

LTE 信号の電波干渉による GNSS 観測への影響と対策 Effect of LTE Signal on Geodetic GNSS Observation and its Mitigation

測地観測センター 佐藤明日花・三浦優司・中久喜智一・鈴木啓¹・
三木原香乃¹・福崎順洋・畑中雄樹・辻宏道

Geodetic Observation Center

Asuka Sato, Yuji Miura, Tomokazu Nakakuki, Akira Suzuki, Kano Mikiharu,
Yoshihiro Fukuzaki, Yuki Hatanaka and Hiromichi Tsuji

要 旨

国土地理院が運用する電子基準点の一部において、2013 年から信号強度が低下し、解析結果の上下成分に見かけの周期的な変動が検出され始めた。原因を調査したところ、LTE (Long Term Evolution) と呼ばれる携帯電話の高速データ通信サービスが 2012 年頃から全国で展開され、GNSS の L1 帯付近の周波数帯 (1.5 GHz 帯) を利用し始めた時期と一致していた。そこで、見かけの周期的な変動を LTE (1.5GHz 帯) 信号の電波干渉による異常と仮定し、帯域フィルターやアッテネータ (減衰器) で信号を抑制し、電波干渉による影響の軽減を試みた。その結果、上下方向のみに発生する異常な変動が改善された。その後、解析結果に異常が認められた特定の電子基準点にアッテネータの導入を進めた。また、LTE 信号の影響を受けにくいとされる GNSS アンテナを用いた試験観測を行い、有効性を検証した。

1. はじめに

国土地理院では、現在全国約 1,300 か所に電子基準点を設置し、観測データを提供するとともに、地震や火山活動に伴う地殻変動の監視を行っている。電子基準点で覆う世界最大級の GNSS 連続観測網は、測量、地殻変動観測、地震火山防災に不可欠なツールであるばかりでなく、i-Construction や自動運転等の測位、天気予報等に役立つ社会インフラとなっている (辻ほか, 2017)。

電子基準点は一部の例外を除き GPS 衛星のほか、準天頂衛星、GLONASS 衛星、Galileo 衛星の電波を受信することができる。最新の GNSS アンテナは、従来の GPS 用アンテナよりも多様な衛星測位システムの信号を受信する必要があり、より広範囲な周波数帯に対応した設計となっている (図-1)。このことは、地上電波等のノイズの影響を受けやすいことも意味する。近年、携帯電話会社は LTE と呼ばれる高速データ通信サービス (以下「LTE サービス」という。) を全国で展開している。これには GNSS 衛星の L1 帯 (1.56GHz-1.61GHz) に隣接する 1.5GHz 付近の電波を利用するものが存在する。

2013 年 6 月以降、電子基準点「函館」において、

定常解析結果の上下成分に異常な周期的変化が検出された。この異常な変化が地盤の上下変動かどうかを確認するため、2014 年 9 月に水準測量を実施したが、定常解析結果から期待される上下変動は検出されなかった。したがって、電子基準点「函館」で検出された異常な上下変化は実際の変動ではなく、何らかの原因による見かけの変動 (以下「見かけの上下変動」という。) であることが判明した。その後、電子基準点「函館」以外にも複数の電子基準点において同様の現象が確認された。

本稿では、この見かけの上下変動の原因の候補として、LTE 信号による電子基準点への電波干渉を取り上げ、その因果関係を明らかにするとともに、見かけの上下変動の軽減方法を評価・検証し、対策を検討する。

