

2005 年度中緯度短波レーダー研究会

日時：平成 17 年 11 月 7 日(月) 11:10-15:20

場所：豊川市民プラザ

11:10-11:45 北海道短波レーダー計画の今までの経過・現況報告 西谷望(STEL)

11:45-12:10 北海道短波レーダーを用いた研究計画 小川忠彦(STEL)

13:20-13:35 北海道短波レーダーによる中緯度電離圏-内部磁気圏結合の研究

菊池崇(STEL)

13:35-13:50 極域電離圏対流と極赤道電磁エネルギー結合 橋本久美子(吉備国際大)

13:50-14:05 SuperDARN レーダー運用の現状と課題 細川敬祐(電気通信大)

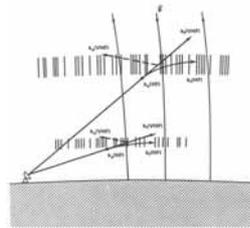
14:05-15:20 議論 - 今後の北海道短波レーダー計画の進め方について

司会: 西谷望(STEL)

北海道短波レーダー計画の 今までの経過・現況報告

西谷 望 (名大STE研)・
北海道レーダー研究グループ

短波レーダーの観測原理 (電離圏エコー)



Greenwald et al., 1995

- 電離層中の10-100m程度のスケールを持つプラズマ不規則構造により、ブラッグ散乱を受ける。
- 散乱されて戻ってきた電波の受けるドップラー効果(周波数シフト)により、電離圏プラズマの水平対流速度を測定する。

Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN)

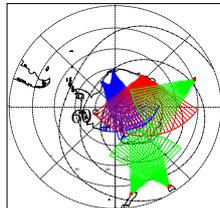
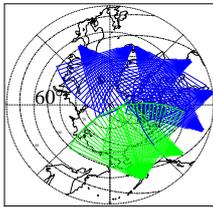
日本を含む11ヶ国による国際プロジェクト
空間分解能:15-100km、時間分解能:1 s - 2 min.
使用周波数: 8-20MHz、最大瞬間出力: 10 kW

SuperDARN

SuperDARN

Northern Hemisphere Map

Southern Hemisphere Map



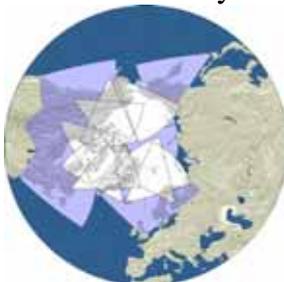
現存のレーダーの有効視野は大部分60°より極側

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network)の現状

- 世界11ヶ国による国際プロジェクト
- 現時点で北半球に10基、南半球に7基、併せて17基のレーダーが極域に展開
- 通常モードでも1-2分の時間分解能で広域にわたる電離圏プラズマ対流を観測
- 最近では、電離圏だけではなく、熱圏・中間圏物理の研究にも有効なことが判明
- 課題: 現時点のレーダーは大部分極域(有効観測視野は磁気緯度60度以上)に展開

R.A. Greenwald, 2004 SuperDARN Workshop in Saskatoon

SuperDARN Today and Tomorrow



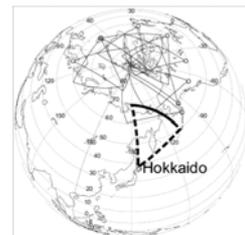
Northern Hemisphere



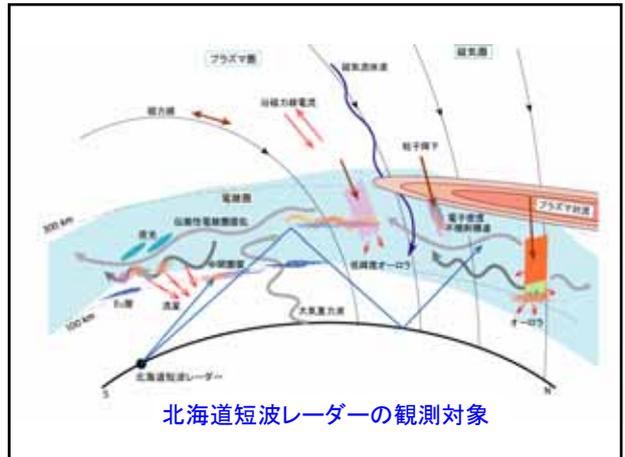
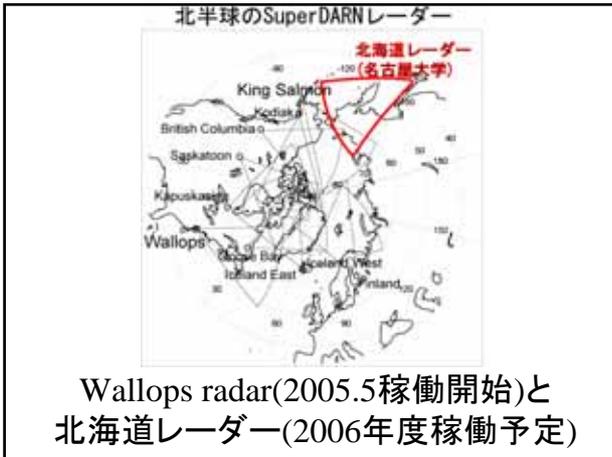
Southern Hemisphere

SuperDARNネットワークの 中緯度領域への拡大

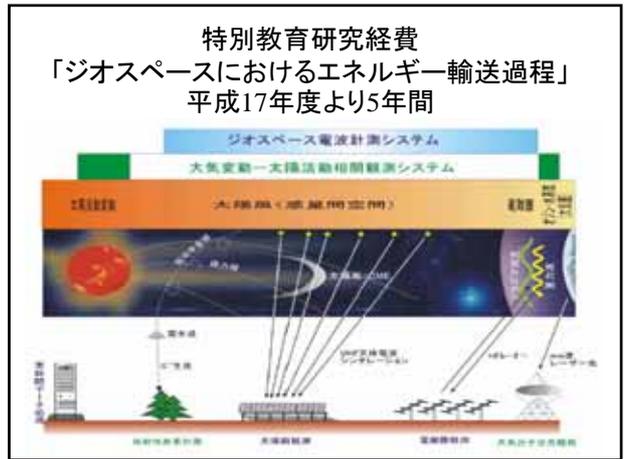
- 日本を含む世界各国で中緯度領域にSuperDARNレーダーを作る案が次々と浮上
- 北海道、北米、イギリス、オーストラリア、.....etc.
- この中で北海道が一番緯度が低く、しかも他の様々な観測とのcoordinationが一番多様性がある
 - NICTのKing Salmon radar (シベリア北部域をカバー)
 - 極域・中緯度の磁場ネットワーク
 - 日本におけるGPS観測網
 - カムチャッカ領域のGPS観測網
 - 日本国内の大気光イメージングネットワーク
 - イオノゾンデ
 - 他
- 北海道レーダーは磁気緯度38-65度の領域をカバー



北海道レーダー(平成17年度特別教育研究経費で採択)



- ### 現在までの準備状況
- 平成17年度特別教育研究経費で採択される
 - 中緯度短波レーダー研究会の開催(2003,2004)
 - 中緯度短波レーダー-MLの作成
 - 建設候補地の選定、候補地における電波雑音状況調査(2003)
 - 無線局免許申請に向けて総務省・北海道総合通信局と折衝中(周波数の内示はすでに受けている:
9120±20kHz,10810±20kHz,11070±20kHz,14650±20kHz,16120±20kHz)
 - 送受信システムの入札手続き完了(9月)
導入期限は2006年10月31日
 - 土地利用のための農地転用等諸手続きは完了(9月末)
 - アンテナタワーの基礎工事了(10月下旬)
本体・エレメントは来年度春作業予定
 - 今年度中に観測小屋建設予定(~11月末)
 - SuperDARN国際会議を2007年5月北海道にて開催予定



