

東南アジア VLF 観測網による下部電離圏トウィーク反射高度観測計画

大矢 浩代（千葉大学・大学院工学研究科）

足立 透（京都大学・生存圏研究所）

土屋 史紀，高橋 幸弘（東北大学・大学院理学研究科）

1. はじめに

本計画では，東南アジアのD領域電離圏の夜間電子密度変動を明らかにすることを目的として，トウィーク空電を観測し，反射高度および水平伝搬距離を推定する。トウィークの反射高度での電子密度は $20\text{--}28\text{ cm}^{-3}$ であり，D領域での電子密度の増加は反射高度の低下に対応し，逆に電子密度の減少は反射高度の上昇に対応する。夜間D領域の主な電離源は，磁気圏からの高エネルギー粒子の降りこみといわれているが，低緯度に関してはほとんど明らかになっていない。トウィーク反射高度変動はその高エネルギー粒子の降りこみのモニターとなりうることが期待できる。また，3 地点以上のトウィークの水平伝搬距離から，その発生源である雷の位置を推定でき，雷分布図作成に貢献できる。

トウィーク空電とは，雷放電を発生源とし，地球-電離圏導波管内を長距離伝搬（ $\sim 5000\text{ km}$ ）する VLF/ELF 帯自然電磁波である（図 1）。その継続時間は，約 $\sim 50\text{ ms}$ で

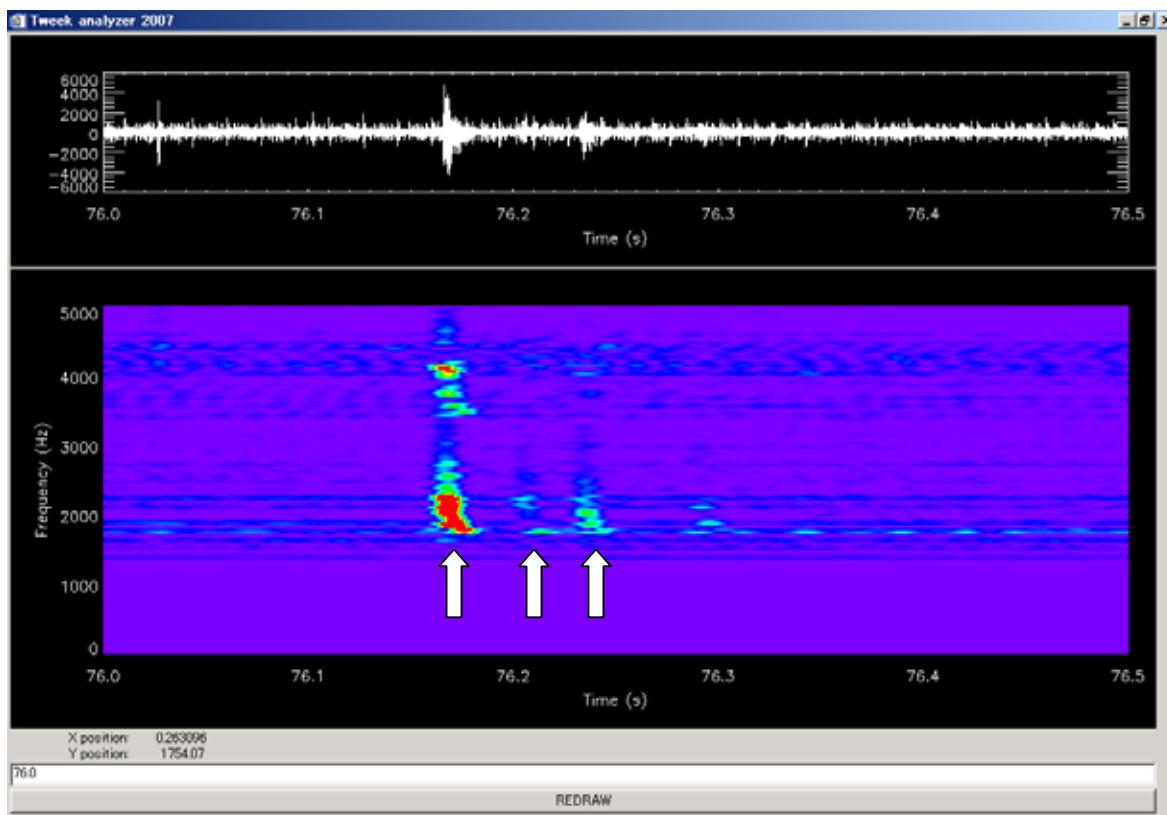


図 1 2008 年 1 月 13 日 16:51:16 UT (00:51:16 LT) に台湾で観測されたトウィーク空電の波形 (上)およびダイナミック・スペクトル(下)。サンプリング周波数は 20 kHz, window 幅は 25.6 ms で，1 点ずつずらしながら FFT を行っている。

