



名大STE研研究集会

『地球科学メタ情報データベースの現状とその活用』

2011/2/23-24

超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究

Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork

IUGONET観測データに基づく地磁気日変化と熱圏風の長期トレンドについて

新堀淳樹、林寛生 (京大RISH)

小山幸伸・能勢正仁(京大・地磁気センター)

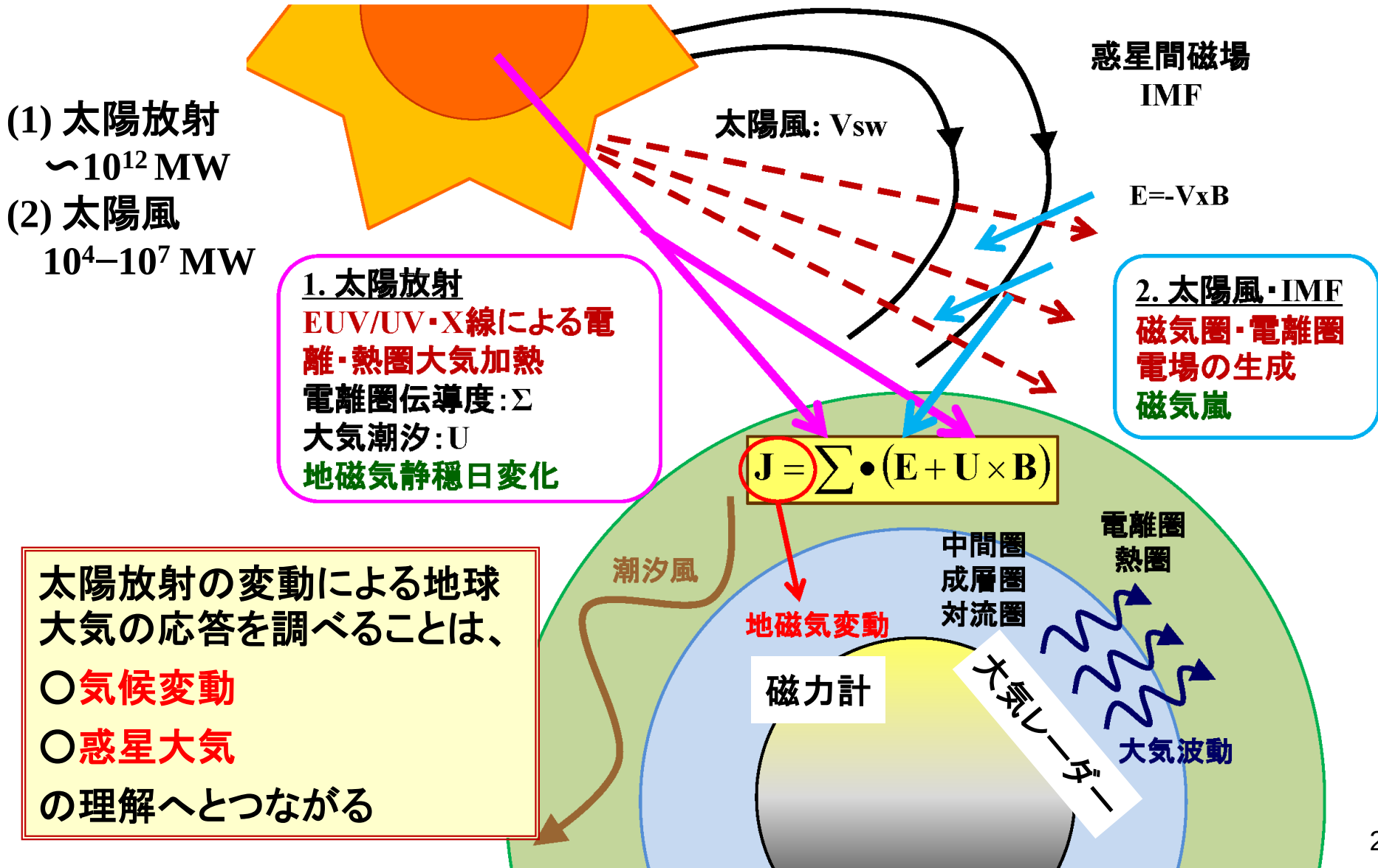
上野悟 (京大天文台)

磯部洋明、浅井歩 (京大宇宙総合)

横山正樹 (和歌山大宇宙教育)

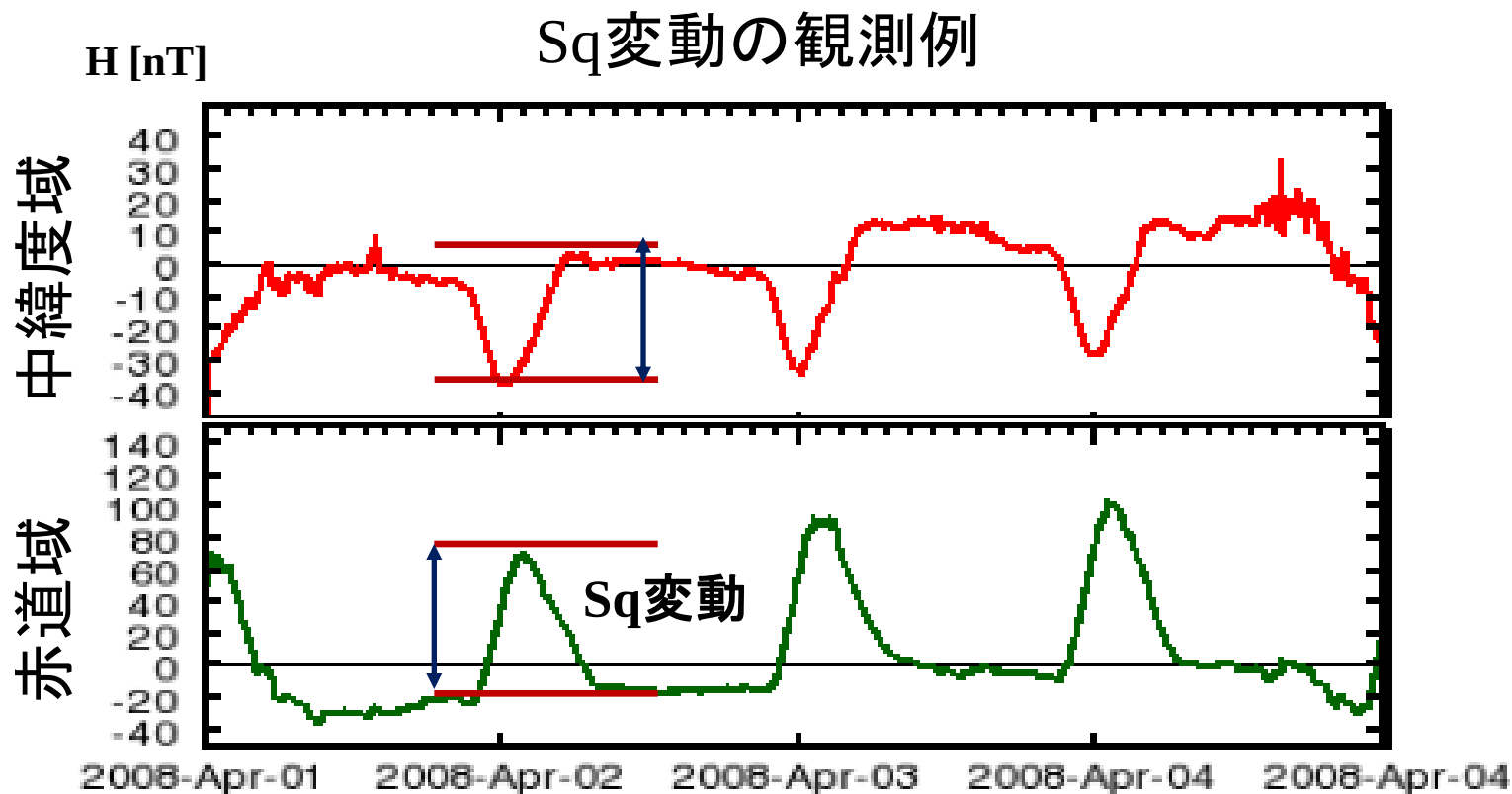
1. はじめに

1.1 太陽地球系科学(太陽活動が地球大気へ与える影響)



1.2 地磁気日変化

擾乱の少ない磁氣的静穏時の地磁気の日変化は、Sq (Geomagnetic Solar daily Quiet variation)と呼ばれ、電離圏高度の中性風によって駆動される電離圏電流がその要因である



1.3 地磁気静穏日変動の振幅を決めるもの

○地磁気日変動(Sq)の振幅

←電離圏電流の大きさ

←電離圏電気伝導度＋地球磁場強度＋風速

$$\mathbf{J} = \Sigma \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

○電離圏伝導度(Σ)の変化

太陽活動依存性＝太陽放射(UV/EUV)の11年周期性

季節依存性＝地球の自転軸の傾きの効果

地磁気永年変化＝磁場減少による伝導度の増加

地球温暖化＝電離圏の状態に関わる長期的な変化

[e.g., Elias et al., JGR, 2010]

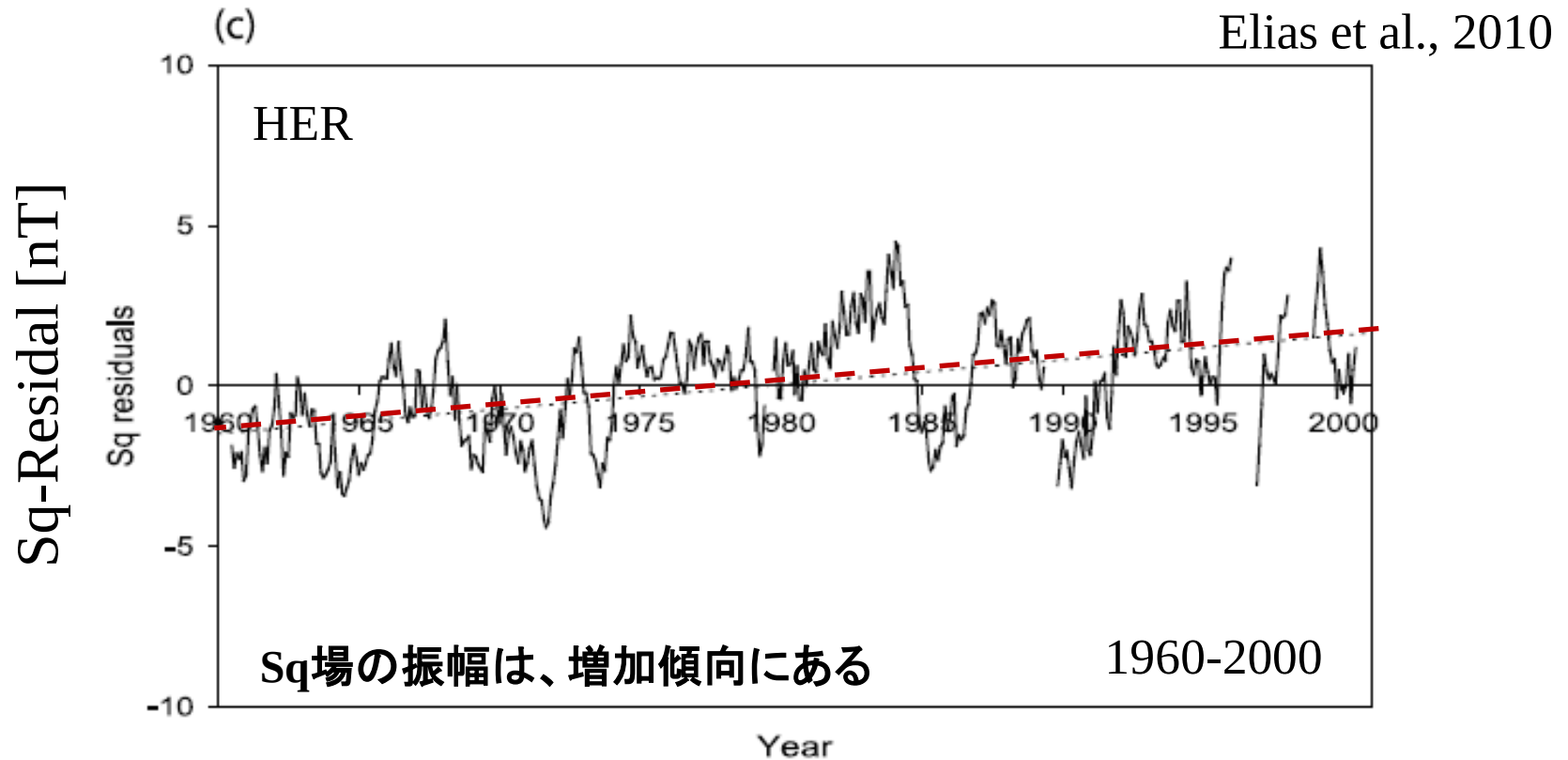
1. はじめに

1.4 これまでの地磁気日変化の長期トレンドの研究

	観測 点数	太陽デ ータ	Sq場の 経年変動	主磁場の永年 変化の影響	特記事項
Sellek [1980]	3点	太陽黒 点数	あり 増加傾向	あり	親論文
Schlapp et al., [1990]	11点	太陽黒 点数	あり 増加傾向	あり	Hermanusでは、モ デル予測値よりも 経年変動が1桁ほど 小さい
Macmilla n and Droujinin a [2007]	14点	F10.7	あり 観測点に 依存	議論はしてい るが、明示し ていない	Sq場の年変動は、 太陽放射のプロキ シとして使える
Elias et al. [2010]	3点	太陽黒 点数	あり 増加傾向	あり	地球温暖化による 電離圏変動がSq場 の変動に存在する 可能性を示唆

