解析手法の異なる GNSS 測位解の整合性に関する研究（第 3 年次）

実施期間　　令和元年度～令和 4 年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室　中川　弘之

1. はじめに

現在,国土地理院では,いわゆる GEONET 定常解析システムのほか,業務及び研究において REGARD（RTK，PPP）（Kawamoto，2018）や宗包（2017）による後処理 PPP 解析システム等，複数の GEONET データの解析システムが運用されている．これらのシステムはそれぞれ異なる解析戦略に基づいて電子基準点の座標解を算出している．

また，国土地理院では昨年度から，JAXA が開発したソフトウエア MADOCA を用いて，GPS，GLONASS に準天頂衛星システム（QZSS）を加えた後処理暦の生成を試験的に実施している（阿部ほか，2021）．宇宙測地研究室では，この後処理暦を用いて全国の電子基準点の座標値を PPP-AR で算出し，特別研究「災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究」（令和 2 年度～6 年度）において，任意の観測エポックにおける電子基準点の座標値を迅速かつ固定点に依存しない形で取得するために使用できないかを検討している．

これらの座標解はそれぞれの精度の範囲内で整合すべきものである．そこで本研究は，現在，国土地理院が運用している異なるシステムの座標解間や，これらと海外の機関が提供する PPP サービスによる解との整合性を調査することを目的とする．本研究によりこれらの解同士の整合性が保証されれば,それらの解を組み合わせて測地基準系の構築や地殻変動の算出を行うことの妥当性が保証される．逆に，ある解にだけ有意な系統差が生じていれば，その解の解析に何らかの問題があることが示唆され，それを調査し修正することによって解のさらなる品質向上に寄与することとなる．

本稿では，国内の IGS 観測点における IGS 解（daily solution），GEONET 定常解析の F5 解，後処理 PPP 解析システム及び国土地理院で生成した後処理暦を用いて計算した PPP-AR 解との間の整合性の調査の際に見られた，①受信機のファームウエアのバージョンと解析パラメータの設定に起因する現象と，②観測局 MCIL（南鳥島）における F5 解と IGS 解の間のバイアスについて報告する．

2. 解析の概要

2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日までの 2 年間の期間，日本国内の STK2（新十津川 A），ISHI（石岡），TSKB（つくば），TSK2（つくば 2A），AIRA（姶良），CCJ2（父島 A），MCIL（南鳥島）の 7 つの IGS 観測点について，GEONET 定常解析の F5 解，後処理 PPP 解析システムの解，国土地理院で生成した後処理暦を用いて算出した PPP-AR 解（以下「本研究の解」という．）の IGS 解（daily solution）からの三成分のずれを日々計算し，その時系列を比較した．なお，後処理 PPP 解析システムの解と本研究の解については，日々PPP-AR で求まる 30 秒間隔の時系列の日平均をとり，これを IGS 解と比較した．比較を行った 3 つの解の解析方法の概要を表-1 に示す．

3. 結果と考察

3.1 受信機のファームウエアのバージョンと解析パラメータの設定に起因する現象

結果の一例として，図-1 に IGS 観測点 AIRA について，横軸に日付，縦軸に IGS 解からのずれをプ

表-1　解析方法の比較．黄色のハッチは共通する要素を示す．

	本研究の解	後処理 PPP 解析システムの解	GEONET 定常解析（F5 解）
解析方法	PPP-AR キネマティック法	PPP-AR キネマティック法	相対測位 スタティック法
座標系	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014
使用衛星	GPS，GLONASS，準天頂衛星	GPS，GLONASS	GPS
暦	国土地理院が生成した後処理暦	システム内で推定	IGS 最終暦
暦推定ソフトウエア	MADOCA	MADOCA	―
解の時間分解能	30 秒（比較には日平均値を使用）	30 秒（比較には日平均値を使用）	1 日
測位解析ソフトウエア	RTKLIB	RTKLIB	BERNESE

ロットしたグラフを示す．縦軸が 0 ということは，座標値が IGS 解と同じことを意味する．これを見ると，一部の期間を除いて 3 つの解は IGS 解とほぼ一致していることがわかる．一方，2021 年 1 月末から同年 8 月半ばにかけて，本研究の解だけが他の解と大きくずれ，かつばらつきも大きくなっている．また，その期間はかなりシャープに分かれている．他の IGS 観測点についても，CCJ2 を除いて同様な現象が見られたが，その期間は観測点によって必ずしも同じではなかった．