平成15年度中緯度短波レーダー研究会 (2003/9/18、豊川市民プラザ)

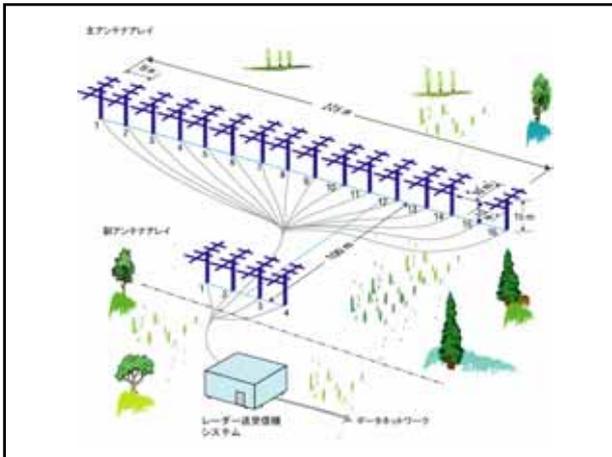
- 22名の磁気圏・電離圏・熱圏・中間圏物理の研究者が参加
- 講演の数: 14
- レーダー研究のターゲット・計画遂行上の課題について活発な議論がなされた。

オンライン集録: <http://st6.stelab.nagoya-u.ac.jp/mlradar/syukai0309.html>

平成16年度中緯度短波レーダー研究会 2004年10月13日、名古屋大学豊田講堂第1会議室 28名出席、講演数21

- 概要(小川、西谷、佐藤)
- 内部磁気圏における粒子・電磁場ダイナミクス(海老原、新堀、三好)
- 擾乱時電流系(橋本、中野)
- 電磁気圏電場ダイナミクス(菊池、田口)
- ULF地磁気脈動(湯元)
- 中緯度電離圏イオン流出(小川)
- 中緯度電離圏イレギュラリティ(齊藤、小野間、横山)
- 中規模・大規模伝播性電離圏擾乱(小竹、大塚、津川、藤原)
- 流星エコー・中間圏エコー(堤、細川)

オンライン集録: <http://st6.stelab.nagoya-u.ac.jp/mlradar/syukai0410.html>



レーダーシステムの諸仕様

使用周波数	8~20MHz	最大瞬間出力	10kW
パルス仕様	マルチパルス方式	Duty比	約2.5%
パルス長	100~300μs	1パルスパターン長	0.1s
時間分解能	1s~2min	空間分解能	15km~約100km
ビーム幅(水平方向)	約5度	ビーム方向	約0~60度(16方向)
ビーム幅(鉛直方向)	約40度	最大到達距離	約3500km

SuperDARNレーダーのアンテナおよび送受信装置の例



King Salmonレーダー送受信装置

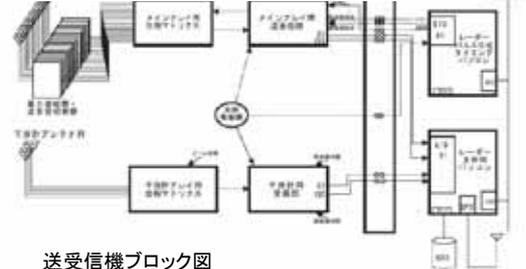
Iceland Eastレーダーアンテナ (レスター大学で作成時)

レーダー送受信機システム

国際入札の結果、英国レスター大学が落札

(2005年9月3日開札)

納入期限は2006年10月31日



送受信機ブロック図

レーダーシステム建設予定地(陸別町ポントマム)



レーダー予定地

太陽地球環境研究所附属陸別観測所

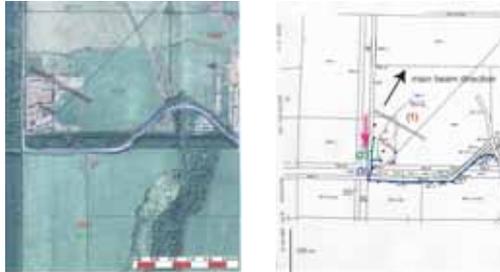
短波レーダー設置予定地

左:2003年5月12日撮影

右:2002年11月21日撮影



レーダーアンテナアレイの配置図:
北海道陸別町ポントマム



∴ 電柱

北海道HFレーダーのアンテナに
要求される条件

- 遠隔地まで観測ができるような高いgain
- 高いfront-to-back ratio
- 広い周波数範囲(9-16MHz)で安定した特性
- 垂直方向への漏れが可能な限り少ない
- 限られた予算で建設が可能
- 建設後のメンテナンスが容易



SuperDARNで現在使用されている
アンテナタイプ



SABREタイプ



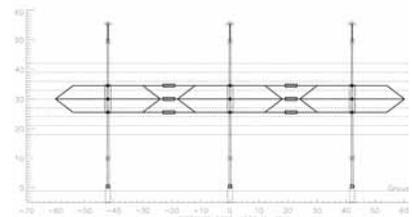
NICTタイプ



Wallopsタイプ

Wallops Island

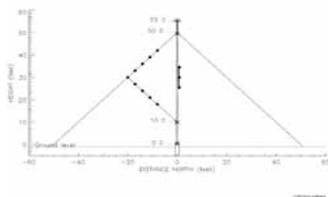
Front View of Three Antennas



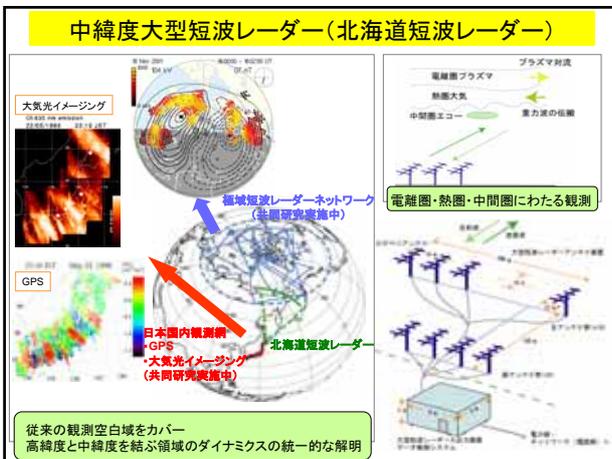
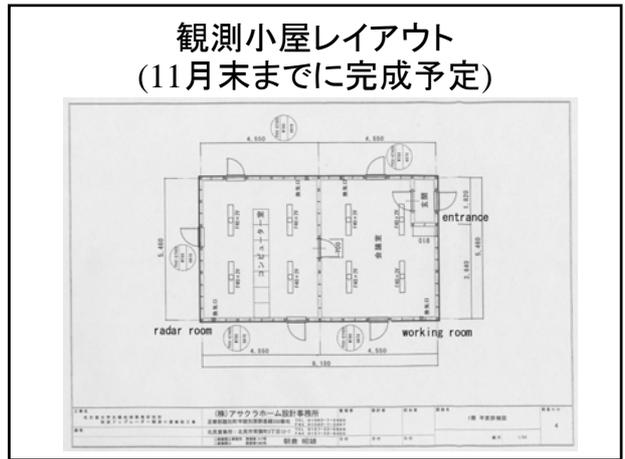
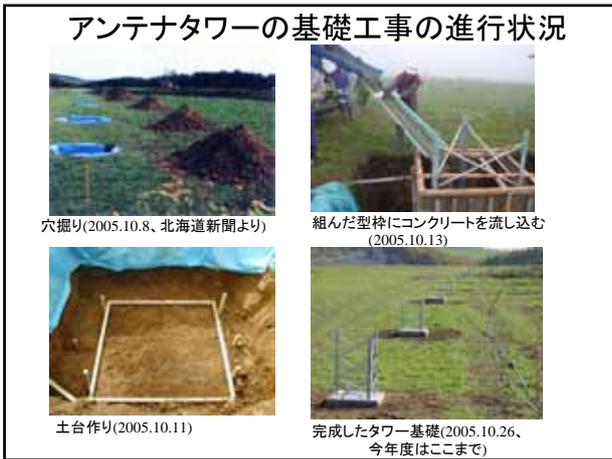
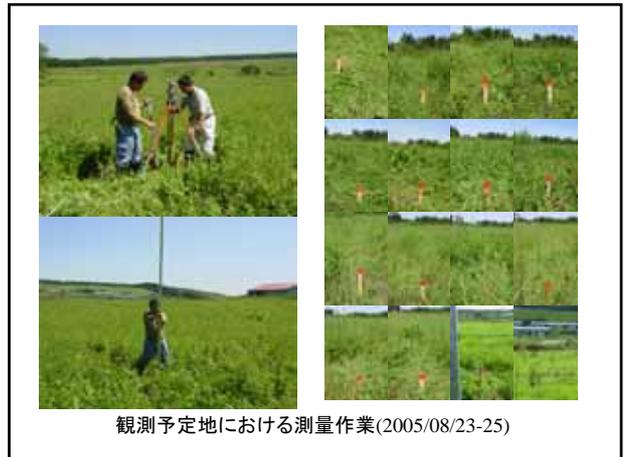
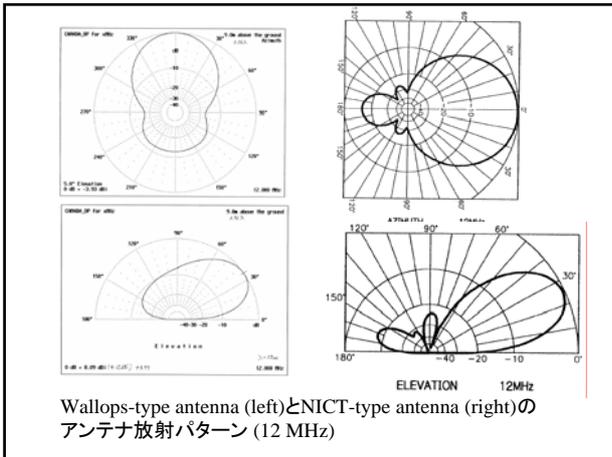
Barker-Williamson antenna (folded dipole)