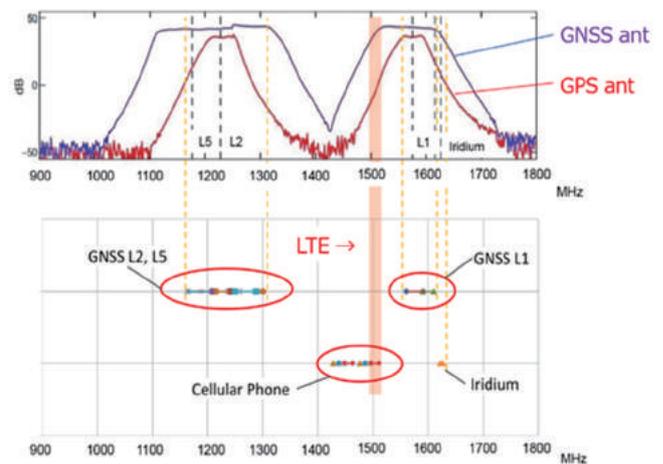


図-1 GNSS アンテナ、GPS アンテナの周波数特性及び GNSS、LTE 信号 (1.5GHz 帯)、Iridium 端末の使用周波数

※UNAVCO のサイト (UNAVCO, 2017) の図に加筆

2. 電子基準点で発生した現象とその特徴

電子基準点「函館」では、2013 年 6 月頃から見かけの上下変動 (振幅: 2~5cm, 周期: 2~3 週間の周期変動) が検出された (図-2)。一方、水平成分には異常は特に確認できない (図-2)。また、見かけの上下変動が起こり始めたのと同じ時期に L1 及び L2 信

号のSN比 (Signal-to-Noise ratio) が低下していることが判明した。

電子基準点「焼津 A」では、2014年3月頃から見かけの上下変動 (振幅: 2~3cm, 周期: 5~6週間の周期変動) が検出され, SN比が低下し, 電子基準点「函館」とは, 振幅と周期が異なっていた (図-3)。

見かけの上下変動には次のような特徴が見られる。

- 1) 上下成分のみに見られる。
- 2) 周期は2~8週間程度。
- 3) 振幅は時期によって変化することがある。
- 4) 電離層フリー線形結合 (LC) またはL1のみを用いた解析結果に現れるが, L2のみによる解析結果には見られない (図-4)。
- 5) 解析に用いる観測量や対流圏遅延量の推定の有無によって振幅や位相が異なる。

2014年4月以降同様の変動が検出された電子基準点は徐々に増え, 2016年9月時点で20点となった (表-1)。これらの電子基準点については見かけの上下変動の振幅が2~5cmに達しているため, 2016年9月から「GNSS測量による標高の測量マニュアル」による公共測量で使用しないよう指導している。

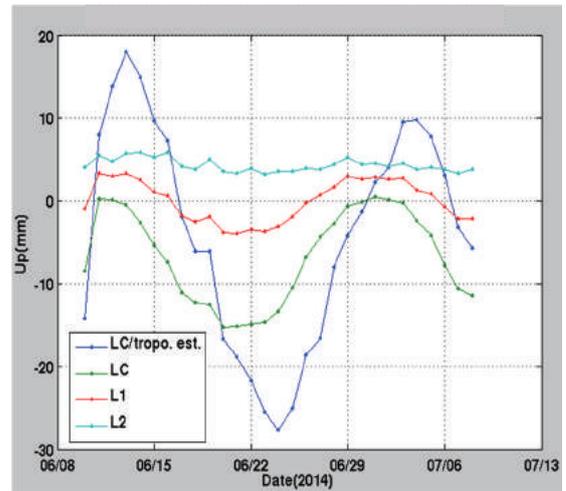


図-4 電子基準点「函館」における比高変化グラフ

表-1 LTE信号の電波干渉と思われる見かけの上下変動が発生した電子基準点

No.	名称	電子基準点 ID	都道府県
1	厚岸	950125	北海道
2	函館	940022	北海道
3	八郷	93002	茨城県
4	大宮	93013	埼玉県
5	越谷	950224	埼玉県
6	千葉松尾	93024	千葉県
7	足立	93016	東京都
8	神奈川川崎	93026	神奈川県
9	厚木	93029	神奈川県
10	R麻績	99R006	長野県
11	東部	950268	長野県
12	更埴	020984	長野県
13	塩尻	950273	長野県
14	御殿場	93038	静岡県
15	焼津 A	990840	静岡県
16	楠	950309	三重県
17	大阪	950336	大阪府
18	新富	960713	宮崎県
19	指宿	950490	鹿児島県
20	石垣2	960750	沖縄県