IGS 解からのずれが見られる期間が観測点によって異なること，とくに CCJ2 ではこの現象が見られないことから，その原因は衛星軌道など観測点に共通するものではなく，観測点固有の事項だと考えられた．そこで，STK2（新十津川 A），ISHI（石岡），TSKB（つくば），TSK2（つくば 2A），AIRA（姶良），CCJ2（父島 A）の 6 局について，IGS のサイトログから各観測局の受信機及び受信機ファームウエアの履歴を調べ，それを時系列と比較した．その結果，CCJ2 を除く全観測点について，ずれが生じた期間と，受信機が TRIMBLE ALLOY でかつファームウエアのバージョンが 5.37 であった期間とが非常によい一致を示した（図-2）．さらに異常が見られなかった CCJ2 では，この受信機とファー

図-1　IGS 観測点 AIRA における F5 解，後処理 PPP 解析システムの解及び本研究の解と，IGS 解との差の時系列．（青：F5 解，黄：後処理 PPP 解析システムの解，緑：本研究の解）

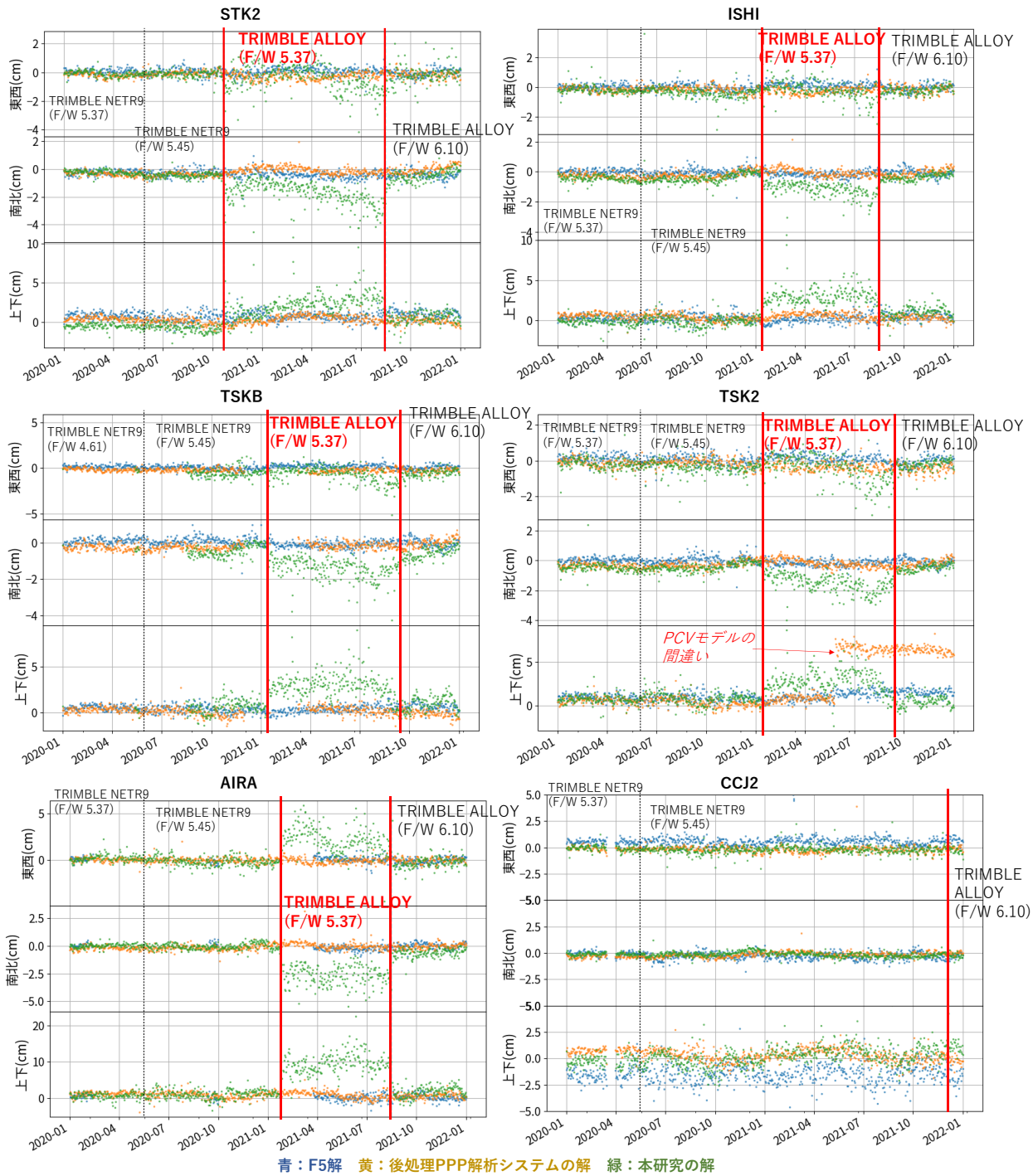


図-2　6 つの IGS 観測点における 3 種類の解と IGS 解との差の時系列と，GNSS 受信機の比較
