

国際共同観測ロケットキャンペーン I C I と科学的成果

阿部琢美, 齋藤義文 (ISAS/JAXA)、横田勝一郎 (大阪大学)

1. I C I キャンペーンの科学目的

1.1 科学目的

高緯度電離圏のプラズマ対流が太陽風磁場の影響を強く受ける事から理解できるように、極域電離圏は地球大気の中で磁気圏ひいては宇宙空間につながる窓となっている。このため、例えば太陽の活動が活発な状況の下で飛来する高エネルギープロトンは極域電離圏に侵入して電波吸収を増加させ、短波通信が困難になるブラックアウト現象を引き起こす。これは高緯度地域を航行する船舶の無線通信に重大な影響を与え、宇宙天気予報の対象のひとつでもある。このような理由から、太陽からの電磁エネルギーが直接流入する極域電離圏の中で、最も効率的に太陽起源の粒子が注入される特殊な領域がカस्प領域と考えられている (図 1 参照)。

極域カस्प領域は地球大気と宇宙の間でエネルギーと物質の交換が最も密に行なわれている場所であり、それに関連して特異なプラズマ密度構造や波動現象が観測される。電離圏の対流パターン推定等に H F レーダは強力な観測手段であるが、その電波を後方に散乱するような強い電子密度擾乱がカस्प域に存在する事が観測により明らかになった。これはひとつの例であるが、カस्प域は電離圏・磁気圏の中でも特異な領域であり、それを物語るデータは多数得られている。

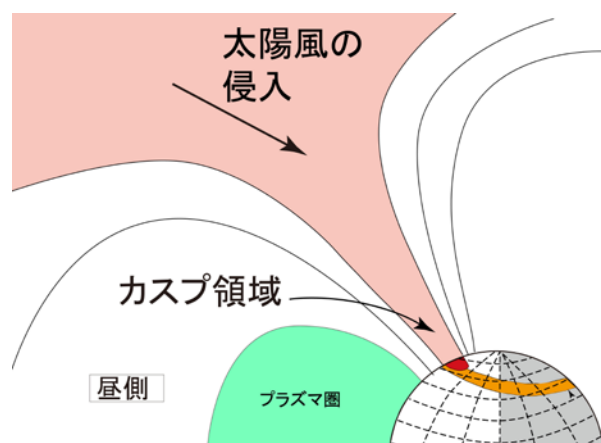


図 1. 磁気圏境界域の構造

カस्प領域での激しいプラズマ密度擾乱の

生成メカニズムを解明するためには、局所的な物理パラメータを提供する飛翔体による観測が最も効果的であると考えられることから、観測ロケットを中核とし地上からの観測を組み合わせるカस्प領域の総合観測を行なう I C I キャンペーンが計画された。密度擾乱現象はカस्प領域の特異性に起因しており、現象の発生を見極めて観測ロケットを打ち上げることで、カस्प領域に存在する宇宙プラズマのマイクロプロセスをその場で観測出来る絶好の機会が得られる。

1.2 I C I-2、I C I-3、I C I-4 キャンペーンの実施と搭載観測機器

I C I プロジェクトは複数の実験から構成されるものであるが、その中で I C I-2, 3, 4 キャンペーンが 2008 年から 2015 年までの間に実施された。本研究グループはこれら 3 つのキャンペーンに対し中心メンバーとして参画し、電子密度擾乱測定器 (FBP) と低エネルギー電子計測器 (LEP-ESA) の 2 つの観測装置を観測ロケットに搭載した。2 つの測定器はカस्प域の特異なプラズマ擾乱現象に関し、1) 電子密度擾乱の高時間分解能観測 (FBP)、2) 降下低エネルギー電子フラックスの高時間分解能観測 (LEP-ESA) を行なうことを目的とした。

極域カस्प領域の特異性は太陽からの粒子エネルギーが最も密に流入している事に大きく起因しているが、このためにこの領域には特異なプラズマ密度構造やプラズマ波動現象、粒子の流出現象等が観測される。I C I プロジェクトの科学目的は、カस्प領域のプラズマ密度擾乱の生成