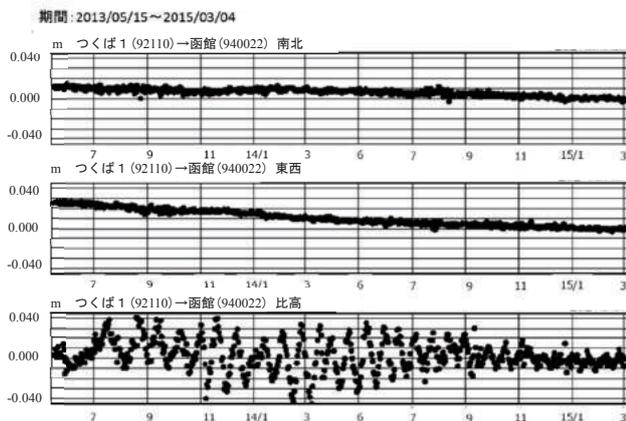


図-2 電子基準点「函館」における成分変化グラフ

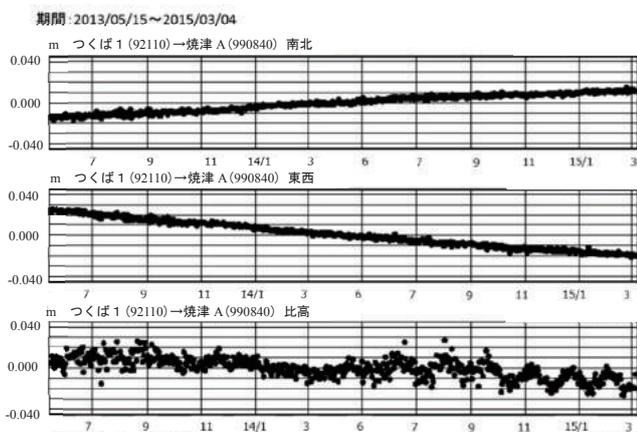


図-3 電子基準点「焼津 A」における成分変化グラフ

3. 原因の推定

見かけの上下変動が検出された電子基準点は特定のメーカー (Trimble 社) の GNSS 受信機とチョークリングアンテナが使用されている共通点があり, 機器に内在する何らかの要因が現象に関与しているものと推定される。また, これらの電子基準点の周囲 (概ね 1km 以内) には携帯基地局があることから, その電波が特定の機器に影響した可能性が疑われる。実際, 携帯電話会社の協力を得て調査した結果, これ

らの電子基準点において SN 比の低下が発生した時期は、携帯基地局から LTE サービスを開始した時期とほぼ一致していることが判明した (図-5)。また、電子基準点「函館」の GNSS アンテナで受信した信号を出力し、スペクトラムアナライザで直接測定した結果、L1 帯付近の周波数帯である 1.5GHz 付近に強い信号が検出された (図-6)。周囲 (概ね 1km 以内) に携帯基地局が全くなく、見かけの上下変動が発生していない電子基準点「七飯」における測定も比較対象として図-6 に示した。電子基準点「七飯」では、電子基準点「函館」で測定されたような 1.5GHz 付近の強い信号は見られない。

以上の結果から、受信周波数帯域の広い GNSS アンテナでは隣接周波数帯の LTE 信号を受信していることが強く示唆される。電波干渉の影響としては、GNSS アンテナへの入力信号を直接歪ませる作用の他に、入力信号の振幅がアンテナまたは受信機内のアンプ (増幅器) のダイナミックレンジの範囲を超え (飽和し)、スケールアウトが引き起こされることにより、その出力を歪ませる可能性も考えられる。すなわち、SN 比低下の要因として強い LTE 信号を受信することにより、狭帯域の L1 及び L2 信号 (S) に対してノイズ (N) が増加するとともに、アンプの飽和によって L1 及び L2 信号 (S) の一部に欠落が生じ、出力信号が歪んでいる可能性がある。

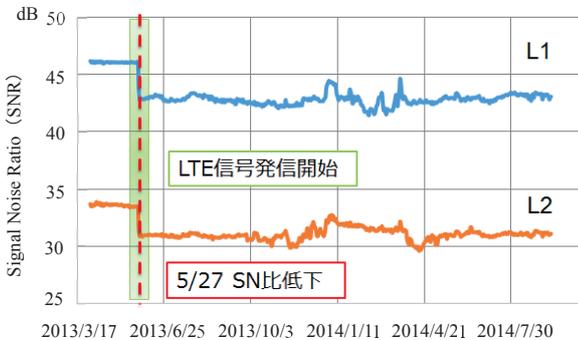


図-5 電子基準点「函館」における SN 比の変化

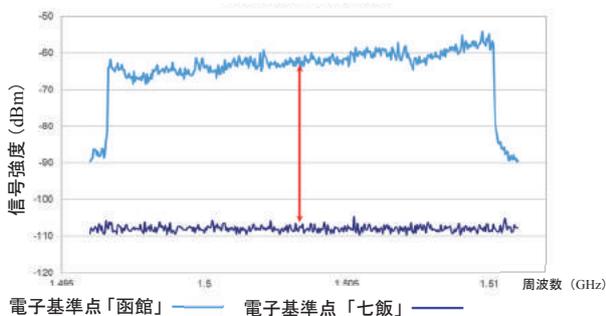


図-6 電子基準点「函館」・「七飯」の信号強度 (1.5GHz 帯)