（青：F5 解，黄：後処理 PPP 解析システムの解，緑：本研究の解）
注：TSK2 局の後処理 PPP 解析システムの時系列で 2021 年 5 月後半にステップが見られるのは，解析にアンテナの交換が反映されていなかったため．

ムウエアの組み合わせが用いられていないこともわかった．以上により，本研究の解の IGS 解からのずれには，受信機とファームウエアの特定の組み合わせが関係していることが強く示唆された．

一方，後処理 PPP 解析システムの解ではこのような IGS 解からのずれは見られない．そこで，その原因を調べるために，観測点 STK2 で，上記の受信機・ファームウエアの組み合わせで本研究の解が IGS からのずれが大きかった日と，ファームウエアが上記のものではなくてずれが小さかった日の

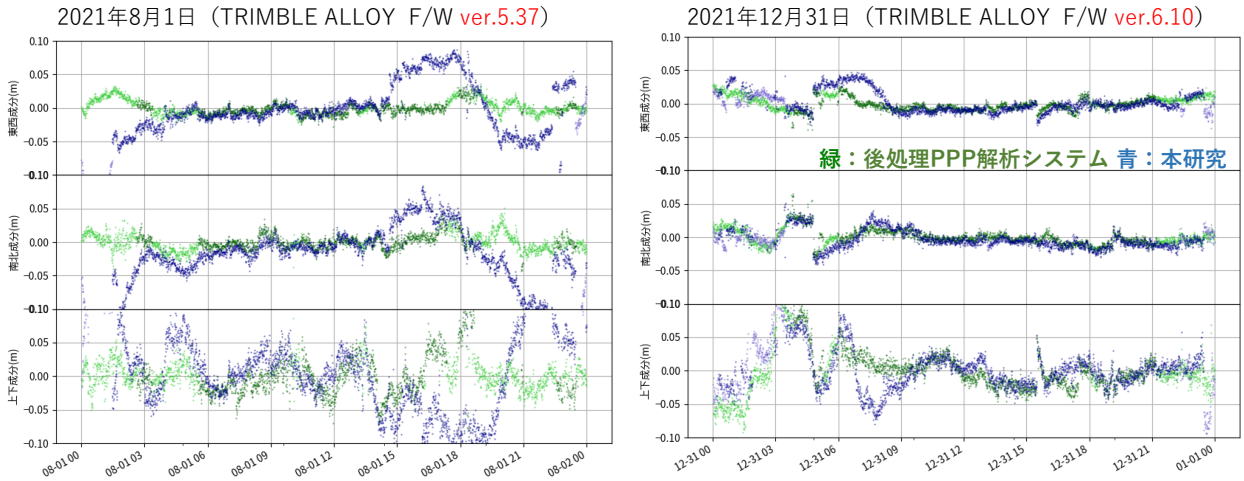


図-3　IGS 観測点 STK2 における，IGS 解とのずれのある日（左図）とずれのない日（右図）の，本研究と後処理 PPP 解析システムの 30 秒座標時系列の例（緑：後処理 PPP 解析システム，青：本研究）

