

電離層を伝える地震波

地表面変位による電離層擾乱の観測

宇宙測地学研究室 4年 佐藤 真悠

1:地震は地面だけでなく超高層大気まで揺らしている

最近の研究では地表面(海面)の変位が電離層を引き起こしていることが観測されている
 ○その原因としては、地震や火山の噴火、津波など様々
 ○非常に小さな変位も、大気中を伝播する間にその振幅は増幅される
 ○GPS技術やドップラーサウンディングなど、様々な方法で観測可能
 ○擾乱が電離層を伝播する様子は、まるで地震波そのものが電離層を伝わっているかのように見える
 現在まで研究されていることに目を向けながら、2003年9月26日に起きた十勝沖地震2003(M8.0)、2004年12月26日のスマトラ島沖地震(M9.0)において、GPSネットワークによる電離層擾乱の様子の観測を行った。

2:観測の様々な方法と結果

①GPS衛星によるTEC(Total Electron Content)の観測

②ドップラーサウンディング法 など

①TEC観測

GPS衛星はGPS受信機に向けて2つの異なる周波数の電波を送っている。分散的な媒質である電離層の特徴を生かし、2つの周波数がそれぞれ異なる遅延より、衛星と受信機の全電子数TEC(Total electron content)の値を計算する方法。広い観測域を持つ、M7.5以上の地震などで観測可能
 観測例:1996/8 Black-Thunder炭鉱の爆発によるTEC観測(Fig2-1)
 2001/6/23 ペルー地震が引き起こした津波による重力波のTEC擾乱観測(Fig2-2)

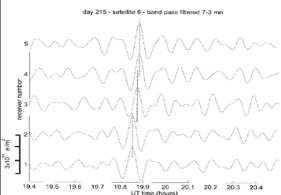


Fig2-1 E,Calais et al(1998)より

Fig2-1 横軸に時間、縦軸はGPS受信機の種類を表して、下の方ほど、その※SIPと震央からの距離が近くなる。このグラフの振幅の最大から、伝播の到達速度を求めると、1.2km/sとなった。地震よりも規模の小さい爆発だが、浅い位置での爆発であったため、TECの変化を観測することができた。

※SIP(Sub-Ionospheric Point) GPS衛星と受信機を結んだ直線が地上350km地点と交わるポイントを地上に投影した点。350km点は、電離層でも電子密度が高くなっている点

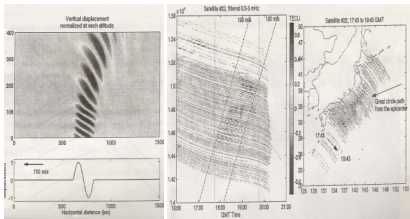


Fig2-2

Fig2-2 左図は、津波によって引き起こされた大気の擾乱の断面図。下が伝播する津波を表している。中央の縦横軸に時間、縦軸に震央からSIPまでの距離、色によってTECの変化を表したグラフ。右図は中央のグラフを日本地図に投影したもの。これから計算された電離層伝播速度は1.5-2.5km/s

②ドップラーサウンディング法

電波送信局から上空へ向けて2つの異なる周波数の電波を飛ばし、送信局によってそれをうける。そのドップラー遅延を計算することで低電離層の状態を調べる。地面での計測なので同時に表面波を直接測ることができ、比較しやすい。TEC法より低い電離層を観測するため、M6.5以上の地震で観測可能

観測例:1999/9/20 Chi-Chi地震(M7.6)による電離層擾乱伝播の観測(Fig2-3)

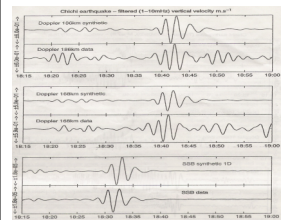


Fig2-3 J.Artru et al(2004)による

Fig2-3 1-50MHzのブロードバンドシグナルに1-100MHzのバンドパスフィルターをかけたもの。横軸が時間、縦軸が震央からの距離。上の2つのグラフはそれぞれ高度168km、186kmでの観測結果で、上が計算による予測値で下が実際のデータ。一番下のグラフは、表面波の伝播の様子で、上が1-Dモデルで下の実際のデータ。計算結果と実際の値がよく一致している。レイリー波が到達してから電離層の擾乱が起きるまで約10分ほどで、これは、地表面から電離層まで音波が届く時間に相当する。

3:観測方法

観測に用いた手法:GPSネットワークによるTEC観測

- ①基準となるGPS衛星を決定するために、地震前後でのGPS衛星の軌道を計算した。札幌を基準点と考え、計算した軌道情報をプロット(Fig3-1)
- ②①で決定したGPS衛星と日本の受信局(約300)においてSIP、TECを計算
- ③実際に得られたTECの値に多項式近似を用いて長周期の変化を取り除き、時間と距離とのグラフとして表す

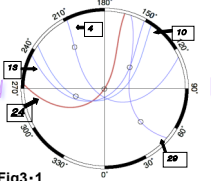


Fig3-1

Fig3-1 札幌から北を向いた状態で天頂を見上げたときに見えるGPS衛星の軌道をプロットしたもの。単位は、仰角と方位角で表しており、丸印がついているのが地震発生の時刻の衛星位置。また、各衛星についての数字は、その衛星番号を示している。この図から、24番衛星が地震時に札幌上空を飛んでいたことが分る。

4:結果

①本州と北海道にわたるTECの変化のグラフ(Fig4-1)

