



3D
EISCAT

EISCAT_3D: 次世代欧州非干渉散乱レーダー計画

宮岡 宏¹⁾、野澤悟徳²⁾、小川泰信¹⁾、大山伸一郎²⁾、
藤井良一³⁾、佐藤夏雄¹⁾

1): 国立極地研究所、2): 名古屋大学太陽地球環境研究所、3): 名古屋大学



3D
EISCAT

EISCAT_3D: 次世代欧州非干渉散乱レーダー計画

- EISCATの現状とEISCAT_3D計画の背景
- EISCAT_3Dシステムの概要
- EISCAT_3Dで目指すサイエンス
- 経費とスケジュール
- 計画推進に向けて

背景と歴史

欧州非干渉散乱(EISCAT)科学協会は、非干渉散乱(IS)レーダーを用いたヨーロッパにおける宇宙科学の研究や教育を推進するため、レーダーの建設と維持・運用を主目的として、欧州6ヶ国(独、仏、英、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド)が共同出資し、1975年に設立。

科学協会設立の背景

- (1) 高緯度域の大気圏・電離圏・磁気圏に関する研究は、基礎科学として有意義であること。
- (2) これらの研究にとって北欧諸国が地理的に非常に重要な位置にあり、且つ研究に必要な観測所を既に有していること。
- (3) 大規模施設の建設、維持・運用には国際協同が重要であること。

- KST UHFレーダーは1981年より、VHFレーダーは1988年より観測開始。
- EISCAT Svalbard radar (ESR)のプランニング(1990-1992年)。
ESR第1アンテナ建築(1993-1996年)、1996年より観測開始。
- 日本のEISCAT協会への加盟(1996年)。
日本が担当するESR第2アンテナ完成、観測開始(1999年)。
- KST UHF/VHFレーダーシステムのリニューアル(1999-2001年)。
- 新協定の締結(2007年)。EISCAT協会加盟国は、独、英、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、日本、中国の7ヶ国。
- IPY観測期間中に、ESRによる1年間連続観測(2007年3月-2008年2月)。

