

令和3年夏の西日本を中心とした大雨による地殻変動

Crustal deformation due to heavy rains in western Japan
in 2021 summer

北海道大学理学部地球惑星科学科四年

玉田 祐樹

令和4年2月1日

要旨

近年我が国では、夏の大雨による被害が深刻になっている。その多くは梅雨の終わりに梅雨前線に沿って起こる線状降水帯によってもたらされ、地球温暖化によってその頻度が上がってきていると考えられている。なかでも 2018 年 7 月の中国地方を中心とした平成 30 年七月豪雨や 2020 年 7 月の九州地方を中心とした令和 2 年七月豪雨による洪水被害と土砂災害がある。2021 年も 7 月の熱海での大雨および 8 月の西日本広域で起こった大雨など、過去の大雨に並ぶ規模の降水があった。Heki & Arief (2022) は 2017 年から 2020 年までの大雨による地殻変動を明らかにしたが、本卒業論文では同様の手法を用いて 2021 年夏の大雨による地殻変動を研究した。この先行研究では西日本全体などの広域で積分した日毎の雨量と沈降量が比例しており、さらにその沈降量は過去の雨量にはよらないことが報告されている。本研究でも同様に、GEONET 点と AMEDAS 点の観測データから得られた上下位置時系列と、一日当たりの降水量の時系列を比較した。その結果 2021 年の大雨でも、それらの間に明らかな線形関係が見られることが分かった。さらに積分する範囲を変化させ、上下位置時系列と降雨量の相関がどのように変化するかを調べた。その結果範囲を狭めるほど相関が弱くなることが分かり、局地的な降水データから上下位置の補正を行うのは難しいこと、また降水が短い時間スケールで空間的に移動していること等が明らかになった。

目次

第1章	はじめに.....	2
1.1	GNSS局位置時系列に見られるばらつき.....	2
1.2	先行研究(Heki & Arief, 2022)の概要と本研究の目標.....	2
第2章	観測・解析に用いたデータとその処理.....	4
2.1	GNSS.....	4
2.1.1	GPS.....	4
2.1.2	GLONASS.....	5
2.1.3	QZSS.....	6
2.2	GEONET.....	7
2.2.1	F5解.....	7
2.2.2	F5解とF3解の違い.....	8
2.2.3	メジアン(中央値)と平均値.....	9
2.2.4	F5解の共通誤差.....	9
2.2.5	共通誤差の除去.....	10
2.3	AMeDAS.....	11
第3章	雨水の荷重による上下変動.....	13
3.1	原理.....	13
3.2	令和3年7月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨による上下変動.....	14
3.3	2021年8月の西日本を中心とした大雨による上下変動.....	15
3.4	降水量と体積沈降量.....	17
3.5	水平方向の変動.....	18
第4章	降水量と上下変動の相関とその空間スケール依存性.....	20
4.1	空間スケールによる相関の強さの変化.....	20
4.2	地方による降水と沈降の相関の差について.....	23
4.3	富士山麓での降水による隆起.....	23
4.4	富士山以外の火山での異常な隆起.....	24
第5章	まとめと今後の課題.....	26
第6章	謝辞.....	27
参考文献	27
参考ホームページ	28

第1章 はじめに

1.1 GNSS局位置時系列に見られるばらつき

1990年代に本格的に実用化された全球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS)を用いた高精度測位観測によって、プレート運動やプレート境界での変形がセンチメートル以下の単位で計測可能となった。それによって、地震動を伴わないゆっくりした断層運動であるスロー地震などの様々な現象が明らかになっている。

一方で細かい時間スケールで測位データの時系列を見ると、かなりのばらつきがあることが分かる(図 1.1)。この原因として実際の位置変化を伴わない観測誤差が第一に考えられるが、ばらつきはある程度周期性を持っているようにも見受けられ、実際の地表の変形も含まれていることが示唆される。例えば季節変化成分は積雪荷重による実際の変形であることが Heki (2001)によって示されている。本研究では、同様に降水の荷重による変形として、夏の大雨による荷重変形を取り上げる。降水量と上下位置時系列の関係について、Milliner et al. (2018)によるハリケーンの降水に伴うアメリカ南部の沈降を報告した研究が初めてのものである。日本では令和元年台風 19 号の豪雨がもたらした降水荷重による地殻変動が Zhan et al. (2021)によって初めて報告された。それらを発展させた研究が後述する Heki & Arief (2022)である。本研究では、これらの先行研究を参考に、2021 年の大雨と地殻変動の関係について考察する。

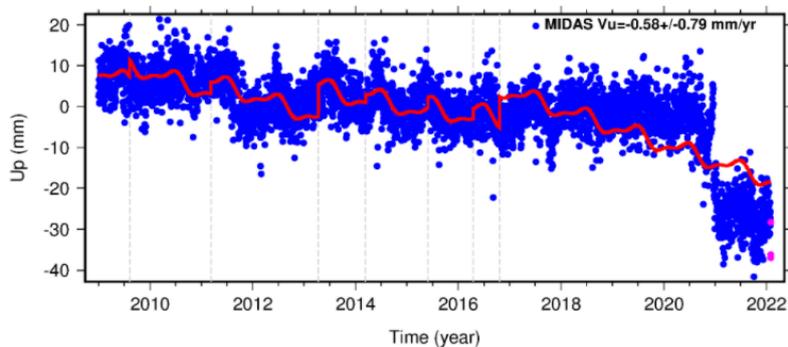


図 1.1 J766 局(960766 岡山県倉敷市)の上下位置時系列。ネバダ大学が公開している日別の座標値の上下成分 (<http://geodesy.unr.edu>, Hammond et al., 2021)。2021 年初めの値のジャンプはアンテナ交換によるものである。

1.2 先行研究(Heki & Arief, 2022)の概要と本研究の目標

地球温暖化の影響の一つとして、西日本を中心に豪雨災害が繰り返し起こっている。Heki & Arief (2022)は、2017 年から 2020 年の 4 年間にわたって毎年夏に発生した豪雨を取り上げ、雨水の荷重による地殻変動を調査した。その結果、西日本全体で積分した降雨量と沈降量に強い正の相関があることを見出し、雨水の荷重によって地面が沈降することが示され

た。さらに西日本全体で一日当たりの総雨量 1Gt あたり、沈降に面積を掛けて積分した量（体積沈降）が 0.1 km^3 程度に及ぶこと、また一日に 10 Gt 以上の降雨があると、その比例関係が崩れることが分かった。

一日当たりの降雨量とその日の沈降量が比例すること（その日以前の降雨量には依らない）、また雨が止んだ日は沈降が回復することがわかった。それらのことから、雨は一日でほとんど海に流出することが示唆される。これは日本の河川が短くて大きな勾配を持つことと関係しており、降水が数か月地上滞留するアメリカ南部 (Milliner et al., 2018) とは事情が異なることを意味する。

令和 3 年(2021 年)の夏の大雨は平成 30 年夏の豪雨に匹敵する雨量であったが(表 1.1)、Heki & Arief (2022)では調査対象となっていない。本研究では先行研究の手法を用いて 2021 年の大雨でも 2020 年以前と同じように降雨と沈降の比例関係が成り立つこと、また沈降量は当日の雨量にのみ比例し、それまでの記憶を持たないこと等を確認する。

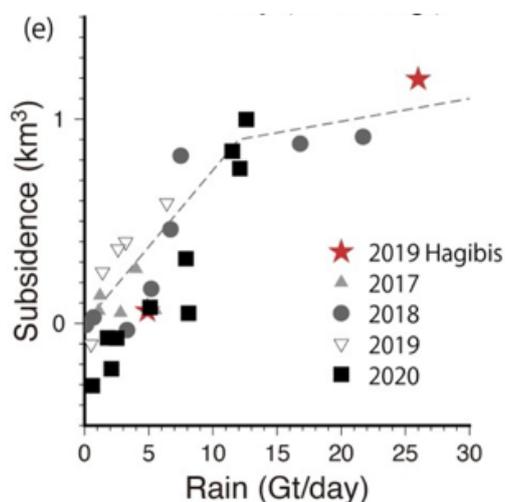


図 1.2 2017 年から 2020 年までの西日本豪雨の一日毎の降水量（横軸）と沈降量（縦軸）の比較 (Heki & Arief (2022)に Zhan et al. (2021)の台風の事例を加筆したもの)。降雨量と沈降量の間には比例関係があることが分かる。また西日本全体で 10Gt 以上の雨が降ると沈降が飽和し、体積沈降が 1 km^3 程度で頭打ちすることが分かる。

表 1.1 令和 3 年と平成 30 年豪雨の降水量の比較(tenki.jp)。令和 3 年 8 月の豪雨は 11 日間の降水量も一日当たりの降水量も平成 30 年 7 月の豪雨に匹敵していたことが分かる。

H30 豪雨	日総降水量 (百万m ³)	2,347	7,724	4,363	2,206	3,007	10,846	8,463	20,201	21,548	14,852	3,576	99,133
	発生日	20180628	20180629	20180630	20180701	20180702	20180703	20180704	20180705	20180706	20180707	20180708	11日間合計
R3 大雨	日総降水量 (百万m ³)	3,394	9,793	19,604	20,394	7,529	3,277	10,804	9,351	4,048	3,661	2,347	94,202
	発生日	20210811	20210812	20210813	20210814	20210815	20210816	20210817	20210818	20210819	20210820	20210821	11日間合計

2章 観測・解析に用いたデータとその処理

2.1 GNSS

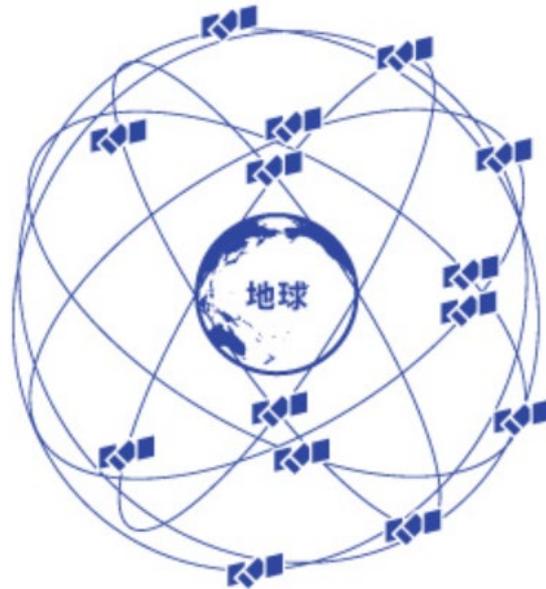
本研究では地殻変動の計測に GNSS の測位データを用いる。GNSS(Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム)とは、米国の GPS、日本の準天頂衛星 (QZSS)、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo、中国の北斗 (BeiDou)、インドの NAVIC (NAVigation Indian Constellation) 等の衛星測位システムの総称である。それらのシステムでは地球を周回する複数の測位衛星から発信された電波を地上局で受信し、その搬送位相の変化から位置座標を決定している。日本では一般的に GPS、GLONASS、QZSS を使用することが多いため次節からそれぞれを解説する。