1. はじめに

1.5 これまでの地磁気日変化の長期トレンドの研究



地磁気日変化の振幅の長期トレンドには、地球磁場の永年変動だけでなく、**地球温暖化に伴う超高層大気の寒冷化による電離圏変動**が存在する可能性を示唆

1.6 これまでの問題点

○使用している地磁気観測点の不足

Sq場の振幅には、太陽活動依存性に加えて、経年変動が存在することがわかっているが、**全球的な経年変動の特徴は、わかっていない**

○分野間の観測データを用いた統合解析の不足

Elias et al. [2010]では、地球温暖化による電離圏変動がSq場の変動に存在する可能性を示唆しているが、**実際の観測データに基づいた地球温暖化が与える超高層大気変動への影響を議論していない**

○解析手法の問題

太陽活動依存性を取り除く際に、太陽黒点数を用いているが、これでは**2009年のような無黒点日が多い静穏期には適用が困難**となる。

地磁気静穏日の同定方法(ある月の中で最も静穏な日を5日間、選択)

⇒**ある閾値の具体化し、データ点を増やす必要がある**

1.7 本発表の趣旨

IUGONETプロジェクトに属する2機関(京大地磁気センター・生存圏研究所)が保有している長期の地磁気、及び熱圏・中間圏における中性風データを用いて、**Sq振幅の長期変動の要因**を明らかにする。

ここでは、これまでの研究の問題点を克服するために以下の改良を加えている

(1) 多点の地磁気観測点や熱圏風速の長期データ解析

IUGONETで開発中のメタデータ検索システムと解析ソフトを利用して、研究推進の効率化を図った

(2) 解析手法の改良

地磁気静穏日の閾値の具体化

太陽活動依存性の差し引きに非線形回帰を採用

2.1 使用観測データ

地磁気データ(1時間値、1900年以降のデータ): 京大WDC

地磁気指数(Kp指数、1932年-2010年): 京大WDC

太陽F10.7フラックス(1947年-2010年): NGDC/NOAA

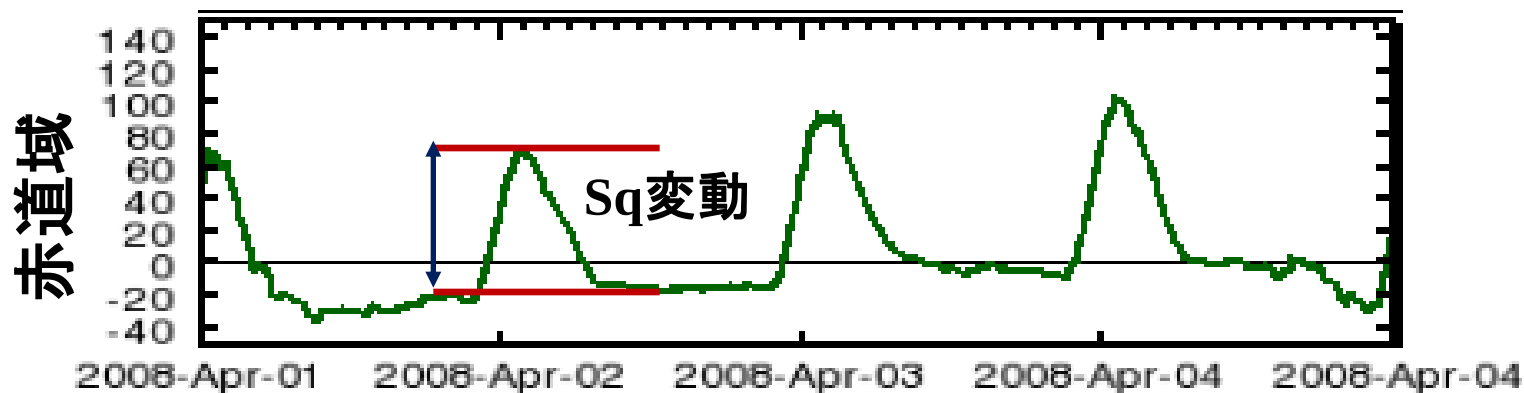
熱圏下部中性風(1日平均値): 京大RISH

2.2 地磁気静穏日とSq振幅の同定方法

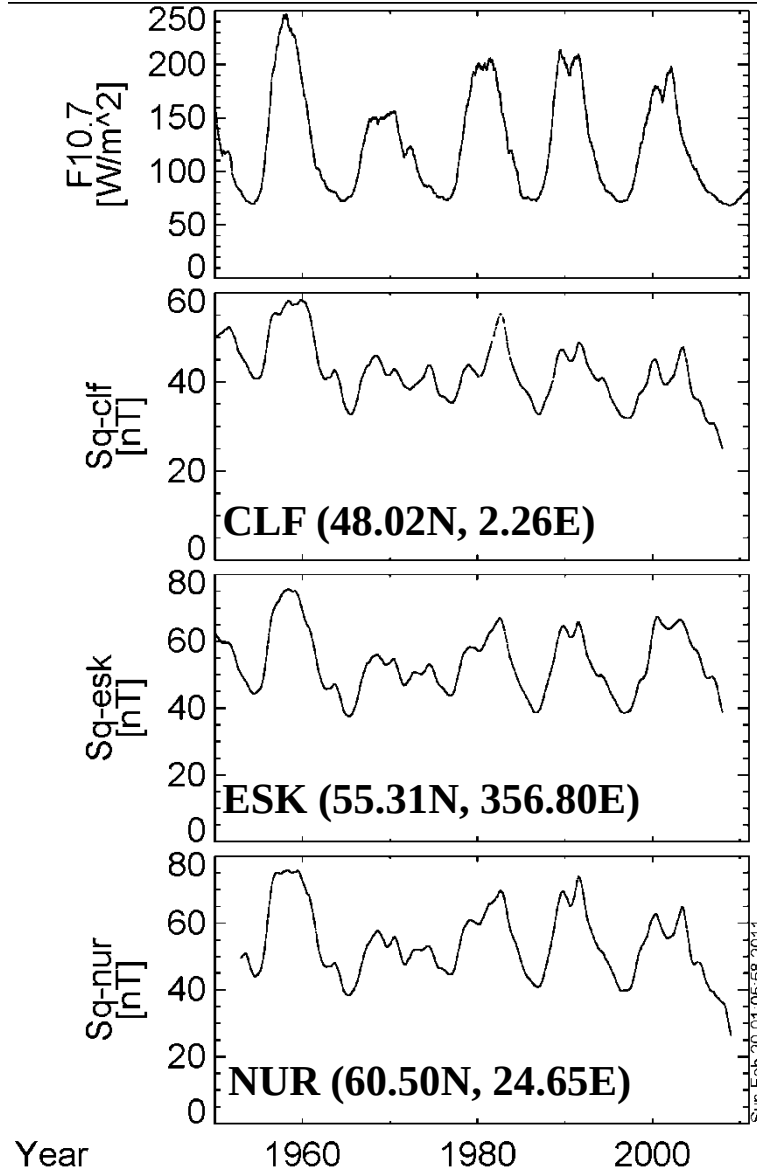
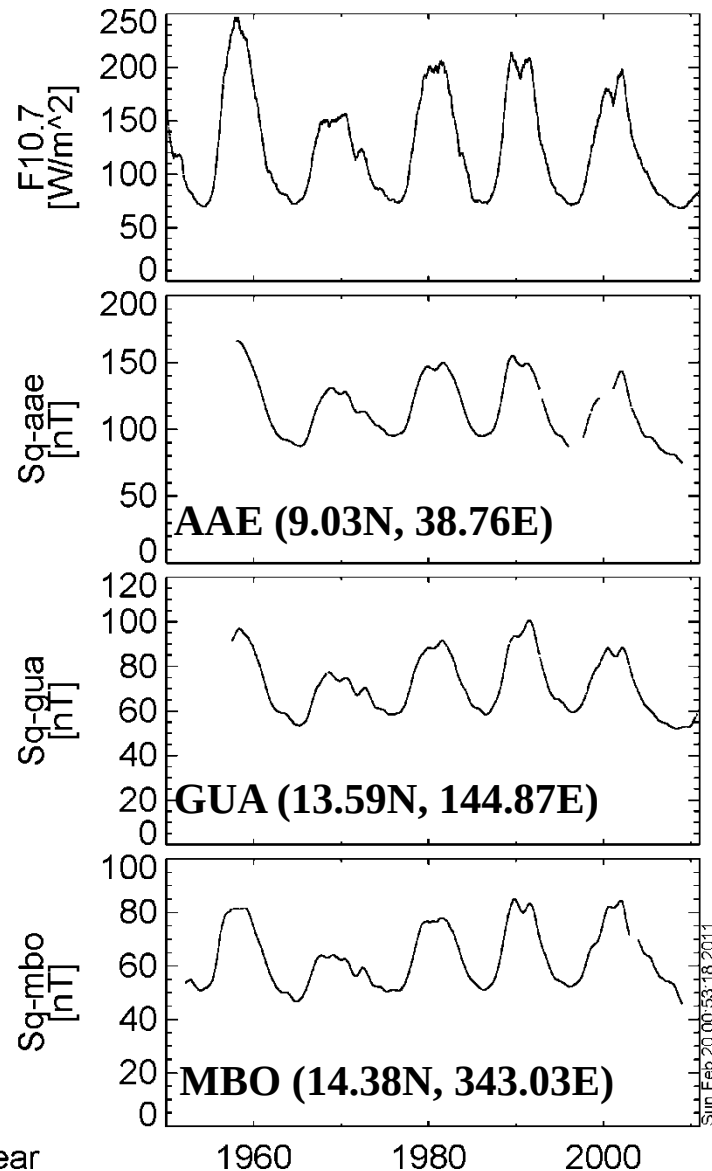
○地磁気静穏日: Kp指数の1日の最大値が4未満

○Sq振幅: 1日の変化の最大と最小の差

○太陽活動依存性の除去: 2次回帰曲線からのずれを計算



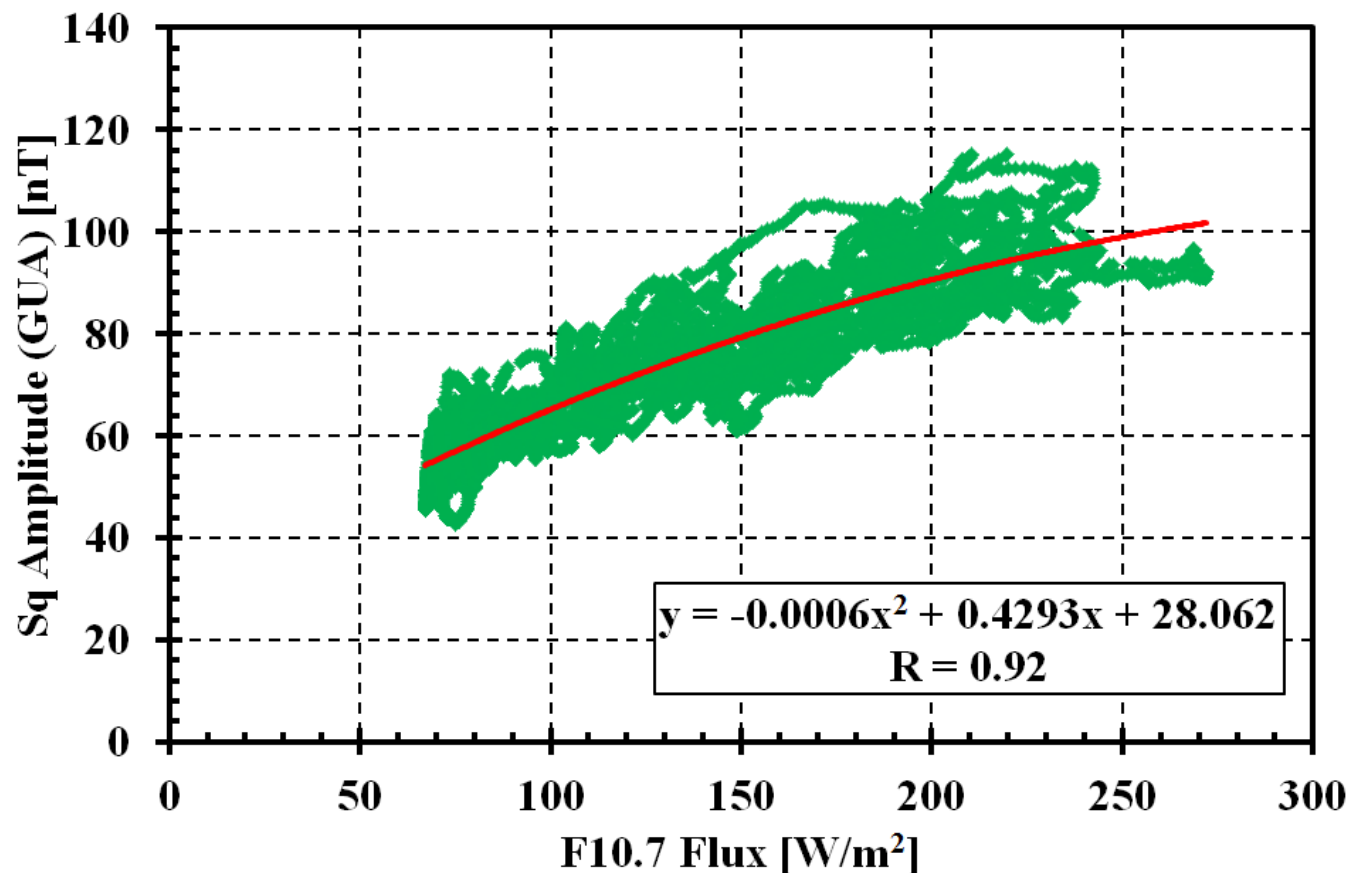
3.1 地磁気静穏日変化の長期変化(太陽活動との比較)



左図:低緯度
(9-15度)
右図:中緯度
(48-61度)

