

日本-ノルウェー国際共同大気球観測報告

山岸久雄*・小野高幸*・福西 浩*

Report of Japan-Norway Balloon Campaign at Andøya and Stamsund, 1982

Hisao YAMAGISHI*, Takayuki ONO* and Hiroshi FUKUNISHI*

Abstract: This report describes a result of the Japanese balloon campaign carried out in March 1982, at Stamsund (68°09'N, 13°46'E) in northern Norway.

The objective of this campaign was to study auroral particle precipitation and related ionospheric phenomena. Two balloons were successfully launched on March 19 and 20, 1982.

The first one was launched in the recovery phase of an auroral substorm, and X-ray pulsation and microburst, correlated well with VLF emissions, were observed.

The second one was launched at the substorm time, and the change of the ionospheric electric field direction was observed in association with auroral activities.

The process of planning, the preparation and the operation for this campaign are also described for the convenience of future balloon campaign.

要旨: 本報告は、北欧における国際共同大気球観測3カ年計画の第2年次として、ノルウェー国において実施した大気球実験の経過と初期解析結果についてである。

1982年3月19日および20日、ノルウェー国 Stamsund (68°09'N, 13°46'E) において、オーロラ粒子降下と、それに関連した超高層物理現象を研究するため、観測気球2基による実験を行った。実験は、2基とも成功し、オーロラサブストーム時の電離層電場の変化、VLF電波の伝搬状態、X線 microburst 現象について、良好な観測結果を得た。

さらに3月4日より3月25日まで、ノルウェー国 Andøya (69°18'N, 16°01'E) において、オーロラ活動に伴う、超高層物理現象の地上観測をも実施した。

1. 序

本実験は、昭和55年より始まった高緯度電離圏国際共同観測(平沢, 1980)の第2年次にあたる。初年度の大気球実験は、1980年9月スウェーデン国 Esrange で行われ、北欧地域で気球実験をするうえで貴重な経験が得られた(江尻・鮎川, 1980; 鮎川・江尻, 1981; EJIRI *et al.*, 1982)。本実験は、それらの経験を踏まえ、さらに本格的な超高層物理気球観測を実施することを目的として計画した。実験場は当初、初年度と同じ Esrange を予定したが、高層の風の条件により、ノルウェー国 Stamsund (68°09'N, 13°46'E) に変更した。そして、日本とノルウェーとの共同実験として実施されることになった。

* 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

本報告では、上記実験について、計画概要、現地での実験実施、実験データの初期解析結果について述べる。

2. 実験計画と準備経過

昭和 56 年 2 月、「高緯度電離圏国際共同観測」のための昭和 56 年度予算の内示をうけ、前年度より一層本格的な実験を実施することが可能になった。そこでオーロラ粒子流入に伴う、エネルギー収支と関連現象を中心テーマとして大気球実験計画の公募を行ったところ 10 件の応募があり、これを基に 2 月 25 日大気球実験世話人会（小玉他）を開き、観測気球として B_{15} 型 ($15\,000\text{ m}^3$) を作成 ($B_{15}-1N$) し、観測項目は表 1 の通りとするとの基本方針が決められた。

上記方針に基づき、4 月 15 日大気球実験設計会議を国立極地研究所にて開催し、観測器仕様の確定、フライトトレインの構成、テレメータのチャンネル配分等を決定し、機器の製作、発注に本格的に着手した。

気球実験場としては、当初第 1 年次と同じくスウェーデン国 Esrange を予定し、打ち合わせを重ねてきたが、その途上で、(1) 冬期のスウェーデン北部高層の風速は非常に大きく (時速 100-180 km)、気球はすみやかにソ連方面へ流されること、(2) ソ連領空内への気球飛しょう許可を得ることは、かなり困難であること、(3) そのため Esrange からフィンランド中央部までの気球飛しょう時間は 2 時間となり、観測時間 (水平飛しょう時間) が十分とれないこと、の 3 点が明らかとなった。この点について、6 月 23 日宙空専門委員会ロケットバルーン分科会にて検討され、ソ連とさらに交渉を進めること、Esrange よりも風上側に位置するノルウェーからの放球についての可能性の追求を行うこととなった。

ソ連より 7 月 8 日、昭和 56 年度実験にソ連は参加できず、したがって気球の領空侵入は許可しない、しかし 57 年度は、オーストリア、フランス、ソ連の共同実験があり、それに日本が参加することを歓迎するとの回答が寄せられた。また、ノルウェー、Andøya ロケ

表 1 $B_{15}-1N$ 観測項目一覧
Table 1. List of observation items selected for $B_{15}-1N$ balloon experiments.

観 測 項 目	担 当 者 (所 属)
オーロラ X 線空間分布	平島 洋・村上浩之 (立教大学理学部) 小玉正弘 (山梨医科大学) 山上隆正・西村 純 (宇宙科学研究所)
成 層 圏 電 場	小川俊雄 (京都大学理学部)
VLF 自 然 電 波 オ メ ガ 電 波 伝 搬	鎌田哲夫 (名古屋大学空電研究所) 山岸久雄 (国立極地研究所) 長野 勇 (金沢大学工学部)
電 力 線 放 射	芳野越夫・富沢一郎 (電気通信大学)

ット実験場からは、ロフォーテン諸島の Stamsund (68°09'N, 13°46'E) にて気球実験を行った実績があり、同地から放球した場合、冬期でもフィンランド中央部まで4時間程度の飛しょうが可能であり、観測時間として2.5時間は確保できるとの回答を得た。

そこで、7月22日、Stamsund を気球実験場に選ぶこととし、実験時期は Andøya 実験場のスケジュールと、高層の風速が最も速い12月-2月を避けることを考え合わせ、3月18日-3月31日とすることを内定した。

また、昭和55年度の大気球実験で、Esrangle より放球された観測器がフィンランドで発見され、昭和56年4月日本へ送りかえされてきたので、これを改修したものを B₁₅-3N とし、昭和56年度実験に使用することとした。これらいくつかの計画の変更が必要となったため、8月31日、大気球実験関係者連絡会議を開催し、今までの経過を説明し、表2に示す計画案の承認を得た。

以上の経過と、物品発送までの準備状況を日程表として、表3にまとめた。

表2 昭和56年度北欧大気球実験計画

Table 2. The plan for the Japan-Norway balloon campaign, 1982.

実験場	実験期間	観測気球	観測項目	担当者 (所属)
ノルウェー国 Stamsund	昭和57年 3月18日-3月31日 (または 3月11日-3月25日)	B ₁₅ -1N	表1に同じ	表1に同じ
		B ₁₅ -3N	X線マイクロバースト	山上隆正・西村 純(宇宙科学研究所) 小玉正弘(山梨医科大学) 平島 洋(立教大学理学部)
			VLF 自然電波	山岸久雄・小野高幸(国立極地研究所)
			オメガ電波伝搬	山岸久雄(国立極地研究所)

表3 昭和56年度北欧大気球実験計画準備経過

Table 3. List of planning meeting and preparations for the Japan-Norway balloon campaign, 1982.

期 日	事 項
昭和56年2月	昭和56年度北欧大気球実験計画公募
2月25日	大気球実験世話人会; 実験基本方針の決定
4月15日	大気球観測器設計会議
5月22日-30日	大気球実験隊員訓練; 宇宙科学研究所, 三陸大気球実験場. 参加者: 藤井(良)・山岸・小野(国立極地研究所)
6月23日	宙空専門委員会ロケット・バルーン分科会; 昭和56年度北欧大気球実験および23次南極大気球実験計画検討
7月22日	気球実験場, 変更内定; スウェーデン, Esrange よりノルウェー, Stamsund へ
8月31日	大気球実験関係者連絡会議; 実験方針の変更案承認
9月25日- 10月8日	大気球実験に関する合意書交換; 国立極地研究所-ノルウェー王立科学産業評議会
11月5日-7日	B ₁₅ -1N 観測器総合試験; 明星電気守谷工場

Table 3 (continued).

期 日	事 項
昭和56年11月13日 - 15日	船便輸送物品梱包作業
11月16日	船便輸送物品運送業者引き渡し
昭和57年1月20日	実験計画書, ノルウェーへ送付
1月29日	B ₁₅ -3N 観測器総合試験
2月4日	航空便貨物運送業者引き渡し
2月21日	出発

3. 行動概要

筆者らは昭和 57 年 2 月 21 日成田を発ち、2 月 22 日スウェーデン国 Esrange に到着した。北欧大気球実験第 3 年次にあたる昭和 57 年度大気球実験は、Esrange で行われる予定であるので、今回ノルウェーへの途上立ち寄り、実験計画について予備打ち合わせを行うことが目的であった。23 日から 25 日まで、我々とオーストリア Graz 工科大教授の W. RIEDLER, Kiruna 地球物理観測所の G. GUSTAVSSON 博士, Esrange 所長 A. HELGER 他により共同実験の実施に関し打ち合わせを行った。

2 月 26 日、ノルウェー国 Andøya ロケット実験場に到着し、2 月 27 日より 3 月 8 日まで開梱作業、地上観測用機器の設置、気球実験打ち合わせ、気球観測器の調整、Stamsund への実験器材輸送に、多忙な日々を過ごした。地上観測は 3 月 4 日より定常観測体制に入った。

3 月 8 日、Andøya 実験場の気球実験班とともに自動車で陸路とフェリーを乗り継いで、Stamsund に移動した。3 月 9 日から 11 日まで開梱、テレメータ受信局の設置、気球ランチャーの設置、地上観測器の設置、気球フライトトレインの最終編成を行った。3 月 10 日、第 1 回目の気球観測器、受信局間のテレメトリー電波テストを行った。3 月 12 日、すべての準備を完了し、待機態勢に入った。

地上の天候の周期と地磁気活動の周期がうまく一致せず、1 週間待機した後、3 月 18 日、第 1 回目の放球 (B₁₅-3N) を行った。放球直後、大気球が破れ、観測器は付近の山 (高度 200 m) の山頂付近に着地した。さいわい、観測器は無事回収され、翌 3 月 19 日 0632UT (現地時間午前 7 時 32 分) に予備気球を用い B₁₅-3N の再放球を行い、典型的な X 線 microburst 現象の観測に成功した。引き続き 3 月 20 日 1909UT (現地時間午後 8 時 9 分)、B₁₅-1N の放球を行い、観測気球は飛ばし中 2 回のオーロラサブストームに遭遇し、観測は成功した。

Stamsund および Andøya にて撤収作業を行った後、福西は 3 月 31 日帰国した。山岸、小野は、帰途 Esrange で昭和 57 年度気球実験について再打ち合わせを行い、また Bergen 大学で気球実験に関して研究打ち合わせを行い、4 月 7 日帰国した。表 4 に上記の行動概要を示す。

表 4 行動の概要

Table 4. List of activities of the Japan-Norway balloon campaign, 1982.

