

首都圏地震観測網 (MeSO-net) で見られる様々なノイズ

川北優子^{1)*}・酒井慎一¹⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

Various Types of Noise in MeSO-net

Yuuko Kawakita^{1)*} and Shin'ichi Sakai¹⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

The Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in the Tokyo Metropolitan Area has been ongoing (2007–2012). Under this project, the Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net), which consists of about 400 observation sites, has been constructed. The correlations of waveform from local and teleseismic events are high because observation sites are deployed at about 2 or 3-km intervals. In addition, the later phase is easily identified although artificial noise is very intense. However, we are attempting to improve quality by characterizing the various types of noise.

In the metropolitan area, various human activities are observed that generate noise such as trains, automobiles, aircrafts, factories, and electrical power. These adversely affect our observations. We recognize various types of noise from continuous records. A spectral graph and a spectrogram in each station are useful for characterizing signals and noise. We also discovered a form of system noise obtained from the relationship between sensor and electrical circuit. We named it Aurora Noise. The strength of Aurora Noise was reduced by improving the electrical circuit.

Our study will lead to improving the quality of observed data, and contribute to a new assessment of seismic hazard in the Tokyo Metropolitan Area in Japan.

Key words: Metropolitan Seismic Observation network, noise reduction, spectrogram

1. はじめに

首都圏に甚大な被害をもたらした巨大地震といえば、1923年に発生した大正関東地震（マグニチュード 7.9, M 7.9）であるが、このような地震は 200 年～400 年の周期で発生すると考えられていて、次に M 8 級の関東地震が発生するまでには、まだ猶予がある。しかし、これまでに南関東地域で発生した大地震の時系列を見てみると、M 8 級の地震が発生する間に M 7 級の地震が数回発生している (Fig. 1)。その発生頻度は、大正関東地震発生直前の 70 年間の方が、その前の 150 年間に比べて明らかに高く、静穏期と活動期が交互に訪れる可能性が考えられている。いずれ活動期に入って大地震が発生することも考えられる。

東京や江戸に被害を及ぼした M 7 級の地震としては、例えば安政江戸地震（1855）と明治東京地震（1894）があるが、どちらも近代的な観測網が整備される前の地震であるため、その発生場所や発生様式に関しては、ほとんど明らかになっていない。そのため、南関東地域の M 7 級地震の発生確率を見積もる際には、最近の 100 年間に発生した 5 つの地震を用いて算出し、今後 30 年間で 70% であるとされている（地震調査研究推進本部, 2004）。一方、南関東地域で発生する M 7 級地震に対して 19 種類の地震断層を仮定し、それぞれで被害想定を行ったところ、例えば東京湾北部地震（M 7.3）の発生では、最大で死者数約 11,000 人、経済的被害約 112 兆円等の甚大な被害が推定された（中央防災会議, 2005）。これらの M 7

*e-mail: kawakita@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

級の地震は、切迫度が高い上に、被害による影響も甚大なことから、防災対策が急務である。そこで、首都圏に大被害をもたらす首都直下地震の全体像を解明するとともに、地震による被害の軽減と首都機能維持に資することを目的とする「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」が、文部科学省により実施されることとなった(平田編, 2008, 平田編, 2009, 平田ほか, 2009)。

このプロジェクトは、①: 首都圏でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等、②: 都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究、③: 広域的危機管理・減災体制の構築に関する研究の3つのサブプロジェクトからなる。このうちサブプロジェクト①では、首都圏で発生するM7程度の地震の場所、規模、発生頻度、揺れ方

などの地震像を解明するために、1. 地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査、2. 制御震源を用いた地殻構造探査、3. 歴史地震等の記録の収集、整理及び再評価、4. 震源断層モデル等の構築の4つの項目において調査研究を進めている。これらの調査研究の一環として、平成19年度から首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network: MeSO-net) が構築され始めた。

首都圏は、経済活動や交通などによる雑振動が非常に強く、微弱な地面の揺れをとらえるような地震観測には不利な地域であるため、これまでの高感度地震計は深さ1000 mを越える井戸の底に設置されていた。このような観測点は建設コストが高いため、多点観測が困難で、中央防災会議が想定した東京湾北部地震の震源断層上には5ヶ所の観測点しか設置されていなかった。MeSO-netは東京湾北部を中心とした半径約80 kmの範囲に、平成19年度から5年間で約400ヶ所の観測点を設置する計画である (Fig. 2)。このことにより観測点密度が高まり、地震断層周辺の構造の解像度が飛躍的に向上することが期待される。

観測点の設置は2007年度から始まり、2008年度までの2年間で178ヶ所の観測点が稼働し、データが蓄積され始めた。これらのデータには、首都圏で発生した多数の地震が含まれており、今後の様々な解析に利用される。一方で、これまでの地震観測網とは違って都市部に設置

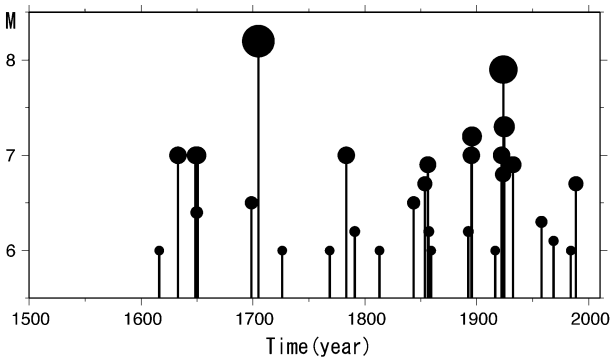


Fig. 1. Large earthquakes ($M > 6.0$) occurring in the metropolitan area over about 500 years.

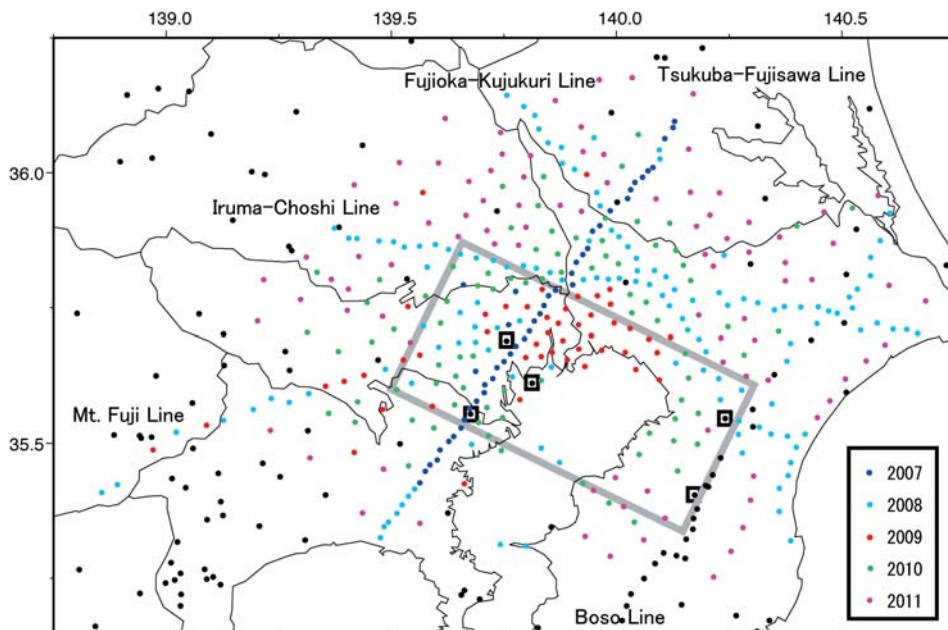


Fig. 2. Map of observation points in MeSO-net. Colors indicate year of deployment. Large square indicates area of estimated Northern Tokyo-bay earthquake. Small squares indicate the Hi-net's station and JMA's station.