メカニズムを解明することにあるが、Flow Channel Events (FCE)、Reversal Flow Events (RFE)、Polar Cap Patch といったカusp領域・更に高緯度の極冠領域の各現象に応じて異なる種類のプラズマ密度擾乱が存在するために、個別のキャンペーンでは異なる領域での密度擾乱に焦点をあてている。表 1 に ICI-2, 3, 4 キャンペーンにおける各観測ロケットの打ち上げ年月と搭載観測装置をまとめた。

表 1. これまでに行われた ICI キャンペーンと搭載観測機器

キャンペーン	打ち上げ	ロケットへの搭載観測機器と担当機関
ICI-2	Dec 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Electron density perturbation (JAXA) • Low energy electron spectrum analyzer (JAXA) • High energy particle (Univ of Bergen, Norway) • AC&DC electric field & Wave (Univ of Oslo, Norway) • 4-needle Langmuir probe (Univ of Oslo, Norway)
ICI-3	Dec 2011	<ul style="list-style-type: none"> • Electron density perturbation (JAXA) • Low energy electron spectrum analyzer (JAXA) • AC&DC electric field & Wave (Univ of Oslo, Norway) • Search coil magnetometer (LPP, France) • 4-needle Langmuir probe (Univ of Oslo, Norway)
ICI-4	Feb 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Electron density perturbation (JAXA) • Low energy electron spectrum analyzer (JAXA) • Electric field & Wave (Univ of Oslo, Norway) • Multi-needle & Sphere Langmuir probe (Univ of Oslo, Norway) • AC&DC magnetometer (LPP, France) • Fluxgate magnetometer (Univ. of Alberta, Canada)

2. ICI-2 キャンペーン(2008 年 12 月)

ICI-2 キャンペーンの科学目的は、極域カusp領域でHF レーダ電波の強い後方散乱波を引き起こす電子密度擾乱を観測ロケット、地上のレーダ、全天カメラ等を使って総合的に観測を実施し、その発生メカニズムに迫ることにあつた。極域カusp領域のプラズマ密度擾乱については、2007 年以前は地上での電波観測からその存在が推測されていただけだった。空間スケールについては、HF レーダの電波が後方散乱されていることから効率の良い反射が起きるレーダ送信電波の半波長程度の密度擾乱が卓越しているだろうとの予測がなされていただけで、根拠には乏しかった。生成メカニズムの予想としては、最初に何らかの要因により 10m スケールの小さな擾乱が発生し、それが勾配ドリフト不安定またはケルビンヘルムホルツ不安定により発達し、観測された大振幅のプラズマ密度擾乱になるのだろうと考えられていた。このため、ICI-2 キャンペーンでは密度擾乱の発達に寄与する勾配ドリフト不安定の役割を見極めるために必要なパラメータが観測から得られるように観測機器構成が考えられた。

ICI-2 キャンペーンは 2008 年冬期に行われ、観測ロケットは 2008 年 12 月 5 日 10 時 35 分 10 秒 UT にノルウェーのスピッツベルゲン島のニーオルスン射場から打ち上げ仰角 81 度、方位角 196 度で打ち上げられた。飛行時間は 575 秒、最高到達高度は 328.8 km であつた。

図 2 は ICI-2 観測ロケットに搭載された電子密度擾乱測定器への入射イオン電流とそのダイナミックスペクトルを示す。測定用のプローブには -4 V が印加され、イオンの飽和電流が測定されているために電子温度の変動が比較的小さい場合はその場での電子密度を直接反映していると考えてよい。

サンプリング周波数は 6400 Hz で、1 m 以下の空間スケールの電子密度擾乱を検出することができる。図 2 から、観測ロケットは打ち上げから 120~140 後、高度 183~213 km において強い電子密度擾乱の通過していたことがわかるが、これは現象の高度方向ではなく水平方向の分布を