4. 対応策

4.1 対応策の検討

前章の考察を踏まえ、LTE 信号の電波干渉を見かけの上下変動の原因とする仮説に基づいて、その対応策を検討する。この場合、電子基準点において、1.5GHz 付近の強い電波干渉の影響を低減する手段として、次の3つが考えられる。

- 1) 帯域フィルターの挿入。
- 2) アッテネータ (減衰器) の挿入。
- 3) 電波干渉対策アンテナへの換装。

まず、帯域フィルターは、不要な周波数の信号 (ノイズ) を選択的に抑圧することによって、必要な信号を減衰させることなく干渉を防ぐ効果が期待される。ただし、帯域フィルターには一般的に遮断周波数付近の位相を変化させ、温度によって周波数特性が変化するなどの副作用もある。

次に、アッテネータ (写真-1) は GNSS アンテナが受信する信号全体を減衰させる装置である。受信機内のアンプの飽和が原因である場合、それを解消し、見かけの上下変動を改善することが期待される。さらに周波数依存性がないというメリットがあり、価格も安い。しかし、信号全体を減衰させるため SN 比は完全に戻らないほか、減衰量に上限があるというデメリットもある。

最後に、近年、LTE 信号の電波の影響が受けにくくなるように設計された GNSS アンテナ (以下「電波干渉対策アンテナ」という。) が複数のメーカーで開発されている。先の2つの手段は、信号が受信機に入力する手前でアンテナからの出力を処理するものだが、この方法はアンテナ内部のプリアンプ手前でフィルター等によりノイズの周波数帯域を減衰させるものであり、アンテナのプリアンプの飽和を防ぐ効果が期待される。ただし、導入には最もコストがかかる。3つの対応策について以下の章で検証する。



写真-1 電子基準点に導入したアッテネータ (DC パス型)

4.2 帯域フィルターの挿入

電子基準点「焼津 A」において、アンテナと受信機

の間に帯域フィルターを挿入し、試験観測を行った。使用した帯域フィルターは、L1 帯及び L2 帯の電波感度を維持しつつ LTE 信号をカットすることができる。その結果、見かけの上下変動及び SN 比ともに改善し効果が見られた (図-7, 図-8)。ただし遮断周波数付近で位相に影響与える可能性は払拭できていない。