2.1.1 GPS

GPS(Global Positioning System) とはアメリカが開発し、1993 年から運用されている最も古い GNSS である。軍事用として開発されたが現在は民間にも開放されている。GPS は世界に先駆けて実用化され、広まったので現在でも GNSS の代名詞となっている。2022 年 1 月現在では運用中 31 機の衛星が運用されている。GPS は軌道高度 約 22,000 km、軌道傾斜角約 55 度、周期約 12 時間の軌道を用いており、昇交点の経度が異なる 6 つの軌道面に 4 機ずつ衛星が配置されている(図 2.1)。

GPS 衛星は L1 (1575 MHz)、L2 (1227 MHz)、L5 (1176 MHz)の周波数を利用している。衛星からの通信には符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) という方式が採用されている。この方式は同一周波数帯で複数の通信を行う技術である。GPS では搬送波を定められた擬似ランダムノイズ (Pseudo Random Noise: PRN) により変調することで受信機が各衛星を識別できるようにしている。

GPSの軌道



2.1:GPS 衛星の軌道イメージ(内閣府：

https://qzss.go.jp/technical/technology/tech01_orbit.html)

2.1.2 GLONASS

GLONASS とはロシアが開発・運用している GNSS である (図 2.2)。1982 年に最初の衛星が打ち上げられ、1995 年に一度完成したが、1990 年代後半になるとソ連崩壊の影響もあり、急速に衛星の数を減らした。2002 年に新しいプロジェクトが始まり、衛星が打ち上げ始められ、2011 年には全世界で利用が可能となった。

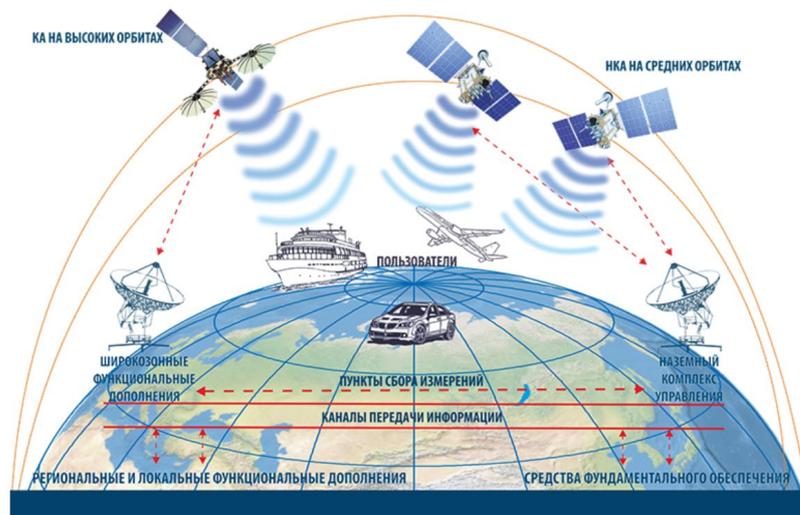
GLONASS が使用している軌道は軌道高度 19100km、軌道傾斜角 64.8° 周期 11 時間 15 分 44 秒である。それぞれ傾きの向きが異なる 3 つの軌道に、1 軌道あたり 8 機の衛星が配置され、合計 24 個の衛星によりシステムが構成されている。

衛星から送信される電波の周波数帯は L1, L2 及び L3 (1202 MHz) を用いている。GLONASS と GPS の大きな違いはそれぞれ個々の衛星の識別方法である。GPS では前項で述べたように各衛星から通信には CDMA を使用し、衛星ごとの符号で受信機が衛星を識別している。一方 GLONASS では、L1, L2 において衛星ごとに送信する電波の周波数を少しずつ変えることで衛星の識別を可能にする、周波数多重分割多元接続 (Frequency Division Multiple Access: FDMA) という方式を採用している。GLONASS の送信する周波数 (L1, L2) はチャンネル番号 k を用いると以下のように算出できる。

$$(k = -7 \dots + 12)$$

$$L1 : 1602 \text{ MHz} + k \times 9/16 \text{ MHz}$$

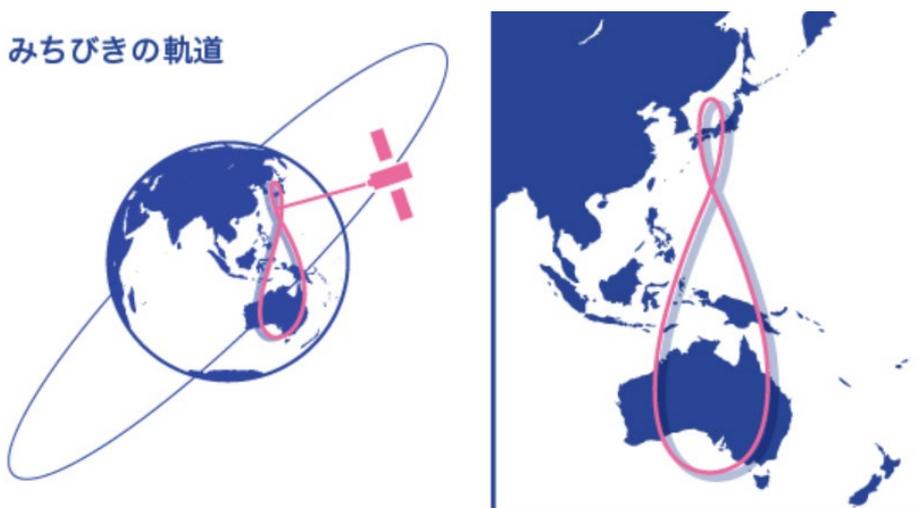
$$L2 : 1246 \text{ MHz} + k \times 7/16 \text{ MHz}$$



2.2:GLONASS 衛星のイメージ(<https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php>)

2.1.3 QZSS

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) とは、準天頂軌道の衛星が主体となって構成されている日本の衛星測位システムのこと、愛称はみちびきである (図 2.3)。2010 年に一号機が打ち上げられ 2018 年には 4 機でのサービスが開始された。2023 年に 7 機体制でのサービス開始を目指している。現在の 4 機の内訳は 3 機の準天頂軌道衛星と 1 機の静止軌道衛星である。衛星の通信方式は GPS と同様の CDMA を用いており、衛星から送信される電波の周波数帯は L1、L2、L5、L6 (1279 MHz) である。



2.3:QZSS 軌道のイメージ(https://qzss.go.jp/technical/technology/tech01_orbit.html)

2.2 GEONET

GNSS 連続観測システム (GEONET:GNSS Earth Observation Network System) とは、全国約 1,300 ヶ所に設置された電子基準点と GEONET 中央局 (茨城県つくば市) からなる、高密度かつ高精度な測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的とした観測システムである (図 2.4)。GEONET の観測データは日本周辺のプレート運動のメカニズムを解明するのに役立てられている。断層がゆっくり動いて地震波を発生させない「ゆっくり地震」は GEONET によって発見された現象の一例である。後述するが、本研究では国土地理院が公開している F5 解を利用した。



2.4 : GEONET のイメージ(国土地理院:
https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_38136.html)

2.2.1 F5 解

F5 解とは国土地理院が電子基準点で受信した測位衛星の信号 (観測データ) を解析して、最終的な電子基準点の日々の座標値を求めたものである (Takamatsu et al., 2020)。2021 年から 1996 年 3 月 21 日以降のデータが正式に公表されている。2021 年以前では電子基準点の座標は一代前の F3 解 (Nakagawa et al., 2009) が公表されていた。図 2.5 は F5 解と F3 解を比べたものであるが、F5 解の方がデータのばらつきが少なく、精度が良いことが分かる。次節では F5 解析と F3 解析の違いについて述べる。

2.2.2 F5 解と F3 解の違い

両者の相違は以下の四点に集約される

1) 解析ソフトウェア

F3 解析では Bernese 5.0 を使用していたが、F5 解析では Bernese 5.2 を使用している。これにより GPS BlockIII 衛星のデータが使用可能となった。

2) 準拠座標系

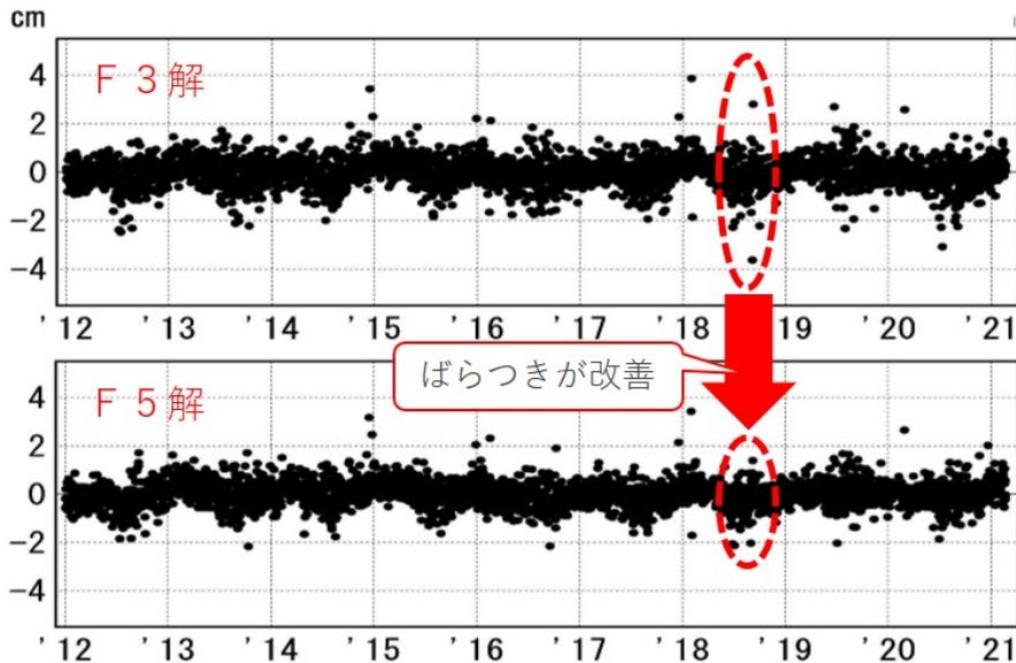
F3 解析は ITRF2005 (IGS05) に準拠していたが、F5 解析は ITRF2014 (IGb14) に準拠している。これに伴いアンテナ位相特性モデルも ITRF2014 に対応させたものに変更された。

3) 固定点座標

F3 解析と F5 解析では、固定点である「つくば1」の座標計算手法が異なる。前者ではアジア太平洋地域の IGS 局の位置から求めているが、後者では全世界から選ばれたより多くの IGS 点の位置を基準として求めている。

4) 対流圏遅延の推定間隔及びマッピング関数

F3 解析では天頂遅延量を 3 時間、水平勾配を 24 時間ごとに推定していたが、F5 解析ではそれぞれ 1 時間、3 時間間隔に変更された。また F5 解では対流圏遅延推定時に使用するマッピング関数が、F3 解析で用いられた NMF (New Mapping Function; Niell, 1996) から VMF1 (R5・Q5 解析では GMF) に変更された。対流圏遅延の推定間隔の変更により、湿潤大気の変化をより正確に評価でき、解析に含まれるノイズを軽減させる効果が想定される。この効果は大気中の水蒸気量が不均質になりやすい夏季に強く表れる。



