



平成24年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

超低周波音波計測を用いた 巨大津波検知の研究

首都大学東京 大学院システムデザイン研究科
情報通信システム学域
准教授 博士（工学）

大久保 寛

1. はじめに

大地震は待たなしに我々人類を襲う。地震は起こってしまったため、もうそれを巻き戻すことはできないが、地震の次に我々を襲うのは津波である。そのとき、我々にはいち早い正確な情報が重要となるだろう。

「今の地震で津波は発生したのか」「津波はいつ・どこへ・どんな規模で来るのか」

日本列島を含む太平洋沿岸のアジア諸国は火山帯（沈み込み帯）に属し、また複数のプレートの衝突領域であるため、多く地震・津波が発生する地域である。特に、海溝型の巨大地震時には巨大津波が同時に発生することがあるため、発生した津波の規模や到達時間をいかに早く国民に知らせることができるかは、社会的に非常に重要な課題と言える。

しかし、現時点で我が国やアジア諸国が有する津波検知システムが不十分であることは明らかである。2004年のスマトラ地震での津波やその数年後に起きた東北地方太平洋沖地震でさえも、発生した津波の規模・到達時間を正確に知る術はなかったのが事実であり、東日本大震災では津波により多くの犠牲者が発生し、死者数は15,000人以上にのぼっている。

“地震”と“津波”は、日本はもちろんアジア、そして世界の多くの地域において避けられない自然現象であり、これらに関する研究は古く

から盛んに行われてきている^{1)~5)}。しかしながら、津波については、大きな人的被害を引き起こすクラスの事象が頻繁に起こるわけではなく、いかに数少ない貴重な観測結果を次の防災研究に利用するかが極めて重要である。

津波に関しては、これまでも到達予測シミュレーションなどの研究は行われてきているが、現時点で、国内外を通じて津波をリアルタイムで検知する技術は全く確立されていない。

一方、津波発生に伴う極超低周波音波の観測成功事例はそれほど多くはないが、以前より、その観測結果は報告されていた⁴⁾。ただし、極超低周波音波計測を用いた津波検知システム

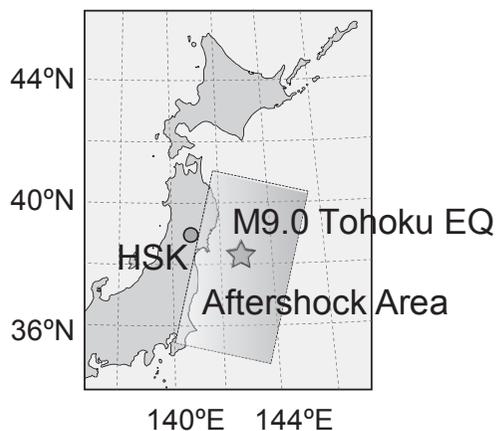


図1 東北地方太平洋沖地震と観測地点（細倉観測点：HSK）

の検討はあまり行われていないのが現状である⁶⁾。直接、海底で水圧を計測する方法も検討され始めており、これは将来有効な津波検知法となり得るだろうが、メンテナンス・初期費用が多額となるため、陸上に容易に設置できる本提案法の有効性は十分にあるだろう。

2. 観測システム

我々の研究グループでは宮城県栗原市の細倉鉱山（HSK、図1）において野外計測システムによって気圧信号の連続観測を行ってきている⁷⁾。この観測点でのサンプリング周波数は2Hzであるが、日本国内において、この観測パラメータを1Hz以上の周波数帯で観測している事例は非常に少ない。なぜなら、一般的に天気予報などに役立つための気象観測用のパラメータとして気圧を計測する場合には、数分程度の時間刻みでも十分だからである。

我々のHSK観測点は、細倉鉱山の地上と地中に整備されており、気圧の他にも、温度、湿度、イオン濃度、大気電場、加速度（地震動を検知するため）など20種類近くのパラメータを常時観測している。観測システムは鉱山内の立坑にケーブルを敷設することで、GPSによって時刻同期されており、また、停電に備え無停電電源装置（UPS）を装備している。