Wallops Island

End-on View of Antenna Array
Showing Front and Rear Guy Lines,
Reflector Wires, and Antennas



	SABRE	NICT	Wallops
gain	◎	○	◎/△
F/B ratio	◎	△	◎/△
周波数特性	◎	◎	△
垂直方向への漏れ	◎	◎	△
Elev. Angleの周波数特性	△	◎	△
コスト	△	○	◎
メンテの容易度	△	○	◎



- ### レーダー運用準備の当面の課題
- 小屋建設(11月末までに)
 - アンテナ完成(来年春)
 - 電力線、電話線の地下埋設(約180m)
 - 高速ネットワーク回線の確保(次年度)
 - 無線局免許状取得(申請～予備免許まで半年)
 - 送受信システム導入
- ↓
- 運用開始へ！

今後の課題

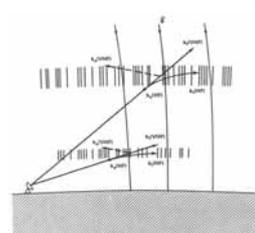
- 完成後の運用体制
- 観測モードの決定体制
- 周波数選択方法
- 他の観測手段との協力体制

SuperDARN Workshop 2007

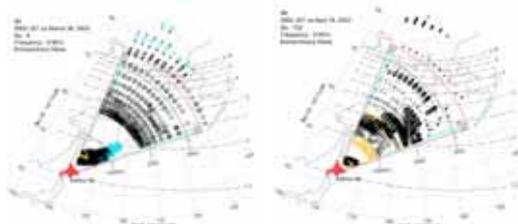
- 日時 2007年5月頃、5日間
- 場所: 北海道東部
- 毎年世界中で場所を変えて開催
(2003:芬、2004:加、2005:英、2006:米)
- 例年の参加者数: 約70名
- 皆様のご参加・ご協力をお願いいたします。

HFレーダーによる電離圏エコーの受信条件(Bragg散乱を利用)

- 後方散乱域において、水平方向に $\lambda/2$ の空間スケールを持つirregularity構造が存在する
- 散乱域において、電波の進行方向と磁力線方向とが直交する(irregularityは、磁力線に沿ってほぼ一様な構造を持つため)
- 電波の伝搬路において、D層による吸収等がほとんど存在しない



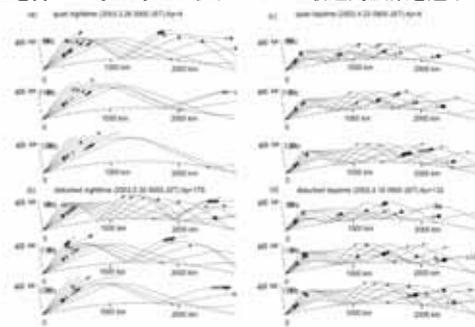
電波の直交条件を満たす領域 (左側: 夜、右側: 昼)



Jones and Stephenson (1975) algorithm + IRI-2001

Nishitani and Ogawa, APUAR, 2005

伝搬経路は地磁気活動度、地方時、使用周波数に高い依存性を持つ→その時々に応じて最適周波数を選ぶ



Wallop Island radar

- 1st mid-latitude SuperDARN radar
- 2005年5月より稼働開始
- 2005年6月よりデータ公開
<http://superdarn.jhuapl.edu>
で参照可能
- 地磁気緯度 $\sim 49^\circ$
- 地理緯度 $\sim 38^\circ$