3. 解析結果

3.2 太陽F10.7フラックスと地磁気静穏日変化(Sq)の振幅の関係

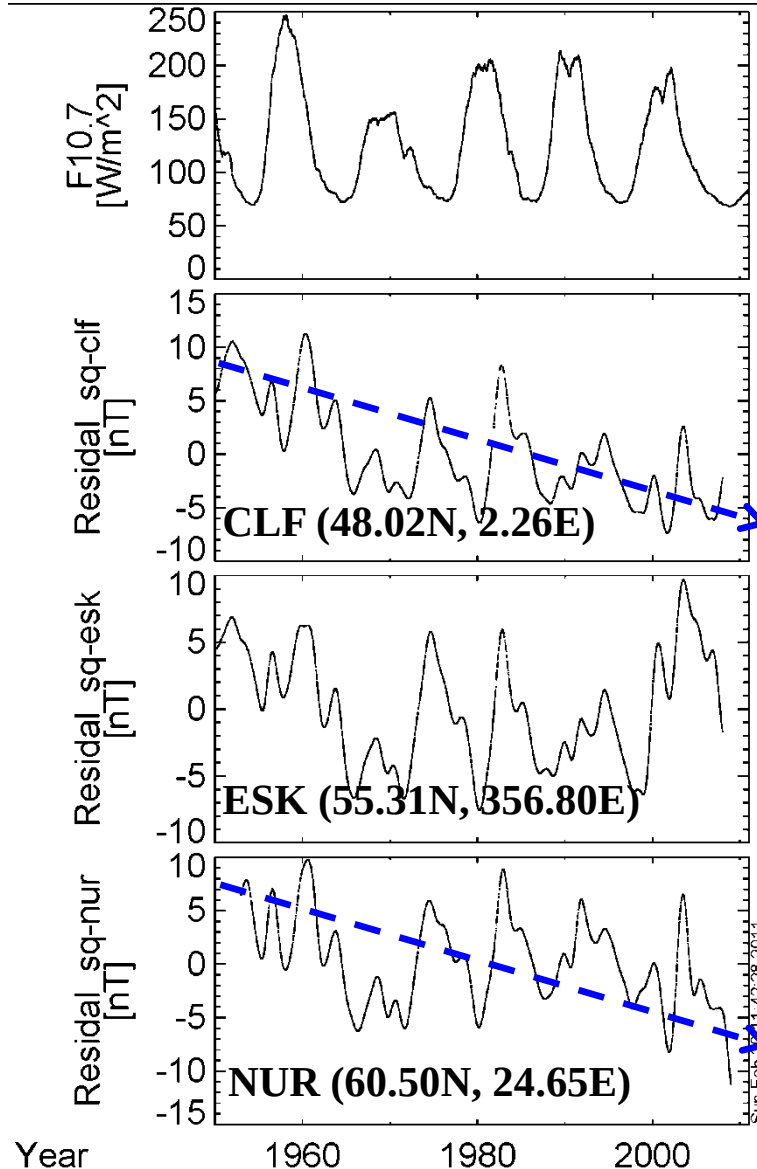
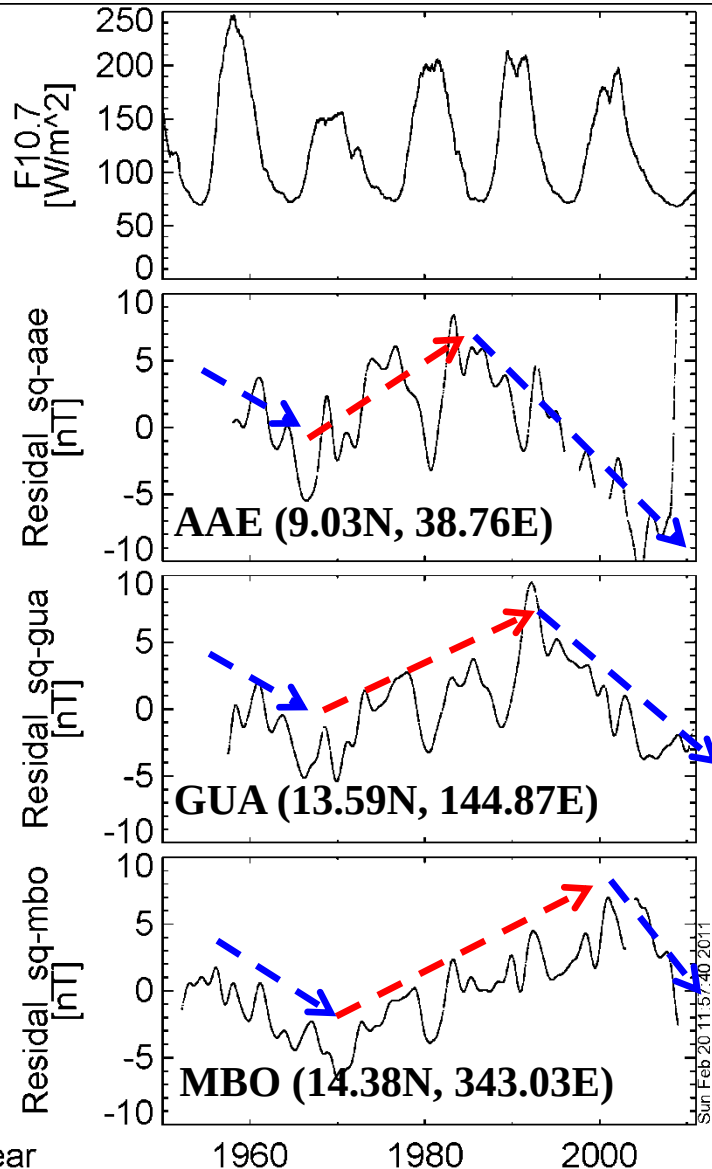


太陽活動に依存する成分を除去

Sq振幅に依存する成分 = ~~太陽活動(F10.7)~~

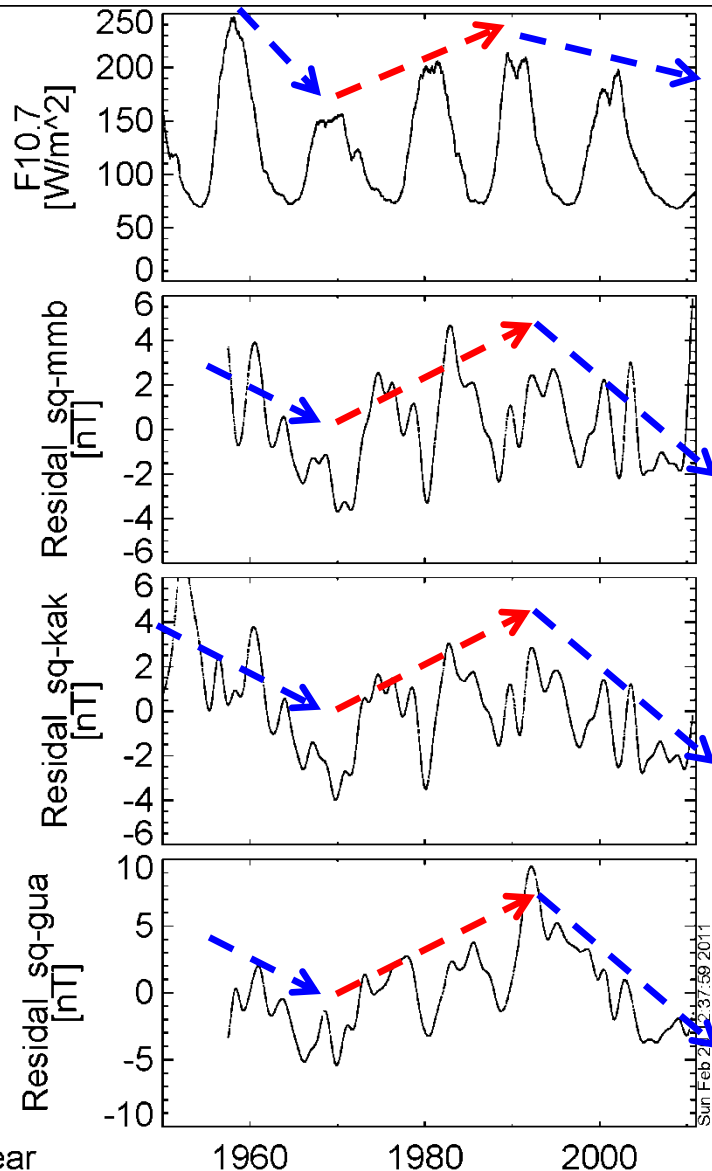
+ 地磁気永年変化 + 地球大気の変化(温暖化など)

3.3 地磁気日変化の長期変化(太陽活動11年周期成分を除去)



増加
減少

3.4 同じ経度上における地磁気日変化の長期変化



中緯度から低緯度におけるSq場の振幅には、
ほぼ同じような長期トレンドが存在する

1970年付近で振幅が極小

1990年付近で振幅が極大

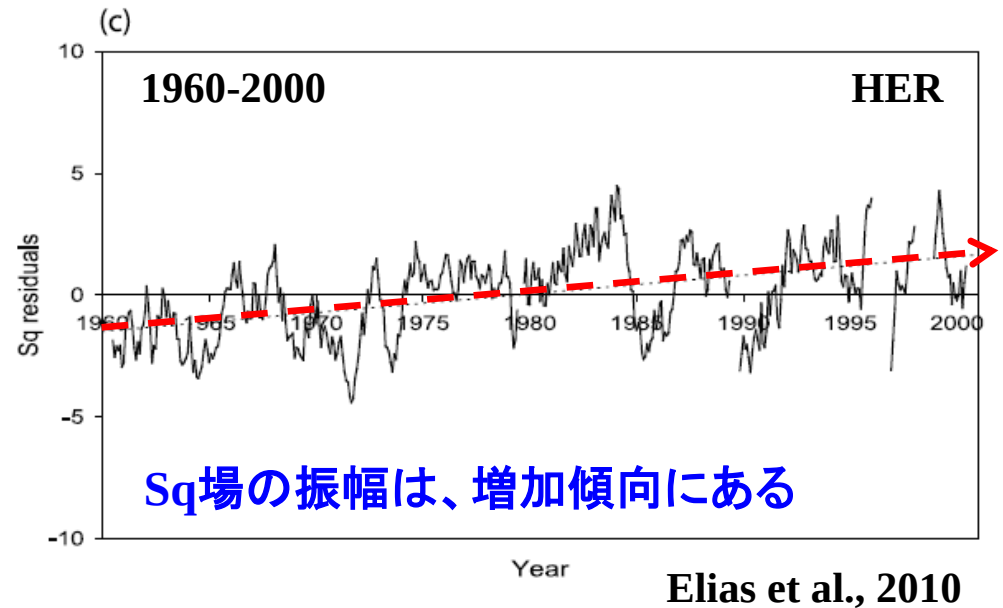
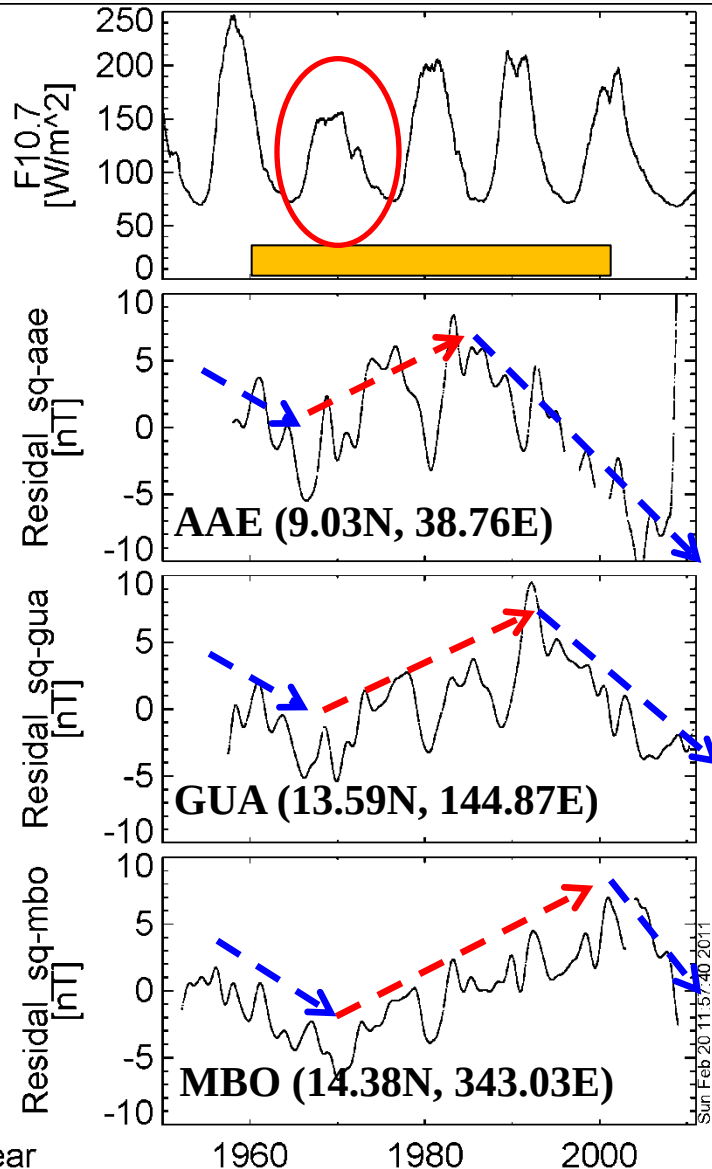
太陽活動が比較的不活発な時期に極小となる
傾向が存在する

MMB (43.91N, 144.18E)

KAK (36.23N, 140.18E)

GUA (13.59N, 144.87E)

