

タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正について

Rainfall Correction of Volumetric Strainmeter Data by Tank Models

木村一洋¹, 露木貴裕², 菅沼一成³, 長谷川浩², 見須裕美², 藤田健一⁴

Kazuhiro KIMURA¹, Takahiro TSUYUKI², Issei SUGANUMA³,
Hiroshi HASEGAWA², Hiromi MISU², and Kenichi FUJITA⁴

(Received April 25, 2013; Accepted May 21, 2014)

ABSTRACT: Rainfall correction of the Japan Meteorological Agency's (JMA's) volumetric strainmeter data was problematic because a mediating change was produced after rainfall. We attempted to perform rainfall correction of the volumetric strainmeter data using tank models (Sugawara, 1972) and were able to obtain better results than with old rainfall correction. Various tank model shapes to correct rainfall of crustal deformation data had been suggested in previous studies, but no general tank model shape had been determined. By changing the shape, tank models can adopt the effects of flank outflow and soil water structure, evaporation, and time delay. We defined the sum of the absolute value of the difference of volumetric strainmeter data over the 24-hour investigation period as the objective function and examined the shape of the most suitable tank by the SCE-UA method (Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona, Duan et al., 1992). We suggest the most suitable tank shape in Fig. 25, Table 6, and formulas 22 to 36.

Because rainfall correction by tank models had been examined for shallow crustal deformation measurement in previous studies, the penetration process of rainfall had come to be regarded as important. We understand the load and horizontal movement process of rainfall are important in correcting the rainfall of deep borehole crustal deformation measurements, such as those of the volumetric strainmeter.

For JMA's strainmeters, the noise level was defined to monitor the Tokai Earthquake pre-slip. We recognized that the old noise level definition was problematic during the rainfall period, and we suggest re-defining the noise level to estimate each amount of precipitation progressively. We obtained a resulting noise level value that was 68% of the old noise level and old rainfall correction. The detectability of a Tokai Earthquake pre-slip will improve by incorporating rainfall correction and re-defining the noise level.

1 はじめに

気象庁では東海地震の前兆すべりの監視などを目的として、Sacks-Evertson 式の体積ひずみ計 (Sacks et al., 1971) と、石井式の多成分ひずみ計 (石井・他, 1992) のデータをリアルタイムで監視している。こ

のうち、降水の影響が大きい体積ひずみ計データについては、降水補正 (石垣, 1995) を行ってきた。しかし、この降水補正では降水後に緩和的な変化が生じてしまうため、降水後についていえば降水補正をしない方が地殻変動現象を検知しやすい状況であ

¹ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute
現所属: 気象研究所地震津波研究部, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

² 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

³ 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

⁴ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department
現所属: 気象研究所地震津波研究部, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

った。そのため、降水補正を行ったデータだけでなく、降水補正なしのデータも重複してリアルタイムで監視していた（木村・他，2012）。

このような問題点を解消するため、試行的に簡単なタンクモデルを用いた降水補正を行ったところ、4.1 節で紹介するような良好な結果を得ることができた。なお、タンクモデルとは、流域水文学（以降、水文学）の観点から河川流出量を推測するために菅原（1972）によって考案されたモデルであるが、これまでもたびたび地殻変動データの降水補正に用いられてきた。但し、適正なモデル（パラメータの値やタンクの形状）を見出すことが簡単ではないなどといった問題点を抱えていたため、最近ではあまり行われていなかった（気象研究所，2005）。しかし、近年の計算機環境の劇的な向上によって、現在では本稿のように適正なモデルを見出すことが比較的簡単に実現可能な状況となっている。気象庁の体積ひずみ計は、地理条件が全く異なる複数の場所に設置されている。本稿ではこの点を生かして詳細な調査を行い、タンクモデルによる地殻変動データの降水補正に用いる汎用的なタンクの形状を提案する。この提案によって、これまでの降水補正が抱えていた問題点を解消できるだけでなく、これまで検知できなかった地殻変動現象が検知できるようになる。

また、ひずみ計のデータを実際に監視するためには、監視の基準となる閾値（ノイズレベルの値）をあらかじめ調べる必要がある。気象庁では、これまで小林・松森（1999）によるノイズレベルの定義に基づいた監視を行ってきた。しかし、降水期間については、少々の雨の場合にはノイズレベルの値が過剰なほど大きな幅であることや、大雨の場合には必ずノイズレベルの値を超えることといった問題点を抱えていた。本稿では、ノイズレベルの定義の見直しについても提案する。この見直しによって、これまでのノイズレベルの定義が抱えていた問題点を解消できるだけでなく、ノイズレベルの値を超えたという事実が重要な意味を持つようになる。タンクモデルによる降水補正と、ノイズレベルの定義の見直しの両方を業務に導入することによって、東海地震の前兆すべりの検知力が向上することが確認できた。

本稿では、大まかに前半部の 2 章から 6 章でタンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正、後半部の 7 章から 8 章でノイズレベルの定義の見直し

について説明する。各章を個別に示すと、まず前半部の 2 章では、これまでに行われてきた地殻変動データの降水補正と、タンクモデルに関する調査のレビューを行い、タンクモデルの問題点とその現在の状況について説明する。3 章では、タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正の調査方法について説明する。4 章では、気象庁の体積ひずみ計データの降水補正に適したタンクの形状を提案する。5 章では、調査を行った各観測点における降水応答の特徴について述べる。6 章では、これまでの降水補正とタンクモデルによる降水補正の比較を行う。後半部の 7 章では、ノイズレベルの定義の見直しを提案する。最後に 8 章では、タンクモデルによる降水補正を行った体積ひずみ計データのノイズレベルの値を調べるとともに、各観測点における検知力向上のための今後の課題について検討する。

なお、気象庁では 2014 年 1 月に本稿の提案を業務に導入し、東海地震の前兆すべりの監視や資料作成を行うようになった。また、多成分ひずみ計については、体積ひずみ計に比べて埋設深度を深くしているため降水の影響は小さいが、全く無視できるわけではない。多成分ひずみ計データについてもタンクモデルによる降水補正の有効性が確認されたため、業務に導入するようになったが、本稿では割愛する。

2 これまでに行われてきた地殻変動データの降水補正とタンクモデルに関する調査

2.1 気象庁の体積ひずみ計の降水の影響の補正（降水補正と地下水位補正）

気象庁で体積ひずみ計の連続観測が開始されたのは、1976 年のことである（末廣，1979）。この体積ひずみ計のセンサーは、深さ数百 m のボアホールの底に埋設されており、潮汐や気圧の影響も大きい。降水の影響も大きい。まず潮汐については、固体地球潮汐に加えて、海に近い場所では海洋潮汐の影響も大きく受ける。末廣（1979）は、この海洋潮汐による体積ひずみ計データの変化の要因について、海水ののしかかり（荷重）を指摘した。このような潮汐の影響を補正するため、古くは福留（1984）がフーリエ解析と最小二乗法を用いた潮汐補正の試み。現在、気象庁で監視している体積ひずみ計を含めた全ての地殻変動データは、Baytap-G（石黒・他，1984；

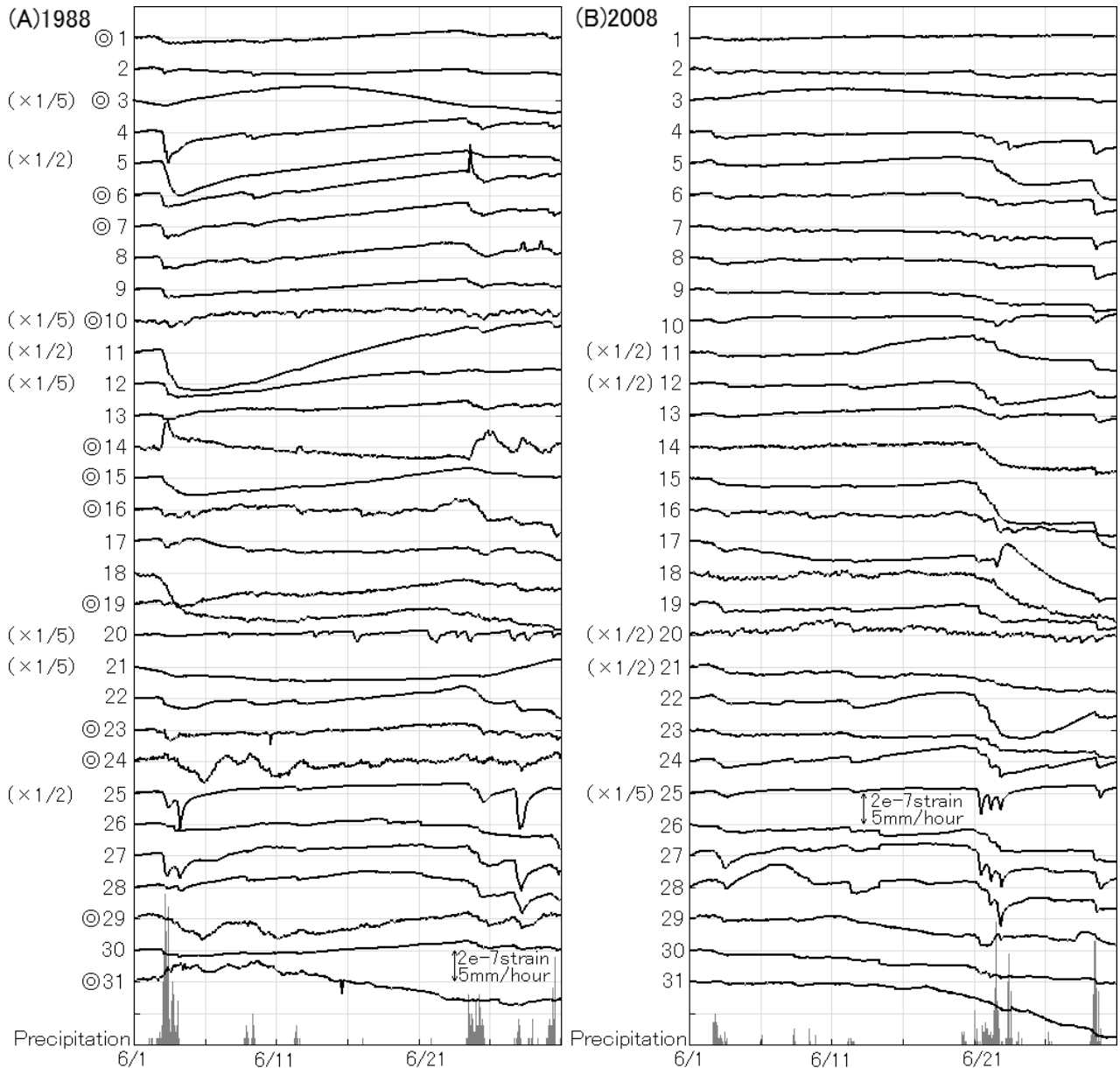


Fig. 1 Data plot of all volumetric strainmeters and precipitation at Shizuoka (1)

(A) June 1–30, 1988 (◎: These strainmeters were updated in the 1990's.)

(B) June 1–30, 2008

* Station code (refer to Table 1) is shown on the left side of the volumetric strainmeter data.

* Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

Tamura et al., 1991) による潮汐補正を行っている。次に気圧については、檜皮・他 (1983) や古屋・檜皮 (1984) などによって、線形的な気圧補正ができることが分かった。上垣内 (1986) は、気圧による体積ひずみ計データの変化の要因について、荷重を指摘して物理的な考察を行った。こうした調査を受けて、気象庁では東海地域の各観測点には 1984 年までに、南関東地域の各観測点には 1988 年までに気圧

計を設置した。これらの結果、Fig. 1 (A) に 1988 年 6 月における全観測点の体積ひずみ計データを示すが、このような古い時代でも潮汐や気圧の影響は概ね補正できていた。しかし、降水の影響については、補正できていないまま大きな課題として残されていた。そこで、体積ひずみ計データの降水の影響を補正するため、降水量データを入力値とする降水補正と、地下水位データを入力値とする地下水位補

Table 1 Station code and installation environment for volumetric strainmeters

Station code	Station name	Japanese name (観測点名)	Altitude (m)	Underground depth (m)	The precipitation data using for the rainfall correction (*)
1	Taharafukue	た はらふく え 田原福江	6	268	
2	Gamagoriseida	がまごおりせいだ 蒲郡清田	38	100	
3	Hamamatsumikkabi	はままつみっかび 浜松三ヶ日	20	216	Mikkabi (三ヶ日アメダス)
4	Hamamatsuyokokawa	はままつよこかわ 浜松横川	160	149	
5	Shimadakawane	しまだかわね 島田川根	173	101	
6	Omaezakisakura	おまえざきさくら 御前崎佐倉	35	286	
7	Makinoharasakabe	まきの はらさかべ 牧之原坂部	16	254	
8	Omaezakiyama	おまえざきおやま 御前崎大山	45	214	
9	Fujiedahanagura	ふじえだはなぐら 藤枝花倉	45	101	
10	Shizuokaurushiyama	しずおかうるしやま 静岡漆山	8	198	
11	Shizuokatadanuma	しずおかただぬま 静岡但沼	60	125	
12	Fujiunaigafuchi	ふじうないがふち 富士鵜無ヶ淵	206	92	
13	Izukoshimoda	いずこしもだ 伊豆小下田	100	152	
14	Minamiizuiruma	みなみいずいるま 南伊豆入間	53	250	
15	Higashiizunaramoto	ひがしいずならもと 東伊豆奈良本	148	251	Inatori (稲取アメダス)
16	Atamishimotaga	あたみしもたが 熱海下多賀	70	260	Ajiro (網代アメダス)
17	Yugawarakajiya	ゆがわらかじや 湯河原鍛冶屋	187	150	Ajiro (網代アメダス)
18	Hadanobodai	はだのぼだい 秦野菩提	206	148	Hiratsuka (平塚アメダス)
19	Oshimatsubaitsuki	おおしまつばいつき 大島津倍付	187	291	Ohshima (大島アメダス)
20	Hinohodokubo	ひのほどくぼ 日野程久保	125	148	Fuchu (府中アメダス)
21	Yokohamakawawa	よこはまかわわ 横浜川和	55	203	Ebina (海老名アメダス)
22	Miuramisaki	みうらみさき 三浦三崎	50	150	Miura (三浦アメダス)
23	Yokosukamabori	よこすかまぼり 横須賀馬堀	28	250	
24	Tateyamanakazato	たてやまなかざと 館山中里	35	250	
25	Futsumochii	ふつもちい 富津望井	15	150	Kisaradu (木更津アメダス)
26	Sosaiidaka	そうさいだか 匝瑳飯高	35	300	Yokoshibahikari (横芝光アメダス)
27	Otakiutobara	おおたきうとうばら 大多喜宇筒原	90	250	Ohtaki (大多喜アメダス)
28	Nagaraosakabe	ながらおさかべ 長柄刑部	28	250	Ushiku (牛久アメダス)
29	Katsuuratona	かつうらとな 勝浦壘名	12	250	
30	Kamogawayairo	かもがわやいろ 鴨川八色	30	150	Kamogawa (鴨川アメダス)
31	Choshimyojin	ちようしみょうじん 銚子明神	20	255	Choshi (銚子アメダス)

* If the cell is blank, the station's rain gauge precipitation data is used to perform rainfall correction.
(The Japanese name of the precipitation data is shown in parentheses.)

正という 2 つのアプローチで、気象庁でも 1980 年代から 1990 年代にかけて比較的盛んに調査が行われ

てきた。

まず、降水補正のアプローチとして、二瓶・檜皮

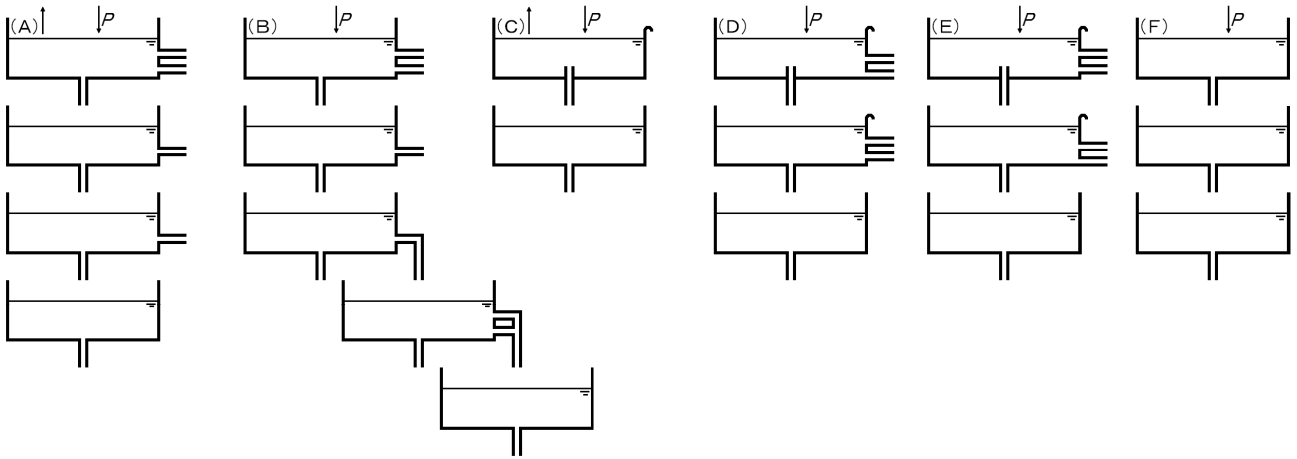


Fig. 2 Shapes of various tank models from previous studies
 (A) Sugawara (1972), (B) Nihei and Hikawa (1984), (C) Tanaka (1979)
 (D) Yamauchi (1981), (E) Nishimae and Wakui (1996), (F) Ueda et al. (2010)

(1984) は旧三ヶ日（現在は非運用．以降，(3) 旧浜松三ヶ日：埋設深度 51m．気象庁の体積ひずみ計の観測点名の前には観測点コード（Table 1 を参照）を付す．）において，Fig. 2 (B) の 5 段のタンクモデルと浜松測候所（現在の浜松アメダス）の降水量データを用いて，5 段目のタンクの水位の計算値と体積ひずみ計データの長期的な変化が類似していることを示した．二瓶・檜皮（1984）によると，最初は 3 段のタンクで計算を繰り返したが，時間遅れの調整が難しく結局 5 段のタンクにしたと述べており，試行錯誤を重ねた苦勞が感じられる複雑なタンクの形状をしている．なお，この (3) 旧浜松三ヶ日の近傍の地層は 30 度から 60 度の角度で褶曲していることなどから，体積ひずみ計データの降水による長期的な変化の要因は，岩盤の吸水膨張（含水率の増加）であろうと推論した．

なお，重要な観測事実として，吉田・他（1984）は (10) 旧静岡（移設に伴い現在は廃止．埋設深度 60m）と (16) 旧網代（移設に伴い現在は非運用．埋設深度 120m）の 2 つの観測点においてボアホール内の地下水位を観測して，降水による地下水位データの変化に伴う体積ひずみ計データの変化傾向が，2 つの観測点で全く正反対となることを明らかにした．そして，降水による体積ひずみ計データの変化の要因には，降水荷重（縮み）と，体積ひずみ計のセンサー周辺の帯水層の含水率の増加（伸び）が考えられることを指摘した．その上で，この 2 つの観測点における変化傾向の違いは，体積ひずみ計

のセンサーの埋設深度と帯水層の高さの位置関係によって，受けやすい要因が異なるためであると考察した．例えば，Fig. 1 (A) の (14) 旧石廊崎（移設に伴い現在は廃止．埋設深度 133m）では，降水による大きな伸びの変化が見られる．その後，1990 年代に幾つかの観測点で，体積ひずみ計の更新（離れた場所への移設を含む）が行われた．Fig. 1 (B) に 2008 年 6 月における全観測点の体積ひずみ計データを示す．最近のデータであっても，例えば (10) 静岡漆山など一部の観測点では降水後に大きな伸びの変化に反転することはあるものの，全観測点で降水による縮みの変化が見られる．本稿ではこの吉田・他（1984）の考察を参考に，現在気象庁で監視している体積ひずみ計データの降水による縮みの変化の主な要因も，潮汐や気圧と同様，主に荷重（降水荷重）と考えていくこととする．

そして，吉田・他（1984）は先に紹介した重要な観測事実と考察以外に，(10) 旧静岡の体積ひずみ計データと地下水位データの変化の相関が良かったことから，線形的な地下水位補正のアプローチも試みた．その結果，体積ひずみ計データの長期的な変化は補正できたものの短期的な変化は補正できていないことや，地下水位データを体積ひずみ計データの補正量に換算する補正係数の大きさが，期間によって異なることを明らかにした．そして，降水による体積ひずみ計データの変化には地下水位以外の要因があることや，観測した地下水位データが体積ひずみ計データに影響を与える地下水位を正確には反映

していないことが考えられるといった推察を行った。また、小泉・吉田（1989）は降水応答がとても複雑な（17）湯河原鍛冶屋において、孔内に水位計を設置して連続観測を行った。10 時間前の地下水位データの変化が体積ひずみ計データに影響を与えていると仮定してその伝達関数を推定したところ、降水による地下水位データの上昇に伴い一旦は伸びの変化となり、その後 2 日ほどの時間遅れで縮みの変化となることを明らかにした。また、その伝達関数が季節によって異なるような複雑性があることを示した。そして、この体積ひずみ計データの降水による変化の要因は、吉田・他（1984）の考察を踏まえて降水荷重と、体積ひずみ計のセンサー周辺の帯水層の含水率との複合的な影響であろうと推察した。

その他、幾つかの観測点の孔内においては、地下水位の連続観測が行われ（二瓶・佐藤, 1987）、地下水位データと体積ひずみ計データの変化の関係が調査されてきた。例えば、小林・他（2010）は（3）浜松三ヶ日において、観測点の近隣における揚水に伴う地下水位データと新旧 2 つの体積ひずみ計データの変化の関係を調査した。このように、地下水位の連続観測は、体積ひずみ計の環境要素の把握としては一定の成果を得ている。しかし、気象庁では体積ひずみ計データに地下水位補正を行って監視するまでには、現在までのところ至っていない。

これまで気象庁の体積ひずみ計データには、石垣（1995）による成果を元に、AR モデルによる降水補正を行ってリアルタイムで監視してきた。この AR モデルの詳細は 6 章で示すが、石垣（1995）の調査に先立って、松本・高橋（1993）は地質調査所（現：産業技術総合研究所）の浜岡観測井において、MR-AR 解析による地下水位データの降水補正を行うことに成功した。浜岡観測井は深さ 270m で、ストレナーが 153.9m から 264.5m である。浜岡観測井の地下水位データは、降水によって一旦上昇し、その後緩和的に下降する。そして、浜岡観測井に隣接する気象庁の（6）旧浜岡（新観測点の設置に伴い現在は廃止。以降、（6）旧御前崎佐倉：埋設深度 250m）における体積ひずみ計データの降水による変化と類似していることも指摘した。この松本・高橋（1993）の MR-AR 解析による降水補正は、産業技術総合研究所で観測している幾つかの地下水位データに行われて良好な結果が得られており、各種資料にも反映

されている（例えば、産業技術総合研究所（2013））。

石垣（1995）は、気象庁でこれまでで唯一監視に用いることを目的として体積ひずみ計データの降水補正の調査に取り組んだ。松本・高橋（1993）の手法を参考に、降水補正手法として AR モデルを用いて良好な結果を得たとともに、次節で紹介する田中（1979）が考案した Fig. 2 (C) の 2 段のタンクモデルによる降水補正との比較を行った。その結果、田中（1979）のタンクモデルよりも AR モデルの方が良いと結論づけた。しかし、このタンクモデルによる降水補正の調査では、田中（1979）の手法を参考に 2 段目のタンクの水位の計算値のみが用いられている。吉田・他（1984）の考察を参考に、降水による体積ひずみ計データの縮みの変化の要因が降水荷重であると考え、まず降水が最初に荷重として影響を及ぼす 1 段目のタンクの水位の計算値を無視できないはずである。石垣（1995）は、田中（1979）のタンクモデルによる降水補正では、降水直後の変化に追従できなかったことを指摘した。もし 2 段目のみではなく、1 段目のタンクの水位の計算値を用いていれば、そのような結果とはならなかったかも知れない。実際、4.1 節で示すように、わずか 1 段のタンクモデルでも降水直後の変化に追従できる。

このような問題があったものの、石垣（1995）による降水補正の調査の意義はとても大きい。降水補正によるアプローチが成功したことによって、気象庁は 1999 年までに東海地域の各観測点に雨量計を設置した。また、AR モデルによる降水補正を行った体積ひずみ計データをリアルタイムで監視するようにし、東海地震の前兆すべりの検知力を上げるための努力を継続的に行ってきた。

2.2 気象庁の体積ひずみ計以外の地殻変動データのタンクモデルによる降水補正

ボアホール式の気象庁の体積ひずみ計以外に目を向けると、大学などでは横穴式の地殻変動観測施設において伸縮計や傾斜計の観測が古くから行われてきた。この横穴式の地殻変動観測施設における降水の影響は地上に近いためとても大きく、Hagiwara（1938, 1941）など古くから調査や考察が行われてきた。そして、特に横穴式の観測施設が大幅に増えた 1960 年代から 1980 年代にかけては、地殻変動データにおける降水の影響の調査や考察が盛んに行わ

れていた。飯田・他（1969）は名古屋大学の犬山地殻変動観測所において、降水による伸縮計データとトンネル内の湧水量データの変化の相関が高いことを示した。山内・他（1971）は、実際に湧水量データを用いた伸縮計データの補正手法についての検討を行った。また、石井・他（1973）は東北大学の秋田地殻変動観測所（男鹿）において、降水による伸縮計データの変化の要因について、降水荷重よりも含水率の影響が大きいことを示し、多孔性媒質の理論で説明できることを示した。

また、これらの横穴式の観測施設の地殻変動データについて、タンクモデルによる降水補正の調査もこれまでたびたび試みられてきた。田中（1979）は京都大学の由良観測室において、降水による水管傾斜計データの変化がある帯水層内の地下水位あるいは土中含水率などの関数で表わせると仮定して、Fig. 2(C)の2段のタンクモデルを考案し計算を行った。2ヶ月間という比較的短い期間ではあるが、2段目のタンクの水位の計算値と水管傾斜計データの変化が類似していることを示した。山内（1981）も田中（1979）の考えと同様に Fig. 2 (D) の3段のタンクモデルを考案して、名古屋大学の三河地殻変動観測所において伸縮計データの降水による短期的な変化の降水補正に加えて、3年間にわたる長期的な変化の降水補正にも成功した。なお、山内（1981）は夏期（7～8月）に過補正となったため、夏期だけ入力する降水量の値を9割にしたり、また入力可能な降水量を最大30mm/hourに制限したりするなどの工夫を行った。この工夫について、夏期は蒸発が激しく降水が地下に浸透する割合が少ないことや、集中豪雨などの場合には降水が地表を流れてしまい地下に浸透する割合が低いといった降水の影響に関する考察も行った。また、西前・涌井（1996）も気象庁精密地震観測室（現：松代地震観測所）において、山内（1981）と類似した Fig. 2 (E) の3段のタンクモデルを考案して、伸縮計及び水管傾斜計の各データの降水補正に成功した。

ここまでに紹介したタンクモデルによる地殻変動データの降水補正では、いずれも最下段のタンクの水位の計算値のみを用いている。地上に近い横穴式の地殻変動観測施設でトンネル付近の含水率の影響が大きい場合には、降水の地下への浸透過程が重要であり、最下段のタンクの水位の計算値のみを用い

る手法は適切だと考えられる。しかし、埋設深度の深いボアホール式の体積ひずみ計について降水荷重の影響を考える場合には、地表も含めて滞留している全ての降水が重要となるはずであり、最下段のタンクの水位の計算値のみを用いる手法は適切でない。なお、タンクモデルを考案した菅原（1985）も、国立防災科学技術センター（現：防災科学技術研究所）の中伊豆地殻活動観測施設において、Fig. 2 (A) の4段のタンクモデルを用いて降水による傾斜計データの変化を表わせることを示した。この調査において特筆すべきことは、傾斜計データの南北成分については最下段ではなく1段目と2段目のタンクの水位の計算値の和を用いて降水補正を行ったことである。そして、吉田・他（1984）の考察と同様、降水による傾斜計データの南北成分の変化の要因として降水荷重が考えられることを指摘した。傾斜計と体積ひずみ計では観測している物理量が異なるものの、タンクモデルによって地殻変動データの降水荷重による影響を補正できることが示された点で、この調査は重要である。但し、これまで菅原（1985）以外に降水荷重による影響を考えて地殻変動データの降水補正を行った例はほとんどない。

タンクモデルによる地殻変動データの降水補正の調査は、近年でもわずかながら行われている。例えば、上田・他（2010）は、防災科学技術研究所が火山監視のために富士山周辺に設置した幾つかの傾斜計データの降水による変化について、Fig. 2 (F) の3段のタンクモデルを用いて降水補正を行った。ここで特筆すべきことは、各段のタンクの補正係数を変えて与えたことである。このアイデアはとても重要で、たとえ地殻変動データの中に降水荷重と帯水層の含水率の両方の影響が含まれていたとしても、あるいはその他の要因による影響が含まれていたとしても、複合的な時間遅れの効果として取り入れることができる。4.2節で説明するが、本稿でもこのアイデアを取り入れた降水補正を行う。

2.3 タンクモデルによる地殻変動データの降水補正の問題点

降水荷重の影響にせよ、帯水層の含水率の影響にせよ、タンクモデルによって地殻変動データの降水補正ができることは、既に1980年代に確認されていた。しかし、かつてはタンクモデルのパラメータの

値やタンクの形状を試行錯誤で決めており、それが最適かどうかについて調査することはできなかった。菅原 (1972, 1979) はパラメータの値やタンクの形状について試行錯誤を繰り返しており、著書の中でシンプルな直列型のタンクモデルを考案するに至った経緯や、タンクモデルの各パラメータの値を推定する方法についても述べているが、現在のように計算機環境が恵まれていない中で大変な労力が必要であったことが分かる。タンクモデルによる地殻変動データの降水補正の問題点として、石垣 (1995) は解析者の試行錯誤が必要であることと、タンクの形状に任意性があることという 2 つの問題点を指摘した。これらの指摘は実を射ており、実際これまでに行われてきたタンクモデルによる地殻変動データの降水補正では、Fig. 2 のようにタンクの形状が全て異なっている。

大久保 (2006) は、重力変動や地殻変動のモデル化は環境擾乱が無視できる場合には高度な段階に達しているが、降水の影響は依然として地殻変動・重力変動の解析にとって共通の障害となっていることを指摘した。その中で、タンクモデルの有効性は否定しないが、半経験的な方法には限界があることを意識すべきであり、補正量やモデルパラメータの物理的な裏付けがきちんとなされて初めてモデルの有効性と適用限界が明らかになるはずと述べている。この指摘も実にもっともである。なお、体積ひずみ計のような地殻変動データではなく、さらに降水の影響が大きい重力データからのアプローチではあるが、風間・大久保 (2010) は浅間山における重力の連続観測データの降水の影響について地下水に着目し、不飽和領域と飽和領域の拡散方程式に基づいて理論的に地下水流動を計算して表わせることを示した。地殻変動データのように本来の検知すべき対象が地下深部の地殻変動現象である場合、降水の影響について目を向けられることは少なく、重力データにおけるこのような理論的なモデルによるアプローチはとても貴重である。但し、現実の地表面には人工物や河川などといった複雑な地理条件によってパラメータの設定が困難であったり、表面流出や河川からの流入といった地下水流動以外の全く別の物理過程が必要になったりするような問題も存在する。

理論的なモデルを構築していき地殻変動データの降水の影響を理解するというアプローチがある一方

で、そういった理論的な視点は無視してでも、実際に観測した地殻変動データから経験的に最適な降水補正を行い、地下深部の地殻変動現象を検知したいという実用上のニーズも大きい。本稿の目的でもある東海地震の前兆すべりの検知力向上においてもまさにそのようなニーズを抱えており、地殻変動データの降水の影響がたとえ理解できていなくても、降水補正ができていれば十分である。なお、タンクモデルを考案した菅原 (1985) は、タンクモデルが物理的意味を持たないブラックボックスモデルだという水文学者からの批判があることを認めている。その上で、前節で説明したようにタンクモデルによって降水による傾斜計データの変化を表せたことにより、タンクモデルの物理的な裏付けが取れたと主張している。地殻変動データの降水補正であっても推定したタンクモデルのパラメータの値自体に直接的な物理的意味を見出すことは難しく、菅原 (1985) の主張に対しては否定的な意見もあるかも知れない。しかし、タンクモデルに何かしらの概念を導入することによって、より良い降水補正が可能になるのならば、その導入した概念には物理的に重要な意味があると考えられる。例えば、これまでに行われてきたタンクモデルによる地殻変動データの降水補正の調査では、Fig. 2 (B) の 3 段目のタンクのように下段に流出する孔がタンクの底から若干高くなっている形状が Fig. 2 の幾つかのタンクモデルでも共通して見られる。菅原 (1979) は、外国の河川では乾季に降水があっても河川流出量が増加しない事例があるという観測事実を表すため、タンクモデルに土壌水分構造を導入する試みを行ったこと、但し日本は湿潤な地域であるため土壌水分構造が不要な特殊な地域であることを紹介している。Fig. 2 の大半における共通形状とは、まさに菅原 (1979) が導入を試みた土壌水分構造そのものである。本稿で提案するタンクモデルの形状にも、最終的には 4.7 節で示すように土壌水分構造を導入しており、先人たちの試行錯誤には地殻変動データの降水補正を考える上での重要な示唆が含まれている。

これまでの地殻変動データの降水補正の問題点は、石垣 (1995) や大久保 (2006) の指摘を一言でいえば、降水荷重の影響を考えた上で降水補正に必要な概念について丁寧に調査し尽くされていないことであろう。但し、幸い次節で示すように近年の計算機

環境の劇的な向上によって、このような問題は解決可能な状況である。

2.4 タンクモデルのパラメータの値の推定手法とタンクの形状の検討

近年、気象庁でタンクモデルを用いて行われたひずみ計データの降水補正の調査として、山本・小林 (2009) は気象研究所の敦賀及び今津観測点において、菅原 (1972) の考案した Fig. 2 (A) の 4 段のタンクモデルを用いて石井式 3 成分ひずみ計データの降水補正を行って良好な結果を得た。現在の恵まれた計算機環境を生かし、SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona) 法 (Duan et al., 1992) を用いてタンクモデルのパラメータの値を推定したことは特筆すべきことである。この調査の意義はとて大きく、石垣 (1995) が指摘していたタンクモデルの 2 つの問題点のうち、まずは解析者の試行錯誤の労力を解消できる。