Wallops Island radar



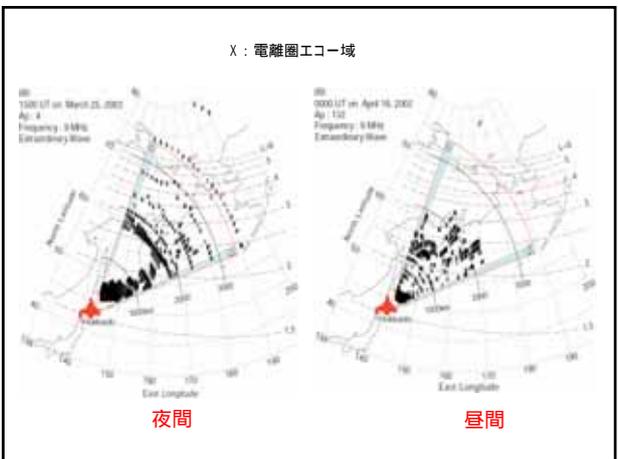
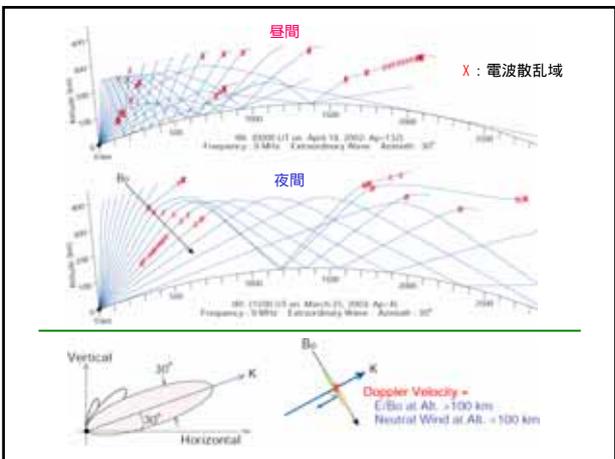
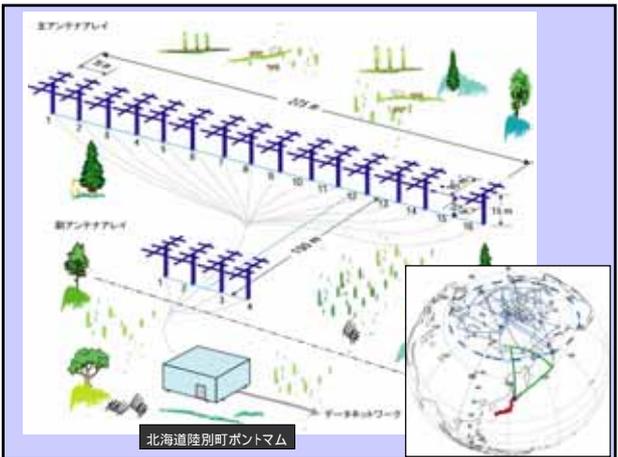
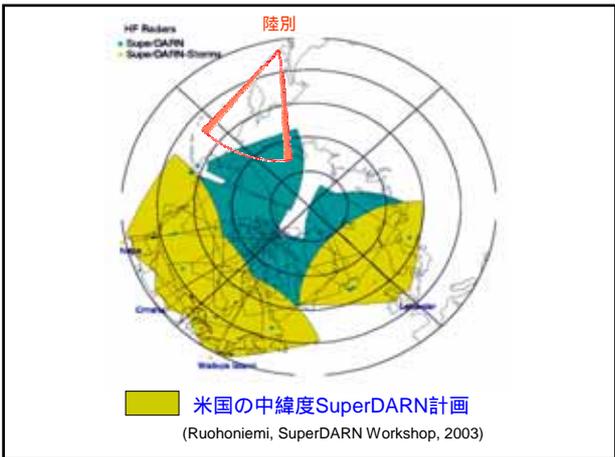
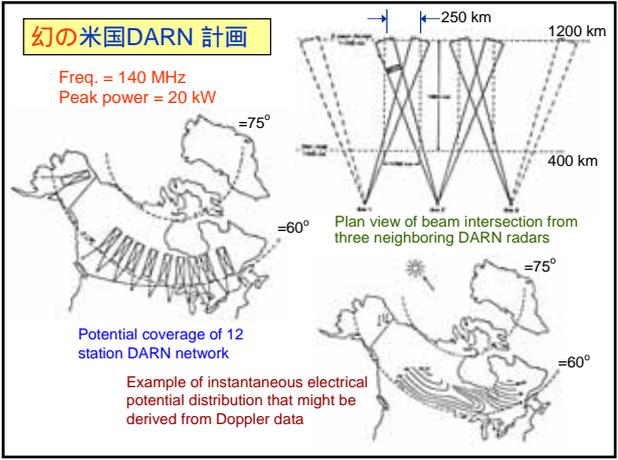
Wallops Island radar

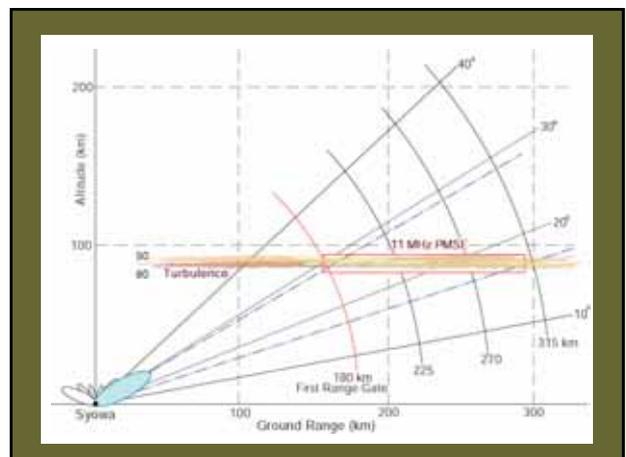
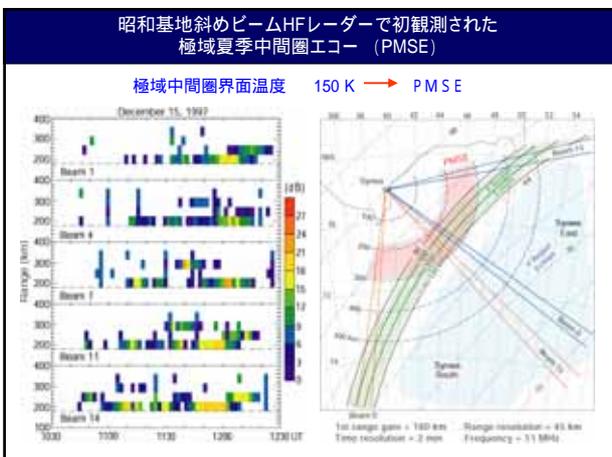
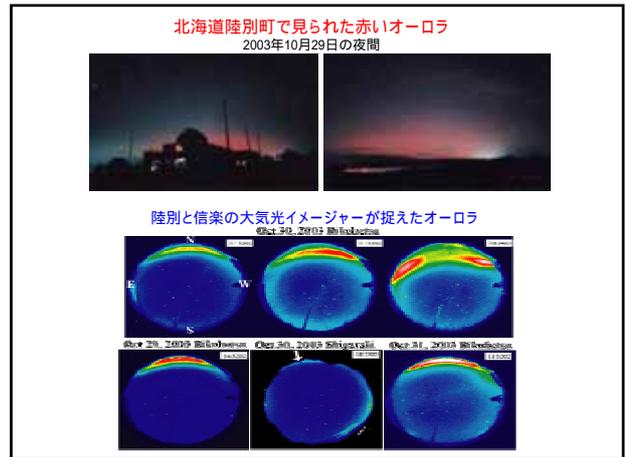
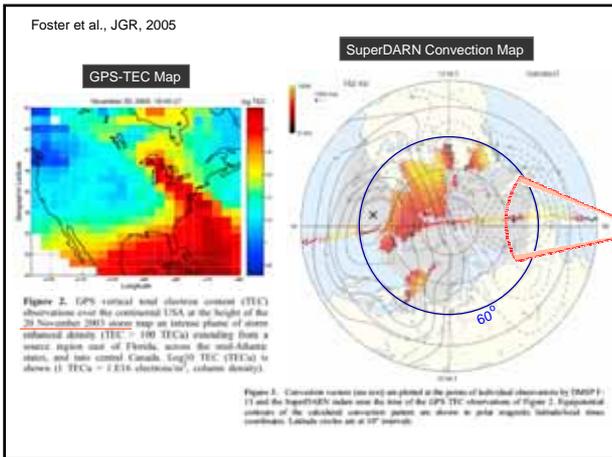
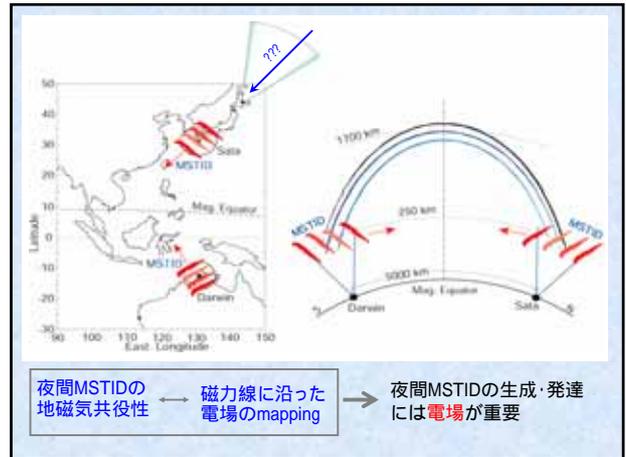
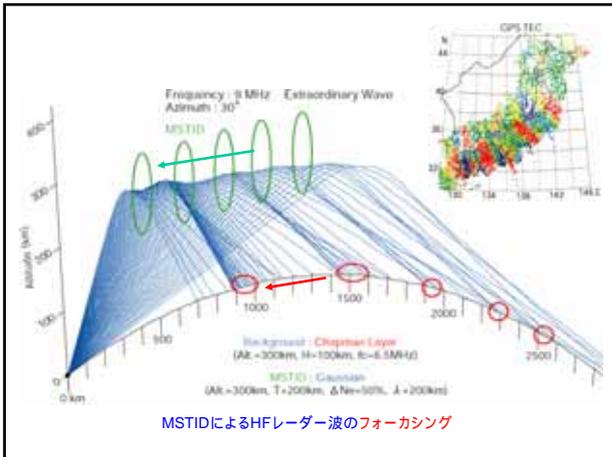