したため、解析を阻害する多くのノイズが含まれている。そこで、これらの波形データの質を検討し、主たるノイズの分類を行い、目的とする地下からのシグナルを際立たせるための情報をまとめる。これらを詳細に調べることによって、ノイズを軽減させ、高品質な観測網の構築に資する情報を提供するのが、本稿の目的である。

2. 首都圏地震観測網の概要

MeSO-net が展開される領域は東京湾北部を中心とした半径約 80 km の範囲で、5 本の直線状の観測点分布 (2 ~ 3 km 間隔) と中心ほど密な面状分布 (4 ~ 10 km 間隔) の組み合わせからなり、最終的に 400 か所の観測点が設置される計画である (Fig. 2) (酒井・平田, 2009)。設置場所の多くが都市部のため、地震観測に適するようなノイズレベルの低い場所を選択しにくい。そこで、地震計とデジタル変換装置を同じ容器に入れ、地下 20 m の深さのボアホールの孔底に設置することにより、地表の人工振動からの影響から逃れ、温度変化による機器の特性変化の影響の軽減を図ることとした (笠原ほか, 2009)。その結果、観測点として選定されたのは、道路や鉄道路線から比較的離れることが可能で、ボアホールの掘削が

容易な場所をもつ学校や公園が主になった。

2007 年度に 46 ケ所、2008 年度に 132 ケ所が設置され、データが地震研究所へ伝送され、収録が始まっている。観測点で得られたデータの伝送は、回線状態によって伝送速度を変えたり、伝送を中止してデータを現地で蓄積したりする自律協調型のデータ伝送システムを採用した (森田ほか, 2009)。地震研究所の収録側でデータを受け取ったときに発せられる情報を観測点側で受信しない限り、観測点で得られたデータを観測点が保持することになっているため、確実にデータの収集が行われる。たとえ途中の回線工事や停電等によって伝送経路が断たれたり、地震研側の収録システムがダウンしたりしたとしても、データの欠落なしに収録することが確認されている (中川ほか, 2009)。

3. 様々なノイズの例

3.1 ノイズの概要

地震観測においては、様々な事象がノイズとして観測および解析の障害となっている。地震以外に地面を揺らすものとして、人間の活動による交通や工場の稼働、風雨や雷等の気象による大気の変動が地面に伝わるもの、

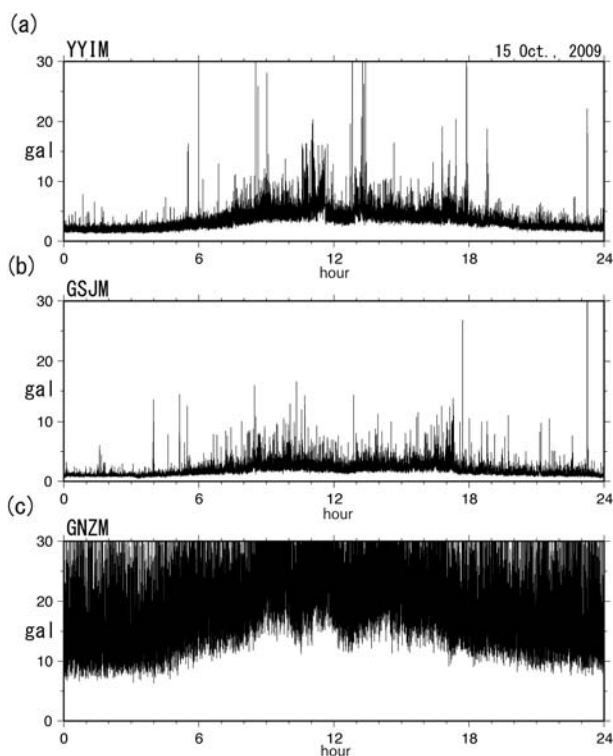


Fig. 3. Time sequence of amplitude for each station from 0:00 to 24:00 on 15 Oct., 2009.

(a) YYIM, W901, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo. (b) GSJM, TF46, Tsukuba, Ibaragi. (c) GNZM, TF24, Ginza, Chuo-ku, Tokyo.

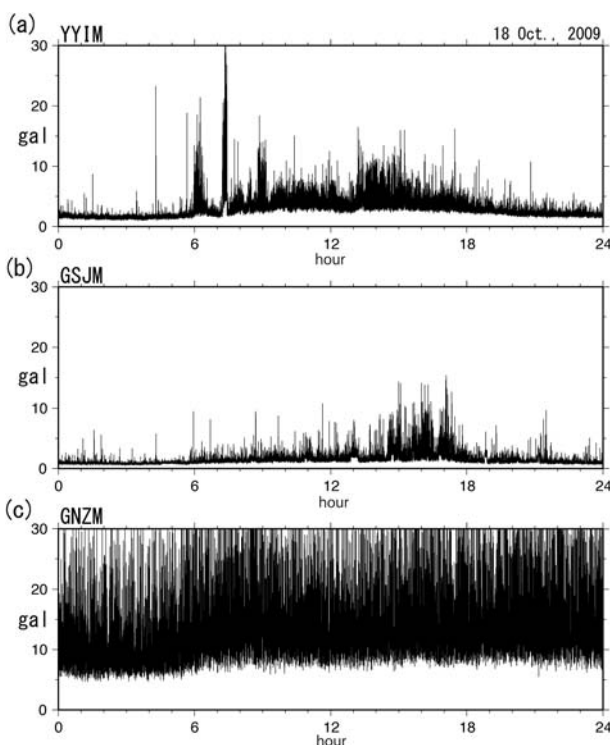


Fig. 4. Time sequence of amplitude strength for each station from 0:00 to 24:00 on 18 Oct., 2009.

(a) YYIM, W901, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo. (b) GSJM, TF46, Tsukuba, Ibaragi. (c) GNZM, TF24, Ginza, Chuo-ku, Tokyo.

波浪や潮汐が地面に伝わったもの、音波や衝撃波などが地面に伝わったもの、さらには電気信号の混入によるノイズ、システムや回路そのものの発振などが考えられる。

まず、観測された波形の強さの時間変化を見てみた (Fig. 3, Fig. 4)。これは、振幅の二乗を一秒ごとに平均して表示したものである。どの観測点でも日中の振幅が大きく、深夜が小さい様子が見られ、これらの原因は人間の活動によるものと考えられる。さらに平日と休日というような曜日による違いや気候変化に対応すると考えられる日変化も見られる。これらは、観測点ごとに異なるものと共通するものがあり、周波数ごとにも違いが見られるようで、様々な傾向が見られる。そこで、同時刻の波形を並べて、観測点ごとの振幅の大きさの特徴を比較してみた。

Fig. 5 は 2009 年 9 月 25 日の昼と夜の波形を茨城県つくば市から神奈川県藤沢市に至る測線（つくば藤沢測線）上の観測点のうち 40 点分を北から南へ表示したものである。昼の波形 (Fig. 5 (a)) と夜の波形 (Fig. 5 (b)) を比較すると、東京都心部 (図の中央付近) の観測点は昼 13 時の振幅が大きい。東京都心部での人間の活動度が、他の地域より高いためであることが表れてい

る。しかし 5 秒のローパスフィルタを通した長周期成分だけを見た Fig. 5 (c) と Fig. 5 (d) によれば、神奈川県横浜市 (図の下方) の観測点では、夜 1 時の方が振幅が大きい。深夜であることから、人間の活動に原因があるのではなく、他の事象によるものと考えられ、このときは、南方の太平洋上を低気圧が通過して波浪が強くなり、海岸地域を中心として地面の揺れが高まったためと思われる。

このように、周波数ごとにノイズレベルも変化すると考えられるため 3 観測点のスペクトルを見た。Fig. 6, Fig. 7 は、文京区弥生 (YYIM, W901), つくばみらい市 勘兵衛新田児童公園 (GSJM, TF46), 中央区銀座中学校 (GNZM, TF24) で夜 3 時と昼 15 時の 1 時間に観測された上下動成分のスペクトルを表示した。約 2Hz より高周波数の帯域では弥生観測点は、昼 15 時の方が数倍～10 倍大きい。他の観測点でも同様の傾向が見られるが、銀座中学校は昼と夜の差が小さい。一方、約 5 秒より低周期の帯域では昼夜の違いが見られない。昼 15 時には、どの観測点にも周期約 4 秒の所にピークがある。関東平野全体に同様なゆれが存在すると考えられる。