3.4 節で示す SCE-UA 法のように、タンクモデルのパラメータの値を効率よく推定する手法の調査については、地殻変動データの降水補正に関してはほとんど行われていなかったが、水文学の分野では盛んに行われてきた。タンクモデルを考案した菅原 (1972, 1979) 自身も著書でタンクモデルのパラメータの値を推定する手法を紹介している。計算機環境が近年ほど恵まれていなかった時代、タンクモデルのパラメータの値の推定には小林・丸山 (1976) が用いた Powell の共役方向法など、計算量が少なく済む局所的探索法が主流であった。しかし、局所的探索法はあくまでも最適解近傍における手法であるため、複数の局所解が存在する多峰性の問題を解決できなかった。その後、1990 年代に入ると計算機環境の向上とともに、多峰性の問題点を解決できる遺伝的アルゴリズムや SCE-UA 法といった大域的探索法が考案され、実用化されるようになってきた。田中丸 (1995) はタンクモデルのパラメータの値の推定手法に関して、2 つの局所的探索法と SCE-UA 法や遺伝的アルゴリズムなど 6 つの大域的探索法を比較した。その結果、マルチスタート・パウエル法と SCE-UA 法が安定した収束解を求めやすいことを示し、計算効率を考えれば SCE-UA 法が最良であると結論付けた。

但し、水文学の分野でも、タンクの形状について検討する試みはあまり多くない。例えば、4.5 節で紹介する新バケツモデル (近藤, 1993) や修正タンクモデル (永井, 1995) といった流出過程の関数形を変えたモデルが、これまでも幾つか提案されてきた。いずれもタンクモデルを改良すること自体が目的ではなく、それぞれ別の目的で良好な結果を得たが、結果的に推定した河川流出量の差はほとんどない。ある広がりを持った流域からの総和となる河川流出量を観測し、タンクモデルによる河川流出量の計算値と比較しても、その場所で実際に滞留している降水の量を比較しているわけではない。また近年の計算機環境の劇的な向上は、人工衛星による観測技術の改良と観測データの増大及び精度向上も合わさって、水文学の分野の著しい発展にも繋がった。そして水文学の分野における流出モデルは、もはや流域全体を 1 つのパラメータ群で与える集中型モデルではなく、領域を細かく分けて個々の格子に異なるパラメータ群で与える分布型モデルが主流となっている (沖, 2006)。その分布型モデルは、理論的なモデルで各流出過程を表し計測可能な値でパラメータを設定することを原則とする分布型物理的モデルと、タンクモデルなどの概念的なモデルの集合として各流出過程を表す分布型概念モデルに分類される (末次・他, 2000)。例えば土木研究所による土研分布型流出解析モデルは流出過程の関数形を変えているもののタンクモデルを用いており、気象庁の土壌雨量指数や流域雨量指数はタンクモデルそのものを用いている。このように水文学の分野では、タンクモデルはこれら分布型概念モデルの中でも確実に根付いている。しかし、河川流出量のような観測データで検証を行う限り、最適なタンクの形状を検討するのには向いていない。

一方で、ある場所に設置された地殻変動観測施設における降水の影響を考える場合、他の場所からの流入を考慮する必要が無ければ、水文学では主流でなくなっている集中型モデルでも十分である。むしろ、体積ひずみ計がその場所に滞留している降水の量を観測できているならば、その場所に最適なタンクの形状を検討できる。幸い、気象庁の体積ひずみ計は地理条件の全く異なる複数の場所に設置されているという恵まれた条件を持っている。各観測点に必要な概念を最小公倍数的に導入していけば、

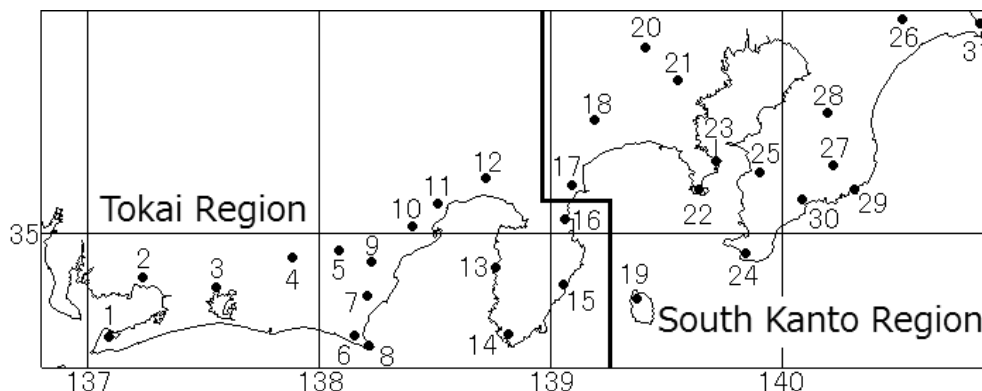


Fig. 3 Map of volumetric strainmeters

* Station code refer to Table 1

タンクモデルによる体積ひずみ計の降水補正に適した汎用的なタンクの形状も提案可能である。そうすれば、石垣（1995）が指摘していたタンクモデルの 2 つの問題点のうち、もう 1 つ残っていたタンクの形状に任意性があることについても解消できる。なお、現在の恵まれた計算機環境を生かして SCE-UA 法のような大域的探索法を用いれば、タンクモデルのパラメータの最適値を推定するだけでなく、タンクの形状を検討することも実現可能である。

3 本稿における降水補正の調査方法

3.1 調査対象の観測点

本稿では、Table 1 及び Fig. 3 の地図に示す東海地域と南関東地域の体積ひずみ計の各観測点について調査する。東海地域と南関東地域は、冬でも比較的温暖な気候であり、どの観測点も標高があまり高くない。そのため、降水が雪である場合の影響をあまり考えなくても良い恵まれた条件にある。もし、降水が雪である場合には積雪が直ちに移動せず、融雪によって時間遅れの変化となることなどが考えられるが、本稿では降水が雪である場合の影響を無視している。各観測点の埋設深度については、(12) 富士鶴無ヶ淵が 92m と最も浅く、(26) 匠瑛飯高が 300m と最も深い。1970 年代から 1980 年代に設置した古い観測点の中には埋設深度がやや浅いものもあったが、Fig. 1 (A) に示した 1990 年代に更新・移設した観測点は概ね埋設深度が 200m を超えている。

各観測点で体積ひずみ計データの降水補正に用いた降水量データの選別については、3.3 節で説明する。なお、南関東地域の一部の観測点では遠方のア

メダスの降水量データを用いているため、降水補正にその影響が含まれている可能性がある。そのため、4 章のうち体積ひずみ計の降水補正に適したタンクの形状の検討と 5 章では、Fig. 3 の地図の西側に示す東海地域の 16 観測点のみを対象として調査する。南関東地域の 15 観測点については、4.7 節においてパラメータの値や長期的な時系列グラフといった結果のみを示すに留める。また、7 章及び 8 章では東海地域の 16 の観測点に加えて、火山監視のために重要な南関東地域の (17) 湯河原鍛冶屋及び (19) 大島津倍付についても結果を示す。但し、これら 2 つの観測点では、これまで降水補正が行われていなかったため、一部の図表については記載を省略する。

3.2 目的関数の定義

実際に観測した地殻変動データから最適な降水補正パラメータを求めるような逆問題を考える場合、ある目的関数を定義して、その値を最小化することによって最適化問題を解くことができる(土木学会, 2000)。本稿の目的は、東海地震の前兆すべりの検知力を向上させることである。なお、現在の気象庁における地殻変動データの監視の基本は、潮汐や気圧などの補正を行った上で、幾つかの時間階差(ひずみ計の場合は、ひずみ変化速度)をリアルタイムで監視するものである。この時間階差のバラつきが小さいほどデータは直線的となり、その直線から外れた変化を検知しやすくなる。現在、気象庁では 60 分、180 分、24 時間の 3 つの時間階差で地殻変動データの監視を行っているが、このうち 24 時間階差は潮汐補正残差が小さいため、単位時間あたりの変化量が小さな現象を最も検知しやすい。そのため、本

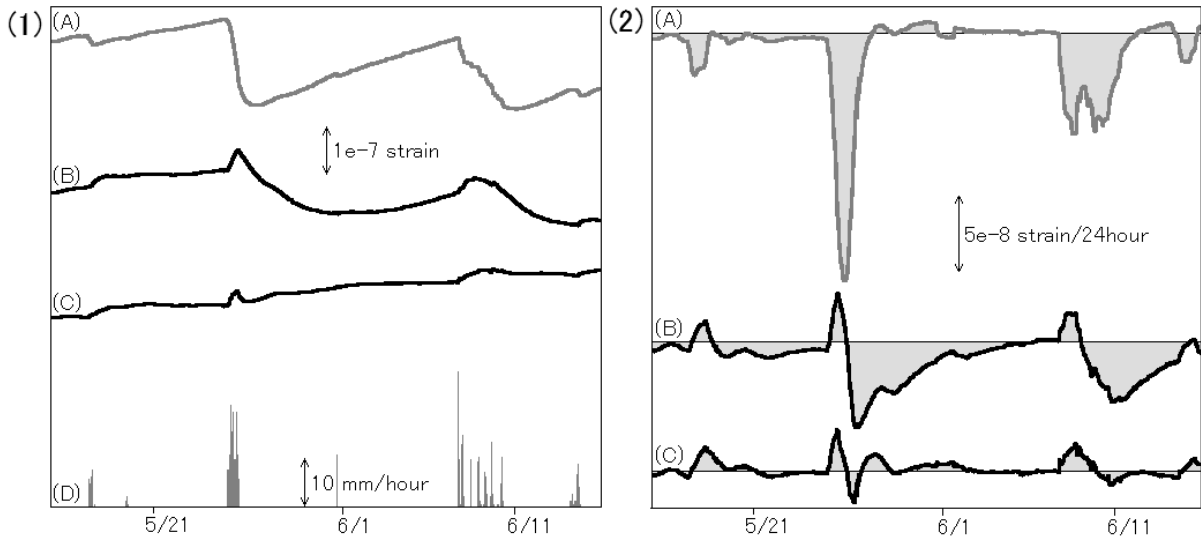


Fig. 4 Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at station code 5 (1) (May 15–June 15, 2007)

(1) Volumetric strainmeter data and precipitation data

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with old rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by the tank model

(D) Precipitation data

(2) Difference over 24 hours in the volumetric strainmeter data

* The total gray area shows an objective function.

* Items (A) to (C) are the same as in (1).

稿では、地殻変動データの 24 時間階差のバラつきが可能な限り小さくなることを最重要視する。そこで、年ごとにトレンド係数 $Tr(y)$ を差し引いた上で、定めた調査期間 T までの 24 時間階差の絶対値の和を目的関数 f と定義する。以下に式を示す。

$$f = \int_0^T |D(t) - D(t-24) - Tr(y)| dt \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は時刻 t における地殻変動データである。この目的関数 f の値が小さいほど、モデルを比較する上では良いと評価、タンクモデルの概念の導入効果を調べる上では高い効果、タンクモデルのパラメータの値を推定する上では最適値と判断する。なお、この目的関数はタンクモデルに限らず、どんな降水補正モデルでも適用可能である。仮に、本稿で提案したタンクモデルによる降水補正よりも目的関数の値を小さくできる降水補正手法が考案されたならば、その手法を業務に導入すべきである。なお、24 時間階差の絶対値の和ではなく、二乗和にすれば 24 時間階差の変化が大きい降水期間に重みが増し、

絶対値の平方根の和にすれば 24 時間階差の変化が小さい非降水期間に重みが増す。本稿では、調査期間の全体が公平な重みを持つようにするために、どちらの期間にも重みを持たない目的関数の定義とした。また、河川流出量などのように長期的に安定している観測データの場合には、統計学的にシンプルな目的関数を定義できる。例えば、田中丸 (1995) は観測流量と計算流量の最小 X^2 誤差評価基準、杉原・他 (2011) は観測流量と計算流量との平均二乗誤差を目的関数と定義して、タンクモデルのパラメータの値の推定を行っている。しかし、体積ひずみ計データは埋設後に観測孔が安定していく過程で経年的にトレンドが変化していくことや、地震によるステップ、雷災などによる機器障害、地震後の余効変動などによって長期的に安定していない観測データであるため、統計学的にシンプルな目的関数を定義することができない。そのため、本稿では、式 (1) のような特殊な目的関数を定義せざるを得なかった。

Fig. 4 (2) に、本稿で定義した目的関数を分かりやすくした図を示す。この図は、Fig. 4 (1) の (5) 島田川根の体積ひずみデータの 24 時間階差を示し

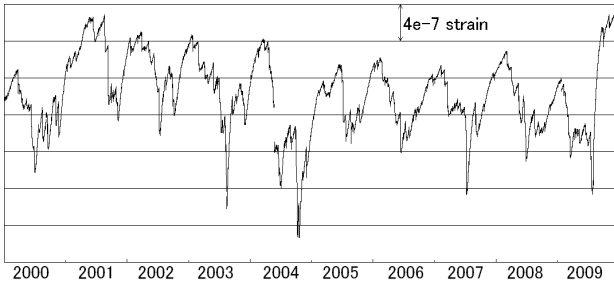


Fig. 5 Data plot of volumetric strainmeter data at station code 11 (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

* Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

ているが、このような図ではトレンドが横線として表される。そして、このトレンドと 24 時間階差データとの間で囲まれた灰色の面積の総和が目的関数に相当する。Fig. 4 (2) には、降水補正なし、これまでの降水補正、タンクモデルによる降水補正の計 3 つのデータを示すが、この順に段々と灰色の面積の総和が狭くなっている。実際、Fig. 4 (1) において、タンクモデルによる降水補正のデータが最も直線的であるのは明らかであり、この目的関数の定義がモデルの良さを表わす評価指標として十分機能していることが分かる。

なお、本稿における調査期間（式 (1) における T ）は、2000 年から 2009 年の 10 年間とする。このように長期間のデータを用いて降水補正の調査を行う目的は、頻度の少ない数年に 1 度の大雨も補正できることを目指すだけでなく、降水補正によって真の地殻変動現象による変化を除去しないようにするためである。たまたま降水と真の地殻変動現象が重なった事例が 1 回あったとしても、他の降水の回数が多ければ、その影響は薄れていくはずである。経験的に最適な降水補正を行うための期間としては、十分な長さであると考えられる。なお、このように長い調査期間とするには、降水応答が経年変化していないこと、体積ひずみ計データの感度特性が経年変化していないことなどが調査の前提条件となることに注意が必要である。前者については確認できなかったが、後者については調査期間とする 10 年間で気圧補正係数や潮汐補正係数の振幅の値が経年変化していないことを確認できている。目的関数の値の算出に際しては、保守などに伴う欠測については調査期間から除外したが、地震などに伴うステップ変化につ

いては、調査期間から除外していない。なお、気象庁の体積ひずみ計データは、歴代担当の努力の下、保守作業等に伴うステップ変化を除去するなどの品質管理が丁寧に行われてきたため、本稿では全観測点でステップ変化を除去することなく調査を行うことができた。しかし、大きなステップ変化が頻繁にある地殻変動データでは、そのステップ変化を無理に補正しようとしてその部分に極端な重みが増してしまい、最適な降水補正を行うことができない場合があったことを申し添えておく。

また、本稿におけるトレンド係数（式 (1) における $Tr(y)$ ）は、調査期間全体を一定値とするのではなく年ごとに差し引いているが、これは体積ひずみ計データが長期的に安定していない観測データであることを考慮して、調査期間の各年が公平な重みを持つようにするためである。また、月ごとではなく年ごとにトレンド係数を差し引いているのは、降水による長期的な変化の補正も目指しているためである。実際、月ごとにトレンド係数を差し引いた場合でも降水補正を試みたが、5.2 節で示すような降水による長期的な変化を補正できなかった。逆に、埋設直後などで年ごとのトレンドが安定していない地殻変動データでは、年ごとにトレンド係数を差し引くとうまくいかないことも多かった。そのため、降水による長期的な変化の補正を諦め、月ごとにトレンド係数を差し引いた方が良い降水補正になる場合があったことも申し添えておく。

具体的な年ごとのトレンド係数には、降水補正なしのデータにおける、降水の影響が少ない期間（ここでは 72 時間積算降水量が 10mm 以下）の 24 時間階差の年平均値を用いるが、調査期間の各年が公平な重みを持つようにする値であれば何でも良い。但し、この値は実際の長期的なトレンドとは異なるため、その差を埋めるための値も 1 つ余計に推定する必要がある。Fig. 5 に、(11) 静岡但沼における降水補正なしの体積ひずみ計データの 10 年間の時系列グラフを示す。これだけ季節変化が大きかったり、降水以外の要因による変化が大きかったりすると、年ごとのトレンド係数をある期間の差で決めたり、最小二乗法による回帰直線で決めたりすることは難しい。なお、最初から式 (1) の $Tr(y)$ に長期的なトレンド係数を与えることができれば良かったのだが、本稿で調査し始めた時点では良い方法が思いつ

かなかった。この年ごとのトレンド係数の算出についても、目的関数と同様に、ステップ変化の影響はあるが、本稿では調査期間から除外していない。

3.3 目的関数を用いた降水量データの選別

気象庁では、東海地域及び南関東の一部の観測点には 1999 年までに雨量計を設置しており、本稿では基本的にこの降水量データを用いて体積ひずみ計データの降水補正を行う。なお、東海地域の (1) 田原福江, (8) 御前崎大山, (13) 伊豆小下田, 南関東地域の (29) 勝浦墨名に設置している雨量計は、地域気象観測システム観測点 (以降, アメダス) でもある。アメダスの雨量計では、降水量データを気象庁が公式に観測している。一方、アメダス以外の雨量計は、あくまでも体積ひずみ計の環境要素の把握のために補助的に設置したもので、必ずしも降水量データの観測に適した環境に設置しているわけではない。雨量計の近傍に樹高の高い木があるなど、設置環境に問題を抱えている観測点も幾つかある。

本稿の調査に際し、観測点設置の雨量計の降水量データを体積ひずみ計の降水補正に用いて問題ないかを確認するため、観測点近隣のアメダスの降水量データを用いた場合と比較する調査を行った。式(1)で定義した目的関数は、3.1 節で紹介した目的以外に、降水量データの選別も行うことができる。その結果、概ね観測点設置の雨量計の降水量データを用いた方が目的関数の値が小さくなり、観測点設置の雨量計の降水量データを用いても問題ないことが確認できた。しかし、東海地域の (3) 浜松三ヶ日, (15) 東伊豆奈良本, (16) 熱海下多賀, 南関東地域の (31) 銚子明神については、観測点近隣のアメダスの降水量データを用いた方が目的関数の値が小さくなった。これらの観測点では雨量計の設置環境に問題がある可能性を考慮し、観測点設置の雨量計の代わりに、Table 1 に示す観測点近隣のアメダスの降水量データを体積ひずみ計の降水補正に用いることとする。特に (15) 東伊豆奈良本では、南に 3.9km 離れた稲取アメダスの降水量データを用いた方が観測点設置の雨量計に比べて目的関数の値が 6% も小さくなった。これら 4 つの観測点はいずれも近隣のアメダスが観測点から 5km 以内と比較的近い。設置環境等による降水量データの品質も見えてしまうほど、体積ひずみ計がその場所に滞留している降水の量を観測

できているのかも知れない。

また、南関東地域の大半の観測点には雨量計を設置したのがごく最近の 2008 年であるため、本稿の調査期間ではほとんど用いることができない。そのため、観測点設置の雨量計の代わりに、Table 1 に示す観測点近隣のアメダスの降水量データを体積ひずみ計の降水補正に用いることとする。このアメダスの降水量データの選別についても、式 (1) で定義した目的関数を用いて比較して行った。その結果、概ね観測点に最も近いアメダスの降水量データを用いた場合に目的関数の値が小さくなった。但し、(17) 湯河原鍛冶屋では、7.5km と最も近いが山間部に位置する箱根アメダスよりも、13km とやや離れているが海沿いに位置する網代アメダスの降水量データを用いた方が目的関数の値が小さくなった。網代アメダスの降水量データの方が、実際に (17) 湯河原鍛冶屋の体積ひずみ計に影響を及ぼす降水に近いと考えられる。また、(25) 富津望井では 12km 離れた鋸南アメダスが最も近いが、本稿の調査期間に 4 ヶ月以上の欠測があったため用いることができなかった。そのため、16km とやや離れているが最も目的関数の値が小さくなった木更津アメダスを用いることとした。木更津アメダスは、2006 年に 2.7km ほど内陸に移転したが、移転に伴う降水量データの品質のギャップが多少あったとしても、降水量データの選別に影響するほどではなかったと言える。

3.4 タンクモデルのパラメータの値の推定手法

本稿では、タンクモデルのパラメータの値の推定手法に、山本・小林 (2009) と同様の SCE-UA 法を用いる。SCE-UA 法とは、線形計画法を解くアルゴリズムであるシンプレックス法に、ランダム探索、遺伝的アルゴリズムに類似した競争進化、新たに開発された集団混合の概念を組み合わせた大域的探索法の一つである (土木学会, 2000)。ランダム探索を取り入れているため収束解の値は 1 回の計算ごとに異なるものの、他の大域的探索法である遺伝的アルゴリズムに比べて安定した収束解が求まりやすく (田中丸, 1995)、2.4 節でも紹介したように水文学の分野では本稿のようなタンクモデルのパラメータの値の推定手法としても一般的に使われている。SCE-UA 法の処理の流れについては、田齊・他 (2006) や杉原・他 (2011) でも日本語で手法が詳しく紹介さ

れており、本稿では割愛する。処理の流れを簡潔に言えば、初期設定したパラメータの値の探索幅からランダムにパラメータの初期点群を作成し、それらをグループに分割して、そのグループ内の最悪パラメータをその他のパラメータの助けを借りながら目的関数の値が小さくなる方へ集団進化させていき、最良パラメータがこれ以上改善しなくなるまで何度も繰り返していくものである。但し、単にタンクモデルのパラメータの値を推定するだけであれば 1 回の計算を行うだけでも十分かも知れないが、本稿のようにタンクの形状を検討するような場合、それぞれのタンクの形状において目的関数の究極的な最小値に達する必要があるため、初期設定するパラメータの値の探索幅を試行錯誤しながら何回も計算を繰り返す必要があった。以前に比べて計算機環境が良くなったとは言え、本稿の調査にはかなりの手間と時間を要したことを申し添えておく。なお、目的関数の最小値が 1×10^{-7} strain よりも改善しないことをもって、究極的な最小値に達したと判断した。この値は目的関数の改善率としては 0.01% から 0.1% 程度であり、これより小さな目的関数の改善率は有意とみなさないことに相当する。

なお、本稿の調査に用いたプログラムのソースコードは、C 言語で 1800 行程度である。特殊な組み込み関数は必要ない。現在の汎用のパソコンでも、現実的な計算時間で調査が可能である。また、本稿の調査に必要なデータは、潮汐と気圧の補正を行った体積ひずみ計データと降水量データの時間値だけである。なお、潮汐補正については月ごとに最適な係数を用いた。体積ひずみ計データは時間値そのものではなく、潮汐補正残差の小さな 24 時間階差を用いており、月ごとに潮汐補正係数が異なる影響はほとんどない。

3.5 各段のタンクの水位の初期値の与え方

本稿におけるタンクモデルでは、各段のタンクの水位の初期値（1999 年 12 月 31 日 23 時の値）に、調査期間と同じ 2000 年から 2009 年までの 10 年間の調査期間で 1 度計算させた最終値（2009 年 12 月 31 日 23 時の値）を用いた。本稿では、どの観測点でも補正量が完全に 0 となることはほとんど無かった。つまり、降水が始まった段階から降水補正を行うのではなく、降水補正がいつでも必要であることを示

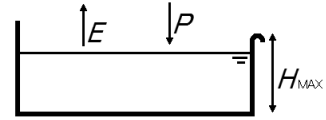


Fig. 6 The shape of the bucket model (Manabe, 1969)

唆している。これは地殻変動データの降水補正を考える上ではとても重要なことで、6 章で詳しく示す。なお、各段のタンクの水位の初期値については、4.7 節で体積ひずみ計の降水補正に適したタンクの形状を提案した後、あらためて Table 7 にて示す。

4 気象庁の体積ひずみ計の降水補正に適したタンクの形状の検討

4.1 バケツモデルから 1 段のタンクモデルまで

本稿の調査を行う最初のきっかけとなったのは、これまでの体積ひずみ計データの降水補正によって降水後に緩和的な変化が生じてしまう問題を解消するため、とても単純なバケツモデルを用いた降水補正を試みたところ、意外にも良好な結果を得たことである。この試みは原始的ではあるが、タンクモデルへの概念の導入（タンクの形状の変更）効果が図中で明瞭に確認できることから、この節で紹介する。

有名なバケツモデルは Fig. 6 に示す Manabe (1969) によるもので、気候モデルに組み込むため、地表面の水収支に対して考案したものである。バケツモデルも広義の意味ではタンクモデルの中に含まれるのかも知れないが、形状としては孔が空いていないバケツそのものであるため、ここでは敢えて区別する。

Manabe (1969) のバケツモデルでは、時刻 t におけるバケツの水位を $H_1(t)$ とすると、単位時間あたりの変化量は以下のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 H_1(t + \Delta t) &= H_1(t) + P - E \\
 &\begin{cases} (H_1(t) + P - E < H_{MAX}) \\ = H_{MAX} \\ (H_1(t) + P - E \geq H_{MAX}) \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 P は単位時間降水量、 E は単位時間蒸発量、 H_{MAX} はバケツの最大保水容量で、 H_{MAX} 以上の高さの水は全て外へ流出する。なお、Manabe (1969)

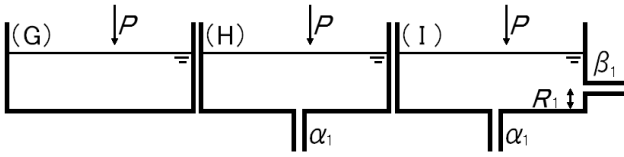


Fig. 7 Shapes of the bucket and tank models
 (G) Simple bucket model G
 (H) Tank model H without flank outflow
 (I) Tank model I with flank outflow

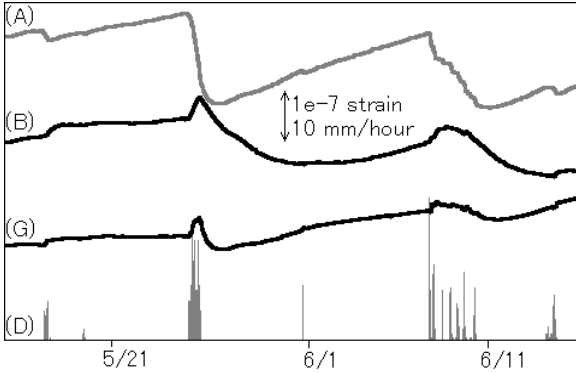


Fig. 8 Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at station code 5 (2) (May 15–June 15, 2007)
 (A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
 (B) Volumetric strainmeter data with old rainfall correction
 (G) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by simple bucket model G
 (D) Precipitation data

は、水文学的には重要な河川流出過程をほとんど無視して、気候モデルにとって重要な蒸発過程に主眼を置いている。これまで地殻変動データの降水補正に用いられてきた幾つかのタンクモデルのように、地表面からの単位時間蒸発量 E を一定値では与えてはならず、以下の式のように与えている。

$$E = \beta \rho C_D U (q_{SAT} - q) \quad (3)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 C_D は蒸発に関するパルク係数、 U は風速、 q_{SAT} は地表面温度の飽和比湿、 q は比湿であり、これらの中には実際の観測データとして入力する要素も幾つかある。また β は地表面の蒸発のしやすさを表す蒸発効率で、以下の式のように与えている。

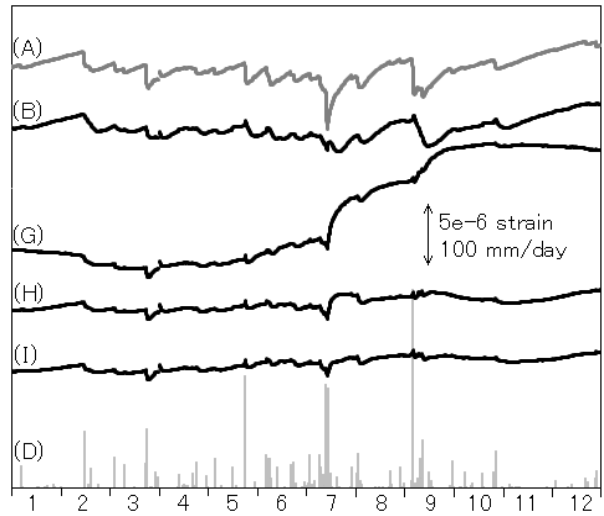


Fig. 9 Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at station code 5 (3) (Jan. 1, 2007–Dec. 31, 2007)
 (A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
 (B) Volumetric strainmeter data with old rainfall correction
 (G) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by simple bucket model G
 (H) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model H
 (I) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model I
 (D) Precipitation data

$$\beta = 1 \quad (H_1(t) > H_{WET}) \\ = \frac{H_1(t)}{H_{WET}} \quad (H_1(t) \leq H_{WET}) \quad (4)$$

H_{WET} は蒸発効率 β を規定するパラメータで、蒸発効率 β はバケツの水位が H_{WET} に達するまでバケツの水位に比例し、バケツの水位が H_{WET} に達した段階で頭打ちとなる。

降水補正なしの地殻変動データ $D(t)$ に降水補正を行って $D'(t)$ にする式は、以下のように表わせる。

$$D'(t) = D(t) + A_1 H_1(t) \quad (5)$$

ここで、 A_1 はバケツの水位 $H_1(t)$ の計算値を地殻変動データの補正量に換算する補正係数である。

式 (2) における単位時間蒸発量 E を 0 とし、バケツの最大保水容量 H_{MAX} を無限大としたモデルが、Fig. 7 (G) のとても単純なバケツモデル (以降、バケツモデル G) である。バケツモデル G は、言い換えると降水がバケツに貯まり続けるだけの単純なモデルである。Fig. 8 に、(5) 島田川根の 1 ヶ月間の体積ひずみ計データを示す。これまでの降水補正では降水後に緩和的な変化が生じているが、バケツモデル G による降水補正では降水後に緩和的な変化が生じていない。したがって、少なくともこの期間の降水については、これまでの降水補正よりもバケツモデル G による降水補正の方が良いと言える。

しかし、Fig. 9 のように図の表示期間を 1 年間に延ばすと、バケツモデル G による降水補正では補正できていない事例が幾つかあることも分かる。(5) 島田川根では、2007 年に 7 月と 9 月の計 2 回大雨があったが、いずれもバケツモデル G による降水補正では降水後に緩和的な伸びの変化が生じており、過補正となっている。このような過補正を改善するため、例えば山内 (1981) は 2.2 節で紹介したように、入力値である降水量データに修正を加えて調整している。本稿では、山内 (1981) のような方法ではなく、バケツモデル G の底に、バケツの水位に流出量が比例する孔 (下方流出過程) を導入して調整する。このいわばバケツからタンクへと形状を進化させた Fig. 7 (H) のタンクモデル (以降、タンクモデル H) についても、降水補正を試みた。このような下方流出過程を導入すると、降水によるタンクの水位の上昇に伴い流出量を増やすことができるため、降水後の過補正を解消できる。タンクモデル H のタンクの水位 $H_1(t)$ の単位時間あたりの変化量は以下のように表わせる。

$$H_1(t + \Delta t) = (1 - \alpha_1 \Delta t) H_1(t) + P \quad (6)$$

ここで、 P は単位時間降水量、 α_1 は下方流出係数である。その結果、Fig. 9 (H) で示すように、バケツモデル G による降水補正によって大雨の後に生じていた過補正を改善できた。

さらに、大雨の際にだけ流出する孔 (側面流出過程) を導入した Fig. 7 (I) のタンクモデル (以降、タンクモデル I) についても降水補正を試みた。こ

のような側面流出過程を導入すると、少々の降水では効果が無いが、大雨の際にだけタンクの水位の上昇に伴う流出量を増やすことができるため、降水後の過補正をさらに解消できる。タンクモデル I の側面流出孔の高さを R_1 とすると、側面流出量 Q_1 は以下のように表わせる。

$$Q_1 = \begin{cases} \beta_1 \Delta t (H_1(t) - R_1) & (H_1(t) \geq R_1) \\ 0 & (H_1(t) < R_1) \end{cases} \quad (7)$$

ここで β_1 は側面流出係数である。そして、タンクモデル I のタンクの水位 $H_1(t)$ の単位時間あたりの変化量は、式 (6) を少し変形して以下のように表わせる。

$$H_1(t + \Delta t) = (1 - \alpha_1 \Delta t) (H_1(t) - Q_1) + P \quad (8)$$

その結果、Fig. 9 (I) で示すように、タンクモデル H による降水補正によって大雨の後に生じていた過補正をさらに改善できた。

なお、これらのモデルを比較するために式 (1) で定義した目的関数の値を用いた場合、降水補正なしを基準とするとこれまでの降水補正の目的関数の値は 19.8% 小さくなった程度であるのに対し、バケツモデル G では 43.7%、タンクモデル H では 52.0%、タンクモデル I では 53.7% も小さくなった。タンクの形状を複雑にすることによって降水補正の効果が高くなっていることは、Fig. 9 のような図の上でも一目瞭然だが、目的関数という数値の上でも確認することができる。但し、次節以降では図中で降水補正の改善効果を確認することが難しいため、目的関数の値を比較することによってタンクの形状の検討を行う。

なお、この節では降水の影響が大きい (5) 島田川根を例として示したが、大雨による過補正に目をつぶれば、これまでの降水補正よりもバケツモデル G による降水補正の方が良いのは、他の観測点でも同様であった。

4.2 2 段以上のタンクモデルの補正係数について

これまでに行われてきたタンクモデルによる地殻

変動データの降水補正は、2.2 節で紹介したようにほとんどが地上に近い横穴式の観測施設であり、トンネル付近の含水率の影響を考慮するため、最下段のタンクの水位の計算値のみを用いている。そのため、タンクの水位の計算値を地殻変動データの補正量に換算する補正係数は、1 つだけ必要であった。菅原 (1985) は、傾斜計の降水補正に対して降水荷重の影響を考えたが、1 段目と 2 段目のタンクの水位の計算値の和を用いているため、補正係数は同じく 1 つだけ必要であった。降水荷重の影響を考慮する場合、それぞれのタンクの水位が地殻変動データに与える影響が一律ならば、菅原 (1985) と同様に各段のタンクの水位の計算値の総和を用いて、補正係数を 1 つだけとするのが適当である。しかし、Fig. 1 (B) の (3) 浜松三ヶ日や (10) 静岡漆山のように、降水期間中は縮みの変化だが、降水後にその縮みの変化を大きく上回る伸びの変化となる場合、下段のタンクの補正係数の符号が上段に対して反転しない限り、反転する大きな伸びの変化を表すことはできない。さらには、南関東地域の (17) 湯河原鍛冶屋のように、通常の降水では縮みの変化だが、大雨の際に限ってその縮みの変化を大きく上回る伸びの変化となり、さらにそれらを上回る大きな縮み変化となるような降水応答の非線形性が強い観測点もある。したがって、本稿では上田・他 (2010) のアイデアを取り入れ、2 段以上のタンクモデルの補正係数については、 i 段目のタンクの水位 $H_i(t)$ の計算値に対して、以下の式のようにそれぞれ別の補正係数 A_i を用いることとする。

$$D'(t) = D(t) + \sum_{i=1}^n A_i H_i(t) \quad (9)$$

ここで、 n はタンクの段数である。このように各段のタンクの補正係数を変えたことで、結果的に各観測点の降水応答の特徴を把握することができたが、それについては 5.1 節で紹介する。