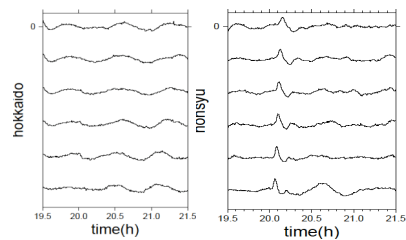


Fig4-1 横軸が時間、縦軸がTECの変化量。下の方から順に震源地から近いものとなっている。グラフ横の数字はGPS受信局の名前。左が北海道の受信局によるもので、右が本州のもの。震源地から北に位置する、北海道の受信機では、その擾乱の様子はほとんどみとれない。それに比べ本州の受信機が得たTECの値は、震源地から徐々にその擾乱が伝播している様子が見て取れる。

②多数のGPS受信局を用いた走時ダイアグラム(Fig4-2)

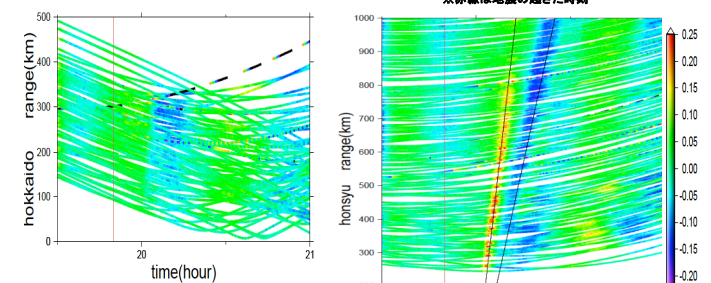


Fig4-2 横軸に時間、縦軸は震源とSIPの距離、色の変化でTECの変化を表した。赤の縦線が示しているのは地震発生の時刻。本州の変化の地点をフィットした直線が黒の直線である。左が本州、右が北海道の局を表したもの。

北海道のほうは、やはり、TECのプラスの変化はみられていない。本州のほうに注目すると、赤の変化(プラス)が顕著に現れているのがわかる。この値にフィットした直線からその群速度を求めると、約1.25km/sとなった。また、X軸切片は、約20.02となり、地表面から電離層まで音波が到達する時間(約10分)とほぼ一致する。

Fig4-3は、Fig4-1と同様の観測を2004/12/26のスマトラ島沖地震で行ったもの。横軸に時間、縦軸にTECを示した。番号は衛星を表している。中心の縦の線は、電離層内の伝播速度を1.25km/sと仮定し、計算したときの音波の到達時間。13番衛星と23番衛星ではほぼ一致している様子を見て取れる。20番衛星のようなずれは、地震による地面の変動が局地的ではないことに関係あると考えられる。TECの変化は、十勝沖のときは、最大で1TECUにも満たない変化量だったのに対し、3TECUもの変化量を見せた。

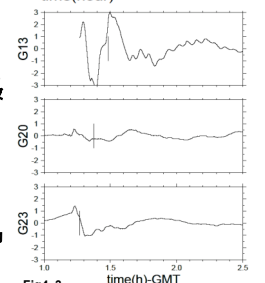


Fig4-3

5:考察

①電離層までの伝播方法について

○考えられる伝播方法

1:地表面の変位による音波・重力波が直接、上空の電離層まで伝播する

2:一度上空まで到達した波が、空気の密度によって屈折させられ、水平方向へ伝播する

1については、Fig2-3より、地面(海面)を伝播して行く波の水平伝播速度と、電離層を伝播して行く波の水平伝播速度がほぼ同じ値でことより、このことは推測される。また、Fig2-1、Fig4-2より求められた水平伝播速度1.2km/sは、音波の電離層での速度に近いことから、これも推測できる。両者の違いは、震央からの距離であり、1についてはその距離が遠いところで顕著に現れており、震央と観測点の距離が近い場合は2の伝播法の特徴を示す傾向にある。

②なぜ北に伝播しないのか

これは、地球の地磁気の影響ではないかと考えられる。北半球では地磁気は北に傾くほど垂直に近くなるので、電離層を北に伝播する波は、屈折をうけ、磁力線と垂直に交わる点が存在する。その点で、ローレンツ力の効果で電子がサイクロトロンを起し、電子の変位がなくなってしまうために、北の観測ではその擾乱が見つけられないことが考えられる。

③まとめ

地震による地表面の変位は、電離層に擾乱を与えている。震央からの距離が近いところでは、上空まで一度伝播した波が徐々に屈折し、電離層を水平方向に伝播している様子を観測することができ、その波が減衰し観測できない距離では、地表面(海面)から直接伝播した波による電離層の擾乱を観測することができる。今回の観測では、一回目の擾乱の他に、2回目の速度の違う擾乱を見ることができた。これは、電離層を波が伝播する際に生じた新たな重力波ではないかと考えることができるのではないかと。重力波は斜めに発生する性質があり、その水平速度成分は発生元の波の水平速度より多少遅くなる。その重力波の性質も当てはまる。電離層の擾乱観測は、その方法や地表面変位の原因などによって様々な兆候を示す。さらに研究を進めることで、電離層の観測が、津波の到達予報など様々な方面の研究の力になるのではないだろうか。

参考文献

E.Calais et al(1998) Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. G.J.Vol.132,191-202
 H.kanamori et al(1994) Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions. JGR.Vol.99.No.B11,21947-21061
 J.Artru et al(2004)Acoustic waves generated from seismic surface wave;propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modelling. G.J.Vol.158,1067-1077
 V.Ducic et al(2003) Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh Surface waves. GRL.Vol.30.No18,abS512A-0370