北海道短波レーダーを用いた 研究計画

小川忠彦 (名大STE研)

極域SuperDARNでは不可能な研究

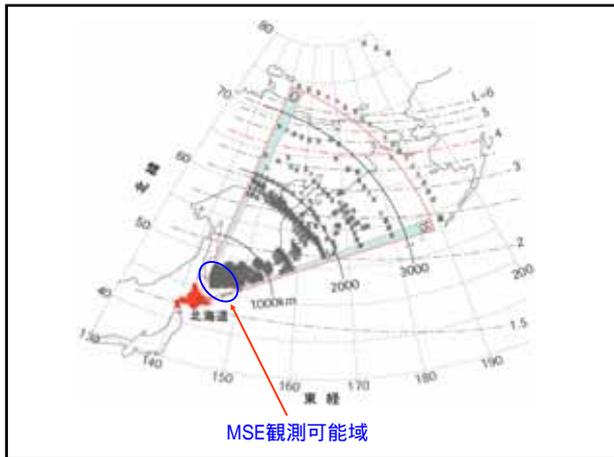
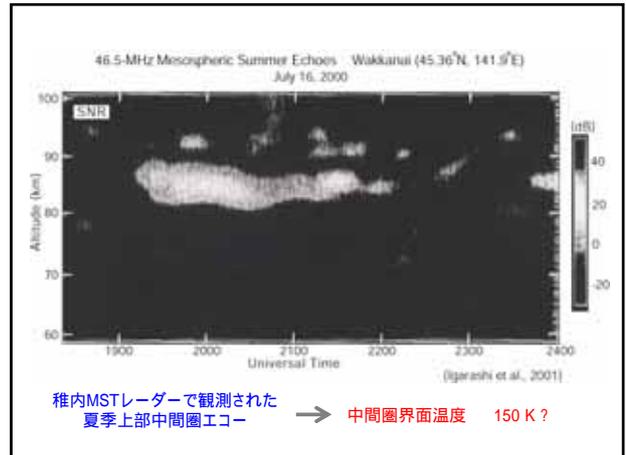




中緯度での夏季中間圏エコー (MSE) の観測

- 56.1°N 8-9 MHz 1994年 Sura, Russia
(Karashtin et al., Ann. Geophys., 1997)
- 54.1°N 53.5 MHz 1998年 Kühlungsborn, Germany
(Latteck et al., Geophys. Res. Lett., 1999)
- 52.4°N 46.5 MHz 1990年 Aberystwyth, UK
(Thomas et al., JATP, 1992)
- 52°N ? 53.5 MHz 1987-1988年 Harz Mountains, Germany
(Reid et al., GRL, 1989)
- 45.4°N 46.5 MHz 2000年 稚内
(Igarashi et al., 大気圏シンポジウム, 2001)

(因みに、極域で観測されるMSEは "PMSE")



北海道短波レーダーによるMSE研究

中緯度MSEの特徴

MSEの発生機構(中間圏界面温度の低下によるのか?)

PMSEとの違い

MSEは中緯度中間圏界面温度変化のモニター?

→ 地球温暖化のモニター?

MSE発生と潮汐、AGWとの関係

冬季中間圏エコー (MWE) はあるのか?

北海道短波レーダーによる中性風の観測

昭和基地SuperDARNによる中性風の観測

(Yukimatu & Tsutsumi, 2002)

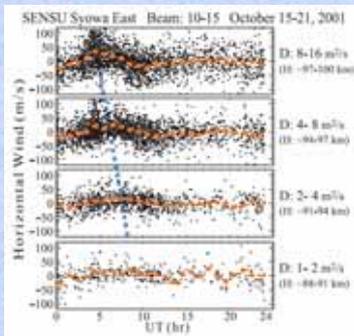


Figure 4. Daily variation of eastward neutral wind for 4 ranges of ambipolar diffusion coefficients.

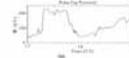
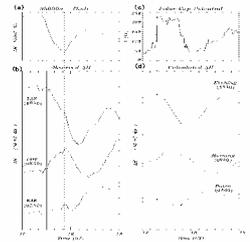
北海道レーダーによる中緯度電離圏-内部磁気圏結合の研究

菊池 崇
(名大STE研)

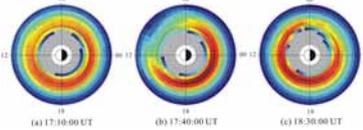
Quick development of the ring current during a substorm

(Hashimoto et al., JGR 2002)

This fact suggests that the convection electric field was transmitted promptly to the inner magnetosphere.



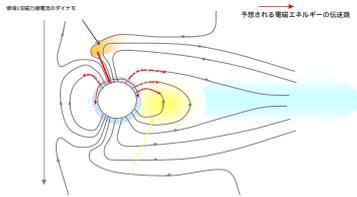
September 5, 1995



Simulated plasma pressure in the inner magnetosphere using the Ebihara model.

対流電場の内部磁気圏への伝送

カスプ付近でつくられる磁気圏対流電場は磁力線を横切っては伝送されない。電離圏を經由して、内部磁気圏へ伝送される可能性がある。



中緯度電場を決めるもの

- Region-1沿磁力線電流の強さと位置
 - IMF $B_z < 0$ により電流は強くなり、位置は低緯度へ移動
 - Region-1電流はグローバル電離圏へ流れ、DP2電流系を形成する。
 - DP2電流に伴い対流電場が中低緯度へ侵入する。
- Region-2沿磁力線電流による遮蔽効果
 - Region-2はRegion-1発達から時間遅れを伴って発達する
 - 平均的にはRegion-1より弱い、Region-1が減少するとRegion-2が卓越しover-shieldingが発生する。
 - Region-2の位置はRegion-1発達と共に変化?

内部磁気圏の誘導性電場 Inductive electric field in the inner magnetosphere

1991.3.24 SC Event

- Wygant et al. (1994GRL)
- The **inductive electric field** produced radiation belt particles.

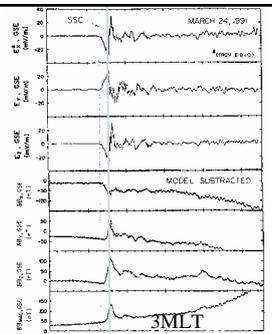
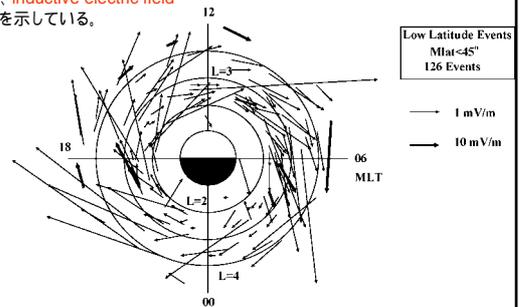


Figure 1. This figure presents the two directly measured components of the electric field (E_1 and E_2) and the calculated E_3 component based on $E_1 \cdot B = 0$ from the sudden commencement on March 24, 1991 at 3:41 UT while the spacecraft was at $L = 2.6$ at 3:00 MLT at 12.5 magnetic latitude near the equatorial plane. Magnetic field data is also presented in a GSE system with a model field subtracted.

