

北欧のEISCAT_3Dレーダー計画 (多点VHF帯電波観測)について

宮岡宏^[1], 野澤悟徳^[2], 小川泰信^[1], 大山伸一郎^[2],
中村卓司^[1], 藤井良一^[2]

Hiroshi Miyaoka^[1], Satonori Nozawa^[2], Yasunobu Ogawa^[1],
Shin-ichiro Oyama^[2], Takuji Nakamura^[1], and Ryoichi Fujii^[2]

[1] NIPR; [2] STEL, Nagoya Univ.

宇宙電波懇談会シンポジウム2013
2013年12月18-19日

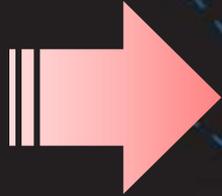


EISCAT_3D計画の研究対象と目的

極域の電離圏・中層大気へのエネルギー流入とその応答過程の解明

極域は太陽起源のプラズマや電磁エネルギーが磁場を通じて集中するユニークな領域で時空間変動が激しい

太陽風



太陽風エネルギーの流入過程

スケール間結合の素過程

磁気圏へのフィードバック過程

イオン流出

オーロラオーバル

沿磁力線電流

上層大気から下層大気への影響

3次元電流系の構造

サブストーム機構
オーロラ微細構造

EISCAT_3D
レーダー

プラズマ対流

ジュール加熱
ジェット電流

電離・中性大気相互作用

伝搬性電離圏擾乱

広域観測網

領域間結合
(緯度間結合)