1 日ずつについて，本研究と後処理 PPP 解析システムの 30 秒間隔座標時系列を比較した（図-3）．その結果，IGS 解からのずれが大きな 2021 年 8 月 1 日では，本研究の座標時系列は後処理 PPP 解析システムの時系列よりも大きくばらついている（左図）．一方，IGS 解からのずれが小さい 2021 年 12 月 31 日については，多少の違いはあるものの両者の座標時系列はよく一致している（右図）．すなわち，IGS 解からのずれの原因は，後処理 PPP 解析システムの時系列との間に系統差が生じているためではなく，本研究の解析が不安定になっているためと考えられる．

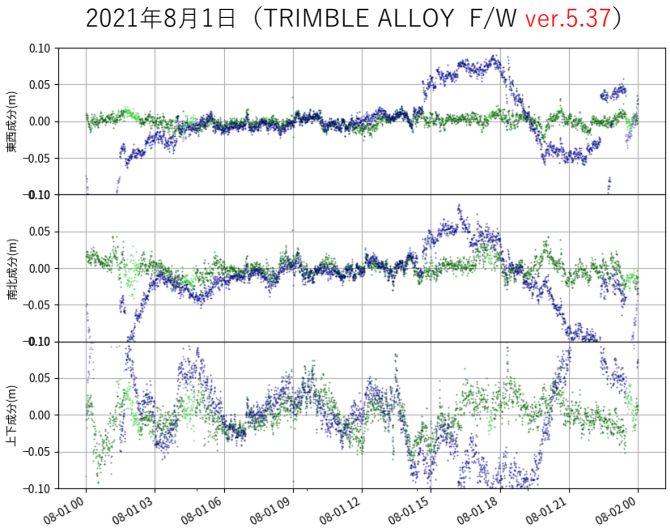
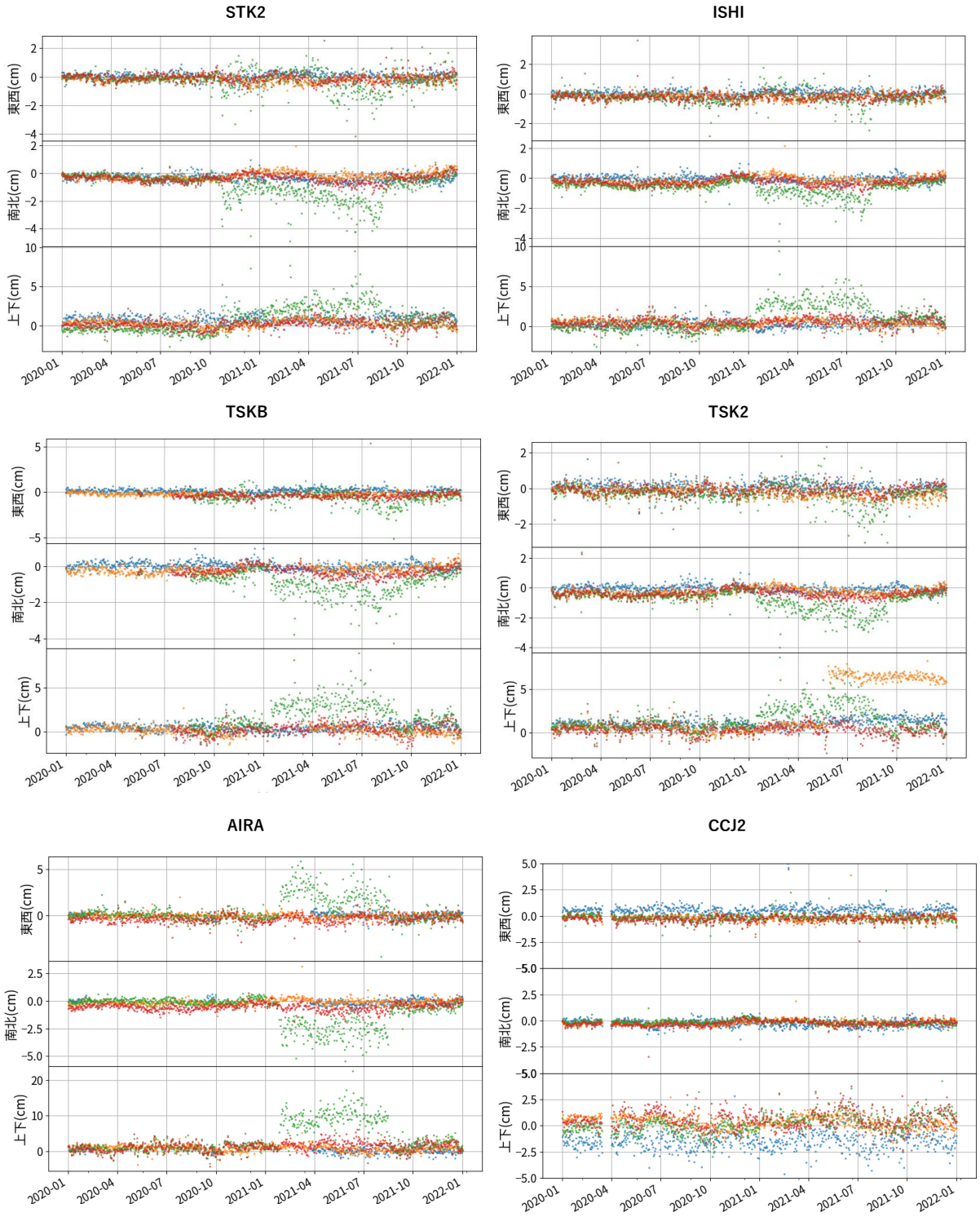