期	日	事	項
昭和57年	2月21日	東京発	
	22日	スウェーデン Esrange 着	
	23日	Esrange VLF, HF 帯雑音測定	
	24日	KGI 訪問	
	25日	57年度気球実験 (SAMBO '82) 打ち合わせ	
	26日	Esrange より Andøya へ移動	
	27日 - 28日	開梱	
3月	1日	気球実験打ち合わせ (国立極地研究所, Andøya 実験場)	
	2日	気球観測器単体テスト, 地上観測器設置	
	3日	GA 屋外テスト, Stamsund 地上系テスト	
	4日	気球実験ランチャー主任 (S. ULLALAND) との打ち合わせ	
	5日	気球観測器テレメータテスト	
	6日	Stamsund への実験器材梱包	
	8日	Andøya より Stamsund への移動	
	9日	開梱, テレメータ受信室設置	
	10日	気球ランチャー設置, 地上観測器設置	
	11日	フライトトレイン最終編成, 気球観測器テレメータテスト	
	12日 - 17日	待機	
	18日	0700UT, B ₁₅ -3N 放球, 失敗, 観測器回収	
	19日	0632UT, B ₁₅ -3N 放球, 成功	
	20日	1909UT, B ₁₅ -1N 放球, 成功	
	22日	撤収および梱包	
	23日	荷物, 港へ輸送	
	24日	Stamsund より Andøya へ移動	
	26日	地上観測器撤収, 気球・地上観測データ整理	
	27日	福西 Andøya 発, 梱包作業	
	28日 - 29日	梱包作業	
	30日	山岸, 小野 Andøya より Esrange へ移動	
	31日	57年度気球実験打ち合わせ	
4月	1日	Kiruna 発, Bergen 大学にて気球観測打ち合わせ	
	7日	帰国	

4. 観測概要

本実験は、オーロラ粒子流入に伴う超高層物理現象の相互関係を総合的にとらえることを目的とする。大気球実験では、地上観測では測定できない電離層電場、高エネルギー電子の降り込みを測定することが可能となる。また、気球の移動速度は 100 km/h 程度であるので、数分のタイムスケールの現象に対しては定点観測とみなすことができる。一方、数時間のタイムスケールの現象に対しては、気球の移動によって、現象の発生領域の空間構造をとらえることが可能となる。したがって気球観測は、超高層物理の研究手段としてきわめて有効で

ある。

しかし、複雑な地球物理現象を気球観測のみでとらえるには限界があり、気球観測と有機的に結びついた地上での同時観測を実施することができれば、気球観測データをさらに有効に生かすことができる。スカンジナビア半島は IMS 以来、超高層物理地上観測ネットワークが充実しており、さらに最近は、STARE, EISCAT 等、レーダーによる電離層リモートセンシングも、活発に行われるようになってきており、気球実験の際これらの観測所と協同観測を行うことは、地球物理現象を総合的に把握するうえで、きわめて有効である。このような観点にたち、我々はスカンジナビア各地の研究機関に気球実験期間中の協同観測を依頼し、また、我々自身、ノルウェー国 Andøya および Stamsund で地上観測を実施した。以下、地上観測および気球観測の概要を述べる。

4.1. 地上観測

Andøya ロケット実験場 (69.3°N, 16°E) において、図 1 に示す地上観測を実施した。ULF 地磁気脈動観測器、HF ドップラー観測器 (九州大学北村研究室)、記録機器は日本側が用意し、VLF 自然電波については、Oslo 大学 (J. HOLTET 教授)、フラックスゲート磁力計、リオメータ、掃天フォトメータ、全天カメラについては、Andøya 実験場よりデータの提供を受けた。また、VLF 自然電波、フラックスゲート磁力計、リオメータ、掃天フォ

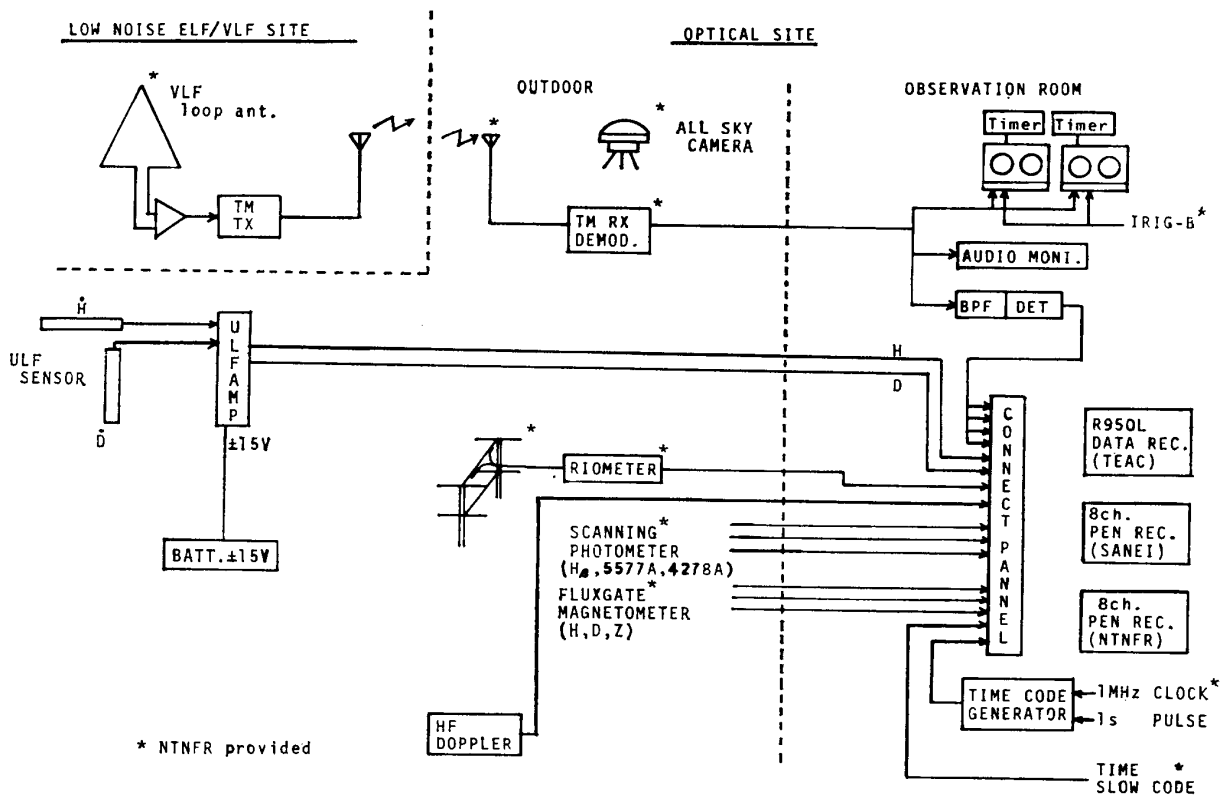


図 1 Andøya における地上観測ブロック図

Fig. 1. Functional block diagram of ground-based observations at Andøya.