鉱山内は隔離されているため、外来の観測雑音が非常に少なく、極めて良好な観測環境とい

える。また、この鉱山はすでに操業は停止されており、坑道は鉱山管理のために整備されているが、廃鉱山の再利用という側面からも、鉱山における観測はとても有益な組み合わせと言えるだろう⁸⁾。

3. 東北地方太平洋沖地震時の津波によって発生した極超低周波音波の観測結果

図2に東北地方太平洋沖地震発生前後の観測結果を示す。同図は、地震発生前後の2011年3月10日から12日（JST）の気圧変化を示している。東北地方太平洋沖地震発生時には、地震発生とともに電力供給は一時停止したが、UPSと細倉金属鉱業株式会社が有する自家発電装置によって、地震発生後も継続してデータを観測することに成功した。東北地方太平洋沖地震の震源近くにおいて、停電の影響を受けずに、地震の前後で継続して観測されたデータは非常に貴重といえるだろう。

続いて、図3に2011年3月11日14:30から15:30に細倉観測地点において観測された信号波形を示す。ただし、上段が加速度、下段が気圧変化である。地震発生（14:46.18JST）の10から20分後に東北地方太平洋沖地震時の津波によって発生した10分周期程度の極超低周波音波が観測されているのがわかる。この時刻はすでに地震波による振動は存在しないので、センサーの振動によって信号が生じた可能性はない。

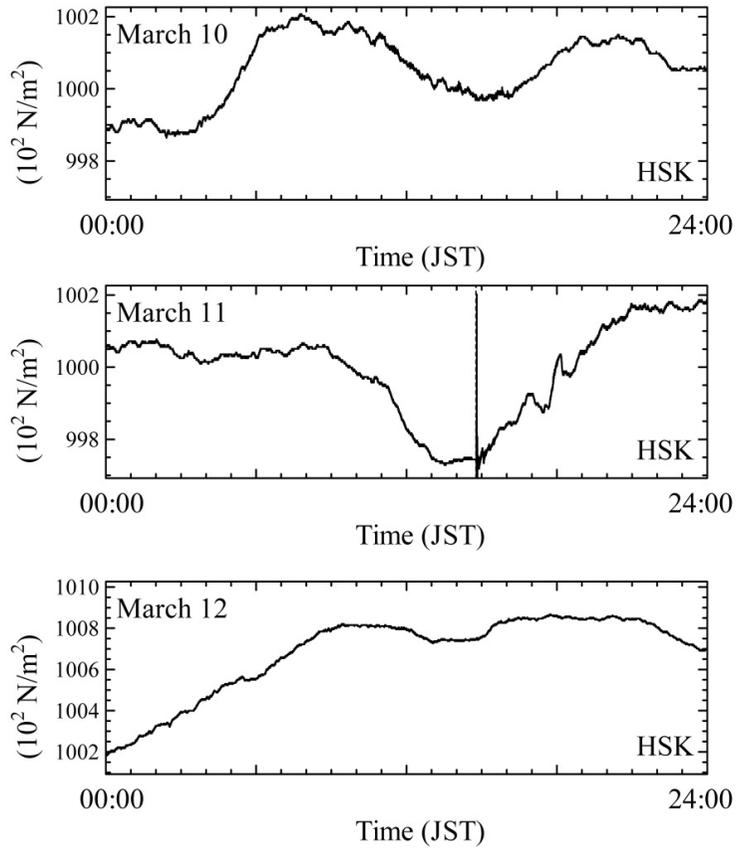


図2 東北地方太平洋沖地震前後の気圧変化波形
(2011/03/10-2012/03/12、HSKにて観測)

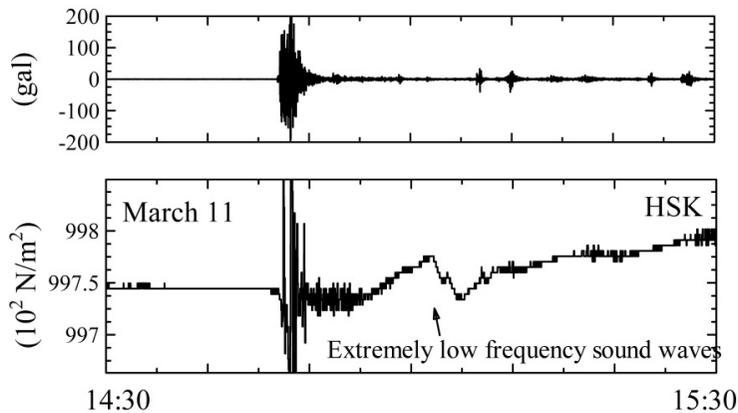


図3 東北地方太平洋沖地震津波によって発生した極超低周波音波
(上段：加速度信号、下段：気圧信号 (HSKにて観測))