4.3 田中 (1979) と Ishihara and Kobatake (1979) のタンクモデルの比較

本稿では、タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正に適したタンクの形状を検討する。ま

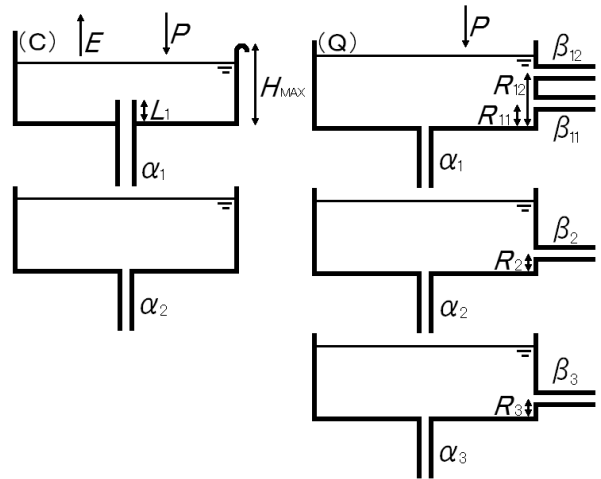


Fig. 10 Shapes of the standard tank model referred to in section 4-3
(C) Tanaka (1979)
(Q) Ishihara and Kobatake (1979)

ずは検討の手がかりを掴むため、できるだけシンプルなモデル同士の比較から始める。この節では、Fig. 10 (C) に示す田中 (1979) の 2 段のタンクモデル (Fig. 2 (C) と同じ。以降、タンクモデル C) と、Fig. 10 (Q) に示す Ishihara and Kobatake (1979) の 3 段のタンクモデル (以降、タンクモデル Q) を比較する。タンクモデル C は 2.2 節でも紹介したように元々は水管傾斜計データの降水補正を目的としている。一方のタンクモデル Q は、大雨の際の河川流出量を推定することを目的としている。なお、Ishihara and Kobatake (1979) は、タンクモデル Q の他にも異なる形状のタンクモデルを用いた調査を行っているが、それらのうちタンクモデル Q が気象庁の土壤雨量指数の算出などにも用いられているため、この節における比較用のモデルとして採用する。なお、タンクモデル Q は、Fig. 2 (A) の菅原 (1972) が考案した 4 段のタンクモデルと上 3 段のタンクの形状が同じであるが、大雨の際の河川流出に主眼を置いており、短期間では大雨に比べて無視できる蒸発過程については考慮していない。

まず、タンクモデル C の式を示す。1 段目のタンクの水位 $H_1(t)$ が、一定の水位 L_1 以上にならないと下方流出しない土壤水分構造を導入している。このような土壤水分構造を導入すると、菅原 (1979) が外国の河川において乾季に降水があっても河川流出量が増加しない事例があるという観測事実を表わせ

たことを紹介しているように、しばらく降水が無かった後の久々の降水と、断続的な降水とで降水応答を変えることができる。1 段目から 2 段目のタンクの下流流出量 S_1 は、以下のように表わせる。

$$S_1 = \alpha_1 \Delta t (H_1(t) - L_1) \quad (H_1(t) \geq L_1) \\ = 0 \quad (H_1(t) < L_1) \quad (10)$$

ここで α_1 は 1 段目のタンクの下流流出係数である。また、Manabe (1969) のバケツモデルと同様に、1 段目のタンクの水位が最大保水容量 H_{MAX} を超える場合には、全てタンクの外へ流出する。1 段目のタンクの水位 $H_1(t)$ の単位時間あたりの変化量は、以下のように表わせる。

$$H_1(t + \Delta t) = H_1(t) + P - S_1 - E \quad (11) \\ = H_{MAX} \quad (H_1(t) + P - S_1 - E < H_{MAX}) \\ = H_{MAX} \quad (H_1(t) + P - S_1 - E \geq H_{MAX})$$

ここで、 P は単位時間降水量である。なお、単位時間蒸発量 E は一定値であるものの、厳密には 1 段目のタンクの水位が 0 になれば、単位時間蒸発量も 0 とならざるを得ない。次に、2 段目のタンクの水位 $H_2(t)$ における単位時間あたりの変化量は、1 段目から 2 段目のタンクへの下流流出過程による流入と 2 段目のタンクから外への下流流出過程による流出によって決まり、以下のように表わせる。

$$H_2(t + \Delta t) = (1 - \alpha_2 \Delta t) H_2(t) + S_1 \quad (12)$$

ここで、 α_2 は 2 段目のタンクの下流流出係数である。

次に、タンクモデル Q の式を示す。Ishihara and Kobatake (1979) の論文に式の記述は無いが、気象庁の土壤雨量指数について紹介している岡田・他 (2001) の論文に式が紹介されている。1 段目から 3 段目のタンクの水位 $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$ 、 $H_3(t)$ における単位時間あたりの変化量は、以下のように表わせる。

$$H_1(t + \Delta t) = (1 - \alpha_1 \Delta t) H_1(t) + P - Q_{11} - Q_{12} \quad (13)$$

$$H_2(t + \Delta t) = (1 - \alpha_2 \Delta t) H_2(t) + \alpha_1 \Delta t H_1(t) - Q_2 \quad (14)$$

$$H_3(t + \Delta t) = (1 - \alpha_3 \Delta t) H_3(t) + \alpha_2 \Delta t H_2(t) - Q_3 \quad (15)$$

なお、 α_1 、 α_2 、 α_3 は 1 段目から 3 段目までのタンクの下流流出係数である。また、 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_2 、 Q_3 は各タンクの側面流出量 (1 段目のタンクには 2 つの側面流出孔を設定) で、以下のように表わせる。

$$Q_{11} = \beta_{11} \Delta t (H_1(t) - R_{11}) \quad (H_1(t) \geq R_{11}) \\ = 0 \quad (H_1(t) < R_{11}) \quad (16)$$

$$Q_{12} = \beta_{12} \Delta t (H_1(t) - R_{12}) \quad (H_1(t) \geq R_{12}) \\ = 0 \quad (H_1(t) < R_{12}) \quad (17)$$

$$Q_2 = \beta_2 \Delta t (H_2(t) - R_2) \quad (H_2(t) \geq R_2) \\ = 0 \quad (H_2(t) < R_2) \quad (18)$$

$$Q_3 = \beta_3 \Delta t (H_3(t) - R_3) \quad (H_3(t) \geq R_3) \\ = 0 \quad (H_3(t) < R_3) \quad (19)$$

ここで、 β_{11} 、 β_{12} 、 β_2 、 β_3 は各タンクの側面流出係数、 R_{11} 、 R_{12} 、 R_2 、 R_3 は各タンクの側面流出孔の高さである。

これら 2 つのタンクモデルにおけるタンクの形状の違いは、全部で 4 つある。1 つ目は側面流出過程で、タンクモデル Q では考慮しているがタンクモデル C では考慮していない。なお、Fig. 2 では (C) と (F) 以外は、全て側面流出過程を考慮している。側面流出過程を考慮していないタンクモデル C でも、1 段目のタンクで最大保水容量 H_{MAX} を超える水は全てタンクの外に流出する過程を導入しているが、側面流出過程と完全には同じではない。但し、側面流出係数を 100% にすれば同じ過程を表わせるため、1 段目の側面流出過程の導入効果を調査すれば十分である。2 つ目は土壤水分構造で、タンクモデル C で

Table 2 Tank model parameter differences (refer to Figs. 11 and 12) for comparison in section 4-3

Type of the tank model		C	1	2	3	4	5	Q
Number of tanks		2	2	2	2	2	1	3
Evaporation from the first tank (E)		Constant	Proportion to the water level					
Soil water structure of the first tank		○	○	○				
Number of flank outflow	The first tank				2	2	2	2
	The second tank				1	1		1
	The third tank							1
Overflow from the first tank		○	○					
Number of parameter		8	8	7	12	11	7	15

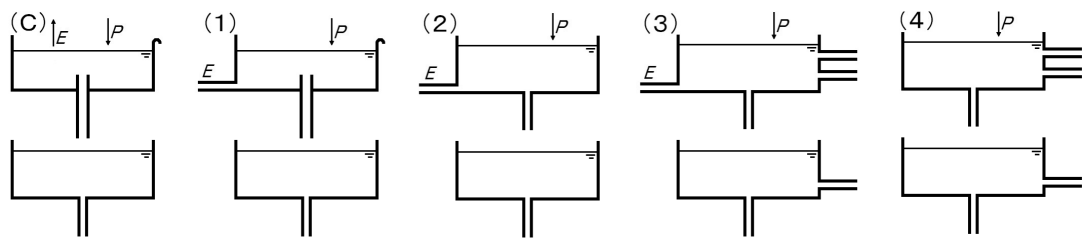


Fig. 11 Shapes of the tank model for comparison in section 4-3 (1)

は1段目のタンクで考慮しているが、タンクモデル Q では全く考慮していない。なお、Fig. 2 では (A) と (F) 以外は、いずれかのタンクにおいて土壌水分構造を考慮している。3 つ目は蒸発過程で、タンクモデル C では考慮しているが、タンクモデル Q では考慮していない。なお、Fig. 2 において蒸発過程を考慮しているのは、(A) と (C) だけである。いずれも単位時間蒸発量 E は一定値であるが、Manabe (1969) のバケツモデルの式 (3) 及び式 (4) からは、バケツ (タンク) の水位が上昇すれば蒸発量も増えること、水位が一定の高さに達した場合に頭打ちがあることも示唆される。但し、前者の効果については、側面流出孔の高さを 0 とすれば全く同じ過程を表せる。4 つ目が時間遅れの効果があるタンクの段数で、タンクモデル C は 2 段、タンクモデル Q は 3 段である。なお、Fig. 2 ではタンクの段数は 2 段から 5 段まで様々である。タンクの段数が多ければ多くなるほど、複雑な時間遅れの効果を表わせる一方で、パラメータ数が増えるため、パラメータの値の推定にかかる計算時間も増えてしまう。そのため、現在の計算機環境も踏まえた上で、体積ひずみ計データの降水補正に最低限必要かつ現実的に計算

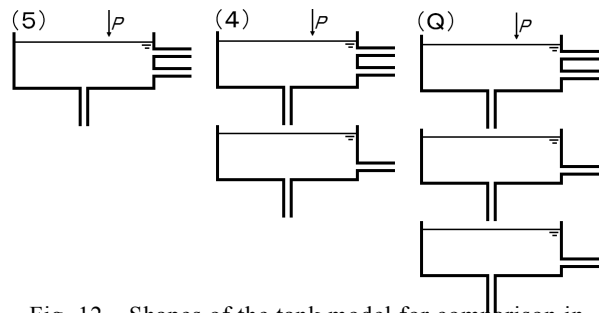


Fig. 12 Shapes of the tank model for comparison in section 4-3 (2)

* (4) is same as Fig. 11 (4).

可能なタンクの段数について調査する必要もある。以上の 4 つの違いを踏まえて、タンクモデル C からタンクモデル Q まで、少しずつタンクの形状を変えながら目的関数の値を比較することを試みた。Fig. 11 に、タンクモデル C を皮切りに、タンクの段数を 2 段としたまま、少しずつタンクの形状を変えて、各概念の導入効果を比較した複数のタンクモデルを示す。また、Fig. 12 にタンクの形状はタンクモデル Q とほとんど同じのまま、タンクの段数を変えて、体積ひずみ計の降水補正に最低限必要かつ現実的に計算可能なタンクの段数を調査するために比較した複数のタンクモデルを示す。これらのタンクモ

デル（以降、タンクモデル 1~5）のうち、タンクモデル 4 は Fig. 11 と Fig. 12 に示すとおり全く同じモデルであり、この 2 つの図の流れを合わせると、タンクモデル C からタンクモデル Q まで少しずつタンクの形状を変えたことになる。これらのタンクモデルの比較で考慮した各概念と、パラメータ数などを、Table 2 に示す。なお、Table 2 のパラメータ数には、3.2 節で示したように、年ごとに差し引いたトレンド係数（式 (1) における $Tr(y)$ ）と長期的なトレンドが異なるため、その差を埋めるための値もパラメータの 1 つとして追加している。

Fig. 13 に、タンクモデル C を基準としたタンクモデル 1~4 の目的関数の値の比率を示す。これは、観測点ごとにどの概念の導入効果が高いかを見るための図である。タンクモデル C の目的関数の値を基準として正規化しており、比率が小さいほど降水補正の効果が高い。個別に見ていくと、タンクモデル C とタンクモデル 1 では単位時間蒸発量が一定か、タンクの水位に比例するかの違いがあるが、どちらの導入効果が高いかについては結論が出なかった。例えば、タンクモデル C に比べてタンクモデル 1 の目的関数の値が、(10) 静岡漆山では 2.4% 小さくなり、逆に (14) 南伊豆入間では 1.9% 大きくなった。この蒸発過程については、次節で引き続き検討する。次に、タンクモデル 1 とタンクモデル 2 では土壤水分構造の導入の有無の違いがあるが、土壤水分構造の導入効果が高いことが確認できた。特に (10) 静岡漆山では、6.7% も目的関数の値が小さくなった。そして、タンクモデル 2 とタンクモデル 3 では側面流出過程の導入の有無の違いがあるが、側面流出過程の導入効果が高いことが確認できた。特に (5) 島田川根では、10.0% も目的関数の値が小さくなった。タンクモデル 3 とタンクモデル 4 ではタンクの水位に比例する単位時間蒸発量の有無の違いがあるが、目的関数の値に有意な差がなかった。単位時間蒸発量がタンクの水位に比例すると考える場合には、側面流出過程でも十分に代用できるため不要であることが確認できた。

また Fig. 14 に、1 段のタンクモデル 5 を基準とした 2 段のタンクモデル 4 及び 3 段のタンクモデル Q の目的関数の値の比率を示す。タンクの段数が増えるにつれて、全ての観測点で目的関数の値が小さくなったことが確認できる。但し、タンクの段数を 1

段から 2 段にした場合は、全観測点平均で目的関数の値が 8.2% も小さくなったのに対し、2 段から 3 段にした場合は、全観測点平均で目的関数の値が 1.4% ほど小さくなった程度であった。つまり、タンクの段数を増やす効果は、タンクの段数が多くなるほど低くなることが分かった。なお、(6) 御前崎佐倉では、タンクの段数を 2 段から 3 段にした場合でも目的関数の値が 10% 以上小さくなり、タンクの段数を 3 段にする必要性が高いことが確認できた。この理由は、1 段目のタンクに降水が貯まりにくいことと、下段のタンクの補正係数の符号が上段に対して反転する必要があるという 2 つの特徴を、2 段のタンクモデルの中に取り込むことが難しいためであると考えられる。さらに、(6) 御前崎佐倉ではタンクの形状はタンクモデル Q と同じまま、タンクの段数を 3 段から 4 段にした場合についても調査を行ったが、目的関数の値が 1.9% 小さくなった程度であった。

(6) 御前崎佐倉においてタンクの段数を 4 段にする必要性の評価は、4.7 節でタンクの形状を提案した上で改めて調査する。

4.4 蒸発過程の簡単な検討

蒸発量については、実際に微気象を観測することなどによっても推定が可能であるが、現在のところ、気象庁の体積ひずみ計の各観測点では全く行っていない。この節では、体積ひずみ計データの降水補正に用いるタンクモデルの蒸発過程について、前節に引き続き、簡単にではあるが検討する。前節では、単位時間蒸発量が一定かタンクの水位に比例するかで結論が出ず、また、単位時間蒸発量がタンクの水位に比例すると考える場合には側面流出過程でも代用できるため、不要であることが確かめられた。また、前節でも指摘したようにまた式 (3) と式 (4) からは、水位が一定の高さに達した場合に単位時間蒸発量が頭打ちすることも示唆される。前節では、側面流出過程と土壤水分構造が必要であることが既に確かめられているため、これら 2 つの概念を導入した上で、Fig. 15 のような 2 段のタンクモデルを用いて、蒸発過程のみを検討することとした。なお、3 段ではなく 2 段のタンクモデルを用いるのは、パラメータの値の推定にかかる計算時間の短縮のためである。1 段目のタンクの蒸発過程についてのみ検討を行うため、下段のタンクは重要ではない。また、

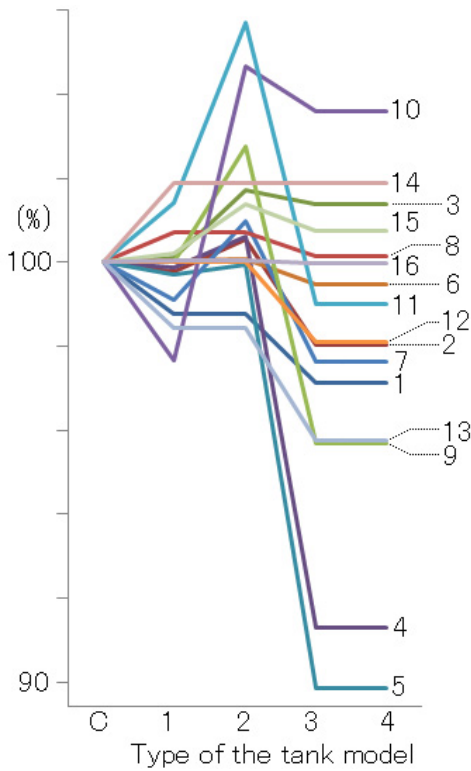


Fig. 13 Ratio of the objective function based on tank model C

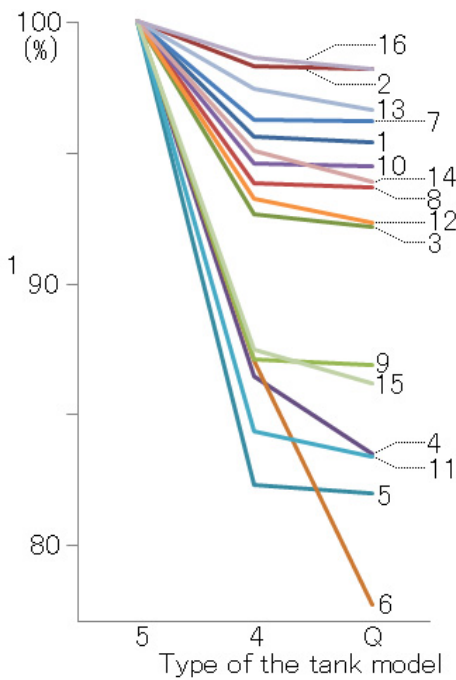


Fig. 14 Ratio of the objective function based on tank model 5

本来蒸発量は特に日射量などの影響を強く受けるため、日変化や季節変化を伴うものである。但し、蒸発量の日変化は、潮汐補正を行う際に除去されてい

る可能性もあり、本稿ではそのような影響を考慮することができていない。

ここでは、Fig. 15 のような 2 段のタンクモデルの蒸発過程について、蒸発過程なしのタンクモデル 6 と、それぞれ Fig. 16 のグラフのように単位時間蒸発量 E を与えたタンクモデル 7~10 について、比較を行った。Fig. 16 における E_C は一定成分の値、 E_P はタンクの水位に比例する係数、 E_L は頭打ちの値を示す。これらのタンクモデルのパラメータ数などを、Table 3 に示す。例えば、タンクモデル 10 の単位時間蒸発量 E は、以下の式のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 E &= H_1(t) \\
 &\begin{cases} (H_1(t) \leq E_C) \\ (E_C < H_1(t) \leq \frac{E_L - E_C}{E_P} + E_C) \\ (H_1(t) > \frac{E_L - E_C}{E_P} + E_C) \end{cases} \\
 &= E_C + E_P(H_1(t) - E_C) \\
 &\left(E_C < H_1(t) \leq \frac{E_L - E_C}{E_P} + E_C \right) \quad (20) \\
 &= E_L \\
 &\left(H_1(t) > \frac{E_L - E_C}{E_P} + E_C \right)
 \end{aligned}$$

なお、タンクモデル 7 は E_P が 0 (E_P, E_L ともに不要)、タンクモデル 9 は E_L が無限大 (不要)、タンクモデル 8 は E_C が 0 の場合にそれぞれ相当する。なお、式 (20) のように 1 段目のタンクの水位 $H_1(t)$ が 0 になれば、単位時間蒸発量 E も 0 となる。

Fig. 17 に、蒸発過程なしのタンクモデル 6 を基準としたタンクモデル 7~10 の目的関数の値の比率を示す。蒸発過程なしのタンクモデル 6 と比較した場合、全観測点平均で目的関数の値がそれぞれ 0.55% から 0.75% 小さくなったが、増やしたパラメータ数に見合う導入効果が得られたのは、タンクモデル 7 だけであった。特に (11) 静岡但沼では目的関数の値が 3.3% 小さくなり、このように蒸発過程を考える上で一定成分の導入効果は高い。そして (11) 静岡但沼では、前節において蒸発過程の一定成分を導入したタンクモデル C とタンクモデル 1 を比較した場合よりも、蒸発過程の一定成分の導入効果が高くなっていることも分かった。この理由として、土壤水分構造を導入すれば 1 段目のタンクに滞留する降水が増

Table 3 Tank model parameter differences (refer to Figs. 15 and 16) for comparison in section 4-4

Type of the tank model		6	7	8	9	10
Number of tanks		2	2	2	2	2
Evaporation from the first tank (E)			X_C	X_C, X_P	X_P, X_L	X_C, X_P, X_L
Soil water structure of the first tank		○	○	○	○	○
Number of flank outflow	The first tank	2	2	2	2	2
	The second tank	1	1	1	1	1
Number of parameter		12	13	14	14	15

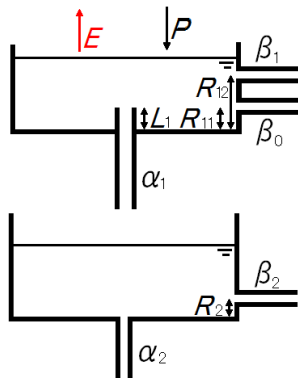


Fig. 15 Shapes of the tank model for comparison of evaporation (refer to Fig. 16) in section 4-4

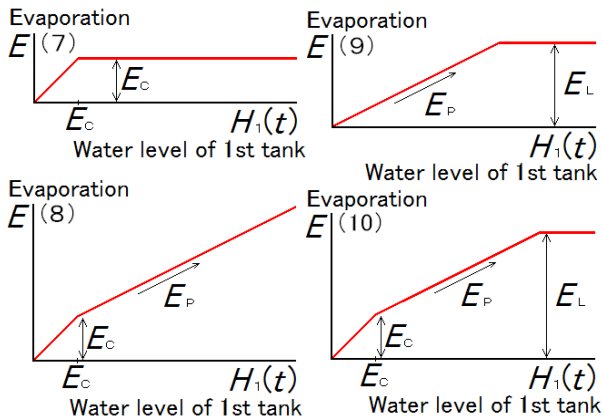


Fig. 16 Tank models for comparison of evaporation in section 4-4

えるため、蒸発も起こりやすくなる相乗効果が起きていると考えられる。蒸発過程と土壤水分構造は一緒に導入した方が良いことが確認できた。

本節の結果を元に、単位時間蒸発量としては一定成分のみを導入することとする。なお、蒸発過程、側面流出過程、最下段の下方流出過程の3つは降水がタンクの外に散逸する点では全く変わらない。本

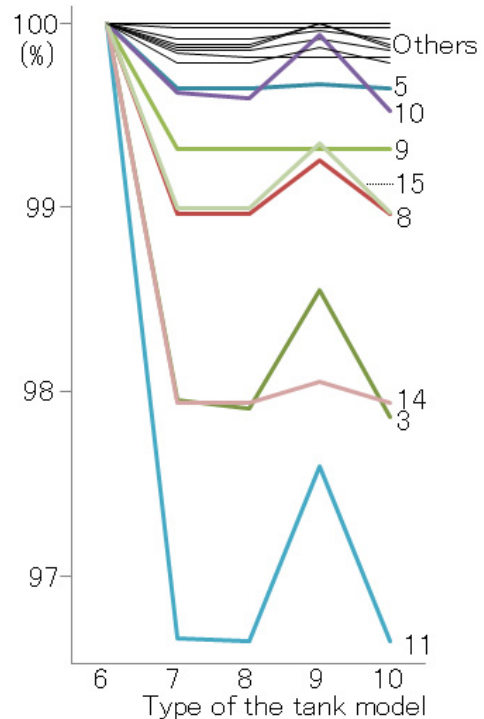


Fig. 17 Ratio of the objective function based on tank model 6

稿で計算した蒸発過程や各流出過程による散逸量が、それぞれ正確に蒸発量や各流出量に対応しているわけではないが、本稿ではタンクから一定成分として散逸する単位時間蒸発量 E を、便宜的に蒸発過程として考えることとする。

4.5 パラメータ数を減らす工夫（新バケツモデル）

現実的な時間で計算可能なタンクの形状を検討するためには、パラメータ数を減らすことによって計算時間を短縮する工夫を取り入れることも1つの方法である。そのようなパラメータ数を減らす試みを行ったところ、試み自体はうまくいったのだが、残

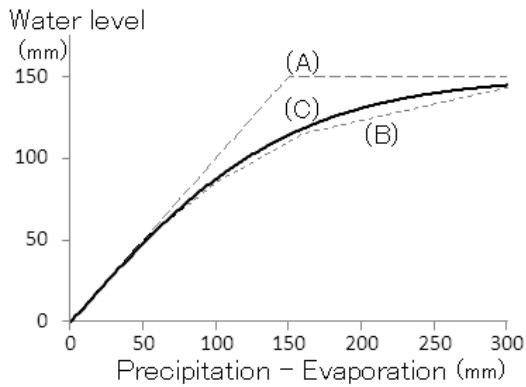


Fig. 18 Relation of precipitation after subtracting evaporation and the water level of each model
 (A) Bucket model (Manabe, 1969)
 (B) Tank model (Sugawara, 1972)
 (C) New bucket model (Kondo, 1993)

念ながら肝心の計算時間の短縮には繋がらなかった。但し、観測点によってはパラメータ数が少ないにも関わらず目的関数の値が小さくなる結果が得られたことや、タンクの形状の検討に対して示唆を含む結果が得られたことから、この節でその試みを紹介する。

例えば、前節のタンクモデル7のパラメータ数は13個であるが、そのうち側面流出過程に関するパラメータ数は6個もあり、半分近くを占めている。近藤（1993）は、流出過程に関するパラメータ数を減らすことを目的とした新バケツモデルを考案した。これは、Manabe（1969）のバケツモデルを改良し、液体水が土壌内を移動する過程を、土壌水分ポテンシャルと透水係数を用いて定式化した上で行った数値実験の結果から、日降水量と含水量（バケツの水位）の関係が双曲線で表わせることを明らかにし、その結果を元に考案したものである。新バケツモデルと、Manabe（1969）のバケツモデル、そして例えば前節におけるタンクモデル7の1段目のタンク（土壌水分構造を導入し側面流出孔が2つある場合）における降水量－蒸発量と、バケツやタンクの水位の関係を Fig. 18 に示す。横軸の降水量－蒸発量と縦軸のバケツやタンクの水位の差が、流出量を表している。流出過程を新バケツモデルに切り替える最大のメリットは、1つの流出過程につきパラメータ数をわずか1個にできることである。例えば、タンクモデル7の側面流出過程を全て新バケツモデルに切り替えた場合、パラメータ数を13個から8個へと減ら

すことができる。但しデメリットもあって、パラメータ数が少ないために、流出過程を表す関数形の自由度が失われてしまう。ここで、新バケツモデルは日値への適用を前提に考案されたモデルであるが、時間値でも拡張して適用可能と仮定したこと、また、新バケツモデルは地下に浸透しきれない降水が表面流出しないという仮定における数値実験の結果であり、基本的には水平に非一様な厚さを持つ表層土壌への降水の浸透過程を考えていることにも注意が必要である。

新バケツモデルによるバケツの水位 $H(t)$ の単位時間あたりの変化量は、以下のように表わせる。

$$H(t + \Delta t) = H(t) + (H_{MAX} - H(t)) \tanh(x)$$

$$x = \frac{P - E}{H_{MAX} - H(t)} \quad (21)$$

$$\tanh(x) = \frac{1 - \exp(-2x)}{1 + \exp(-2x)}$$

式（21）の唯一の未知のパラメータ H_{MAX} は、バケツの最大保水容量である。タンクモデルやバケツモデルにおける水位が降水量－蒸発量に対して直線で段階的に変化しているのに対し、新バケツモデルはバケツの水位が降水量－蒸発量に対して曲線で連続的に変化して最大保水容量 H_{MAX} に漸近する。近藤（1993）は、新バケツモデルやタンクモデルは座標原点とバケツモデルの最大保水容量 H_{MAX} を結ぶ漸近線であると紹介している。新バケツモデルは、側面流出過程に限らず下方流出過程にも適用可能であり、実際に近藤・他（1995）は下方流出過程にも新バケツモデルを導入し、河川流出量の観測値との比較を行って良好な結果を得ている。本稿でも、下方流出過程を新バケツモデルに切り替える調査も試みたが、残念ながら不調に終わった。そのためパラメータ数を減らすのは側面流出過程だけの絞りを、側面流出過程を新バケツモデルに切り替えた影響を調べるため、Fig. 19 に示す複数のタンクモデルについて比較を行った。Table 4 に、これらのタンクモデルの比較で設定した側面流出過程とパラメータ数などを示す。

Fig. 20 に、側面流出過程を新バケツモデルに全く切り替えていないタンクモデル11を基準とした、タ

Table 4 Tank model parameter differences (refer to Fig. 19) for comparison in section 4-5

Type of the tank model		11	12	13	14	15
Number of tanks		3	3	3	3	3
Evaporation from the first tank		Constant	Constant	Constant	Constant	Constant
Soil water structure of the first tank		○	○	○	○	○
Number of flank outflow	The first tank	2	New bucket	2	2	New bucket
	The second tank	1	1	New bucket	1	New bucket
	The third tank	1	1	1	New bucket	New bucket
Number of parameter		17	14	16	16	12

* (New bucket) refers to the new bucket model (Kondo, 1993).

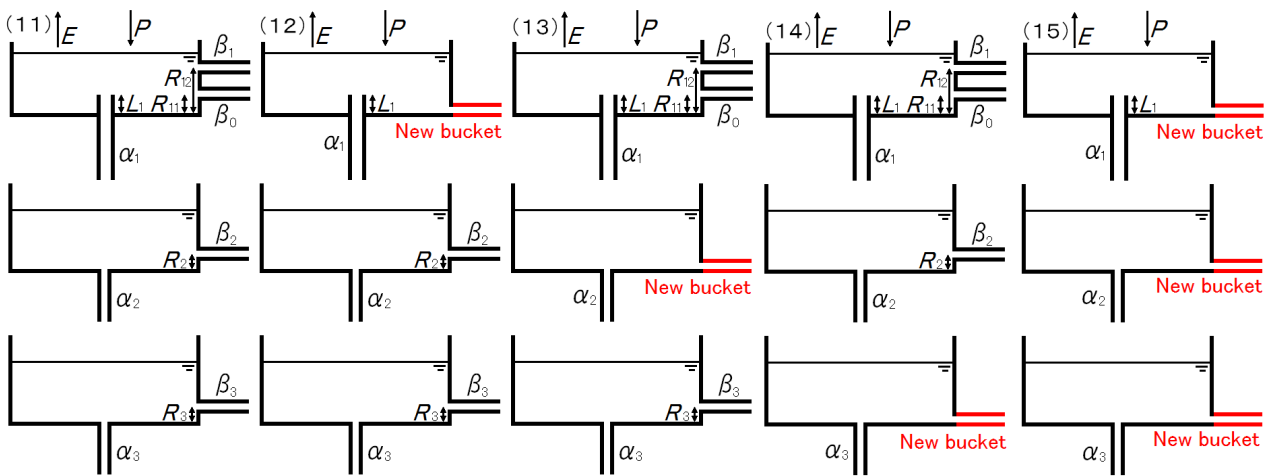


Fig. 19 Shapes of tank models for comparison in section 4-5

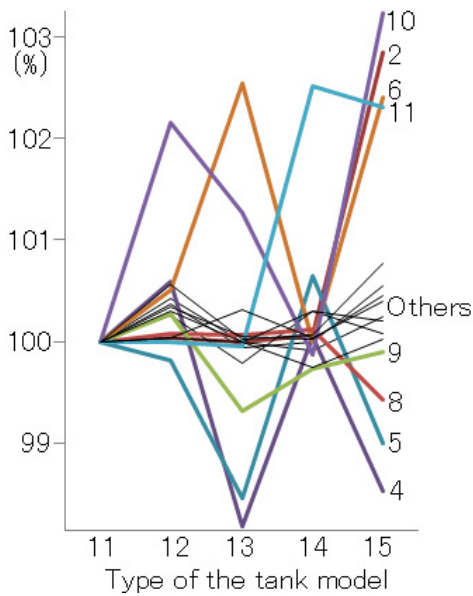


Fig. 20 Ratio of the objective function based on tank model 11 (1)

ンクモデル 12~15 の目的関数の値の比率を示す. タンクモデル 11 と比較した場合, タンクモデル 12 で目的関数の値が小さくなった観測点がほとんど無かったのに対して, タンクモデル 13 では (4) 浜松横川で目的関数の値が 2.0% 小さくなる効果が得られた. また, タンクモデル 14 でも複数の観測点でわずかながら目的関数の値が小さくなる効果が得られた. なお, 基準としたタンクモデル 11 には, 2 段目と 3 段目のタンクに側面流出孔が 1 つしかない. この結果を踏まえると, 2 段目と 3 段目のタンクにおいて側面流出孔を 2 つに増やす必要性について調べる価値は十分にあることが分かる. さらに (8) 御前崎大山では, タンクモデル 11 に比べてパラメータ数が 5 個も少ないタンクモデル 15 の方が, 目的関数の値が 0.58% も小さくなったことも特筆すべきである.

この節で側面流出過程の切り替えを試みた新バケツモデルであるが, 側面流出過程を表す関数形とし

Table 5 Tank model parameter differences (refer to Fig. 21) for comparison in section 4-6

Type of the tank model		11	16	17	18	19
Number of tanks		3	3	3	3	3
Evaporation	The first tank	Constant	Constant	Constant	Constant	Constant
	The second tank		Constant	Constant	Constant	Constant
	The third tank			Constant	Constant	Constant
Soil water structure	The first tank	○	○	○	○	○
	The second tank		○	○	○	○
	The third tank			○	○	○
Number of flank outflow	The first tank	2	2	2	2	2
	The second tank	1	1	1	2	2
	The third tank	1	1	1	1	2
Number of parameter		17	19	21	23	25

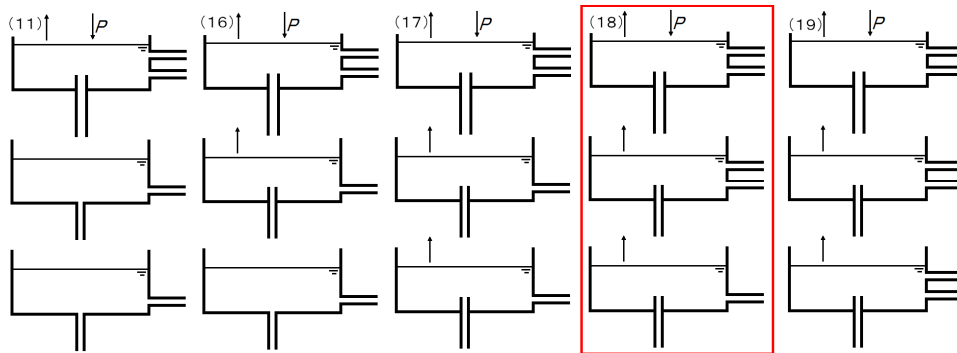


Fig. 21 Shapes of the tank model for comparison in section 4-6

* Tank model 18 is the most suitable shape for rainfall correction of volumetric strainmeter data.