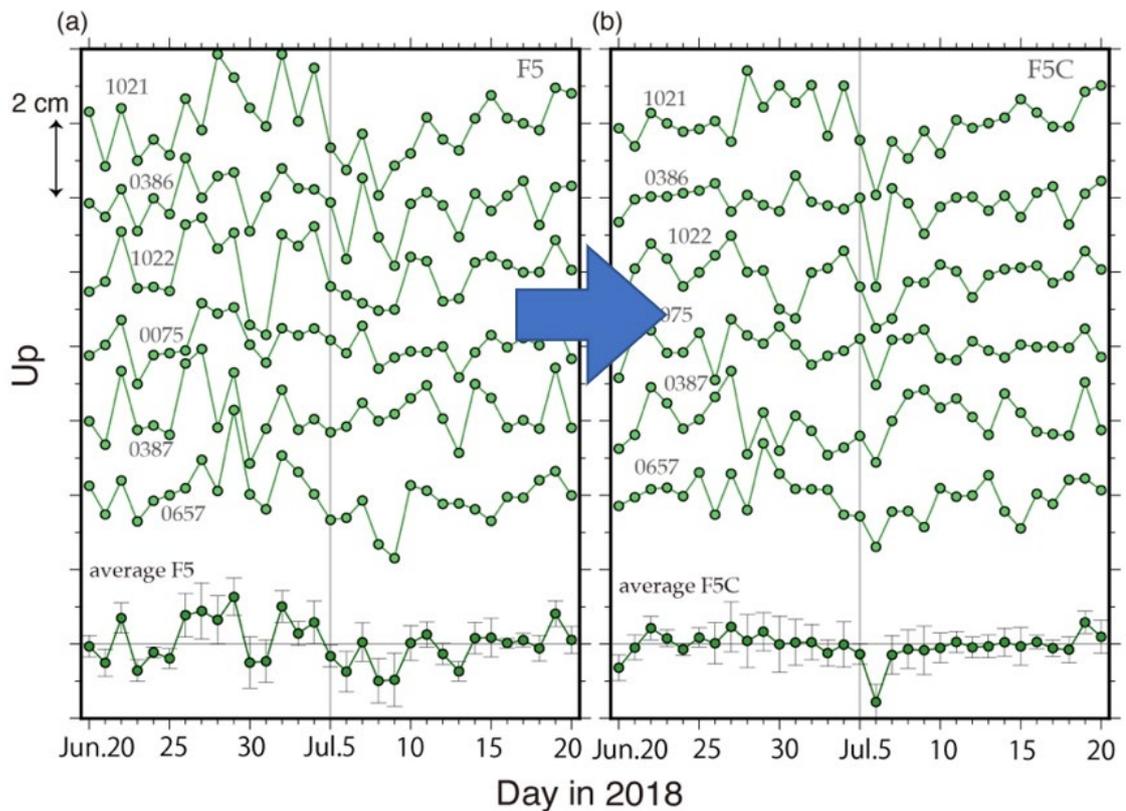
2.5：国土地理院による F3 解(上)と F5 解(下)のばらつきの比較。小松（石川県）、三隅（島根県）間の基線における高さ方向の位置の時系列を示す。線形トレンドは除去されている。高さ方向のばらつきが F5 解では改善されたことが分かる。
https://terras.gsi.go.jp/geo_info/information/information_F5_R5.html

2.2.3 メジアン（中央値）と平均値

本研究では降雨による沈降を求める際の基準位置として、日々の座標値の降雨当日と前後それぞれ 15 日、計 31 日の中央値（メジアン）を基準座標値とした。平均ではなく中央値を使った理由は、GEONET による計測では大きく外れる値がしばしば生じるため、平均値に比べて極端な異常値の影響を受けにくい中央値が安定して基準として適切であると考えたためである。

2.2.4 F5 解の共通誤差

F5 解はつくばに設けられた基準点からの相対的な位置座標として与えられているので、基準点の測定誤差が全体の共通誤差となる。また軌道誤差などはネットワーク全体の回転やスケール誤差をもたらすこともある。F5 解は、先述したように F3 解よりばらつきは少なくなっているが、本研究を行うには十分ではない。そこで平行移動や回転などに関する共通誤差を除去した後に上下位置の時系列を議論する。図 2.6 は共通誤差の除去前と除去後の上下位置の時系列の比較である。数値のばらつきがさらに小さくなっているのが分かる。



2.6:F5 解の共通誤差の除去前(左)と除去後(右)の比較例(Heki & Arief, 2021)。平成 30 年西日本豪雨時の六局の上下位置のデータとその平均について比較している。

2.2.5 共通誤差の除去

本節では共通誤差の除去方法について述べる。今回の研究では Heki & Arief (2021) の手法を用いて平行移動(3 方向)、回転(3 軸)、伸縮の合計 7 パラメータについて、日々の座標と基準としたメジアン位置の間で、それらが最も良く一致するような Helmert 変換のパラメータの推定を日々行った。

Helmert 変換とは座標変換の一つで相似変換ともいわれる。図 2.7 はそのイメージであり、座標変換を行った際、元の図形の形が変化することはない。二次元平面における Helmert 変換の式は変換前の座標 (x, y) と変換後の座標 (X, Y) の間の関係は、伸縮を省略すると以下のように表される。ここでパラメータ a, b は回転を、 c, d は平行移動を表す。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}$$

最小二乗法を用いて4つのパラメータ a, b, c, d を求めるには次のように行列 A とベクトル K, L, v を定め、式1を計算することによって算出される。観測された座標と、基準位置を Helmert 変換した座標の差を真の地殻変動と仮定した。

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 \\ y_1 & -x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_n & -x_n & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \\ \vdots \\ v_{xn} \\ v_{y1} \\ \vdots \\ v_{yn} \end{pmatrix}$$

$A \qquad K \qquad L \qquad v$

$$K = (A^T A)^{-1} A^T L \tag{1}$$

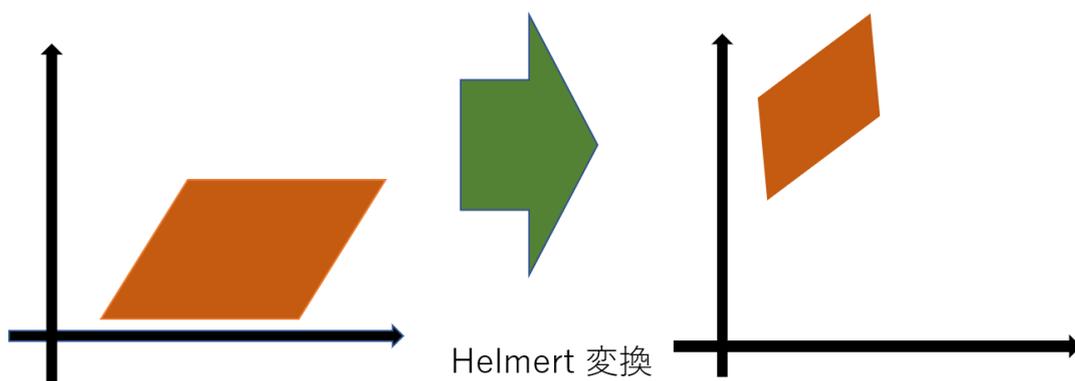


図 2.7: Helmert 変換のイメージ。この図では縮小、水平移動、回転を行っている。移動前の図形と移動後の図形は相似である。

アメダス (Automated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS) とは気象状況を時間的、地域的に細かく監視するために、降水量、風向・風速、気温、湿度の観測を自動的におこなうシステムである (池田, 2000)。地域気象観測システムともいわれる。アメダスは 1974 年 11 月 1 日に運用を開始して、現在、降水量を観測する観測所は全国に約 1,300 か所、約 17km 間隔で設置されている。この数は GEONET とほぼ同様の規模である。またこのうち約 840 か所 (約 21km 間隔) では降水量に加えて、風向・風速、気温、湿度を観測しているほか、雪の多い地方の約 330 か所では積雪の深さも観測している。



図 2.8: アメダス観測所の例 四要素（降水量、風向・風速、気温、湿度）と積雪深を観測
(気象庁: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/amedas/kaisetsu.html>)

第3章 雨水の荷重による上下変動

3.1 原理

図 3.1 は降水と上下変動についての説明である。降水があると、雨水の荷重によって地面が沈降する。台風など低気圧が著しい場合は、負の気圧荷重で地表が隆起する分も無視できないが、本研究で扱う前線に伴う降水では気圧変化はそれほど重要ではない。その後雨水が地面に浸透することで土壌が膨張し、隆起が起きる。

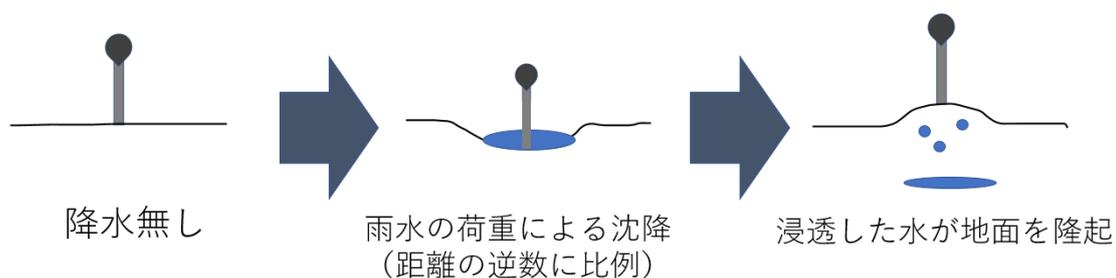


図 3.1:降水による沈降の原理。最初に荷重による弾性変形が生じるが、時間と共に雨水が地下水を涵養し、土壌が膨張して隆起することも考えられる。

& Arief (2022)によると、西日本全体の一日当たりの降水量が 10Gt 以下の場合、沈降量と降雨量の間には比例関係がみられる。1Gt の降雨に対して、西日本全体について沈降量と面積を掛けて体積に換算した値（体積沈降量）で約 0.1km^3 沈降する。降雨量が 10Gt を超えた日には、体積沈降量は飽和し、 1km^3 程度で頭打ちになる（図 3.2e）。本章では、2021 年 7 月の東海地方を中心とする豪雨と、8 月の西日本広域で発生した豪雨でも同じような比例関係が見られるか、Heki & Arief (2022) の手法を用いて調べた結果について述べる。