赤道MULレーダー

EISCAT_3Dレーダーの主要課題

オーロラの生成機構

- ・オーロラの3次元微細構造
- ・オーロラと3次元電流系との関係

領域間のエネルギー収支と物質循環

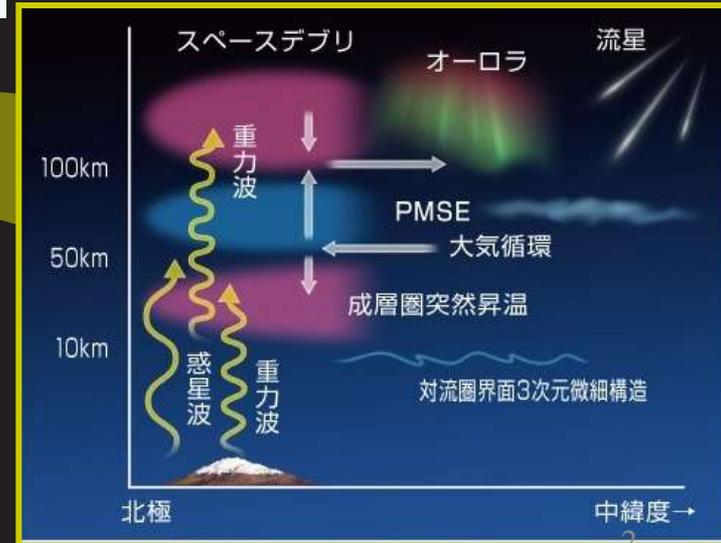
- ・大気の緯度間結合
- ・電離圏イオンの循環と散逸

下層大気と超高層大気の上下結合

- ・大気波動の生成・伝搬・散逸

超高層大気の長期変動

- ・中間圏・熱圏の寒冷化



EISCAT_3Dレーダーシステムにより幅広い高度領域の観測が可能

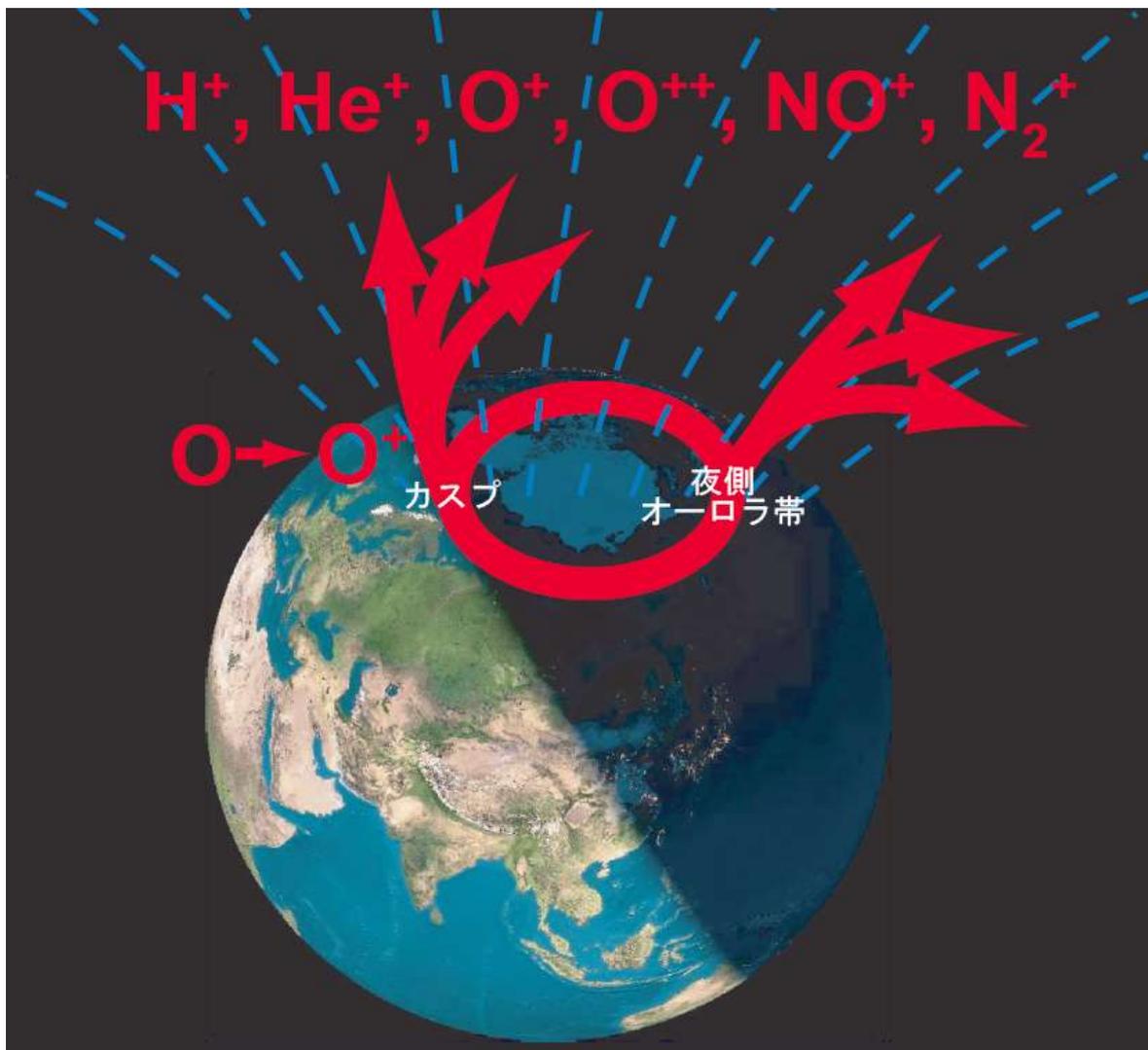
主要課題1:オーロラ生成機構の解明



- ・オーロラは地球磁場の形状から南北両半球に似た形状で発生。
- ・しかし、オーロラは共役性を持たない場合もあり(図の赤丸)。
- ・このようなオーロラの形や動きの違いや相似性に、オーロラが発生するメカニズムを解くカギが隠されていると考えられる。
- ・両極を含む広域ネットワーク観測や極域の大型大気レーダーに加え、EISCAT_3Dによる精密な電離圏3次元観測が、そのメカニズムの理解に大きく貢献する。

左図は2009年7月のNatureの表紙。北半球と南半球で同時に撮られたオーロラ画像。Laundal and Østgaard, 2009 より。

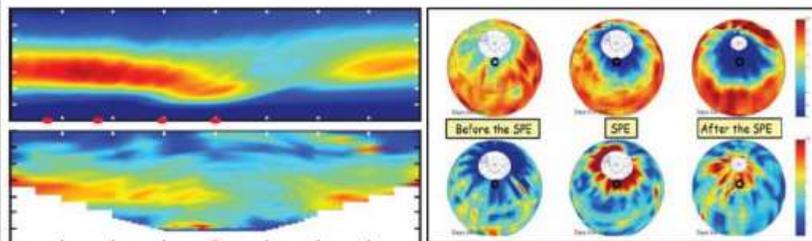
主要課題2: 地球大気の流れ機構の解明



上図は極域電離圏イオン流出の模式図

- ・地球電離圏を構成するほぼすべての成分が極域から流出。
- ・その流出量は、地球電離圏の全イオン($\sim 5 \times 10^{31}$ 個)が数日で無くなる程の量。
- ・イオン流出の物理機構を地球電離圏で解明することは、他の惑星(火星など)の大気の生成消滅過程の理解にも繋がる。
- ・この流出/上昇量を面的又は立体的に観測できるのはEISCAT_3Dのみ。