て十分有効であることが示された。しかし、最初に説明したように残念ながらタンクモデルのパラメータの値の推定にかかる計算時間を減らすことができなかった。新バケツモデルのように、降水量-蒸発量に対して流出量が曲線で連続的に変化する場合、多峰性の問題がより複雑化してしまい本稿で用いたSCE-UA法では最適解に収束しづらいのかも知れない。したがって、本稿では側面流出過程のパラメータ数を減らすことは諦め、新バケツモデルは導入しないこととする。

4.6 2 段目及び 3 段目のタンクの形状

Fig. 2 (D) や (E) の側面流出孔は、1 段目及び 2 段目のタンクが 2 つで、3 段目のタンクは 1 つである。Fig. 2 (A) や (B) の側面流出孔は、1 段目のタンクが 2 つで、2 段目及び 3 段目のタンクは 1 つである。このように、これまでに行われてきたタンク

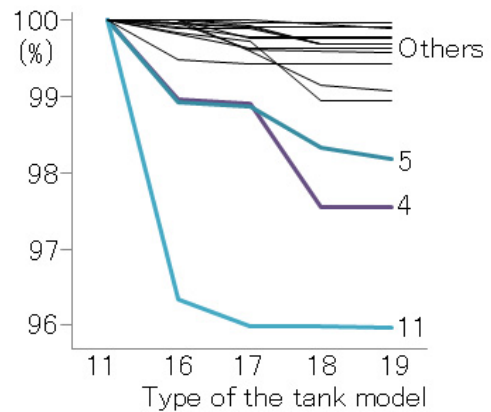


Fig. 22 Ratio of the objective function based on tank model 11 (2)

モデルによる地殻変動データの降水補正で考案されてきたタンクの形状は、上段のタンクは比較的複雑な形状で、下段のタンクは比較的簡略な形状である。しかし、前節の結果を踏まえると、2 段目及び 3 段

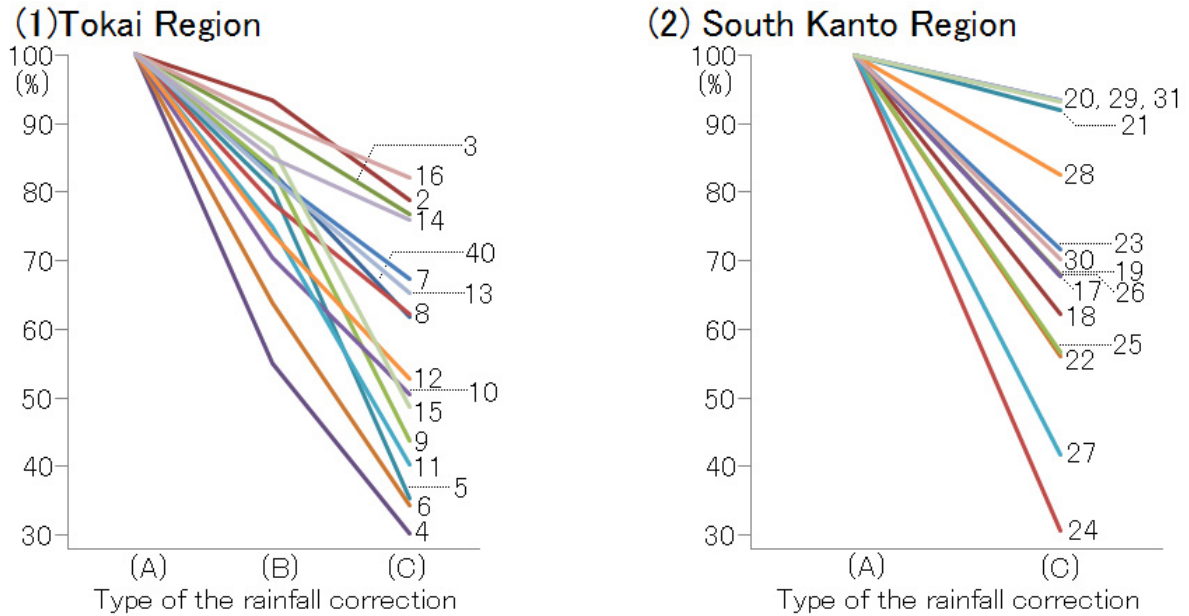


Fig. 23 Ratio of the objective function based on (A) no rainfall correction
 (A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)
 (B) Old rainfall correction (Only (1) Tokai Region)
 (C) Rainfall correction by tank model 18

目のタンクでも側面流出孔を 2 つにした方が良いかも知れない。また、前節までの調査では多くの観測点で 1 段目及び 2 段目のタンクの水位が 0 になる期間が多かったことも分かっており、1 段目のタンクのみを導入していた蒸発過程がほとんど効いていないことになる。蒸発過程を適切に考慮するのであれば、2 段目と 3 段目のタンクでも蒸発過程や土壌水分構造を導入した方が良いかも知れない。下段のタンクにも蒸発過程を導入する調査は、これまでに行われたタンクモデルによる地殻変動データの降水補正では見受けられなかったが、角屋・永井 (1988) は樹木の根からの吸い上げを考慮して導入しており、短期及び長期の河川流出量の推定に対して良好な結果を得ている。

本節では、前節でも比較に用いた Fig. 19 の 3 段のタンクモデル 11 を基準とし、Fig. 21 に示すように 2 段目と 3 段目のタンクの形状を少しずつ複雑にした複数のタンクモデルについて比較を行った。Table 5 に、これらのタンクモデルの比較で導入した各概念とパラメータ数などを示す。パラメータ数は、最大となるタンクモデル 19 で 25 個に増えている。

Fig. 22 に、タンクモデル 11 を基準としたタンクモデル 16~19 の目的関数の値の比率を示す。2 段目や 3 段目のタンクに、蒸発過程と土壌水分構造、2

つ目の側面流出過程を導入するにつれて、目的関数の値も徐々に小さくなった。特に (11) 静岡但沼では、タンクモデル 11 に比べてタンクモデル 17 の目的関数の値が 4.0% も小さくなり、他にも (4) 浜松横川や (5) 島田川根では、タンクモデル 11 に比べてタンクモデル 18 の目的関数の値がそれぞれ 2.5% と 1.7% 小さくなり、効果が高かった。一方で、タンクモデル 19 についてはタンクモデル 18 よりも有意に効果の高い観測点は無く、増やしたパラメータ数に見合う導入効果は得られなかった。

4.7 気象庁の体積ひずみ計の降水補正に適したタンクの形状

前節までの結果から、気象庁の体積ひずみ計データの降水補正に適したタンクの形状として、前節のタンクモデル 18 を提案する。このタンクモデル 18 のパラメータ数は 23 個である。

Fig. 23 (1) に、東海地域の各観測点における降水補正なしを基準としたこれまでの降水補正と、タンクモデル 18 による降水補正の目的関数の値の比率を示す。降水補正なしに比べて、これまでの降水補正の目的関数の値は東海地域の全観測点平均で 20% 小さくなったのに対し、タンクモデル 18 による降水補正の目的関数の値は東海地域の全観測点平均で

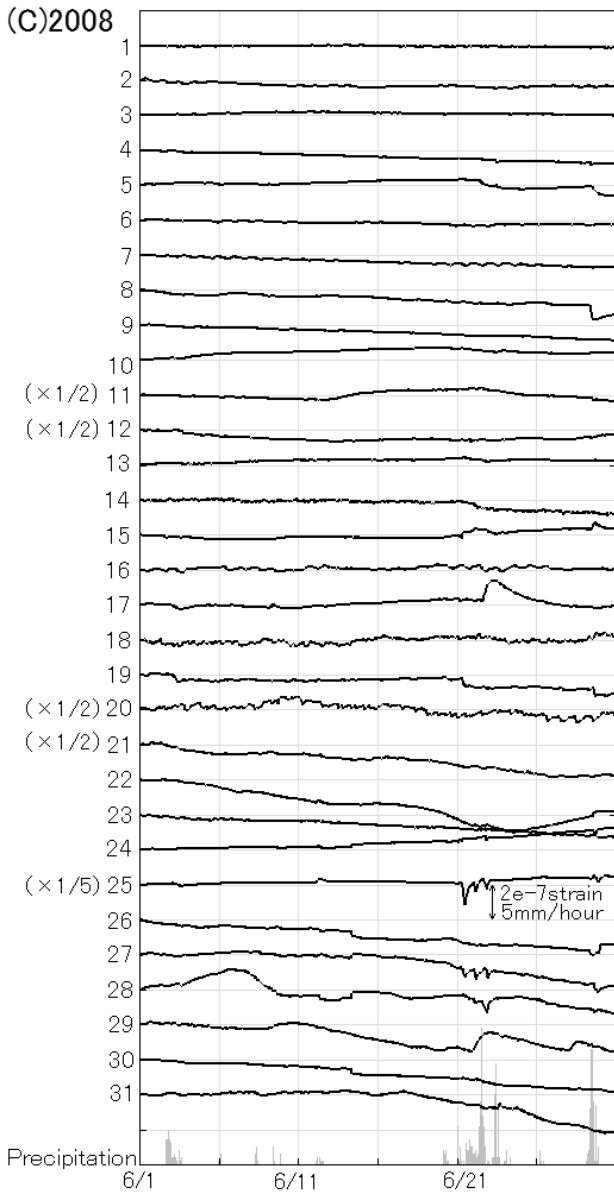


Fig. 24 Data plot of all volumetric strainmeters and precipitation in Shizuoka (2) (June 1–June 30, 2008)

* Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, while rainfall is corrected by tank model 18.

* The station code is shown on the left side of the volumetric strainmeter data.

43%も小さくなった。目的関数という数値の上では、タンクモデル 18 による降水補正は、これまでの降水補正の 2 倍以上の高い効果があるとも言える。

Fig. 24 に、2008 年 6 月における全観測点のタンクモデル 18 による降水補正した体積ひずみ計データを示す。降水補正をしていない Fig. 1 (B) と同じ期

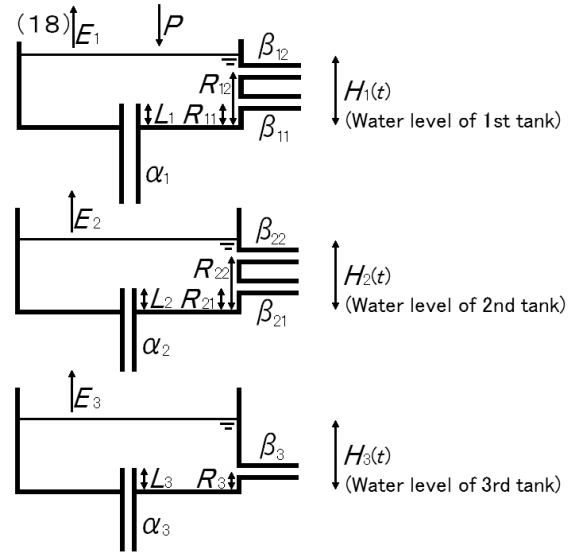


Fig. 25 The most suitable shape of tank model (tank model 18) to correct rainfall of strainmeter data

Table 6 Tank model 18 parameter (refer to Fig. 25)

Parameter	Contents (Unit)
A_1, A_2, A_3	The correction factor (strain/mm)
E_1, E_2, E_3	Evaporation (mm/hour)
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Coefficient of downward outflow (%/hour)
L_1, L_2, L_3	Soil water structure (mm)
$\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{21}, \beta_{22}, \beta_3$	Coefficient of flank outflow (%/hour)
$R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}, R_3$	Height of flank outflow (mm)

間のデータであるが、2 つの図を見比べると、タンクモデル 18 による降水補正によってどの観測点においても短期的な降水の影響がある程度補正されていることが分かる。

なお、Fig. 23 (2) には、南関東地域の各観測点における降水補正なしを基準とした、タンクモデル 18 による降水補正の目的関数の値の比率も参考として示している。東海地域に比べて降水以外のノイズが大きい観測点が多いため、降水補正が効果的であったとしても目的関数の値は小さくなりにくい、南関東地域でも降水補正なしに比べて全観測点平均で 28%、特に (24) 館山中里では 69%も目的関数の値が小さくなるなど、タンクモデル 18 による降水補正

による高い改善効果が得られた。

4.3 節においてタンクの段数を 2 段から 3 段にした効果が特に高かった (6) 御前崎佐倉において、3 段のタンクモデル 18 を 4 段にした場合についても調査を行ったところ、目的関数の値が 0.4% 小さくなった程度であった。パラメータ数 1 つあたり 0.07% の改善効果であり、(6) 御前崎佐倉においてタンクの段数を 4 段にする必要性はあまり高くないことも分かった。また、4 章全体の結果を元に、気象庁の体積ひずみ計データの降水補正に必要な概念についてまとめると、以下の通りとなる。

- ・ 時間遅れ (タンクの段数)
- ・ 蒸発過程 (全てのタンクに導入)
- ・ 土壌水分構造 (全てのタンクに導入)
- ・ 流出過程 (側面流出過程と下方流出過程)

また、参考のためにタンクモデル 18 の形状と必要なパラメータを Fig. 25 に再掲し、Table 6 にパラメータの内容を示す。また、これまでに比較してきたタンクモデルと式の重複があるが、あらためてタンクモデル 18 に関する数式を以下に示す。

$$H_1(t + \Delta t) = H_1(t) + P - S_1 - Q_{11} - Q_{12} - V_1 \quad (22)$$

$$H_2(t + \Delta t) = H_2(t) + S_1 - S_2 - Q_{21} - Q_{22} - V_2 \quad (23)$$

$$H_3(t + \Delta t) = H_3(t) + S_2 - S_3 - Q_3 - V_3 \quad (24)$$

ここで P は単位時間降水量、 $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$ 、 $H_3(t)$ は 1 段目から 3 段目までのタンクの水位である。また、 V_1 、 V_2 、 V_3 は単位時間蒸発量、 S_1 、 S_2 、 S_3 は下方流出量、 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{22} 、 Q_3 は側面流出量 (1 段目と 2 段目のタンクには 2 つの側面流出孔を設定) で、それぞれ以下のように表わせる。

$$\begin{aligned} V_1 &= E_1 & (H_1(t) \geq E_1) \\ &= H_1(t) & (H_1(t) < E_1) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= E_2 & (H_2(t) \geq E_2) \\ &= H_2(t) & (H_2(t) < E_2) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} V_3 &= E_3 & (H_3(t) \geq E_3) \\ &= H_3(t) & (H_3(t) < E_3) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} S_1 &= \alpha_1 \Delta t (H_1(t) - L_1) & (H_1(t) \geq L_1) \\ &= 0 & (H_1(t) < L_1) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} S_2 &= \alpha_2 \Delta t (H_2(t) - L_2) & (H_2(t) \geq L_2) \\ &= 0 & (H_2(t) < L_2) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} S_3 &= \alpha_3 \Delta t (H_3(t) - L_3) & (H_3(t) \geq L_3) \\ &= 0 & (H_3(t) < L_3) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \beta_{11} \Delta t (H_1(t) - R_{11}) & (H_1(t) \geq R_{11}) \\ &= 0 & (H_1(t) < R_{11}) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} Q_{12} &= \beta_{12} \Delta t (H_1(t) - R_{12}) & (H_1(t) \geq R_{12}) \\ &= 0 & (H_1(t) < R_{12}) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Q_{21} &= \beta_{21} \Delta t (H_2(t) - R_{21}) & (H_2(t) \geq R_{21}) \\ &= 0 & (H_2(t) < R_{21}) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Q_{22} &= \beta_{22} \Delta t (H_2(t) - R_{22}) & (H_2(t) \geq R_{22}) \\ &= 0 & (H_2(t) < R_{22}) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= \beta_3 \Delta t (H_3(t) - R_3) & (H_3(t) \geq R_3) \\ &= 0 & (H_3(t) < R_3) \end{aligned} \quad (35)$$

ここで E_1 、 E_2 、 E_3 は 1 段目から 3 段目までの単位時間蒸発可能量、 α_1 、 α_2 、 α_3 は下方流出係数、 L_1 、 L_2 、 L_3 は土壌水分構造、 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} 、 R_3 は側面流出孔の高さ、 β_{11} 、 β_{12} 、 β_{21} 、 β_{22} 、 β_3 は側面流出係数である。

そして、地殻変動データ $D(t)$ に降水補正を行って $D'(t)$ にする式は、以下のように表わせる。

$$D'(t) = D(t) + \sum_{i=1}^3 A_i H_i(t) \quad (36)$$

ここで、 A_i は i 段目のタンクの水位 $H_i(t)$ を地殻変動データに換算する補正係数であり、タンクの段数は Fig. 25 で示すように 3 段である。

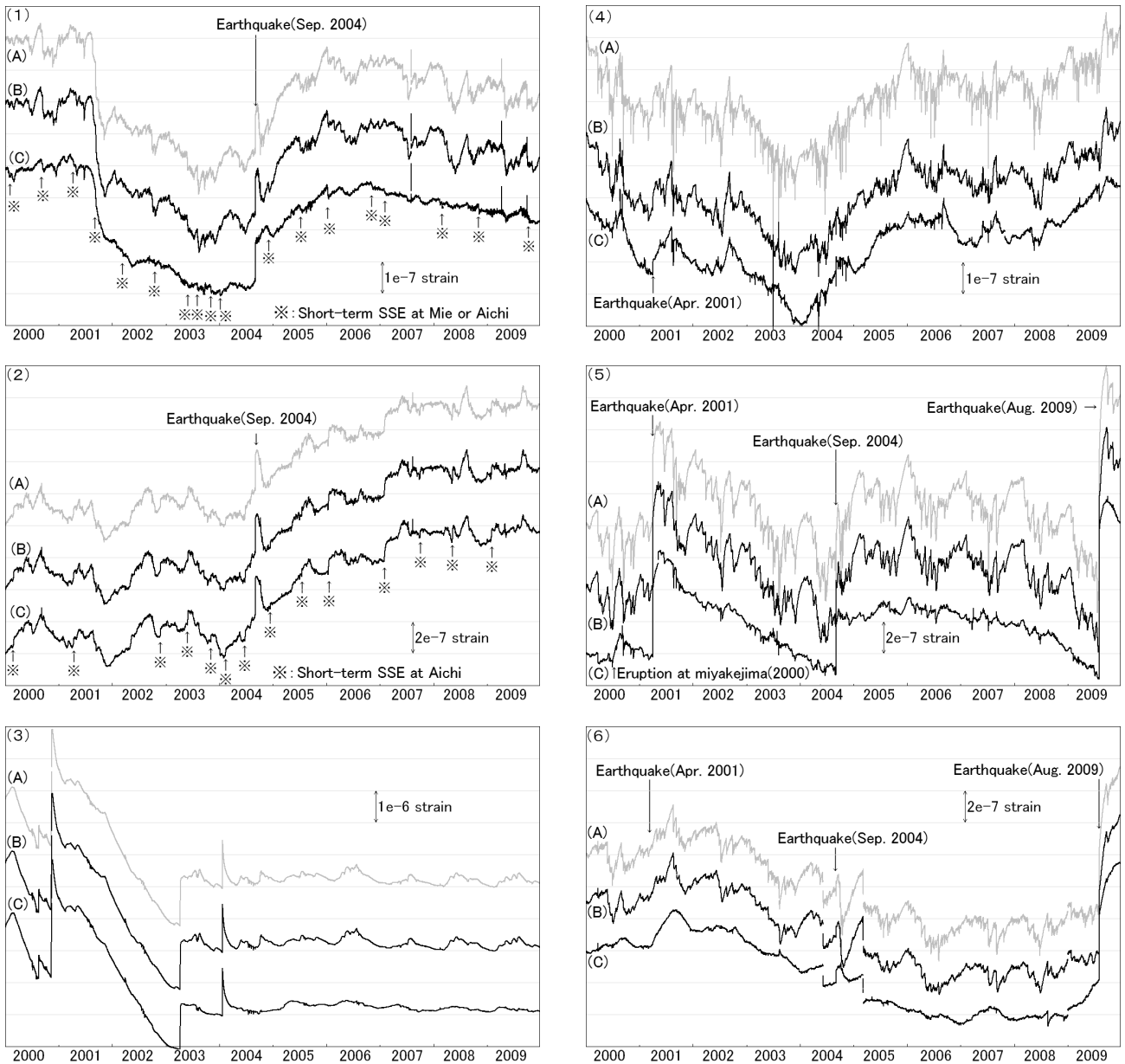


Fig. 26 (1) Long-term data plot of volumetric strainmeters (station codes 1–6) (Jul. 1, 2000–Dec. 31, 2009)
 (A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)
 (B) Old rainfall correction
 (C) Rainfall correction by tank model 18

次章以降は特別な場合を除き、本稿のタンクモデルとは、気象庁の体積ひずみ計データの降水補正に適したタンクの形状として提案したタンクモデル18を指すこととする。Fig. 26に各観測点における10年間の時系列グラフ、Table 7に各観測点の各段のタンクの水位の初期値、Table 8に各観測点のパラメータの値を示す。これら3つの図表には、東海地域だけでなく、南関東地域の観測点も参考のために載

せている。なお、一部の観測点ではFig. 26において指数関数を用いて緩和的な変化を除去している。Table 7及びTable 8に示した値と、2010年1月1日0時以降の降水量の連続データがあれば、現在までの降水補正量を算出することが可能である。また、降水量の連続データさえあれば、過去に遡って降水補正量を算出することも可能である。

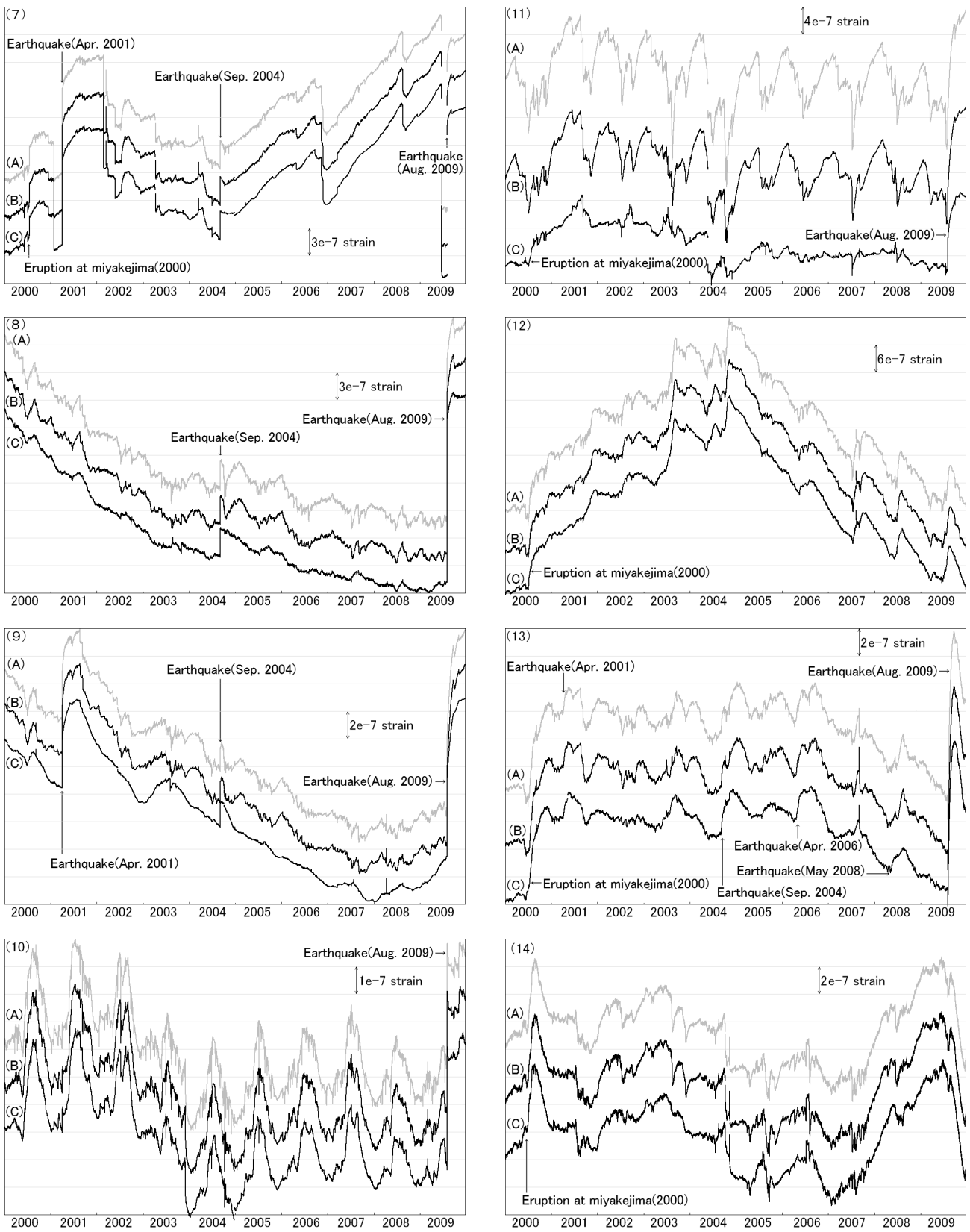


Fig. 26 (2) Long-term data plot of volumetric strainmeters (station codes 7-14) (Jul. 1, 2000-Dec. 31, 2009)

(A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)

(B) Old rainfall correction

(C) Rainfall correction by tank model 18

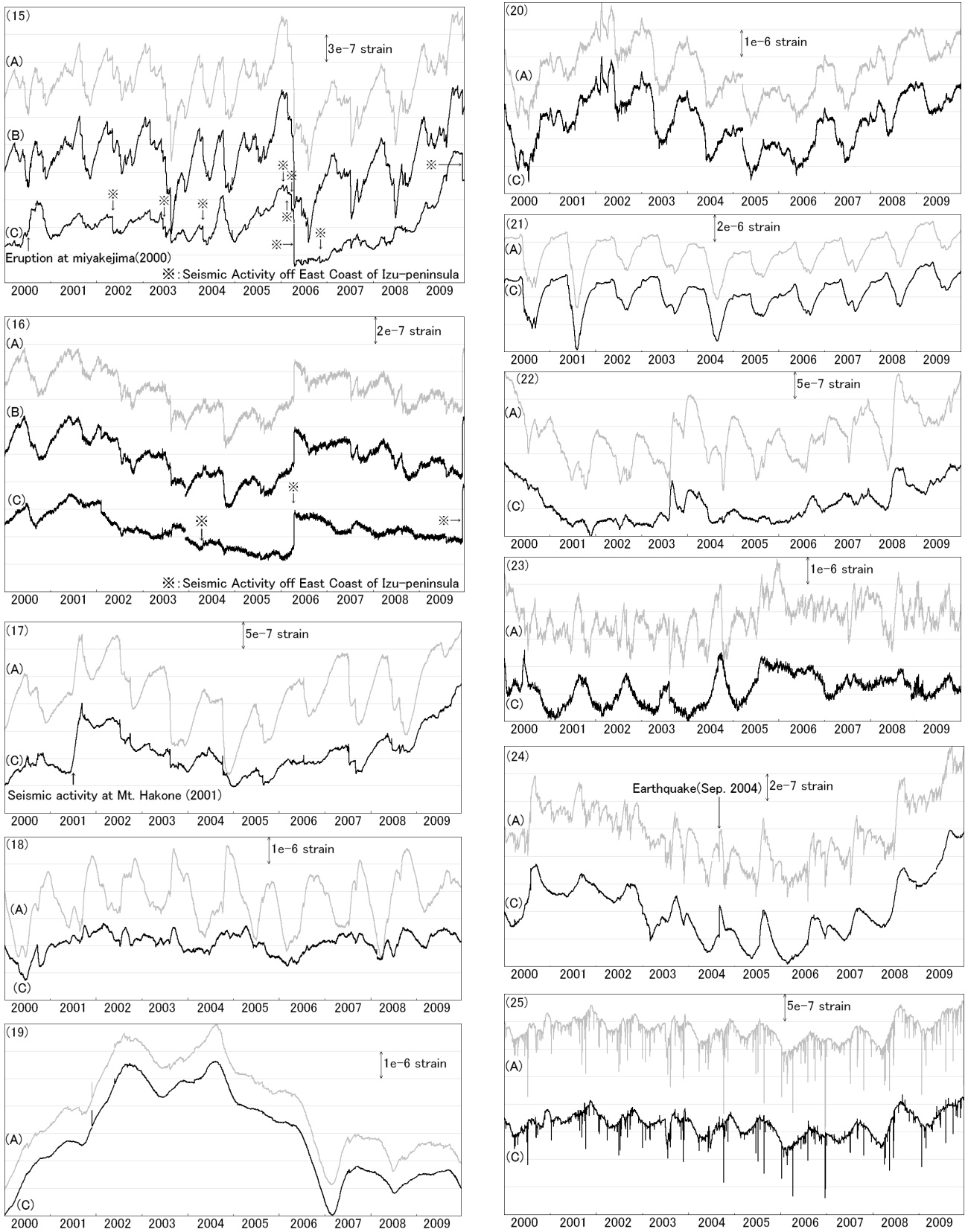


Fig. 26 (3) Long-term data plot of volumetric strainmeters (station codes 17–25) (Jul. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)

(B) Old rainfall correction

(C) Rainfall correction by tank model 18

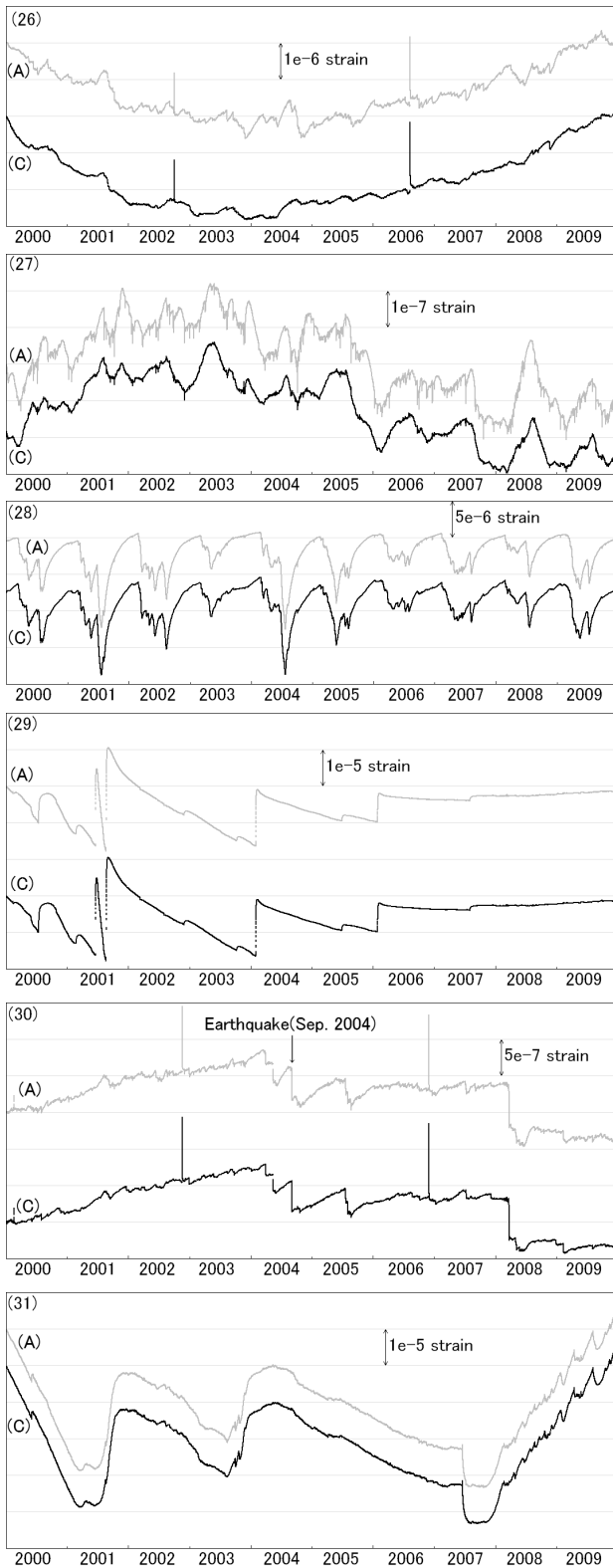


Fig. 26 (4) Long-term data plot of volumetric strainmeters (station codes 26–31) (Jul. 1, 2000–Dec. 31, 2009)
 (A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)
 (C) Rainfall correction by tank model 18

Table 7 Tank model 18 initial water level data

Station code	The first tank (mm)	The second tank (mm)	The third tank (mm)
1	0.0	9.4	44.5
2	0.0	0.7	25.3
3	19.3	0.0	98.0
4	0.0	18.1	13.6
5	0.0	41.5	37.5
6	0.0	78.2	2.0
7	0.0	0.6	0.0
8	0.0	0.0	82.1
9	23.6	6.0	52.8
10	14.7	0.0	4.4
11	0.0	82.6	68.4
12	0.0	3.9	41.2
13	32.7	3.9	11.8
14	0.0	67.0	0.0
15	87.9	7.3	116.2
16	0.9	0.0	169.4
17	4.3	21.7	146.2
18	7.0	66.0	193.5
19	0.0	85.3	95.8
20	43.6	1.4	0.0
21	3.0	66.1	0.0
22	160.3	88.1	181.7
23	7.5	66.8	93.0
24	14.5	44.6	20.5
25	1.7	0.0	0.0
26	1.5	128.9	466.2
27	16.5	47.4	108.5
28	0.0	6.0	229.3
29	46.0	0.0	15.7
30	15.2	72.8	5.5
31	44.8	60.3	16.0

* The calculated water level data for December 31, 2009 23:00 is set as the initial water level data (for December 31, 1999 23:00).