次に、得られた観測記録の単位時間ごとのスペクトル強度を色で表し、その時間変化を示したスペクトログラ

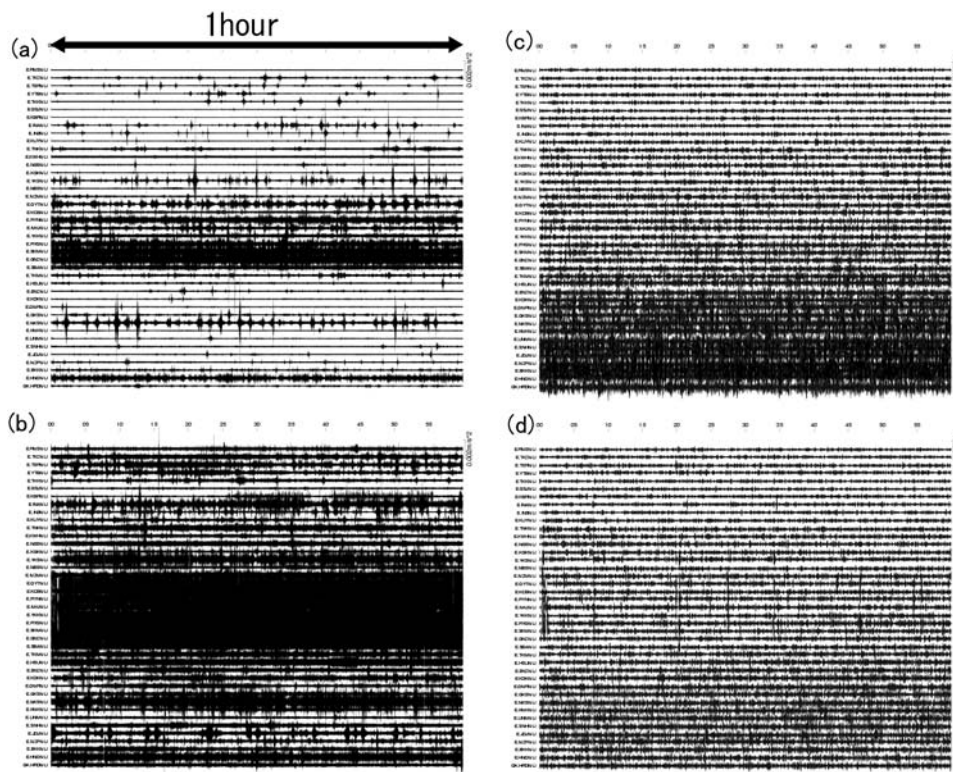


Fig. 5. Waveforms observed by Tukuba-Fujisawa line are shown for 25 Sep., 2009

Top is northern station and bottom is southern station. (a) Not filtered, from 01: 00 to 02: 00, (b) Not filtered, from 13: 00 to 14: 00, (c) Low-pass filtered (5 sec.), from 01: 00 to 02: 00, (d) Low-pass filtered (5 sec.), from 13: 00 to 14: 00.

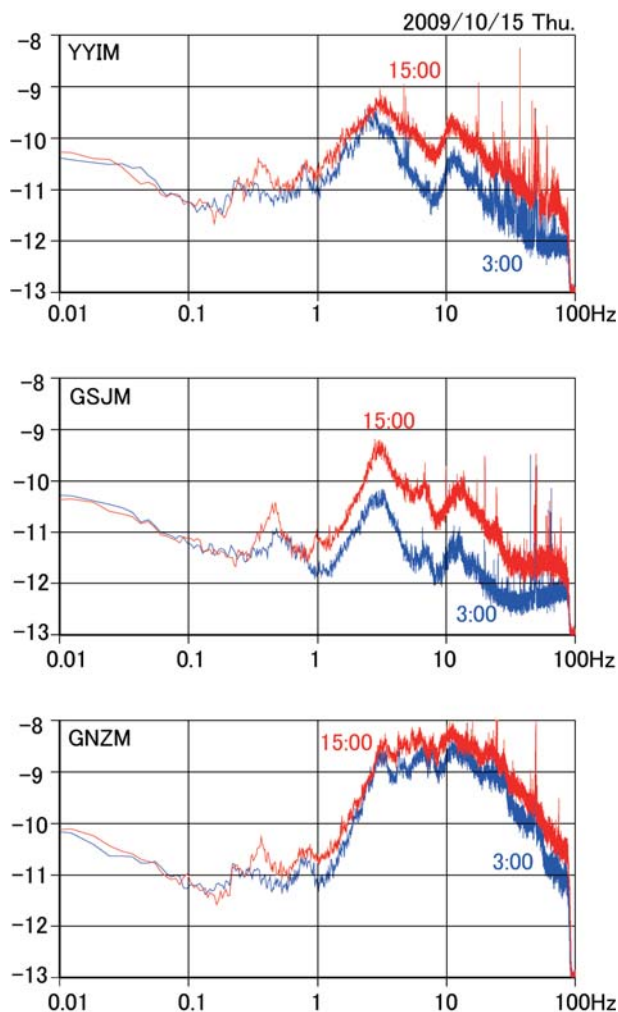


Fig. 6. Spectrums of each station for 1 hour.

Blue line indicates spectrum from 3:00 to 4:00 on 15 Oct., 2009, and red line indicates from 15:00 to 16:00, (a) YYIM, (b) GSJM, (c) GNZM.

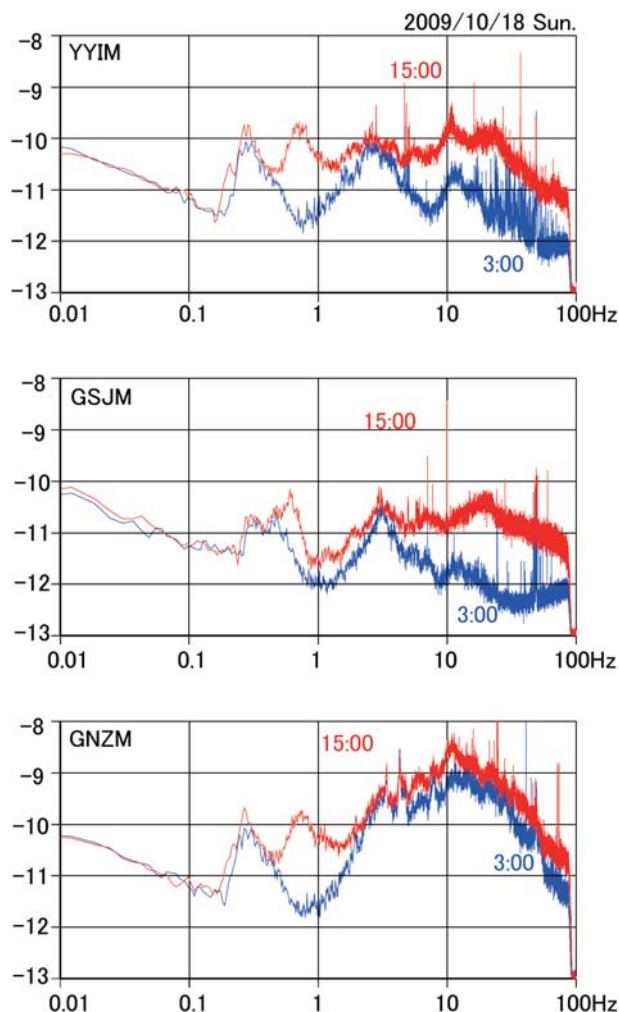


Fig. 7. Spectrums of each station for 1 hour.

Blue line indicates spectrum from 3:00 to 4:00 on 18 Oct., 2009, and red line indicates from 15:00 to 16:00, (a) YYIM, (b) GSJM, (c) GNZM.

ムで調べた (宮川・酒井, 2008). 今回のシステムでは, AD 変換を 200 Hz のサンプリング速度で行っているため, 80 Hz のアンチエイリアスフィルターを通してている. そのため, 約 80 Hz 以下の周波数帯域での時間変化を見ることができる. このスペクトログラムでは, バックグラウンドの振幅が青くなるようにし, それより大きなパワーを持ったシグナルが存在するときには, その大きさによって, 黄, 赤となるよう表示している. 一般的には, 地震動をシグナルと呼び, それ以外の振動をノイズとしているが, 本稿では, そのノイズに注目しているため, 地震動以外でバックグラウンドを超える振幅を持った特徴的なものもシグナルと表記することにした.