Courtesy of Tony van Eyken

EISCATレーダーシステム構成



サブオーロラ帯～オーロラ帯の観測

Kiruna- Sodanklyä- Tromsø (KST)
UHF radar (**931 MHz**) 1981年～

Tromsø VHF radar (**224 MHz**) 1988年～

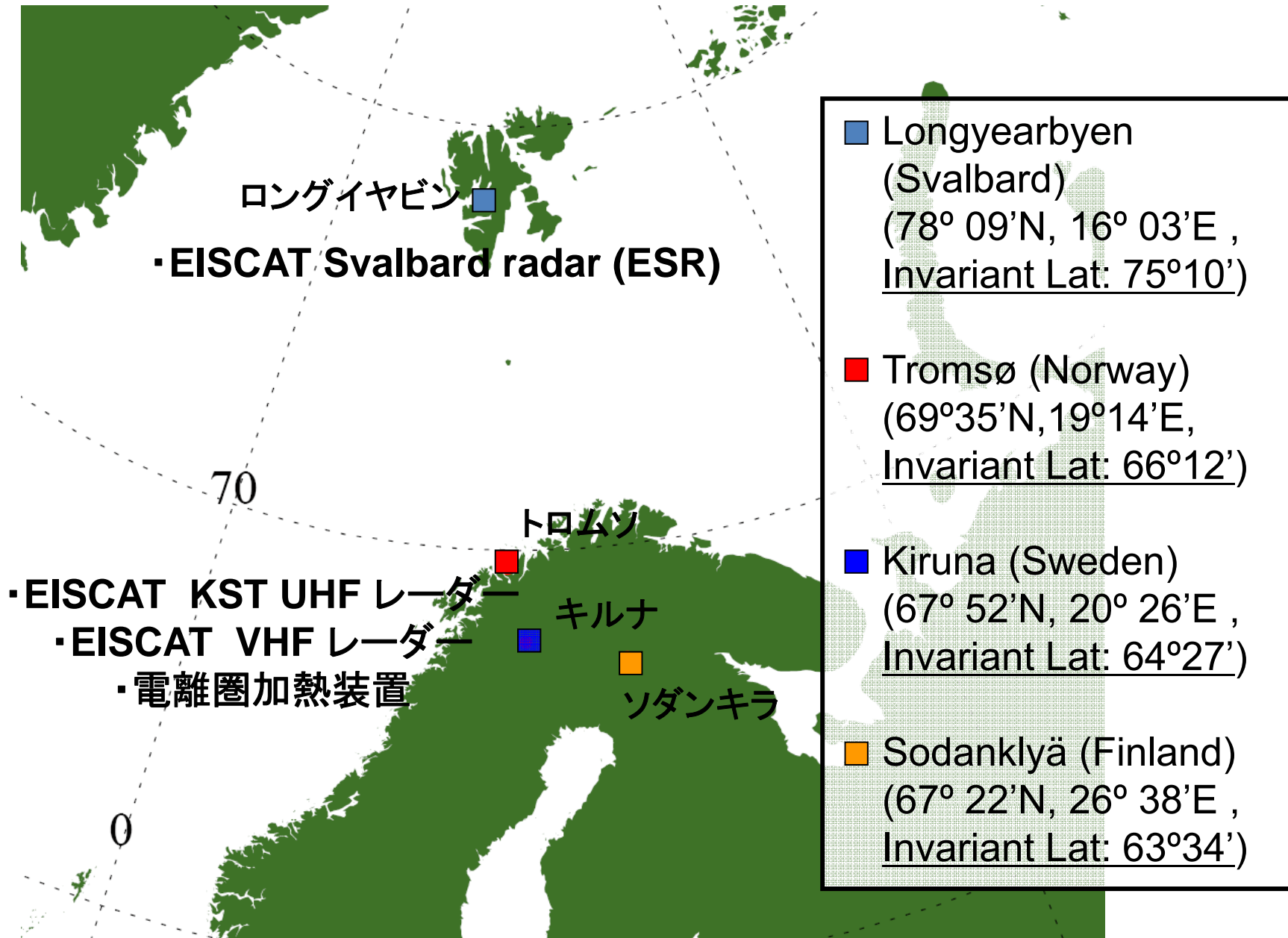


カस्प領域～極冠域の観測

EISCAT Svalbard radar (ESR) (**500 MHz**)
32m アンテナ:1996年～, 42m アンテナ:1999年～



EISCATレーダー設置場所



KST Radars



Tromso, Norway: VHF and UHF

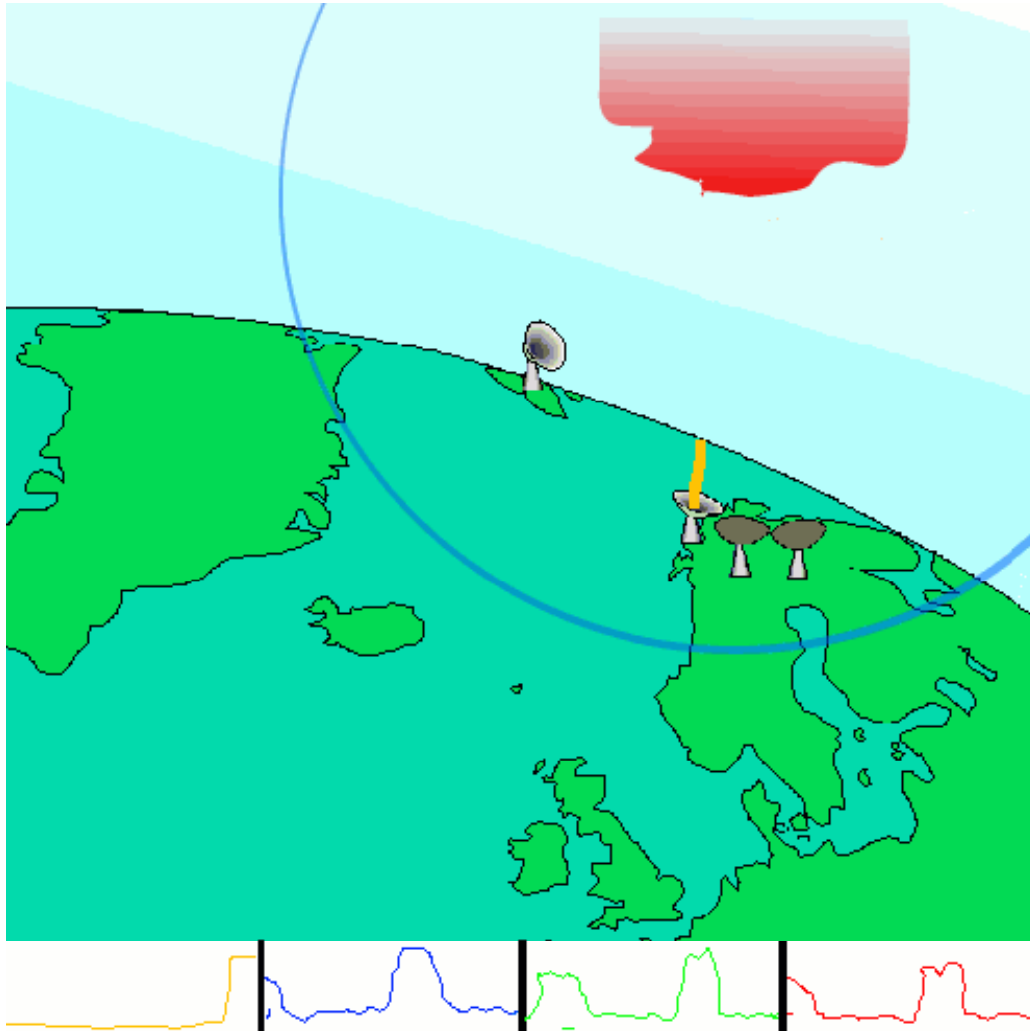


Kiruna, Sweden: UHF RX



Sodankyla, Finland: UHF RX

三局方式による観測 (EISCAT KST UHFレーダー)



EISCAT本部より

$$E = -v \times B$$

E : 電場

v : イオン速度

B : 磁場

3次元イオン速度を導出
→電離圏電場を精度良く
導出可能。

観測できる物理量

直接検出可能な物理量:

高度 約 80 km から約 1800 km の

- ・電子密度
- ・電子温度
- ・イオン温度
- ・イオン速度(視線方向)

KST UHF レーダーによる3局方式の観測から

- ・イオンの3次元速度ベクトル

モデル等を用いて2次的に導出可能な物理量:

- ・中性風速度
- ・電気伝導度/電場
- ・電離圏電流

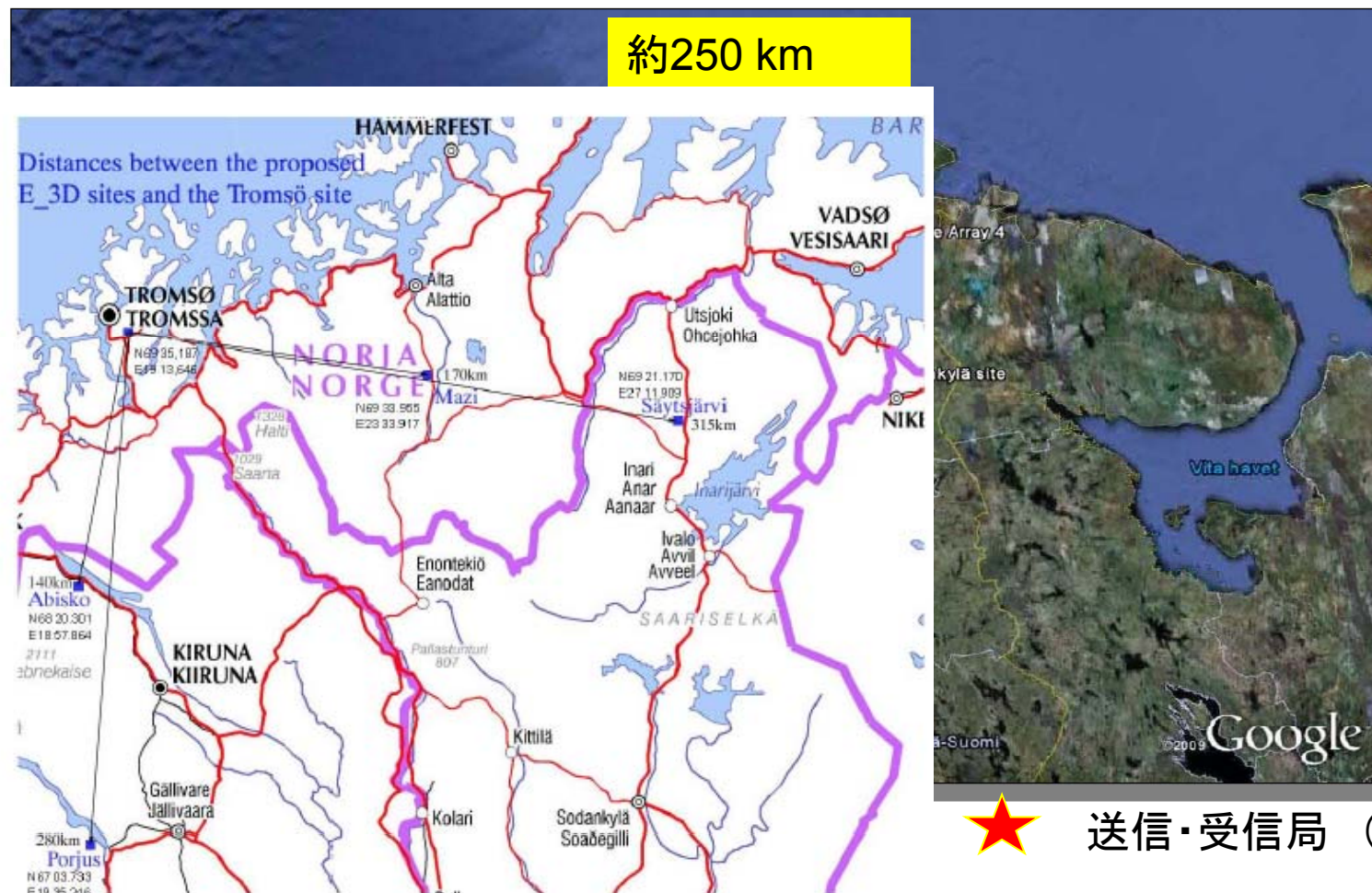
様々な時間分解能、高度分解能による解析が可能。

EISCAT 3D計画の背景

- ★ キルナ、ソダンキラの周波数保護が2010年3月で終了
- ★ トロムソの送信周波数ライセンスも2013年まで
- ★ アンテナ設備の老朽化(駆動系、送信機)
- ★ 運用省力化(無人化)・連続化のニーズ
- ★ 観測性能アップ(時間・空間分解能)のニーズ
- 次世代型高機能レーダーによる新たな展開が不可欠
- EU予算によるDesign Study、ESFRI roadmapに採択

The system recommended by the EISCAT_3D Design Study (1)

レーダー配置案 (tentative model)

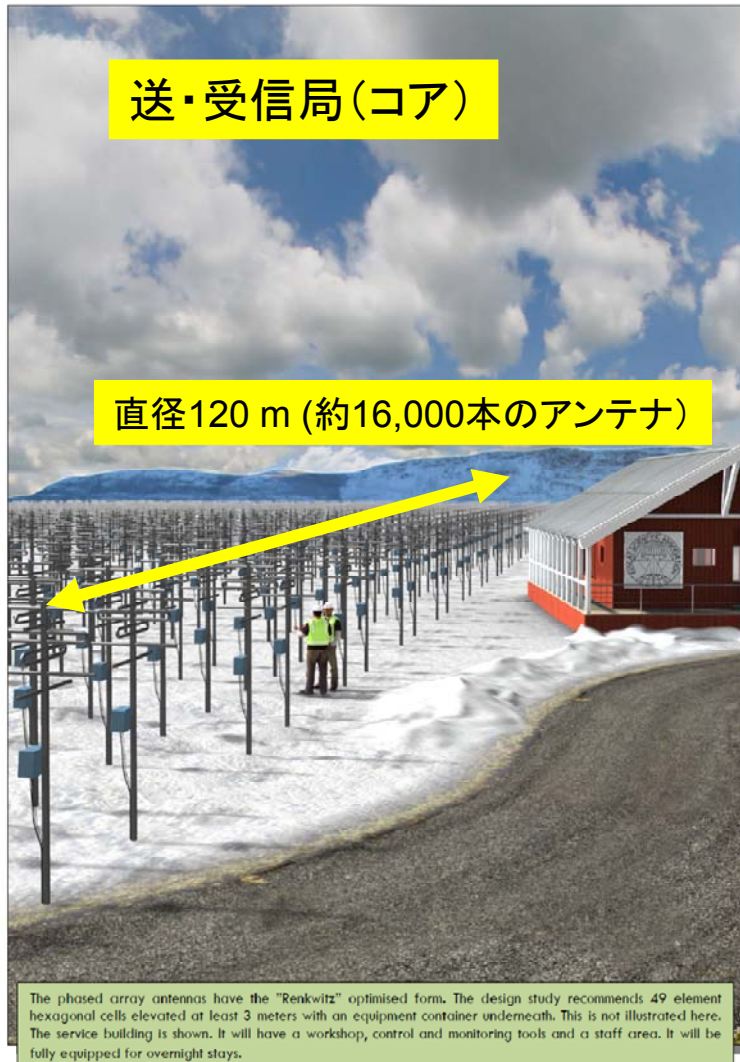


★ 送信・受信局 (トロムソ)

★ 受信局

Figure 9.5.1: One possible layout of the EISCAT_3D system.

The system recommended by the EISCAT_3D Design Study (2)



送・受信局(コア)

- 視野角: FWHM $\sim 0.46^\circ$ (現UHFレーダー 0.5°)
- 周波数: 220-250 MHz (波長1.2-1.36 m)
- 出力: $> 100 \text{ GW m}^2$ (現VHFより1桁大きく)

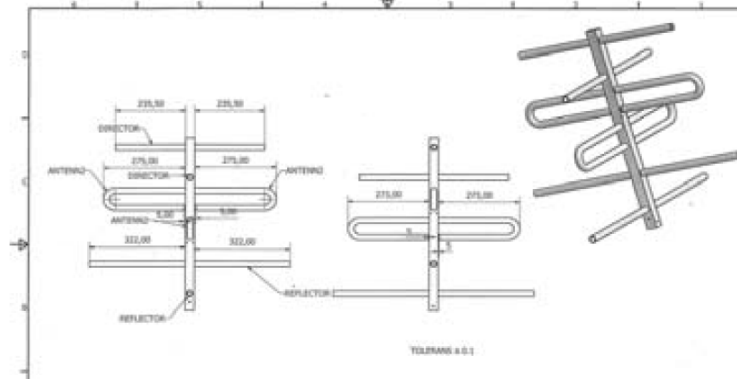
受信局(リモート)