EISCAT_3D サイエンスケース



EISCAT_3D Science Case

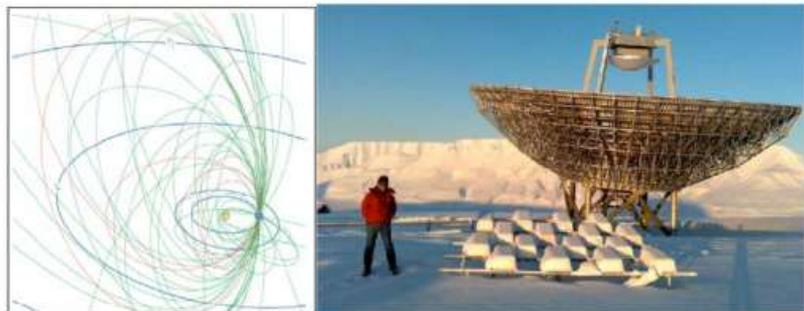
Anita Aikio¹, Ian McCrea²,
and the EISCAT_3D Science Working Group

¹University of Oulu, Finland

²STFC Rutherford Appleton Laboratory, United Kingdom

EISCAT_3D Preparatory Phase Project WP3

Version 2.0, June 2012



- EISCAT_3D準備フェーズの一環として、国際ワーキンググループを形成して執筆(日本からもメンバー参加)。
- 2011年6月に初版を、2012年6月に第2版を出版。全109ページ。
- まとめ版(9ページ)も作成。

EISCAT_3D SCIENCE CASE の内容:

- A. Atmospheric physics and global change
- B. Space and plasma physics
- C. Solar system science
- D. Space weather and service applications
- E. Radar techniques, coding and analysis

Appendix A: Table of EISCAT_3D radar performance requirements by science topics

ウェブページに掲載

<http://www.eiscat3d.se/project/fp7/science-case>

EISCAT_3D計画の経緯

- 2003年~: EISCAT将来構想(*E-Prime*)の検討開始
- 2005年5月~ 2009年4月: EISCAT 3Dデザインスタディ(Design Study: FP6)
EU大型研究設備計画(ESFRI)に採択。EU から2.0Mユーロ(約2.5億円)
- 2007年: 試験用アレイアンテナ設置(キルナ)。VHF帯受信波を用いた試験開始
- 2008年: EISCAT評議会によるEISCAT_3D推進の最終決定
- 2008年~ 09年: EISCAT_3D用周波数(230-240MHz帯)免許取得
- 2010年10月~ 2014年9月: EISCAT 3D準備フェーズ(Preparatory Phase: FP7)を実施中
EU から4.5Mユーロ(約5億円)。14の分科会(Work Package)で検討開始
Project Manager公募、Dr. Ingrid Mann 2011年8月着任
- 2010年11月: EISCAT_3DサイエンスWG立ち上げ(日本からも参加)
“EISCAT_3D サイエンスケース” →2011年6月ウェブ公開、2012年6月改訂
- 2010年: EISCAT_3Dプロトタイプ受信局(KAIRA)をフィンランド北部に建設開始
- 2010年12月: 学術の大型研究計画に関する調査(日本学術会議)に応募
「大型大気レーダーを用いた南北両極の大気科学の推進」
- 2011年5月: 統合計画案に対するヒアリング(日本学術会議)「極域科学のフロンティア」
- 2012~14年: スウェーデンが7MSEK(約0.8億円)の準備予算獲得
- 2012年10月: ノルウェーが建設予算申請(210MNOK ~38億円)
- 2013年3月: スウェーデンが建設予算申請(250MSEK ~38億円)
マスタープラン2014に応募:「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」
- 2013年5月: フィンランドが建設予算申請(25MEUR ~31億円)
- 2013年9月: Bergfors(キルナより少し北側の地域)に受信局建設のため、
EISCAT本部がスウェーデンWallenberg基金に応募(58MSEK ~9億円)