Fig. 8 は, 弥生観測点において観測された上下動成分の波形 1 時間分のスペクトログラムである. 8192 サンプル (約 40 秒間) のスペクトル強度を色で表し, その時間

変化を表示したものである. まず目につくのは, 同じ周波数 (約 48 Hz 付近) で常に見える連続したシグナルである (Fig. 8 のピンクの矢印). MeSO-net が東日本に展開されていることから, 商用電源からの漏れ電流ではないかと考えられるが, 50 Hz ちょうどではないことから, ハムそのものではなく, 周辺で稼動している空調や自販機等の様々なものに含まれるモーター, トランス, インバーターなどが発する振動ではないかと考えられる. これらは, 一定の周期の振動を出し続けるため, スペクトログラムで見ると, 横に長い直線状に見える. それと比べて, 地震等のような突発的なものは, 時間変化にそれぞれの特徴が出る.

例えば東京都東部の地震 (2009 年 10 月 17 日 19 時 18 分, M 2.5, 深さ 30 km) は, 赤いたて線として見える (Fig. 8 の青い矢印). この時間軸を拡大すると, Fig. 9

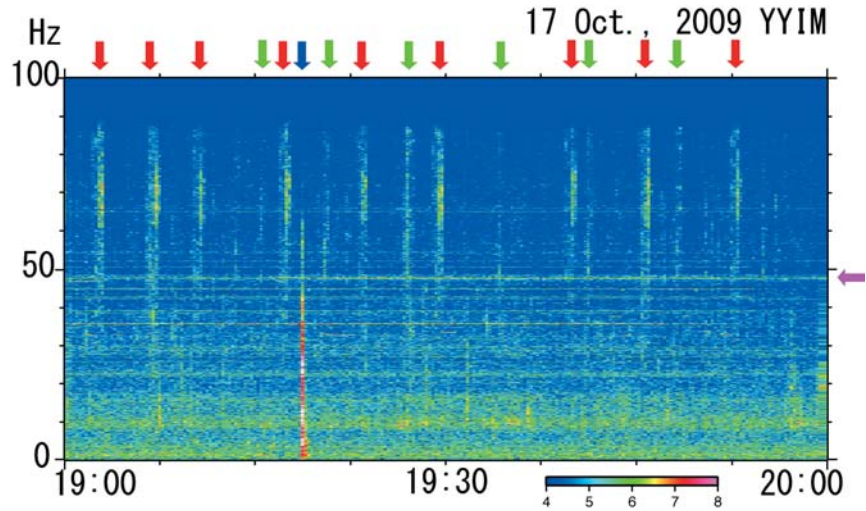


Fig. 8. Spectrogram of YYIM from 19:00 to 20:00 on 17 Oct., 2009.

Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. For example, red signal at about 19:18 indicates an earthquake (M2.5) occurring in Tokyo (blue allow). Red allows and green allows indicate weak signal and more weak signal, respectively. Pink allow indicates continuous noise around 50 Hz.

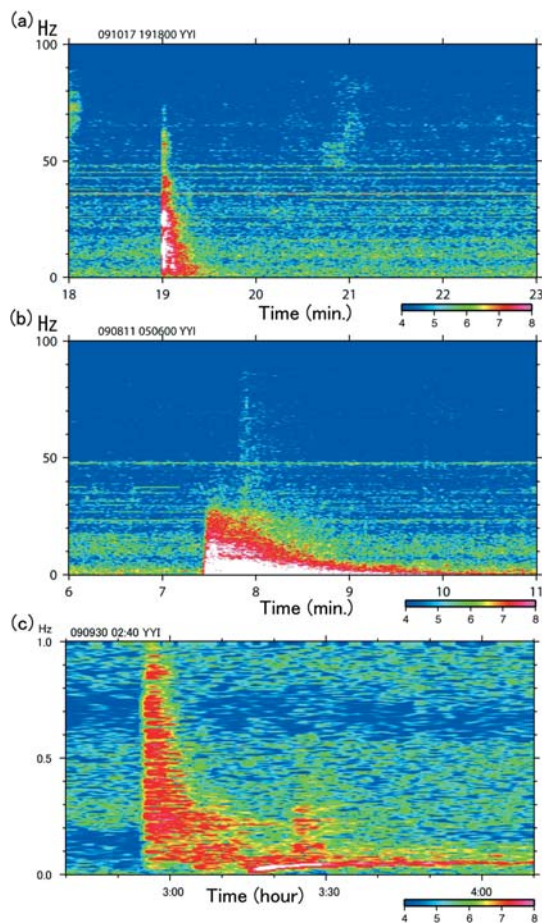


Fig. 9. Spectrograms of earthquakes observed at YYIM. (a) Earthquake (M2.5, 30 km depth) occurring in eastern Tokyo on 17 Oct., 2009. (b) Earthquake (M6.5, 23 km depth) occurring at Suruga Bay on 11 Aug., 2009. (c) Earthquake (M8.0, 33 km depth) occurring at Samoa Islands in southern Pacific on 30 Sep., 2009.

(a) のようになり、自然地震の場合は、P 波や S 波の到達直後が大きなエネルギーを持っているため、スペクトルもそこが最も強く赤く表示される。その後、時間とともに高周波数程早く減衰し、低周波数の振動の継続時間が長い。この減衰の仕方は、地震の規模や距離および観測点との間の構造に依存し、例えば駿河湾沖の地震 (2009 年 8 月 11 日 05 時 07 分, M 6.5, 深さ 23 km) の場合は、地震の規模が大きく、震源距離が遠いため、周期 1 秒の波であれば 3 分以上も揺れが続いている。さらにサモアの地震 (2009 年 9 月 30 日, M 8.0) では、1 時間以上もゆれが記録されていることが、Fig. 9 (c) からわかる。このスペクトログラムは、65536 サンプル (約 327 秒間) ごとのスペクトル強度の時間変化を表示していて、首都圏においても数十秒の周期の表面波が、十分な SN 比で観測可能であることが認められた。

3.2 列車の運行によるノイズ

一方 Fig. 8 には、上部に赤い矢印で示したように、19 時 3 分、7 分、10 分、17 分…頃の 60~80 Hz 周辺に、もやとした地震のシグナルより弱いものが見える。このシグナルの出現パターンは、東京メトロ千代田線のダイヤと高い相関があることが分かった。さらに、それより弱いシグナル (Fig. 8 の緑の矢印) も見られ、千代田線だけでなく、他の路線からの影響も考えられる。

他の観測点でも同様のシグナルが見られるところがある。例えば、横浜市神大寺小学校観測点 (JDJM, TF12) では、午前 5 時前後に始まり、朝 7 時~9 時頃が最も激

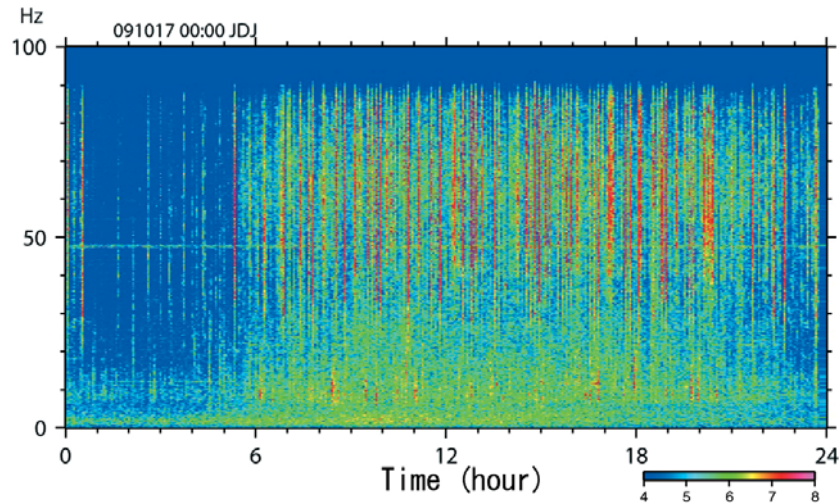


Fig. 10. Spectrogram of JDJM from 0:00 to 24:00 on 17 Oct., 2009.
Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong.