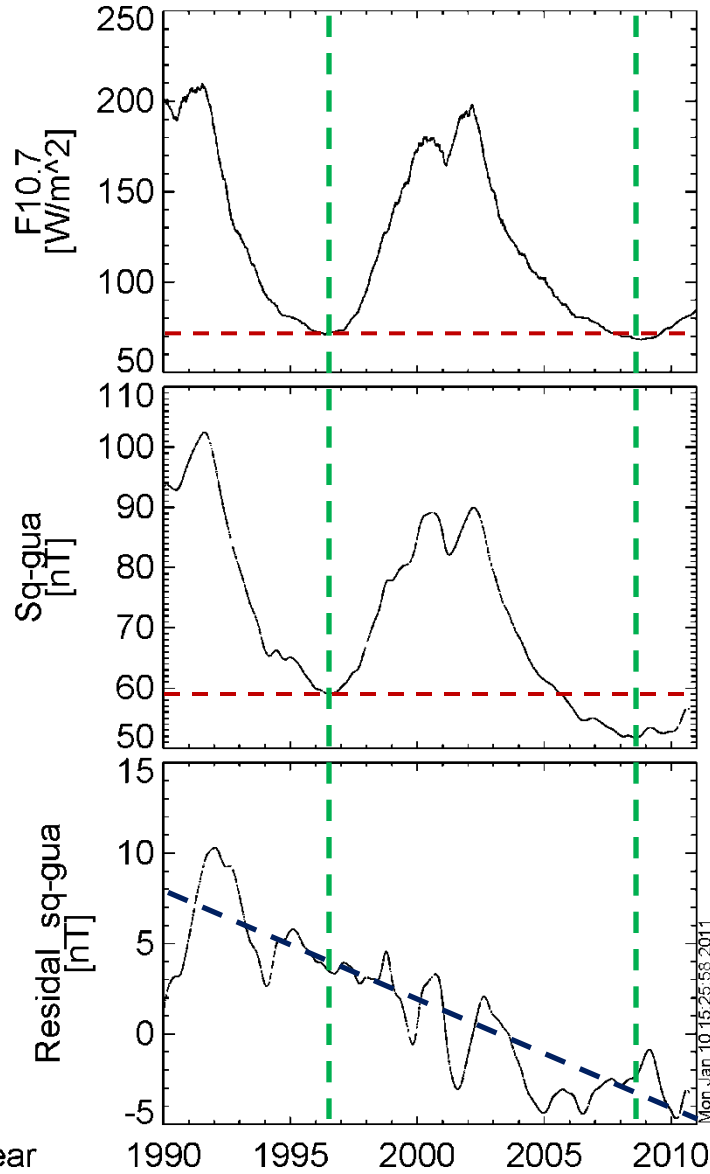
4.1 これまでの研究との比較



Elias et al. [2010]の解析期間は、主に増加傾向にある期間(1960-2000)であったため、この結果を基にした解釈には疑問点が残る

⇒本研究の示す結果は、地球温暖化の傾向が単純には見出すことはできないことを示唆する

4.2 太陽活動22, 23周期の極小期におけるSq振幅の違い



22周期の極小: 1996-1997年

23周期の極小: 2008-2009年

地磁気観測点: GUA (13.59N, 144.87E)

Sq振幅が最小となる日時とF10.7フラックス

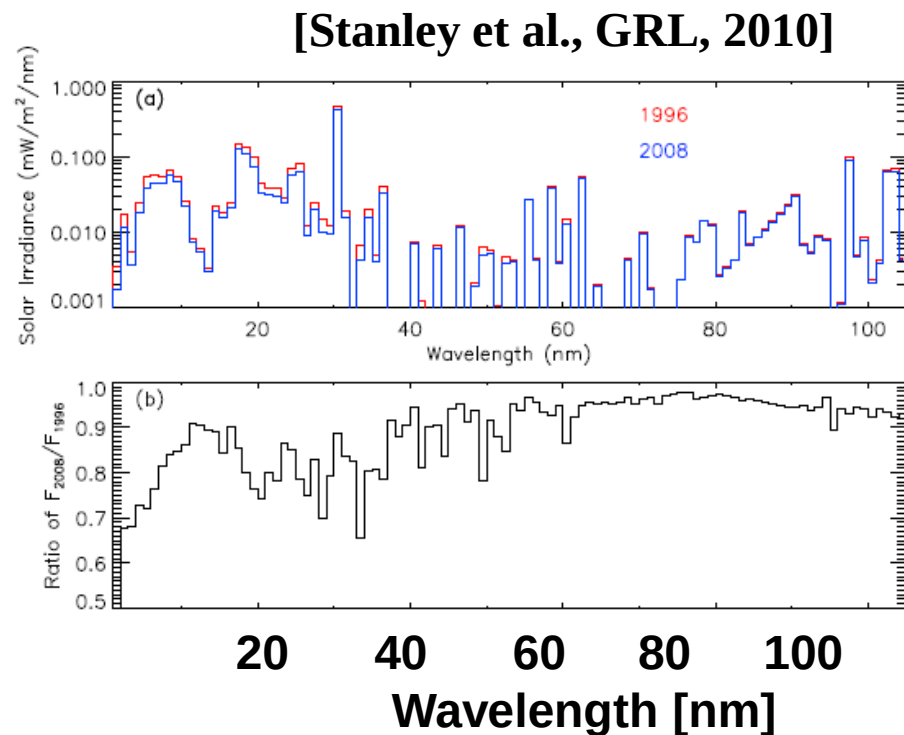
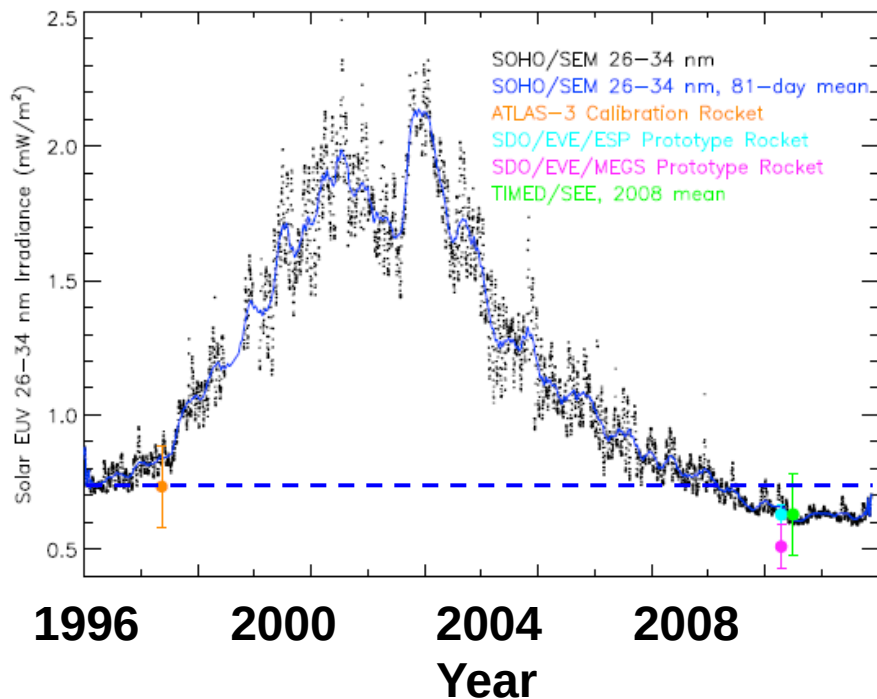
	22周期 (1996/7/18)	23周期 (2008/8/15)	変化量
F10.7 [W/m ²]	72.67	68.60	-4.07 (5.6%減)
Sq振幅 [nT]	59.07	51.74	-7.33 (12.4%減)

※太陽活動11年周期を差し引いたSq場の振幅の経年変化は**負の変化**を示す

⇒F10.7以外に依存するものが存在

EUV/UV領域の太陽放射、地磁気永年変化

4.3 今サイクルの極小期のSq振幅が小さい理由



1996年と2008年における太陽EUVフラックスの比

90-100 nm:0.9 (10%減)

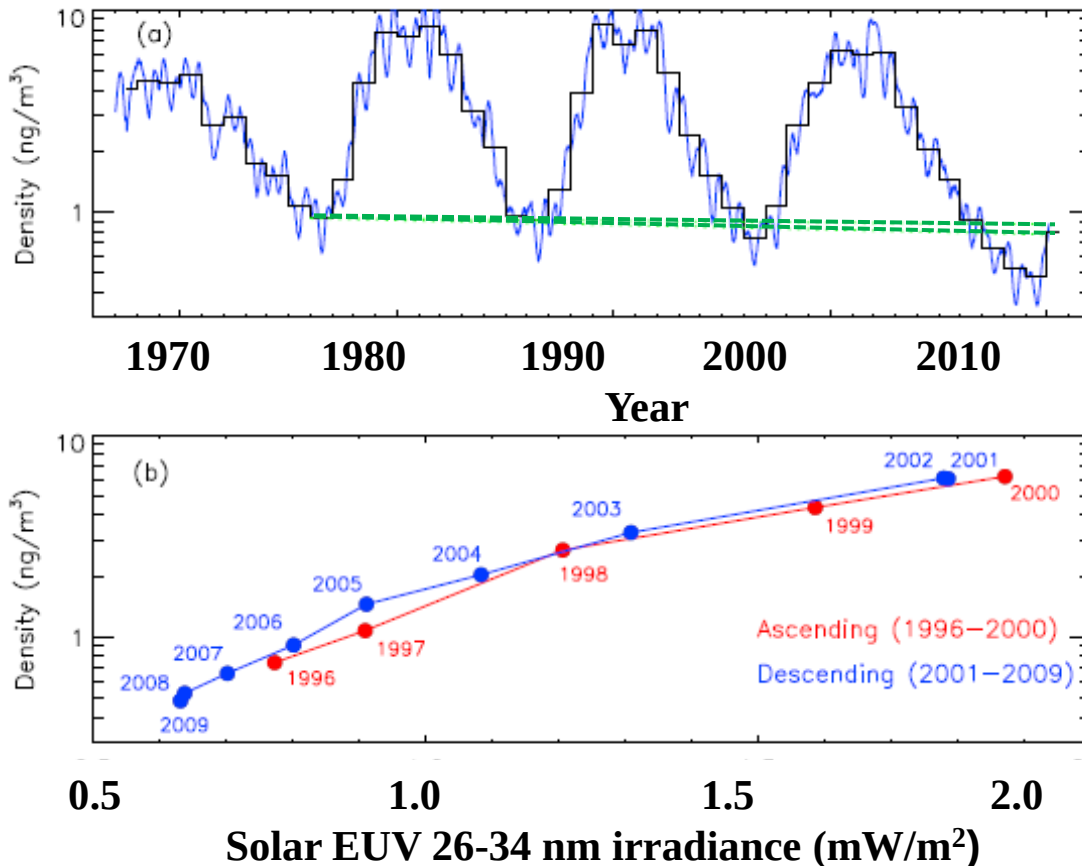
60 nm以下:0.7-0.9 (10-30%減)

E領域(電流層= Sq場の振幅に関係):

90-150 nm (NO, O, O₂)

F領域: 100 nm以下(H, He, O)

4.5 熱圏大気密度の太陽活動依存性



[Stanley et al., GRL, 2010]

上段: 高度400kmの衛星観測
に基づく熱圏大気密度
の年変動

下段: 太陽EUVを関数とした熱
圏大気密度の変化

上段の緑線:

CO₂大気増加に伴う寒冷化に
よる大気密度減少のトレンド

1976年の値を基準

上側: **2%の増加**として計算

下側: **5%の増加**として計算

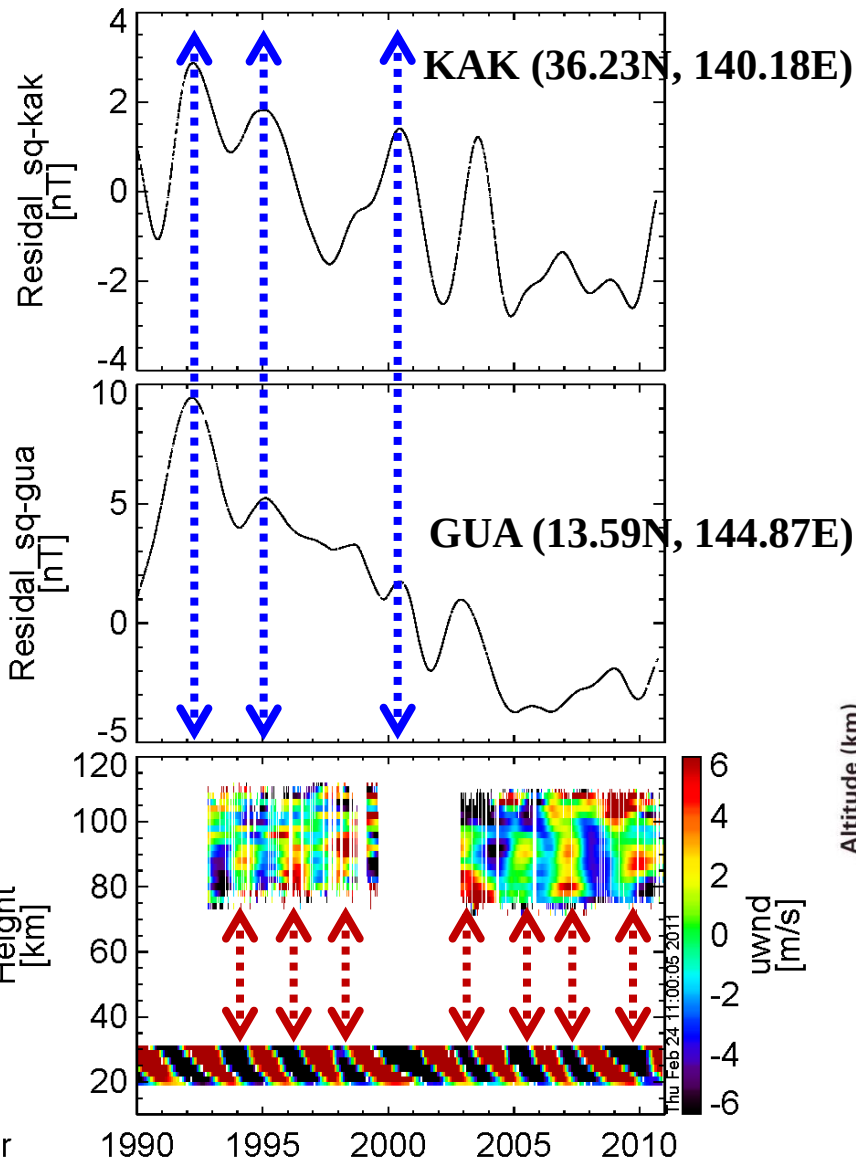
太陽23サイクルの極小期における熱圏大気密度は、前サイクルのものよりも約20%小さく、CO₂大気増加に伴う寒冷化の影響よりもはるかにその変化は大きい。