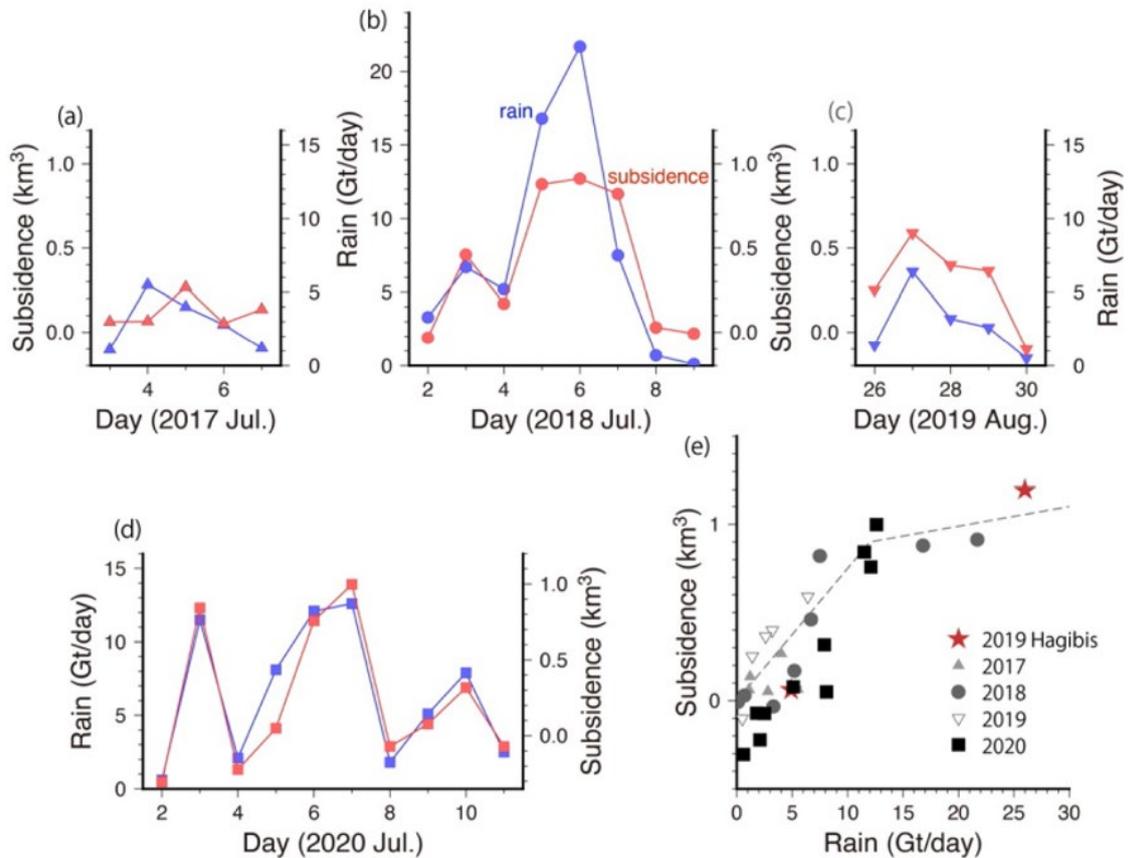
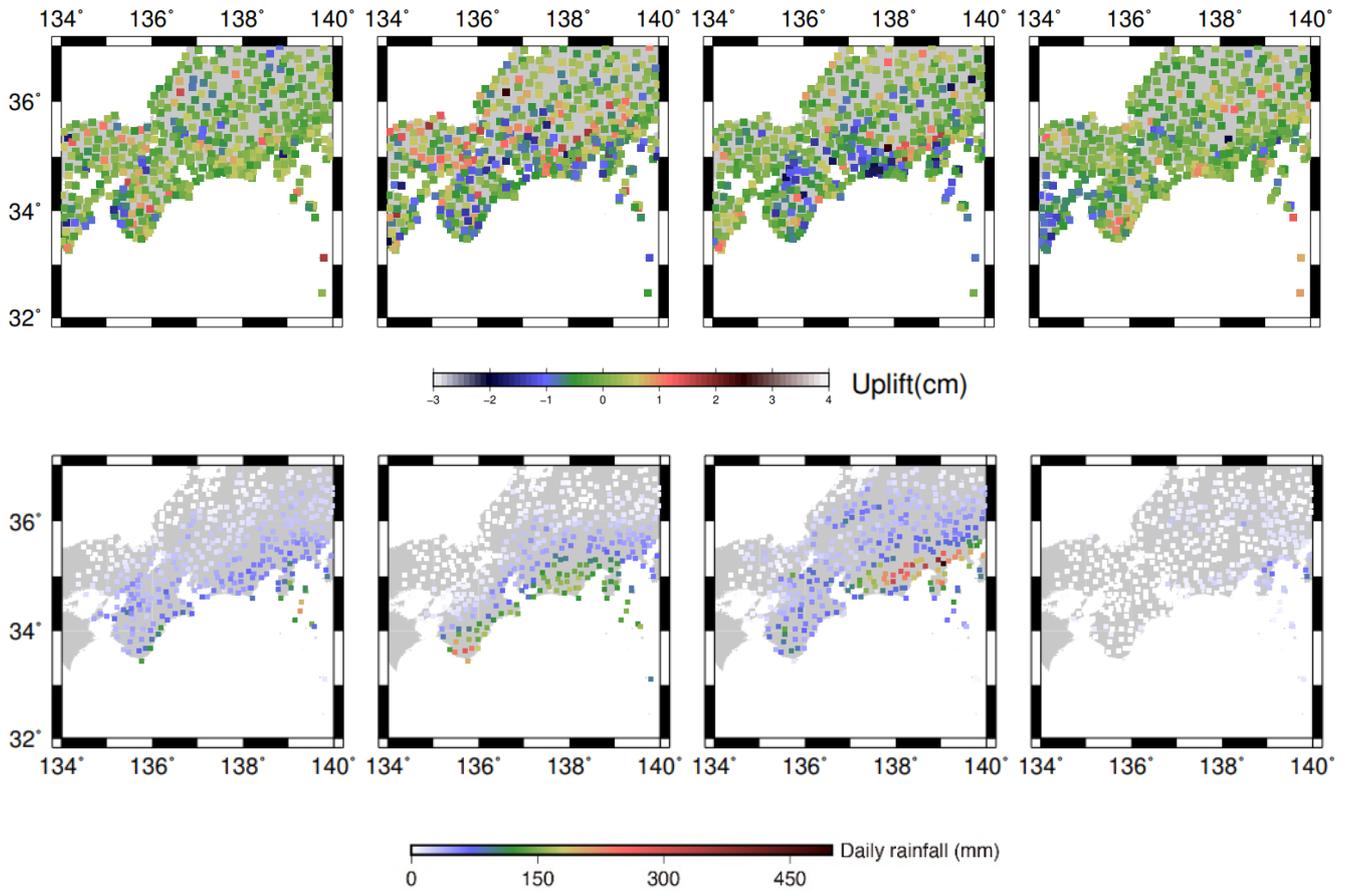


図 3.2:(a)~(d)2017 年から 2020 年の大雨について、地域全体の降雨量(青)と体積沈降水量(赤)の関係を比較したもの。降水量と沈降水量がおおむね比例関係にあることが分かる。(e)西日本全体での 10 Gt の降雨があると、西日本全体が~1 km³ 沈降することが分かる(Heki & Arief, 2022)

令和 3 年 7 月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨による上下変動

図 3.3 は令和 3 年 6 月 30 日から 7 月 4 日までの四日間について、一日当たりの降雨量(下段)と、その日の上下変動(上段)をプロットしたものである。7 月 1 日に東海地方や紀伊半島太平洋岸で雨が降り始め、それに対応してそれらの地域が 1 cm 程度沈降したことが分かる。また 7 月 2 日に雨が強くなり、沈降もより顕著になっている。7 月 3 日に雨がやむと、沈降はほぼ回復していることから、7 月 1 日、2 日の雨はその日までに既に海に排水され、地表に残っていないことが示唆される。



3.3:左から、UT における 2021 年 6 月 30 日、7 月 1 日、7 月 2 日、7 月 3 日の
上下地殻変動(上)と降雨量(下)を比較したもの

2021 年 8 月の西日本を中心とした大雨による上下変動

前節に続き令和 3 年 8 月の大雨についても調査した (図 3.4、3.5)。8 月 11 日に九州地方で雨が降り始め、8 月 12 日には雨が西日本全域に広がった。それに伴い沈降も九州から西日本全体へと広がっている。さらに 15 日に雨がやみ、それに対応して沈降がほぼ元に戻っている。16 日以降も大規模な降雨があった地域で沈降し、その後元に戻ることが確認できた。

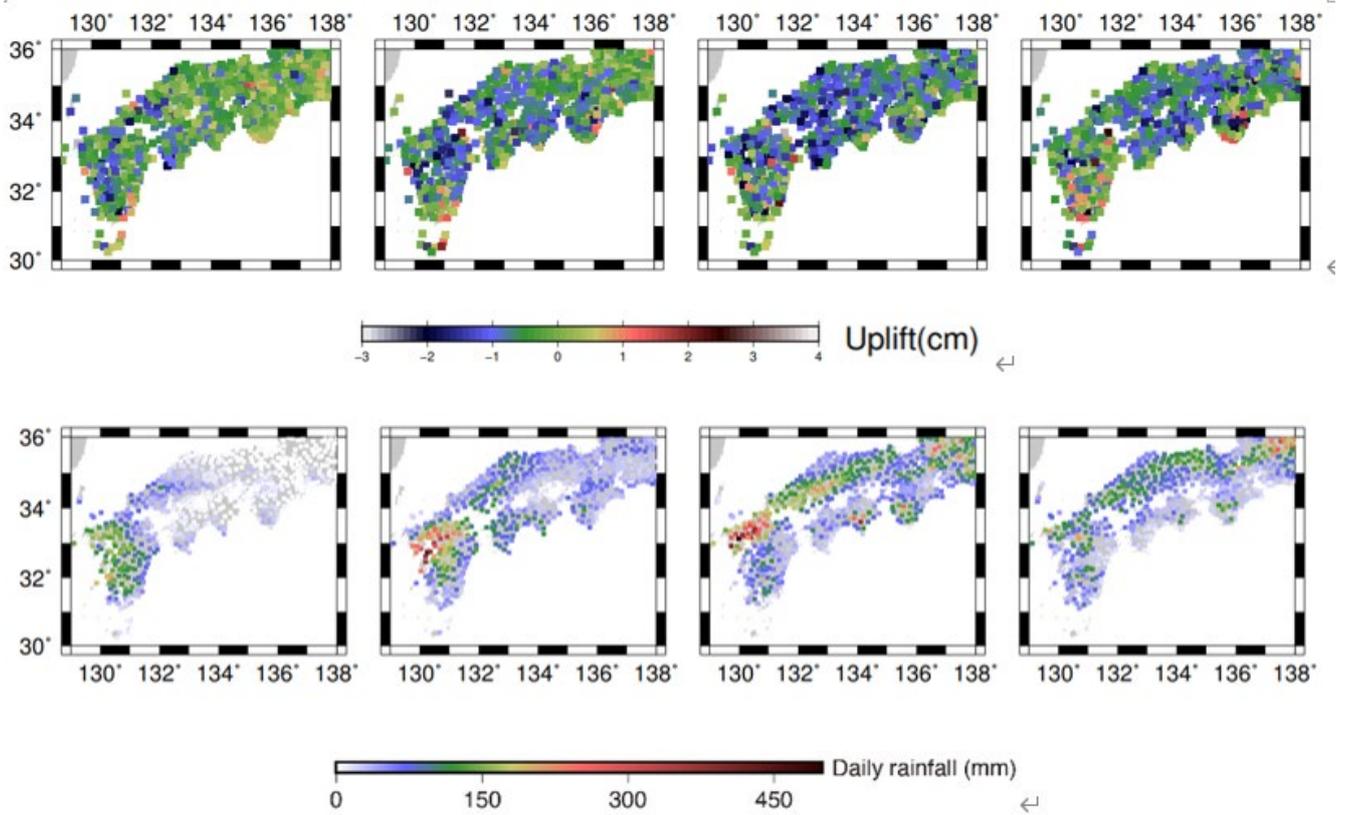


図 3.4:UT における 2021 年 8 月 11 日(左)から 8 月 14 日(右)までの四日間の上下変動(上)と降雨量(下)。8 月 11 日には九州で雨が降り始めるとそこで沈降し、8 月 12 日に雨が西日本全体に広がるとともに沈降域も広がっていることが分かる。