トメータについては、Andøya 実験場のミニコンピュータにより、1 秒値、10 秒値のデータ収集が行われた。

観測は、3 月 1 日より 3 月 26 日まで行った。期間中、機器動作は良好であり、顕著な地磁気活動、オーロラ活動が観測された。特に VLF 自然電波については、ワイドバンド信号をテープレコーダーで連続録音したため、多くの興味深い現象をとることができた。

気球実験場である Stamsund においても図 2 に示す地上観測を 3 月 10 日より 3 月 20 日まで実施した。これは Stamsund において地磁気活動度を監視し、気球を放球すべき時期を見定めるためと、地磁気脈動について、Andøya, Stamsund 2 点観測を行うためであった。

リオメータ、ULF 地磁気脈動観測器は、気球実験場 (Stamsund 小学校) 裏の民家の庭先に設置し、記録器はその家の 1 室を借用し設置した。市街地であるため雑音がやや多かったが、観測はおおむね順調に行われた。

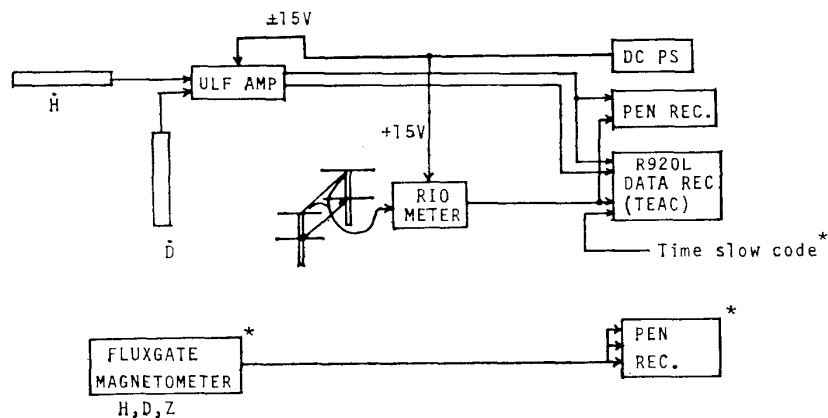
また、スκανジナビア各地の地球物理観測所との協同観測として、表 5 に示す観測所より、気球実験期間中の地上観測データの提供を受けることが可能となった。またツインドップラーレーダ「STARE」と大気球電場観測器とで、電離層、成層圏電場の同時観測を行うことを計画した。

4.2. 大気球観測

4.2.1. 大気球および観測器

本観測は、極域電離層へのオーロラ粒子降下に関連し、下に列記した現象相互間の関係を明らかにすることを目的とする。

- (1) オーロラ粒子降下の空間分布と電離層電場の関係
- (2) オーロラヒス放射とオーロラ活動の関係
- (3) オーロラ活動に伴う、VLF 局 (オメガ A 局) 電波の伝搬状態の変化



* NTNFR Provided

図 2 Stamsund における地上観測ブロック図
Fig. 2. Functional block diagram of ground-based observations at Stamsund.

表 5 大気球実験と協同観測を行った観測所一覧
 Table 5. List of the collaborated geophysical observatories for the Japan-Norway balloon campaign, 1982.

国 名	観 測 所	観 測 項 目	担 当 者 (機関名)
ノルウェー	Ny-Aalesund	VLF 自 然 電 波	Dr. J. HOLTET (Oslo 大学)
	Tromsö	地 磁 気 3 成 分 リオメータ, 全天カメラ	Dr. O. HARANG
スウェーデン	Abisko Kiruna Lycksele Uppsala	地 磁 気 3 成 分 リ オ メ ー タ 全 天 カ メ ラ ア イ オ ノ ソ ン デ	Dr. S. WESTERLUND (Kiruna 地球物理研究所)
フィンランド	Kilpisjärvi	全 天 カ メ ラ	Dr. R. PELLINEN (フィンランド気象研究所)
	Kevo	全天カメラ, リオメータ	
	Ivalo Sodankylä Rovaniemi Oulu Haapajärvi Jyväskylä Nurmijärvi	リ オ メ ー タ	

表 6 大気球観測器観測仕様
 Table 6. List of the specifications of the balloon payloads, B₁₅-1N and B₁₅-3N.

B ₁₅ -1N	VLF	Auroral hiss PLR Omega	E _z	0.2-8 kHz (wideband)	
	X-ray	Auroral X-ray 20-100 keV	E _z , B _x	40 Hz-1 kHz (waveform)	
			E _z , B _x , B _y	10.2, 11.33, 13.6 kHz (waveform)	
			Sensor	Field of view	Orientation
				Zenith	Azimuth
		A	40°	0°	—
		B	20°	20°	270°
		C	10°	5°	30°
		D	10°	5°	150°
	AEF	Stratospheric E-field	E _x , E _y	100 mV/m full scale	
			E _z	1 V/m full scale	
			I _z		
B ₁₅ -3N	VLF-WB	Chorus emission	B	0.2-8 kHz	
	Omega	Omega signal intensity spatial variation	B	11.33 kHz	
	X-ray	X-ray microburst	20-100 keV	Field of view 40°	

(4) オーロラ活動に伴う、電力線放射スペクトルの変化

(5) X線マイクロバーストと、ポーラーコーラス放射の関係

B₁₅-1N 気球は、X線観測器、電場観測器により (1) の項目を、VLF 受信器により、(2)-(4) の項目を観測する。B₁₅-3N 気球は X線観測器、VLF 受信器により (5) の項目の観測を行い、オメガ受信器により (3) の項目の観測を行う。表 6 に、B₁₅-1N および B₁₅-3N 観測器の観測仕様を簡単にまとめた。

電場観測器のセンサーとしては、互いに直交する 75 cm 角平行平板電極 (電極間隔 116 cm) 3 組を使用し、電極表面はアクアダックコーティングを施した。X線観測器のセンサーは、鉛、すずのコリメータを備えた NaI (TI) シンチレータと、フォトマルチプライヤーを使用した。特に B₁₅-1N の X線観測器のセンサーは、異なる視野角と異なる視野方向をもつ 4 個のセンサーの組み合わせからなる。そして、このセンサーをつけた観測器全体を回転させることにより、高エネルギー電子降下域の空間構造のイメージングを行うことができる。VLF 観測器については、B₁₅-1N では 10 m 垂直ダイポールアンテナおよび 3 本のコアループアンテナ (オメガ受信用 2 本、電力線放射用 1 本) を用い、B₁₅-3N では 5 m 角の空心ループアンテナ (自然電波用) と、コアループアンテナ (オメガ受信用) 各 1 本を用いた。

観測器は、ナショナルハイトップ 6D-D および 4D-D を用いた。容量は 0°C において 11 時間である。気球搭載用テレメータの仕様を、表 7 にまとめて示した。

大気球は、ウィンゼン社 (U.S.A.) 製 SF-106.77-050-NSH-01 を 3 個 (内 1 個は予備) 用意した。容積は 13 722 m³、自重 58 kg、正規負荷 100 kg に対し、水素ガスを封入した場合の到達高度は 32.3 km である。補助気球は同じくウィンゼン社製、SF-22.24-100-CYL-01

表 7 大気球搭載テレメータ仕様
Table 7. Specification of the balloon telemeter.

項 目	B ₁₅ -1N	B ₁₅ -3N
変 調 方 式	FM(VSB)-FM	同 左
主搬送波周波数	245.88 MHz	同 左
放 射 電 力	0.8 W	同 左
送信アンテナ	λ/4 スリープアンテナ	同 左
偏 波	垂 直	同 左
最大周波数偏移	55 kHz	70 kHz
副 搬 送 波	VSB (86-100 kHz) VLF 広帯域信号 IRIG No. 15-No. 18 VLF 電波 IRIG No. 11-No. 14 オーロラ X線 IRIG No. 8-No. 10 電 場 IRIG No. 7 地磁気姿勢計	VSB(27-35 kHz) VLF 広帯域信号 IRIG No. 12 オメガ信号強度 IRIG No. 13 オーロラ X線
VCO 安定度	±1% 以下	同 左
VCO 直線性	1% 以下	同 左
不要電波放射	-30 dB 以下	同 左

であり、自重 7.5 kg、容積 139 m³、荷重範囲は 57-136 kg である。

観測終了後の気球切り離しは、現地にコマンド送信システムが無い場合、プリセットタイマーにより、スクイブカッターを動作させる方式とした。日本側は、新規に開発した電子式タイマー（明星電気製、-50°C 仕様）を用意し、ノルウェー側は Bergen 大学製 E-Cell タイマーを用意し、2重システムとした。

パラシュートは B₁₅-1N 用に 75 kg 物傘、3N 用に 50 kg 物傘（藤倉航装製）を用いた。

B₁₅-1N では、電場観測器用に 100 m の巻下器、電場および X 線観測器用に 1 r.p.m. のスピニングモーターを用意した。いずれも、三陸大気球実験で標準的に用いられているものである。