反映したものと考えるのが一般的である。ロケットは飛翔中に計3回、プラズマ密度擾乱の強い領域を通過した。

ICI-2 キャンペーンは世界で初めてカスピ領域のプラズマ密度擾乱についてのその場観測に成功し、高度方向を含む空間分布、局所的な電場分布、それらの磁力線方向との関係を明らかにした。その結果としては10 mスケールの密度擾乱とプラズマ対流および密度勾配は勾配ドリフト不安定の条件として整合的であるもの

の、観測データから推定される不安定の成長率は密度擾乱振幅を説明出来ないという定量的な問題を残した。また、ケルビンヘルムホルツ不安定は単独では密度擾乱の原因になり得ない事が観測データをもとにした検討結果として示された。さらに、降下電子に10mスケールの空間構造は見られなかったことから、初期の密度擾乱を与える根源的な現象は何か、という大きな問題が提起された。

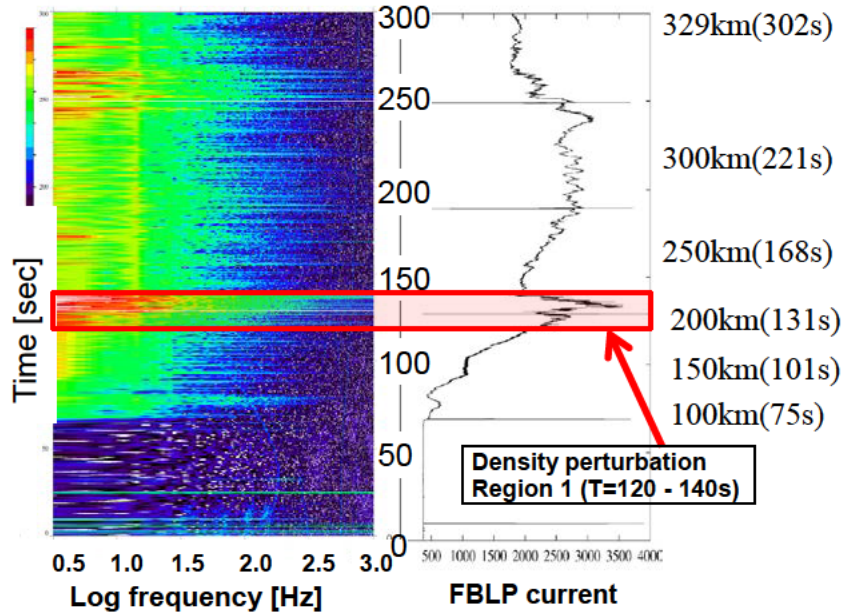


図2. ICI-2に搭載されたFBP（固定バイアスプローブ）への入射イオン電流とそのダイナミックパワースペクトラム

3. ICI-3 キャンペーン(2011年12月)

ICI-2 キャンペーンで取得されたデータの研究結果として、カスピ領域の電子密度擾乱の生成メカニズムとして、1) 降下電子により比較的大きな空間スケールの密度擾乱が発生、2) ケルビンヘルムホルツ不安定により km 程度の空間スケールのプラズマ密度擾乱が発達、3) その後勾配ドリフト不安定により 10 m スケールの擾乱が作り出される、という説が提案された。また、降下電子に km スケールの構造があって、それが第2段階の密度擾乱を作り出している可能性もまだ残されている。そこで、ICI-3 キャンペーンを実行するにあたってはケルビンヘルムホルツ不安定の後に勾配ドリフト不安定が寄与する、という2段階のステップが密度擾乱生成の有力候補と位置づけ、観測戦略が考えられた。こうして、水平方向のプラズマ対流の役割を明確にするため、Reversed Flow Channel という大規模対流の中で逆向きの流れをもつ領域をロケットが通過するようにして観測を行なう戦略をとった。これによってケルビンヘルムホルツ不安定がプラズマ密度擾乱の生成にどのような役割を果たすかが明らかになる。