○1947年から2010年までの長期の期間における太陽F10.7放射フラックスとIUGONETの保有する地磁気、及び熱圏・中間圏風速のデータを用いて、地磁気静穏日変化(Sq)の振幅の太陽活動依存性とその長期トレンドの解析を行った。その結果、以下のような結果が得られた

1. Sq場の振幅は、**太陽活動11年周期に同期して変動**し、太陽放射フラックス(F10.7)が最大となる極大期には、Sq場の振幅が増大する。
2. 太陽活動11年周期と差し引いたSq場の振幅の長期変動は、**1990年を境に増加から減少に転じる**傾向を示す。
⇒Elias et al. [2010]で報告されている**地球温暖化に伴う超高層大気の寒冷化による電離圏伝導度の増加とは逆の傾向であり、その兆しはよくわからない。**
3. 太陽極小期で、Sq場の振幅が比較的に小さくなる場合、**次期極大期のSq場の振幅は、小さい傾向**にある。
特に、太陽活動22と23サイクルの極小を比べると、**地磁気日変化(Sq)場の振幅が10%程度減少**している。さらに、
⇒同様の傾向が太陽活動20サイクルにも見受けられる。
⇒**太陽活動24サイクルの極大は小さいことが予想される**

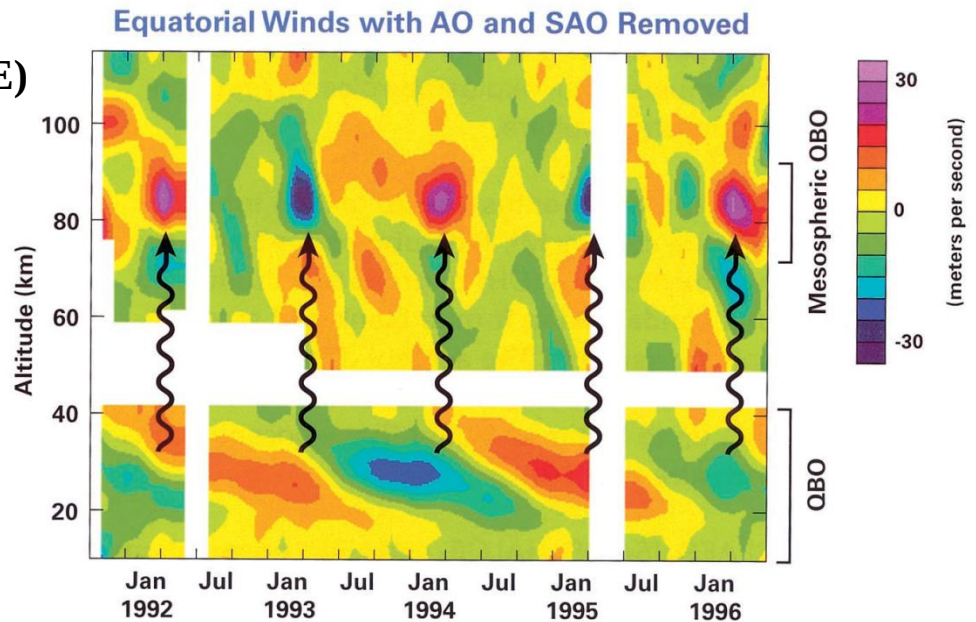
6. 今後の展開と方針

6.1 MLT領域のダイナミクスとSq場変動との関連性



成層圏に比べて変動は小さいが、MLT領域でも同様の準2年周期変動が見られ、高度100-110kmの電流層まで達している

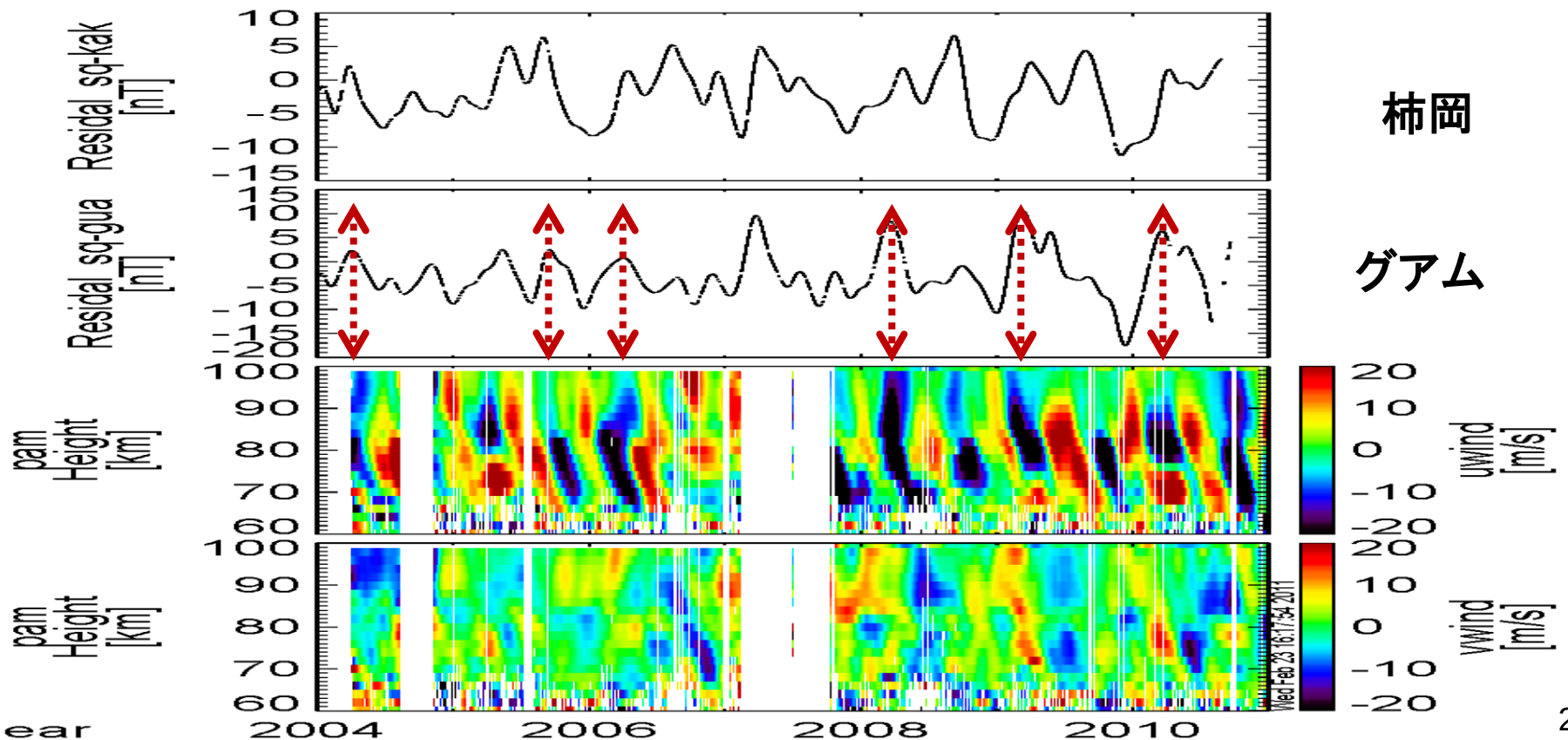
⇒詳細な解析でSq場の変動に見受けられるか？



[Baldwin et al., RG, 2001]

6. 今後の展開と方針

1. 使用できる全ての地磁気観測点のデータを用い、全球的なSq振幅の年変動の傾向を明らかにする。
2. 電離圏電気伝導度との比較から、**地球環境変動に伴う超高層大気の変動成分を明らかにする**
3. **熱圏風との比較解析やSqの短期変動の機構も明らかにする**



1. はじめに

1.1 地磁気変動の要因とその種類

(1) 地球内部の核の対流運動(地球内部電磁気学)

永年変化、地球磁場減少、地磁気逆転

(2) 太陽活動との関わり(超高層大気物理学、宇宙気候学)

○太陽放射: 電磁波

(中性大気の電離、大気潮汐、地磁気日変化)

⇒太陽活動周期と超高層大気変動

○太陽風: 物質

(磁気嵐・オーロラ活動)

⇒太陽自転周期、11年活動周期との関連性

(3) 地殻の活動(地震学・火山物理学、地球物質科学)

火山・地震活動との関連性

プレートテクトニクス

1. はじめに

1.1 地磁気変動の要因とその種類

(2) 太陽活動との関わり

○太陽放射を駆動源とする地磁気変動

擾乱の少ない磁氣的静穏時の地磁気変化:

Sq (Geomagnetic Solar daily Quiet variation)

発生要因:

電離圏高度の中性風が荷電粒子を磁場を横切った方向に引きずることで駆動される電離圏電流

Stewart[1883]:

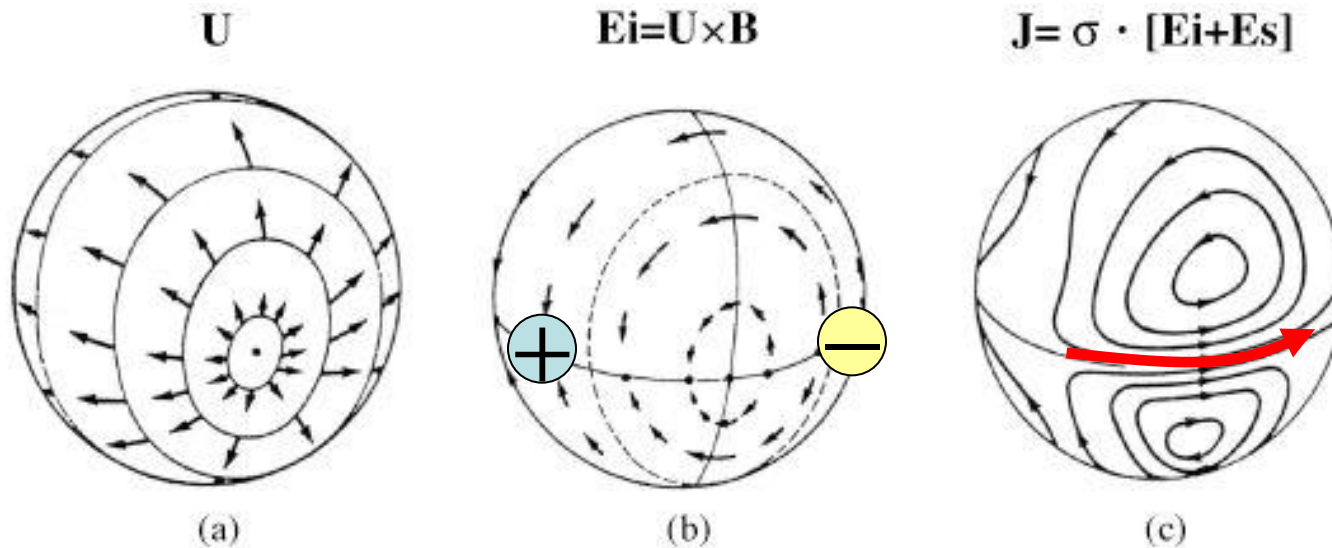
地磁気変動の原因は地球の超高層大気を流れる電流であるという仮説を提唱

Chapman and Bartels[1940]:

数学的に完全な電離層ダイナモ理論体系の構築

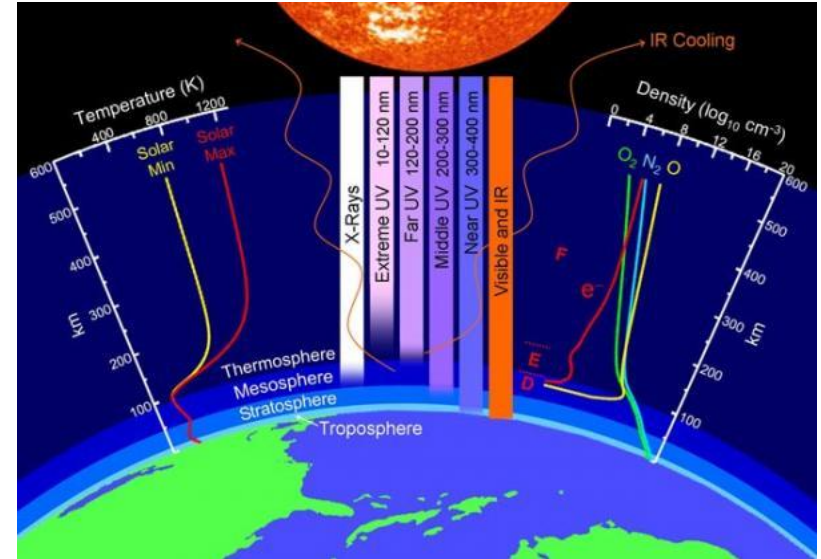
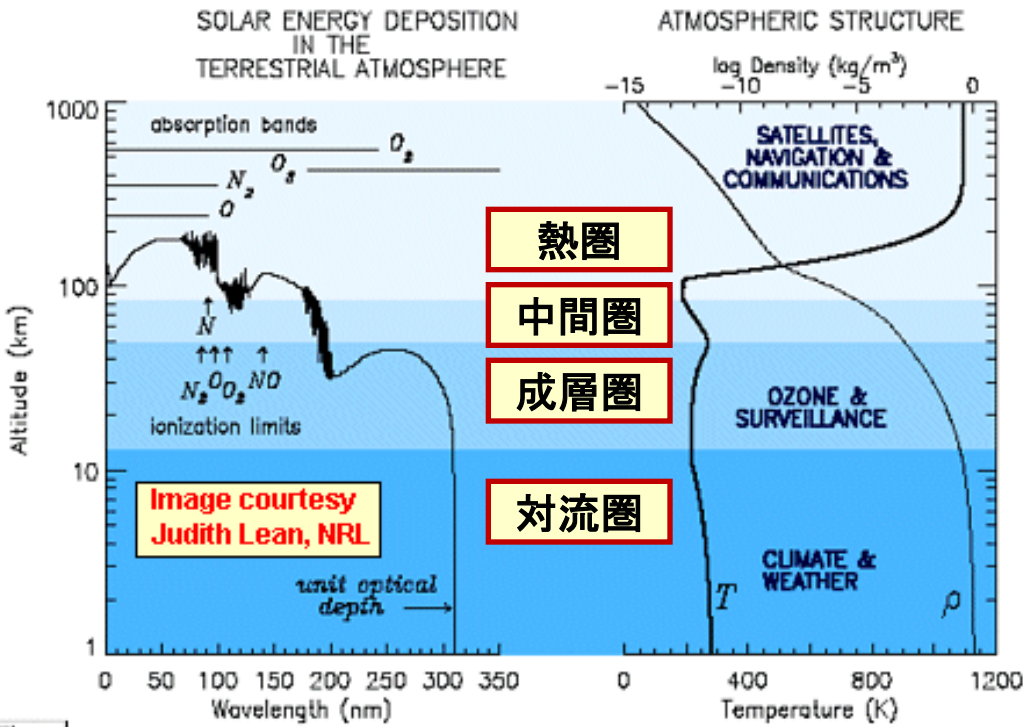
1.2 地磁気静穏日変動の要因