年次計画案

Table 3: Overview of the EISCAT_3D Implementation Phase

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Preparation							
		Construction					
		Deploy T/R Array Deploy R1 Array					
			Deploy R2 Array				
				Deploy R3 Array Deploy R4 Array			
				Commission			

EISCAT_3Dコアサイトの建設を2016年から開始。2018年からの本格運用開始を目指している。

Table 7: EISCAT_3D operations.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>EISCAT Research Infrastructure Operation cost (kSEK)</i>											
Site IS	2,720	2,720	2,790	6,259	6,259	7,317	8,298	7,831	7,971	9,485	9,648
Operations	4,092	4,090	4,048	3,507	3,507	13,997	16,890	19,275	21,409	23,890	24,301
Staff	21,930	26,177	33,604	38,037	38,037	38,824	39,508	34,203	34,814	35,425	36,035
Total	28,743	32,988	40,441	47,803	47,803	60,138	64,696	61,309	64,193	68,798	69,985
<i>EISCAT Staff Effort</i>											
Staff years	20.75	24.75	34.25	37.50	37.50	37.50	37.50	30.50	30.50	30.50	30.50
<i>EISCAT Radar Operation Hours</i>											
<i>Svalbard</i>											
ESR	923	923	923	923	923	923	923	923	923	923	923
<i>Mainland</i>											
UHF radar	587	587	294	294	294	off	off	off	off	off	off
VHF radar	513	513	513	513	513	513	off	off	off	off	off
Remotes	on	on	on	off	off	off	off	off	off	off	off
Heating	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202
<i>EISCAT 3D Radar Operation Hours</i>											
Active			off	off	off	500×2	500×3	500×5	1000× ₅	1752× ₅	1752× ₅
Monitoring			off	off	off	500×2	500×3	500×5	1000× ₅	3504× ₅	3504× ₅
Stand-by			off	off	off	100×2	100×3	100×5	100×5	876×5	876×5