内部磁気圏の誘導性電場 Inductive electric field in the inner magnetosphere

SC電場は、昼間も夜間も西向き、SC電場が、**inductive electric field**であることを示している。

Shinbori et al. (2004)

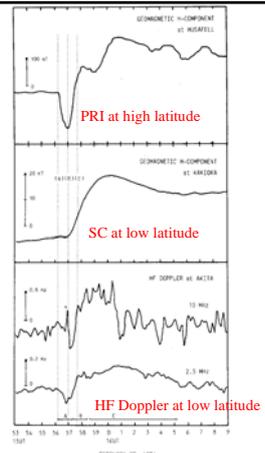


HF Doppler observation of the PRI electric field at low latitude (midnight)

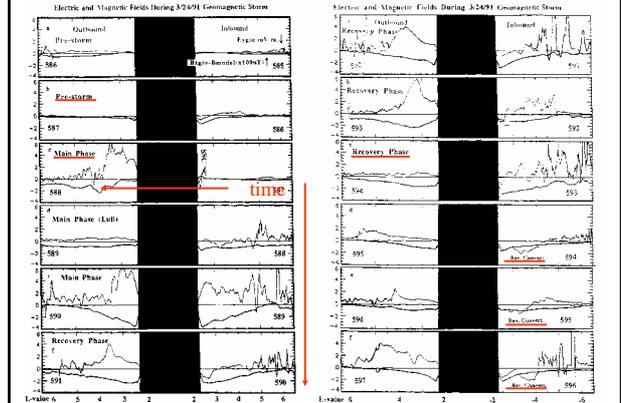
(Kikuchi, JGR 1986, p.3101)

夜間の電離圏では、PRI電場は東向き。
Potential electric fieldであることを示す。

inductive electric fieldは電離圏では生き残るのが難しい、SC、PCの速い変化のみが観測される。



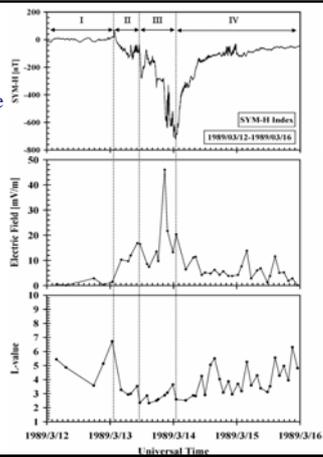
内部磁気圏で観測された対流電場 (Wygant et al., 1998)



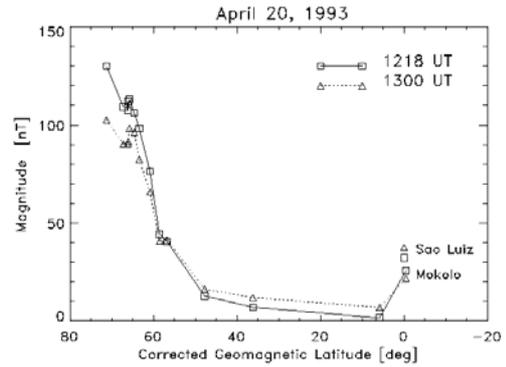
内部磁気圏の対流電場 Convection electric field in the inner magnetosphere (L=2-3)

(Shinbori et al., 2005)

L=3, E=46mV/m
電離圏では
100mV/m程度



Latitudinal Profile of the DP2



電場モデルと実測の比較

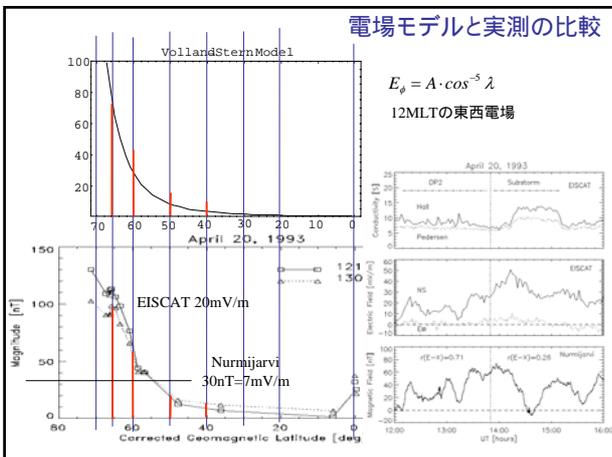
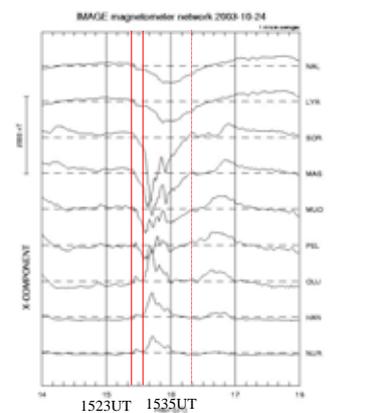


IMAGE magnetometer data at dusk

Nurmijarvi
>500nT
>100 mV/m

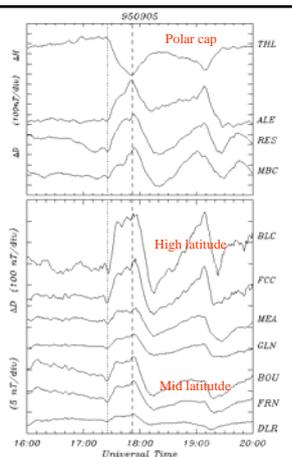


The convection electric field penetrated to mid and low latitudes as detected by magnetometers

Hashimoto et al. (JGR 2002)

極冠から中緯度まで coherent な磁場変動は対流電場の中緯度への侵入を示す。

Baker Lake (BLC, 74.26 ° N, 326.55 ° E GM)
 Fort Churchill (FCC, 69.25 ° N, 331.56 ° E GM),
 Meanook (MEA, 62.28 ° N, 304.99 ° E GM),
 Glenlea (GLN, 60.08 ° N, 328.53 ° E GM),
 Boulder (BOU, 49.18 ° N, 319.15 ° E GM),
 Fresno (FRN, 43.11 ° N, 303.24 ° E GM),
 Del Rio (DLR, 38.93 ° N, 325.92 ° E GM).



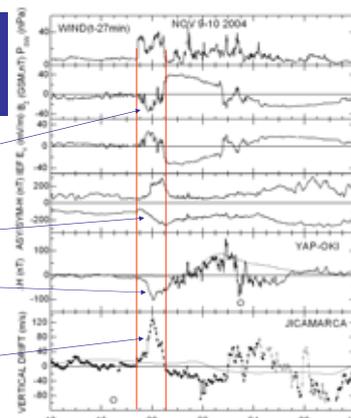
Stormtime electric fields in the equatorial ionosphere on the day- and night-sides

Southward IMF

Storm main phase

Night-side electric field (CEJ)

Day-side electric field (ion drift)



レーダー観測で内部磁気圏電場を推定

- 磁気圏対流電場は中緯度に侵入するが、幾何学的な減衰と遮蔽により振幅が小さくなる。
- 中緯度(56度)で、10mV/m程度のDP2電場、100mV/m程度の磁気嵐電場が期待できる。
- 内部磁気圏(L=3)で磁気嵐中、20-40mV/mの電場が観測されており、HFレーダー観測から内部磁気圏電場を推定することは可能。

極域電離圏対流と 極-赤道電磁エネルギー結合

橋本久美子(吉備国際大)、
石川裕子、渡辺堯(茨城大)、
菊池崇(名古屋大)

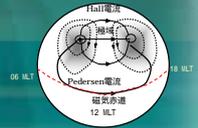
極-赤道で同時発達する地磁気変動

- ・ 磁場変動の開始が汎地球規模に同時である。
- ・ 電場ポテンシャルが、中心が高緯度に位置する正負ペアの極性を持つ。
- ・ 磁場変動の振幅が、極から中低緯度に向かうほど減少し、昼間側磁気赤道で異常増幅が顕れる。