ICI-3 キャンペーンは2011年冬期に行われ、観測ロケットは2011年12月3日 7時21分31秒 UT に ICI-2 と同じくニーオルスン射場から打ち上げられた。飛翔時間は575秒、最高到達高度は328.8 kmであった。測定器による主な観測結果は次の通りである。

- 1) ICI-3 ロケットは飛翔中に 1 m の空間スケールまでのプラズマ密度擾乱を伴う複数の Reversed Flow Event (RFE) 領域を通過した
- 2) 微小スケールのプラズマ密度と電場の擾乱が最も強い領域は2つ山の速い流れの領域に一致している。擾乱の空間波長が長いため、ケルビンヘルムホルツ不安定だけでは観測された密度擾乱を説明することはできない

3) 数値的な検討結果として、inhomogeneous energy-density-driven instability (IEDDI)がその領域における電場から幅広い周波数帯で静電的なイオンサイクロトロン波を励起する可能性があり、それが観測された微小スケールの擾乱を引き起こすことができることを実証した。日本が提供した2つの測定器以外の観測機器もほぼ予定通りの測定を実施しデータが取得され、その結果として、電子密度擾乱の生成メカニズムに関する理解は大きく進展した。図3にカusp領域のプラズマ密度擾乱生成のメカニズムについて、ICI-2 キャンペーン以前に予想されていたもの、ICI-2 と3のキャンペーン観測を通して得られた新たな描像を示す。

