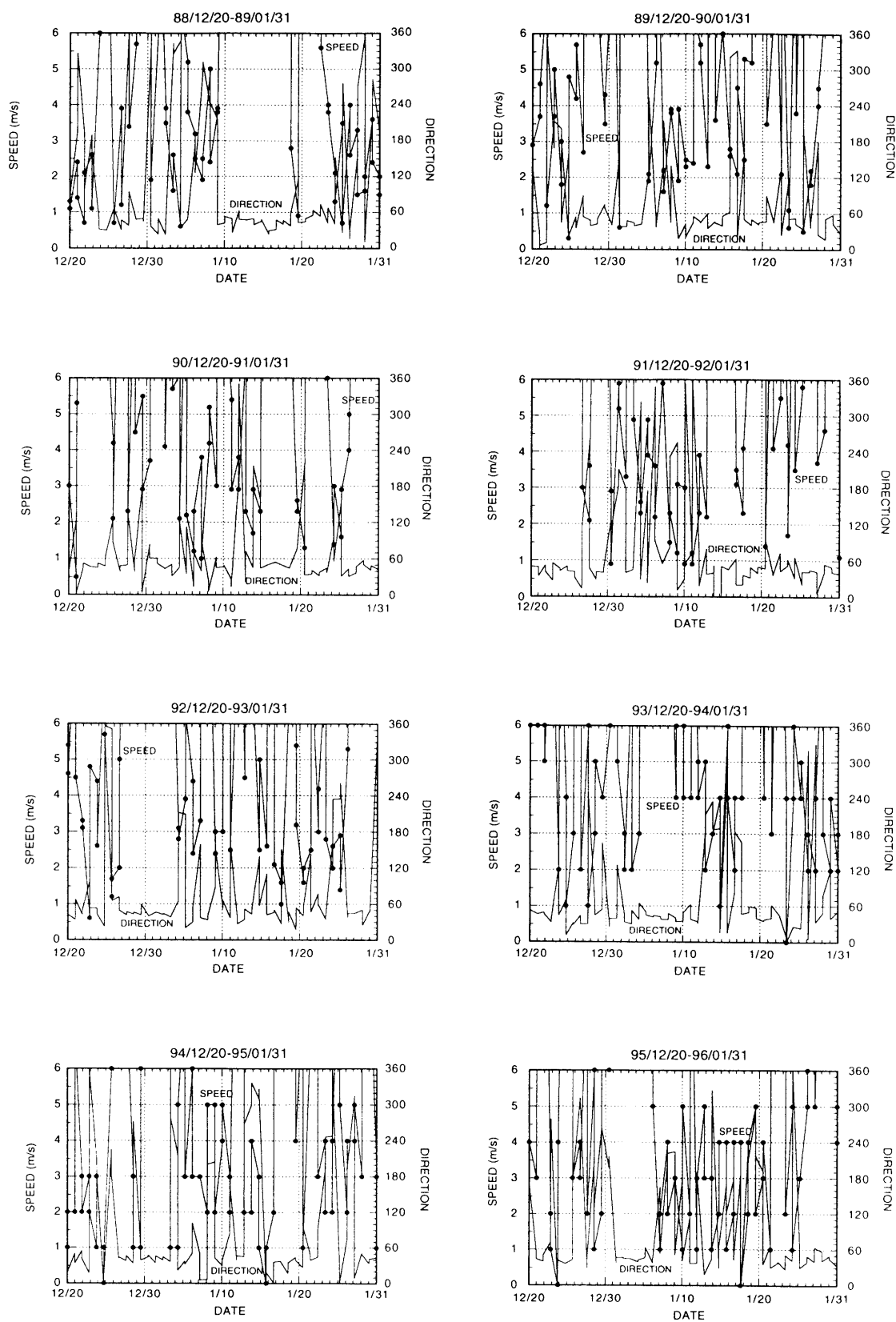


図 6. 1 日 2 回のレーウィンゾンデ観測から求められた昭和基地における地上風の風向と風速の変化。

期を経て開氷面となった海域は完全に結氷している。そして、流出が生じるのは遅くとも7月までであり、それ以降に流出した例はない。特に、夏期間(12-1月)に昭和基地西方の海水が流出したことは、過去20年間一度も観測されていない。