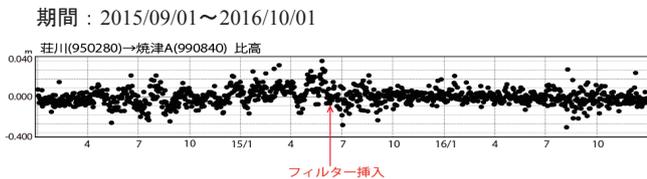


図-7 電子基準点「焼津 A」における比高変化グラフ

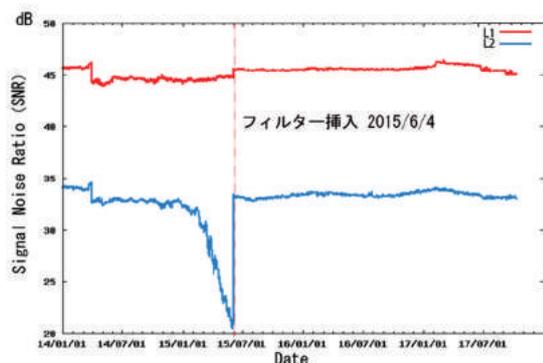


図-8 電子基準点「焼津 A」における SN 比変化グラフ

4.3 アッテネータの挿入

次に、電子基準点に導入する適切なアッテネータを選定するにあたって、適切な減衰量を把握するため国土地理院構内で試験観測を実施した。

まず、国土地理院構内の電波環境をスペクトラムアナライザ測定した結果、1.5GHz 付近に $-70 \sim -80$ dB と高い強度の信号が見られた (図-9)。国土地理院周辺にも携帯基地局があることから、LTE 信号の影響を受けている環境といえる。しかし、国土地理院構内にある電子基準点「つくば 1」・「つくば 3」では、見かけの上下変動や SN 比の低下は見られていない。このことから、1.5GHz 付近の信号強度が $-70 \sim -80$ dB 程度であれば電子基準点の測位結果には影響を及ぼさないと推測した。一方、電子基準点「函館」や「越谷」などの見かけの上下変動が発生している点における測定結果は、 $-50 \sim -60$ dB と国土地理院構内よりさらに高い信号強度を示している (図-9)。したがって、見かけの上下変動を改善させるためには、国土地理院構内で測定した LTE 信号の信号強度と同程度まで減衰させれば良いと推測した。

次に、LTE 信号の電波干渉を受け、見かけの上下変動や SN 比の低下が発生している電子基準点「越谷」において、アッテネータの減衰効果を確認した。具体

的には、アッテネータの減衰量を調整し、LTE 信号の信号強度を国土地理院構内と同程度まで減衰させた (図-9)。その結果、帯域フィルターと同様に見かけの上下変動と SN 比に改善が見られた (図-10, 図-11) (辻ほか, 2016)。なお、図-10 では、アッテネータ挿入により SN 比に少し改善が見られるが、これは、第 3 章で述べたように強い LTE 信号の干渉によりノイズ (N) の増加とアンプの飽和による信号 (S) の欠落の両方が引き起こされていたとすると、アッテネータ挿入によりアンプの飽和が解消されて信号 (S) が欠落しなくなったことによる SN 比の改善を示唆している。ただし、LTE 信号に起因するノイズ (N) は除去できないので、SN 比は完全には回復していないと考えられる。

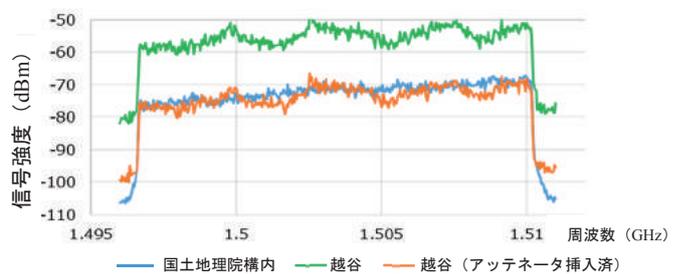


図-9 電子基準点「越谷」でのアッテネータ挿入前後の信号強度と国土地理院構内での信号強度

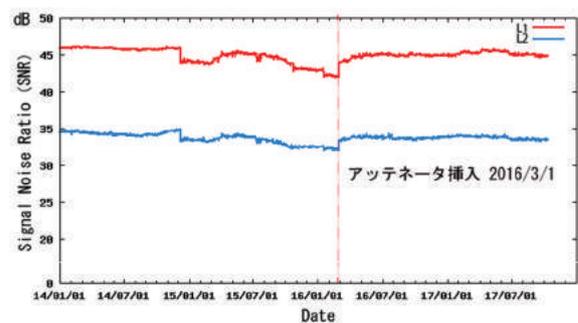


図-10 電子基準点「越谷」における SN 比変化グラフ

期間：2015/09/01～2016/10/01

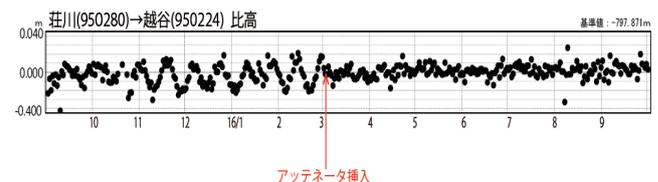


図-11 電子基準点「越谷」における比高変化グラフ

4.4 電波干渉対策アンテナの使用

最後に、電波干渉対策アンテナの効果を検証するための試験観測を電子基準点「足立」で実施した。「足

立」を試験観測の場とした理由は、下記のとおりである。

- 1) 4 台のアンテナを本点周囲の特殊な架台に取り付けることができ、同一地点において各アンテナの性能が比較可能であること（写真-2）。
- 2) 電子基準点「足立」は、LTE 信号の電波干渉を受け、アッテネータを導入した電子基準点であり、現在も LTE 信号の電波干渉の影響下にあると考えられること。