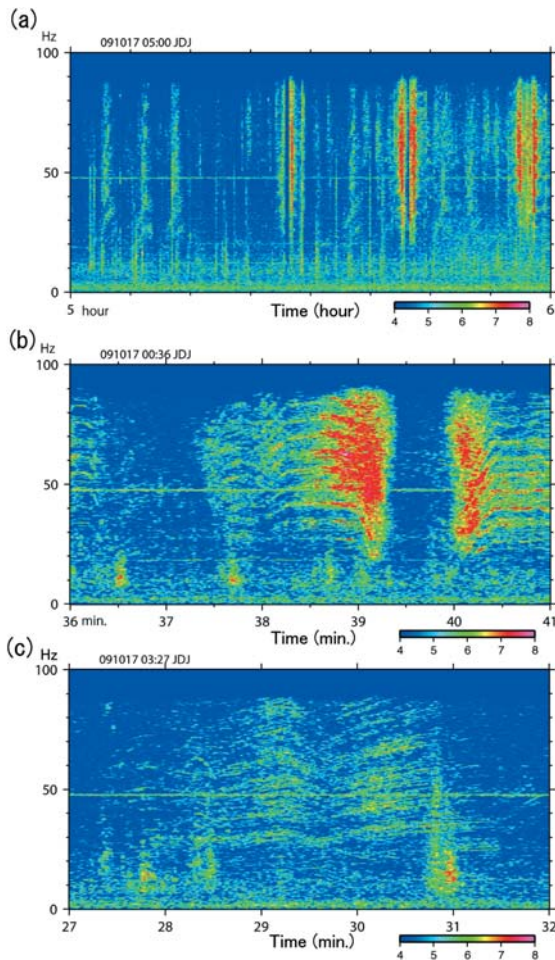


Fig. 11. Spectrograms of JDJM on 17 Oct., 2009.
Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) Spectrogram from 0:00 to 1:00. (b) Spectrogram from 0:36 to 0:41. (c) Spectrogram from 3:27 to 3:32.

しく、深夜0時を過ぎた頃に静かになるのが通常のパターンである (Fig. 10). 時間軸を拡大すると, Fig. 11 (a) のような強烈なシグナルが見られる. この観測点は, 横浜市営地下鉄から約 300 m 東にあり, その出現間隔は, 最寄りの片倉町駅のダイヤとほぼ一致する. このシグナルの特徴は, 不連続なスペクトル (とびとびの周波数) を持ち, 時間的には, 徐々にシグナルが大きくなり, 数 10 秒で最大値になり, 直後に静かな約 1 分間の休止時間帯がある. 次に, 大きなパワーから始まって徐々に小さくなっていくというパターンである (Fig. 11 (b)). これは, 片倉駅に列車が進入してくる時に発する振動の様子を表していると考えられ, 途中の静かな期間は, 列車が駅に停車している時間であると思われる.

さらに詳細に比較したところ, 停車期間前後の振動の強さには違いがあり, 弱い振動が先に来ているときは南向きの電車, 強い振動が先に来ているときは北向きの電車の発車時刻と対応していた. 観測点から最も近い線路が片倉駅の南西側にあたることから, 北向きに電車が近づいてくるときは観測点に最接近するのが駅の手前であるため, そのとき振動が最も強くなり, それから停車し, その後駅から遠ざかっていく. 一方, 南向きの電車が入ってくるときは, 最も接近するのが駅に停車した後であるため, 駅に進入するときの振動は弱く, 停車後に通り過ぎるときが強くなるようである.

シグナルの強弱だけでなく周波数の変化からも, 列車の運行の違いがわかる. 駅に進入するときは速度を落とすため, 列車から発せられる振動の周波数がドップラー効果によって低くなる. 逆に駅から発車するときは速度を上げていくため, 振動の周波数が高くなる. このこと

も Fig. 11 (b) のスペクトログラムからわかる。

一方で、地下鉄の運行がない深夜 0 時半から 5 時までにもいくつかの弱いシグナルが見られる (Fig. 10)。これらは Fig. 11 (b) に比べてシグナルが弱いことから、地下鉄より遠いところを振動源とするものと思われる。周辺には、新幹線と JR 貨物の線路が見られるが、新幹線は 0 時以降は運行していないので JR 貨物によるものと考えられる。このシグナルは、不連続なスペクトルを持つがその強度の時間変化は少ない (Fig. 11 (c))。ただし、数 10 秒ずつの周波数変化が連続して見られる。強度の変化が少ないのは、観測点からの距離が遠いため、見かけの距離の変化が小さいためであろう。数 10 秒ごとに周波数の変化が見られる原因は、振動源の周波数が一定であると仮定すれば、振動源の速度が変化するか、振動を伝える媒質が変化するかのどちらかであると考えられる。この場合、振動を音とするならば、振動を伝える媒質 (空気) の変化、言いかえると風の強弱によって周波数が変わったのではないかとと思われる。

次に、列車の運行に起因するシグナルに関して、その発信源 (線路) からの距離とシグナルの強さとに相関があるかを調べてみた (Fig. 12)。つくば-藤沢測線の観測点のうち、2007 年度に設置した 40 点のスペクトログラムを見て、間隔が数分程度の不定期なシグナルが存在するかどうかと、そのタイミングに対応するダイヤを持つ路線が近くにあるかどうかを見た。列車の運行と相関の高いシグナルは、低周波数 (数 Hz) から高周波数へ連続的なものと、20 Hz 以上の高周波数だけや、不連続なと

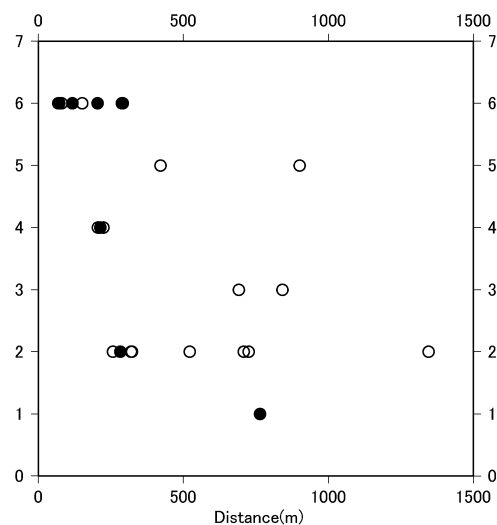


Fig. 12. Relation between amplitude strength and distance from train line. Solid and open circles indicate strength of ground shake and the atmospheric shake.

びとびの周波数を持つものなどがある。前者は地面の振動が伝わって記録されたもの、後者は列車の通行によって生じた音が空気中を伝わり、地震計を揺らしたものと考えられる。これらには、それぞれ異なる時定数の距離減衰が見られ、地面の振動の場合は距離が 300 m 離れるとほとんど検知不能のレベル (0.5 gal) 以下になるが、それ以外の音によるものと考えられるシグナルは、1 km 先まで届いている。音によるシグナルの方が遠方まで届く理由は、MeSO-net の地震計が、20 m の水をひたした管の中にあるため、音に対する感度が良いのかもしれない。ただ、実際にどこから音が発生して、どのように伝わるのか、間に建物などの音をささぎるものの存在がどう影響するのかなど、さらなる現地調査の必要がある。

3.3 自動車の通行によるノイズ

近くに鉄道路線がない観測点においても、スペクトログラムを見ると短時間のシグナルが線状に見える (例えば山梨県道志村道志中学校 (DSCM, YN10) 2009 年 11 月 8 日 2 時 30 分頃, Fig. 13 (a) の赤矢印)。この時間軸を拡大すると (Fig. 13 (b) の赤矢印)、列車の通過によるものと比べるとパワーが弱く、継続時間は 10 秒程度と短い。この場合は、付近の道路 (距離約 100 m) を通る自動車による振動であると考えられる。

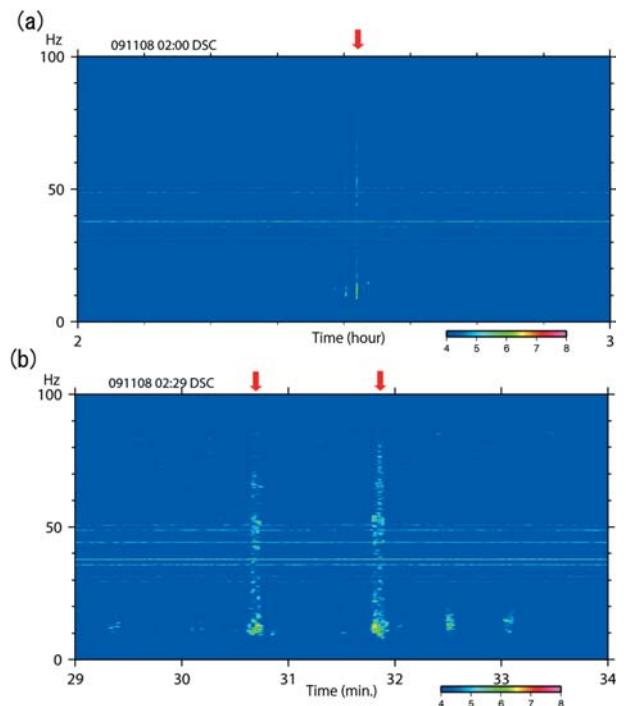


Fig. 13. Spectrograms of DSCM on 8 Nov., 2009.

Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. Red arrows indicate noise from an automobile. (a) Spectrogram from 2:00 to 3:00. (b) Spectrogram from 2:29 to 2:34.

車の交通量が多い道路に近い場合は、連続的にノイズが高まる。たとえば、中央区銀座中学校 (GNZM, TF24) や品川区潮風公園 (SKPM, W025) のように、交通の激しい首都高速道から約 60 m しか離れていない観測点では、2~30 Hz の帯域に強烈なノイズが入っている (Fig. 14). 一方で、道路から離れていてもノイズが大きくなる場合もある。川口市東中学校 (HGCM, IC13) は、閑静な住宅地にあり、首都高速川口線から約 160 m 離れていて、現地では通行する車の音もほとんど聞こえないが、Fig. 14 (c) のように、強烈なノイズが常に入っている。この付近の首都高速道が高架になっているため、橋脚が揺れて常に振動が続いているのではと考えられる。そのような目で見ると、墨田区両国小学校や埼玉県三郷市鷹野小学校などは首都高速道から距離 100 m 以内にあり、

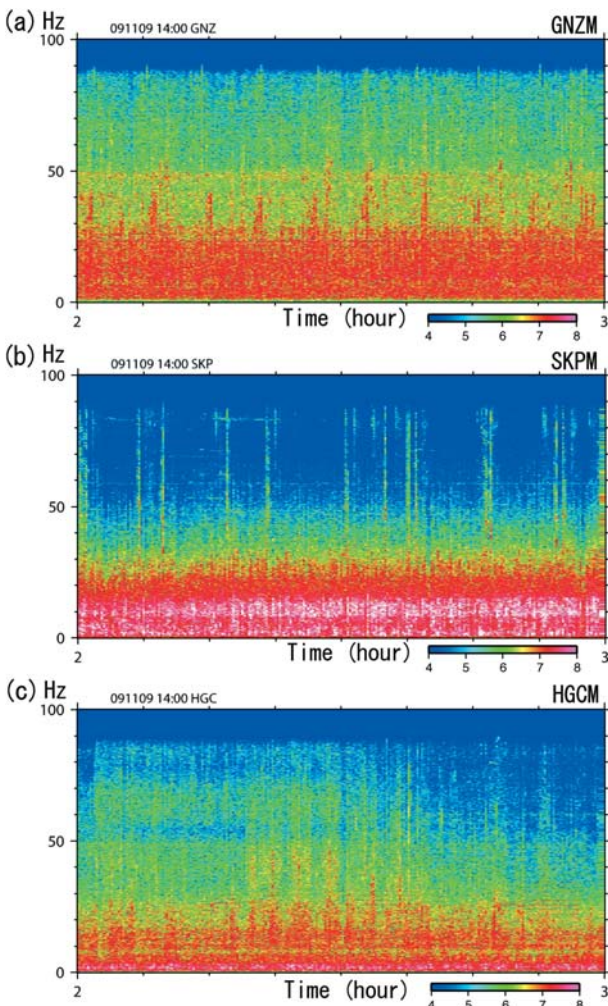


Fig. 14. Spectrograms of each station from 14: 00 to 15: 00 on 9 Nov., 2009. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) GNZM, (b) SKPM, (c) HGCM.

どれも大振幅のノイズが常に混入している。逆に、新宿区落合第五小学校や横浜市仏向小学校は、高速道路と約 50 m の距離にあるが、上記の観測点ほど大きな振幅のノイズではない。これらの高速道路は、地下もしくは地面を削った半地下に作られているためと考えられる。

3.4 航空機の飛行によるノイズ

スペクトログラムの中には、Fig. 15 (a) のようなシグナルが出現することがある。これは 2009 年 7 月 27 日 14 時 31 分の東京湾第二海堡観測点 (KH2M, W201) の記録で、真上をヘリコプターが通過したことを現地で確認している。このシグナルは、高周波数から低周波数へ時間と共に滑らかに変化しているのが特徴的で、一定の周波数の振動源が一定速度で移動するときにドップラー効果によって、受信した周波数が変化する現象と考えられる。この場合、移動体が観測点に向かってくるとき高周波数になり、遠ざかるときに低周波数になる。

同様のシグナルは、他の観測点でも見られ、この周波数の変化から、移動体の速度を推定することができる。例えば、Fig. 15 (b) (墨田区横川小学校, YKKM, TF27) の 2008 年 12 月 17 日 4 時 5 分頃のシグナルに注目すると、高周波数から低周波数へと連続的に変化するシグナルが数本見える。そのうち 50 Hz (H_1) から 37 Hz (H_2)

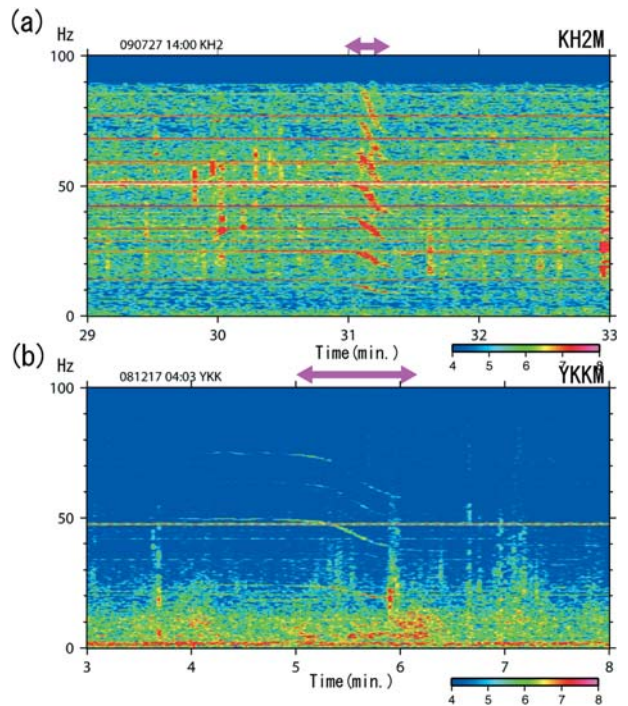


Fig. 15. Spectrograms of each station. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) KH2M from 14: 29 to 14: 33 on 27 Jul., 2009. (b) YKKM from 4: 03 to 4: 08 on 17 Dec., 2008.