図-4　IGS 観測点 STK2 における，IGS 解とのずれのある日についての，準天頂衛星を解析に含めた場合（青）と含めない場合（緑）の 30 秒座標時系列

そこで，TRIMBLE ALLOY 受信機のファームウエアのバージョン 5.37 から 6.10 のバージョンアップの際に生じた変更点について詳細に調べたところ，GPS と準天頂衛星間の受信機依存のコードバイアスの修正が行われていた．そこで，図-3 の IGS 解とのずれのある 2021 年 8 月 1 日の同じデータを用いて，準天頂衛星を外した解析を行い，その結果を元の解析結果と比較した．結果を図-4 に示す．準天頂衛星を外すことによって解が安定することがわかる．すなわち，解が不安定化した原因は，準天頂衛星のデータに含まれていた受信機依存のコードバイアスによる可能性が高い．

さらに，解の挙動が異なる原因の調査の中で，本研究と後処理 PPP 解析システムで用いている PPP-AR 解析のパラメータを比較したところ，搬送波位相誤差の仰角依存項の標準偏差を与えるパラメータが解の挙動に差を生み出すことを見つけた．本研究では RTKLIB のデフォルト値である 0.003m/sin(el)（el は仰角を表す）を使用したが，後処理 PPP 解析システムでは 0.008m/sin(el)であった．このパラメータは解析において搬送波位相の仰角に依存した重みを与えるものであり，後処理 PPP 解

析システムに比べて本研究の方が低仰角の搬送波位相の重みが大きいことを意味している．そこで，上記のパラメータの値を後処理 PPP 解析システムと同じ 0.008m/sin(*el*)にして準天頂衛星を含めた再解析を行ったところ，30 秒時系列が安定化した．すなわち，この値を用いることで，TRIMBLE ALLOY



青：F5解　黄：後処理PPP解析システムの解　緑：本研究の解（旧）　赤：本研究の解（再解析）

図-5　6 つの IGS 観測点における 4 種類の解と IGS 解との差の時系列
（青：F5 解，黄：後処理 PPP 解析システムの解，緑：本研究の解（旧），赤：本研究の解（再解析））
注：TSK2 局の後処理 PPP 解析システムの時系列で 2021 年 5 月後半にステップが見られるのは，解析にアンテナの交換が反映されていなかったため．

受信機のファームウエアバージョン 5.37 に起因する準天頂衛星を含めた PPP 解の不安定性を回避できることがわかった．そこでこの値を用いて IGS 観測点の再解析を行い，IGS 解と比較を行った（図-5）．