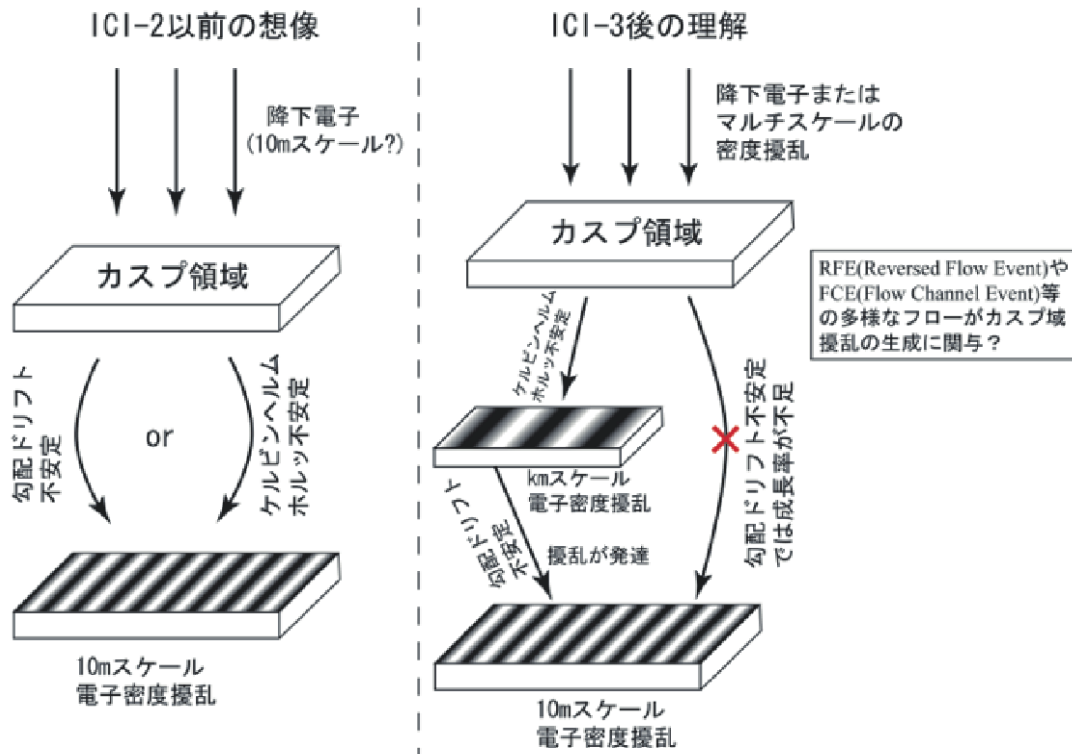


図3. 電離圏カusp領域のプラズマ密度擾乱の生成メカニズムに関する理解の進展

4. ICI-4 キャンペーン(2015年2月)

ICI-4 キャンペーンでは、プラズマ密度擾乱の生成に対するケルビンヘルムホルツ不安定の寄与を研究するために ICI-3 キャンペーンと比較可能なデータを取得することを目的とした。すなわち、カusp領域の降下電子は顕著に存在するがフローシアアの無い FCE (Flow Channel Event) 領域にロケットを打上げて観測を行うこととした。これによって、ケルビンヘルムホルツ不安定が作用しない領域において、どのような密度擾乱が見られるか、あるいは見られないかを検証する。さらに、FCE 領域中の降下電子の空間構造を観測し、km スケールの構造が存在するか否かを検証する予定であった。

しかしながら、2013年に ICI-4 ロケットの第1段モータ部に不具合が発見されたため、打ち上げが延期となった。その後、2014年に不具合の原因が特定され対策が行われて打ち上げが可能になったが、その時点で同年冬にノルウェーのニーオルスン射場から打ち上げを行うための調整はできなかったため、同射場で実験を行うことは諦めた。そして、2015年の1~2月にノルウェーのアンドーヤ射場から ICI-4 ロケットの打ち上げを行うこととした。ただし、アンドーヤからのロケットの打ち上げではカusp領域を通過させることが困難なため、実験として狙う現象を変更することとした。カusp領域よりも高緯度側の極冠域に発生するポーラーキャップパッチ (Polar

cap patch)は反太陽方向へのプラズマ対流により夜側のオーロラ帯に達するが、この現象はプラズマ不安定や擾乱を伴うことがある。ICI-4 キャンペーンの観測対象は、このようなプラズマ現象に変更された。

このような経緯を経て、ICI-4 キャンペーンの観測ロケットは2015年2月19日 22時06分41秒UTにノルウェーのアンドーヤ射場から打ち上げ仰角80.2度、方位角353.5度で打ち上げられた。本キャンペーンは当初と異なる目的をもって行われたため、本稿では結果を紹介しないこととする。

5. 日本が提供したロケット観測機器の詳細

既に述べたように我々は、電子密度擾乱測定器 (FBP) と低エネルギー電子計測器 (LEP-ESA) を開発し、打ち上げる観測ロケットに搭載し観測を行うことでICIプロジェクトに参加してきた。本プロジェクトでは10 mスケールのプラズマ密度擾乱を観測のターゲットとしているために1 m程度の空間スケールの観測が必要で、ロケットの飛行速度から考えると、飛行中に少なくとも1) 数kHz以上のサンプリングレートで電子密度計測、2) 数10Hz以上の時間分解能で低エネルギー電子計測、を行う必要がある。本研究グループは既に上記に要求されるサンプリングレートの機器開発を行ってきた。こうした実績が評価され、ノルウェーからICI-2、ICI-3、ICI-4プロジェクトへの協力要請があったものである。ここでは、ICI-4プロジェクト用に開発された測定器について紹介を行うこととする。

5.1 電子密度擾乱測定器 (FBP)

極域電離圏カスプ領域に発生する電子密度擾乱は、それが後方散乱エコーの原因となることからレーダ運用波長の半分である10 mオーダーの空間スケールをもつと推定されている。ICI-4 キャンペーンで打ち上げるロケットの当初の観測目的のひとつとして、Flow Channel Eventに伴って駆動されるプラズマイレギュラリティ領域における電子密度擾乱の空間スケールと変動量に関する情報を得ることがあげられていた。FBPのプローブがロケット頭胴部先端に配置され正の電圧に印加したプローブにより微小スケールの電子密度変動を観測する事は最も重要な観測項目のひとつであり、本測定器は現象の解明にとって欠かせないデータを提供することになる。