Table 8 (1) Tank model 18 parameter values (1)

Station code	The correction factor (strain/mm)			Downward outflow coefficient (%/hour)			Evaporation (mm/hour)			Soil water structure (mm)		
	A_1	A_2	A_3	α_1	α_2	α_3	E_1	E_2	E_3	L_1	L_2	L_3
1	7.55E-10	5.23E-10	5.99E-10	35.3	1.76	0.078	0.0835	0.0165	0.0461	1	11	2
2	3.54E-10	7.62E-10	7.69E-10	7.82	43.5	0.105	0.034	0.024	0.0395	0	2	1
3	4.06E-10	1.43E-10	-1.56E-09	3.2	0.762	0.106	0.12	0.0002	0.0355	69	0	83
4	1.62E-09	1.17E-09	8.32E-10	8.35	1.3	0.211	0.024	0.0494	0.0188	0	29	4
5	6.80E-10	1.51E-09	8.89E-10	3.9	0.836	0.186	0.121	0.0447	0.0257	41	52	17
6	2.87E-09	1.29E-09	-9.22E-09	52.6	0.082	2.57	0.0386	0.0463	0.0132	1	0	0
7	1.19E-09	9.03E-10	4.88E-10	26.5	4.67	0.184	0.0124	0.0167	0.0376	1	12	1
8	2.86E-09	1.26E-09	9.76E-10	82.8	13.3	0.103	0.153	0.0543	0.0332	2	0	23
9	7.79E-10	8.79E-10	8.59E-10	21	3.1	0.105	0.0268	0.0103	0.0347	39	13	15
10	9.38E-10	-2.09E-09	-2.11E-09	2.89	1.31	0.409	0.0293	0.0024	0.0137	36	0	8
11	1.93E-09	1.32E-09	2.82E-09	15.6	0.673	0.113	0.152	0.101	0.0346	2	116	62
12	1.20E-09	3.67E-09	2.28E-09	3.82	6.64	0.472	0.0283	0.0043	0.0759	0	4	56
13	6.64E-10	5.92E-10	1.50E-09	0.789	0.299	0.287	0.0645	0.0199	0.0177	52	5	7
14	9.96E-10	4.28E-10	1.11E-09	46.5	0.939	0.145	0.0783	0.0598	0.0603	9	101	22
15	6.90E-10	3.19E-09	1.98E-09	0.477	4.19	0.06	0.117	0.0027	0.0298	119	8	0
16	8.46E-10	1.30E-09	9.95E-10	32.5	11.8	0.021	0.0148	0.0746	0.0761	2	0	20
17	9.88E-10	-4.41E-10	4.86E-09	4.18	0.456	0.037	0.0363	0.04	0.0382	21	33	195
18	4.65E-10	2.86E-09	-1.03E-08	0.745	0.17	0.033	0.0025	0.0526	0.0555	6	35	3
19	1.31E-09	2.31E-09	2.64E-09	16.4	21.1	0.047	0.0574	0.0638	0.016	1	109	64
20	1.55E-09	-3.43E-10	1.83E-09	2.28	2.45	1.66	0.0496	0.0398	0.0328	62	15	7
21	1.33E-09	2.08E-09	2.43E-09	8.74	25.5	2.77	0.0249	0.0777	0.0796	13	101	33
22	1.30E-09	2.46E-09	-4.58E-09	0.498	0.136	0.186	0.117	0.0119	0.0423	188	28	142
23	4.67E-10	1.63E-09	-9.32E-10	1.79	0.09	17.7	0.0108	0.0513	0.0507	8	10	93
24	1.50E-09	1.18E-09	1.11E-09	11.8	1.02	18.1	0.0207	0.0777	0.0375	16	63	184
25	1.57E-09	8.99E-09	2.85E-09	33.4	12.9	1.36	0.0731	0.0022	0.0117	11	0	1
26	1.17E-09	1.97E-09	1.45E-09	4.03	69.1	0.02	0.0013	0.0931	0.0667	1	140	195
27	2.58E-09	1.10E-09	-2.79E-09	4.8	0.159	0.027	0.0153	0.0965	0.0983	17	9	93
28	3.23E-09	1.44E-09	-5.01E-09	17.9	0.678	38.8	0.0015	0.0412	0.119	0	4	251
29	8.01E-10	6.80E-10	9.19E-10	9.55	4.49	2.86	0.065	0.0542	0.0216	58	12	22
30	6.84E-10	9.99E-10	8.53E-10	5.13	26.1	0.136	0.0397	0.0484	0.0464	27	71	22
31	3.52E-10	1.10E-10	1.41E-09	0.301	0.892	46.1	0.0596	0.0703	0.0392	19	55	16

5 各観測点の降水応答の特徴について

5.1 各段のタンクの補正係数の傾向

タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正で推定した Table 8 に示すパラメータの値自体か

ら、物理的意味を見出すことは難しい。これらのパラメータの値には、おそらく土壌の透水係数、地形勾配、地下水面までの深さ、人工物や植生による被覆率、外部からの流入量など様々な要因による影響が含まれていると考えられるが、計測可能な物理量

Table 8 (2) Tank model 18 parameter values (2)

Station code	Flank outflow									
	Height (mm)					Coefficient (%/hour)				
	R ₁₁	R ₁₂	R ₂₁	R ₂₂	R ₃	β_{11}	β_{12}	β_{21}	β_{22}	β_{3}
1	2	31	47	92	236	37.3	50	3.37	39.7	49.2
2	16	31	179	288	73	18	42.5	22.2	20.6	38
3	101	189	152	216	258	4.86	77.9	34.3	25.9	0.273
4	4	18	55	74	122	3.08	5.32	2.96	17.9	44.6
5	216	228	122	170	120	1.88	15.1	2.13	3.53	0.417
6	2	3	369	408	9	71.1	66.3	4.22	47.1	42.9
7	4	13	26	47	179	32.2	21.9	6.67	31.8	83.8
8	2	2	34	67	395	87.5	86.3	20.2	48.4	3.67
9	41	48	25	48	265	18.3	22.4	2.26	22	5.88
10	17	144	13	18	31	2.01	0.333	12.1	46.7	72.6
11	156	160	539	739	271	69.2	54.7	57.8	0	0.584
12	8	89	19	61	219	0.295	6.73	19.3	26.2	62
13	65	113	85	181	83	0.667	11.6	58.1	24.1	18.8
14	0	8	344	406	81	5.91	46.5	46.3	27.2	0.46
15	135	234	48	122	394	0.262	0.241	81.6	28.9	50.5
16	3	10	48	132	409	67.3	18.4	48.6	27.6	79.1
17	14	49	191	197	339	2.83	5.83	10.4	14.6	10.8
18	202	305	366	376	270	1.3	6.24	2.09	6.37	0.244
19	2	2	121	236	258	25	71.1	47.6	33.6	81.9
20	210	215	78	80	52	5.02	4.39	11.4	6.3	3.86
21	19	34	164	177	176	32.7	16.6	18.2	12.3	18.7
22	432	438	206	214	218	17.7	28.9	1.8	26.9	24.2
23	17	90	201	206	97	3.96	39.5	10.4	11.3	15.1
24	23	30	224	230	6	1.58	2.25	2.75	2.44	0.29
25	25	25	54	56	48	77.4	84.2	17.5	18.1	12
26	51	117	151	152	561	4.06	37.5	28	26.4	46
27	29	47	160	163	233	2.71	9.49	72.9	39.3	41
28	86	86	117	135	251	53	55.6	30.2	56.5	77.9
29	68	108	217	251	199	11.9	20.2	24.5	23.2	22.2
30	31	66	73	75	113	9.85	22.6	27.1	23.4	22.1
31	356	368	133	140	55	33.5	34.2	27.1	33	26.4

* The gray cells indicate there was no flank outflow (highly arbitrary parameter).

として直接対応づけることは困難である。但し、各段のタンクの補正係数の傾向から、各観測点における降水応答の特徴を見出すことができたので、この節において紹介する。なお、南関東地域の一部の観

測点では、遠方のアメダスの降水量データを用いて体積ひずみ計データの降水補正を行った影響が含まれる可能性がある。そのため、この章では4章の大半と同様、東海地域の観測点のみ言及する。

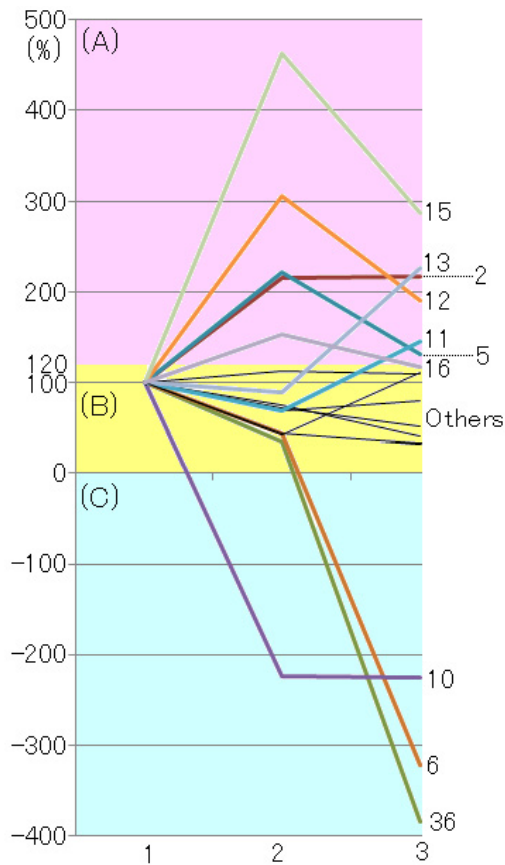


Fig. 27 Ratio of the correction factor for each tank based on the first tank
 (A) The ratio of the correction factor for the second or third tank based on the first tank is more than 120% (Type A).
 (B) Other (Type B)
 (C) The ratio of the correction factor for the second or third tank based on the first tank is negative (Type C).

Table 8 (1) に示した東海地域の各観測点における降水補正パラメータのうち、1 段目の補正係数を基準とした 2 段目及び 3 段目の補正係数の比率を Fig. 27 に示す。これは、降水直後の変化に追従する 1 段目のタンクに対して、時間遅れとして効く 2 段目や 3 段目のタンクによる影響の強さや性質を見るための図である。この図において、各段のタンクの補正係数の傾向に関して、概ね 3 つの分類ができる。

1 つ目の分類 (以降、A タイプ) は、1 段目に比べて 2 段目や 3 段目のタンクの補正係数が大きい観測点である。1 段目の補正係数を基準とした 2 段目と 3 段目の補正係数の比率のいずれかが 120%以上の観測点をこの分類の定義とすると、7 観測点が該当する。これらの観測点のうち、(5) 島田川根、(11) 静

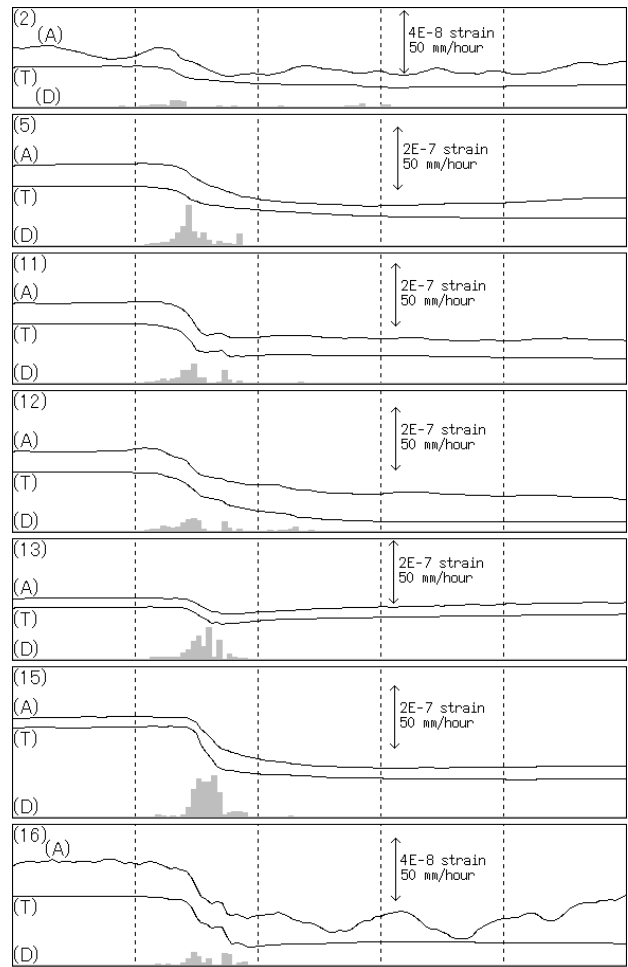


Fig. 28 (1) Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at Type A (June 28–July 2, 2008)
 (A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
 (T) Theoretical volumetric strain data by tank model 18
 (D) Precipitation data
 * The station code (refer to Table 1) is shown on the upper left side.

岡但沼, (12) 富士鶴無ヶ淵では、近隣を川が流れており、(2) 蒲郡清田, (13) 伊豆小下田, (15) 東伊豆奈良本, (16) 熱海下多賀では背後が山の斜面となっている。Fig. 28 (1) に、A タイプの観測点における降水補正なしの体積ひずみ計データ、タンクモデルによる理論降水応答、降水量データを示す。これらの観測点のうち、(5) 島田川根、(12) 富士鶴無ヶ淵、(15) 東伊豆奈良本では、降水期間中だけでなく降水後も緩和的な縮み変化が継続する特徴があり、(11) 静岡但沼では、降水後に一旦縮みから伸びの

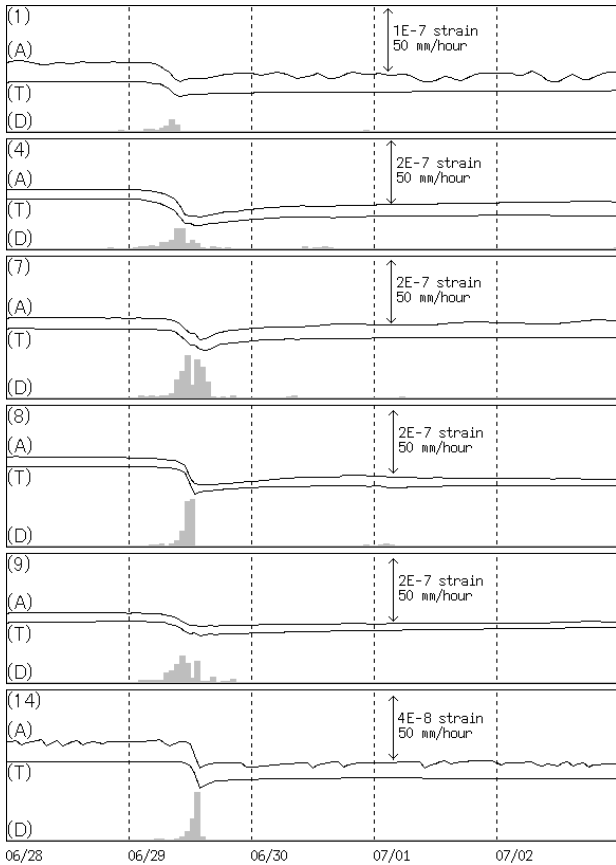


Fig. 28 (2) Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at Type B (June 28–July 2, 2008)
 (B) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
 (T) Theoretical volumetric strain data by tank model 18
 (D) Precipitation data
 * The station code (refer to Table 1) is shown on the upper left side.

変化に若干ながら反転するものの、しばらくしてから再度緩やかな縮み変化となる特徴があることが分かる。これら 4 つの観測点の変化傾向からは、降水が時間遅れで影響を及ぼす要因があることが示唆される。地理条件を元にこの要因について考えてみると、これらの観測点では近隣の川や地下水などによって、上流部から時間遅れの流入があっても不自然ではない。

2 つ目の分類（以降、B タイプ）は、1 段目から 3 段目までタンクの補正係数がほとんど変わらない観測点である。1 段目の補正係数を基準とした 2 段目と 3 段目の補正係数の比率が 0% から 120% までに収まる観測点をこの分類の定義とすると、6 観測点が

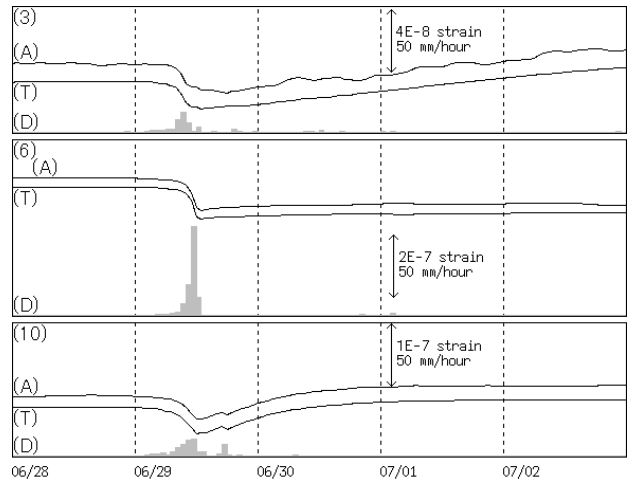


Fig. 28 (3) Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at Type C (June 28–July 2, 2008)
 (C) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
 (T) Theoretical volumetric strain data by tank model 18
 (D) Precipitation data
 * The station code (refer to Table 1) is shown on the upper left side.

該当する。これらの観測点は、(4) 浜松横川を除いて比較的平坦な位置に設置されている。Fig. 28 (2) に、B タイプの観測点の降水補正なしの体積ひずみ計データ、タンクモデルによる理論降水応答、降水量データを示す。全ての観測点において、降水後に縮み変化も素直に収まっていることが分かる。これらの観測点では、外部からの流入がなく、観測点周辺の散逸の影響だけが大きいと考えられる。なお、(4) 浜松横川では近隣の川が流れているため、A タイプに分類されてもおかしくはないのだが、その川の勾配が急で上流の流域面積も約 5 km² と狭い。川による上流部からの流入があるとしても、時間遅れとして効いてこないと考えれば、B タイプに分類されている説明がつく。

3 つ目の分類（以降、C タイプ）は、1 段目の補正係数に対し 2 段目や 3 段目の補正係数の符号が反転する観測点である。この分類には 3 観測点が該当する。Fig. 28 (3) に、C タイプの観測点における降水補正なしの体積ひずみ計データ、タンクモデルによる理論降水応答、降水量データを示す。これらの観測点のうち、(3) 浜松三ヶ日と (10) 静岡漆山では、降水期間中は縮みの変化だが、降水後にその縮みの

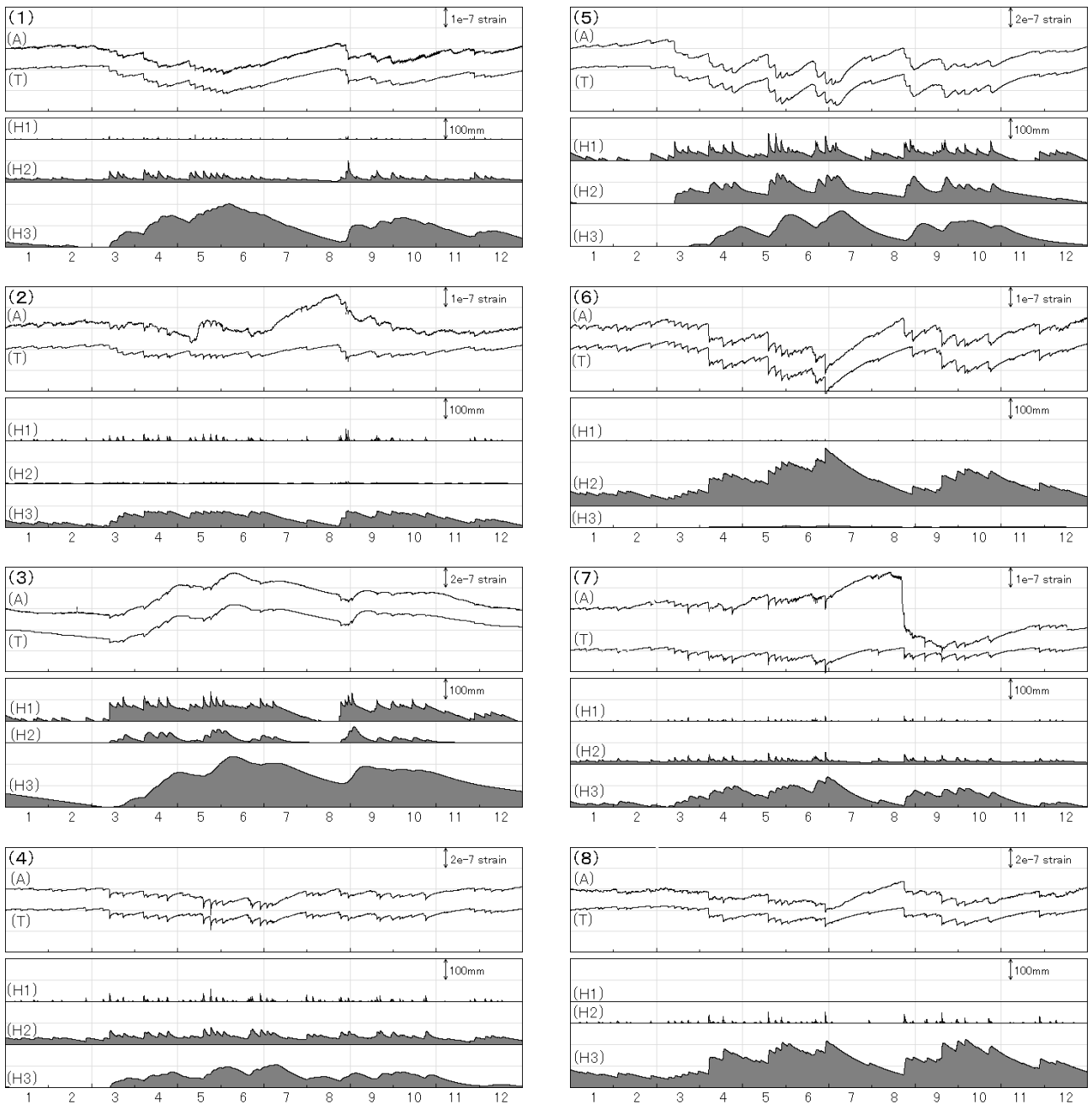


Fig. 29 (1) Data plot of volumetric strainmeter and calculated water level by tank model 18 (station codes 1–8)

(Jan. 1, 2008–Dec. 31, 2008)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(T) Theoretical volumetric strain data by tank model 18

(H1), (H2), (H3) Calculated water level data for each tank by tank model 18

変化を上回る伸びの変化に反転する特徴がある。(3) 浜松三ヶ日は浜名湖に近い位置、(10) 静岡漆山は観測点周辺の勾配が緩やかで、周辺を取り囲むように数百 m 離れた一帯に調整池あさはた(麻機遊水地)が整備されている位置にそれぞれ設置されている。降水が溜

まるような地形の近傍では、降水後に大きな伸びの変化に反転するような物理過程が存在しているのかも知れない。また、(6) 御前崎佐倉では、補正係数の符号が反転している3段目のタンクの水位はほとんど0であり、その他の2つの観測点の特徴である

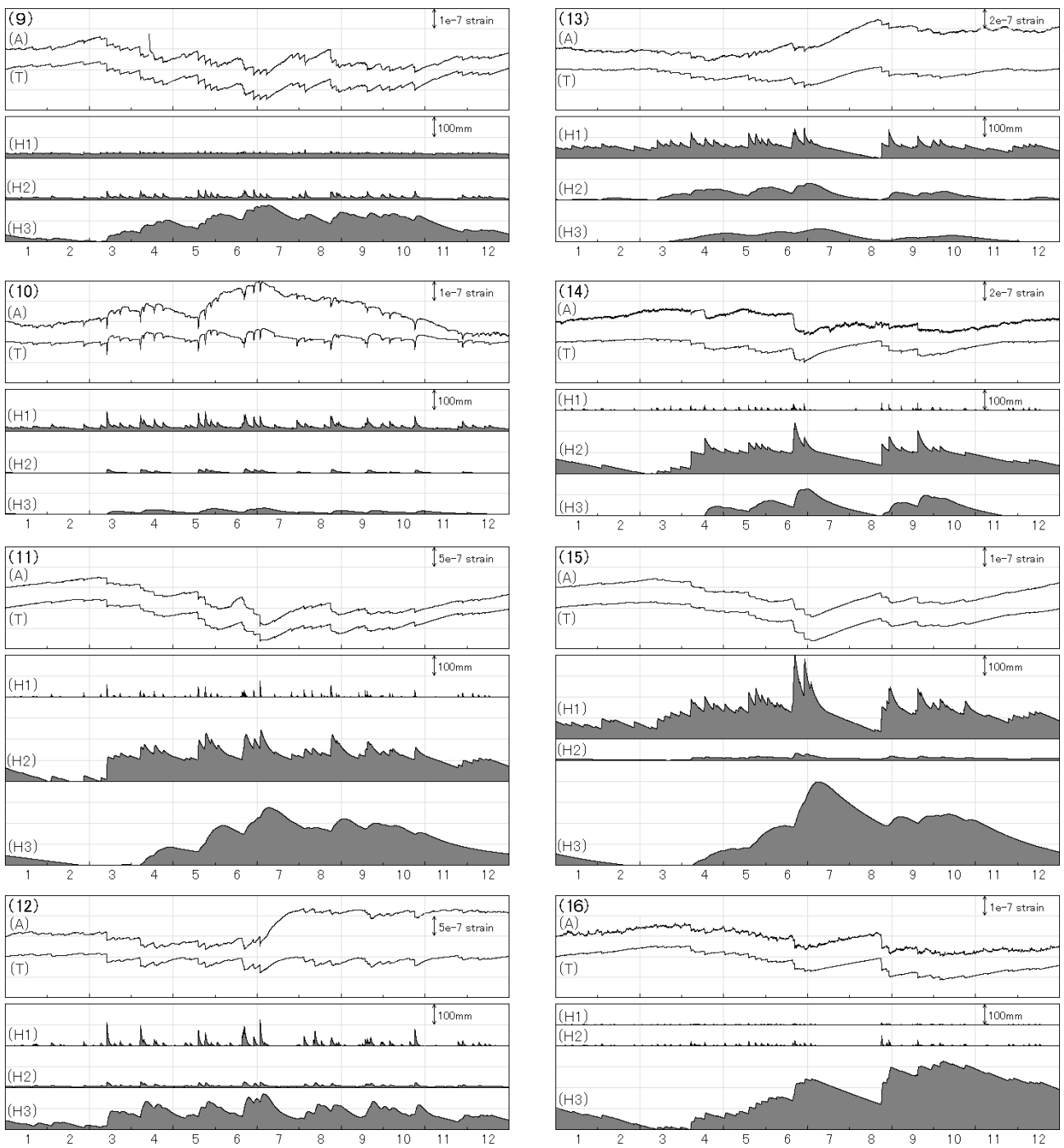


Fig. 29 (2) Data plot of volumetric strainmeter and calculated water level by tank model 18 (station codes 9-16) (Jan. 1, 2008-Dec. 31, 2008)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(T) Theoretical volumetric strain data by tank model 18

(H1), (H2), (H3) Calculated water level data for each tank by tank model 18

降水後の大きな伸びの変化は見られない。2 段目のタンクからの流出過程として、たまたま 3 段目のタンクの補正係数の符号が反転している方が都合良い

と考えられる。

これらの推察をまとめると、タンクモデルによって体積ひずみ計データの降水補正ができていますのは、

体積ひずみ計がその場所に滞留している降水の量を観測できていることのためであり、さらにタンクモデルが地表水やごく表層の地下水が移動する過程を表せているためと考えられる。この移動とは、降水が鉛直方向に浸透する過程だけでなく、流入や流出といった降水が水平方向に移動する過程も含んでいる。特に降水荷重の影響を考える場合には、前者よりも後者の方が効いている。この推察は、何かしらの観測事実に基づいているわけではないが、もしそうであるとすると水文学の分野で考案された様々な流出解析のモデルを用いることによっても、降水による体積ひずみ計データの変化を再現できるかも知れない。逆にそのような流出解析のモデルの検証用としても、体積ひずみ計が貴重な観測データとなる可能性はある。

5.2 降水による長期的な季節変化

本稿の降水補正の最大の目的は、東海地震の前兆すべりの検知力を向上することであり、どちらかと言えば体積ひずみ計データの降水による短期的な変化の補正に主眼を置いている。しかし、これまでに行われてきたタンクモデルによる地殻変動データの降水補正と同じく、Fig. 26 の各観測点における 10 年間の時系列グラフで示すように、大多数の観測点で長期的な季節変化も補正できている。これらの観測点における長期的な季節変化の要因は、タンクモデルによって補正できている以上、降水による影響と考えるのが素直である。Fig. 29 に、東海地域の各観測点における 2008 年の降水補正なしのデータ、タンクモデルによる理論降水応答、各タンクの水位の計算値を示す。大多数の観測点で、降水補正なしのデータとタンクモデルによる理論降水応答が類似していることや、1 段目のタンクの水位の計算値が降水によって鋭い変化をしている一方で、2 段目や 3 段目のタンクの水位の計算値が緩やかに季節変化していることが分かる。各観測点において、長期的な季節変化の傾向を示すタンクの補正係数の符号は、Table 8 (1) で示したように (3) 浜松三ヶ日を除いて全て正であり、降水荷重による影響であると考えられる。(3) 浜松三ヶ日は、前節において C タイプと分類されており、降水期間中は縮みの変化だが、降水後にその縮みの変化を上回る大きな伸びの変化となる観測点である。Fig. 30 に、東海地域の観測点

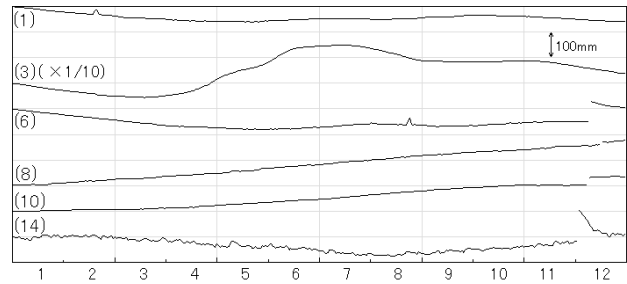


Fig. 30 Data plot of observed water levels
(Jan. 1, 2008–Dec. 31, 2008)

* The station code is shown on the left side of the graph.

のうち、孔内で地下水位を観測している観測点の地下水位データを示す。(3) 浜松三ヶ日の地下水位データは、Fig. 29 の 3 段目のタンクの水位の計算値と類似した傾向が見られる。降水荷重による影響ではないかも知れないが、観測点周辺に降水が溜まったことによる影響であると考えられる。

逆に Fig. 29 において、長期的な季節変化を補正できない観測点の方が特異であるとも言える。そのような例として、(12) 富士鶴無ケ淵の長期的な季節変化が該当する。これは、年によって変化傾向が異なるが 5 月か 6 月頃から伸びの変化が始まり、7 月から 9 月にかけて極大を迎えた後、縮みの変化に転じる。2005 年にはほとんど変化が無いなど、年によって変化傾向が異なることも特徴の 1 つである。この変化の要因を推察してみると、富士山からの融雪が考えられる地理条件と季節にあたる。例えば、石田 (1963) は、富士山麓の三島における地下水位データの変化が、富士山の融雪に関係していることを指摘している。そして、(12) 富士鶴無ケ淵と同じ富士市内にある井戸についても、地下水位の変化傾向が三島と同じ傾向であることを示している。土 (2007) は、富士山の地下水・湧水のメカニズムについて、高所ほど降雨と雪融け水は溶岩層間に浸透しやすく、三島市の小浜池の湧水の水源が富士山南東側の中腹以上であることを指摘している。また、土 (2007) は、1998 年から 2000 年にかけての (12) 富士鶴無ケ淵から 11km 離れた富士宮市の湧玉池の地下水位データを示し、1998 年 8 月下旬の大雨によって異常湧水が発生したことを指摘している。Fig. 31 に、本稿の調査期間外も含む、同時期の (12) 富士鶴無ケ淵の体積ひずみ計の時系列データを示す。特に (C) 降水補正データについては、湧玉池の 3 年間の地下

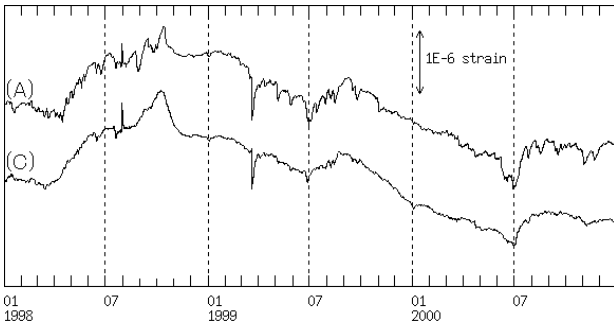


Fig. 31 Data plot of volumetric strainmeter data at station code 12 (Jul. 1, 1998–Dec. 31, 2000)
 (A) Correction for tide and barometric pressure only (no rainfall correction)
 (B) Correction for tide and barometric pressure only (with rainfall correction)
 (C) Rainfall correction by tank model 18

水位データの季節変化と整合的であるだけでなく、土 (2007) が指摘した 1998 年の異常湧水による変化も見られる。(12) 富士鶴無ケ淵の通常の降水による変化は、他の観測点と同様に縮みの変化となることから、観測点周辺の降水は近隣の川や透水性の悪い溶岩の上層の地下の浅いところを流れることによって降水荷重として効いていると考えられる。一方、富士山の中腹以上からの融雪などによる大量の水は、土 (2007) の考察を元にすれば、観測点周辺において地下の深いところを伏流水として流れる。この伏流水によって、体積ひずみ計のセンサー付近の帯水層の含水率が増加すれば、伸びの変化となっても不自然ではない。

このように、大多数の観測点で長期的な季節変化も補正できたことは、体積ひずみ計データの監視をする上でも重要な成果である。8 章で示すが、特に非降水期間の 24 時間階差のバラつきがかなり小さくなったことにより、ノイズレベルの値を下げることに成功し、結果的に東海地震の前兆すべりの検知力が向上した。また、これまでは降水の影響によって検知することができなかった長期的な変化も、降水補正データが直線的となったおかげで検知できるようになったことも極めて重要な成果である。個別の地殻変動現象について詳しくは割愛するが、例えば Fig. 26 の (5) 島田川根では、(c) タンクモデルによる降水補正だけが 2000 年の伊豆諸島北部の地震火山活動による変化を検知することができている。

5.3 降水が散逸したタイミング

タンクモデルにおける降水の流れを、簡単にまと

める。最初に、先行した降水の後に蒸発過程や各流出過程によって、各タンクの水位が徐々に減っていく状態がある。その状態で降水があると、まず 1 段目のタンクの水位が上昇し、それが下段のタンクへ時間遅れで移動しながらこれらのタンクの水位も上昇する。その後、再びいずれかのタンクの蒸発過程や各流出過程によって、各タンクの水位が徐々に減っていく。ここで、降水がどの過程から散逸したかについては、各過程を厳密に分離することが難しいため物理的な意味を考えにくい。降水がどのタイミングで散逸したかについては、多少なりとも物理的意味が見出せる可能性がある。そこで、本稿で提案したタンクモデルにおける降水が散逸したタイミングの特徴について調査するため、気象庁の土壤雨量指数にも用いられているタンクモデル Q との比較を試みた。降水量データは、4 章での調査と同じく観測点ごとに 3.3 節で示したものをを用いる。なお、本稿では各タンクの補正係数を変えているが、例えば 2 段目のタンクの補正係数が 1 段目の半分になる観測点では、1 段目から 2 段目のタンクへ下方流出する際に、半分の降水がタンクの外へ流出したと考えることもできる。したがって、このような場合は本来 1 段目と 2 段目のタンクの水位の重みが異なるが、5.1 節でタイプ C と分類した観測点のように下段のタンクの補正係数の符号が上段に対して反転するような場合、このような重み付けを考慮することができない。そのため、補正係数の絶対値や符号は敢えて無視して、散逸量だけに着目する。

降水が散逸したタイミングの分類については、Fig. 32 のように、24 時間積算降水量と 72 時間積算降水量の関係を元に設定する。24 時間積算降水量が 50mm 以上の期間を「⑦大雨」、72 時間積算降水量が 50mm 以上だが 24 時間積算降水量は 50mm 未満となった期間を「⑥大雨の後」と分類し、以下雨、少雨についても 10mm, 0.5mm を閾値として同様に分類する。最後に、72 時間積算降水量が 0mm の期間を「①降水なし」と分類する。なお、24 時間積算降水量が 72 時間積算降水量を上回ることはないので、Fig. 32 の灰色で示す分類は生じない。調査期間は、4 章と同じく 2000 年から 2009 年の 10 年間とする。