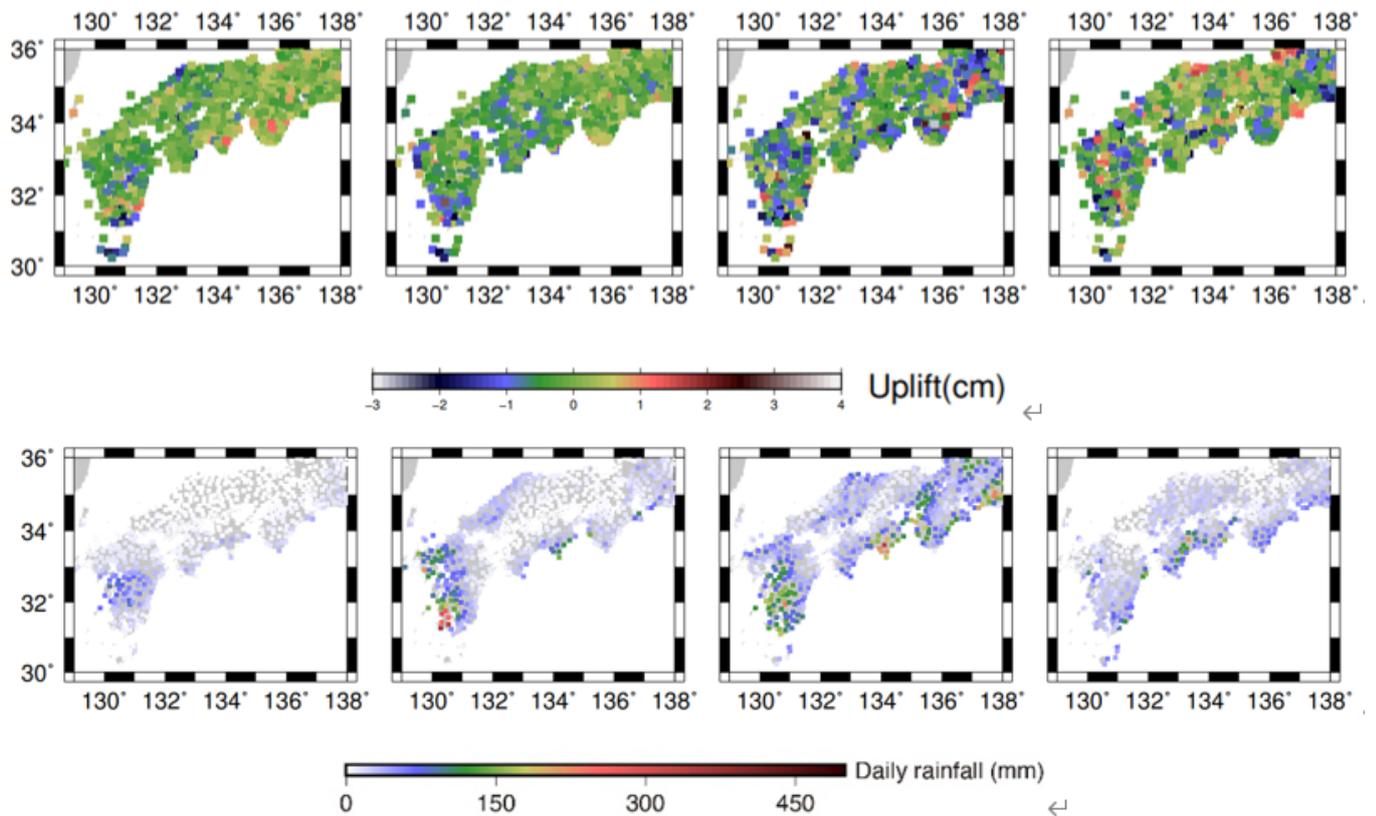


図 3.5:UT での 2021 年 8 月 15 日(左)から 8 月 18 日(右)までの四日間の上下変動(上段)と降雨量(下段)。8 月 15 日に雨が止むと全体的に沈降が元に戻っていることが分かる。8 月 16 日以降局所的に雨が降っているが、降水の多かった地域で顕著な沈降が見られることが分かる。

降水量と体積沈降水量

本節では Heki & Arief (2022) に倣って、令和 3 年 8 月の大雨に関しても、広域で積分した降水量と、沈降水量に面積を掛けて西日本全体で積分した量(体積沈降水量)を計算し、それらの間の関係について述べる。

図 3.6 は、令和 3 年 8 月 11 日から 8 月 21 日までの、日々の降雨量と体積沈降水量をプロットしたものである。これによると、降雨量と沈降水量は比例関係にあり、2020 年以前の事例と同様に前日までの降水量によらない(当日の降水量にのみ依存する)ことが分かる。また両者の間の比例定数については、令和 3 年 8 月の大雨でも西日本全体で 10Gt の降水があると西日本が約 1km^3 沈降するという 2020 年以前の事例で成り立つ比例定数が 2021 年の事例でもおおむね有効であることが確認できた。

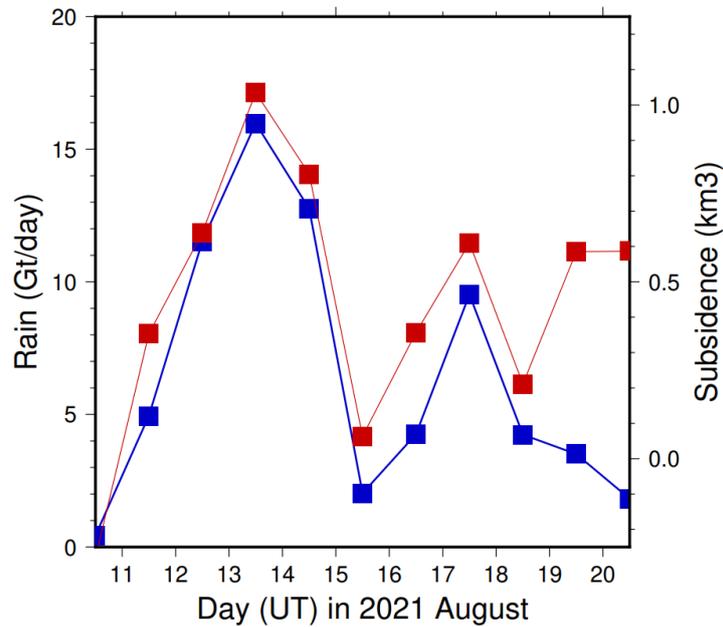


図 3.6:2021 年 8 月中旬の一日当たりの降雨量(青)と体積沈降水量として表した上下変動(赤)。一日当たりの降雨量と上下変動は比例しておりよく似た変化を示す。これは Heki & Arief (2022)が示したように、上下変動は前日の降雨に依存せず、当日の降水量によってのみ決まることと調和的である。

水平方向の変動

前節までは、降水量と上下変動について調査してきた。本節では水平面内の位置変動について述べる。Heki & Arief (2022)によると、水平移動ベクトルは上下変動のように系統的に変化しておらず、ランダムに変動しているようにみえる (図 3.7 下)。一般的に、雨水の荷重による上下変動は沈降のみをもたらすが、水平方向の変動は観測点の周囲の雨水荷重の分布の方位による違いを反映する。従って水平変動は観測点の周囲の局地的な水分分布に強く依存し、実際の GEONET より高密度で GNSS 点が分布していない限り、意味のあるデータとなりにくい。本研究でも Heki & Arief (2022) に倣い、上下変動のみを議論した。

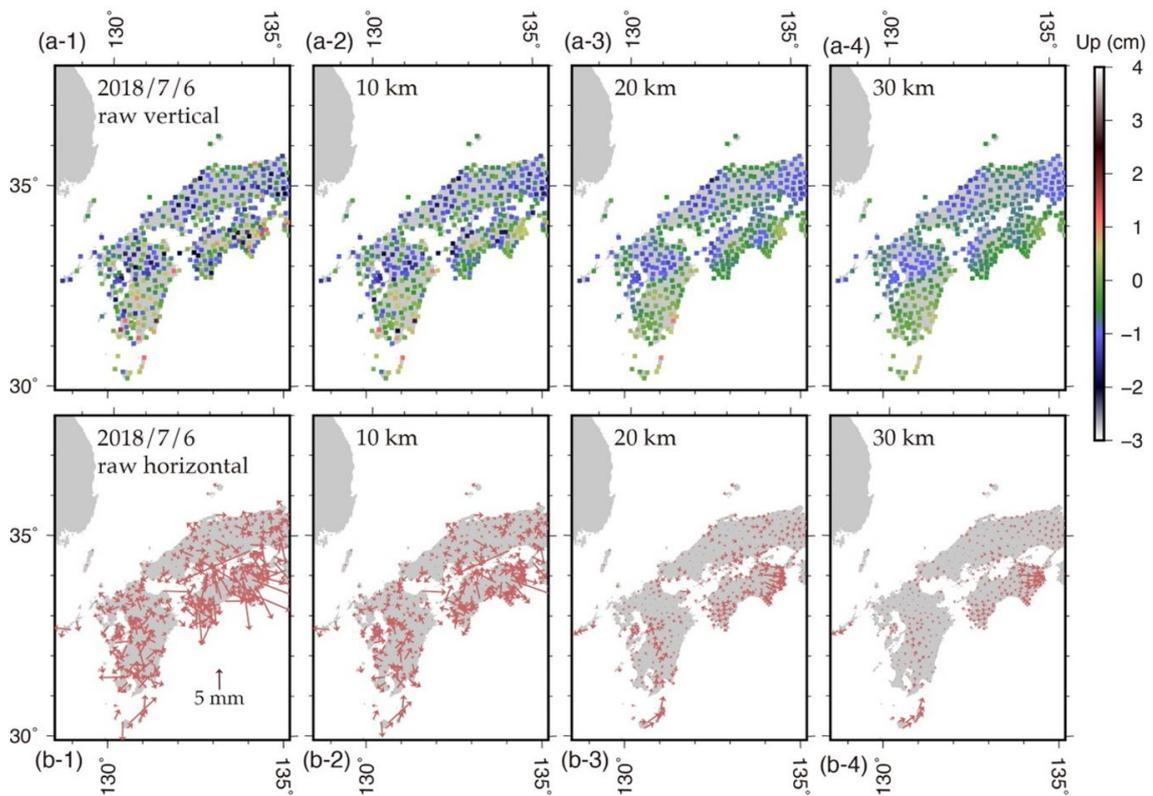


図 3.7:2018 年 7 月の大雨による上下変動(上)水平方向の変動(下)に様々な強さの空間平滑化フィルターを施した結果を比較したもの(Heki & Arief, 2022)。上下変動は系統的で一様に沈降を示すが、水平変動は複雑で局地的な荷重分布を反映しており規則性を見出しがたい。