スウェーデンの予算申請書より抜粋

EISCAT_3Dのサイト候補地

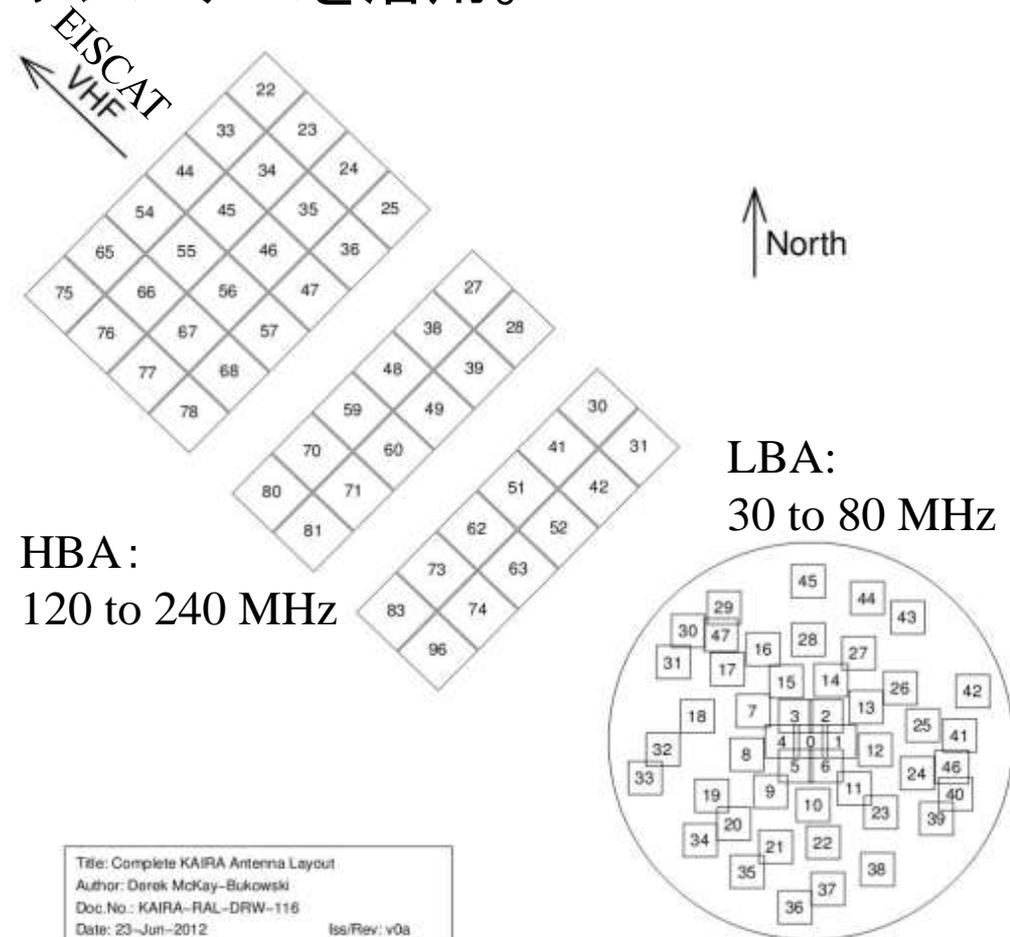
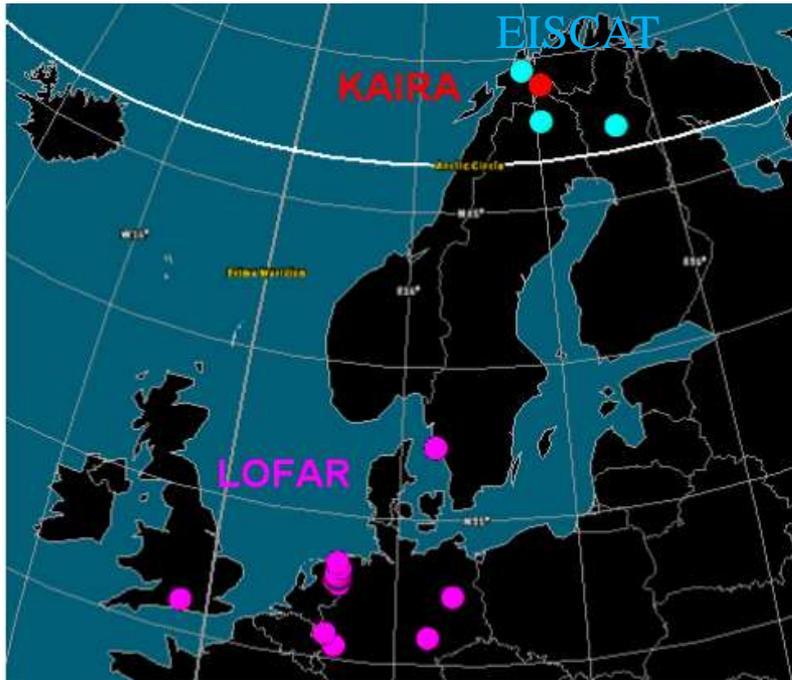


赤丸のSkibotnを、送受信局(コアサイト)の第1候補として現地調査中。Ramfjordmoen(現行のEISCAT Tromsøサイト)がそのバックアップ候補地。

青丸の受信局(リモートサイト)については、送信機能以外のスペックはコアサイトと同じ予定。

フィンランド北部に建設したEISCAT_3D プロトタイプ受信局 (KAIRA)