- 8000本のアンテナで構成
- 送・受信局から東、南方向に約110 km, 250 kmの距離に設置

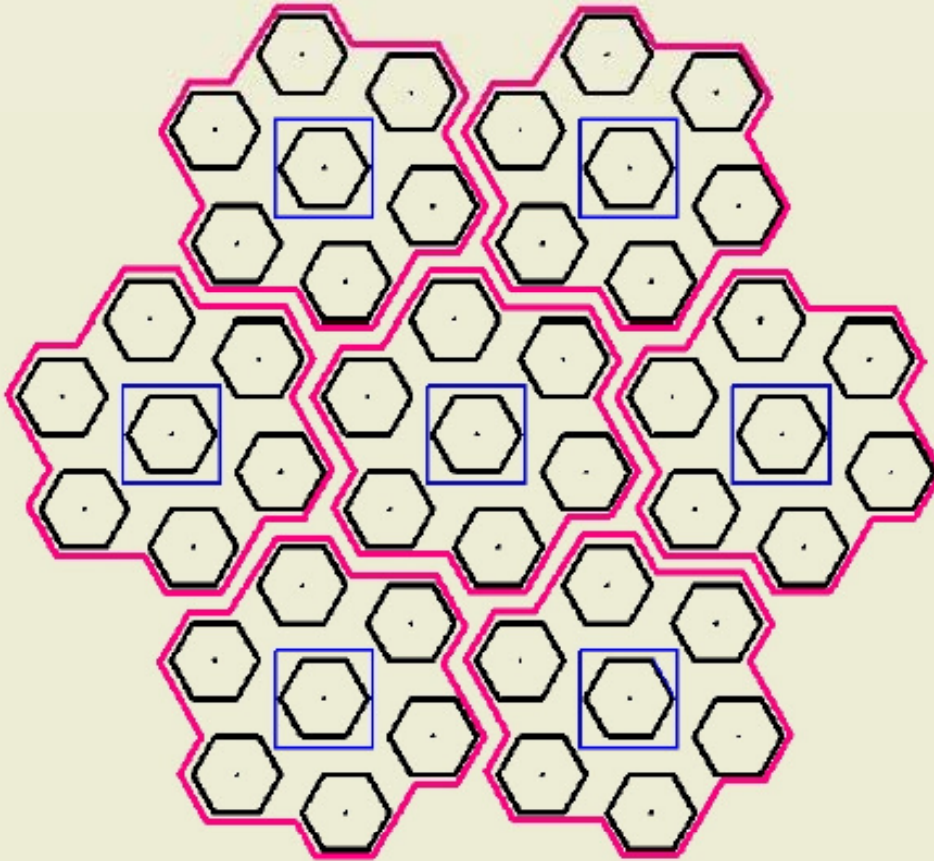
データ

- 一時的に各サイトに保存できる量: 100 TB
- 1000 TB (1 PB)のアーカイブを送・受信局に設置

EISCAT_3D は中心となるデータ及びオペレーションセンターを持つ。できれば学術研究機関のそばに設置。



EISCAT 3D Core array



2.0 x 2.0 x 2.8 m のコンテナ
の上にアンテナアレイを設置

六角形のセルによる階層構造
(7, 49, 343, 2401, 16807)

セル間の距離: 6.2m (4.9 λ)

49-element cell ->
Interferometry application
(高度100kmで最高20mの
空間分解能を想定)

Figure 8.2.2: Illustrating how the 3D Core array can be built up from close-packed 49-element sub-groups, each of which can be regarded as composed of seven 7-element hexagonal cells. The Figure shows a top view of a 343-element, approximately 18-m diameter array group, formed from seven sub-groups (outlined in red). Each sub-group is served by a common, approx. 2-m by 2-m equipment container (indicated by a blue square at the centre of each sub-group) containing all RF, signal processing and control and monitoring electronics.

How large does the Core have to be to meet the original performance demands ?

Table 3: Parameters of some $\lambda = 1.27$ m ($f = 236$ MHz) phased arrays. Equilateral grid geometry, Inter-element distance = 0.7λ , transmitter power 600 W / element

Array #	Beam FWHM [deg]	Number of elements	Array diameter [m]	Power-aperture product [GW m ²]	Notes
1	3.0	1009	29.6	0.4	1
2	2.0	2270	44.4	2.1	4
3	1.2 x 1.7			2.4	2
4	1.5	4036	59.2	6.7	
5	0.6 x 1.7			9.8	3
6	1.25	5811	71.0	13.8	
7	1.0	9080	88.8	33.7	
8	0.75	16142	118.4	106.6	
9	0.5	36320	177.6	539.8	4