レーダーリフレクタ、補助気球切り離し治具（4.2.2. 図6参照）は、ノルウェー側が用意した。

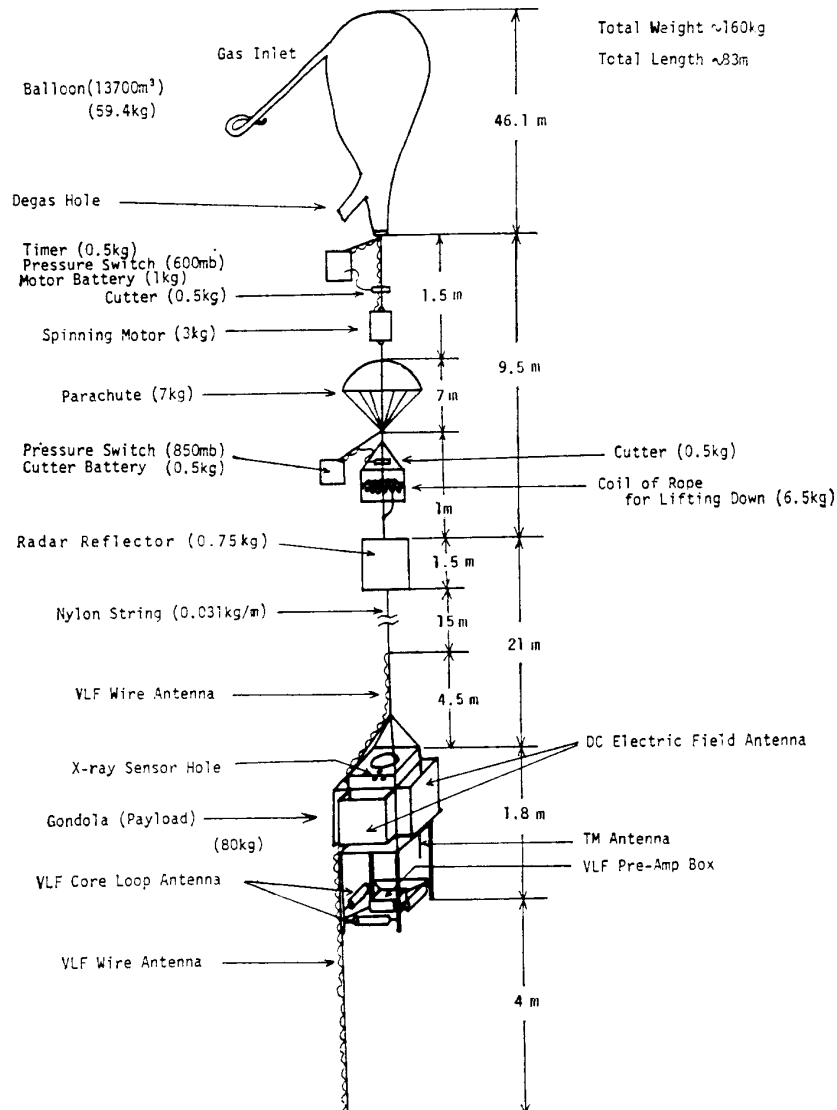


図 3 B₁₅-1N 気球フライトトレイン構成
Fig. 3. Flight train configuration of B₁₅-1N.

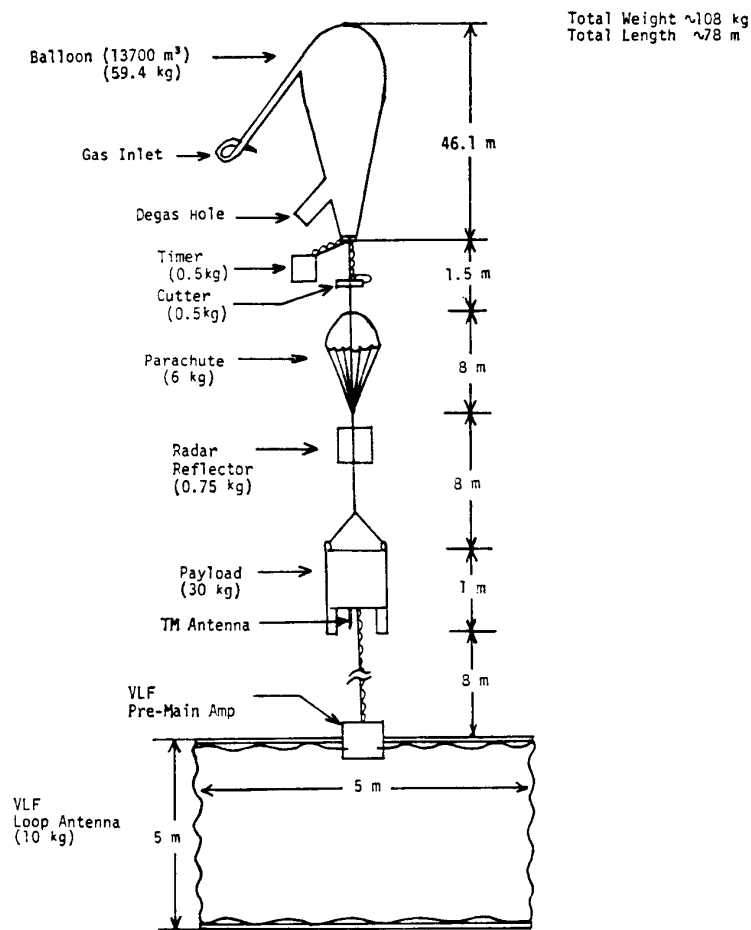


図 4 B₁₅-3N 気球フライトトレイン構成
Fig. 4. Flight train configuration of B₁₅-3N.

B₁₅-1N, 3N のフライトトレイン全体図を、それぞれ図 3, 図 4 に示す。

4.2.2. 放球オペレーション

放球場としては、Stamsund 小学校のフットボールグラウンドを使用した。この場所は、三方を高度 200-300 m の山に囲まれ、地上風が弱く、放球に好適地であるため選ばれた。放球班は、Bergen 大学より、S. ULLALAND 教授（放球主任）他 2 名、Andøya 実験場より 2 名の計 5 名で構成された。

放球システムは、Bergen 大学独特の移動用簡易システムであり（図 5 参照）、正規のランチャーは使用しない。したがって、大気球の浮力測定は行えず、注入ガス量より浮力を算出する。ガスは水素を使用している。放球は、ダイナミックロンチング方式であり、観測器はあらかじめ補助気球により吊り上げられている。大気球が放球され、フライトトレインが立ち上がった瞬間に、観測器は手離され、補助気球により吊り上げられる（図 6 右、中）。しばらく大気球と、観測器を吊り下げた補助気球は並行して上昇していくが、大気球による牽引力が優勢になるにつれ、観測器と補助気球をつなぐ、可動フックが外れ、補助気球は離れる（図 6 左）。

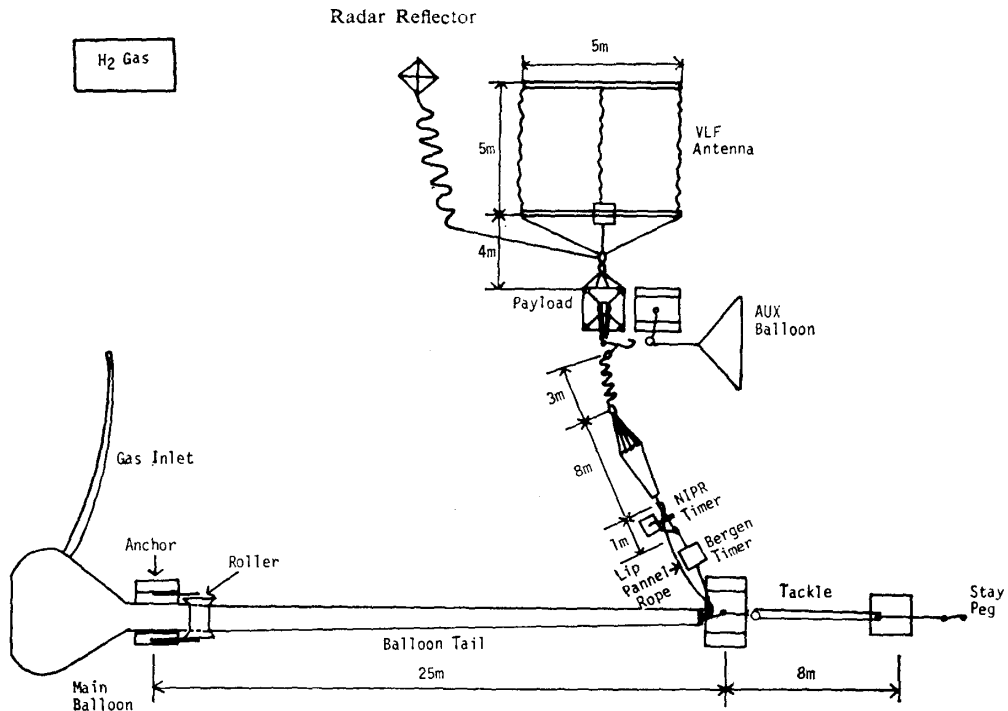


図 5 気球放球態勢概略図
 Fig. 5. Configuration of balloon launching.

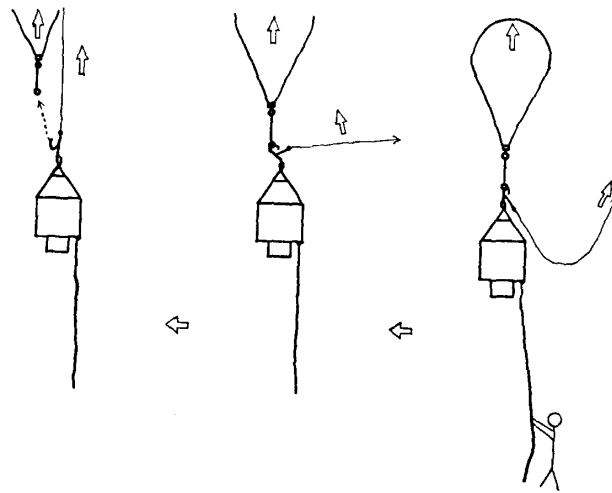


図 6 補助気球と観測器の分離手順図解
 Fig. 6. Schematic illustration of the separation of an auxiliary balloon and a payload.