あり，その短い間に周波数は 10 kHz から約 2 kHz まで急激に減少する。ダイナミック・スペクトル上では，周波数が低くなるほど伝搬時間が長くなるという特徴的な周波数-時間分散性が見られる。受信頻度は地磁気活動度依存性を持ち，活発なときは受信数が増え，静穏になると少なくなり，平均すると 1 分間に約 100 個である。昼間は下部電離層での吸収が大きいため，トウィークは観測されず，また日本の夏季は夜間であっても観測できない。その理由は，スプラディック E 層のため，昼間と同様に吸収が大きくなるためである。

2. トウィーク空電の推定方法

球面地球 - 電離圏導波管モデル (図 2) を用いると，トウィークの周波数 - 時間分散性 $f(T_g)$ は，

$$f(T_g) = \frac{T_g f_c}{\left(1 - \frac{c}{2af_c}\right) \sqrt{T_g^2 - \left(\frac{d}{c}\right)^2}} \quad (1)$$

で表すことができる。ここで， T_g は伝搬時間¹， f_c は 1 次モードのカットオフ周波数， c は光速， a は地球半径，および d は水平伝搬距離である。この式で， f_c および d を最小二乗法でFFTによって求めたダイナミック・スペクトルにフィッティングして推定している。

1 次モードのカットオフ周波数 f_c から，トウィークの反射高度 h を求めることができる。

$$h = \frac{c}{2f_c} \quad (2)$$

この h は，言い換えると導波管の高さに相当する。

サンプリング周波数は 20 kHz, FFT 周波数分解能は $\pm$ 約 40Hz, 推定精度は h は 1700 Hz 付近で $\pm$ 2.0 km, d は $\pm$ 945 km である。この推定精度は不確定性原理のため，FFT の分解能の限界であり，現在 d の推定精度を上げるため，推定方法を検討中である。

¹雷発生時間から各周波数が到達するまでの時間，ここでは計算の簡単化のために，雷発生時刻からトウィークが最初に到達した周波数までの時間を T_{g0} とし，次のデータ点 $t_1 = T_{g0} +$ サンプリング間隔， $t_2 = T_{g0} +$ サンプリング間隔 $\times 2$ ，...としている。

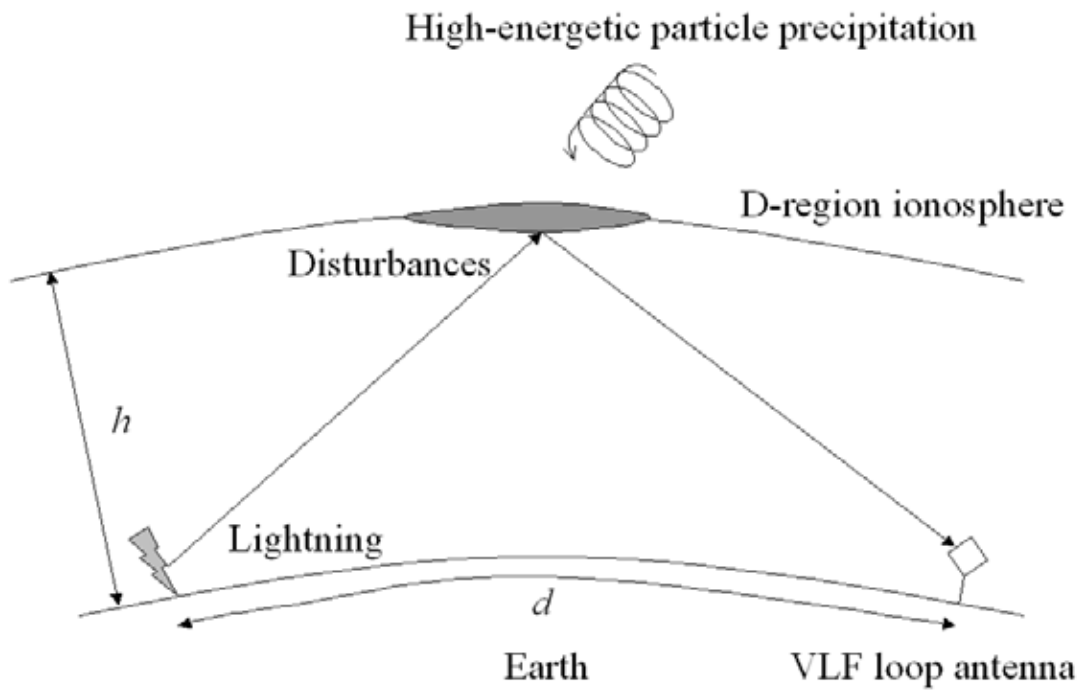


図 2 球面地球 - 電離圏導波管モデル。高エネルギー粒子の降りこみによって、下部電離圏は電子密度の擾乱を受け、その下を伝搬するトウィーク空電のカットオフ周波数に高感度で反映される。