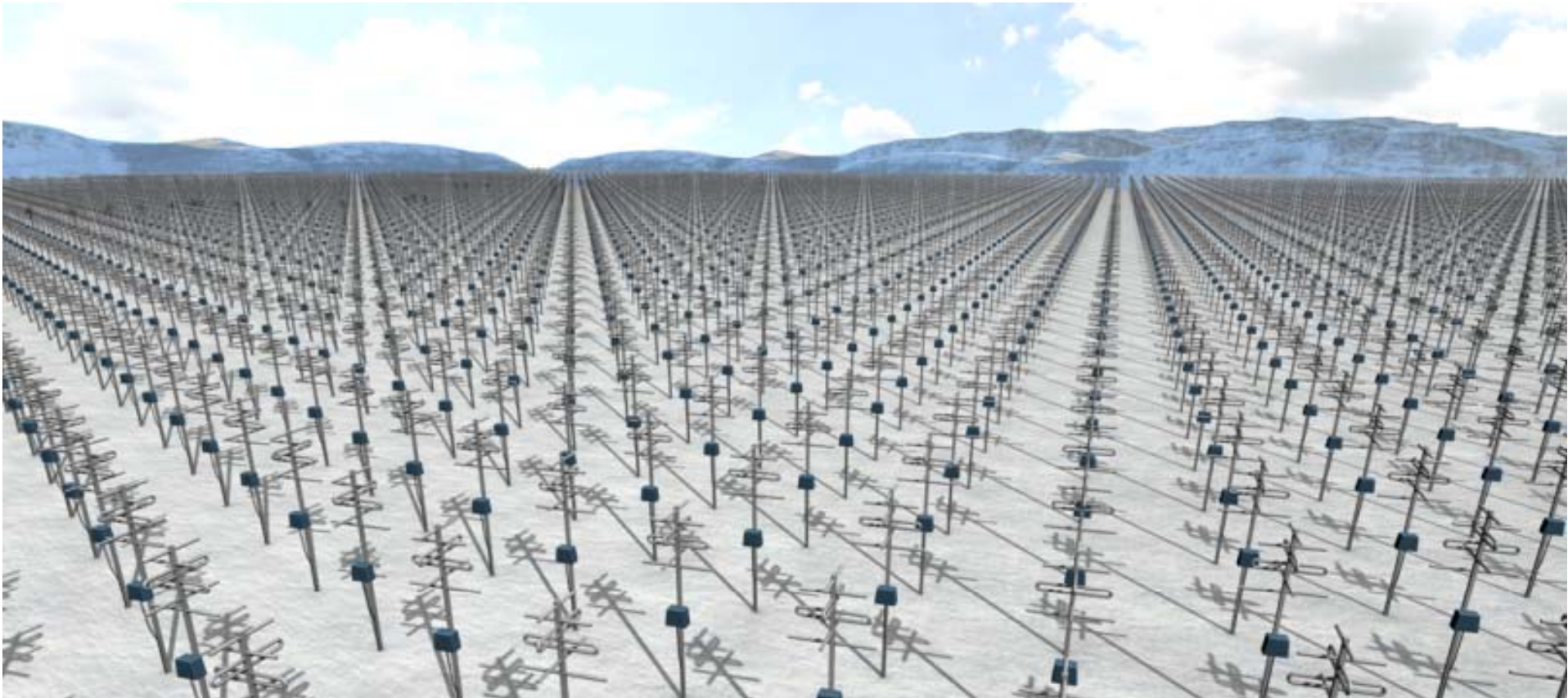
Note 1: Minimum size phased array, comparable to the ESR Phase 1 system

Note 2: EISCAT VHF, Mode 2 (dual beam, power-aperture product per beam)

Note 3: EISCAT VHF, Mode 1 (full antenna, single beam, 2.4 MW)

Note 4: Cf. the EISCAT UHF (32 m parabolic dish, $\theta = 0.6^\circ$, 2 MW @ 928 MHz), whose power-aperture product is only 1.1 MW m²

Array # 8 (16K elements) has close to 10 x the power-aperture product of the EI VHF...



EISCAT_3Dで目指すサイエンス

(日本からの提案)

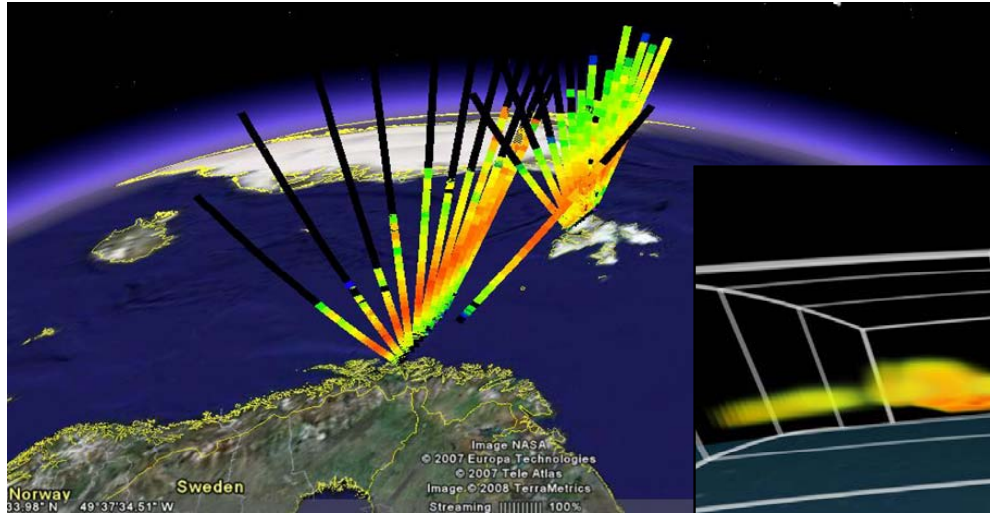
- 1) オーロラの微細構造とパルセーティングオーロラの3次元構造
- 2) Naturally enhanced ion-acoustic and plasma linesの3次元構造
- 3) 電離圏における電磁エネルギー散逸のメソ・ミクロスケール時空間構造
- 4) 熱圏のメソ・ミクロスケール時空間構造
- 5) 電離圏・熱圏変動が全球規模の指標に与える影響と磁気圏フィードバック
- 6) 電離圏全域のイオン組成高度分布を導出する方法論の確立
- 7) 下部熱圏風
- 8) 大気波動(重力波、潮汐、惑星波)
- 9) イオン上昇流
- 10) 3次元沿磁力線電流系
- 11) 南極大型大気レーダー(PANSY)との南北連携観測
- 12) 衛星・ロケットとの同時観測