(2) Sq変動のメカニズム



- (1) 電離圏高度の中性大気の大気潮汐運動 U が太陽放射等で駆動(a)。
- (2) この運動に伴い電離圏の荷電粒子が地球磁場 B を横切る動き U によって、誘導起電力 E_i が発生(b)。
- (3) E_i による電荷の移動により、朝側に正電荷、夕方側に負電荷が蓄積され、分極電場 E_s が発生(c)。
- (4) その結果、電離圏内にオームの法則に従う電流 J が流れる(c)。

5.2 今サイクルの極小期のSq振幅が小さい理由-2



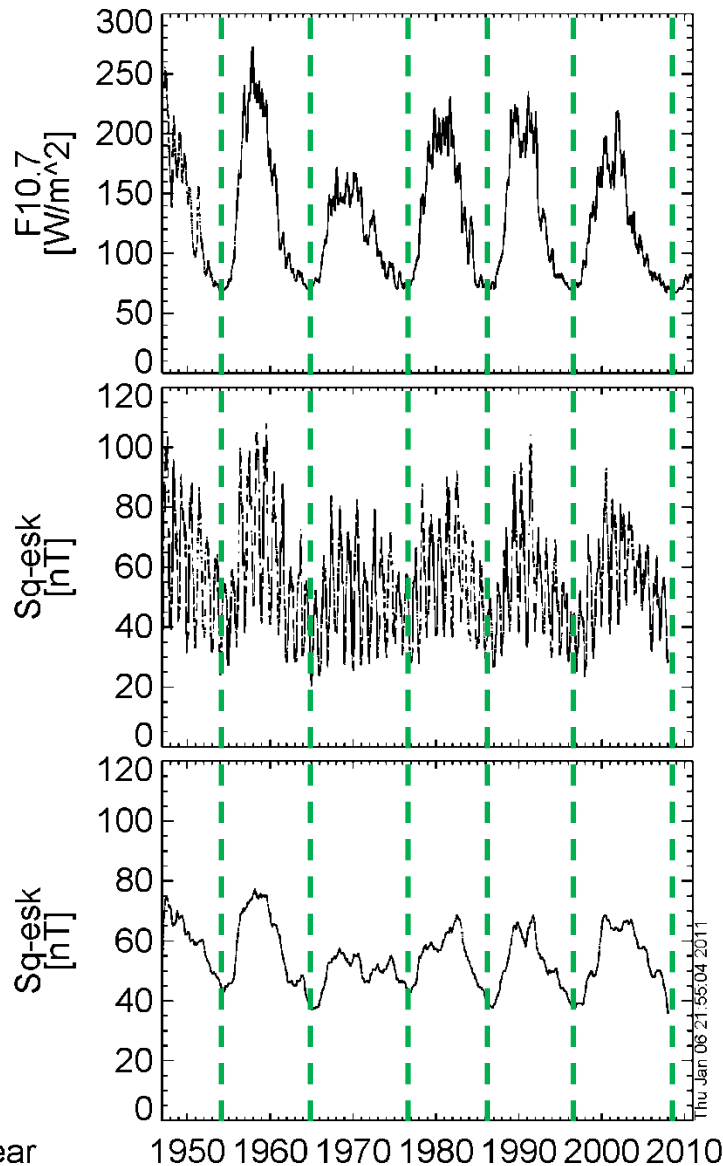
熱圏・電離圏大気の変動に関係する波長領域

E領域: 90-150 nm (NO , O , O_2)

F領域: 100 nm以下(H , He , O)

種	電離		解離	
	Vp(eV)	$\lambda(\text{nm})$	Vp(eV)	$\lambda(\text{nm})$
N_2	15.58	79.6		
O_2	12.08	102.6	9.76	127
O	13.61	91.1	5.12	242.2
N	14.54	85.3		
NO	9.25	134		
H	13.59	91.2	6.51	190.5
He	24.58	50.4		

4.1 地磁気日変化の長期変化(太陽活動との比較)



上段: 太陽F10.7フラックス

(90日移動平均)

中段: Sq場の振幅(90日移動平均)

下段: Sq場の振幅(1年移動平均)

地磁気観測点: ESK (55.32N, 356.80E)

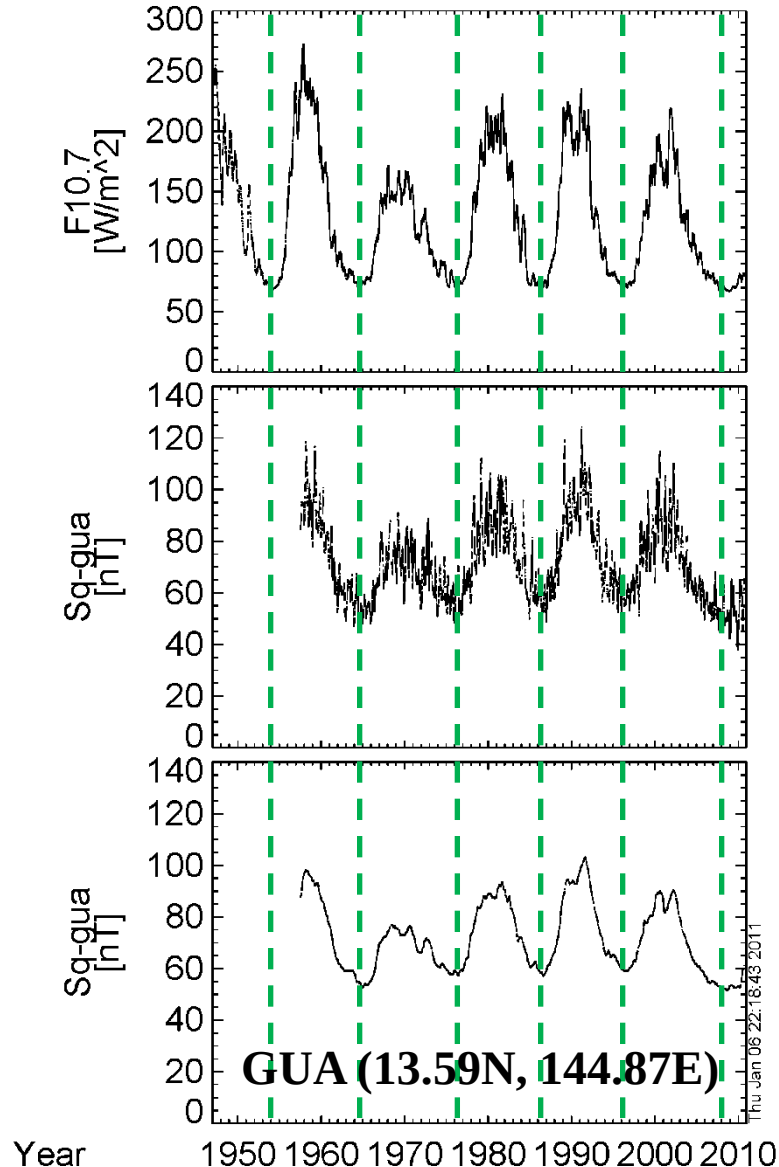
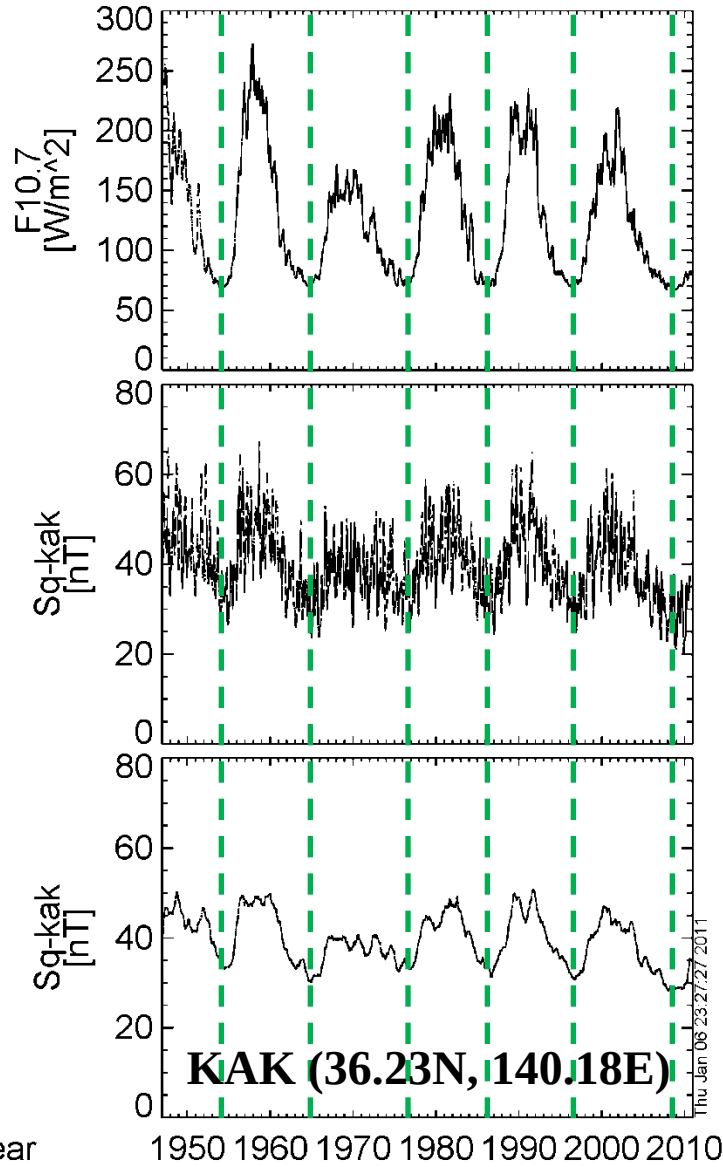
○太陽活動11年周期をもつF10.7フラックスの変化に呼応してSq場の振幅が変化する

(太陽側の変動が原因)

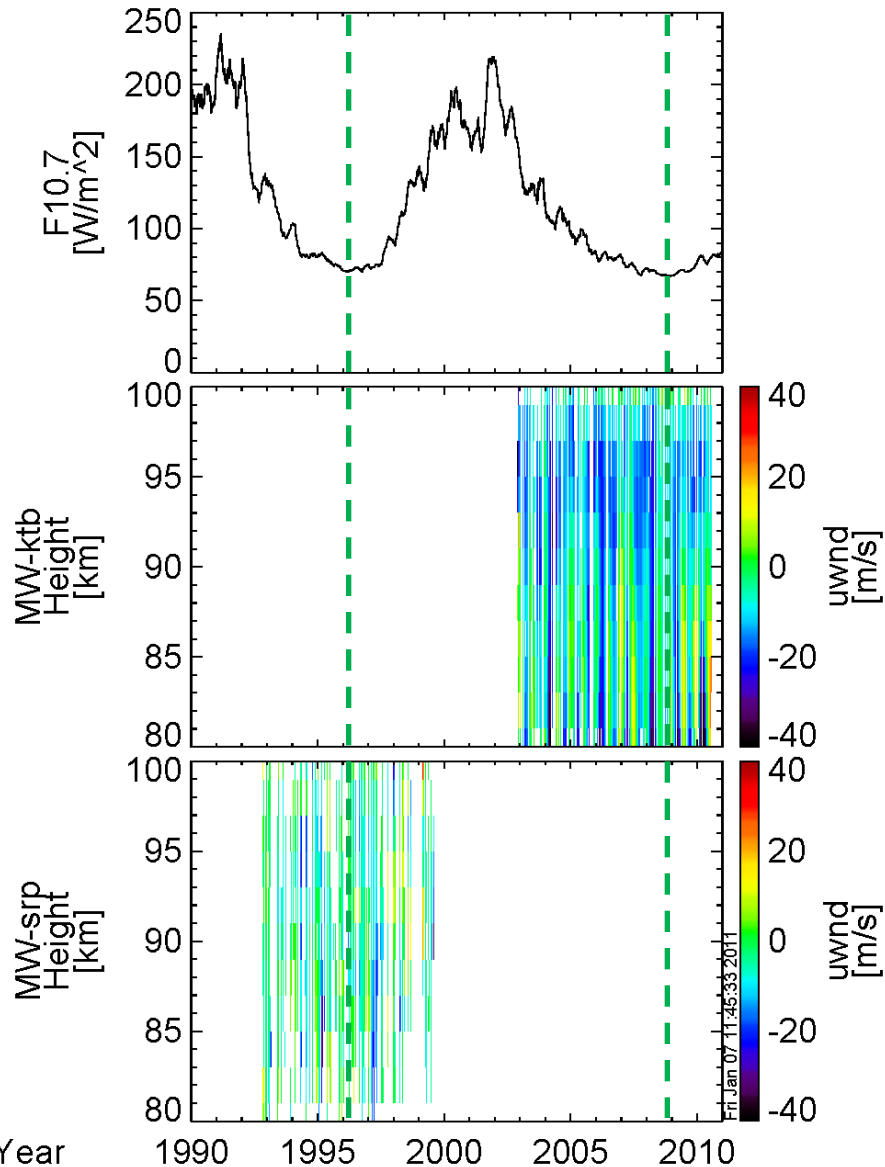
○中段パネルでSq場の振幅変動の周期が短い変動は、季節変化である

(地球側の変動が原因)