使用した電波干渉対策アンテナは、Topcon TCR-G5-C 及び Trimble GNSS-Ti v2 の 2 台のチョークリングアンテナであり、本点周囲の試験観測用架台に設置した。また、電波干渉対策アンテナの性能を評価するため、アッテネータ挿入済みの Trimble TRM59800.80 及びアッテネータを挿入していない Trimble TRM59800.80 を併せて試験観測用架台に設置した。なお、GNSS 受信機については全て Trimble NetR9 を用いた。

スペクトラムアナライザで信号強度を測定したところ、アッテネータを挿入していない Trimble TRM59800.80 に比べて電波干渉対策アンテナ（Topcon TCR-G5-C、Trimble GNSS-Ti v2）で受信した信号は 1.5GHz 帯付近の信号強度が低下していることが確認された（図-12）。なお、L1 帯の電波強度は維持する仕様のため、GNSS 信号の信号強度は低下していない。



写真-2 電子基準点「足立」

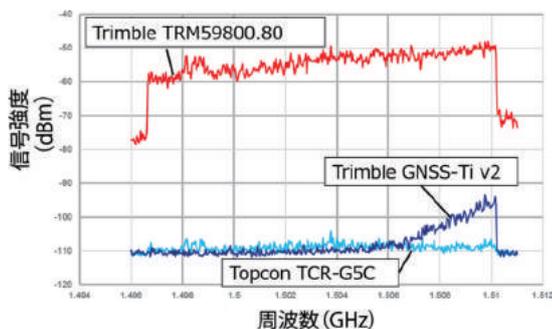


図-12 各アンテナで取得した 1.5GHz 帯付近の信号強度

得られた観測データを用いて基線解析を実施した結果、2 台の電波干渉対策アンテナ（Topcon TCR-G5C、Trimble GNSS-Ti v2）はアッテネータを挿入していない Trimble TRM59800.80 と比べて、見かけの上下変動が軽減していた。また、2 台の電波干渉対策アンテナ（Topcon TCR-G5C、Trimble GNSS-Ti v2）は、アッテネータ挿入済みの Trimble TRM59800.80 の解析結果と近い値であった（図-13）。上記のことから、試験を行った 2 台の電波干渉対策アンテナは LTE 信号の電波干渉に対して効果的であることが確認された。

4.5 電子基準点における当面の措置

検討した結果、下記の点から、当面、見かけの上下変動が発生している電子基準点にアッテネータを導入することとした。

- 1) 見かけの上下変動の低減について帯域フィルターと同程度の効果が試験観測で確認できたこと。
- 2) 帯域フィルターは観測信号の位相に影響を与える可能性があること。
- 3) 安価であること。

なお、電子基準点「越谷」の試験観測で使用したアッテネータは DC ブロック型であり、受信機からアンテナ内の増幅器へ供給する必要のある直流電流を減衰させるデメリットがあったため、直流電流を減衰することなく供給することが可能な DC パス型のアッテネータを用いることとした（三木原ほか、2016）。

2017 年 2 月までに見かけの上下変動が見られる電子基準点 20 点のうち 18 点にアッテネータを導入する対応を実施した。アンテナと受信機の間にはアッテネータ挿入時にはスペクトラムアナライザを用いた測定を行い、受信している信号強度が国土地理院構内と同程度まで下がっていることを確認した。また、アッテネータ挿入後の観測データから見かけの上下変動と SN 比が改善していることも併せて確認した。残る 2 点のうち「神奈川川崎」については、携帯電話会社から携帯基地局のアンテナ角度を微調整したとの情報提供を受けて、見かけの上下変動や SN 比を確認したところ、データの品質が改善していたため導入を見送った。また「焼津 A」は試験的に帯域フィルターを入れて現象が改善されたため、帯域フィルターを引き続き使用している。

この結果を受け、2017 年 2 月に「GNSS 測量による標高の測量マニュアル」で使用しないよう指導していた電子基準点 20 点のうち 19 点まではこの指導を解除できた（表-1）。残念ながら、電子基準点「大阪」は、アッテネータ導入による見かけの上下変動の改善が不十分であり、まだ若干の周期的な上下変動が残っていることから、指導措置の解除を見送ることとなった。電子基準点「大阪」については受信機を