電子密度擾乱測定器は、プローブ部、プリアンプ部、電子回路部より構成される。ロケットのスピンのともなう電子密度変動を出来るだけ軽減するために、電子密度擾乱測定用プローブは球形で、機体中心の最上部へ搭載することが必要である。電離圏F領域での測定を重視することと搭載の電場計測器への干渉を抑えるために、球プローブの直径は2cmとする。ICI-4 キャンペーンのためのFBPは電子電流測定に加えイオン電流測定を行なうため、正の電圧を印加する電子用プローブに加え、負の電圧を印加するイオン用プローブを搭載することとして、それぞれの飽和電流域で電子電流とイオン電流を測定することとした。図4に示すように電子用プローブは直径2 cmの球形、イオン用プローブは直径2 cmの円板形状である。電流は電子回路部のアンプにより増幅され、

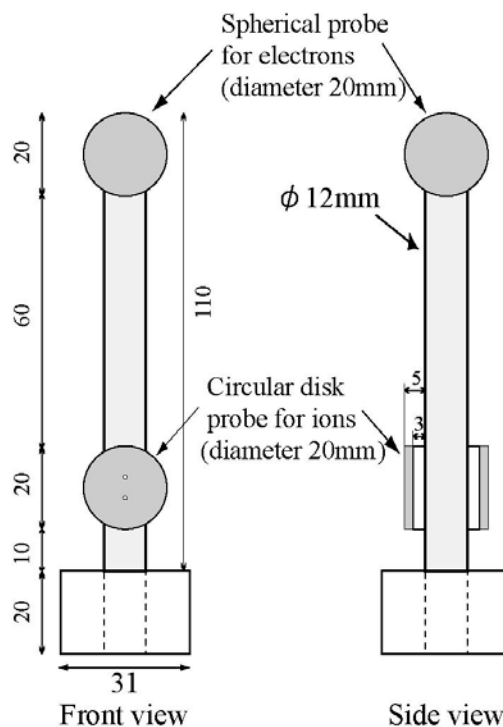


図4. FBPプローブの外観図

テレメータ装置へと送られる。

表 2. 電子密度擾乱測定器の主要性能

チャンネル		電子測定チャンネル	イオン測定チャンネル
サンプリングレート		約 3 0 0 0 H z	約 3 0 0 0 H z
電流利得	Gain Low	Full scale 3.0×10^{-5} A	Full scale 1.0×10^{-7} A
	Gain High	Full scale 1.5×10^{-6} A	Full scale 1.5×10^{-9} A
バンドパスフィルター		DC~1500Hz	DC~1500 Hz
CAL 信号		Low, High を各 0.1 秒間 レベルはフルスケールの半分	Low, High を各 0.1 秒間 レベルはフルスケールの半分

5.2 低エネルギー電子計測器 (LEP-ESA)

低エネルギー電子の計測を行なう LEP-ESA はカスプ上空においてこれまでに無い高い時間分解能 (11 ミリ秒で 16 ステップのエネルギースペクトルを取得) でエネルギー分布関数計測を行う。Flow Channel Event における降下電子の役割を解明するため、またカスプ領域に生起するプラズマ不安定現象のエネルギー供給源としての低エネルギー電子の寄与を明らかにするために、LEP-ESA による低エネルギー電子の観測は重要である。

LEP-ESA は、センサー及び伸展機構と電子回路部で構成される。ESA は 10eV から 10keV の範囲の電子の分布関数を測定する。図 5 に断面図を示すように ESA はトップハット型の静電分析器であり、2 重に重なったトロイダル型の電極の内側に正極性の電位を与えて 0 V から約 3 kV まで掃引することによって電子の分布関数の計測を行う。センサーに飛来した電子は、電極に与えた電位に引き寄せられてセンサー内部に入り電極に与えた電位で決まる適当なエネルギーを持った電子のみが 2 重の電極の間を通過する事が出来る。電極間を通過した電子は、電極の下部に置かれた MCP (Micro

Channel Plate) に入射し、検出可能な電荷量に増幅された上で MCP の背後に置かれた、円周を 16 の部分に分割した円環状のアノードで検出される。円周上の位置を知る事で、電子の飛来した方向を特