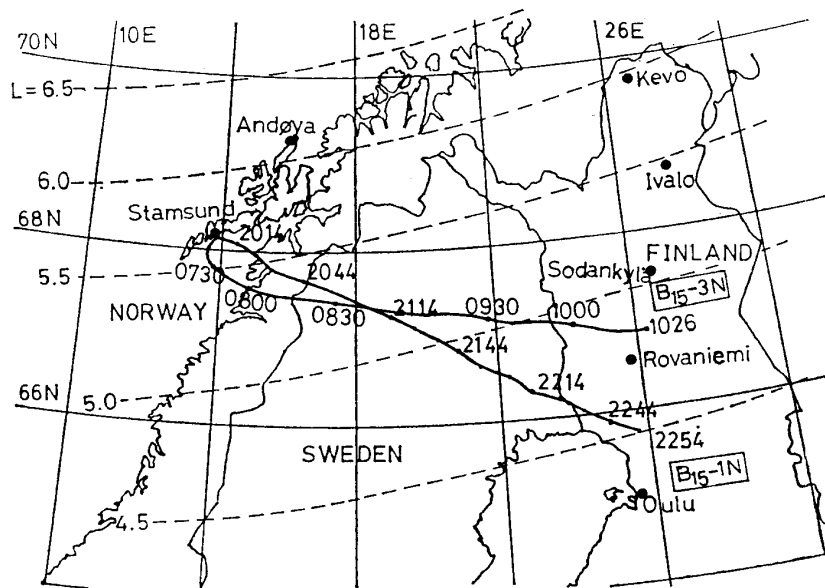
テレメータ受信所は、放球場より尾根1つ隔てた地点の鱈加工場の3階に設置し、中間の尾根上には、2方向を向いた八木アンテナを同軸線で結んだ受動式中継器を設けた。放球場、中継点、テレメータ受信所を結ぶ回線の損失は非常に大きく、放球前のテレメータテストでは信号が受信しにくい場合があり、苦勞した。テレメトリ受信は Stamsund の他、Andøya の飛行場横に臨時受信所を設け、両所で受信を行った。

放球日時の決定に関しては、パリの Meudon Sun Observatory よりテレックスで送られてくる太陽活動警報, Stamsund での超高層物理地上観測 (図 2), Berlin の Free 大学より毎日, ファックスで送られてくる高層天気図, Stamsund の地上気象を総合的に考え合わせ, 実験主任 (福西) と放球主任 (S. ULLALAND) の協議により決定された。

3 月 12 日より 1 週間の待機の後, 3 月 18 日 07UT (現地時間午前 8 時), B₁₅-3N を放球したが, 放球直後, 高度数百 m で, 大気球が破れ, 付近の山に降下した。さいわい, 観測器は補助気球で吊り上げられたままの状態であったため無傷であった。ただちに観測器を回収し, 翌 3 月 19 日 0632UT, 予備気球を用い B₁₅-3N の再放球を行った。放球後 1 時間 45 分, 気球は高度 32 km に達し, 水平飛行に入った。観測器は正常に動作し, 4 時間後, フィンランド中央部にて, 日本側の切り離しタイマーにより観測器は気球より切り離され, 約 30 分後, Rovaniemi 北方に着地した。タイマー誤差は, 4 時間の設定に対し 20 秒以内であった。翌 3 月 20 日 1909UT, B₁₅-1N の放球を行い, 同様に実験は成功した。大気球の追尾は 69°03'N, 18°07'E にある, 1 次レーダにより行われ, 放球直後より, 5 分ごとの位置情報を電話連絡により入手した。図 7 に B₁₅-1N, 3N の飛しょう経路を示す。また, 表 8 に放球時のタイムスケジュールを記す。

4.2.3. B₁₅-3N 観測結果概要

B₁₅-3N 気球は, 3 月 19 日 0632UT, 前夜起こったオーロラサブストームの回復相に放球が行われた。フィンランドのリオメータチェーンの電離層吸収観測によれば (図 8), L=6.0 の Kevo では 0720UT より, L=4.8 の Rovaniemi では 0755UT 付近より顕著な,



Launching B₁₅-3N 06 32UT, Mar.19, 1982
 Stamsund(66°09' N, 13°46'E) B₁₅-1N 19 09UT, Mar.20, 1982

図 7 B₁₅-1N, 3N 気球の飛しょう経路
 Fig. 7. Flight trajectories of B₁₅-1N and 3N balloons.

表 8 放球時のタイムスケジュール
Table 8. Time schedule of the balloon launching.

X - 2 時間	実験決行可否決定会議, 放球時間決定, 航空管制連絡
X - 70分	放球場 - テレメータ受信所間無線電話回線確保, 観測器動作チェック, テレメータテスト
X - 60分	観測器, ランチャー点へ搬出, 補助気球ガス入れ開始
X - 40分	フライトトレイン結合, 大気球ガス入れ開始, 観測器内部電源 ON
X - 10分	観測器最終動作確認
X - 5分	スクイブタイマー ON, 補助気球により観測器吊り上げ
X	放球
X + 20分	観測者, テレメータ受信所へ集合
X + 4 時間	観測器切り離し
X + 4 時間30分	観測器フィンランド中央部に着地

高エネルギー粒子降下に伴う電離層吸収が観測され始め, 1000UT まで継続した。

気球に搭載された X 線観測器は, 見事にこの粒子降下現象を捉えることができた (小玉, 私信). 図 9 に, X 線計数値 (1 分値) の時間変化を示す. 周期 10 分 - 20 分の変動が見られるが, これは図 8 に示した, Kevo, Ivalo, Sodankylä での電離層吸収変動と良く一致するものである. このことから, この時の高エネルギー電子の降り込みは, ノルウェーからフィンランドまで, 経度方向に 500 km 以上の範囲にわたって, 同時に起こっている現象であることがわかる。

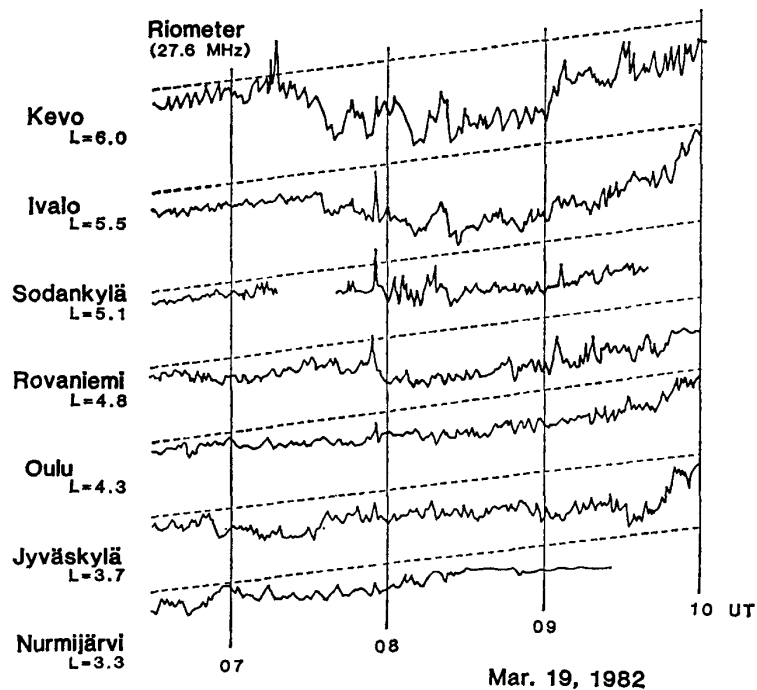


図 8 B₁₅-3N 気球飛しょう時のフィンランドリオメータチェーンによる電離層吸収観測データ

Fig. 8. Cosmic Noise Absorption data observed by Finnish riometer chain during the B₁₅-3N balloon flight.

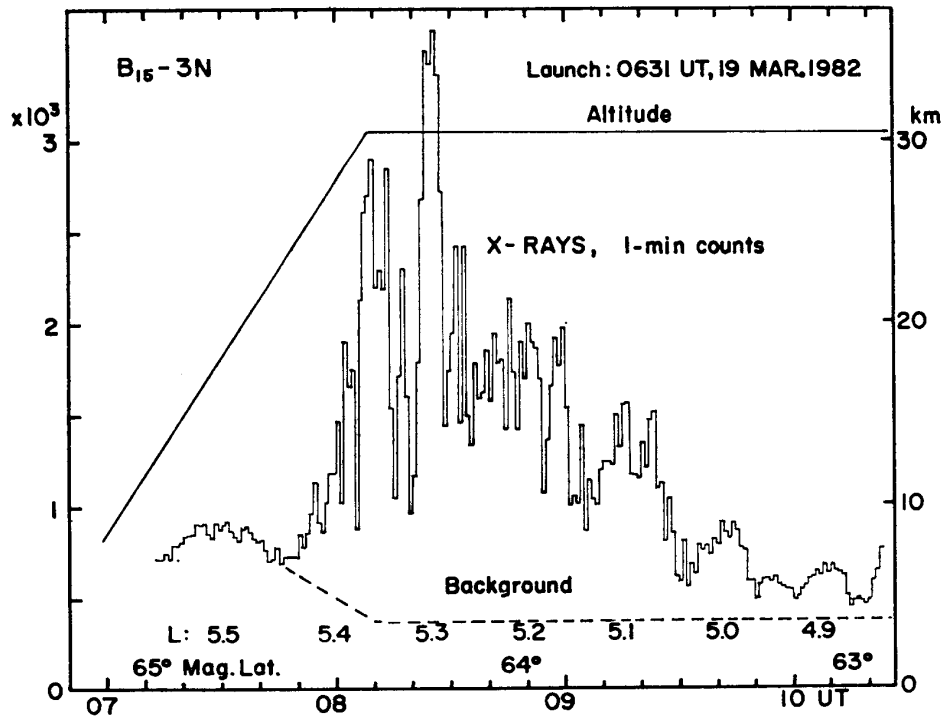


図 9 B₁₅-3N 気球により観測されたX線カウント (1分値) の時間変化 (小玉, 私信による)

Fig. 9. Time variation of X-ray count rate (1-min value) observed by B₁₅-3N balloon (after KODAMA; private communication).