比較に用いたタンクモデル Q のパラメータの値を、Table 9 に示す。この気象庁の土壤雨量指数でも用い

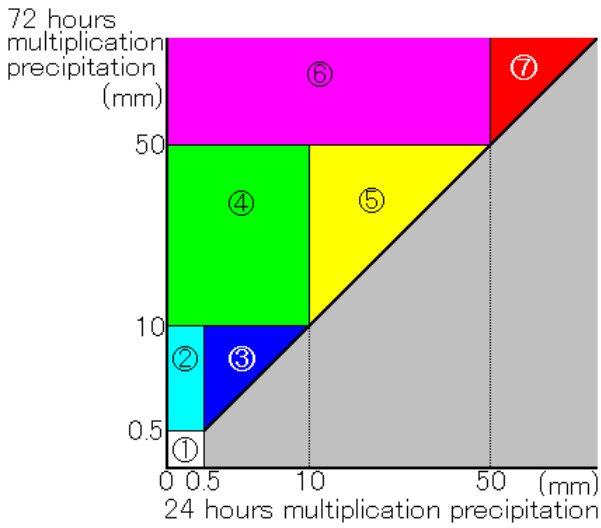


Fig. 32 Classification of lost time of rainfall
 (1) Period of no rainfall
 (2) Period after little rainfall
 (3) Period of little rainfall
 (4) Period after rainfall
 (5) Period of rainfall
 (6) Period after hard rainfall
 (7) Period of hard rainfall

Table 9 Values of the parameter of the tank model by Ishihara and Kobatake (1979) (refer to Fig. 10 (q))

Downward outflow coefficient (%/hour)		α_1	12
		α_2	5
		α_3	1
Flank outflow	Height (mm)	R_{11}	15
		R_{12}	60
		R_2	15
		R_3	15
	Coefficient (%/hour)	β_{11}	10
		β_{12}	15
		β_2	5
		β_3	1

られているタンクモデルQのパラメータの値を全ての観測点で用いた場合、降水が散逸したタイミングの比率を Fig. 33 (Q) に示す。山間部に位置しているため最も降水量が多い(5) 島田川根で「⑦大雨」や「⑥大雨の後」における散逸量が多いなど、用いた降水量データが各観測点で異なるため多少の差はあるものの、用いたタンクモデルのパラメータの値

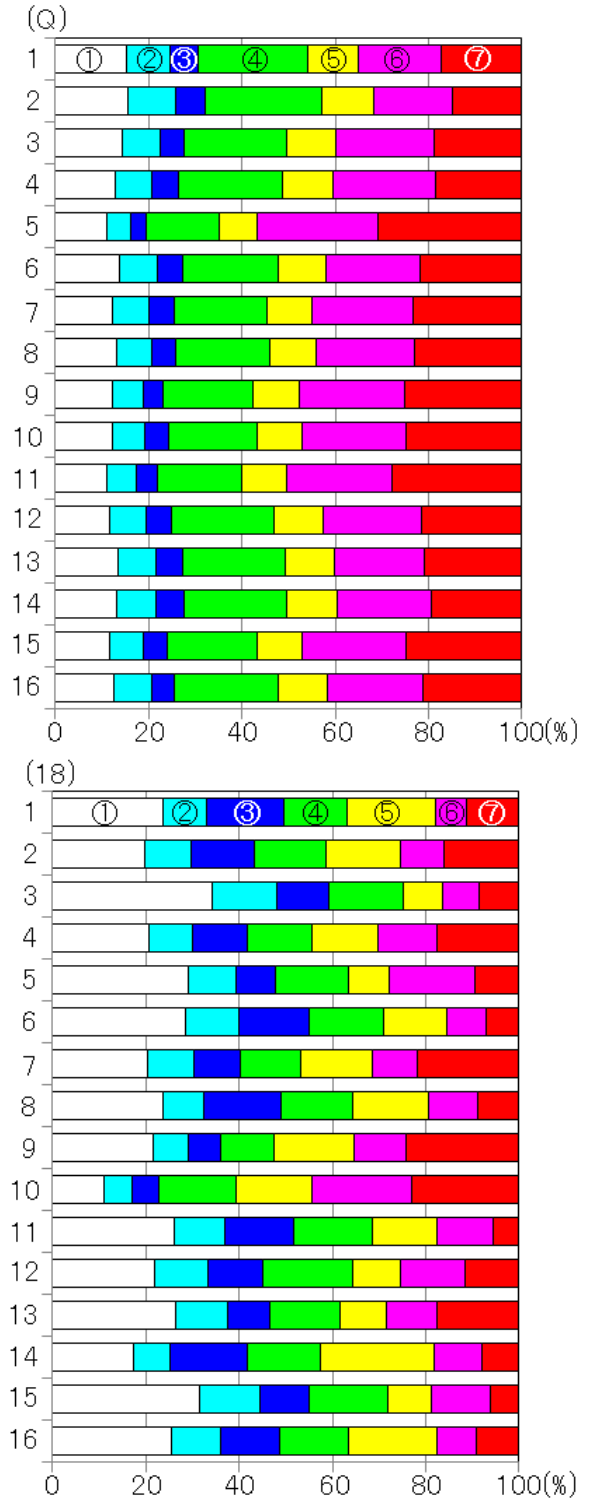


Fig. 33 Ratio of lost time of rainfall
 (Q) Tank model by Ishihara and Kobatake (1979)
 (18) Tank model 18
 * The classification is in reference to Fig. 32.
 * The station code is shown on the left side of the bar graph.

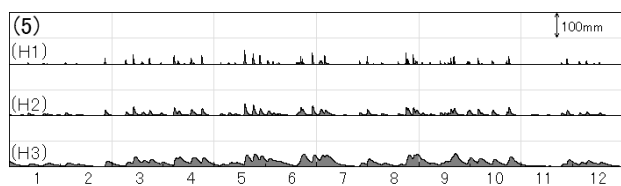


Fig. 34 Data plot of calculated water level of tank model by Ishihara and Kobatake (1979) at station code 5
(Jan. 1, 2008–Dec. 31, 2008)

は共通であるため、どの観測点でも同じような傾向を示す。例えば、「⑤雨」と「④雨の後」、「⑦大雨」と「⑥大雨の後」との比率について着目してみると、大雨の際ほど降水後よりも降水期間中の散逸量が多いことが特徴として挙げられる。これは、タンクモデル Q 及び Table 9 は、側面流出過程の影響が強いためであると考えられる。

次に、本稿で提案したタンクモデル 18 について、観測点ごとに Table 8 に示すパラメータの値を用いた場合、降水が散逸したタイミングの比率を Fig. 33 (18) に示す。降水量データだけでなく、用いたパラメータの値も観測点で異なるため、各観測点で傾向が全く異なる。但し、Fig. 33 (Q) と比べると共通している特徴を幾つか見出すことができる。まずは、概ねどの観測点にでも「①降水なし」における散逸量が多いことが挙げられる。これはタンクモデル 18 に蒸発過程や土壌水分構造が導入されていることや、Table 8 における下方流出係数の α_2 や α_3 が Table 9 に比べて小さい影響であると考えられる。タンクモデル 18 では、これら降水後直ちに散逸しにくい特徴によって、Fig. 29 の 2 段目や 3 段目のタンクに見られるような、体積ひずみ計とも対応した緩やかなタンクの水位の計算値の季節変化を表わしている。また、「⑥大雨の後」や「⑦大雨」における散逸量が少ないことも挙げられる。なお、Fig. 34 に、東海地域の 16 の観測点のうち最も降水量の多い(5) 島田川根の降水量データとタンクモデル Q を用いた場合の、各タンクの水位の計算値を示す。Fig. 29 と Fig. 34 を比較することによって、タンクモデル 18 だけでなくタンクモデル Q 及び Table 9 の特徴も明らかになる。Fig. 34 には、Fig. 29 の 2 段目や 3 段目のタンクに見られた緩やかなタンクの水位の計算値の季節変化を表わすことができていない。つまり、タンクモデル Q 及び Table 9 は側面流出過程の影響

が強すぎるため、土壤に滞留している降水を過小評価している恐れがある。但し、タンクモデル Q は、Ishihara and Kobatake (1979) によって調査されたタンクモデルのうち、土砂災害のリスクを念頭に花崗岩の多い地域を対象としたものである。主に平地に設置されていることが多い気象庁の体積ひずみ計の降水補正量が、その場所に滞留する水の量を反映していたとしても、土砂災害のリスクを見積もるのに適しているかについては十分な吟味が必要となるだろうが、このような検証を行うためにも体積ひずみ計が貴重な観測データとなる可能性はある。

また、Fig. 33 (18) において各観測点で異なる特徴について着目してみると、例えば「⑦大雨」を基準とした「⑥大雨の後」の散逸量の比率が大きい観測点として、(5) 島田川根、(11) 静岡但沼、(15) 東伊豆奈良本が挙げられる。いずれの観測点も、「⑦大雨」における散逸量が少ないという特徴も兼ね備えている。これらの観測点は、5-1 節で分類したタイプ A に属し、近隣の川や地下水などによる時間遅れの流入があることが考えられる。「⑦大雨」における散逸量が少ないという特徴は、このような時間遅れの流入の影響が大きいと考えれば整合的である。逆に「⑦大雨」を基準とした「⑥大雨の後」の散逸量の比率が小さい観測点として、(1) 田原福江、(7) 牧之原坂部、(9) 藤枝花倉が挙げられる。これらの観測点は、5.1 節で分類したタイプ B に属し、比較的平坦な地形に位置している観測点である。これらの観測点の特徴は、時間遅れの流入の影響が無いため降水期間中に多くの降水が流出してしまい、降水後に流出する降水がほとんど残っていないと考えれば整合的である。このように、降水が散逸するタイミングからも、5.1 節と同様に観測点の特徴を見出すことができる。

6 AR モデルとタンクモデルによる降水補正の比較

6.1 降水応答の非線形性について

この章では、冒頭から幾度となく指摘してきた、これまでの降水補正によって降水後に生じている緩和的な変化の原因について説明する。気象庁でこれまでの降水補正に用いられてきた松本・高橋 (1993) 及び石垣 (1995) による AR モデルの式は、以下の

とおりである.

$$R_n = \sum_{i=1}^m c_i R_{n-i} + \sum_{i=0}^{m-1} d_i r_{n-i} \quad (37)$$

ここで、 R_n と r_n は時刻 n における補正值及び降水量、 m は次数、 c_i 及び d_i は自己回帰係数及び降水量補正係数である。前項はそれまでの降水補正係数の履歴を参照にして効く項であり、後項はそれまでの降水量の履歴を参照にして効く項である。後項だけであれば完全に線形的な降水応答となるが、次数以降も補正值自身が徐々に減衰していく前項の効果によって、非線形的な降水応答をある程度導入できている。しかし、大雨の場合や降水応答の非線形性が強い観測点の場合には、AR モデルを適用することが難しくなる。石垣 (1995) は AR モデルによる降水補正が完全でない観測点があることについて、大雨の際には降水応答が線形的にならない可能性を指摘している。松本・高橋 (1993) もまた、降水に対する水位の応答が異なる場合があることを指摘しており、例として 1983 年 8 月の集中豪雨の期間での補正後の水位の急増を挙げている。

一方、本稿で提案したタンクモデルでは、流出過程や土壌水分構造、蒸発過程、時間遅れの効果といった概念を導入することや、3 段のタンクの補正係数を変えることによって、降水応答の非線形性が強い場合でもある程度適用することが可能である。しかし、4.1 節で紹介したように、降水応答の非線形性を表せない 1 段のバケツモデル G による降水補正でも、降水後に緩和的な変化が生じていない。単純な 1 段のバケツモデル G に比べて、非線形的な降水応答をある程度導入できている AR モデルの方が、降水後についても良い降水補正となるはずである。松本・高橋 (1993) によると、式 (37) は降水直後に大きく変化し、さらにある時間以降にはゆっくりと減衰する地下水水位に対する降水の応答を表わせる。AR モデルによる降水補正によって、降水後に緩和的な変化が生じさせないことも十分実現可能であり、松本・高橋 (1993) の調査でも降水後に緩和的な変化が生じていない。AR モデルは、本稿で提案したタンクモデルに比べて降水応答の非線形性を表しづらいという問題はあつたものの、それはこれまでの降

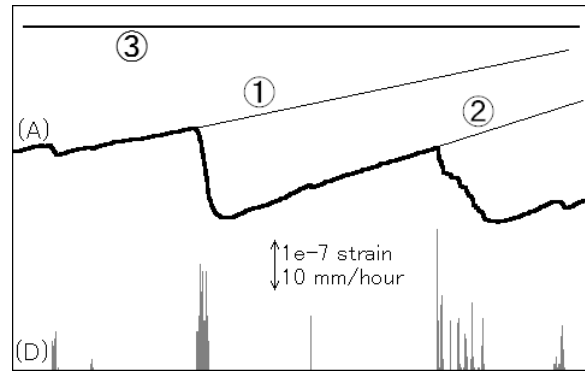


Fig. 35 Data plot of volumetric strainmeter and precipitation at station code 5 (4) (May 15–June 15, 2007)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(D) Precipitation data

* ① and ② are the ideal correction data when the quantity of correction is 0 before rainfall. However, ② cannot result from ①.

Therefore, ③ is the ideal correction data.

水補正によって降水後に生じている緩和的な変化の原因ではない。

6.2 降水直前の補正量の考え方

地殻変動データの降水補正に AR モデルを用いた松本・高橋 (1993) と石垣 (1995) の調査には、大きな違いがある。松本・高橋 (1993) による調査では、降水直前の補正量が 0 になっていない。一方、石垣 (1995) による調査では、降水補正パラメータの算出に際し、時間値レベルの議論では高々数日程度の降水の影響を対象としていると述べており、長期的な変化をトレンドとしてフィルター処理で除去した上で、AR モデルを適用している。その結果、(15) 東伊豆奈良本を除いて降水直前の補正量がほとんど 0 に収束してしまっている。

ここで、Fig. 35 の降水補正なしのデータに対して、降水補正を行うことを考えてみる。Fig. 35 に示す期間に、比較的まとまった降水は 2 回あつたが、それぞれの降水直前の補正量を 0 とした場合、それぞれ ① や ② のような直線で推移していくのが理想的な降水補正である。しかし、① の直線で推移していく限り、② の直線に移行することはあり得ない。降水直前の補正量が 0 に収束しがちなこれまでの降水補正では、Fig. 4 (1) で示すように ① と ② を緩和的に繋

ぐような中途半端な推移となってしまう。これが、これまでの降水補正によって降水後に生じている緩和的な変化の正体である。一方、降水直前の補正量を 0 としない場合、いずれの降水に対しても、③のような直線で推移していくのが理想である。そして、それは決して不可能ではない。本稿のタンクモデルでは、いずれの観測点においても補正量が完全に 0 となることはほとんど無く、Fig. 4 (1) で示すように直線に近い降水補正が実現できている。また、降水直前の補正量が 0 になっていない松本・高橋 (1993) の調査でも、比較的直線に近い降水補正が実現できている。

これまでの降水補正にはこのような問題があったものの、急激に大きくなる変化さえ検知できれば良いという目的で体積ひずみ計データを監視していれば、石垣 (1995) が行った長期的な変化をトレンドとしてフィルター処理で除去する方法は妥当で、降水後に生じてしまう緩和的な変化も問題とはならなかったはずである。なお、AR モデルによる降水補正のしくみは、(1) 田原福江における観測点の直近で揚水を行っている影響を補正するためにも用いられており (松島・他, 2008)、特に線形的な応答をする変化に対しては有効であることが確認されている。

7 ノイズレベルの定義の再検討

7.1 これまでの単独観測点のノイズレベルの定義の問題点

前半部の 2 章から 6 章では、体積ひずみ計データのタンクモデルによる降水補正について説明してきた。この降水補正データを東海地震の前兆すべりの監視業務に用いるには、監視の基準となる閾値 (ノイズレベル) の調査が必要となる。但し、この節で紹介するように、降水期間についてはこれまでの単独観測点のノイズレベルの定義に問題があることなどから、本稿ではノイズレベルの定義の見直しについて後半部の 7 章及び 8 章で説明する。

現在、気象庁で行っている東海地震の前兆すべりの監視業務では、地殻変動データの幾つかの時間階差をリアルタイムで監視し、有意な変化であると判定する閾値を超えた観測点が複数に達した場合などに東海地震に関する各種の情報発表を行う。その有意な変化と判定する閾値の基準となるのがノイズレ

ベルの値であり、これまでのノイズレベルの定義は小林・松森 (1999) によるものであった。そのうち、単独観測点のノイズレベルの定義を大まかにいうと、調査期間 (1 年半) に 1 回程度の大きさの変化であれば検知すべき対象として閾値を超えることを許容し、その次の大きさの変化を通常のノイズとして超えない程度の閾値をノイズレベルとして設定するものである。このノイズレベルの見直しによって、これまで全観測点で一律だった有意な変化と判定する閾値が各観測点のノイズの状況に合わせてより小さな幅で設定できるようになり、東海地震の前兆すべりの検知力が大幅に向上した。

小林・松森 (1999) によるノイズレベルの値の調査方法について説明する。まず、非降水期間の時間階差のバラつきが正負同程度になるようにトレンド係数を定める。そして、非降水期間のノイズレベルの値を定義に基づいて求めるが、絶対値であるため数は 1 つである。次に降水期間のノイズレベルの値についても定義に基づいて求めるが、非降水期間と同じトレンド係数を用いるため、時間階差のバラつきが負の方に大きく偏り非対称である。そこで、ノイズレベルの値を正と負でそれぞれ別に求めるため、数は 2 つである。結果的に、監視する 1 つの時間階差につき、ノイズレベルの値を計 3 つ持つことになる。正のノイズレベルの値を N_+ 、負のノイズレベルの値を N_- とすると、以下の式のようになる。

$$\begin{aligned} N_+ &= N_n && \left(\sum_{n=0}^{K-1} R_n \leq C \right) \\ &= P_1 && \left(\sum_{n=0}^{K-1} R_n > C \right) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} N_- &= -N_n && \left(\sum_{n=0}^{K-1} R_n \leq C \right) \\ &= M_1 && \left(\sum_{n=0}^{K-1} R_n > C \right) \end{aligned} \quad (39)$$

ここで、 N_n は非降水期間のノイズレベルの値 (絶対値) で、 P_1 と M_1 は降水期間の正と負のノイズレベルの値 (P_1 の符号はプラス、 M_1 の符号はマイナス) である。降水期間と非降水期間の判定するために必要なパラメータが降水判定閾値 C と降水積算時間 K

Table 10 Old noise level values

Station code	K (hour) (*1)	C (mm) (*2)	Noise level of no rainfall correction (strain/24hour)			Noise level of the old rainfall correction (strain/24hour)		
			Period of no rainfall (N_n)	Period of rainfall		Period of no rainfall (N_n)	Period of rainfall	
				+ (P_1)	- (M_1)		+ (P_1)	- (M_1)
1	39	5	$\pm 2.7\text{e-}8$	$+ 2.5\text{e-}8$	$- 5.5\text{e-}8$	$\pm 1.1\text{E-}8$	$+ 8.3\text{E-}9$	$- 1.6\text{E-}8$
2	45	1	$\pm 2.5\text{E-}8$	$+ 3.0\text{E-}8$	$- 5.0\text{E-}8$	$\pm 2.2\text{E-}8$	$+ 1.9\text{E-}8$	$- 2.6\text{E-}8$
3	48	5	$\pm 3.1\text{E-}8$	$+ 3.2\text{E-}8$	$- 4.3\text{E-}8$	$\pm 3.4\text{E-}8$	$+ 3.4\text{E-}8$	$- 2.9\text{E-}8$
4	42	1	$\pm 2.4\text{E-}8$	$+ 9.0\text{E-}8$	$- 1.3\text{E-}7$	$\pm 2.0\text{E-}8$	$+ 3.4\text{E-}8$	$- 4.4\text{E-}8$
5	42	1	$\pm 3.0\text{E-}8$	$+ 3.0\text{E-}8$	$- 2.0\text{E-}7$	$\pm 3.1\text{E-}8$	$+ 1.6\text{E-}8$	$- 7.4\text{E-}8$
6	48	3	$\pm 2.0\text{E-}8$	$+ 1.6\text{E-}8$	$- 8.0\text{E-}8$	$\pm 1.8\text{E-}8$	$+ 1.1\text{E-}8$	$- 3.5\text{E-}8$
7	45	1	$\pm 1.5\text{E-}8$	$+ 5.7\text{E-}8$	$- 7.7\text{E-}8$	$\pm 1.3\text{E-}8$	$+ 2.3\text{E-}8$	$- 2.6\text{E-}8$
8	36	3	$\pm 4.3\text{E-}8$	$+ 4.3\text{E-}8$	$- 9.0\text{E-}8$	$\pm 2.6\text{E-}8$	$+ 2.1\text{E-}8$	$- 4.6\text{E-}8$
9	42	1	$\pm 9.0\text{E-}9$	$+ 2.0\text{E-}8$	$- 7.4\text{E-}8$	$\pm 2.1\text{E-}8$	$+ 1.3\text{E-}8$	$- 2.4\text{E-}8$
10	48	5	$\pm 2.0\text{E-}8$	$+ 6.0\text{E-}8$	$- 7.0\text{E-}8$	$\pm 1.5\text{E-}8$	$+ 2.1\text{E-}8$	$- 3.3\text{E-}8$
11	48	0.5	$\pm 2.3\text{E-}8$	$+ 5.0\text{E-}8$	$- 2.1\text{E-}7$	$\pm 5.0\text{E-}8$	$+ 4.8\text{E-}8$	$- 1.4\text{E-}7$
12	42	1	$\pm 5.0\text{E-}8$	$+ 5.0\text{E-}8$	$- 1.8\text{E-}7$	$\pm 5.8\text{E-}8$	$+ 6.8\text{E-}8$	$- 1.2\text{E-}7$
13	48	5	$\pm 2.6\text{E-}8$	$+ 2.7\text{E-}8$	$- 7.0\text{E-}8$	$\pm 1.9\text{E-}8$	$+ 1.9\text{E-}8$	$- 2.5\text{E-}8$
14	33	1	$\pm 4.8\text{E-}8$	$+ 4.5\text{E-}8$	$- 1.0\text{E-}7$	$\pm 4.3\text{E-}8$	$+ 4.1\text{E-}8$	$- 4.6\text{E-}8$
15	42	1	$\pm 2.4\text{E-}8$	$+ 2.4\text{E-}8$	$- 1.2\text{E-}7$	$\pm 2.2\text{E-}8$	$+ 1.2\text{E-}8$	$- 1.1\text{E-}7$
16	45	5	$\pm 3.0\text{E-}8$	$+ 4.0\text{E-}8$	$- 1.1\text{E-}7$	$\pm 2.6\text{E-}8$	$+ 2.3\text{E-}8$	$- 3.1\text{E-}8$
17	48	1	$\pm 3.0\text{E-}8$	$+ 6.0\text{E-}8$	$- 1.0\text{E-}7$			
19	48	1	$\pm 4.9\text{E-}8$	$+ 6.0\text{E-}8$	$- 1.8\text{E-}7$			

*1 K is the threshold for rainfall period judgment.

*2 C is the time of precipitation accumulation.

で、時刻 n の降水量データ R_n を降水積算時間 K だけ積算した降水量が、降水判定閾値 C を超えている場合には降水期間と判定する。

Table 10 に、これまで気象庁で監視に用いていた東海地域の体積ひずみ計データのうち、24 時間階差に関するノイズレベルや降水判定に関するパラメータの値を示す。降水積算時間と降水判定閾値については、これまでの降水補正データも降水補正なしのデータと共通の値を用いていた。Table 10 の同じ観測点のノイズレベルの値を比較すると、全体的にこれまでの降水補正データの方が、降水補正なしのデータに比べてノイズレベルの値の幅が小さい。このように、石垣 (1995) による降水補正を監視業務に導入したことによって、東海地震の前兆すべりの検知力は向上したことが分かる。但し、(9) 藤枝花倉など一部の観測点では、これまでの降水補正データ

の方が、降水補正なしのデータに比べて非降水期間のノイズレベルの値の幅が大きい。これまでの降水補正によって降水後に生じる緩和的な変化による影響も含まれるかも知れないが、同じ観測点であってもノイズレベルの値の調査を行った期間が異なる影響も含まれるため、単純に比較できないことに注意が必要である。なお、7 章及び 8 章では、Table 10 のように南関東地域のうち火山監視のために重要な (17) 湯河原鍛冶屋及び (19) 大島津倍付についても記載するが、これまでの降水補正の欄に記載が無いのは AR モデルによる降水補正が行われていなかったためである。

ノイズレベルの定義を分かりやすくした図として、Fig. 36 に (5) 島田川根における体積ひずみ計データの 24 時間階差、ノイズレベルの値、降水量データ及び 42 時間積算降水量を示す。なお同じ期間の体積

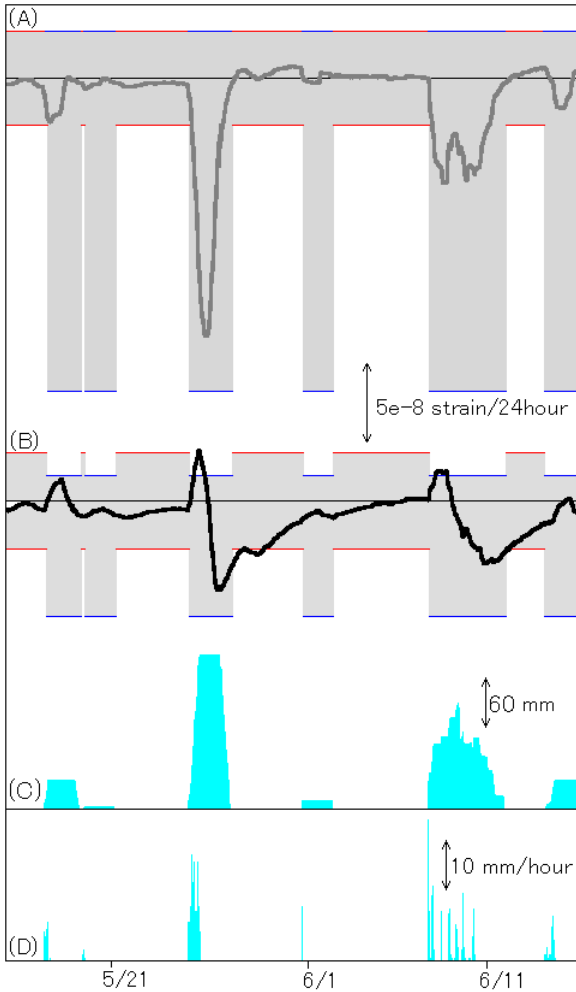


Fig. 36 Data plot of the difference over 24 hours in the volumetric strainmeter data and precipitation at station code 5 (May 15–June 15, 2007)

- (A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
- (B) Volumetric strainmeter data with old rainfall correction
- (C) 42 hours of cumulative precipitation data
- (D) Precipitation data
- * The red line indicates the old noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the old noise level during the period of rainfall.
- * The gray area shows that data does not exceed the noise level.
- * Whether the period is of no rainfall or during rainfall is judged by the 42-hour cumulative precipitation (more than 1 mm).

ひずみ計のデータは、Fig. 4 (1) に示している。このうち、降水補正なしに着目すると、非降水期間では 24 時間階差が概ねトレンド付近となるが、降水期

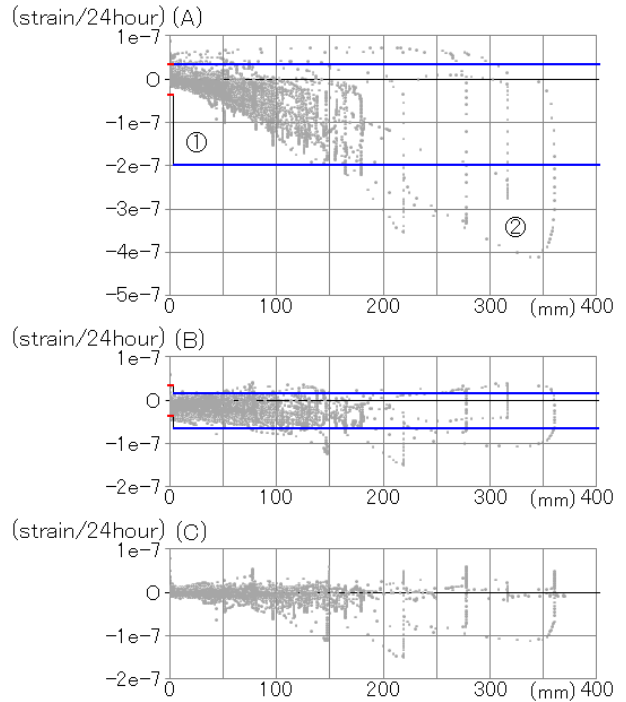


Fig. 37 Relationship between the 42 hours of cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data at station code 5 (1) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

- (A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).
- (B) Volumetric strainmeter data with old rainfall correction
- (C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18
- * The red line indicates the old noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the old noise level during the period of rainfall.
- * The old noise level of ① is too large.
- * ② certainly exceeds the old noise level.

間になると 24 時間階差は下に凸となる。これは、降水によって体積ひずみデータが縮みの変化となった影響で、ノイズレベルの値も 42 時間積算降水量に応じて非降水期間の小さい幅 (Fig. 36 の赤線) から、降水期間の大きな幅 (Fig. 36 の青線) に切り替わる。Fig. 36 で示す期間にはノイズレベルの値を超える変化はない。また、これまでの降水補正に着目すると、降水期間のノイズレベルの値は降水補正なしに比べて小さな幅 (Fig. 36 の青線) であるものの、降水後に生じる緩和的な変化によってノイズレベルの値を何回か超えてしまっている。

ノイズレベルの定義を別の視点から分かりやすく

した図として、Fig. 37に(5)島田川根における42時間積算降水量に対する24時間階差の分布図を示す。この図は降水の状況による24時間階差のバラつき具合を示すもので、図の左端は降水なし、図の右側になればなるほど積算降水量が多い大雨であることを示す。特に降水補正なしでは、大雨になればなるほど24時間階差が負の方向に大きくバラつく傾向が顕著である。なお、Fig. 37(A)及び(B)の降水補正なしとこれまでの降水補正には、Table 10のノイズレベルの値も青線及び赤線で示す。(5)島田川根では、42時間積算降水量がわずかに1mmに達した段階で降水期間と判定され、ノイズレベルの値も非降水期間の幅(Fig. 37の赤線)から、降水期間の大きな幅(Fig. 37の青線)に切り替わる。この図から、降水期間については単独観測点のノイズレベルの定義に2つの問題点があることが一目瞭然である。1つ目の問題点は、少々の雨の場合にはノイズレベルの値が過剰なほど大きな幅となっていることである(Fig. 37の①)。2つ目の問題点は、ある程度の大雨の場合に必ずと言っていいほど負のノイズレベルの値を超えることである(Fig. 37の②)。これまでの単独観測点のノイズレベルの定義に基づけば、降水期間であっても正負それぞれ調査期間に1回程度の大きさの変化であれば検知すべき対象として許容されるため、降水期間のノイズレベルの値はその調査期間における2番目の大雨の積算降水量によって決まる。つまり、降水期間のノイズレベルの値を超えたという状況は、単に調査期間における2番目の大雨の積算降水量を上回ったことを意味するだけであって、地殻変動現象の検知には役立っていない。実際、(5)島田川根では42時間積算降水量が160mm以上になると、必ず負のノイズレベルの値を超えてしまう。また、これまでの降水補正でもFig. 37(B)で示すように、大雨になればなるほど24時間階差が負の方向に大きくバラつく傾向は降水補正なしに比べて改善されてはいるものの、多少残っている。さらに、Fig. 37(C)で示すように、本稿のタンクモデルによる降水補正でも、大雨になればなるほど24時間階差が正負両方に大きくバラつく傾向が見られる。降水補正をいくら改善してもこれらの問題を解消することはできず、降水期間のノイズレベルの定義の見直しは必須である。

Table 11 (T) True events in crustal deformation

Station code	(T) True event
1, 2	Short-term SSE at Mie or Aichi
15, 16	Seismic Activity off East Coast of Izu-peninsula
17	Seismic Activity at Mt. Hakone
19	Seismic Activity at Izu-Oshima

* These events should be detected.

7.2 これまでの単独観測点のノイズレベルの定義の事後検証

前節では降水期間のノイズレベルの定義の見直しが必要であることを指摘したが、具体的にどのように見直すかを考えるためには、ノイズレベルの定義の事後検証が必要である。竹中・他(2001)は東海地震の前兆すべりの監視業務において有意な変化と判定する閾値を超えた事例を、観測点ごとに取りまとめた。但し、その有意な変化と判定する閾値は、ノイズレベルの値を基準としているものの、両者は異なる値である。また、小林・松森(1999)のノイズレベルの定義そのものについて、これまで事後検証が行われたことはない。小林・松森(1999)の調査も、これまで行われてきた地殻変動データのタンクモデルによる降水補正の調査と同様、現在のようないままでの計算機環境で行われたものではなかった。その当時と現在を比べると、歴代担当の努力によって調査環境が格段に整っている。この節では、これまでの単独観測点のノイズレベルの定義の事後検証を行うこととする。

事後検証の方法としては、検知すべき対象として24時間階差のノイズレベルの値を超えた事例の回数と原因を観測点ごとに調べた。原因については、(T) 真の地殻変動現象、(T) 固有変化、(R) 降水、(O) その他の4つの分類とした。このうち、(T) 真の地殻変動現象とは、短期的スロースリップイベントや伊豆半島東方沖の地震活動などによる変化で、具体的な事例をTable 11に示す。なお、これまでのノイズレベルの定義において、(T) 真の地殻変動現象は検知すべき対象としてノイズレベルの値を超えることを特別に許容する。また、(P) 固有変化とは各観測点で良く見られる変化で、具体的な事例をTable 12に示す。なお、これまでノイズレベルの定

Table 12 (P) Peculiar changes in each volumetric strainmeter

Station code	Subject of the noise level	Peculiar change
2	Exclusion (※1)	Irregular extension at period of rainfall
3	Exclusion (※1)	Pumping of the neighborhood
	Exclusion (※1)	Step or mitigative change
7	Exclusion (※1)	Step or mitigative change
8	Inclusion (※2)	Extension every 6 days
10	Exclusion (※1)	Extension of about May
12	Exclusion (※1)	Extension of about May or June.
		Compression of about Summer or Autumn.
14	Inclusion (※2)	Pumping of the neighborhood
	Exclusion (※1)	Step
16	Inclusion (※2)	Pumping of the neighborhood
	Exclusion (※1)	Step

*1 Rare peculiar changes should be detected.

*2 Frequent peculiar changes are assumed to be normal noise.