この結果を見ると 2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日までの全期間において，後処理 PPP 解析システムの解と本研究の解は IGS 解と良く整合しており， IGS 解に対する RMS は水平成分（南北成分，東西成分）で 3～7mm 程度，上下成分で 5mm～十数 mm 程度である．なお，F5 解についても CCJ2（父島 A）を除いて RMS で水平成分 3～4mm，上下成分で 6～12mm とよく整合している．CCJ2 だけは東西成分に数 mm，上下成分に十数 mm 程度のバイアスが見られるが，こればばらつきの範囲内である（小林ほか，2022）．

3.2 観測局 MCIL（南鳥島）における F5 解と IGS 解の間のバイアス

図-6 に IGS 観測点 MCIL（南鳥島）について，横軸に日付，縦軸に図-5 と同じ 4 種類の解についての IGS 解からのずれをプロットしたグラフを示す．これを見ると，本研究の解（再解析）と後処理 PPP 解析システムの解は IGS 解からのずれが小さく，IGS 解と整合していることがわかる．これに比べて F5 解は IGS 解からのずれが顕著に大きい．その平均値を計算すると，東西 51mm，南北 11mm，上下 −96mm であった．MCIL の F5 解の標準偏差はそれぞれ 16mm, 6mm, 35mm であり，このずれは明らかにばらつきの範囲外である．

そこで，2013 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日までの MCIL の F5 解と IGS 解の上下成分の時系列を調べた（図-7）．すると，この期間において IGS 解はほぼ一定値なのに対して，F5 解は 2018 年 10 月

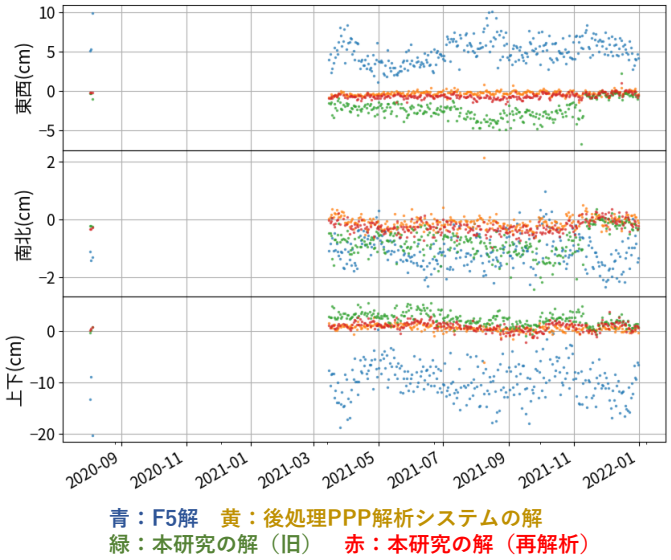


図-6　IGS 観測点 MCIL（南鳥島）における 4 種類の解と IGS 解との差の時系列
（青：F5 解，黄：後処理 PPP 解析システムの解，緑：本研究の解（旧），赤：本研究の解（再解析））
注：2020 年 1 月から 2021 年 4 月の期間は基準となる IGS 解がほとんど提供されていない．

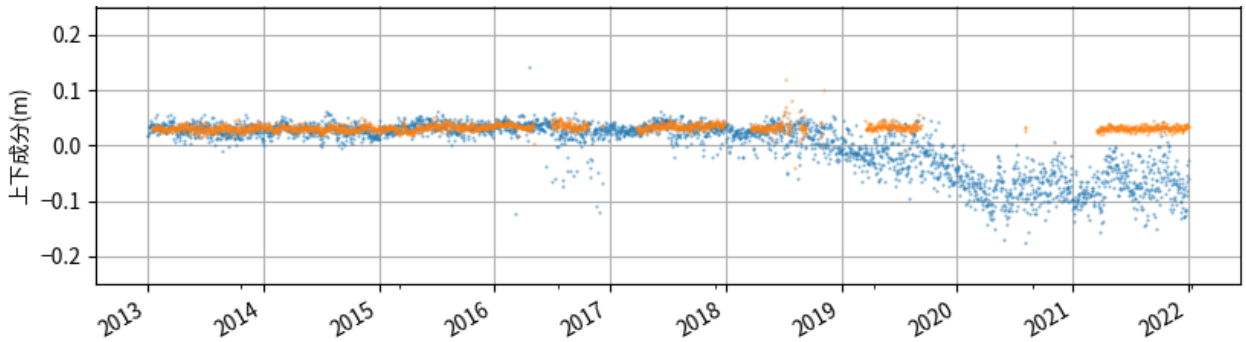


図-7　2013 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日までの MCIL（南鳥島）局の F5 解（青）と IGS 解（橙）の上下成分の時系列．この期間の F5 解の平均値をゼロとした相対値．