他メーカーのものに交換する等の対応を実施し、データの確認を進めている（佐藤ほか，2017）。

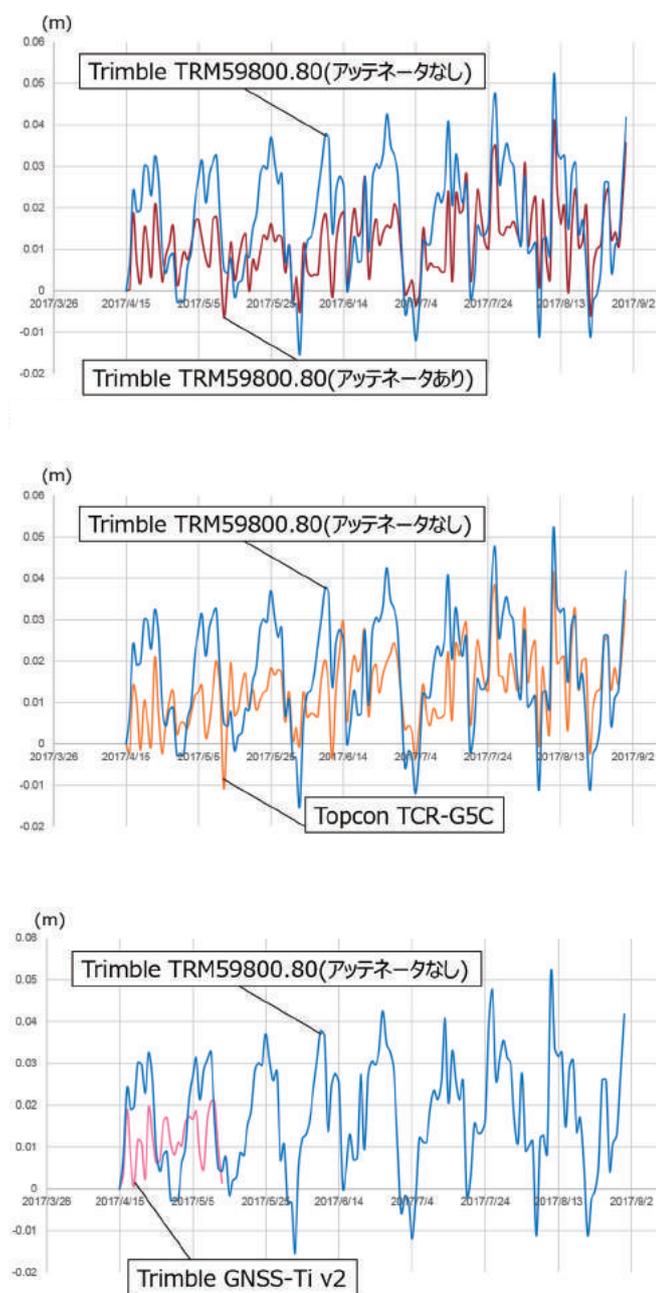


図-13 各アンテナで取得したデータにおける比高変化グラフ

- (上) TRM59800（アッテネータなし）と TRM59800（アッテネータあり）の比較
- (中) TRM59800（アッテネータなし）と Topcon TCR-G5C の比較
- (下) TRM59800（アッテネータなし）と Trimble GNSS-Ti v2 の比較

5. 今後の課題

第 4 章でも述べたとおり，アッテネータの導入が

見かけの上下変動の改善に有効であった。周波数によらず信号を減衰させるだけで効果があることは，受信機内のアンプの飽和を防ぐことが功を奏した可能性を示唆する。また，アッテネータの挿入位置は受信機への信号入力の手前であるため，この改善結果は電波干渉が見かけの上下変動を生じさせる要因が，アンテナ内部よりも受信機内部の処理にあることを支持するものである。受信周波数帯域の広い GNSS アンテナを通過した隣接周波数帯の LTE 信号によって受信機内のアンプが飽和し，見かけの上下変動の発生に何らかの形で関与した可能性が考えられるが，そのメカニズムについては解明には至っていない（例えば，Fukuzaki et al., 2017）。そのため，本稿で検討した対策は限られた経験に基づく対処療法であり，それが有効である条件や限界は明らかとなっていない。実際，電子基準点「大阪」のように効果が不十分である事例もある。アッテネータ等による対策の適用範囲や，それを越えた場合の対応への見通しを得るためにもメカニズムの解明は重要であり，今後それに向けて，現象のより詳細な調査や理論的な検討を継続する必要がある。