義では、頻度が少ない固有変化は検知すべき対象としてノイズレベルの値を超えることを特別に許容するが、頻繁にある固有変化は通常のノイズと見なす。このことによって、前者に引きずられてノイズレベルの値の幅を大きくし過ぎないようにするとともに、後者によってノイズレベルの値を超える回数が増え過ぎないようにしている。頻度が少ない固有変化と頻繁にある固有変化の区別についても Table 13 に示している。これまでのノイズレベルの定義において、(R) 降水や (O) その他は通常のノイズと見なす。調査期間は降水補正の調査と同じ 2000 年から 2009 年の 10 年間である。但し、1990 年代に移設更新を行った (3) 浜松三ヶ日及び (7) 牧之原坂部については、2000 年代初頭のノイズが極端に大きいため、調査期間を数年間短縮している。また、この調査にあたり、機器障害 (雨量計の障害も含む)、体積ひずみ計のバルブオープン、保守点検、地震に伴うコサイスミックな変化、地震後の急激な余効変動については、調査期間から除外している。さらに、(1) 田原福江では観測点の直近で揚水が行われている影響を補正している (松島・他, 2008) もの、頻繁にその補正残差でノイズレベルの値を超えてしまうため、調査期間から除外している。なお、ノイズレベルの値を超えた日が連続している場合には 1 つの事例として数え、途中に 1 日空いた場合にはそれぞれ

別の事例として数えることとする。

Table 13 に事後検証を行った結果を示す。このうち、降水補正なしの結果に着目すると、東海地域の 16 の観測点で 10 年間にノイズレベルの値を超えた事例の回数は、全観測点で合計すると約 500 回であった。これまでのノイズレベルの定義を踏まえると、16 の観測点で 10 年間に約 300 回はノイズレベルの値を超えることが許容されるが、それに比べると 2 倍近く多い。そのうち、まず検知すべき (T) 真の地殻変動現象については、東海地域の全観測点で合計してもわずか 18 回で全体の約 4% 程度に過ぎなかった。小林・松森 (1999) によるノイズレベルの値の調査が行われた当時は、東海地域の短期的スロースリップイベント (小林・他, 2006) がまだ発見されていなかったため、この結果はある程度やむを得ないと考えられる。なお、伊豆半島東方沖の地震活動については大半の事例を検知できていることから、東海地域の短期的スロースリップイベントが真の地殻変動現象として認識されていれば、もう少し (T) 真の地殻変動現象を検知できた回数は多かったと考えられる。次に (R) 降水については、東海地域の全観測点で合計すると約 350 回で全体の約 7 割を占め、際立って多かった。これまでのノイズレベルの定義を踏まえると、もし降水期間にノイズレベルの値を超えた事例が全て降水によるものならば、16 の

Table 13 Old noise level investigation results

Station code	No rainfall correction					The old rainfall correction				
	Mean of noise level (N_{MEAN})	Number of times over noise level				Mean of noise level (N_{MEAN})	Number of times over noise level			
		(T) True (*1)	(P) Peculiar (*2)	(R) Rainfall	(O) Other		(T) True (*1)	(P) Peculiar (*2)	(R) Rainfall	(O) Other
1	3.031e-8	0	(*3) 0	4	0	1.129e-8	4	(*3) 0	13	2
2	3.120e-8	8	1	6	0	2.221e-8	15	1	23	0
3 (*4)	3.306e-8	0	29	18	0	3.321e-8	0	26	2	0
4	6.000e-8	0	0	16	1	2.795e-8	0	0	15	1
5	6.664e-8	0	0	17	0	3.704e-8	0	0	80	0
6	3.046e-8	0	0	44	0	1.987e-8	0	0	12	0
7 (*4)	3.771e-8	0	5	0	0	1.802e-8	0	8	7	0
8	5.038e-8	0	1	36	0	2.836e-8	0	5	11	5
9	2.509e-8	0	0	15	7	1.994e-8	0	0	15	2
10	3.498e-8	0	1	47	0	1.899e-8	0	9	46	0
11	7.908e-8	0	0	63	1	7.306e-8	0	0	29	0
12	7.882e-8	0	20	36	0	7.396e-8	0	1	13	0
13	3.335e-8	0	0	16	0	1.998e-8	0	0	20	11
14	5.691e-8	0	18	5	0	4.318e-8	0	21	9	4
15	4.198e-8	7	0	26	0	3.758e-8	7	0	31	3
16	4.441e-8	3	30	5	0	2.632e-8	3	153	25	0
17	5.858e-8	0	0	47	0					
19	8.386e-8	3	0	2	0					

*1 (T) True events in crustal deformation are in reference to Table 11.

*2 (P) Peculiar changes are in reference to Table 12.

*3 The pump correction (Matsushima et al., 2008) residual error is excluded from the target.

*4 The investigation period is 2000 to 2009, but the period for station code 3 is 2001 to 2009, while the period of station code 7 is 2004 to 2009.

観測点で10年間に約200回はノイズレベルの値を超えることを許容し、全体の67%以上を占めることとなる。これまでのノイズレベルの定義からすれば妥当な回数と比率であるが、原因が降水だと明らかに分かっているにも関わらずノイズレベルの値を超える回数が多いという結果からも、降水期間のノイズレベルの定義の見直しが必須であると言える。次に (P) 固有変化のうち頻繁にある固有変化については、(14) 南伊豆入間や (16) 熱海下多賀において10年間で20~30回程度ノイズレベルの値を超えた。もし通常のノイズとしてノイズレベルの値を超えた事例が全てこの固有変化であるならば、10年間に7回程度はノイズレベルの値を超えることを許容する。

これまでのノイズレベルの定義からすれば、やや多めではある。また、(P) 固有変化のうち頻度が少ない固有変化については、(3) 浜松三ヶ日や (12) 富士鶴無ヶ淵において10年間で20~30回程度ノイズレベルの値を超えた。頻繁ではないとして、ノイズレベルの値を超えることを特別に許容しているが、通常のノイズと見なした方が良いほどの頻度ではない。最後に (O) その他については、わずか9回で全体の約2%程度に過ぎなかった。

この結果を踏まえると、降水期間のノイズレベルの定義の見直しの必要があるものの、非降水期間については真の地殻変動現象を検知するのに適した良好な事後検証結果が得られた。なお、これまでの

Table 14 Redefinition of one observation station's noise level

	Old definition	New definition
Noise level values during the period of no rainfall (N_n)	One change is permitted at the investigated period	99.9th percentile at the investigated period
The threshold of the rainfall period judgment (C)	0.5~5mm	The value which minimizes N_{MEAN}
Time of multiplication precipitation (K)	33~48hour	The value which minimizes N_{MEAN}
Stage number of rainfall period (m)	1	5 (maximum)
Noise level values during the period of rainfall	One change is permitted at the investigated period	A maximum and minimum value by only the rainfall at the investigated period
True events of crustal deformation	These should be detected. (Exclusion from subject of the noise level)	
Frequent peculiar changes	These are assumed a normal noise (Inclusion to subject of the noise level)	
Rare peculiar changes	These should be detected. (Exclusion from subject of the noise level)	
The Change by the earthquake or trouble of the strainmeter	These should be detected. (Exclusion from subject of the noise level)	

降水補正の事後検証を Table 13 で示すが、概ね同様の結果であった。但し、(16) 熱海下多賀の揚水による固有変化については10年間で150回ノイズレベルの値を超えており、通常のノイズとして許容する頻度よりも遥かに多い。設定したノイズレベルの値に問題があったと言える。

7.3 単独観測点のノイズレベルの定義の見直し

この節では、これまでのノイズレベルの定義の問題点を踏まえて、Table 14 で示すように単独観測点のノイズレベルの定義の見直しを提案する。

まず、これまで降水判定閾値を超えた場合の降水期間は1段階しかなかったが、降水期間を積算降水量に応じて複数の段階に区分することを提案する。また、これまでのように降水期間も通常のノイズとしてノイズレベルの値を超えることを許容するのではなく、それぞれの段階における時間階差の最大・最小値にすることによってノイズレベルの値を超えることを許容しないことも提案する。但し、最大・最小値とする対象はあくまでも降水の影響による事例のみであって、降水以外の要因も含まれている事例や、降水量データの観測に何かしらの問題が生じていた可能性があるなどの特異的な降水事例は除く。Fig. 38 には、(5) 島田川根における42時間積算降水量に対するタンクモデルによる降水補正の24時間階差の分布図と、この節で提案するノイズレベル

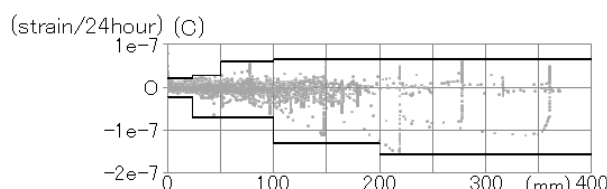


Fig. 38 Relationship between the 42 hours of cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data at station code 5 (2) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)
 * Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, while rainfall is corrected by tank model 18.
 * The black horizontal line indicates the new definition of noise level.

の値のイメージを黒線で示す。タンクモデルによる降水補正データであっても、大雨になればなるほど正負両方に大きくバラつく傾向を踏まえて、ノイズレベルの値も積算降水量に応じて段階的に変えていく。このようにすれば、7.1 節で指摘したノイズレベルの定義における2つの問題点をいずれも解消できる。つまり、少々の雨の場合でもノイズレベルの値が過剰に大きな幅とならず、また大雨に限らず降水期間中は特別なことが無い限りノイズレベルの値を超えることが無くなる。したがって、降水によってノイズレベルの値を超える回数は激減するはずである。一方、この定義の見直しによって積算降水量の多い大雨のノイズレベルの値は、これまでに比べ

て大きな幅になってしまうという問題点も新たに生じる。しかし、7.1 節で指摘したようにこれまでのノイズレベルの定義では、降水期間においてノイズレベルの値を超えたという事実が真の地殻変動現象の検知に役立っていなかった。この定義の見直しによって、降水期間においてノイズレベルの値を超えたという事実が、調査期間に 1 回も無かった特異な事例であることが分かる。ノイズレベルの値を超えたという事実が重要な意味を持つようになることから、デメリットよりもメリットの方が遥かに多いと考えられる。

次に、非降水期間のノイズレベルの定義については、前節で示したように良好な事後検証結果であったことから、見直さなくても問題はない。但し、ノイズレベルの値を超えた事例を回数で数えると調査に手間がかかることから、時間階差の絶対値の 99.9% タイル値という比率で定義することを提案する。なお、非降水期間においてノイズレベルの値を超える頻度は、これまでとほとんど変わらない。

また、降水期間と非降水期間の判定するために必要なパラメータである降水判定閾値と降水積算時間についても、改めて定義を提案する。降水判定閾値については、これまで 0.5mm から 5.0mm までという少ない積算降水量で設定されてきた。しかし、タンクモデルによる降水補正を行えば、積算降水量がもう少し多い降水でも非降水期間のノイズレベルの値を用いた監視をしても問題ない。また降水積算時間についても、これまで 36 時間から 48 時間までの時間で設定されてきた。降水の影響がいつまで残るかについては、5 章で示したように観測点ごとに様々である。これらの値を、監視上の最適値として求めることとする。東海地震の前兆すべりの監視は、降水期間や非降水期間を問わず全期間にわたって検知力が向上することが望ましい。そのため、全期間の平均的なノイズレベルの値を目的関数とし、この値が最も小さくなる降水判定閾値と降水積算時間をグリッドサーチで探索する。全期間の平均的なノイズレベルの値 N_{MEAN} は、非降水期間のノイズレベルの値 N_n 、非降水期間と判定された期間 T_n 、降水期間における各段階（積算降水量で区分）の正のノイズレベル P_i 、負のノイズレベルの値 M_i 、各段階と判定された期間 T_i によって、以下の式のように表す。

$$N_{MEAN} = \frac{N_n \times T_n + \sum_{i=0}^{m-1} \left(\frac{(P_i - M_i)}{2} \times T_i \right)}{T_n + \sum_{i=0}^{m-1} T_i} \quad (40)$$

ここで m は分割した積算降水量の段階数を示す。なお Table 13 には、これまでの全期間の平均的なノイズレベルの値も示している。

その他の条件については、これまでのノイズレベルの定義を踏襲する。但し、非降水期間のノイズレベルを回数はなく比率で定義したため、通常のノイズとしてノイズレベルの値を超える事例の期間が特別に長い事例があると、それだけで 99.9% タイル値から外れる 0.1% を超えてしまうこともある。したがって、このようなノイズレベルの値を超える期間が長い事例については、頻度の少ない固有変化と同様に、検知すべき対象としてノイズレベルの値を超えることを特別に許容する。これは小林・松森 (1999) のノイズレベルの定義にならない、ノイズレベルの値の幅を大きくし過ぎないようにするための工夫である。

7.4 2 点同時変化の監視の見直し

小林・松森 (1999) は単独観測点だけでなく、複数観測点の監視として 2 点同時変化のノイズレベルの値の調査を行った。これは、2 つの観測点においてノイズレベルの値を超える発生割合が同程度で、かつ調査期間に 1 回程度は許容する閾値を求めたものである。その結果、単独観測点の監視よりも真の地殻変動現象を検知できる確実性を増しながら、なおかつ単独観測点のノイズレベルの値よりも小さな閾値で監視できることを明らかにした。但し、降水は広域的な現象であることから、降水期間における 2 点同時変化の監視では、東海地震の前兆すべりの検知力向上が期待できない。そのため、2 点同時変化のノイズレベルの値の調査は、非降水期間限定で行われた。

この 2 点同時変化の監視は、東海地域の短期的スロースリップイベント (小林・他, 2006) などの地殻変動現象の検知にも有効であった (木村・他, 2008)。しかし、2 点同時変化のノイズレベルの値の調査には単独観測点のノイズレベルの値の調査に比べて遥

Table 15 Redefinition of the noise level of two observation stations

	Old definition	New definition
Noise level values during the period of no rainfall (N_n)	Same value of one observation station (One change is permitted at the investigated period)	99th percentile at the investigated period
Noise level values during the period of rainfall	Same value of one observation station (One change is permitted at the investigated period)	Same value of one observation station (A maximum and minimum value by only the rainfall at the investigated period)

かに手間がかかる。その上、例えば 1 つの観測点に 4 つの監視成分があるような多成分ひずみ計同士の 2 点同時変化ともなると、16 の組み合わせのノイズレベルの値の調査が必要になる。そのため、小林・松森 (1999) による調査以降、2 点同時変化のノイズレベルの値には、慣例的に単独観測点のノイズレベルの値の 0.8 倍の閾値が設定されてきた。

また、この 2 点同時変化の監視は、降水補正なしのデータのみ用いられ、それに比べて東海地震の前兆すべりの検知力が高いはずのこれまでの降水補正を行ったデータは用いられていなかった。そのため、2009 年に運用を開始した EPOS4 では、地殻変動監視処理の抜本的な見直しを行い、これまでの降水補正データについても 2 点同時変化の監視に用いるよう改良を行った (木村・他, 2012)。但し、これまでの降水補正データでは降水後に緩和的な変化が生じてしまう問題点があったため、2 点同時変化のノイズレベルの値に、慣例的な単独観測点のノイズレベルの値の 0.8 倍の閾値を設定すると、その閾値を頻繁に超えてしまう。そのため、EPOS4 では 2 点同時変化のノイズレベルの値に単独観測点と同じ値を設定していた。また、EPOS4 では降水期間についても 2 点同時変化の監視を行うようにしたが、降水は広域的な現象であることから、東海地震の前兆すべりの検知力向上が期待できないという小林・松森 (1999) の指摘そのものや、7.1 節で指摘したこれまでの単独観測点におけるノイズレベルの定義と全く同じ問題点を抱えていた。

これらの問題点を踏まえて、この節では Table 15 で示すように 2 点同時変化のノイズレベルの定義の見直しを提案する。まず非降水期間について、タンクモデルによる降水補正のデータは、降水後に緩和的な変化が生じにくくなることから、小林・松森

(1999) の 2 点同時変化のノイズレベル調査のように、単独観測点のノイズレベルの値よりも小さな閾値で監視できる。前節では単独観測点のノイズレベルの定義の見直しに際して、非降水期間については 24 時間階差の絶対値の 99.9% タイル値で定義することを提案した。そこで、非降水期間については 2 点同時変化の監視の閾値に 24 時間階差の絶対値の 99% タイル値で定義することを提案する。そうすることによって、単独観測点のノイズレベルの値よりも小さな閾値で監視できる上に、単独観測点のノイズレベルの値の調査と同時に求めることができる。ノイズレベルの値を超える頻度は、小林・松森 (1999) による 2 点同時変化のノイズレベルの定義とほとんど変わらない。また、降水期間については、前節では単独観測点のノイズレベルの定義の見直しについて、降水期間を積算降水量に応じて複数の段階に区分し、それぞれの段階における時間階差の最大・最小値にすることを提案したが、2 点同時変化の監視の閾値にも、その値をそのまま用いることを提案する。このことによって、単独観測点における降水期間のノイズレベルの定義の見直しによる改善効果をそのまま取り入れることができることに加えて、2 点同時変化のために特別な調査を必要としない。

8 ノイズレベルの値の調査結果と各観測点における検知力向上のためのさらなる課題

8.1 単独観測点のノイズレベルの値の調査結果

7 章で見直しを提案したノイズレベルの定義に基づいて、各観測点の単独観測点のノイズレベルの値の調査を行った。その結果を Table 16 に示す。7.2 節の事後検証と同じく、調査期間は 2000 年から 2009 年の 10 年間で、(3) 浜松三ヶ日及び (7) 牧之原坂

Table 16 (1) Values of the new noise level for tank model 18 (1)

Station code	K (hour) (*1)	C (mm) (*2)	No rainfall period (strain/24hour)		A maximum and minimum value by only the rainfall at rainfall period (strain/24hour) (*5)				
			99.9th Percentile (N_n) (*3)	99th Percentile (*4)	~30mm	~50mm	~100mm	~200mm	200mm~
					+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
1	31	36	$\pm 7.5e-9$	$\pm 4.9e-9$		+6.9e-9	+1.1e-8	+1.0e-8	+1.2e-8
						-7.5e-9	-8.7e-9	-8.3e-9	-2.4e-10
2	44	32	$\pm 1.4e-8$	$\pm 1.1e-8$		+1.9e-8	+2.1e-8	+4.1e-8	+1.6e-8
						-2.0e-8	-2.0e-8	-1.9e-8	-1.5e-9
3 (*6)	79	44	$\pm 1.3e-8$	$\pm 9.8e-9$		+1.6e-8	+1.7e-8	+1.4e-8	+1.6e-8
						-1.3e-8	-1.4e-8	-1.7e-8	-4.2e-9
4	37	11	$\pm 1.4e-8$	$\pm 7.5e-9$	+3.0e-8	+2.4e-8	+5.7e-8	+7.0e-8	+2.1e-8
					-4.0e-8	-3.7e-8	-5.9e-8	-7.9e-8	-4.1e-8
5	72	26	$\pm 1.2e-8$	$\pm 9.0e-9$	+2.1e-8	+2.2e-8	+3.1e-8	+3.2e-8	+6.1e-8
					-2.8e-8	-3.4e-8	-6.2e-8	-1.1e-7	-1.5e-7
6	43	24	$\pm 9.8e-9$	$\pm 7.2e-9$		+1.6e-8	+2.1e-8	+2.5e-8	+3.3e-8
						-1.5e-8	-1.9e-8	-2.4e-8	-3.1e-8
7 (*6)	25	11	$\pm 8.3e-9$	$\pm 6.1e-9$		+1.1e-8	+1.8e-8	+1.3e-8 (*7)	
						-1.3e-8	-1.1e-8	-1.0e-8 (*7)	

*1 K is the threshold for rainfall period judgment.

*2 C is the time of precipitation accumulation.

*3 Values of the new noise level for tank model 18 at one observation station during a period of no rainfall

*4 Values of the new noise level for tank model 18 at two observation stations during a rainfall of no rainfall

*5 Values of the new noise level for tank model 18 during a period of rainfall

*6 The investigation period is 2000 to 2009, but the period for station code 3 is 2001 to 2009, while the period of station code 7 is 2004 to 2009.

*7 Rain during investigated periods did not exceed 200 mm.

部では調査期間を数年間短縮している。また、Table 17 に全期間の平均的なノイズレベルの値 N_{MEAN} や 7.2 節と同様の事後検証結果を示す。東海地域の 16 の観測点で 10 年間にノイズレベルの値を超えた回数は全て合計すると約 300 回となり、これまでの 6 割程度になる。そのうち、降水による事例が全体の約 21%にまで大幅に減少し、逆に真の地殻変動現象は 18%にまで大幅に増加した。7.3 節で提案した定義の見直しによって、ノイズレベルの値を超えたという事実がより重要な意味を持つようになったことは明らかである。

Fig. 39 には、降水補正なしのデータの平均的なノイズレベルの値（これまでの定義）を基準とした、これまでの降水補正データの平均的なノイズレベル

の値（これまでの定義）と、タンクモデルによる降水補正データの平均的なノイズレベルの値（7.3 節で提案した定義）の比率を示す。タンクモデルによる降水補正データの平均的なノイズレベルの値（7.3 節で提案した定義）は、降水補正なしのデータの平均的なノイズレベルの値（従来の定義）に比べて東海地域の 16 観測点で平均すると半分以下の 55%も小さくなり、これまでの降水補正データの平均的なノイズレベルの値（これまでの定義）に比べても東海地域の 16 観測点で平均すると 32%小さくなった。タンクモデルによる降水補正と、ノイズレベルの定義の見直しの両方を行うことによって、東海地震の前兆すべりの検知力が向上することが明らかに確認できた。

Table 16 (2) Values of the new noise level for tank model 18 (2)

Station code	K (hour) (*1)	C (mm) (*2)	No rainfall period (strain/24hour)		A maximum and minimum value by only the rainfall at rainfall period (strain/24hour) (*5)				
			99.9th Percentile (N_n) (*3)	99th Percentile (*4)	~30mm	~50mm	~100mm	~200mm	200mm~
					+ / -	+ / -	+ / -	+ / -	+ / -
8	54	31	$\pm 2.2e-8$	$\pm 1.7e-8$		+2.4e-8	+3.8e-8	+5.1e-8	+4.2e-8
						-2.6e-8	-2.8e-8	-3.6e-8	-4.1e-8
9	29	29	$\pm 8.8e-9$	$\pm 5.8e-9$		+1.0e-8	+1.4e-8	+7.9e-9	+1.0e-8
						-1.1e-8	-1.6e-8	-1.5e-8	-1.5e-8
10	54	14	$\pm 1.1e-8$	$\pm 8.5e-9$	+2.1e-8	+2.3e-8	+2.5e-8	+4.5e-8	+3.8e-8
					-1.1e-8	-2.2e-8	-3.9e-8	-8.3e-8	-8.9e-8
11	64	22	$\pm 2.2e-8$	$\pm 1.6e-8$	+2.8e-8	+5.7e-8	+7.3e-8	+1.3e-7	+1.4e-7
					-2.8e-8	-4.8e-8	-1.1e-7	-2.2e-7	-2.6e-7
12	44	10	$\pm 3.5e-8$	$\pm 2.8e-8$	+5.0e-8	+5.9e-8	+1.0e-7	+1.4e-7	+8.6e-8
					-7.3e-8	-9.0e-8	-9.5e-8	-1.0e-7	-6.3e-8
13	50	17	$\pm 1.7e-8$	$\pm 1.2e-8$		+1.8e-8	+2.5e-8	+3.7e-8	+3.5e-8
						-2.2e-8	-2.6e-8	-2.8e-8	-3.7e-8
14	64	44	$\pm 4.8e-8$	$\pm 3.0e-8$		+3.7e-8	+5.3e-8	+4.6e-8	+4.0e-8
						-2.9e-8	-2.5e-8	-6.9e-8	-3.5e-8
15	39	18	$\pm 1.6e-8$	$\pm 1.2e-8$	+2.4e-8	+3.2e-8	+3.0e-8	+5.0e-8	+5.9e-8
					-3.7e-8	-4.5e-8	-9.5e-8	-6.9e-8	-9.1e-8
16	31	40	$\pm 3.1e-8$	$\pm 2.5e-8$		+2.7e-8	+2.9e-8	+2.8e-8	+1.7e-8
						-2.2e-8	-2.7e-8	-3.3e-8	
17	113	40	$\pm 2.8e-8$	$\pm 2.0e-8$		+4.2e-8	+8.9e-8	+1.2e-7	+1.6e-7
						-4.2e-8	-7.8e-8	-9.5e-8	-1.4e-7
19	23	28	$\pm 2.9e-8$	$\pm 2.2e-8$	+2.7e-8	+3.5e-8	+3.5e-8	+3.8e-8	+4.4e-8
					-3.0e-8	-4.2e-8	-4.1e-8	-5.6e-8	-7.3e-8

*1 K is the threshold for rainfall period judgment.

*2 C is the time of precipitation accumulation.

*3 Values of the new noise level for tank model 18 at one observation station during a period of no rainfall

*4 Values of the new noise level for tank model 18 at two observation stations during a rainfall of no rainfall

*5 Values of the new noise level for tank model 18 during a period of rainfall

なお、7.3 節で指摘したように、定義の見直しによって積算降水量の多い大雨のノイズレベルの値は、これまでに比べて大きな幅となってしまった。しかし、平均的なノイズレベルの値には影響しなかった。これは、大雨となる期間が調査期間全体から見れば短く、調査期間の大半を占める大雨以外の期間でノイズレベルの値をこれまでより小さく設定できた効

果の方が大きかったと考えられる。なお、(14) 南伊豆入間と (16) 熱海下多賀では、これまでの降水補正データの平均的なノイズレベルの値に比べて、タンクモデルによる降水補正データの方が大きな値となってしまった。但し、これはタンクモデルによる降水補正とノイズレベルの定義の見直し自体に問題があるわけではなく、今回ノイズレベルの値の調査

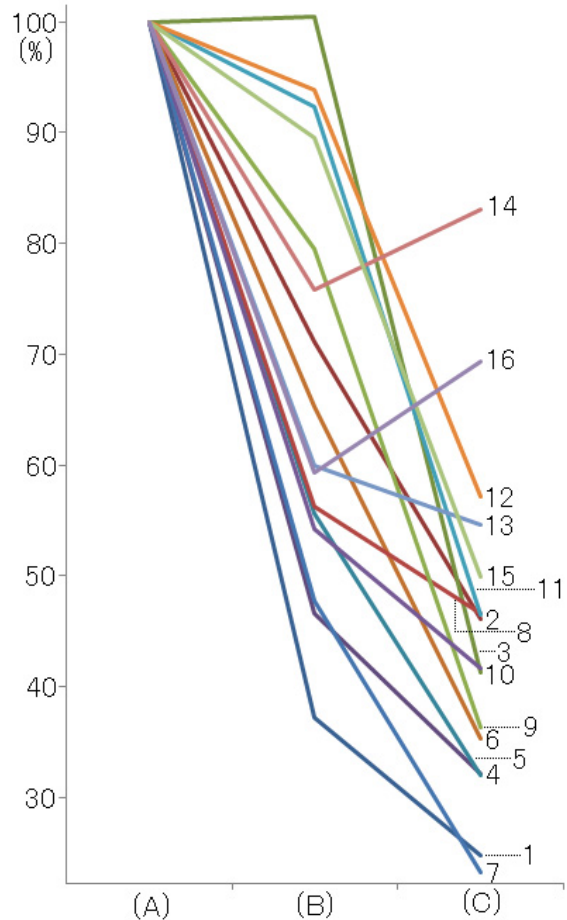
Table 17 New noise level investigation results

Station code	Mean of noise level (N_{MEAN})	Number of times over noise level			
		True (*1)	Peculiar (*2)	Rain fall	Other
1	7.530e-9	16	(*3) 0	1	15
2	1.440e-8	31	3	1	9
3 (※4)	1.367e-8	0	32	4	6
4	1.931e-8	0	0	4	2
5	2.132e-8	0	0	8	0
6	1.077e-8	0	0	11	4
7 (※4)	8.791e-9	0	0	2	4
8	2.349e-8	0	7	1	6
9	9.109e-9	0	0	3	7
10	1.457e-8	0	15	5	2
11	3.677e-8	0	0	9	2
12	4.510e-8	0	21	8	6
13	1.822e-8	0	0	1	9
14	4.725e-8	0	11	0	0
15	2.093e-8	8	0	6	1
16	3.082e-8	3	30	2	0
17	3.951e-8	0	0	17	0
19	2.954e-8	3	14	4	0

- *1 True change in crustal movement is in reference to Table 12.
- *2 Peculiar change is in reference to Table 13.
- *3 The pump correction (Matsushima et al., 2008) residual error is excluded from the target.
- *4 The investigation period is 2000 to 2009, but the period for station code 3 is 2001 to 2009, while the period of station code 7 is 2004 to 2009.

を行ったことによって、適正なノイズレベルの値になったと考えられる。Table 13 と Table 17 を比べると、固有変化によってノイズレベルの値を超えた頻度は、これまでの降水補正に比べて (14) 南伊豆入間では約半分、(16) 熱海下多賀では約 2 割へと大幅に少なくなっている。

Fig. 40 に、小林 (2000) による前兆すべりの検知能力ツールを用いた東海地域の体積ひずみ計 16 観測点の検知力を示す。この図における検知力とは、プレート境界付近で前兆すべりが発生したと仮定し、この現象による地殻変動がいずれか 1 つの観測点で



Type of the rainfall correction and the noise level

- Fig. 39 Ratio of the mean noise level on the basis of
- (A) the conventional noise level having no rainfall correction
- (A) Conventional noise level with no rainfall correction
- (B) Conventional noise level with conventional rainfall correction
- (B) Conventional noise level with conventional rainfall correction
- (C) New noise level with rainfall correction by the tank model
- (C) New noise level with rainfall correction by the tank model

非降水期間のノイズレベルを超えた場合に、その際の前兆すべりの大きさを地震のマグニチュード (M) に換算して表した値である。各観測点の 24 時間階差のノイズレベルの値を設定すると、24 時間あたりの検知力 (マグニチュード) が地図上に示される。本稿で調査対象としなかった多成分ひずみ計も対象に含めた方がより検知力が高くなり、また東海地震の前兆すべりの検知力の現状を適切に表わせるが、ここでは体積ひずみ計のタンクモデルによる降水補正とノイズレベルの定義の見直しの効果のみに着目するため、東海地域の体積ひずみ計のみを対象として検知力の調査を行った。その結果、東海地震の想定

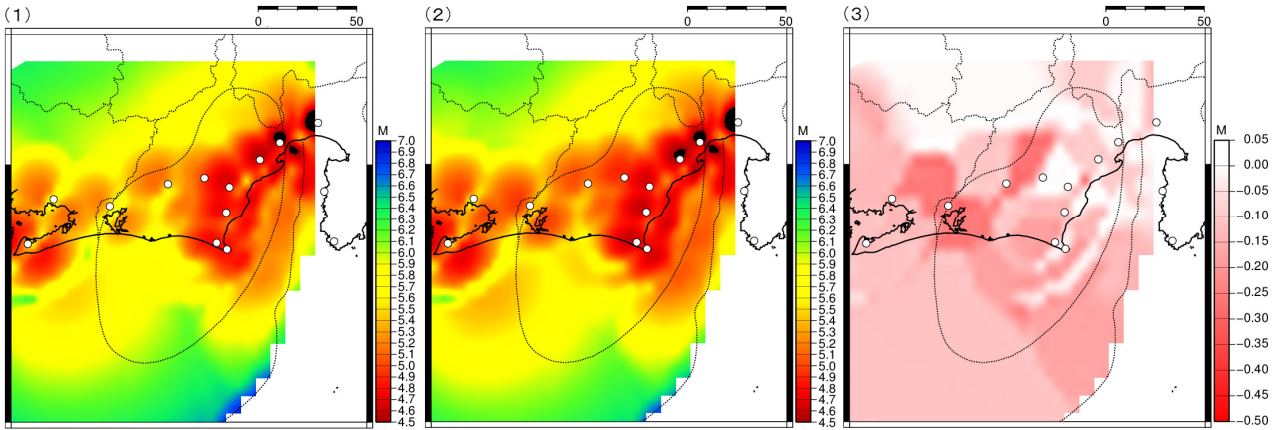


Fig. 40 Detectability of a Tokai Earthquake pre-slip by one observation station's noise level
 (1) Noise level with conventional rainfall correction
 (2) New noise level with rainfall correction by the tank model
 (3) Difference of (1) and (2)
 (improving the detectability of the new noise level with rainfall correction by the tank model)

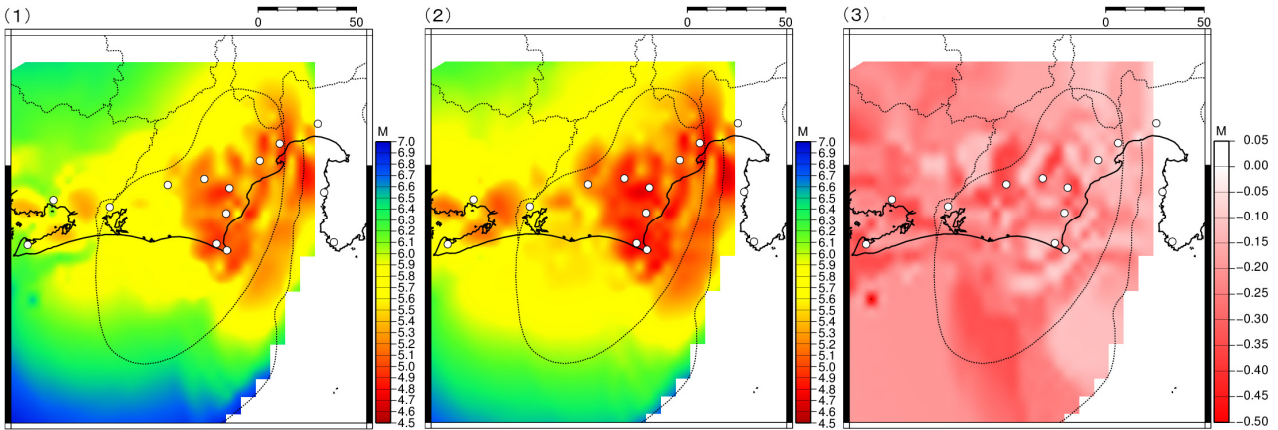


Fig. 41 Detectability of a Tokai Earthquake pre-slip by the noise level measured at two observation stations
 (1) Conventional noise level with conventional rainfall correction
 (2) New noise level with rainfall correction by the tank model
 (3) Difference of (1) and (2)
 (improving the detectability of the new noise level with rainfall correction by the tank model)

震源域内ではこれまでに比べて検知力が下がった領域は無く、最大で 24 時間あたり M0.3 程度の検知力向上効果があることが分かった。この図からも、体積ひずみ計のタンクモデルによる降水補正とノイズレベルの定義の見直しによって、東海地震の前兆すべりの検知力が向上したことが確認できた。

8.2 2 点同時変化のノイズレベル調査の例

Table 16 には、7.4 節で見直しを提案した 2 点同時異常の非降水期間のノイズレベルの閾値である 99% タイル値についても示している。東海地域の体積ひずみ計の 16 観測点について言えば、単独観測点

のノイズレベルの値に比べて全観測点の平均で 0.72 倍であった。7.4 節で示したような、EPOS4 以前に 2 点同時変化の監視で慣例的に用いられてきた単独観測点のノイズレベルの値の 0.8 倍という値は、概ね妥当であったとも言える。

東海地域でこれまで数多くの短期的スロースリップイベント (小林・他, 2006) を検知してきた (1) 田原福江と (2) 蒲郡清田の組み合わせについては、検証を行った。2 つの観測点で同時に 2 点同時変化のノイズレベルの値である 99% タイル値を超えた事例は 2000 年から 2009 年の 10 年間で 28 回あったが、そのうち 20 回は三重県か愛知県で発生した短期

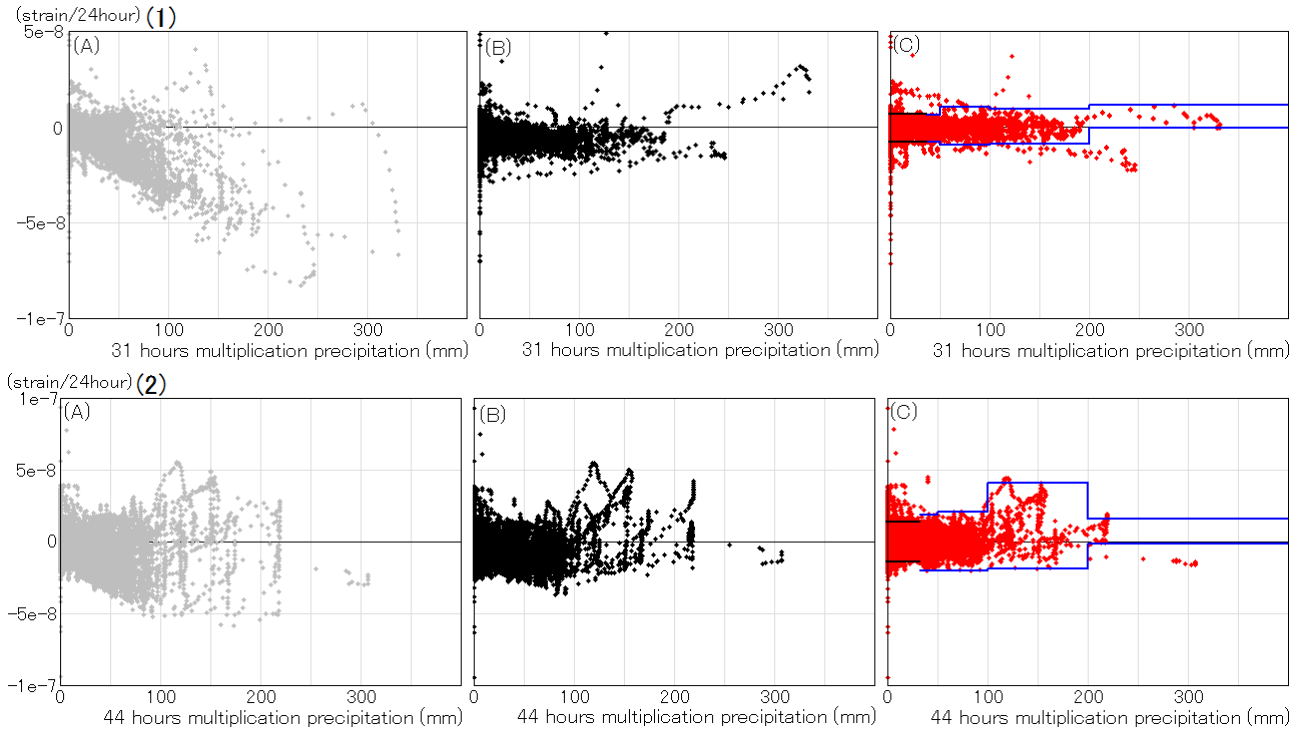


Fig. 42 (1) Relationship between the cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data (station codes 1–2) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with conventional rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18

* The black line indicates the new noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the new noise level during the period of rainfall.