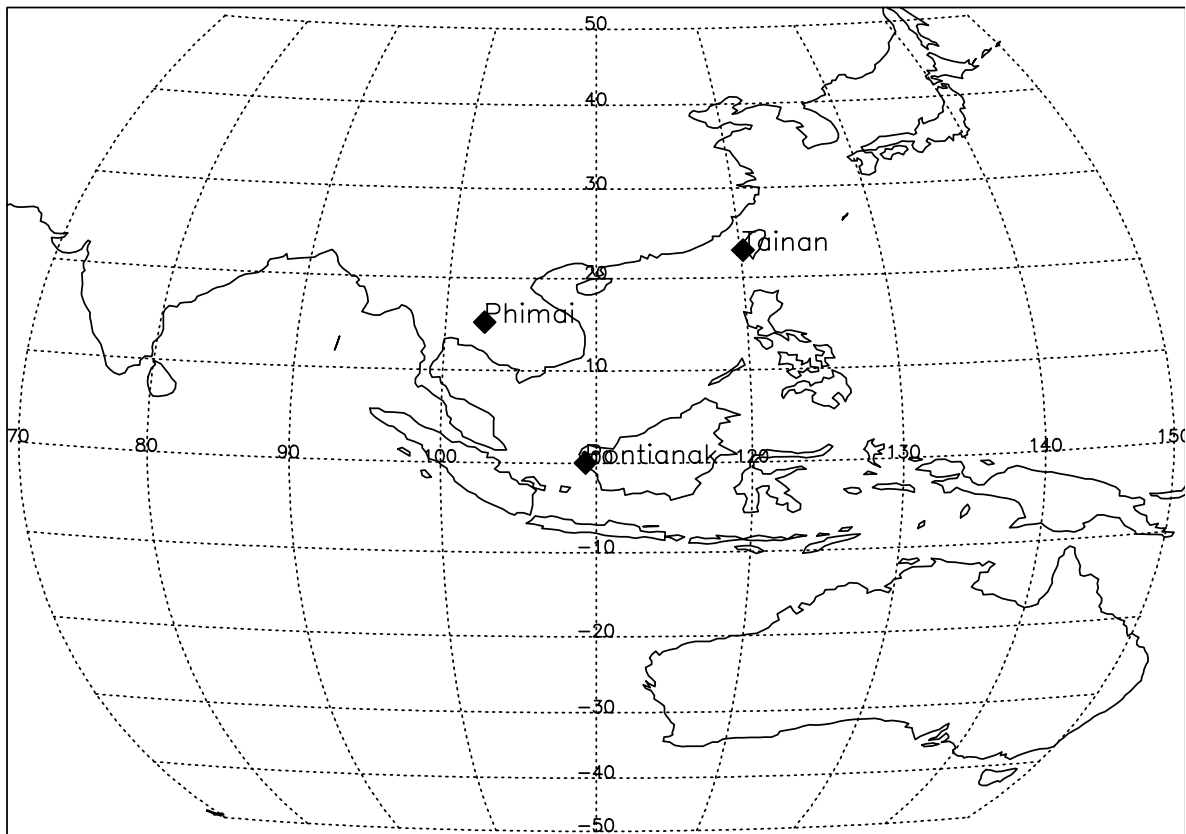


図 3 東南アジア VLF 観測網の観測地点

3. トウィーク観測概要

図 3 に、トウィーク観測地点を示す。台南(23.0°N , 120.2°E) は 2007 年 12 月に仮設置が終了し、現在テスト観測を行っている。2008 年 6 月 Phimai(15.2°N , 102.6°E)に、2008 年 7 月に Pontianak(0.03°N , 109.3°E)に観測機器を設置する予定である。

図 4 に、VLF 直交ループアンテナの外観図を示す。1 辺約 1 m の四角形で、トウィーク用 PC では、夜間のみ磁場 2 成分（東西および南北）を 10 分おきに 2 分間ずつデータ取得する。アンテナ・ケーブルは巻き数 30 回で、実効高は 0.126 cm (2 kHz)である。アンテナの近くにプリアンプ、観測小屋にメインアンプを置き、信号を増幅させる。ローパスフィルターをかけ、10 kHz 以下の周波数のみを取得する。

4. まとめ

本講演では、東南アジア VLF 観測網構築計画の中のトウィーク空電観測を紹介した。トウィークの反射高度変動を推定することによって、放射線帯内帯からの高エネルギー粒子の降りこみのモニターにつながることを期待できる。また、伝搬距離の推定から、雷分布図作成にも貢献できると思われる。



図 4 VLF 直交ループアンテナ外観