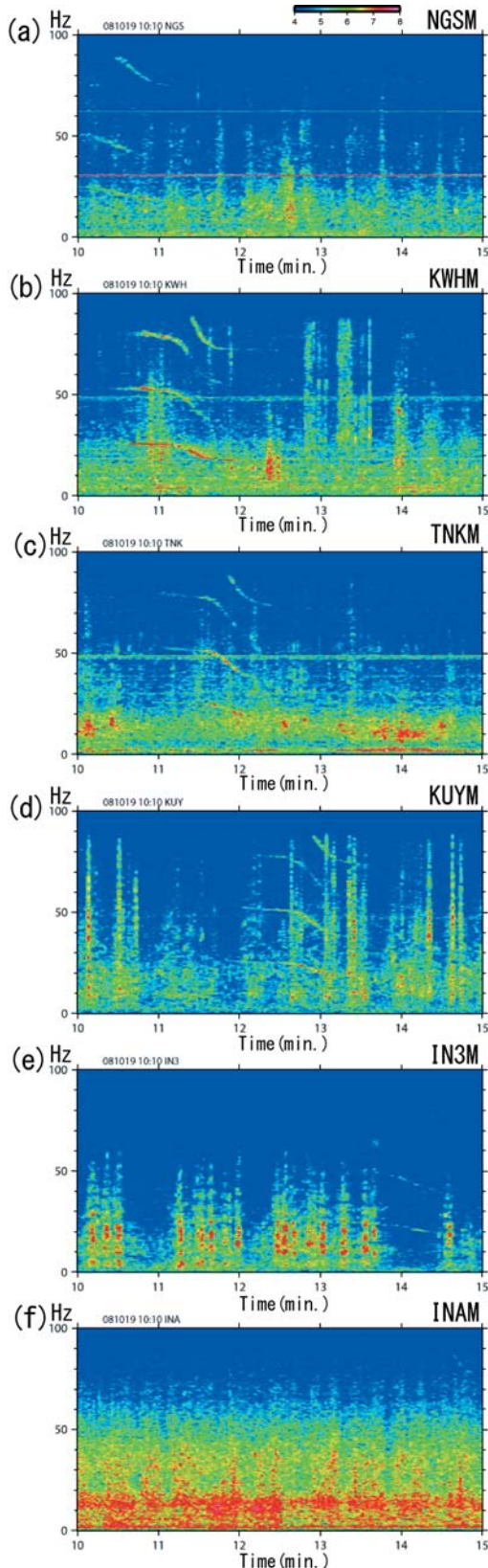


Fig. 16. Spectrograms of each station from 10:10 to 10:15 on 19 Oct., 2008. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) NGSM, (b) KWHM, (c) TNKM, (d) KUYM, (e) IN3M, (f) INAM.

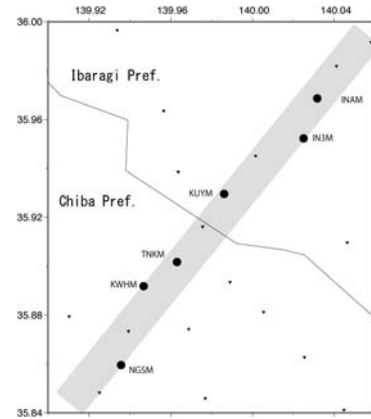


Fig. 17. Map of border between Chiba Prefecture and Ibaragi Prefecture. Solid circle and open triangle indicate the site that observed aircraft signal and planned site, respectively. Shaded line indicates estimated flight course.

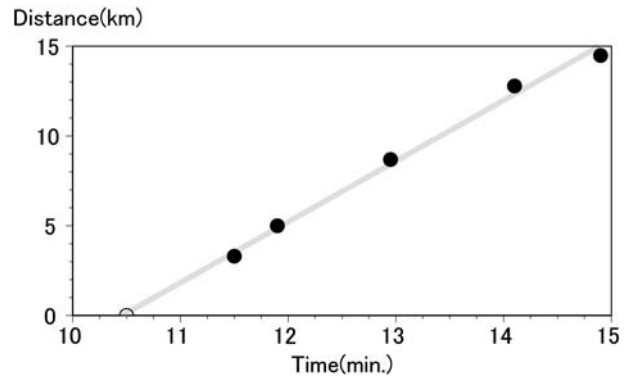


Fig. 18. Relation between time of aircraft signal and distance from NGSM.

に変化するものを取りあげる。ある一定の周波数を放出しながら一定の速度で観測点の直上の一定の高度を通過したと仮定すると、その放出している周波数は約 43.5Hz (H_0) になる (式(1)).

$$H_0 \approx (H_1 + H_2)/2 \quad \dots\dots(1)$$

周波数の変化は、移動体の速度 V と放出される音波の伝わる速度 ν に関係していて、このときの気温は 7.7°C で音速 ν が約 336 m/s であるから、移動体の速度 V は式(2)から約 160 km/h と計算できる。

$$V = \left(\frac{\nu}{H_0} - \frac{\nu}{H_1} \right) \times H_0 \quad \dots\dots(2)$$

同じようなシグナルは、2008 年 10 月 19 日の柏市柏の葉高校 (KWHM, TF39) でも見られた (Fig. 16). この時は、隣接する観測点でも、少しずつ異なる時刻に同様

のシグナルが見られている。これらのシグナルの発信源が同一で、それが移動しながら発信していたと考え、その距離と出現時刻について調べてみた (Fig. 17, Fig. 18)。Fig. 18 は、これらのシグナルが見られた6観測点を通る直線上に投影して、この中で最も早く出現した流山市長崎小学校 (NGSM) からの距離を縦軸にとり、長崎小学校観測点での出現時刻との差を横軸にとった。この図の傾きから、移動体の速度を出してみたところ、約 180 km/h であった。この速度は、横川小学校観測点の周波数変化から求めた速度と同程度であり、ヘリコプターの飛行速度として十分に考えられる範囲のものである。スペクトログラムの特徴も同様であることから、柏の葉高校観測点のシグナルも第二海堡観測点での事象や横川小学校観測点の事象と同じヘリコプターの飛行によるものと考えられる。

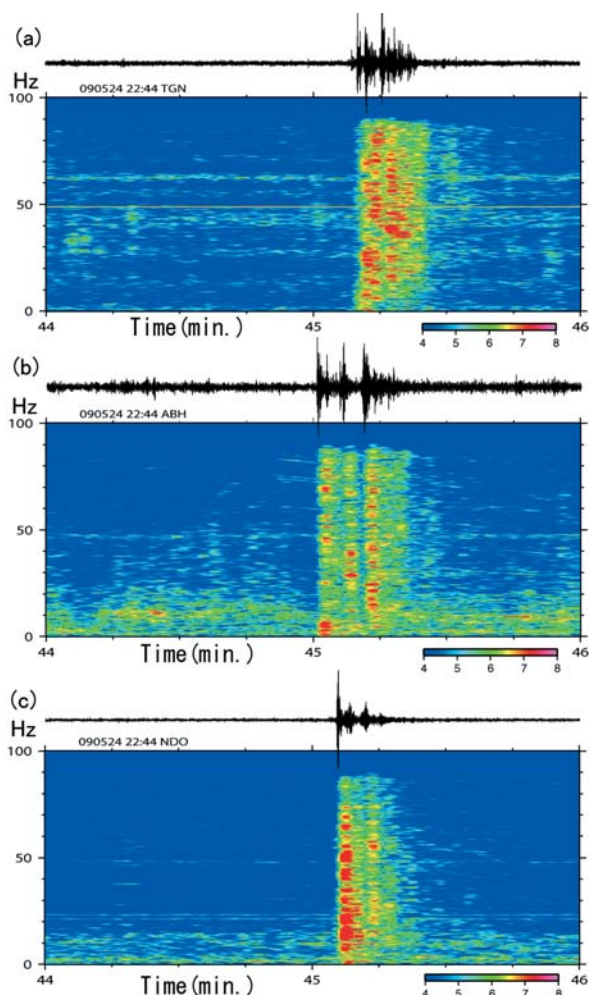


Fig. 19. Spectrograms of each station from 22:42 to 22:47 on 24 May, 2009.

Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) TGNM, (b) ABHM, (c) NDOM.