4.1 地磁気日変化の長期変化(太陽活動との比較)



4.5 太陽活動22、23周期の極小期の熱圏風速とSq振幅の違い



上段: 太陽F10.7フラックス

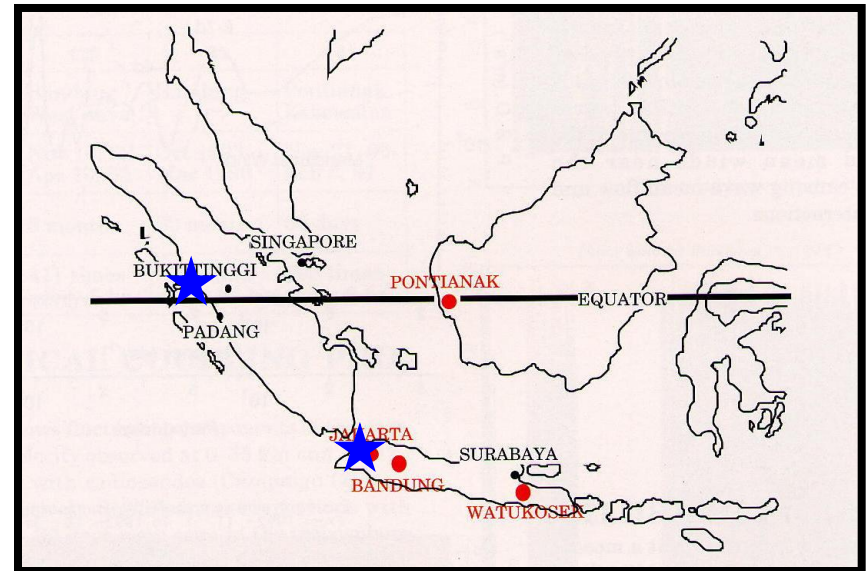
中段: 熱圏東西風

スルポン(6.40S, 106.70E)

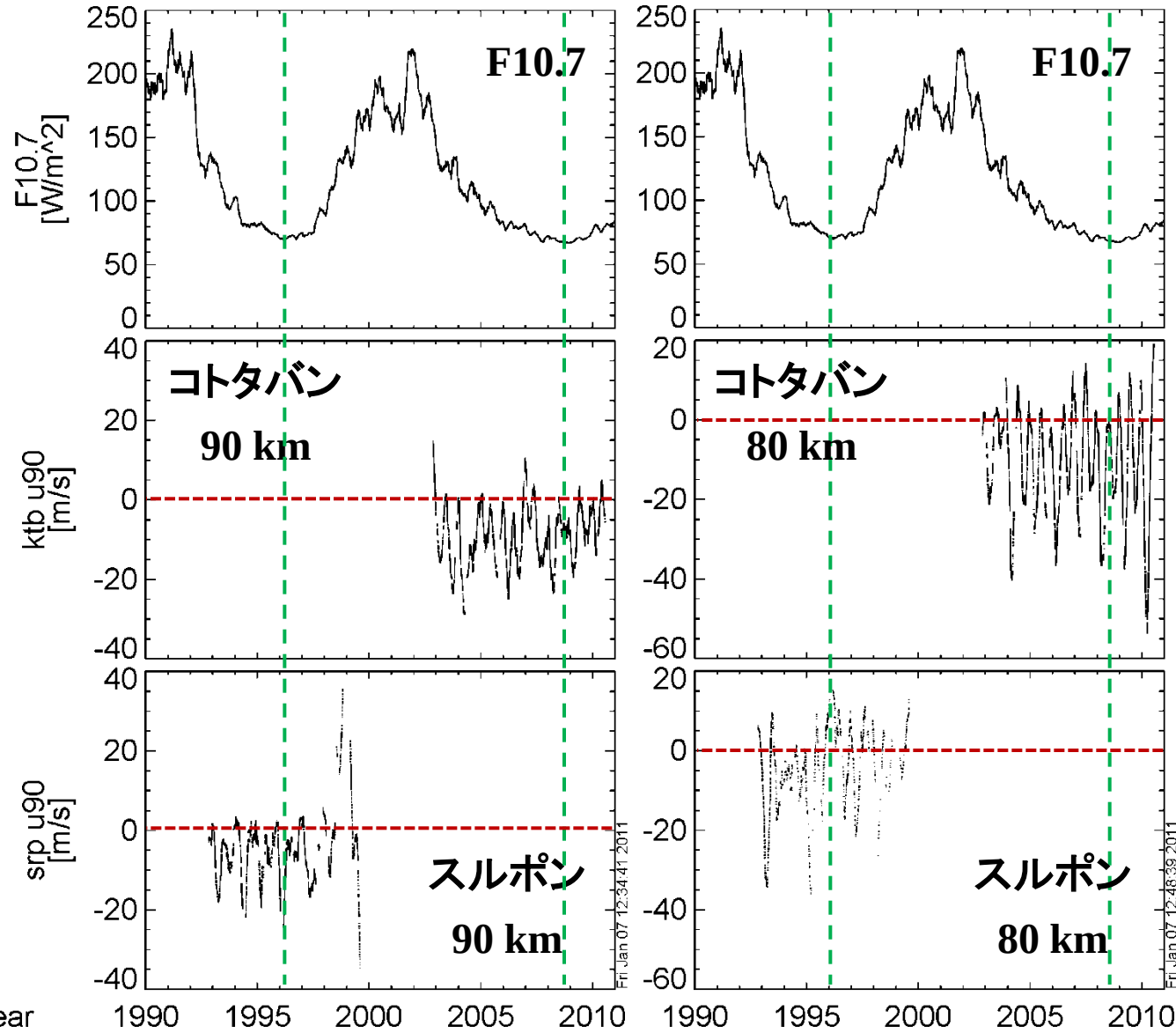
下段: 熱圏東西風

コタババン(0.20S, 100.34E)

※90日の移動平均値

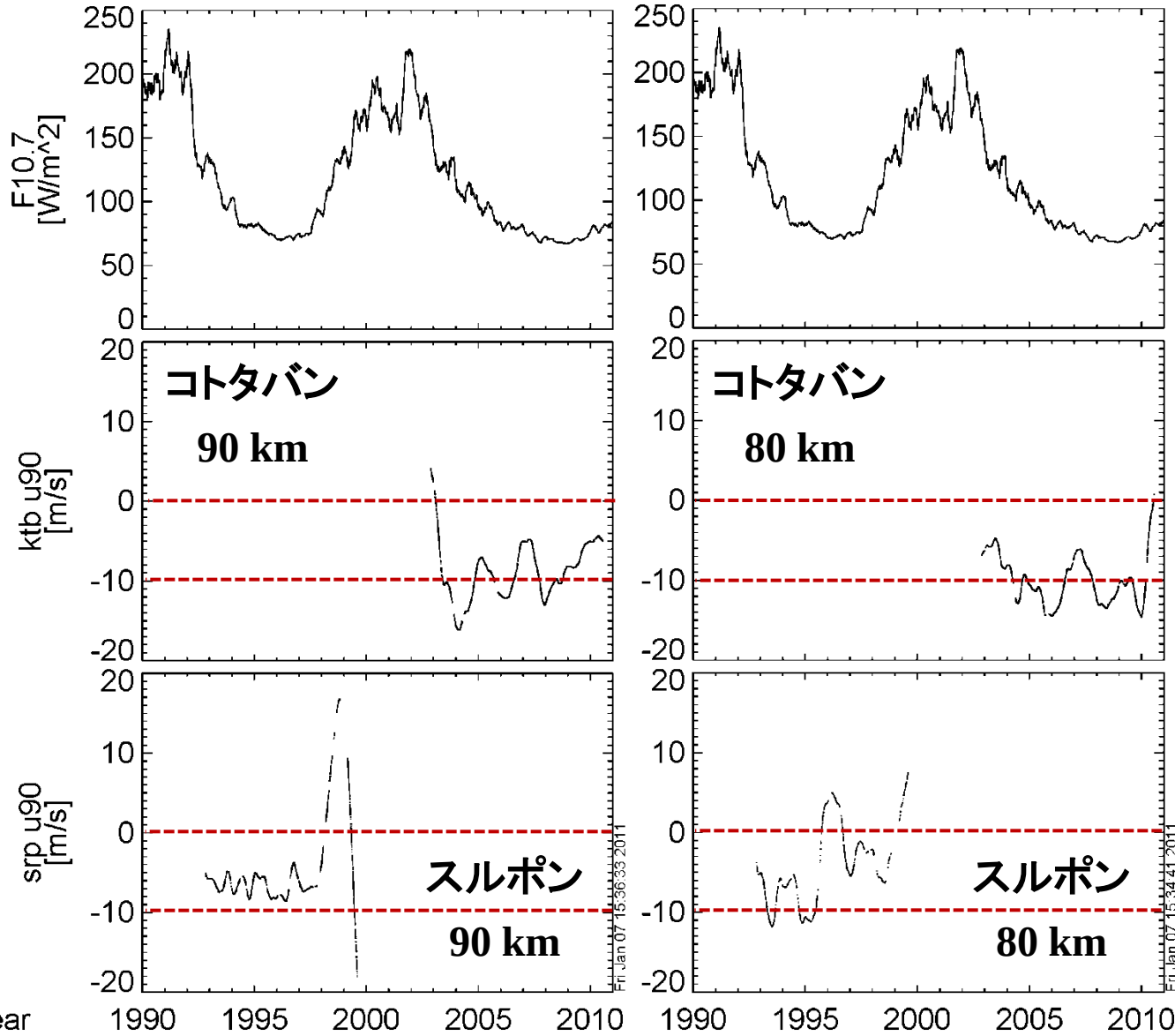


4.5 太陽活動22、23周期の極小期の熱圏風速とSq振幅の違い



SAOの存在
(地球側の変動)
太陽活動22、23サイクルとでは、あまり顕著な違いが見られない

4.5 太陽活動22、23周期の極小期の熱圏風速とSq振幅の違い



コタババンとスルポンの東西風にオフセットが存在

5-7 m/s程度

測器の違いの問題

太陽活動の影響?

5.1 今サイクルの極小期のSq振幅が小さい理由-1

○Sq場の振幅←電離圏電流の大きさ

←電離圏電気伝導度＋地球磁場強度＋風速

$$\mathbf{J} = \sum \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

○電離圏電気伝導度←地球磁場強度＋太陽放射

$$\begin{aligned} \Sigma_P &= \int_{h_1}^{h_2} \left[\frac{n_e}{m_e v_{ne}} \frac{v_{ne}^2}{v_{ne}^2 + \Omega_e^2} + \frac{n_i}{m_i v_{ni}} \frac{v_{ni}^2}{v_{ni}^2 + \Omega_i^2} \right] e^2 dh \\ \Sigma_H &= \int_{h_1}^{h_2} \left[\frac{n_e}{m_e v_{ne}} \frac{v_{ne} \Omega_e}{v_{ne}^2 + \Omega_e^2} + \frac{n_i}{m_i v_{ni}} \frac{v_{ni} \Omega_i}{v_{ni}^2 + \Omega_i^2} \right] e^2 dh \end{aligned}$$

 Ω ←磁場強度に比例、イオン種に反比例 v ←中性大気密度に比例(スケールハイトに関係) n_e, n_i ←太陽放射強度に比例

5.5 今サイクルの極小期のSq振幅が小さい理由-5

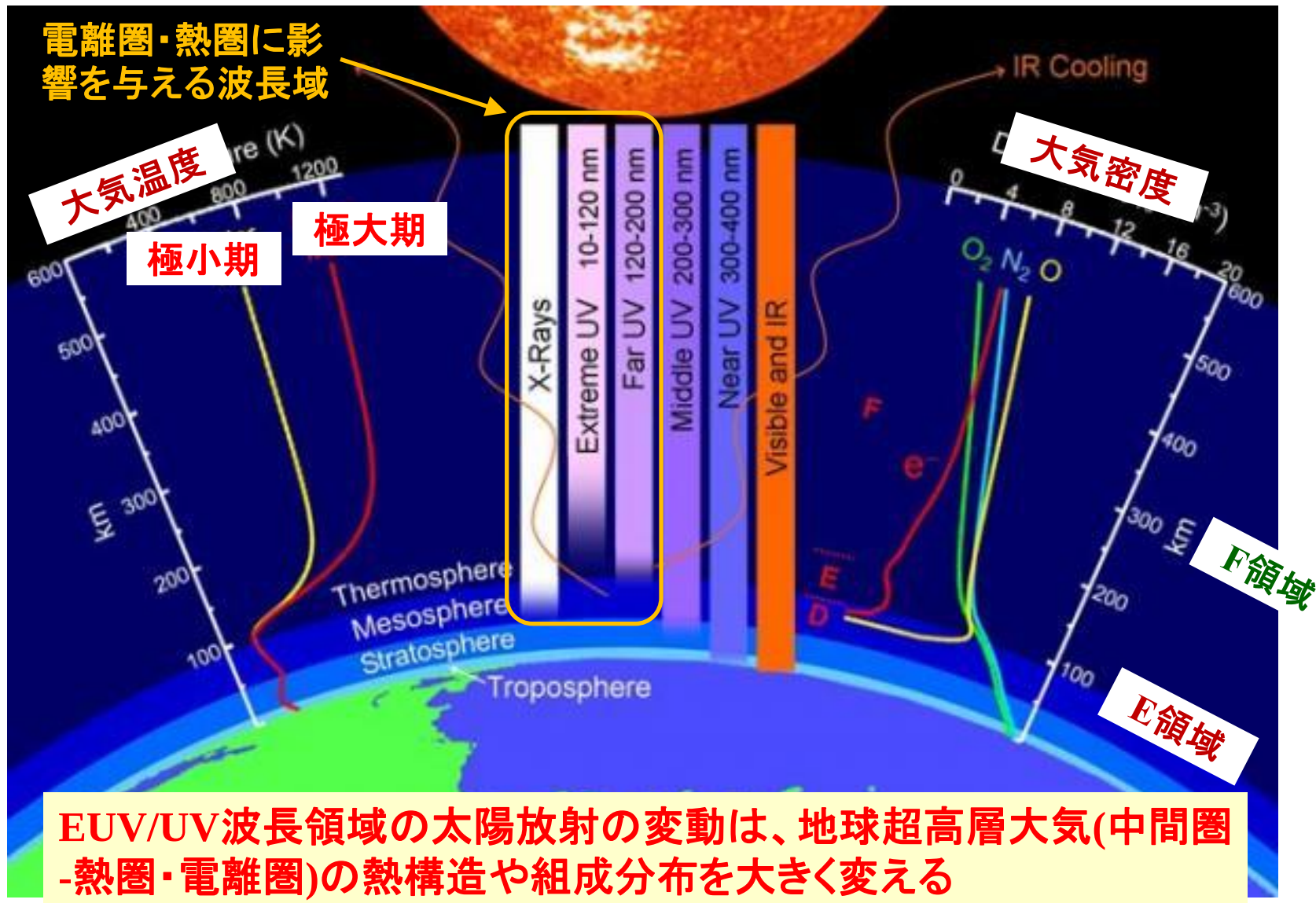
23周期の極小期は、熱圏大気の電離やその密度分布を決める**太陽EUV/UV(150nm以下)フラックスが前サイクルのものよりも低く、かつ、低調な期間が長い**ために、地球大気に降り注ぐ放射エネルギーがかなり低いことが特徴である