LOFAR (Low Frequency Array 電波望遠鏡) プロジェクトと密接な協力関係。LOFARアンテナやシステムを活用。



EISCAT_3Dの仕様

The Instrument

Table 1

EISCAT_3D Specifications

Transmitter			Features	
1	Type	Pulsed	-	1 3-dimensional vector and scalar imaging *
2	Duty Cycle	25	%	2 Phase/Amp transmitter modulation
3	Max Pulse Length	10	ms	3 Arbitrary Tx/Rx polarisation
4	Shortest Pulse Length	0.5 (75)	μs (m)	4 One Core Active site
5	Peak Power	10	MW	5 4 Remote Passive sites
6	Centre frequency	233	MHz	6 Remote active site with power ~ 1 MW
7	3 dB Bandwidth	± 2.5	MHz	7 Electronic scanning and beam-forming
8	Modulation	Phase/Amp	-	8 5 phased steered array antennas
9	Polarization	Arbitrary	-	9 6-10 outlying antenna arrays at active site
Antennas				10 Aperture synthesis imaging
10	Type	Phased Array	-	11 High duty cycle
11	Antennas per site	$\sim 10,000$	-	12 Better sensitivity by a factor $> 20\times$ **
12	3 dB Bandwidth	± 15	MHz	13 Unmanned operation
13	Gain	~ 50	dBi	14 Remote operation via internet
14	beam pointing resolution	0.625°		15 Robust reliability in arctic environment
15	Transverse resolution at 100 km better than	< 50	m	16 Uninterrupted continuous operations
16	Grating-lobe free radiation pattern: zenith all azimuths	$40^\circ - 60^\circ$		17 Common Programs at low duty cycle
17	Power-aperture product	> 100	GWm^2	18 Special Programs to respond to pre-defined/unusual geophysical events
				19 Validated archival database
				20 Restricted real-time data

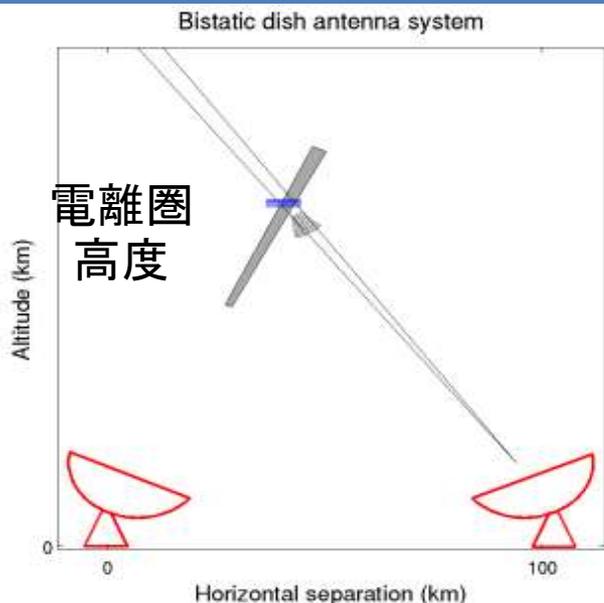
* Unique Technological Innovation

** Major Improvement

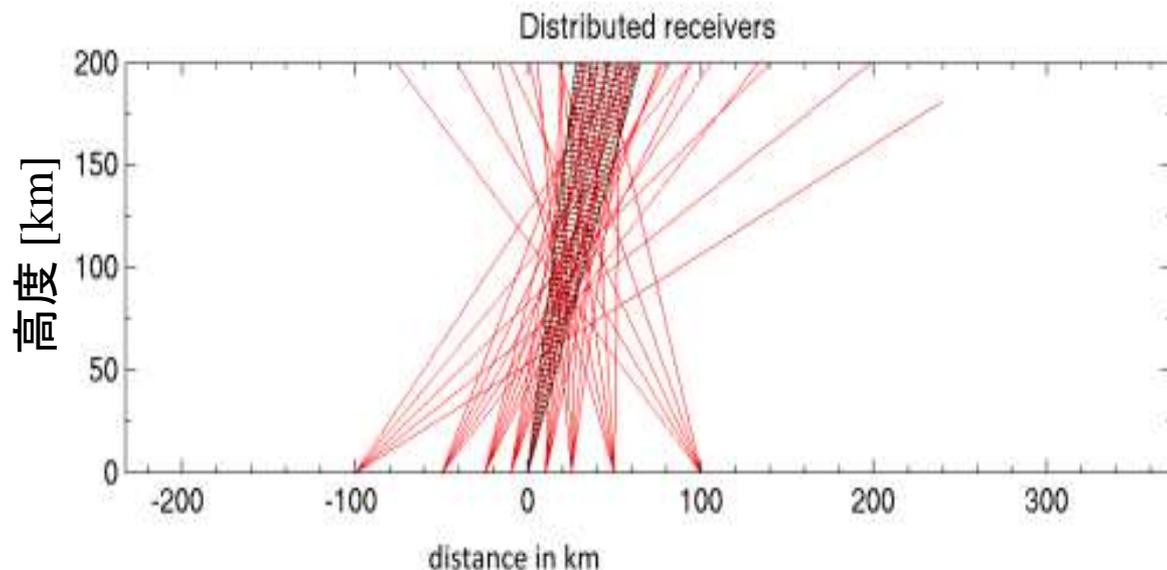
Essential Features to attain the Scientific Goals