第4章 降水量と上下変動の相関とその空間スケール依存性

4.1 空間スケールによる相関の強さの変化

前章では西日本全域での降雨と沈降について比較し、それらに高い相関があることを報告した。本章では調査範囲を西日本全体から地方、県、郡市レベル（10点程度）と小さくしていったときに降雨と沈降の相関がどう変化するかを述べる。

図4.1から図4.4までは、それぞれ西日本全域を福岡県、京都府、広島県、徳島県に向かって空間範囲を狭めた結果、図3.6でみた高い相関がどう変化するかを示す図である。時間範囲は図3.6よりさらに広げて2021年8月全体を対象とした。一時間当たりの平均降水量（黒）と上下変動（緑）は、範囲を狭めるにしたがって相関が小さくなってゆく。この傾向はどの地域でも顕著である。

この理由としては二つのことが考えられる。一つは単純にサンプル数が多くなることによってランダムな誤差が平均化されて高精度になることに起因するものである。もう一つは、そもそも降水は空間的な移動が速いため、雨が降った地域のみで沈降しているわけではない。例えば、水が流れていった先の他の地域もある程度沈降するはずである。このような水の高い可動性も相関の低下の原因の一つであろう。

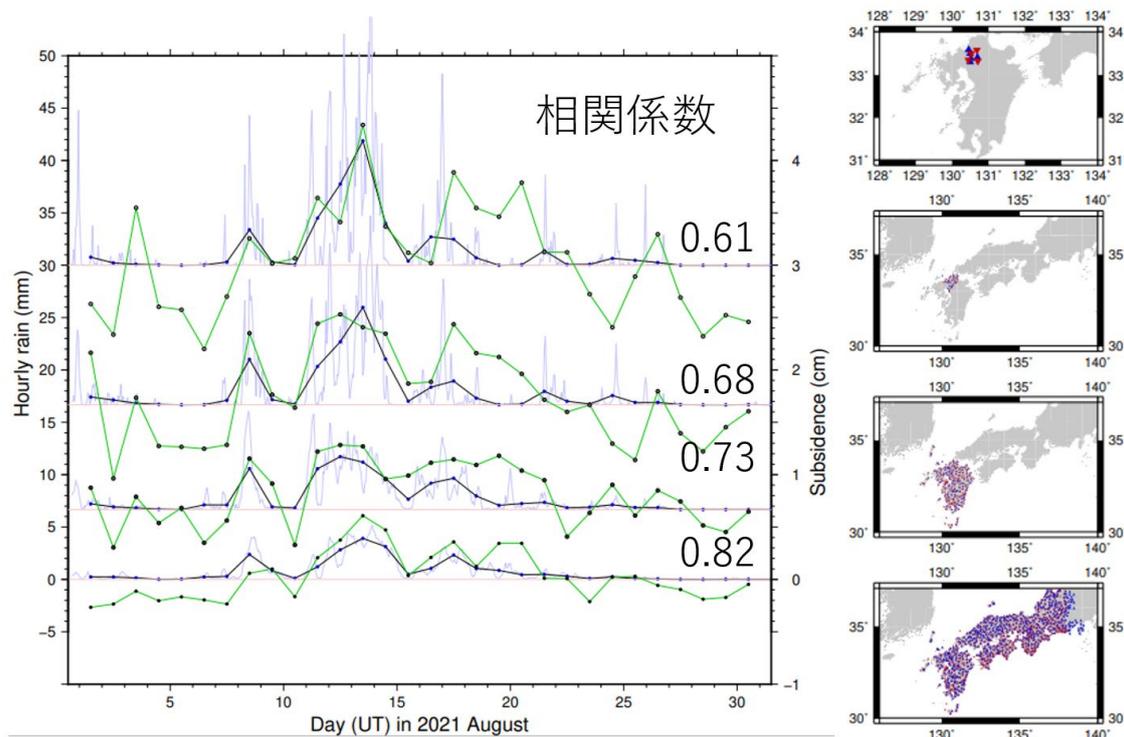


図4.1:降雨—沈降の相関の福岡県の例。右図は左に示す時系列をプロットするのに使用した AMEDAS 点(青)、 GEONET 点(赤)の分布。左図はそれらの大きさの異なる空間範囲での一時間当たりの降水量(青線)、降水量の一日ごとの平均(黒線)、および上下変動(緑線)の2021年8月の時系列を比較したもの。一日当たりの平均降水量と上下変