上記以外にも太陽、月・惑星、流星の科学、大気化学、スペースデブリなど多様な領域、分野への応用が期待されている。

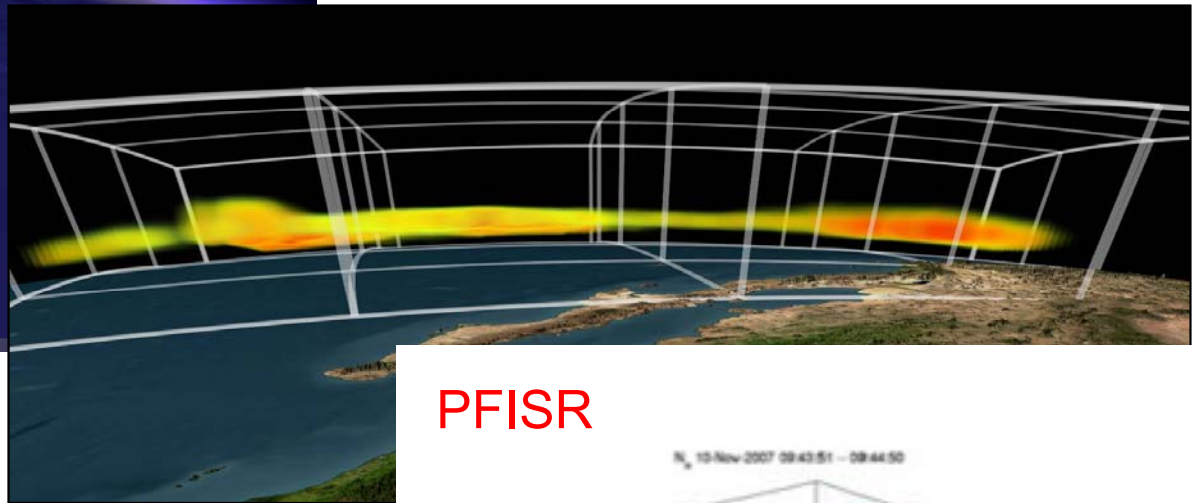
Study of the lower thermospheric wind

磁気圏—電離圏—熱圏結合

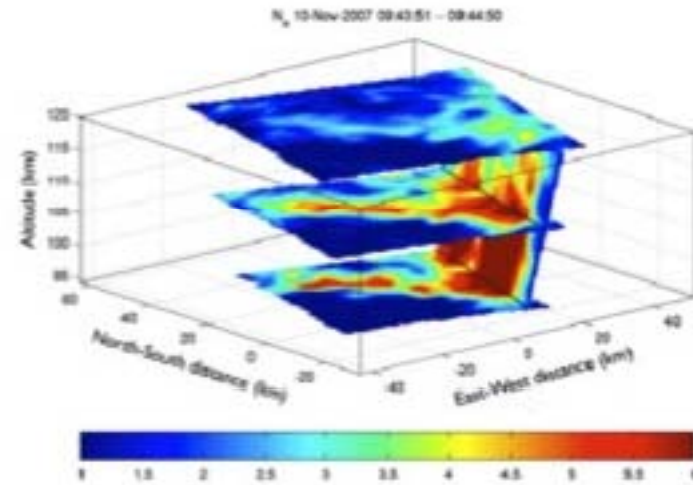
EISCAT



EISCAT_3D

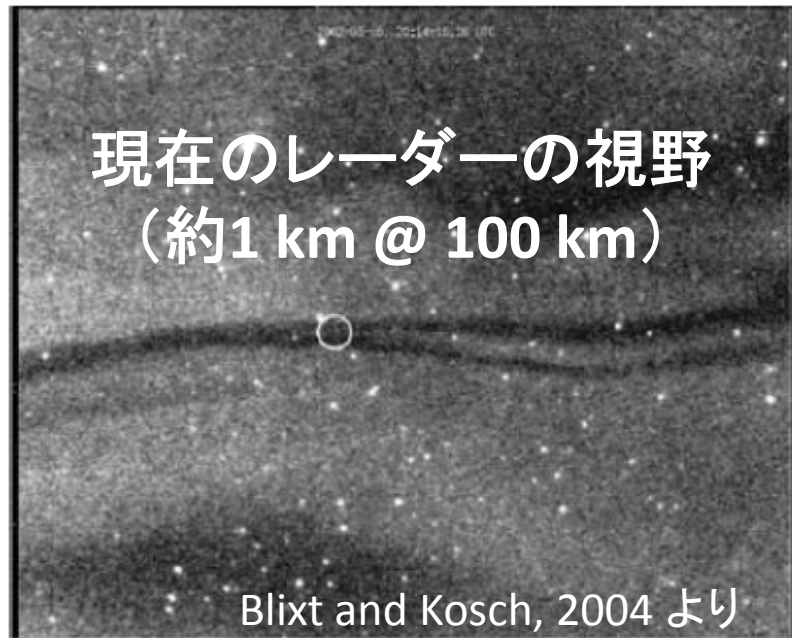


PFISR



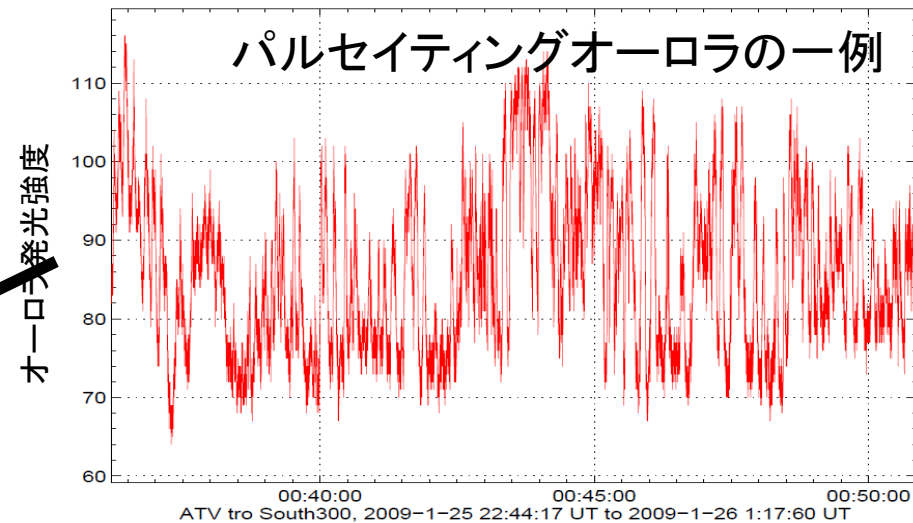
EISCAT_3Dでは現行のアンテナスキャンに代わり、真の広域3次元・高解像度観測が実現する。
これにより、観測上の制約から難しかった多くの研究課題に対してブレークスルーが期待される。