また，Trimble 社製以外の受信機については見かけの上下変動は確認されていないが，TOPCON 社製の受信機にアッテネータを導入したところ，受信衛星数低下の解消，SN 比の改善，低仰角にある衛星に見られたノイズの低減が確認された事例がある。他メーカーの受信機についても電波干渉の影響の有無を調査する必要がある。

6. まとめ

一部の電子基準点で 2013 年から解析結果に上下方向の周期的な変動が検出され始めた。調査の結果，日本全国で 2012 年頃から展開されている LTE サービスのうち，GNSS の L1 帯に隣接した 1.5GHz 帯を使用するものがあり，その基地局が電子基準点付近に存在し，電波の送信開始時期が見かけの上下変動が始まった時期とほぼ一致することが確認された。受信周波数帯域の広い GNSS アンテナが隣接周波数帯の LTE 信号を受信したことにより，受信機内のアンプが飽和し，その見かけの上下変動や SN 比の低下が生じているとの仮説のもと，以下の 3 つの対策を考え，試験観測によってその効果を調査した。

- 1) 帯域フィルターの挿入。
- 2) アッテネータの挿入。
- 3) 電波干渉対策アンテナへの換装。

いずれも効果が認められたが，電子基準点における当面の措置として位相への影響がなく安価なアッテネータを見かけの上下変動が見られる電子基準点に導入し，改善を図った。その結果，18 点において見かけの上下変動が改善したことから，アッテネー

タの挿入による対策が有効であると言える。ただし、電子基準点「大阪」では改善が不十分であり、そのようなケースについては更なる検討が必要である。

一方、フィルター等によりノイズ対象の周波数帯域のみを減衰させるよう設計された電波干渉対策アンテナはアッテネータの挿入よりも優れている点があり、引き続き有効性の検証を進めていく。また、電波干渉が周期的な見かけの上下変動を発生させるメカニズムは今も不明であるため、試験観測等を実施しそのメカニズムの解明を目指す。

携帯基地局の増設に伴い、1.5GHz 帯の電波干渉の影響による見かけの上下変動が解析結果に生じる電

子基準点の出現が今後も懸念される。電子基準点データの解析結果を注意深く監視し、電波干渉の影響が確認された際には、迅速に対策を講ずる予定である。

謝 辞

今回、電波干渉対策アンテナの試験観測で用いた Trimble GNSS-Ti v2 の観測データを提供していただいたニコン・トリンプル社及び LTE サービス開始時期等の情報を提供していただいた携帯電話会社に謝意を表す。

(公開日：平成 29 年 12 月 22 日)

参 考 文 献

- Fukuzaki Y., T. Nakakuki, Y. Miura, A. Sato and H. Tsuji (2017) :Radio Frequency Interference in GNSS Observations by Artificial Signals for Mobile Phones, IVS NICT TECHNOLOGY DEVELOPMENT CENTER NEWS, 37, in press.
- 三木原香乃, 鈴木啓, 中久喜智一, 佐藤明日花, 古屋智秋, 辻宏道 (2016) : LTE (1.5GHz 帯) 周波数電波によって発生する GNSS 観測への影響と対策, 日本測地学会第 126 回講演会要旨集, 7-8.
- 佐藤明日花, 三浦優司, 中久喜智一, 福崎順洋, 辻宏道 (2017) : LTE (1.5GHz 帯) 周波数電波によって発生する GNSS 観測への影響と対策 (その 2), 日本測地学会第 127 回講演会要旨集, 123-124.
- 辻宏道, 畑中雄樹, 佐藤雄大, 古屋智秋, 鈴木啓, 村松弘規, 犬飼孝明, 三木原香乃, 高松直史, 中久喜智一, 藤原智, 今給黎哲郎, 飛田幹男, 矢来博司 (2016) : 隣接周波数電波の GNSS 観測への影響, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, SGD23-P07.
- 辻宏道, 畑中雄樹, 檜山洋平, 山口和典, 古屋智秋, 川元智司 (2017) : GEONET 運用 20 年 : 課題と展望, 国土地理院時報, 129, 85-111.
- UNAVCO (2017) : Instrument/Equipment Development & Testing, <http://www.unavco.org/instrumentation/instrumentation-help/development-testing/development-testing.html> (accessed 10 Nov. 2017) .