動の相関係数も併せて表示した。比較対象とする観測局の地理的範囲を狭めるにしたがって相関が下がってゆくことが分かる。

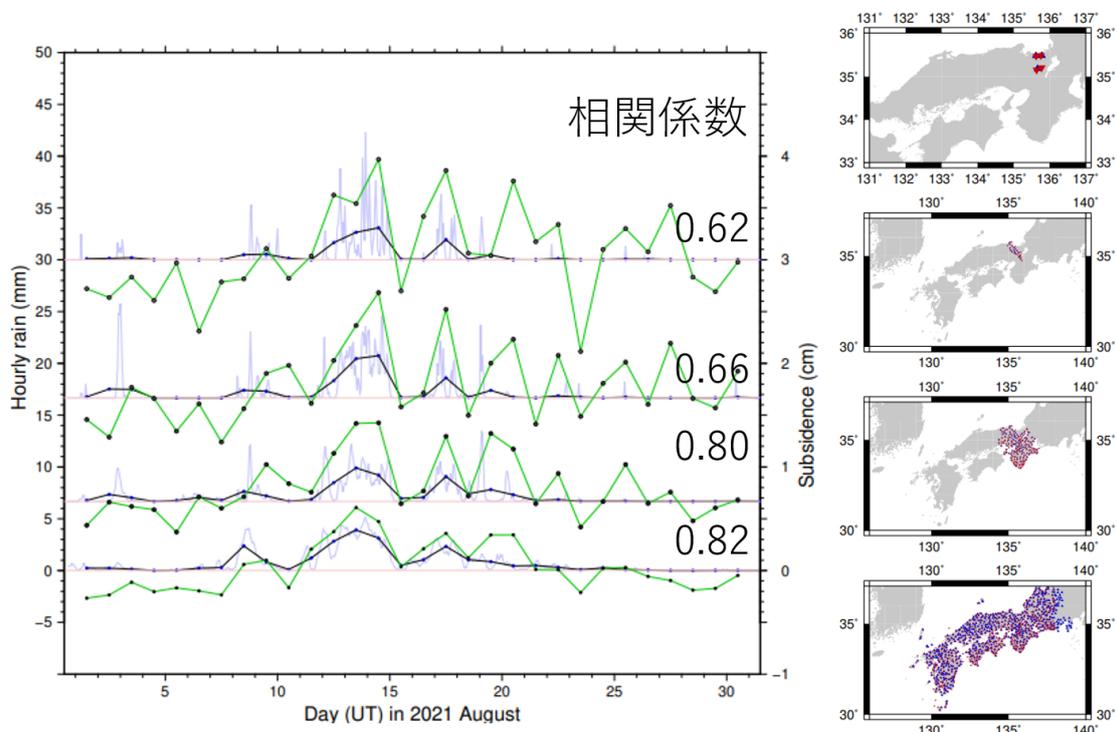


図 4.2: 降雨—沈降の相関の京都府の例、細かい説明は図 4.1 の説明を参照。

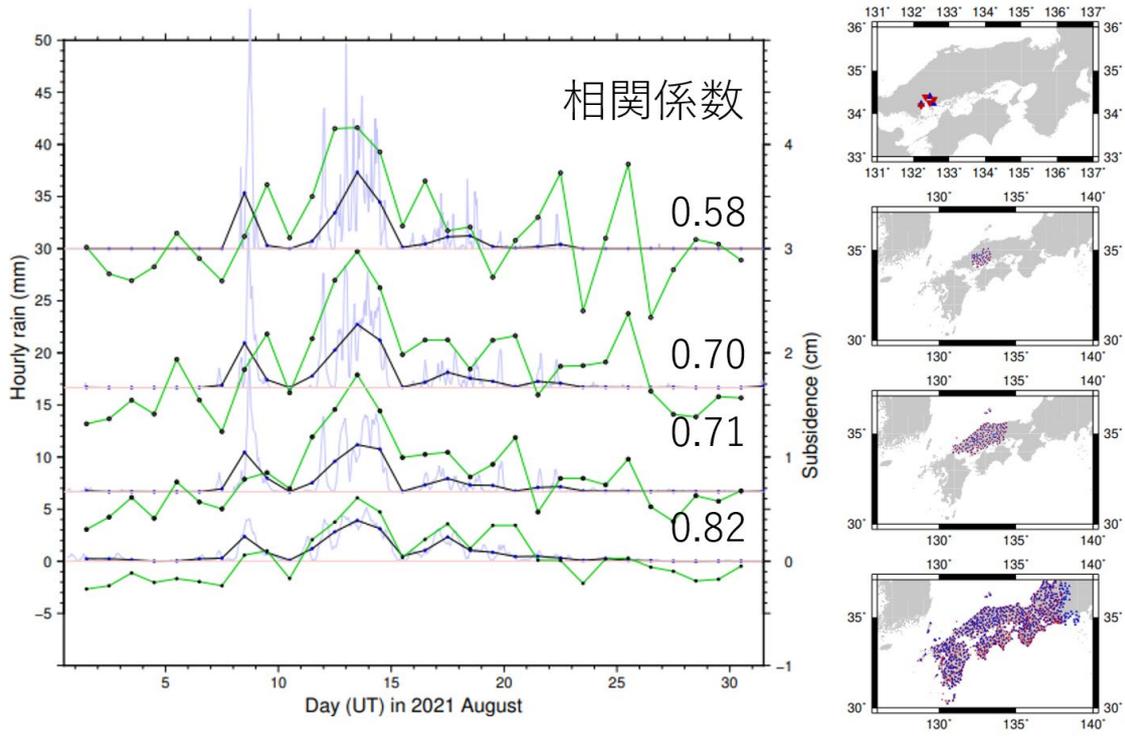


図 4.3: 降雨—沈降の相関の広島県の例。細かい説明は図 4.1 の説明を参照。

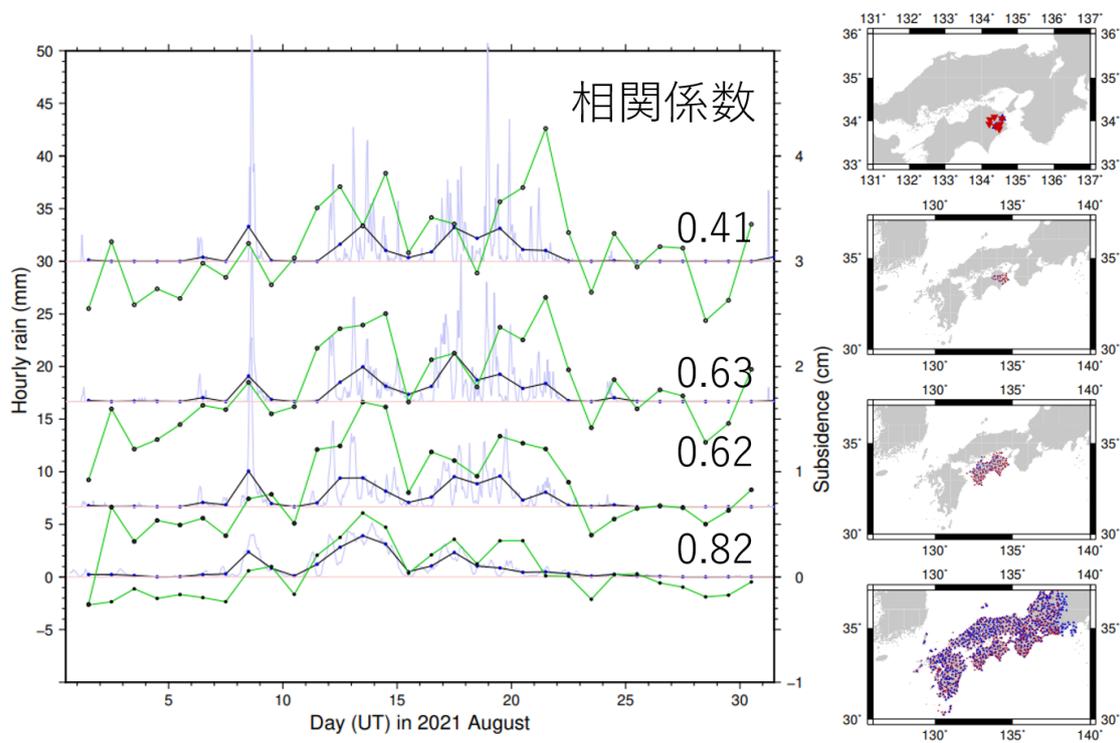


図 4.4: 降雨—沈降の相関の徳島県の例。細かい説明は図 4.1 の説明を参照。

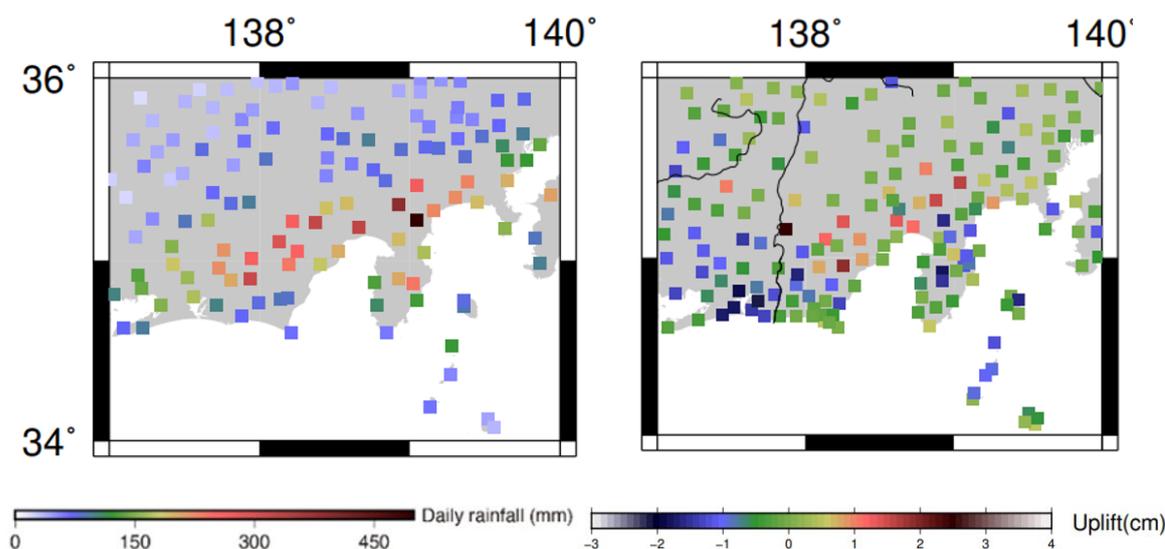
4.2 地方による降水と沈降の相関の差について

前節では、近畿、九州、中国、四国地方の4地域を選び、様々な空間範囲の平均を取って降雨と上下変動の相関係数を求めた。これらのうち地方全体の平均で比べた場合、近畿地方、九州地方、中国地方、四国地方の順番に相関が弱くなっていることが分かる。この原因として四国地方は観測点が九州や近畿地方などに比べ少ないので、平均を求めるサンプル数が小さいため沈降量や降雨量のばらつきの影響が出やすいことが原因として挙げられる。さらに、四国は他の地域に比べて地形の凹凸が激しいため、降水の移動や谷筋への集中の度合いが激しく、沈降と降水の相関が小さくなったことも原因の一つであろう。また特に四国は面積が小さいため、海洋への雨水の排水が一日より短い時間スケールで進み、GNSS局の沈降として現れにくかったことも原因として考えられる。

4.3 富士山麓での降水による隆起

前節まで主に降雨と降雨荷重による沈降の関係について調べたが、図3.1で示したように、降雨後ある程度時間が経過した後に、土壌の膨張と隆起が生じることもある。本章では降雨によって隆起を示す地域があるか否か検討した。

様々な地域について検討した結果、富士山麓地域では、雨が降ると隆起が起きる地点が存在することを見出した。本節ではこの地域の降雨と隆起の関係について述べる。まず2021年7月に生じた東海地方の豪雨と上下変動の関係を取り上げる。7月2日のそれらの分布を図4.5で比較する。強い降雨があった静岡県から神奈川県南部にかけて、伊豆半島や御前崎付近では沈降が見られる。これは、これまで明らかにしてきた降雨荷重による沈降だと思われる。それに加えて、富士山麓に代表される静岡県北部地域で、隆起が卓越していることが分かる。

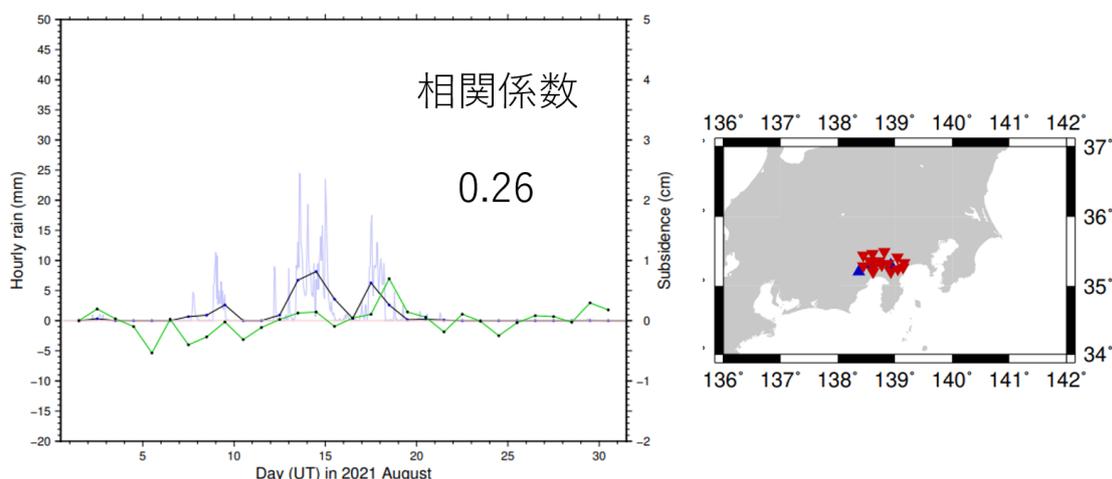


4.5:2021年7月2日の、静岡から神奈川に書けた地域における、アメダス降雨計に

よる降雨(左)と GNSS 点の上下変動(右)。上下変動は前後 15 日間のメジアンを基準とするもの (前の章を参照のこと)。静岡市北方から富士山麓にかけて GNSS 点の隆起が見られることが分かる。

ここで見られた激しい降雨に伴う隆起が、富士山麓地域特有の傾向であるかどうかを議論する。そのために、令和 3 年 7 月の豪雨に加えて、長期間雨が降り続けた令和 3 年 8 月豪雨時の上下変動と降水量について調べた。その結果を図 4.6 に示す。右の縦軸で示す上下変動は沈降を上向きに取っているの、隆起が下向きに出ることに注意。

この図から、この地域では 8 月 15 日以前は降雨に対して沈降が起こっておらず、逆に降雨に伴って隆起している日が多いことが分かる。この地域だけが降雨によって隆起が生じる原因として、富士山麓の上部地殻の岩石には火山地域の特徴として空隙率が多く、雨水の浸透が流出に比べて速く進んだ可能性がある。それによって、降雨荷重による沈降より、土壌の膨張による隆起がより優勢であったこと可能性が考えられる。



4.6:富士山麓を中心とした地域における GNSS 局の上下変動 (緑の線、沈降が上向き) と AMEDAS 局の降雨量 (薄い青が一時間ごとの値、濃い青が一日毎にそれらを平均したもの)。狭い地域で比較した一番上の時系列を比較すると、8/15 以前では降雨に伴って隆起が見られることがわかる。

4.4 富士山以外の火山での異常な隆起

富士山麓での降雨に伴う隆起が普遍的な現象であるかを確認するため、他の火山付近でも同じような傾向が見られるか調査した。本研究では九州中部の阿蘇 (図 4.7)、同南部の桜島 (図 4.8)、中国地方北部の大山 (図 4.9) 山麓について降雨と上下変動の関係を調査した。さらに図 4.1 から図 4.4 で調べた活火山から離れている 4 地域と比較した。

その結果桜島山麓と大山山麓でも大規模な降雨に伴って沈降ではなく隆起が見られる事例が確認できた。また調査した広さと地点数が異なるため単純に比較できないが、富士山

麓と同様に桜島山麓と大山山麓は福岡県、京都府、広島県の地点に比べて降雨と沈降の相関係数も低めであった。この結果から富士山と同様に、新しい大型の火山付近でも降雨に伴う隆起が起こっている可能性があることが示された。

活動的な火山付近の土壌は、基盤岩に割れ目が発達しており空隙率が高いと考えられる。そのため、降水が河川を通過して海洋に流出すると同時に、それらの地域の地下水の涵養が通常地域に比べて速く進む。富士山や羊蹄山などの成層火山の近辺で良質で多量の地下水が噴出するのもその一つの顕れであろう。そういった地域では、多量の降雨に伴う地盤の膨張と地表の隆起が起こるのかも知れない。

なお富士山麓等でも、多量の降雨に伴って隆起する場合と沈降する場合の双方がある理由や、阿蘇山麓では非火山地域と同様に降雨と沈降が正の相関を持つ理由はよくわからなかった。