3.5 雷によるノイズ

2009年5月24日22時45分頃に我孫子市我孫子高校 (ABHM, FK18) で、雷による欠測が発生した。当時、この付近で雷雲が多く発生していたこと、センター側で停電を検出したこと、翌月現地で状況確認したところブレーカーが落ちており、これを上げて復旧したことから、落雷によるブレーカー遮断が原因であると思われる。停電が発生したものの、現地のバッテリーで収録は続けられていたため、電力が復旧したあとでデータはすべて再送され、データの欠落はなかった。

障害発生時のスペクトログラムでは、0 Hz から 90 Hz の帯域全体で縦に長く伸びた細長いシグナルが見られた (Fig. 19)。このシグナルは、継続時間が約 20 秒と短く、電車音のシグナルのように時間経過と共に振幅が変化するわけではなく、一定の強さで、始まりも終わりも急に訪れる。このとき隣接する我孫子市根戸小学校 (NDOM, FK17) や柏市手賀西小学校 (TGNM, FK19) でも、同様なシグナルが見られた。また、このシグナルが赤く表示されていることから、衝撃もかなり強かったことが推測される。

3.6 オーロラ状ノイズ

ノイズの要因は、外的なものだけでなく内的なものも考えられる。外的な要因とは、外部の振動によって地面が揺れ、それが地震計に伝わるもの。そして、内的な要因とは、自らの電気的な発振によって見かけ上振動しているように見えるもので、実際に地震計が振動しているわけではない。前者は、地震計が揺れを感知しているため三成分共に揺れが見られるが、後者は実際に揺れていないため、ある一つの成分にしか出現しないことが多いのが特徴である。ここまで見てきたものは、外的な要因のため、三成分共にシグナルが現れていた。しかし、スペクトログラムを見ていると、あるひとつの成分にだけ現れるシグナルが見られる。これは、内的な要因によるものと考えられる。今回導入した地震観測システムは、地下容器内に地震計とデジタル変換器を収めるという新しい装置である。そのため、地下容器内の回路基板や地震計そのものに起因したノイズがあるのかもしれない。

Fig. 20 は、弥生観測点の 2008 年 2 月 19 日の 1 日間のスペクトログラムである。上下動成分にだけ、顕著な帯状のシグナルが見られる。このようなシグナルは、他の時間帯や、他の観測点でも広く見られた。この特徴をまとめると以下のようなものである。

- ① ある一成分だけに出現する。
- ② 狭い周波数帯 (数 Hz) に集中しているが、その周波数や強さは一定ではなく、時間とともに徐々に変化

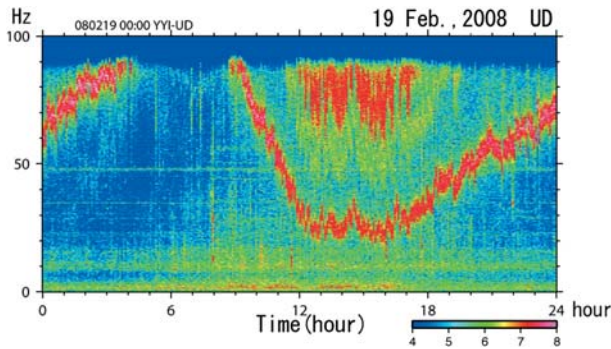


Fig. 20. Spectrograms of each component at YYIM from 0: 00 to 24: 00 on 19 Feb., 2008. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. (a) UD, (b) NS, (c) EW.

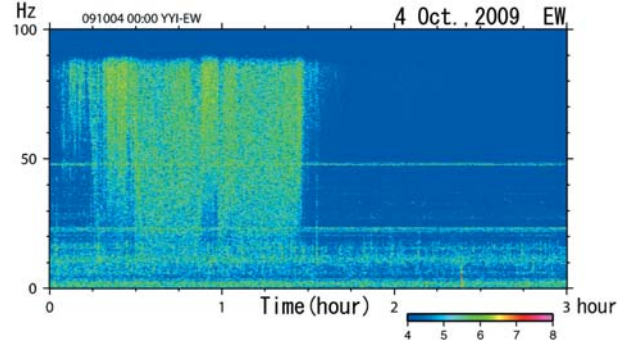


Fig. 21. Spectrograms at YYIM. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. EW-component from 0: 00 to 2: 00 on 4 Oct., 2009.

していく。

- ③ 高周波数側（80 Hz 程度）から始まり、時間と共に徐々に卓越周波数が下がる。場合によっては、直流成分近くまで下がることもある。
- ④ その後、徐々に周波数が高くなり、アンチエイリアスフィルターの帯域外（80 Hz 以上）になって見えなくなる。
- ⑤ 二重の帯に見えることもある。
- ⑥ 帯状のノイズの周辺に、もやとした霞状のノイズを付随することがある。
- ⑦ 帯状ノイズがなく霞状のものだけが出現する場合もある（Fig. 21）。
- ⑧ 出現する時間帯や成分は一定ではなく、ほぼ全ての観測点で見られた。

その特徴からオーロラ状ノイズと呼ぶことにした。これらのオーロラ状ノイズは、内的な要因によって引き起こされたものと考えられるため、地震計や回路基板、電源回路等の設計を見直した。その結果、加速度計内部の発振周波数とスイッチング電源の発振周波数とが近接する場合に、このような共振が発生する可能性が指摘された。そこで、スイッチング電源の数を減らして、共振が起きる可能性を減らし、電源フィルタを導入することでオーロラ状ノイズの低減を図った。修正を加えた後にも出現はするが、その振幅を大幅に減らすことができた（Fig. 22）。

4. おわりに

首都直下地震防災・減災特別プロジェクトで平成 19 年度および平成 20 年度に設置した 178 観測点に関して、スペクトログラムを作成し、ノイズの詳細を調査した。様々なノイズが収録されたが、特に内的な要因で発生し

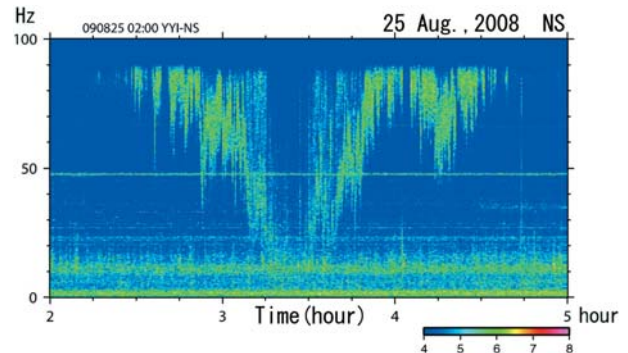


Fig. 22. Spectrograms at YYIM. Color indicates amplitude strength: blue is normal level and red is strong. NS-component from 2: 00 to 5: 00 on 25 Aug., 2009.

ていた「オーロラ状ノイズ」が発見されたことは、その後の回路修正につながり、観測装置の質の向上に大いに寄与したと言える。

都市部での観測では不可避な、電車や自動車の通行によるノイズに関しては、定量的な評価を行ったことにより、線路や道路との距離がどの程度必要であることを示すことができた。今後の場所選定の参考として役立つように、引き続き調査を続けていく。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり査読者の篠原雅尚准教授から有益な指摘をいただきました。この研究は、文部科学省の委託研究事業「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」（代表：平田 直）の一環として行われた。

参考文献

中央防災会議，2005，首都直下地震対策専門委員会報告。

- 平田 直編, 2008, 科学技術振興費 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ① 首都圏でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等, 平成 19 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局, 東京大学地震研究所.
- 平田直 編, 2009, 科学技術振興費 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ① 首都圏でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等, 平成 20 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局, 東京大学地震研究所.
- 平田 直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・額額一起, 2009, 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト ①「首都圏周辺でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等」の概要, 地震研究所彙報, **84**, 41-56.
- 地震調査研究推進本部, 2004, 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価.
- 笠原敬司・酒井慎一・森田裕一・平田 直・鶴岡 弘・中川茂樹・楠城一嘉, 小原一成, 2009, 首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開, 地震研究所彙報, **84**, 71-88.
- 宮川幸治・酒井慎一, 2008, 地震波形の時間周波数解析ツールの開発—首都圏中感度地震観測網 (MeSO-net) 構築におけるノイズ調査への適用—, 地震研究所技術研究報告, **14**, 13-22.
- 森田裕一・酒井慎一・中川茂樹・笠原敬司・平田 直・鏡 弘道・加藤拓弥・佐藤峰司, 2009, 首都圏地震観測網 (MeSO-net) のデータ伝送方式について—自律協調型データ送信手順 (ACT protocol) の開発—, 地震研究所彙報, **84**, 89-105.
- 中川茂樹・鶴岡 弘・川北優子・酒井慎一・平田 直, 2009, 首都圏地震観測網データセンターの構築と運用, 地震研究所彙報, **84**, 107-114.
- 酒井慎一・平田直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, 地震研究所彙報, **84**, 57-69.

(Received November 30, 2009)

(Accepted January 4, 2010)