オーロラの微細構造とパルセイティングオーロラの3次元構造



EISCAT_3Dレーダーでは干渉法も合わせ用いることにより、最高20mの分解能で観測可能に。
→オーロラ微細構造の生成機構の理解。

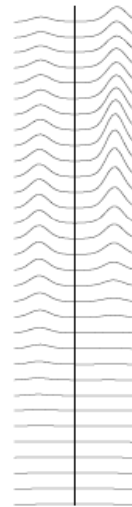
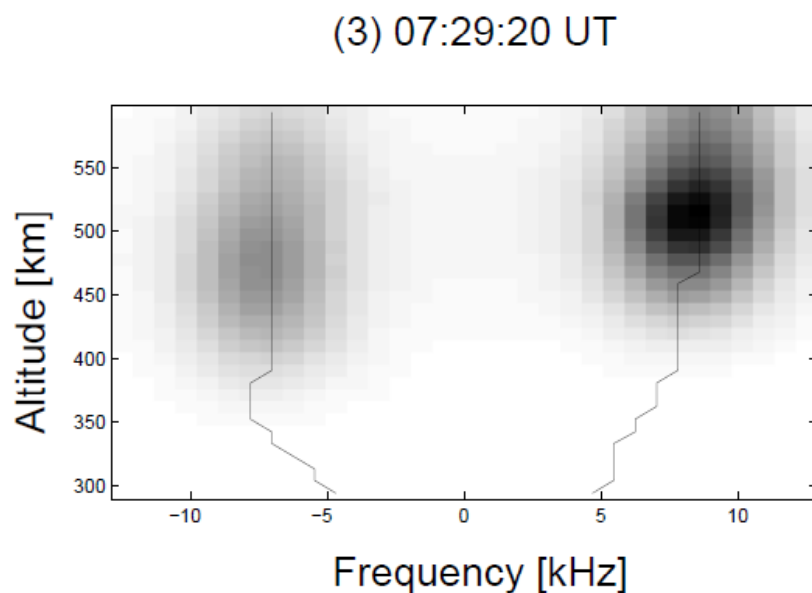
さらに、仰角45度以上の領域(左下の2重丸の赤線)を同時に3次元観測を実施することにより、パルセイティングオーロラ内外の電子密度や電場の3次元構造を導出可能に。



沿磁力線方向のオーロラ発光強度の時間変化(約15分間、ATVデータ)。現在のEISCATレーダーを用いたパルセイティングオーロラの研究では、1方向の電子密度・電場のみ用いている。

Naturally enhanced ion-acoustic/plasma lines の3次元構造

Naturally enhanced ion-acoustic lines (NEIALs。自然励起によるイオン音波擾乱)は主に上部電離圏で発生。その特徴や生成機構を理解することは、プラズマ物理(波動-粒子相互作用など)や領域間(磁気圏-電離圏)結合の理解のために重要。



Michell et al., 2008

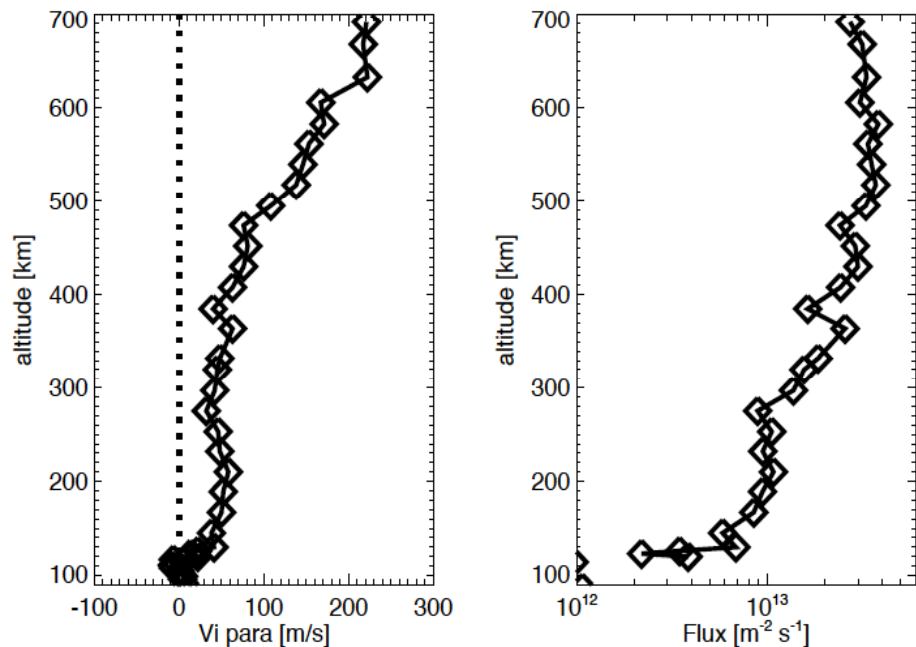
EISCATスヴァールバルレーダーを用いて得られたNaturally enhanced ion-acoustic line (NEIALs)の一例

狭視野カメラ同時観測によるNEIALsの発生領域(白い口)。NEIALsはPFISRで観測。アクティブフェーズドアレイを用いたEISCAT_3Dレーダーでは、アークの内外におけるNEIALs発生領域を3次元的に観測可能に。

イオン上昇流の研究

EISCAT_3Dレーダーでは実効出力が大幅に上がることにより、

- (1) 夜側オーロラ帯における電離圏イオン上昇流の発生領域の3次元可視化が可能に。
 - (2) 高高度(>600 km)における O^+ と H^+ の組成比の導出が高時間分解能で可能に。
 - (3) イオン上昇流に関連したプラズマ温度上昇の情報がより正確に得られる。
- これらの情報が、イオン上昇流の発生機構の更なる理解につながると考えられる。