頃までは IGS 解とほとんど同じ値を示すが，2018 年 10 月頃から 2020 年の初め頃まで座標値が−10cm 弱ほど変化し，以降はおよそ一定の値をとることがわかった．この変化量は IGS 解からのバイアスと大体一致している．その原因は現時点では不明である．MCIL では 2018 年 10 月 26 日にルビジウム時計の交換が行われており，このドリフトとの関係も疑われるものの，それだけで原因と特定することは早計である．今後より詳細な調査が必要である．

4. 結論

国内の IGS 観測点 7 点において，IGS 解と，GEONET 定常解析の F5 解，後処理 PPP 解析システム及び国土地理院で生成した後処理暦を用いて計算した PPP-AR 解との整合性の調査を実施した．

その際に，特定の受信機・ファームウエアの組み合わせで取得された準天頂衛星を含むデータを PPP-AR 解析した場合，キネマティック解が不安定になるという現象が明らかになった．これは受信機に依存する準天頂衛星のコードバイアスに起因するものと考えられ，これを解消したバージョンのファームウエアでは見られない．また，準天頂衛星を解析に含めない場合や，相対測位でかつ GPS のみを対象としている F5 解には影響は見られない．この現象はキネマティック解の日平均値に数 cm 程度の差を生じうるため，測位解の他の解との整合性を評価する上で無視できないが，適切な解析パラメータを設定することにより不安定は解消されることも判明した．

解析パラメータを適切に設定した再解析により，IGS 観測局における本研究の解は後処理 PPP 解析システムの解と同様に，IGS 解と良く整合していることが明らかになった．

F5 解についても CCJ2（父島 A）と MCIL（南鳥島）を除いては IGS 解とよく一致した．CCJ2 においては東西成分，上下成分に数 mm から十数 mm 程度のバイアスが見られたが，これは解のばらつきの範囲内である．一方，MCIL においては，解のばらつきでは説明できない顕著なバイアスが見られた．MCIL の F5 解と IGS 解の上下成分の時系列を見ると，2018 年 10 月ごろまでは F5 解と IGS 解はよく一致しており一定の値を示していたが，2018 年 10 月下旬から F5 解のみ座標値の減少がはじまり，最終的に F5 解と IGS 解の間のバイアスと同程度までこれが増大していることから，この F5 解のドリフトによりバイアスが生じたと思われる．しかしその原因は不明であり，今後調査を進める必要がある．

さらに本研究の成果の一つとして，PPP 解，IGS 解，F5 解のような異なる解の相互比較がそれぞれの解に含まれる問題の把握に対して有効であることが示されたことが挙げられる．

本研究で使用した後処理暦は 2018 年まで遡り解析が行われており，今後さらに遡り解析を進める予定である．そこで今後は，PPP-AR の遡り解析を進め，より長期間にわたって本研究の解と IGS 解や F5 解等との整合性の評価を進めていく．

謝辞

MADOCA は JAXA と国土地理院の包括的協力の協定書に基づき JAXA から貸与を受けた．

参考文献

阿部聡，大野圭太郎，髙松直史，村松弘規，古屋智秋（2021）: GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握（第 2 年次），令和 2 年度調査研究年報，108-110.

Kawamoto, S., Takamatsu, N., Abe, S., Miyagawa, K., Ota, Y., Todoriki, M. and Nishimura, T. (2018): Real-Time GNSS Analysis System REGARD: An Overview and Recent Result, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, 440-452.

小林知勝，中川弘之，古屋智秋，森下遊，松尾功二（2022）：災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究（第 2 年次），令和 3 年度調査研究年報，168-175.
宗包浩志（2017）：電子基準点精密単独測位キネマティック解析プロトタイプシステムの構築，国土地理院時報，129，1-9.