(ノルウェーの予算申請書より抜粋。一部加筆。)

EISCAT_3D観測の仕組みと性能



上図：従来の多局式パラボラアンテナ観測（スウェーデンの予算申請書より抜粋）



上図：EISCAT_3D の多局式フェーズドレイアンテナによる Volumetric imaging 観測。黒線が送信ビーム。赤線が多局からの受信ビームを表す。（Technical Description より抜粋）

プラズマ物理量@高度	現EISCAT	EISCAT_3D	性能比
Ne, Ti, & Te @ 110km	5秒	0.05秒	100倍
Ne, Ti, & Te @ 300km	20秒	0.3秒	67倍
Vector V_i @ 110km	500秒	10秒	50倍
Vector V_i @ 300km	100秒	1秒	100倍

左表：現行のEISCAT UHF レーダーとEISCAT_3Dレーダーとの性能比。EISCAT_3Dレーダーは10MW出力のコアサイトを含む3サイト観測を仮定。（スウェーデンの予算申請書を基に作成。）

非干渉散乱 (IS) レーダーとしての性能

System	Frequency (MHz)	Power (MW)	Quoted Gain (dBi)	Aperture (m ²)	Duty Cycle (%)	System Noise Temperature (K)	PA (GWm ²)	FOM
EISCAT VHF (1 klystron)	224	1.5		3110	12.5	300	4.67	1.00
EISCAT VHF (2 klystrons)	224	3		3110	12.5	300	9.33	2.00
EISCAT UHF	930	2	48	522	12.5	120	1.04	0.13
EISCAT Svalbard	500	1	45	905	25	65	0.90	0.57
Sondrestrom	1290	3.5	49	341	3	85	1.19	0.08
PFISR	449	2	43	708	10	120	1.42	0.34
EISCAT_3D Core	233	9		10000	20	190	90.00	37.04
Jicamarca	50	4.5		75000.0	6	3000	337.50	22.46
Arecibo	430	2.5		55000.0	6	90	137.50	35.46

Table 1. The parameters of some current incoherent-scatter radar systems and the planned EISCAT_3D core site. The figure-of-merit (FOM) is defined as $FOM = \frac{PA\sqrt{D}}{T_{sys}f}$, where PA is the power-aperture product, D is the transmitter duty cycle, T_{sys} is the system noise temperature, and f is the radar frequency. For comparison purposes, all FOMs were normalized to that of the two-klystron EISCAT VHF. The FOM of the EISCAT_3D core is seen to fall in the same range as those of the Arecibo and Jicamarca systems.

$$\text{The figure-of-merit (FOM): } \frac{PA\sqrt{Duty\ cycle}}{T_{SYS} f_{RADAR}}$$

From U.G. Wannberg et al., EISCAT_3D: A Next-Generation European Radar System for Upper-Atmosphere and Geospace Research, 2010.

システムに関する技術的な文書を現在作成中。その際に天文分野の先端技術も応用可能か？

本発表のまとめ

- ・EISCAT_3D計画は、過去に無い高性能を有する次世代非干渉散乱レーダーの実現を国際共同で目指すプロジェクトである。EISCAT科学協会加盟国を中心とした共同出資を経て、2018年から本格運用を想定している。送受信局(コアサイト)を Skibotn (ノルウェー) に、100-300 km 離れた4つの地点に受信局(リモートサイト)を配置し、極域電離圏の3次元立体観測を行う予定。
- ・下層大気から超高層大気、ジオスペースの広範囲かつ様々な分野におけるサイエンスを、EISCAT_3Dレーダーを用いて実施予定。IPS観測による太陽風観測や惑星電波観測も推進する予定。EISCAT_3Dを用いたサイエンスケースを国際EISCATコミュニティで検討し、2011年6月に出版。EISCAT_3Dシステムに関する技術的な文書を現在作成中。その作成に際して、天文分野の先端技術も応用可能であるかどうかを相談・検討希望(LOFARプロジェクトとは、既に密接な協力関係あり)。

欧州非干渉散乱(EISCAT)本部のHP: <https://www.eiscat3d.se/>
EISCAT_3D 国内HP: <http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/eiscat3d/>