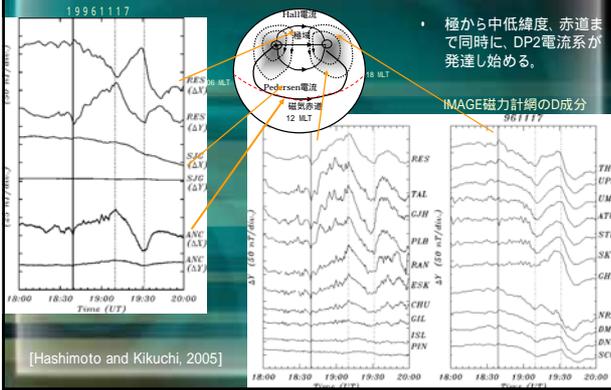
汎地球規模(極-赤道)に同時発達する現象例

観測	現象	周期	原因
Araki 1977	地磁気急激部 (PRI)	1-2分	太陽風動圧
Kikuchi他1996	DP2地磁気変動	数十分-1時間	太陽風磁場
Motobone他2003	グローバルPcs地磁気変動	2-10分	太陽風動圧、及び磁場

極から赤道まで広がるDP2型電離圏電流



DP2電離層電流系の発達開始

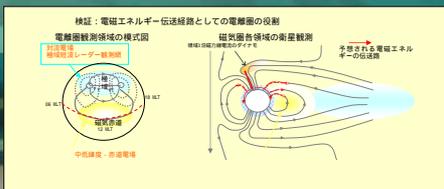


SuperDARNレーダー観測による極域プラズマ対流パターン



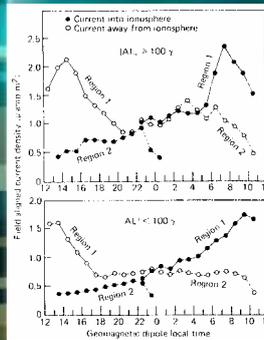
ネットワーク観測を利用した 研究の目的

- ・ 極から赤道までの電磁エネルギー伝送を電離圏固有の特性として捉え、磁気圏対流発達過程における電離圏の役割を検証する。



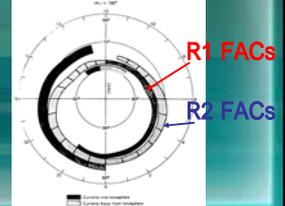
領域1及び領域2沿磁力線電流の電流密度

Iijima and Potemra (1978)



- 0.6 - 2.0 MLTではR1-FACの電流密度が、R2-FACより大きい。
- 2.0 - 2.4 MLT, 0.0 - 0.6 MLTでは、両電流の電流密度は同じくらい。

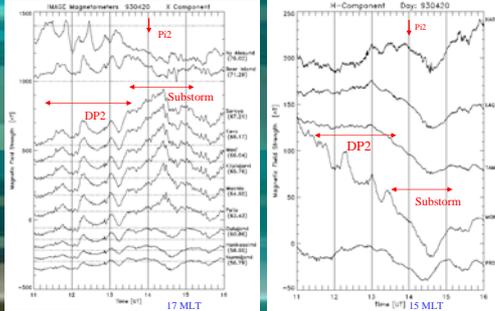
Iijima and Potemra (1976)



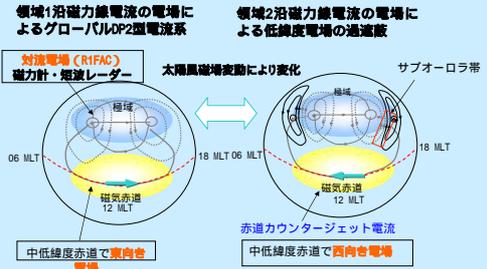
DP2の赤道異常増幅とNegative Bay

相対的に、領域2沿磁力線電流の電場が卓越する場合、昼間側のサブオーロラ帯より低緯度側(赤道まで)、西向き電流が流れる。

(Kikuchi et al., 2000)

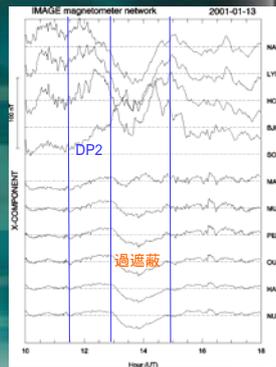
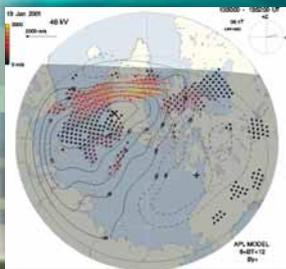


領域1・領域2沿磁力線電流の電場ポテンシャル



午後側対流セルの高速プラズマ流

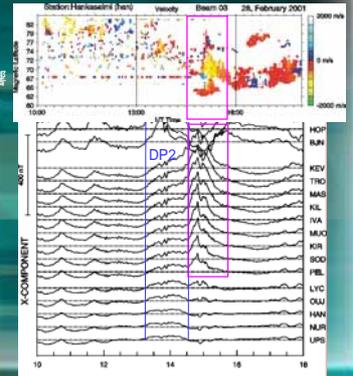
- 午後側対流セルの狭い緯度幅に高速プラズマ流が集中する現象が観測されることがある。
- R1-FACとR2FACの間で電場が強められている領域と対応することを検証。



午後側高速プラズマ流と過遮蔽

以下の3つの現象の関係を調べ、R2-FACの電場ポテンシャルの電離層電場分布への影響を検証する。

- 午後側高速プラズマ流
- サブオーロラ帯の遮蔽電場発達
- 磁気赤道の西向き電場発達



北海道レーダーへの期待

- 磁気嵐時の対流電場と遮蔽電場の発達過程を北海道レーダーとグローバル磁力計ネットワークで検証
- ✓ 中低緯度の電離圏電場の変動は内部磁気圏にどう影響するか。
- ✓ R2-FACの電場は極冠域でも、R1-FACの電場を打ち消す。磁気圏対流のサチュレーションの一因とならないか。

スケジュールファイルでの周波数指定

Iceland East レーダー (Stereo レーダー) の場合

```
# common time - stereo HTR - cluster conjunction
2005 11 3 0 0 /home/radar/usr/bin/stereo_scan -dfA 13 -dfB 13 -nfA 10 -nfB 10
```

周波数指定部分

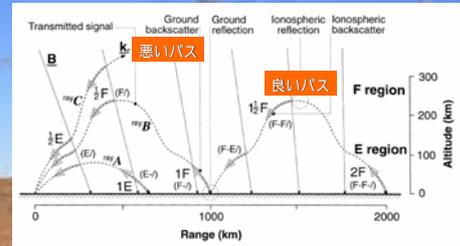
- dfA : daytime frequency for Channel A
- dfB : daytime frequency for Channel B
- nfA : nighttime frequency for Channel A
- nfB : nighttime frequency for Channel B

夜と昼で周波数を変えている

周波数選択について

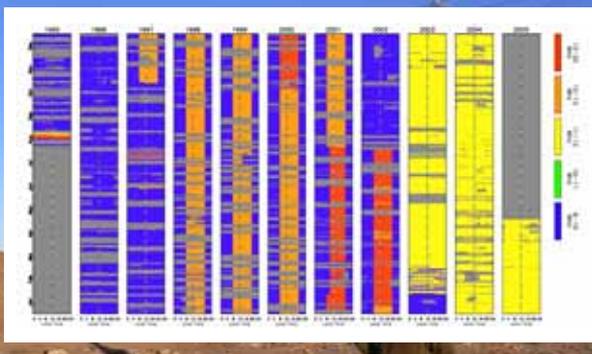
用いる周波数によって電波の通るパスは様々

F 領域を突き抜けないで、ホップしながらなるべく遠くまで伝搬し、なるべく多くのエコーを集めてきて欲しい。



送信周波数の変遷 - Finland レーダー

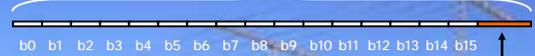
昼夜で周波数を変えている, Solar Max, Min でも変えている



周波数最適化

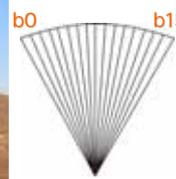
sounding mode (normal_sound, fast_sound)