X線データからは、この他、周期約20秒の脈動や周期約1秒の microburst が含まれていることがわかった。これらと VLF 放射との相互関係を調べるのが、本実験の主目的であるが、気球に搭載された VLF 受信器は、受信アンテナが地上を離れた直後からテレメータ電波により、強い電磁干渉を受け、データ解析が非常に困難となった。さいわい Andøya で VLF 放射地上観測を行っていたので、これと気球 X 線データを比較することが可能となった (YAMAGISHI *et al.*, 1983).

図 10 は、このようにして気球 X 線脈動と Andøya の地磁気脈動、VLF 放射脈動 (Quasi Periodic Emission) の比較を行った例である。図中最下段に示した X 線カウント (対数表示) は、周期約 20 秒で変化しており、一方地磁気脈動 (上の 2 段)、VLF 放射 (上から 3 段目) にも同一周期の変動が見られる。特に X 線脈動と、VLF 放射脈動は、非常に良い一致を示すことがわかる。昼間側のオーロラ帯電離層へ降り込む高エネルギー電子束は、磁気圏内のホイスラーモード波 (VLF 放射) によりピッチ角散乱され、loss cone に落ちこんだものと考えられており、この降下電子束の量は、磁気圏内の VLF 放射強度と正相関をもつ。したがって、VLF 放射強度の変化に同期して、降下電子束の変化が起こることになる。

さらに短いタイムスケールの X 線 microburst について、X 線と VLF の関係を調べた例が図 11 である。X 線 (上段) に関して、周期約 1 秒の microburst 群が、約 20 秒の間隔をおいて発生している。一方、VLF 放射 (下段) についても、polar chorus 現象によ

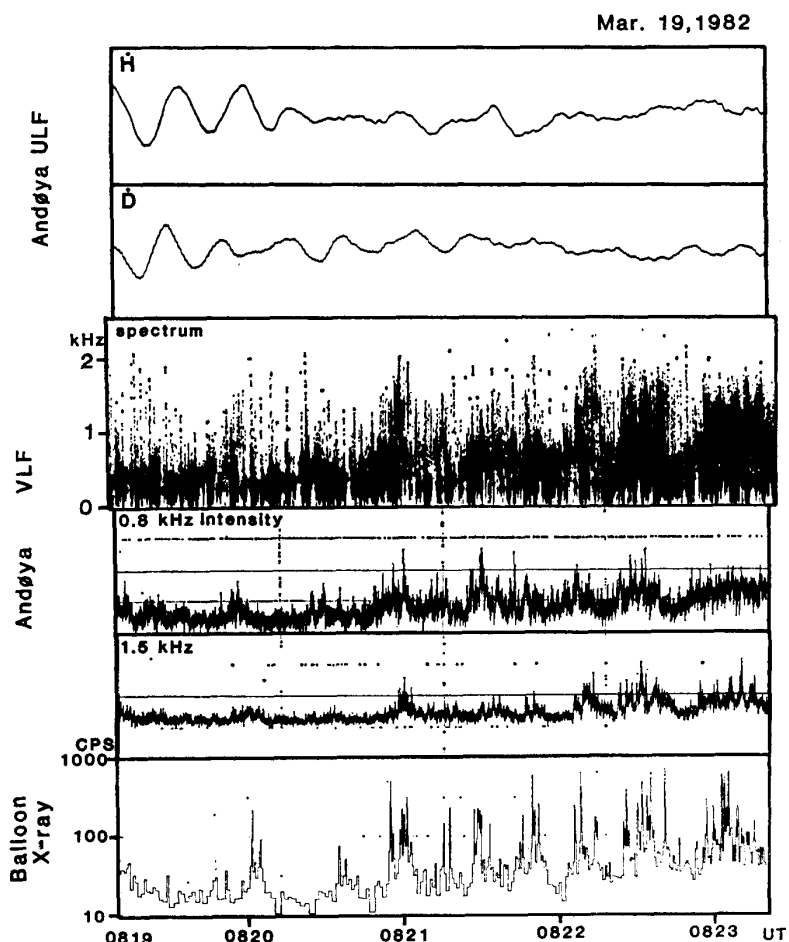


図 10 Andøya 地上で観測された地磁気脈動, VLF 放射脈動と気球X線脈動との相関
 Fig. 10. Correlation of the magnetic pulsation and VLF emission pulsation observed at Andøya and X-ray pulsation observed by B₁₅-3N balloon.

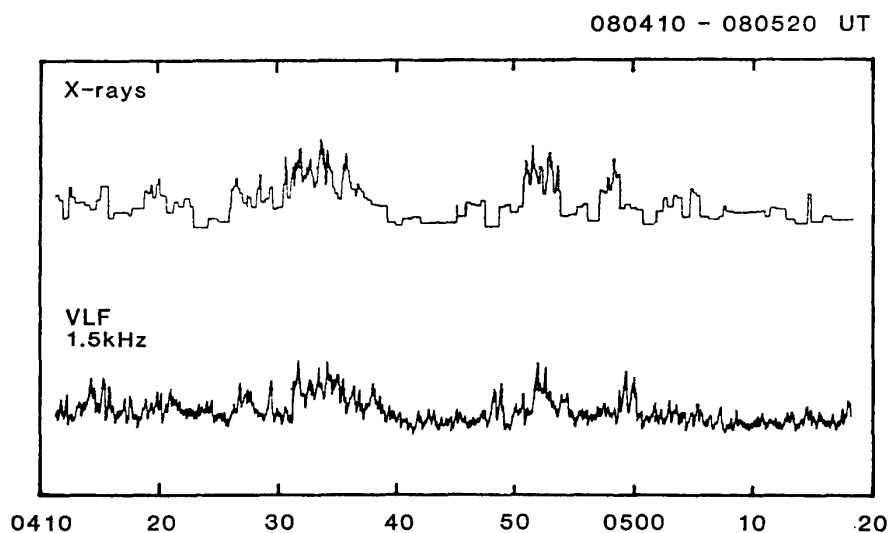


図 11 X線マイクロバーストと VLF 放射の相関
 Fig. 11. Correlation between X-ray microburst observed by B₁₅-3N and VLF emission intensity observed at Andøya.

るバースト状の放射強度変化が、X線と非常に良い対応をもって発生していることがわかる。このことから、オーロラ帯のX線 microburst の原因として、polar chorus によるピッチ角散乱が、主要な役割を果たしていることが予想される。

この他、気球に搭載したオメガ受信器は、オメガ A 局から 200-500 km の範囲内で、信号磁界強度の測定を行った。測定データは、オメガ信号波が電離層と大地間で多重反射し、相互干渉した結果生じたと思われる磁界強度の空間的变化を示した。

4.2.4. B₁₅-1N 観測結果概要

B₁₅-1N 気球は 3 月 20 日 1909UT 放球され、2040UT に高度 32 km に到達し水平飛行に入った。2255UT まで観測を続けたが、VLF 受信器の垂直ダイポールアンテナの影響で、テレメータ送信アンテナ (λ/4 スリーブアンテナ) の水平面内放射指向性パターンが乱され、飛しょうの後半は、テレメータ受信系の IRIG-FM 復調器がしばしば lock off を起こし、データ解析上困難を生じた。

図 12 は、気球飛しょう中のスウェーデン国 Kiruna の地磁気 3 成分記録である。2100UT に 1 回目の地磁気じょう乱が発生し、2200-2220UT、一時回復した後、ふたたび 2230UT より 2 回目のじょう乱が始まった。

気球に搭載された電場観測器は、この地磁気じょう乱に伴う電離層電場の変化を捉えた。図 13 上段に観測された電場強度を、下段に電場ベクトルの方向 (0° が磁北、90° が磁東) を示す (小川, 私信)。これを、気球の飛しょう経路に沿ってベクトル表示したものが、図 14 である。電場強度は 20-30 mV/m の範囲内にある場合が多く、一方電場の方向は、西南西 (地磁気座標系) であったものが 2200UT 付近より北へ回り、2240UT でふたたび西

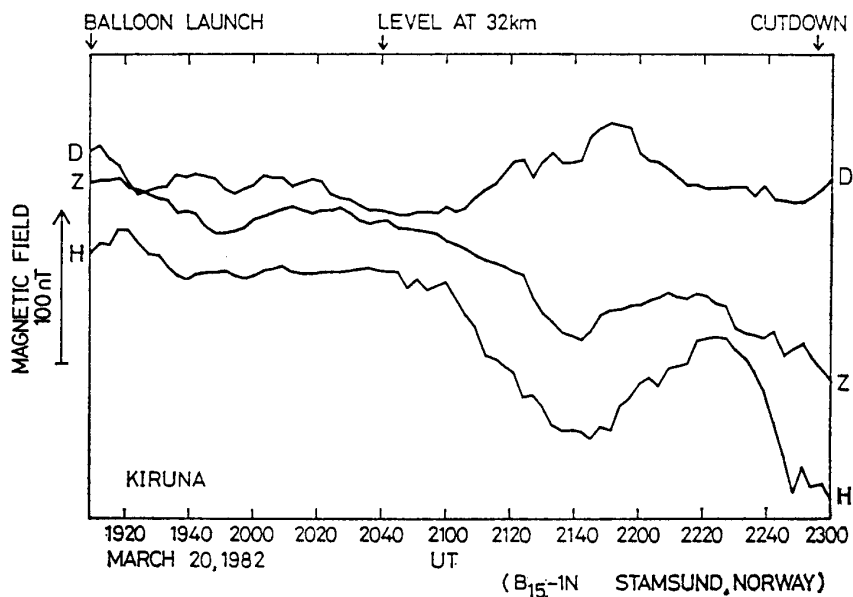


図 12 B₁₅-1N 気球飛しょう時の Kiruna の地磁気 3 成分データ
Fig. 12. Magnetogram of Kiruna during the B₁₅-1N balloon flight.