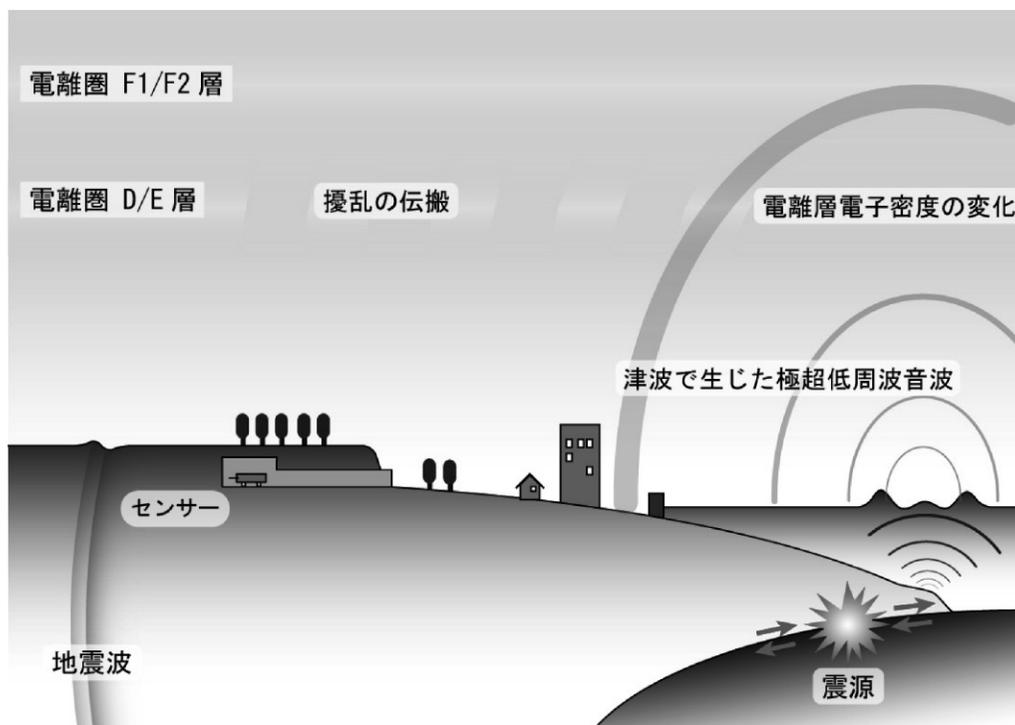


図4 極超低周波音波の発生・伝搬モデル

4. 極超低周波音波の発生モデルと津波検知システムへの応用

図4に津波によって極超低周波音波が誘起されるモデルを示す。同図に示す通り、津波発生に伴って海面が急激に押し上げられる（または引下がる）ことで、大気圧縮が起こり、そこで極超低周波音波が発生する。超低周波数の音波は減衰しにくいいため、また津波（水波）よりも速度が速いため、津波の到達よりも数10分程度早く検知することが可能である。

一方、発生した音波は、上空にも同様に伝搬していき、電離層の擾乱を引き起こす。津波に伴う超低周波音波による電離層擾乱を電離層電子密度（TEC）によって観測した結果が示されており⁹⁾、これらの結果も我々の観測結果が、津波を発生源とする超低周波音波によるもので

あることを支持していると言える。

さらに、図3より、細倉観測地点への音波の到達時間はおおよそ14時57分として、地震発生時刻が14時46分18秒であるので、その差が約640秒程度となる。一方、文献⁹⁾で示されている津波発生点から細倉観測点までは200km程度離れており、この距離は音波の伝搬距離とほぼ等しい。

東北地方太平洋沖地震発生時では、東北地方での極低周波音波の観測結果は非常に少なく、発生点の同定までは難しいが、原理的には複数の観測点で同時計測することで、到達時間の差を用いて、津波の発生点を計算することができる。