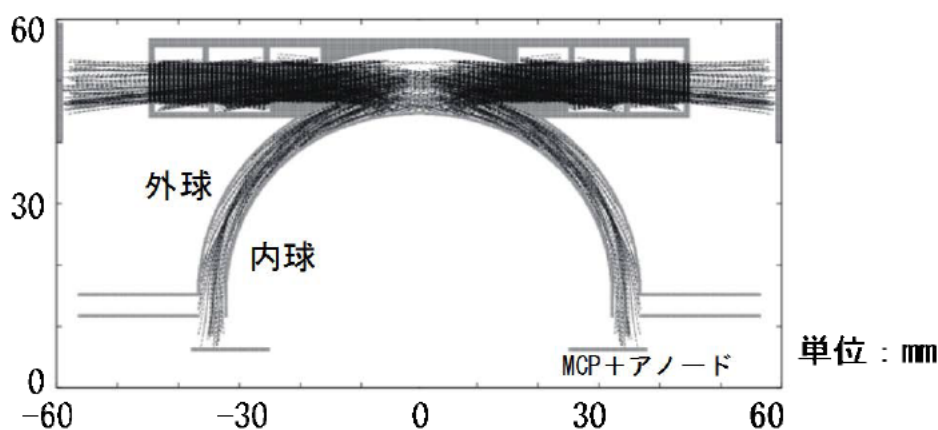


図 5. ESA の断面図

定することができる。センサーは 16 ステップでエネルギースペクトルを取得するが、掃引上昇時と下降時は異なるエネルギーステップをとるため、合わせると 32 ステップでのエネルギースペクトルを取得することができる。低エネルギーの電子はロケット構体の影響を受け易いため、ロケット打ち上げ時はノーズコーン内に収納しておき、ノーズコーンの開頭後、観測高度に到達するまでにセンサーを伸展する。表 3 に ESA の性能をまとめる。

表 3. 低エネルギー電子計測器の主要性能

Energy Range	10eV-10keV
Energy Step	エネルギー掃引は三角波 上昇 16 ステップ、下降 16 ステップでそれぞれエネルギースペクトルを計測可能
視野	360° × 4.5° (22.5° × 4.5° / CHANNEL)
感度 (g-factor)	3.0 × 10 ⁻⁴ cm ² str (/ 22.5 deg.)
時間分解能	11.1 msec / 16 energy steps 22.1 msec / 32 energy steps

6. まとめ

ICI プロジェクトは日本、ノルウェーなど数カ国の国際協力により進められ、ICI-2, 3, 4 キャンペーンとして成功裏に行なわれてきた。観測対象は ICI-2 と 3 では主に極域カusp領域のプラズマ擾乱であり、ICI-4 では夜側オーロラ帯に達するポーラーパッチであった。各々のキャンペーンでは、プラズマ擾乱のメカニズム解明の鍵と考えられている電子密度擾乱、低エネルギー電子、電場等を搭載観測機器により高時間分解能での測定を実施し、現象に関する我々の理解は着実に進展した。これまでに行なわれたキャンペーンおよびその成果は次のようにまとめられる。

- 1) ICI プロジェクトでのロケットによるその場直接観測は、極域カusp領域のプラズマ密度擾乱に関する我々のこれまでの仮説を覆し、擾乱生成のためには2段階のステップ（主要なものとしてケルビン-ヘルムホルツ不安定と勾配ドリフト不安定）が必要であることを示した。
- 2) 極域電離圏には複数の種類のプラズマイレギュラリティ（不規則構造）が存在し、それらは異なるメカニズムにより生成される。
- 3) 日本では ICI プロジェクト参加のために測定器開発が行なわれ飛行中に所定のデータを取得したが、これらは個々のキャンペーン成功に貢献したのみならず、開発された技術の宇宙空間でのパフォーマンスを実証し、今後の他の観測ロケット実験や衛星計画に利用可能であることを示した。