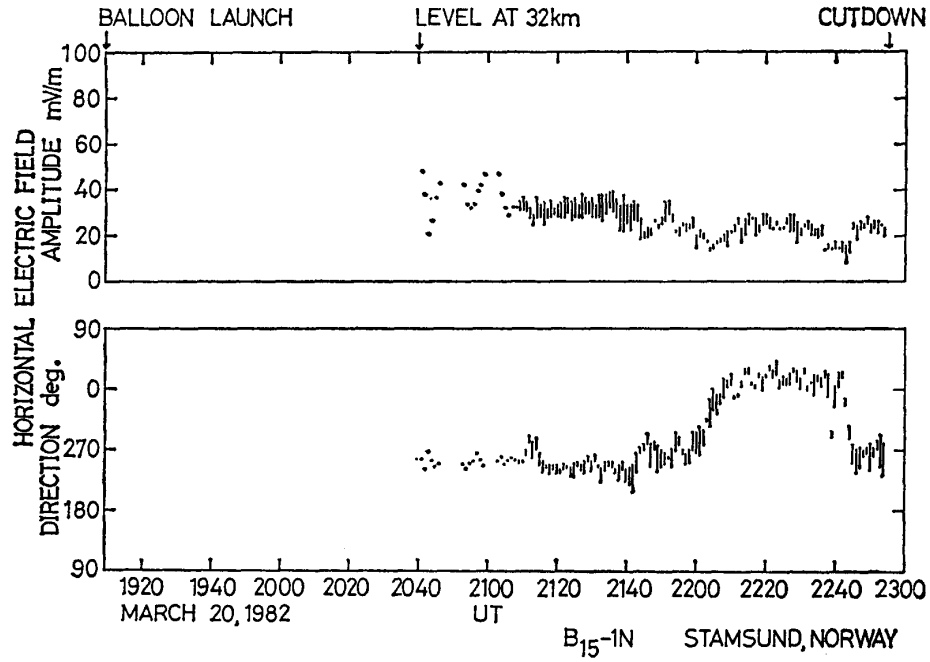


図 13 B₁₅-1N 気球により観測された水平電場強度 (上段) と方位 (下段) (小川, 私信による)
 Fig. 13. Time variation of horizontal electric field intensity (top panel) and direction (bottom panel) observed by B₁₅-1N balloon (after OGAWA; private communication).

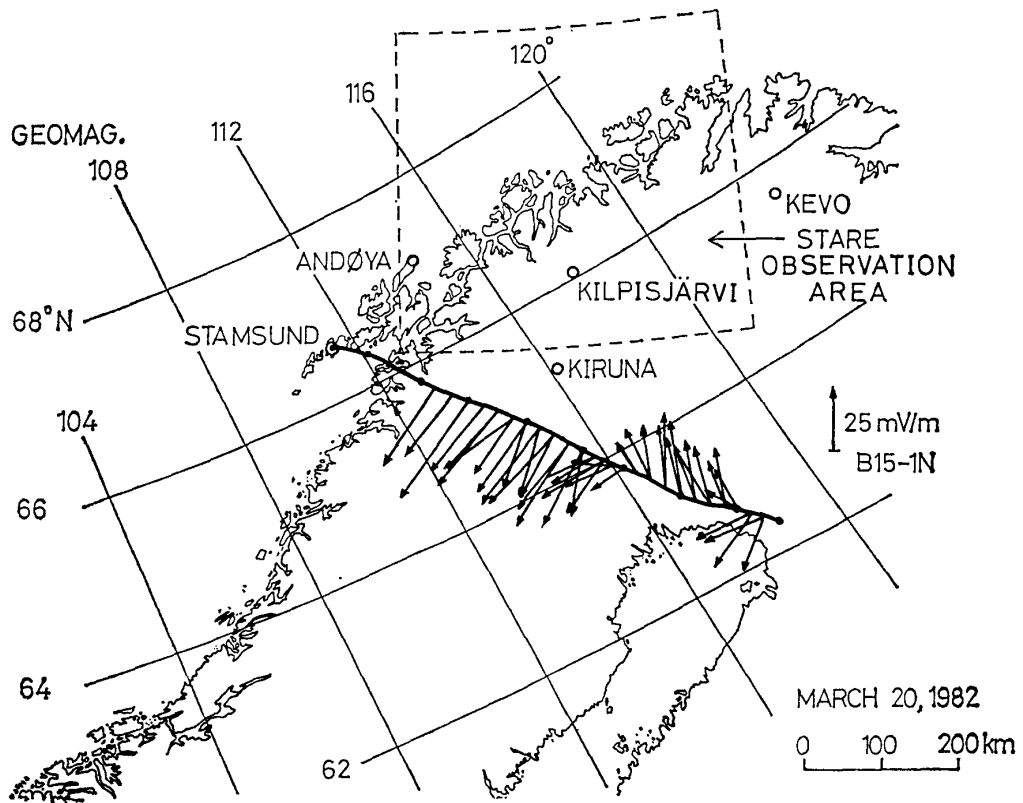


図 14 気球飛しょう経路に沿ってプロットされた B₁₅-1N 観測による水平電場ベクトル (小川, 私信による)
 Fig. 14. Plot of horizontal electric field vector observed by B₁₅-1N along the balloon flight trajectory (after OGAWA; private communication).

へ戻るという変化を示す。

図 14 の地図上点線で囲まれた範囲は、ツインオーロラドップラーレーダ「STARE」の視野を示す。不幸にして、気球実験当日、STARE のノルウェーステーションが故障し、フィンランドステーションのみの観測となったため、STARE による電場観測は不可能となった。また気球の飛しょう経路も STARE の視野を横切らず、STARE-気球による電場同時観測は不成功に終わった。しかし、STARE フィンランドステーションの、オーロラレーダーエコー強度観測から、2000-2030UT に、Harang 不連続が STARE の視野内にあったことが推定されており、気球で観測された電場方向の変化は、Harang 不連続付近での電場構造を捉えた可能性がある。

オーロラ X 線観測器は、上昇途中、高度 20 km 付近で、異常にカウントが激増し、以後、カウントがなくなる事故が発生した。地上では顕著なオーロラが観測されたが、これと比較すべき、オーロラ X 線のイメージングが不可能となり、非常に残念な結果となった。

オメガ観測器は、オメガ A 局 (Aldra) の 10.2, 11.33, 13.6 kHz 信号について、その電磁界強度、位相の連続測定を行った。図 15 に、本実験で得られたオメガ信号電界強度の空間変化を示す。4.2.3. で述べたとおり、多重反射波の干渉パターンが明瞭に認められる。特に周波数が高いものほど、干渉パターンの波長が短くなり、Null 点の位置が周波数とともに、ずれてゆくことが認められる。

図 16 は、電離層で VLF 波が鏡面反射すると仮定し、A 局から気球へ到達する、幾つかの伝搬経路を示したものである。これらの経路間の光路長差を考慮し、電界の重ね合わせを

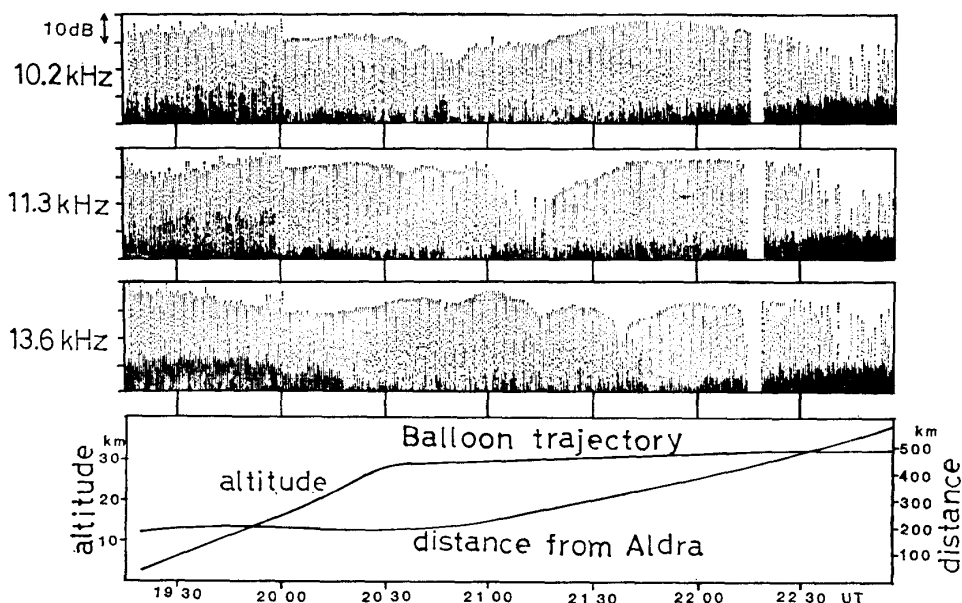


図 15 B₁₅-1N により観測されたオメガ信号電界強度の空間変化
 Fig. 15. Spatial variation of Omega A station signal electric field intensity observed by B₁₅-1N.