すなわち、2つの観測点の緯度経度より変換した xy 座標系での x 座標および y 座標をそれぞれ (X_1, Y_1) および (X_2, Y_2) とし、津波発生

点の座標を (X_0, Y_0) とすると、その間には、

$$\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} - \sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2} = v\Delta t$$
 なる関係がある。ただし、 v は音波の伝搬速度、 Δt は観測地点間の到達時間差とする。この関係式より、観測点の座標は既知であるので、津波発生点 (X_0, Y_0) は xy 座標上で双曲線を描くことになる。したがって、観測点が3点以上あれば、これらの交点より津波発生点を求めることが可能となる。さらに、観測点が4点以上あれば、音速についてもパラメータとして同定することも可能となる。

5. まとめと今後の展望

我々が連続観測している野外観測システムは、東北地方太平洋沖地震時の津波によって発生した極超低周波音波の観測に成功した。津波発生に伴う大気圧縮で発生した超低周波数の音波は減衰しにくいいため、また津波（水波）よりも速度が速いため、観測地点と津波発生点の関係にもよるが津波の到達よりも数10分程度早く検知することが原理的に可能であり、複数の観測点で音波の到達時間差を計測することで、津波の発生点を検知することも可能となる。

日本を含むアジア地域は現在も地殻活動は非常に不安定であり、これらの地域において発生した津波を早期に検知することは重要な課題である。今後は、観測地点を増やし、観測体制を

充実させるとともに発生点の計算精度を向上させることが重要である。

地震や津波の発生を事前に予測することが不可能である現代社会においては、発生した地震や津波をできるだけ早く社会に伝達することはとても重要な課題である¹⁰⁾。もし、この極超低周波音波の計測を用いた津波発生検知が実現すれば、防災の一助に貢献できる画期的な試みとなるだろう。

6. おわりに

これまで、我々グループは野外における観測を続けてきているが、野外における観測を継続的に行うことは非常に難しいとつくづく感じる。野外での観測というのは、多くの場合、無人で行われる。言葉にすると、『ただこの無人システムが停止しないように連続観測する』だけなのだが、これが本当に難しい。自然現象は全く同じものが2度起こることがなく、欲しいデータを観測する機会はたったの1回なのだが、起こった時にちょうどシステムがダウンしていたということは、この分野ではよく聞くことである。

ただ現在では、無線端末が発達したため、無人の観測システムをリモートで制御することも容易になってきている。実際、我々の観測点の中にも研究室からリモートで制御できる箇所がある。情報通信技術の発展とともに、観測シス

テムも高度化しており、堅固なシステムによる更なる継続的な観測によって、観測データを積み重ねることで新たな現象の発見につながると大いに期待している。

参考文献

- 1) 金森博雄, 地震の物理, 岩波書店, 1991.
- 2) 大中康誉, 松浦充宏, 地震発生の物理学, 東京大学出版会, 2002
- 3) K. Okubo, et al., “Direct magnetic signals from earthquake rupturing : Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan,” EPSL vol. 305, no. 1, pp.65 – 72, May 2011.
- 4) T. Mikumo, et al., “Low-frequency acoustic-gravity waves from coseismic vertical deformation associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw= 9.2)”, J. Geophys. Res., 113, B12402, 2008.
- 5) J. Artru, et al., “Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis”, Geophysical Journal International vol. 160, no. 4, pp.840 – 848, March, 2005.
- 6) D.-J. Doong, et al., “Development of tsunami early warning systems and future challenges”, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 379 – 390, 2012.
- 7) A. Takeuchi, et al., “Electric and Ionic Environmental Circumstances Interacting at Hosokura Underground Mine in Northeast Japan”, IEEJ Trans. FM vol. 129, no. 12, pp.870 – 874, 2009.
- 8) 鉦山をゆく「まだある鉦山の再利用」, pp.094, イカロス出版
- 9) T. Tsugawa, et al., “Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”, EPS, Vol. 63 (No. 7) , pp.875 – 879, 2011.
- 10) 大久保寛, 竹内昭洋, 竹内伸直, 地震・津波の革新的発生検知法と緊急警報への応用, HEADLINE REVIEW, OHM2012年11月号