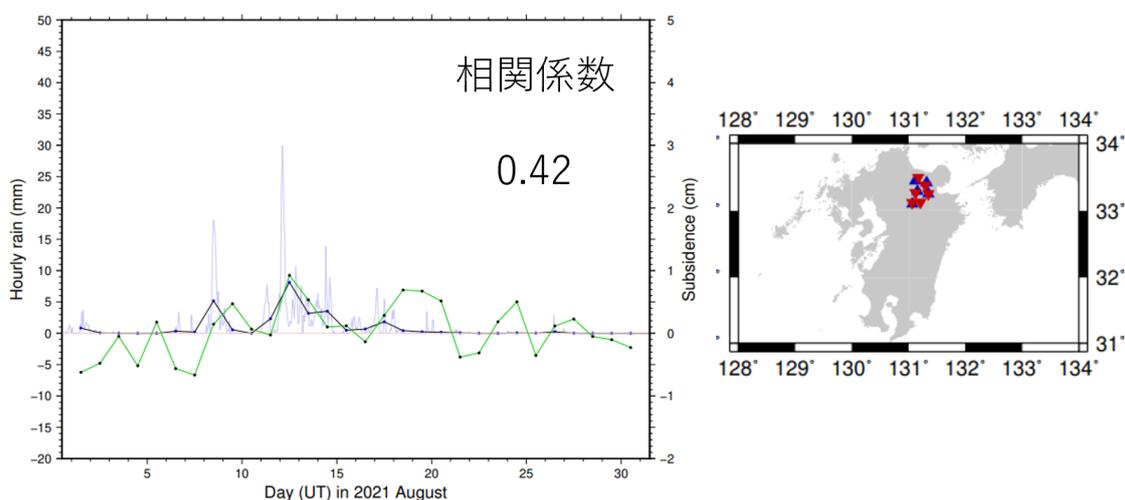


図 4.7 阿蘇山麓での降雨量と沈降量の比較。非火山地域と同様に両者は正の相関を持つ。詳細は図 4.6 の説明を参照。

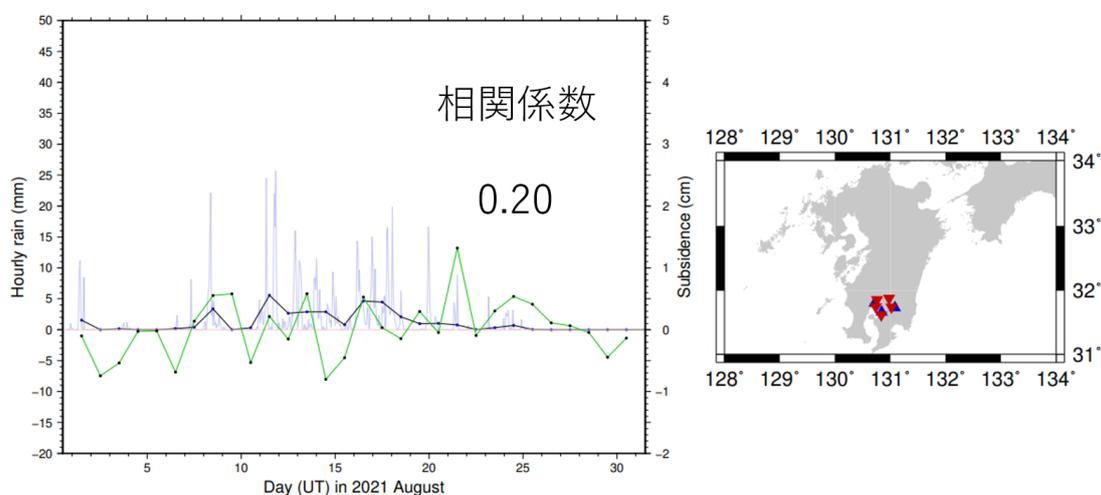


図 4.8 桜島山麓での降雨量と沈降量の比較。8月15日前後は大雨が継続しているが、隆起が見られる。詳細は図 4.6 の説明を参照。

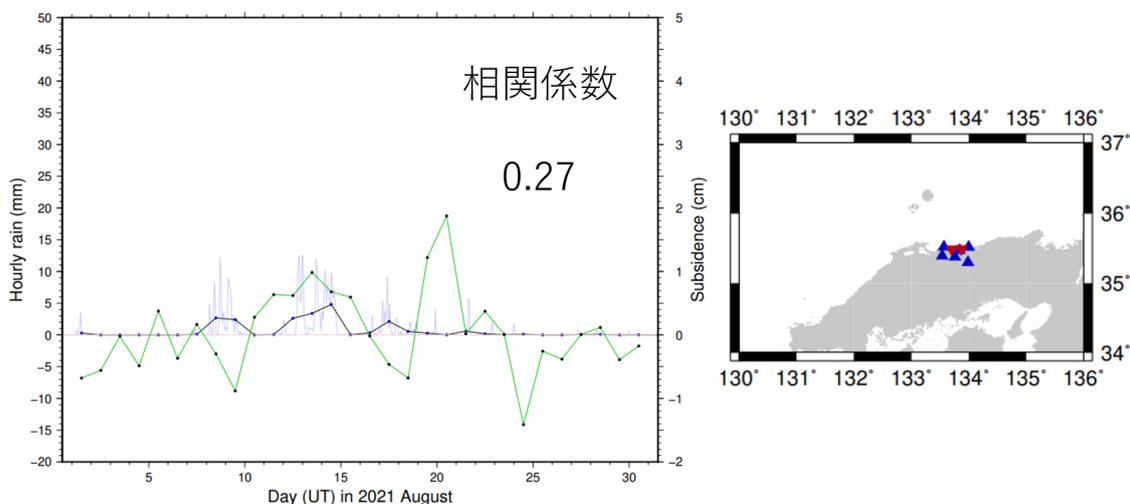


図 4.9 大山山麓(鳥取県)での降雨量と沈降量の比較。多量の降水があった8月8日付近と18日付近で、沈降ではなく隆起がみられる。詳細は図 4.6 の説明を参照。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、2017-2020の夏に西日本で発生した豪雨について、地殻上下変動との関連を調べた Heki & Arief (2022) を先行研究とし、そこで扱われていない 2021 年(令和3年)夏の大雨による地殻変動について、同様の手法で解析した。

第2章では、降雨と地殻上下変動を調べるために用いたアメダスデータとGNSSデータについて、それらのデータの処理法について説明した。

第3章では、令和3年7月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨と、令和3年8月の西日本を中心とした大雨での降雨と沈降、さらに8月の大雨では西日本全体の降雨量と沈降量の関係を調べた。その結果、一日ごとに広域で積分した降雨量と沈降量に比例関係が見られ、Heki & Arief (2022) が 2017—2020 年の西日本豪雨で見出した関係が、2021 年の夏の豪雨の事例でも成り立つことが示された。

第4章では、積分する空間スケールを、市郡レベル、都府県レベル、地方レベル、西日本全体、と様々に変えて、降雨と沈降の相関がどのように変化するかを調査した。その結果、空間スケールを小さくすると相関が小さくなることを見いだされた。その原因として、多くのデータを平均することによる誤差の低減が考えられる。さらに雨水に高い流動性があることによって、局地的にみると沈降域と降雨域が実際に一致しない場合があることも原因の一つであると考えた。

また富士山麓では、他地域と異なり、激しい雨が降った時に沈降せずに隆起することを見出した。特に 2021 年の豪雨の事例では、8月前半では降雨に伴う顕著な隆起が見られ

た。原因として富士山麓の表層の地質は火山からの降下物によって形成されており、高い空隙率のせいで地下水の浸透が速く進んだと考えた。同じく火山からの降下物が分布する桜島や大山、阿蘇山付近でも同様の調査を行った。その結果、大山と桜島付近でも大規模な降雨に伴って地表の隆起がしばしば起こることが確認された。

本研究では、調査する地域の大小による降雨量と沈降量の相関の違いや、富士山麓での降雨に伴う隆起について、主に経験的なアプローチで研究を行った。しかし、降雨量と沈降量の定量的な整合性は、地形による雨の集中や地殻岩石の局地的な剛性の相違などの複雑な問題が解決されないと確認できないと考えられる。また大規模な火山の山麓地域で降雨に伴って隆起が起きる事例についても、そのメカニズムを解明するには、より多くの地域で系統的な研究を継続する必要がある。

第6章 謝辞

本研究を行うにあたり、宇宙測地学研究室及び固体ゼミの皆様には大変お世話になりました。指導教官の日置幸介教授には研究の進め方から発表資料や論文作成に至るまで研究に関するあらゆることについてご指導いただきました。皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Heki, K., S. Arief, Crustal response to heavy rains in Southwest Japan 2017-2020. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 578, 2022.
- [2] Heki, K., Seasonal Modulation of Interseismic Strain Buildup in Northeastern Japan Driven by Snow Loads. *Science*, Vol. 293, No. 5527, pp. 89-92, 2001.
- [3] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *JGR Solid Earth*, Vol. 101, No. B2, pp. 3227-3246, 1996.
- [4] Milliner, C., Materna, K., Bürgmann, R., Fu, Y., Moore, A. W., Bekaert, D., Adhikari, S. & Donald F. Argus, Tracking the weight of Hurricane Harvey's stormwater using GPS data. *SCIENCE ADVANCES*, Vol. 4, No. 9, 2018.
- [5] Hammond, W.C., G. Blewitt, C. Kreemer, R. S. Nerem, GPS Imaging of Global Vertical Land Motion for Studies of Sea Level Rise. *JGR Solid Earth*, Vol. 126, No. 7, 2021.
- [6] Nakagawa, H., Toyofuku, T., Kotani, K., Miyahara, B., Iwashita, C., Kawamoto,

S., Hatanaka, Y., Munekane, H., Ishimoto, M., Yutsudo, T., Ishikura, N., & Sugawara, Y., Development and Validation of GEONET New Analysis Strategy (Version 4). *J. Geographical Survey Inst.*, Vol. 118, pp. 1-8 (in Japanese), 2009.

[7] Takamatsu, N., Muramatsu, H., Furuya, T., Abe, S. & Hiyama, Y., The development of the new analysis strategy of GEONET. paper presented at the 2020 Fall Meeting of American Geophys. Union, Dec. 10, 2020.

[8] Zhan, W., K. Heki, S. Arief, & M. Yoshida, Topographic amplification of crustal subsidence by the rainwater load of the 2019 typhoon Hagibis in Japan. *JGR Solid Earth*, Vol. 126, No. 6, 2021.

[9] 池田学, 渡邊幸男, 牛山素行, 気象庁における地域気象観測(1) -AMeDAS の展開まで-. *水文・水資源学会誌*, 13 巻, 4 号, pp. 313-319, 2000.

参考ホームページ

ネバダ大学ホームページ: <http://geodesy.unr.edu>

内閣府ホームページ: https://qzss.go.jp/technical/technology/tech01_orbit.html

GLONASS ホームページ: <https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php>

みちびき公式サイト: <https://qzss.info>

国土地理院公式サイト: https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_38136.html

気象庁公式サイト: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>