海水がクライオジェニックサンプラー着地の衝撃で受ける影響を見積もった。氷温-10℃以下において海水は1m²あたり、氷厚50cm, 100cmで、それぞれ約3t, 10tの加重に耐え得る[6]。本実験で使用した緩衝機構は10G、すなわち観測器重量が350kgであるから、3.5tの力で潰れるよう設計されている。昭和基地周辺においては、7月から9月にかけての厳冬期に海水は成長するため、1年氷でも春期には氷厚は100cm以上に達する。従って、観測器が一年氷域に着地しても海水が破壊される可能性は低いと考えられる。ただし、以上の議論は海水が一様に分布している場合を想定している。実際には冰山やパドルなどが点在しているため、観測器が不安定な海水上に着地する可能性がある。その場合、ヘリコプタによる氷上回収は難しいが、観測器が水密構造を有する特徴を生かして、しらせによる海上回収も考慮に加えた。

さて、第38次隊より、昭和基地において、NOAAの可視ならびに赤外面像の受信と画像解析が可能となった。また、実験が実施される1998年1月には第38次隊が航空機を運用しているため、海水状況の目視による偵察も可能である。そして、しらせ接岸後にしらせ搭載のヘリコプタによる偵察により、回収予想地点の詳細な情報も得ることができる。したがって我々は、これらの情報を総合することにより回収作業を安全に行うことができる。

5. おわりに

昭和基地の過去8年間の定常気象データを使用して、クライオサンプリング実験の気球の航跡をシミュレートし、ヘリコプタでの回収可能範囲にどの程度の割合で装置を降ろすことができるか検討を行った。その結果、12月20日から翌年の1月31日の間では、装置を回収可能範囲に降ろすことができるような上層風の日が少なくとも40%程度はあり、また同期間には実験可能な機会が3回から6回程度巡ってくるのが分かった。さらに、装置が着陸する可能性の高いリュツォ・ホルム湾の過去の海水状況も調査した。その結果、過去20年間にわたって冬季には海水が流出したことはあるものの、12月から1月にかけては海水は安定していたことが明らかになった。また、夏季には海水が十分成長しているため、ヘリコプタにより海水上で装置回収ができる可能性が非常に高いことが分かった。これらの結果を総合的に判断して、我々は昭和基地におけるヘリコプタを用いた装置の回収は十分可能であると判断した。

今回の研究は、直接的には1998年度に計画したクライオサンプリング実験のためのものであるが、得られた結果は観測器の回収を必要とする他の気球実験にも利用できるものであり、今後南極域における実験観測の多様化に寄与するものとする。

参考文献

- [1] 山内 恭, 青木周司, 本田秀之, 中澤高清, 神沢 博, 回収気球による南極大気サンプリング計画, 大気球シンポジウム, 64-67, 1993.
- [2] 山内 恭, 森本真司, 召田成美, 青木周司, 本田秀之, 松坂幸彦, 南極昭和基地での気球回収予備実験, 大気球シンポジウム, 25-28, 1995.
- [3] 森本真司, 橋田元, 山内 恭, 本田秀之, 秋山弘光, 矢島信之, 青木周司, 中澤高清, 宇井啓高, 召田成美, 南極昭和基地におけるグラブサンプリング実験-37次隊での実験結果-, 大気球シンポジウム, 5-6, 1996.
- [4] Honda, H., S. Morimoto, H. Akiyama, G. Hashida, S. Aoki, H. Ui, T. Nakazawa, N. Yajima and T. Yamanouchi, A newly developed grab sampling system for collecting stratospheric air over Antarctica, *Antarctic Record*, **40**(2), 156-168, 1996.
- [5] 山内 恭, 瀬古勝基, NOAA 衛星から見た南極 -雲・氷・雪-, 国立極地研究所, 1992.

- [6] 日本雪氷学会極地分科会ACR委員会, 海水旅行行動指針, 1989.