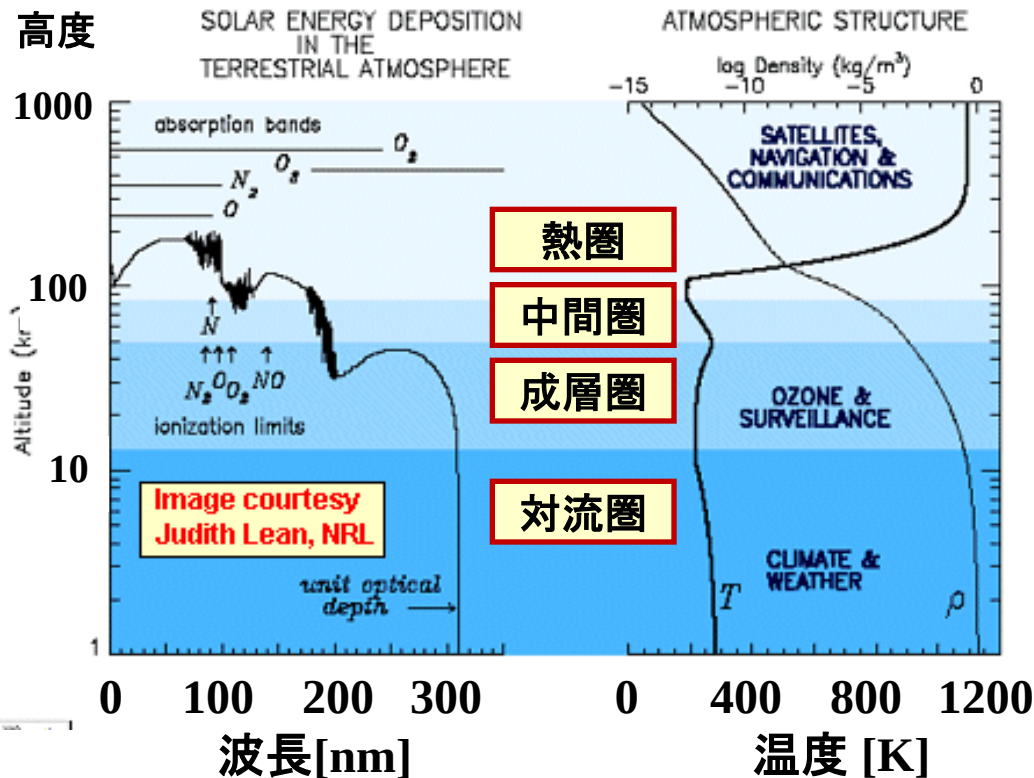
電離圏の電子密度が低くなるばかりか、中性大気密度が減少するため、電離圏電気伝導度が減少し、電離圏電流が流れにくくなる
⇒**電子密度と衝突周波数の両方が減少する方向に変化**
その結果、Sq場の振幅が減少する
ただし、**熱圏大気の温度分布が変化するため、大気の循環が変化し、Sqの起電力(UXB)に影響がでる可能性もある**

1. はじめに

1.2 太陽放射と地球の大気構造



1.3 熱圏・電離圏大気の変動に関する波長領域



種	電離		解離	
	Vp(eV)	λ (nm)	Vp(eV)	λ (nm)
N_2	15.58	79.6	9.76	127
O_2	12.08	102.6	5.12	242.2
O	13.61	91.1		
N	14.54	85.3		
NO	9.25	134	6.51	190.5
H	13.59	91.2		
He	24.58	50.4		

E領域(高度=90-130 km): 90-150 nm (NO , O , O_2)

F領域(高度=130 -1000 km): 100 nm以下(H , He , O)

1.4 各種の波長領域の太陽活動による変化の割合

TABLE 1. Coupling Between the Sun's Radiative Output and the Terrestrial Environment

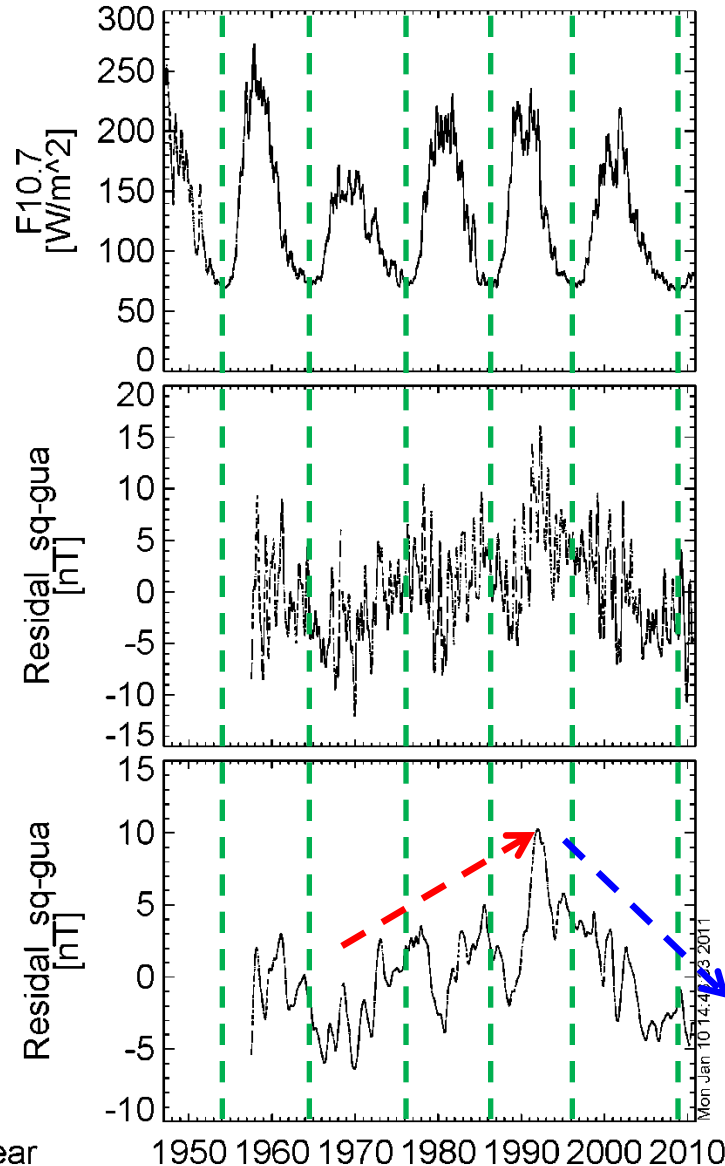
Lean, RG, 1991

<i>Spectral Band</i>	<i>Solar Source Region</i>	<i>11-Year Cycle Variation</i>	<i>Terrestrial Absorption Region</i>	<i>Absorbers</i>
X rays, <10 nm	corona	10× to 1000×	mesosphere	O ₂ , N ₂ , O
<u>10–120 nm</u>	corona, transition region, chromosphere	<u>2× to 10×</u>	thermosphere, 150–300 km	O ₂ , N ₂ , O, N
<u>Ly α, 121.6 nm</u>	upper–middle chromosphere	<u>2×</u>	mesosphere, 60–100 km	O ₂ , H ₂ O, NO, CH ₄ , CO ₂
<u>125–175 nm</u>	chromosphere temperature minimum	<u>50%</u>	thermosphere, 100–160 km	O ₂ /SRC
175–205 nm	upper photosphere	15%	stratosphere, 20–80 km	O ₂ /SRB, H ₂ O, HCl
205–250 nm	photosphere	4%	stratosphere	O ₂ , O ₃ , HCl, CFCs
250–300 nm	photosphere	0.5%	stratosphere, troposphere	O ₃ , H ₂ O ₂ , NO ₂ , ClONO ₂ , HOCl, HNO ₃
300–400 nm	photosphere	0.1%	troposphere, 0–15 km	same as 250–300 nm band
Total: 48% at 400–800 nm	photosphere	0.08%	troposphere, surface, ocean	O ₃ , H ₂ O, CO ₂

120 nm以下の波長域:太陽活動11年周期で2-10倍以上も変化

125-175 nmの波長域:太陽活動11年周期で50%程度の変化

4.3 地磁気日変化の長期変化(太陽活動11年周期成分を除去)



上段: 太陽F10.7フラックス

(90日移動平均)

中段: Sq場の振幅(90日移動平均)

下段: Sq場の振幅(1年移動平均)

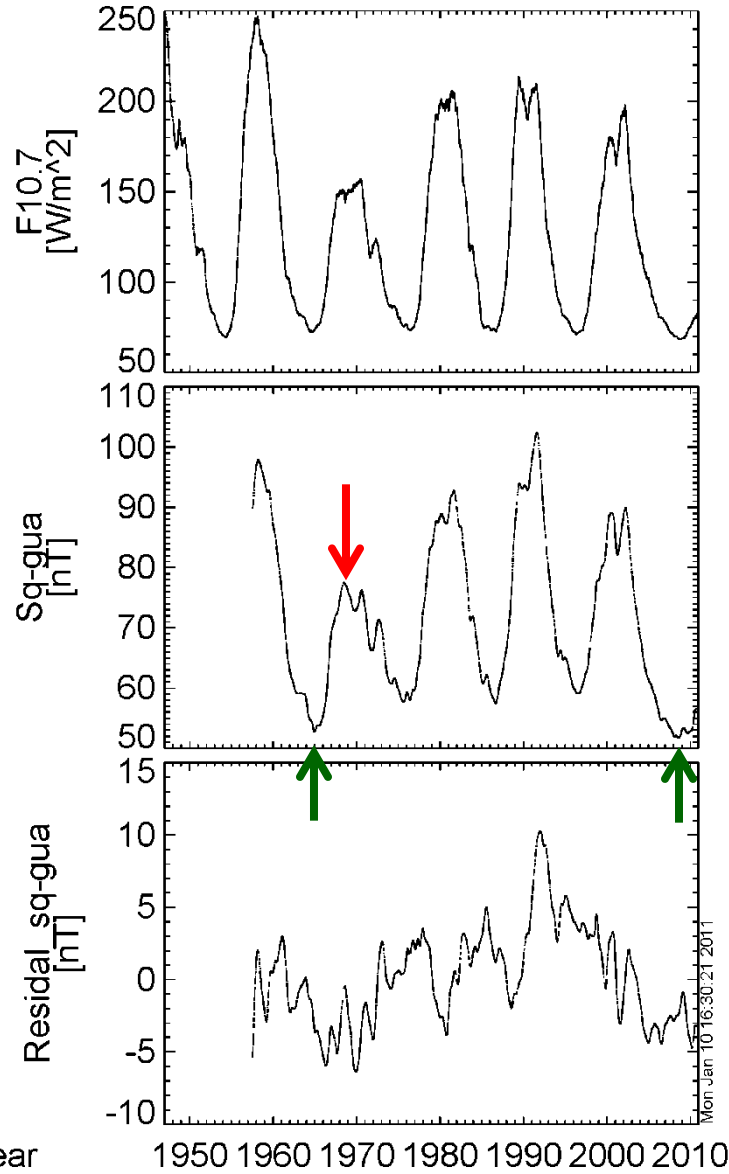
地磁気観測点: GUA (13.59N, 144.87E)

○太陽活動11年周期を抜き去ったSq場の振幅の長期変動には以下の特徴が見られる

1. 1970-1990年: **増加傾向**

2. 1990-2010年: **減少傾向**

5.2 太陽活動23周期の極小期のSq場の振幅は最小か？



Sq振幅が最小となる日時とF10.7フラックス

	F10.7 [W/m^2]	Sq振幅 [nT]	極大期のSq 振幅 [nT]
19周期	73.84	52.79	97.44
20周期	75.58	57.85	77.19
21周期	75.58	57.33	92.37
22周期	72.67	59.07	102.50
23周期	68.60	51.74	89.00

○太陽活動23周期の極小期のSq場の振幅は、ここ60年間の中で最も最小

○太陽極小期で、Sq場の振幅が比較的に小さくなる場合、次期極大期のSq場の振幅は、小さい傾向にある??

○F10.7以外の波長域を調べる必要あり。

1. 使用できる全ての地磁気観測点のデータを用い、全球的なSq振幅の年変動の傾向を明らかにする。
2. 電離圏電気伝導度と用いて、地磁気永年変化に伴う電離圏伝導度の増加の寄与を取り除いて、それ以外の成分を抽出し、**地球環境変動に伴う超高層大気の変動成分を明らかにする**
3. 熱圏風との比較解析やSqの短期変動の機構も明らかにする