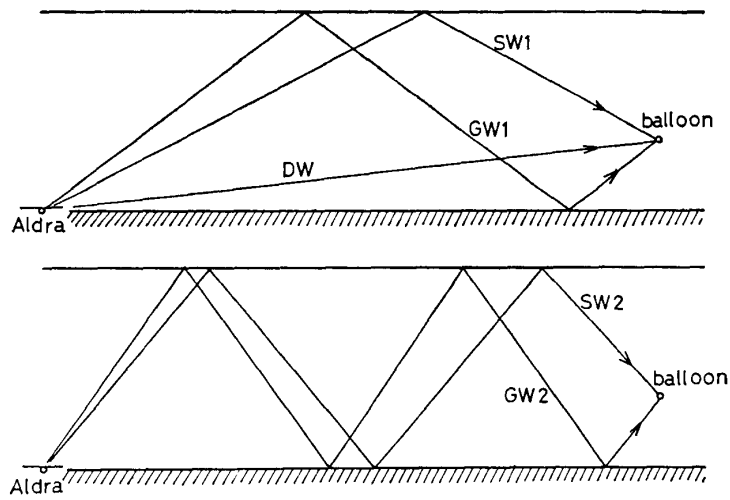


図 16 電離層を鏡面反射面と考えた場合のオメガ A 局と気球間のオメガ信号伝搬経路のモデル
 Fig. 16. The model of the Omega signal propagation path between Omega A station and the balloon.

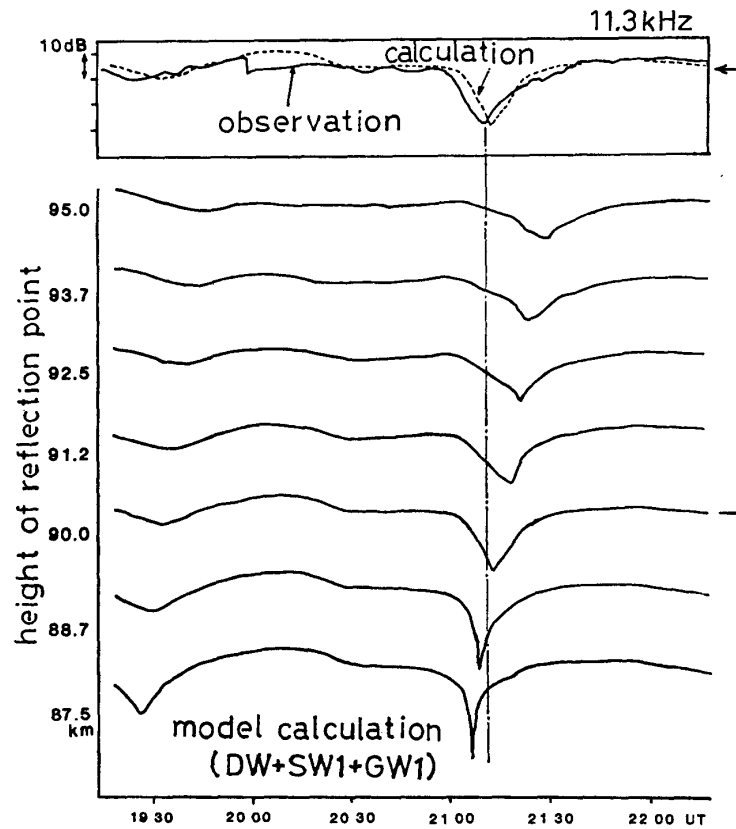


図 17 観測されたオメガ A 局 11.33 kHz 電界強度空間変化とモデル計算との比較。モデルは図 16 上段を用い、反射点高度をパラメータとする。
 Fig. 17. Comparison between observed Omega A signal electric field intensity (11.33 kHz) and model calculation. The model is shown in the top pannel of Fig. 16.

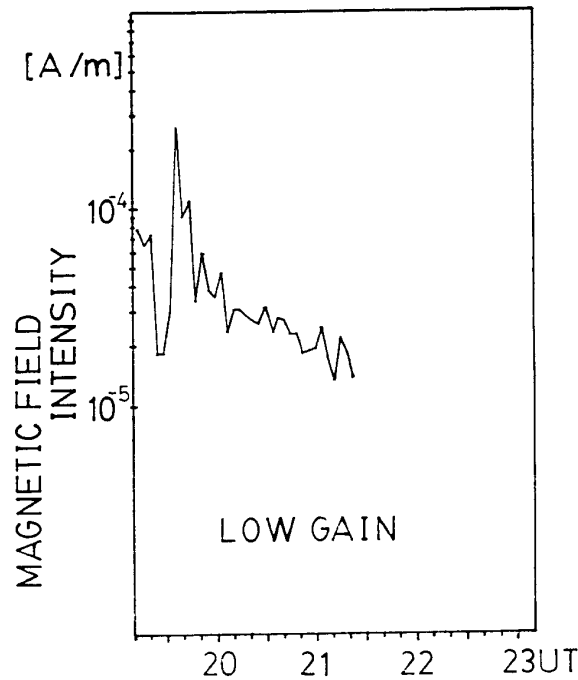


図 18 B_{15-1N} により観測された電力線放射磁界強度 (48-52 Hz 範囲)
(富沢, 私信による)

Fig. 18. Intensity of the power line radiation magnetic field in the frequency range between 48 and 52 Hz observed by B_{15-1N} balloon (after TOMIZAWA; private communication).

行うことにより, 近似的に電界強度空間分布を求めることができ, 図 17 は, 11.33 kHz の電界に対し, 図 16 上段に示した DW, SW1, GW1 の 3 波を合成し, 気球飛しょう経路に沿った電界強度を計算したものである. 下段から上段へ, 電離層反射点高度をパラメータとして, 87.5-95 km まで変化させた場合の結果を示す. 最上段実線は, 観測された 11.33 kHz 電界強度分布であり, 点線は観測値に最も良く適合する, 反射点高度 90 km の場合の計算結果である.

このことから, オメガ局より 200-600 km の範囲内のオメガ波電界強度空間分布については, 図 16 の単純なモデルでもかなり有効で, 仮想反射点高度を求めることができることがわかった.

電力線放射観測器については, 図 18 に示すように, ノルウェー上空での電力線放射磁界の強度分布を測定することができた. またそのスペクトル構造は, 図 12 に示した地磁気じょう乱の影響を強く受けているとの結果が得られつつある (富沢, 私信).

5. 結 語

北欧における大気球実験計画第 2 年次である本実験は, オーロラとその関連現象を主テーマとした関係上, 高層の風が速い, 冬期を中心とした時期に実施せざるを得ず, ややもすれば短くなる観測時間を少しでも長くするため, 実験場を初年度の Esrange から, ノルウ

への Stamsund へ変更する必要があった。その結果、初年度実験と同じく、一から始めなくてはならない点も幾つかあったが、多くの点については、初年度得られた経験が非常に役立った。

さいわい実験目的にかなう現象に遭遇し、良好なデータを得ることができ、実験は成功裡に終了した。スカンジナビアは超高層物理地上観測ネットワークが充実しており、これらと大気球実験を組み合わせた場合、非常に強力な総合観測となりうる。今回の実験では、スカンジナビアの多くの観測所と協同観測を行うことが可能となり、データ解析を進めている現在、その有効性を十分認識することができた。

最後に本計画実施に際し、多大な御指導をたまわった宇宙科学研究所西村純教授、山上隆正助手をはじめとする西村研究室の方々、山梨医科大学小玉正弘教授、名古屋大学空電研究所鎌田哲夫教授、京都大学小川俊雄助教授、電気通信大学芳野起夫教授、富沢一郎助手、立教大学平島洋講師をはじめとする、多くの関係諸先生方に厚く感謝の意を表します。また、国立極地研究所平沢威男教授以下超高層研究グループ、ノルウェー国 Andøya ロケット実験場の A. GUNDERSEN 氏、K. ADOLFSEN 氏、Bergen 大学の S. ULLALAND 教授以下の大気球実験班の方々、Oslo 大学 J. HOLTET 教授、フィンランド気象研究所の R. PELLINEN 博士、Sodankylä 地球物理観測所の H. RANTA 博士、Kiruna 地球物理研究所の G. GUSTAVSSON 博士他の、気球実験と協同観測を実施された方々の多大な御援助に深謝を表します。

文 献

- 鮎川 勝・江尻全機 (1981): 日本-スウェーデン国際共同大気球観測報告. 南極資料, 72, 84-100.
 江尻全機・鮎川 勝 (1980): 日・スバルーン実験報告. 大気球シンポジウム, 昭和 55 年度. 東京, 東京大学宇宙航空研究所, 85-90.
 EJIRI, M., AYUKAWA, M., YAMAGISHI, H., ONO, T., HIRASAWA, T., KAMADA, T., KODAMA, M., HIRASHIMA, Y., OGAWA, T., IWAGAMI, N. and YAMAGAMI, T. (1982): X-ray intensity, ozon density and VLF wave intensity observed by scientific balloon experiments at Esrange. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 22, 155-172.
 平沢威男 (1980): 北半球高緯度でのバルーン実験将来計画. 大気球シンポジウム, 昭和 55 年度. 東京, 東京大学宇宙航空研究所, 91-92.
 YAMAGISHI, H., ONO, T., FUKUNISHI, H., KODAMA, M., YAMAGAMI, T., NISHIMURA, J., MURAKAMI, H. and HIRASHIMA, Y. (1983): Balloon observation of X-ray in the auroral zone; Correlation between X-ray and VLF emissions. Submitted to Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 31.

(1983 年 4 月 4 日受理; 1983 年 5 月 11 日改訂稿受理)