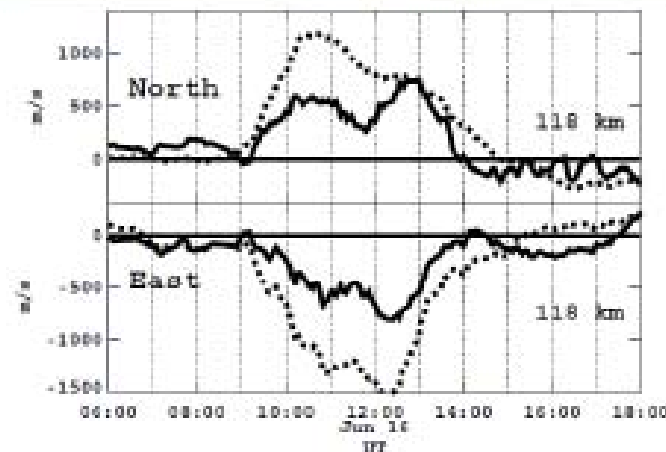
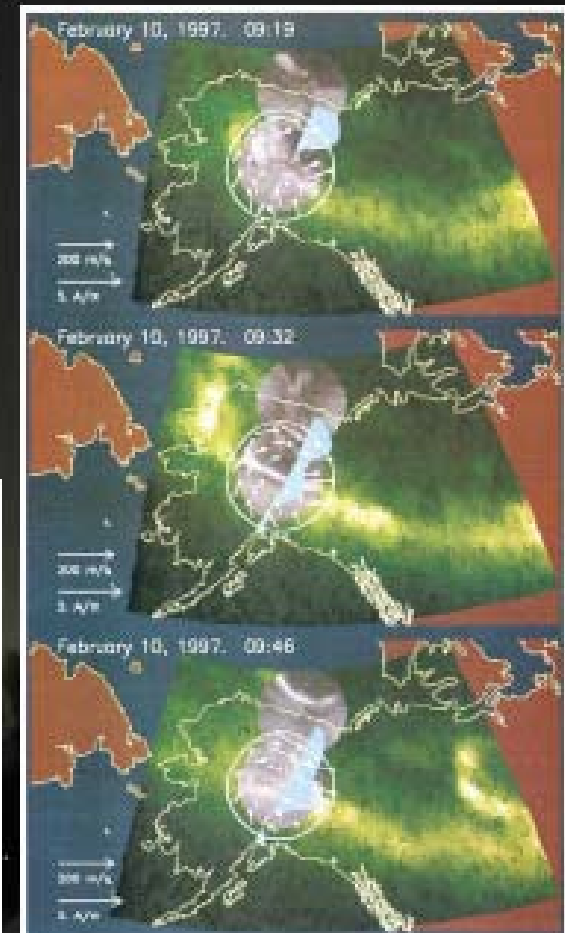


現行のEISCAT UHFレーダーで観測した沿磁力線イオン速度および上向きフラックスの高度分布。高度250 km以上は O^+ として速度を導出。高度700 km付近までの沿磁力線イオン速度分布を導出可能。

Meso/Micro-scale structures in the polar thermosphere

The tidal motions are predominant in the polar thermosphere even during active periods; but the thermospheric wind can deviate from the mean pattern with significant amplitudes in the localized area, in particular, around the aurora. While it is considered that the thermosphere act as an energy and particle sink from the magnetosphere, the thermosphere can also play an active role in the coupled MIT system.

Fine structures in the horizontal pattern of the thermospheric wind from FPI in association with the auroral arc [Conde et al., 2001], and rapid increase in the thermospheric wind measured with the EISCAT Svalbard Radar (ESR) [Tsuda et al., 2009].



EISCAT_3Dで目指すサイエンス

(日本からの提案)

- 1) オーロラの微細構造とパルセーティングオーロラの3次元構造
- 2) Naturally enhanced ion-acoustic and plasma linesの3次元構造
- 3) 電離圏における電磁エネルギー散逸のメソ・マイクロスケール時空間構造
- 4) 熱圏のメソ・マイクロスケール時空間構造
- 5) 電離圏・熱圏変動が全球規模の指標に与える影響と磁気圏フィードバック
- 6) 電離圏全域のイオン組成高度分布を導出する方法論の確立
- 7) 下部熱圏風
- 8) 大気波動(重力波、潮汐、惑星波)
- 9) イオン上昇流
- 10) 3次元沿磁力線電流系
- 11) 南極大型大気レーダー(PANSY)との南北連携観測
- 12) 衛星・ロケットとの同時観測

上記以外にも太陽、月・惑星、流星の科学、大気化学、スペースデブリなど多様な領域、分野への応用が期待されている。

経費・スケジュール

初期費用

- 観測所のインフラ整備 : 5.26 M €
- 送・受信局の建設 : 48.70 M €
- 受信局(4局)の建設 : 63.00 M €
- データ処理・運用センター : 0.50 M €
- 合計 : 117.46 M € (約153億円)

年間運用費用 約3.8億円

スケジュール

2009-2012: 準備(予算確保)

2012-2013: 実施設計

2013-2015: 建設 ※2014: UHFレーダー終了

2015-2045: オペレーション

計画推進に向けて

ワーキンググループの立ち上げ

(2009年4月)

- ・ 情報共有・広報のためのHP整備
- ・ EISCAT共同研究の活性化
- ・ 研究課題の発掘・探索
- ・ 学会/研究会での意見集約
- ・ 研究集会の開催

EISCATプロジェクトのHP :

<http://www.nipr.ac.jp/~eiscat/index.html>

EISCAT_3D計画HP :

<http://www.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscat3d/index.html>

EISCAT_3D Japan Home page

EISCAT 3D計画は、スウェーデン半島北部に最先端のフェーズドレイ式アンテナを設置する、新しい国際共同プロジェクトです。

EISCAT (European Incoherent SCATter: 欧州非干渉散乱) 3D計画

EISCAT 3D計画のパンフレット: 日本語版(作成中) 英語版

現在のEISCATプロジェクト

リンク

Last update: June 24, 2009

EISCAT 3D用アンテナ観測の様式図(赤線)

キルナに設置されたテスト用アンテナ (48本の八木アンテナ)

EISCAT協会加盟国が中心となって推進しているEISCAT 3D計画では、
(1)オーロラ微擾構造などのスモールスケール物理の理解、
(2)D/E/F層及び上部電離圏におけるエネルギー取支の理解、
(3)極域超高度大気モニタリングや予報、
を主たるターゲットとして、現行のEISCAT KSTレーダーシステムに代わる次世代の非干渉散乱(IS)レーダー観測の実現を目指しています。
(図や写真は、EISCAT_3D DELIVERABLE 6.1 2009年02月04日 提出版より。)

まとめ

- EISCAT KSTレーダーの更新計画として、アクティブ・フェーズドアレイ方式を用いて飛躍的に時間・空間分解能を高め、3次元イメージング観測を可能にするEISCAT_3D計画が進行中である。
- 干渉法による高分解能観測や高出力かつ大開口面積による高高度観測などにより、従来の観測上の制約を越えて多くの研究課題にブレークスルーをもたらすことが期待されている。
- EISCAT_3D計画の推進・実現に向けて国内ワーキンググループを立ち上げた。ホームページによる情報共有を始め、学会・研究会等を通じてオープンに国内研究コミュニティの意見を集約し、今後の実施計画にフィードバックを図りたい。
- 多くのみなさんの3D計画への参加、ご支援をお願いします。