2分間 (or 1分間)



7秒 (or 3秒) x 16 = 112秒 (or 48秒)

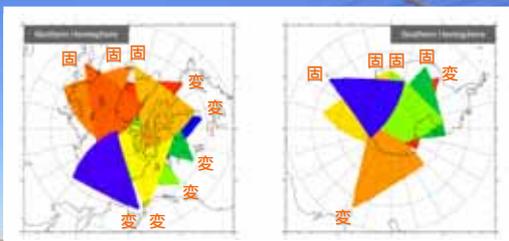
余った時間 8秒 (or 12秒)



周波数を1秒の積分時間で sweep する sounding mode を行う (例: 8, 10, 12, 14, 16, 18 MHz) 最もエコーの得られる周波数を決定

周波数選択について

固定周波数 vs 送信周波数最適化



固定 7基; 可変 8基

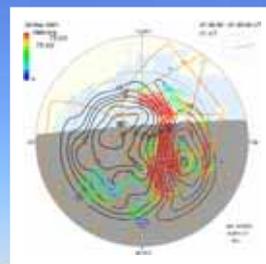
送信周波数選択に関する二つの考え方

アメリカ, カナダの考え方

map_potential においてできるだけ多くの点が欲しい. SuperDARN は場を測るもの.

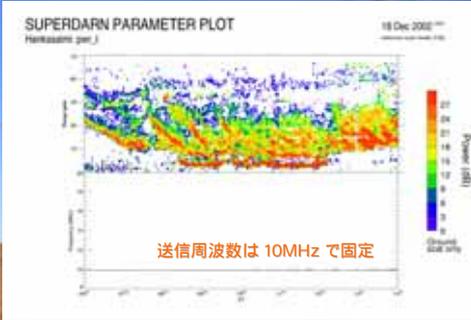
イギリス, 昭和の立場

観測される構造 (TID, FTE, FAI 一般) を大事にしたい. SuperDARN は現象を測るもの.



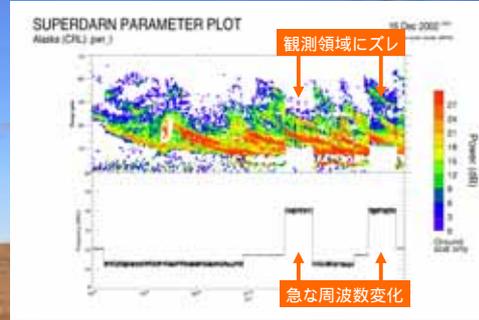
周波数選択について

固定周波数運用 (例えば TID 観測の場合)

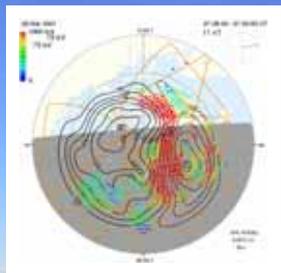


周波数選択について

送信周波数最適化 (例えば TID 観測の場合)



送信周波数選択に関して議論すべきこと



アメリカ, カナダの考え方

map_potential において
できるだけ多くの点が欲しい。
SuperDARN は身を測るもの。

イギリス, 昭和の立場

観測される構造 (TID, FTE
FAI 一般) を大事にしたい。
SuperDARN は現象を測るもの。

北海道はどうする？

- 極域ほど FAI は多くないだろう 周波数最適化をして多くのエコーを
- TID や 低緯度オーロラなどはクリアに捉えたい 周波数固定

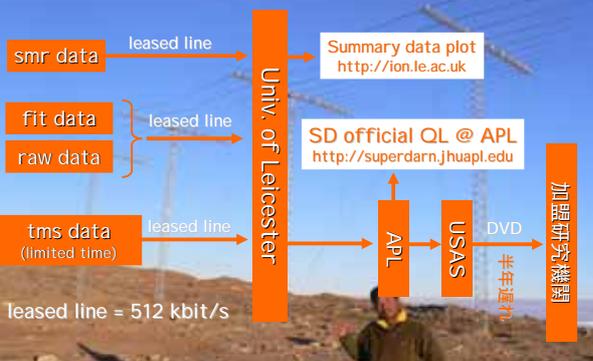
データの種類

様々な種類のデータがある。通常、解析には fit data を使用

容量大きい ↓	smr data (.smr)	power, vel, width, noise_lev, freq サマリープロット作成に使用	1日 約 400kB (fast_scan)	↑ 処理レベル高い (圧縮度高い)
	fit data (.fit)	pwr_l, pwr_s, vel, width_l, width_s, noise_lev, freq, Vel_error 通常の解析に使用	1日 約 60MB (fast_scan)	
	raw data (.dat)	ACF 詳細な解析に使用	1日 約 120MB (fast_scan)	
	tms data (.tms)	Raw time-series 更に詳細な解析に使用	1日 約 4GB (normal_scan)	

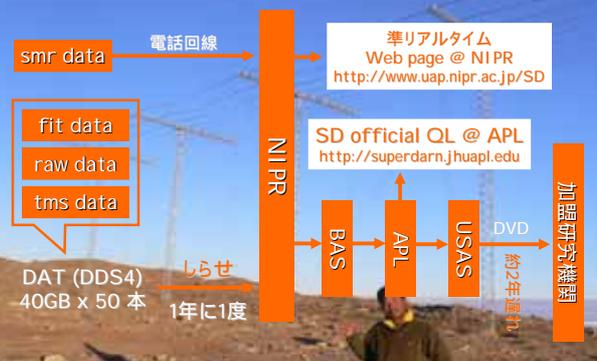
データ転送

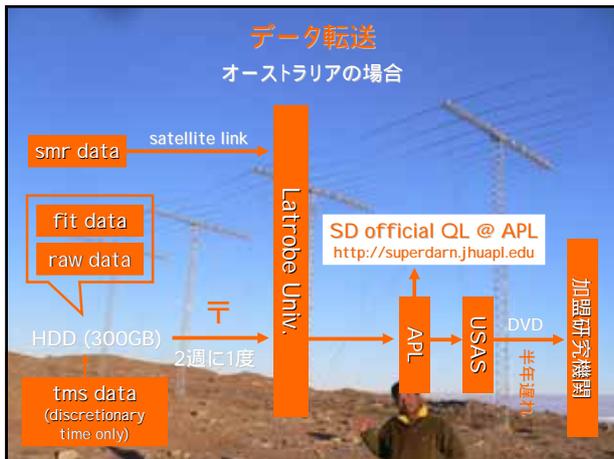
英レスター大学の場合



データ転送

(少し前までの) 昭和の場合





- ### まとめ
- 運用体制**
- 運用責任者・スケジュール担当が必要
 - 特別観測を日本のコミュニティから積極的にリクエストしたい
 - オープンな運用体制にできるか？
(EISCAT, MU radar のような共同利用とりまとめ体制?)
- 送信周波数の選択**
- 周波数の最適化をするのが固定にするのか?
 - 周波数固定にした場合に用いる周波数の検討
- サイトからのデータ転送・配布プロセス**
- fit data (1日60MB: 非圧縮)までオンラインで転送したい
 - 全てをオンラインで取るのは無理 大容量ストレージ
 - fit data は公式配布前にローカルに配布? (遅れ無し)