的スロースリップイベントによるもので、7回は降水による影響、もう1回は原因不明であった。検知すべき真の地殻変動現象が数多く検知できており、その他の要因でノイズレベルの値を超えた回数が10年間で8回程度という結果は極めて良好だと言える。

Fig. 41に、Fig. 40と同様の小林(2000)による前兆すべりの検知能力ツールを用いた東海地域の体積ひずみ計16観測点の検知力を示す。Fig. 40との違いは、1つの観測点で非降水期間のノイズレベルを超えた場合ではなく、2つの観測点で2点同時変化の非降水期間のノイズレベルを超えた場合の結果を示していることである。その結果、2点同時変化についても東海地震の想定震源域内ではこれまでに比べて検知力が下がった領域は無く、最大で24時間あたりM0.5程度の検知力向上効果があることが分かった。また、想定震源域以外の領域でも全体的に検

知力が向上している。単独観測点の監視よりも確実性が高い2点同時変化の監視においても、体積ひずみ計のタンクモデルによる降水補正とノイズレベルの定義の見直しによって、東海地震の前兆すべりの検知力が向上したことが確認できた。

8.3 各観測点における検知力向上のためのさらなる課題

本稿では、ここまでタンクモデルによる降水補正の良い点について言及してきた。この節ではタンクモデルによる降水補正の悪い点についても着目し、降水補正によっても改善できなかった降水事例について、その要因とそれを改善するための課題について説明する。

Fig. 42に、観測点ごとにTable 16に示した積算降水量に対する降水補正なし、現在の降水補正、タンクモデルによる降水補正の各データの24時間階

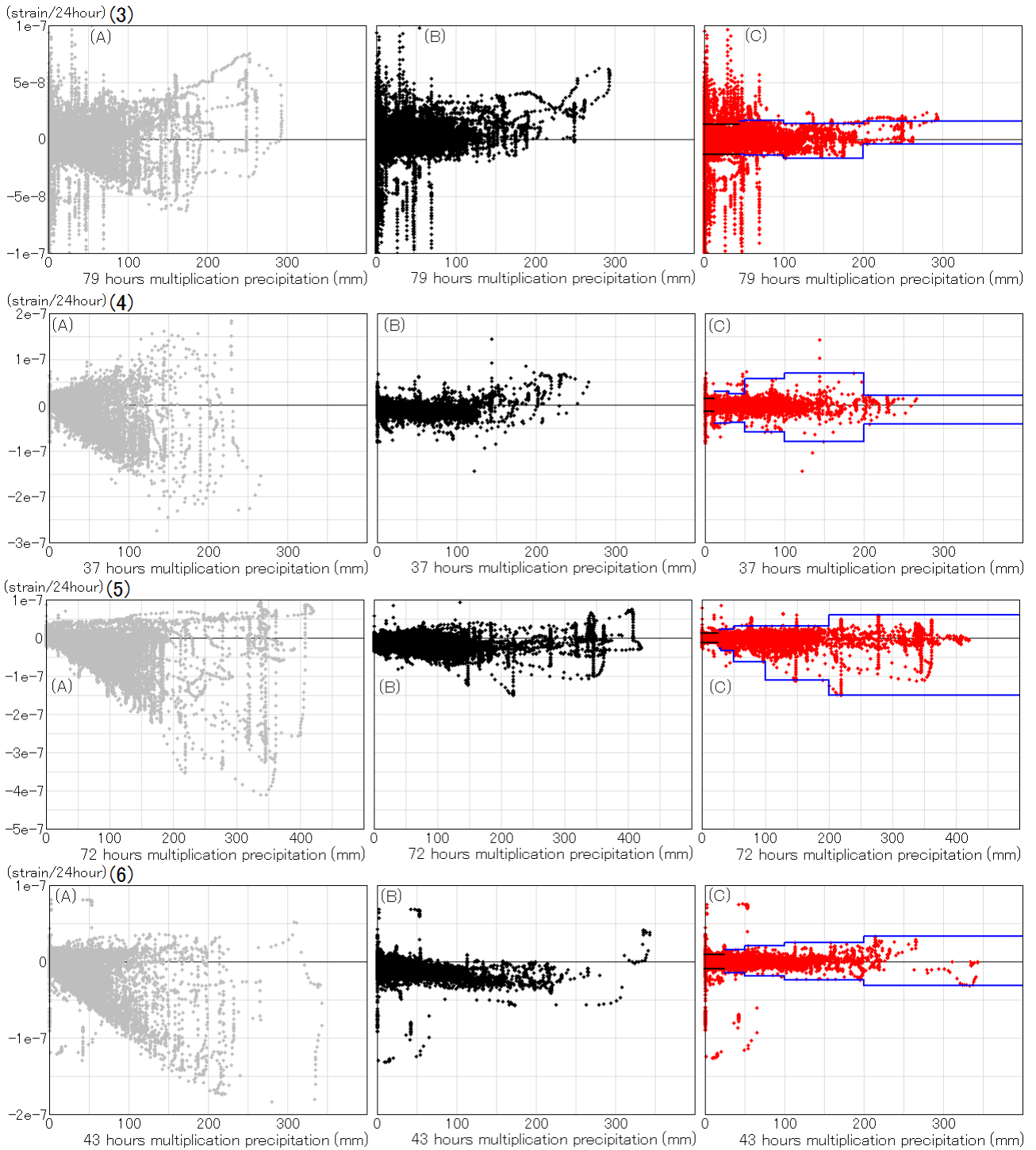


Fig. 42 (2) Relationship between the cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data (station codes 3–6) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with conventional rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18

* The black line indicates the new noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the new noise level during the period of rainfall.

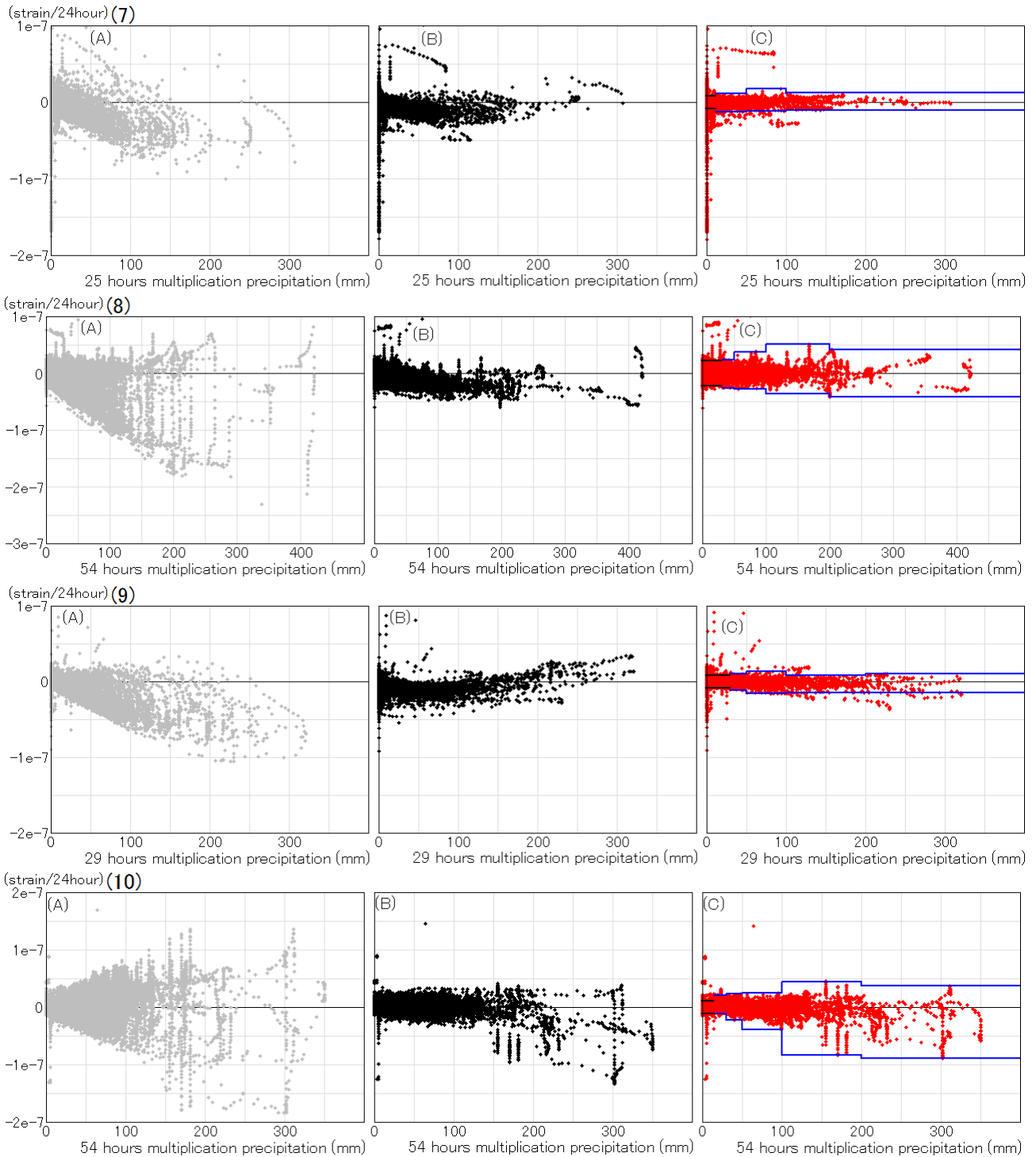


Fig. 42 (3) Relationship between the cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data (station codes 7–10) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with conventional rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18

* The black line indicates the new noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the new noise level during the period of rainfall.

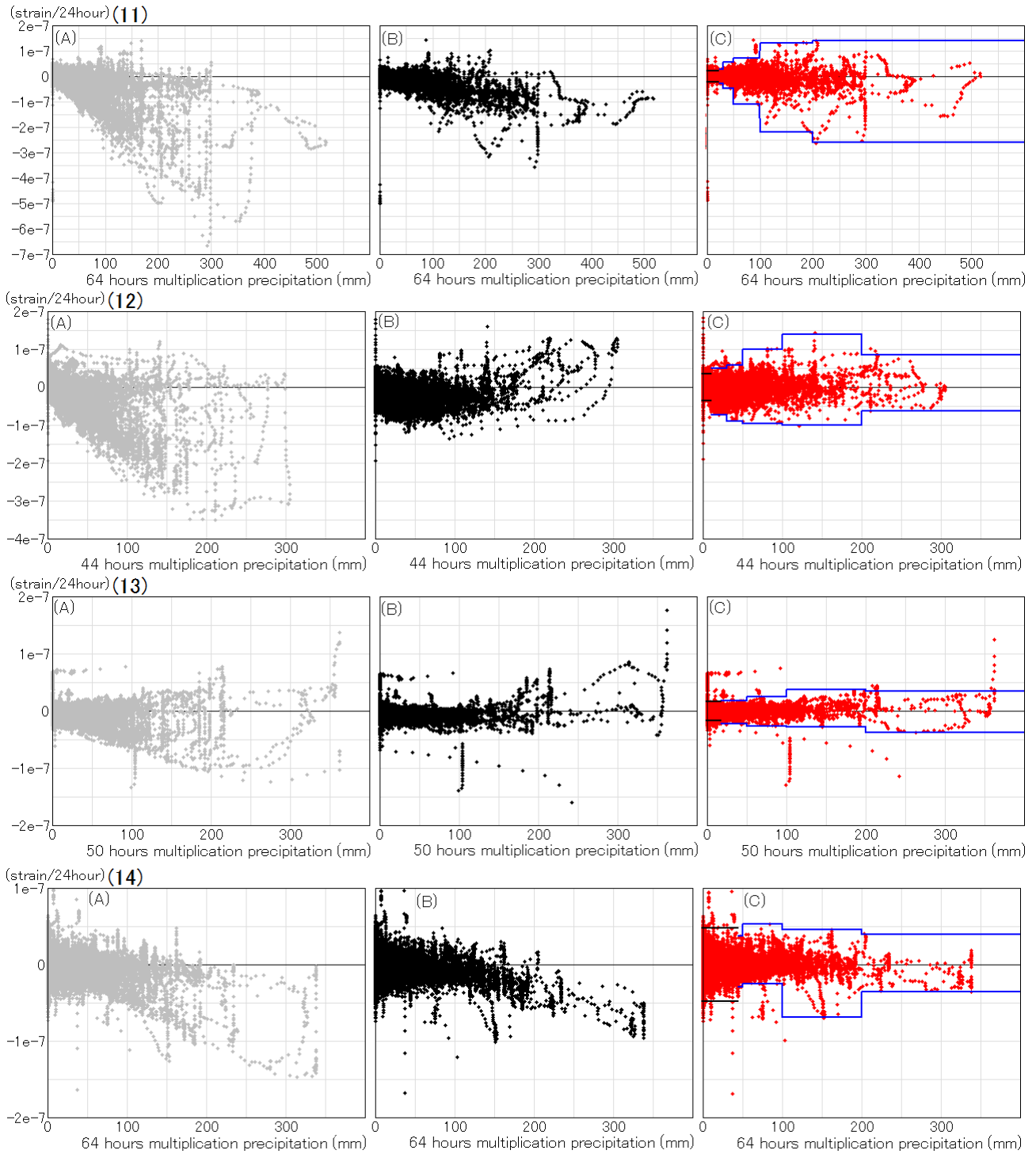


Fig. 42 (4) Relationship between the cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data (station codes 11–14) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with conventional rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18

* The black line indicates the new noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the new noise level during the period of rainfall.

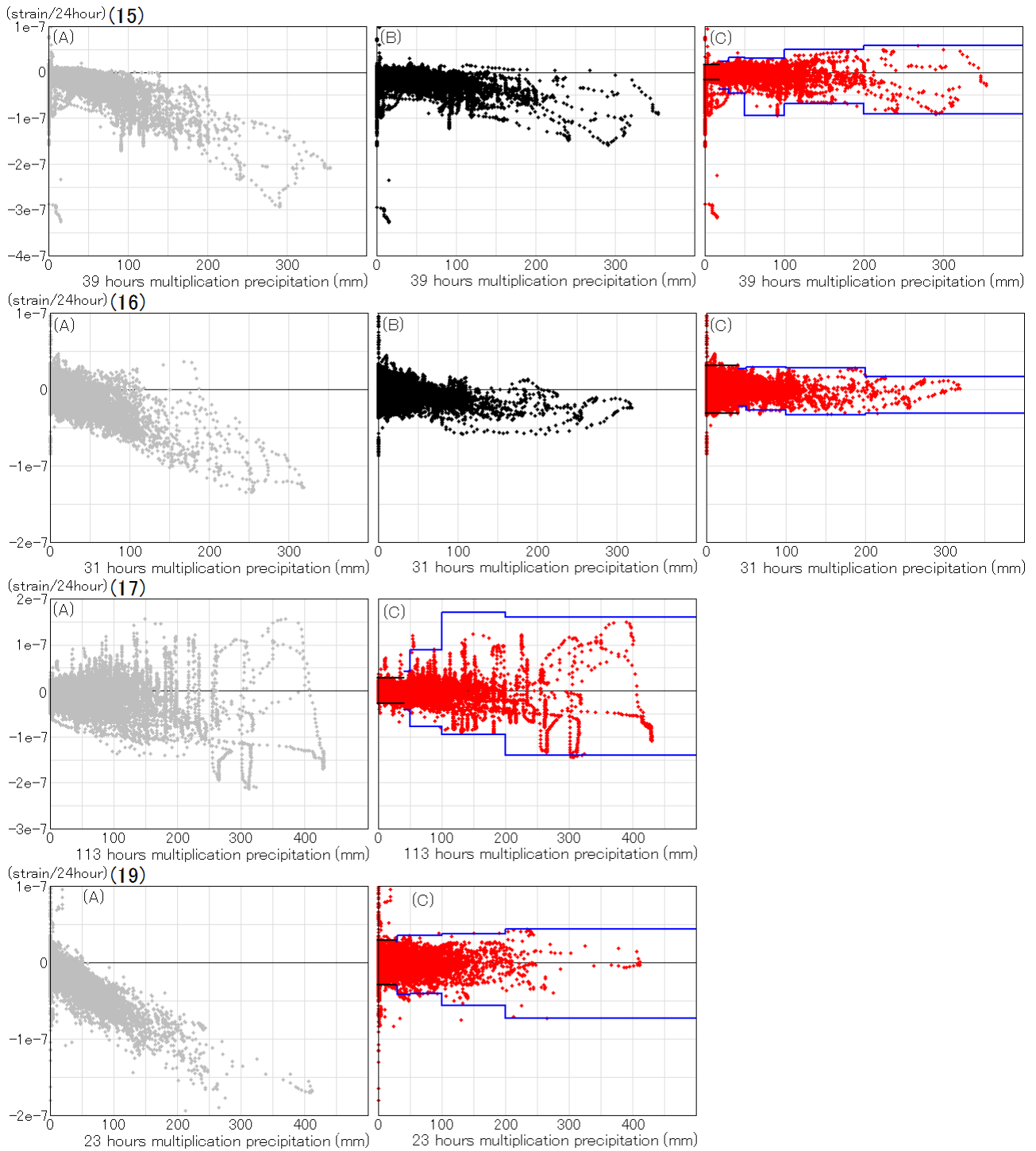


Fig. 42 (5) Relationship between the cumulative precipitation data and the difference over 24 hours of the volumetric strainmeter data (station codes 15-19) (Jan. 1, 2000–Dec. 31, 2009)

(A) Volumetric strainmeter data is corrected for the tide and barometric pressure, but not for rainfall (no rainfall correction).

(B) Volumetric strainmeter data with conventional rainfall correction

(C) Volumetric strainmeter data with rainfall correction by tank model 18

* The black line indicates the new noise level during the period of no rainfall, while the blue line indicates the new noise level during the period of rainfall.

差の分布図を示す。タンクモデルによる降水補正の図には、8.1 節で求めた Table 16 の単独観測点のノイズレベルの値も青線で示す。

降水期間のノイズレベルの幅が、非降水期間のノイズレベルの幅の 2 倍以内に収まる観測点を良好な降水補正ができたと見なすと、1) 田原福江、(3) 浜松三ヶ日、(7) 牧之原坂部、(8) 御前崎大山、(9) 藤枝花倉、(14) 南伊豆入間、(16) 熱海下多賀の 7 観測点が該当する。このうち、(1) 田原福江、(7) 牧之原坂部、(8) 御前崎大山、(9) 藤枝花倉の 4 つの観測点については、5.1 節でタイプ B と分類し、5.3 節では時間遅れの流入の影響が無いため降水期間中に多くの降水が流出することが考えられることを指摘した。さらに (1) 田原福江や (8) 御前崎大山の雨量計はアメダスであることから、降水補正の唯一の入力値である降水量データの品質が高いはずである。このような観測点では、厳しい見方をすれば、降水期間のノイズレベルの幅が非降水期間のノイズレベルの幅が 2 倍どころか同程度になることも期待されておかしくないが、実際には大雨になればなるほど 24 時間階差が正負両方に大きくバラつく傾向が見られる。本稿のようなタンクモデルでは降水量データは正しいものとして降水補正の入力値に用いているが、実際、その場における降水量を雨量計が正しく観測できているかについても検討する必要があるかも知れない。例えば雨量計のデータの捕捉率は風速が大きくなると低下するジェボンス効果は良く知られている。ジェボンス効果は特に降水が雪の場合は影響が大きい。幸い気象庁の体積ひずみ計は降水が雪である場合をあまり考慮しなくても良い条件にある。但し、幾つかの異なる形状の雨量計で風速に対する雪や雨の捕捉率を調査した中井・横山 (2009) によれば、雨であっても一般的な転倒桁雨量計で秒速 6m の風速に対し捕捉率が 80% 程度に下がるという結果を示している。このようなジェボンス効果を考慮した場合に降水補正の効果が向上するかどうかについては検証する必要がある。また、降水量データの品質を確保するために、雨量計の設置環境などを適切に管理する必要があるのは当然のことである。また、(14) 南伊豆入間と (16) 熱海下多賀の 2 つの観測点では、頻繁にある固有変化が降水よりも大きいためであり、必ずしも良好な降水補正ができたからではない。この 2 つの観測点では近

隣の揚水などの影響を大きく受けていると考えられるが、これらの観測点で検知力を向上させるためには、既に (1) 田原福江で行われているように (松島・他、2008) 揚水の起動と停止の情報を入手し、その情報を入力値とした補正が可能かを検討する必要がある。

逆に、降水期間のノイズレベルの値の幅が、非降水期間のノイズレベルの値の幅に比べて大きければ、厳しい目で見なくても降水補正がうまくいっていないと言える。そのような観測点として、(5) 島田川根、(10) 静岡漆山、(11) 静岡但沼、(12) 富士鶴無ヶ淵、(15) 東伊豆奈良本が挙げられる。このうち、5.1 節でタイプ C に分類した (10) 静岡漆山以外は、全てタイプ A と分類した観測点である。タイプ A と分類した観測点では、近隣の川や地下水などによる時間遅れの流入があることが考えられる。したがって、観測点設置の雨量計の降水量データを唯一の入力値とする降水補正を行う限り、時間遅れで流入してくる観測点遠方の降水は把握できていないことから、降水補正がうまくいかないのは当然の結果である。本稿のように、他の場所からの流入が無いと仮定した集中型モデルの限界であるとも言える。このような集中型モデルの問題点を解消するために、既に水文学の分野で行われているような分布型モデルによって近隣の川や地下水などによる時間遅れの流入を見積もるか、あるいは近隣の川からの流入が原因だとすれば河川水位や浅部の地下水位を観測することによって、流入量を把握するなどの方法が考えられる。今後、これらの方法を比較することによって降水補正の効果が向上するかどうかについては検証する必要がある。また、(10) 静岡漆山では 5.2 節で示したように、長期的な季節変化が除去できていない。観測点周辺には麻機遊水地のような降水が溜まる地形があるが、周辺の水位などを観察することによって長期的な季節変化も含めた何かしらの改善手法が見出せるかも知れない。

また、ひずみ計のような高価な観測装置の埋設にあたっては、降水などの水の動きを意識した上で川や池、揚水を行っている工場、農業用などの揚水ポンプ、温泉施設などの周辺を避けて設置場所を選定することが望ましいのは当然である。

9 まとめ

これまでタンクモデルはたびたび地殻変動データの降水補正に用いられてきたが、参考可能な汎用的なタンクの形状が提案されていないだけでなく、降水補正に必要な概念について丁寧に調査し尽くされていないという問題を抱えていた。本稿では、気象庁の体積ひずみ計が地理条件の全く異なる複数の場所に設置されているという点を生かして、タンクモデルによる地殻変動データの降水補正に適用可能な汎用的なタンクの形状を検討した。タンクモデルは、タンクの形状を変えることによって側面流出過程、土壌水分構造、蒸発、時間遅れの効果を取り入れることができる。本稿では、定めた調査期間の体積ひずみ計データの 24 時間階差の絶対値の和を目的関数と定義し、現在の恵まれた計算機環境を生かして SCE-UA 法で目的関数の究極的な最小値を求めた。タンクの形状を変えたモデルを目的関数の究極的な最小値を比較することによって、どちらが良いかを数字の上で判断できる。その結果、4.7 節の Fig. 25, Table 6, 式 (22) から式 (36) までに示すような形状の 3 段のタンクモデルを提案することができた。

なお、これまで主に大学などで行われてきた地殻変動データの降水補正は、地上に近い横穴式の地殻変動観測施設が対象であり、特に降水の浸透過程に着目した調査が行われてきた。本稿で対象とした体積ひずみ計データの降水補正は、埋設深度の深いボアホール式の地殻変動観測施設であり、降水荷重に着目した。各観測点の降水応答の特徴について幾つかの側面から検討し、その場の降水量データだけで降水応答を説明できる観測点、近隣の川や地下水などによる時間遅れの流入があると考えられるためにその場の降水量だけでは降水応答を説明できない観測点、周辺に水が溜まる観測点を分類した。これらの結果から、体積ひずみ計のような埋設深度の深いボアホール式の地殻変動観測施設では、観測点周辺における水平方向の水の動きが重要であることが示唆される。

本稿で提案した 3 段のタンクモデルによる降水補正は、これまでの降水補正によって生じていた降水後の緩和的な変化を改善することに成功した。そして、本稿で定義した目的関数に基づけば、タンクモデルによる降水補正は、これまでの降水補正よりも 2 倍以上の改善効果があった。その要因は、これま

での降水補正が長期的な変化をフィルター処理によって除去した上でパラメータを求めていたことである。降水補正を考える上で、降水前の補正量が 0 と考えてしまうと理想的な降水補正ができないことを意識しておく必要がある。

そして、このタンクモデルによる降水補正の導入とともに、特に降水期間中のノイズレベルの定義の見直しを提案した。具体的には非降水期間については現在と同程度の頻度ながら手間をかけずにノイズレベルの値を決められる 99.9% タイル値とし、降水期間中については積算降水量ごとに段階的にノイズレベルの値を変えながら最大・最小値とする。本稿では、そのように見直した定義に基づくノイズレベル調査を行った。その結果、平均的なノイズレベルの値は大幅に小さくなり、本稿の目的である東海地震の前兆すべりの検知力の向上が図られることが確認できた。また、降水によってノイズレベルを超える回数が激減した一方で、真の地殻変動現象による回数が大幅に増え、ノイズレベルの値を超えたという事実が、地殻変動現象を監視する上でより重要な意味を持つようになった。

本稿の調査や提案については、2014 年 1 月より業務に取り込み、東海地震の前兆すべりの監視や資料作成などを行うようになった。今後、既にタンクモデルによる降水補正の有効性が確認されて業務にも導入されつつある多成分ひずみ計だけでなく、傾斜計などについても検証を行う予定である。

謝辞

SCE-UA 法については地震予知情報課（現所属：気象研究所）の山本剛靖氏の作成したプログラムを参考にした。産業技術総合研究所の松本則夫氏、静岡大学客員教授の吉田明夫氏からは降水補正に関する技術的なアドバイスをいただいた。東濃地震科学研究所の田中俊行氏や京都大学理学研究科の風間卓仁氏の重力観測における水の影響に関する研究は、体積ひずみ計における降水の影響を考える上でとても参考になった。気象研究所の小林昭夫氏からはノイズレベルに関する技術的なアドバイスをいただいた。気象研究所客員研究員の吉川澄夫氏からはパラメータ推定に関する技術的な指導をいただいた。国土地理院の赤司貴則氏には体積ひずみ計データの過去データの補正に協力いただいた。また、本稿の調

査は特に産業技術総合研究所の方々に学会発表などで意見をいただいた以外にも、地震防災対策強化地域判定会の中で報告し気象庁や委員の方々から貴重な意見をいただいた。また、これらの会議資料提出に際して、気象研究所（現所属：東京管区气象台）の横田崇氏には技術的な指導をいただいた。匿名の査読者及び地震津波監視課の西前裕司氏には丁寧に査読していただいたほか、編集委員の坂井孝行氏、森滋男氏、瀧山弘明氏、編集委員長の内藤宏人氏には丁寧に内容を確認していただいた。

本稿のようなタンクモデルの調査は、時代の進歩によって計算機能力が格段に良くなったために可能になった。言い換えると、頭を使わずに計算機任せの力技で行った調査である。現在のように計算機能力が十分ではなかった環境において、地殻変動データの降水補正を行ってきた先人の方々に敬意を表したい。

文献

- 飯田汲事・志知竜一・松浦 宏 (1969): 犬山における地殻変動の連続観測, 測地学会誌, **14**, 144-155.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司 (1973): 秋田地殻変動観測所における地殻変動観測 (2) —降雨による地殻ひずみについて—, 測地学会誌, **19**, 135-144.
- 石井 紘・松本滋夫・平田安廣・山内常生・高橋辰利・鈴木喜吉・渡辺 茂・若杉忠雄・加藤照之・中尾 茂 (1992): 新しい小型多成分ボアホール歪計の開発と観測, 地球惑星科学関連学会 1992 年合同大会予稿集, C22-03.
- 石垣祐三 (1995): 埋込式体積歪データの精密補正及び異常識別について, 験震時報, **59**, 7-29.
- 石黒真木男・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣 (1984): 地球潮汐データ解析プログラム BAYTAP-G の紹介, 統計数理研究所彙報, **32**, 71-85.
- 石田泰治 (1963): 三島市付近の地下水位と富士山の積雪について, 天気, **10**, 199-203.
- 上田英樹・藤田英輔・鶴川元雄・山本英二 (2010): リアルタイム傾斜データを用いた火山性異常地殻変動の自動検知と暫定変動源モデル自動推定手法の開発, 防災科学技術研究所研究報告, **76**, 21-32.
- 大久保修平 (2006): 重力変動と地殻変動, 測地学会誌, **52**, 245-252.
- 岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斉藤 清 (2001): 土壌雨量指数, 天気, **48**, 349-356.
- 沖 大幹 (2006): 水文モデル, 総合科学技術会議地球規模水循環変動研究イニシヤティブ報告書 地球規模水循環変動研究の最前線と社会への貢献, 2-2-3.
- 風間卓仁・大久保修平 (2010): 重力観測データに含まれる地下水擾乱の水文学的モデリング, 月刊地球, **32**, 215-218.
- 角屋 睦・永井明博 (1988): 長短期流出両用モデルの開発改良研究, 農土論集, **136**, 31-38.
- 上垣内修 (1986): 体積歪, 傾斜データに対する気圧の影響の補正に関する物理的考察, 験震時報, **50**, 41-50.
- 気象研究所 (2005): 地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究, 気象研究所技術報告, **46**, 128-136.
- 木村一洋・竹中 潤・甲斐玲子 (2008): 2005 年 7 月に東海地域で観測された短期的スロースリップに伴う歪変化とその監視, 験震時報, **70**, 45-62.
- 木村一洋・近澤 心・菅沼一成・草野利夫 (2012): EPOS4 における地殻変動の異常監視処理の高度化, 験震時報, **76**, 45-62.
- 小泉岳司・吉田明夫 (1989): 湯河原体積歪計に対する地下水の影響, 気象研究所研究報告, **40**, 21-28.
- 小林昭夫・松森敏幸 (1999): 埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 験震時報, **62**, 17-41.
- 小林昭夫 (2000): 体積歪計観測網による東海地震の前兆すべりの検知能力, 験震時報, **63**, 17-33.
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋 (2006): 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984~2005 年), 地震, **59**, 19-27.
- 小林昭夫・山本剛靖・近澤 心・木村一洋・吉田明夫 (2010): 三ヶ日観測点で夏季に見られる特徴的な体積歪・水位変化の原因特定とモデル化, 験震時報, **73**, 159-163.
- 小林慎太郎・丸山利輔 (1976): Powell の共役方向法によるタンクモデル定数の探索, 農業土木学会論文集, **65**, 42-47.
- 近藤純正 (1993): 表層土壌水分量予測用の簡単な新バケツモデル, 水文・水資源学会誌, **6**, 344-349.
- 近藤純正・本谷 研・松島 大 (1995): 新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量, 流出量, 積雪水当量, 及び河川水温の研究, 天気, **42**, 821-831.
- 産業技術総合研究所 (2013): 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2012 年 5 月~2012 年 10 月)

- (46), 地震予知連絡会報, **89**, 256-261.
- 末次忠司・河原能久・賈 仰文・俣 広恒 (2000): 都市河川流域における水・熱循環の統合解析モデルの開発, 土木研究所資料, **3713**, 1-75.
- 末廣重二 (1979): 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, **46**, 9-25.
- 菅原正巳 (1972): 流出解析法 (水文学講座 7), 共立出版, 257pp.
- 菅原正巳 (1979): 続・流出解析法 (水文学講座別巻), 共立出版, 269pp.
- 菅原正巳 (1985): タンク・モデル 河川の流量を雨量から算出する一つのモデルについて, 地学雑誌, **94**, 209-221.
- 杉原成満・福田慎哉・倉本和正・荒木義則・朝位孝二・古川浩平 (2011): SCE-UA 法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集 F6 (安全問題), **67**, 1-13.
- 田齋秀章・平松和昭・森 牧人・原田昌佳 (2006): SCE-UA 法を用いた TOPMODEL パラメータの特性評価, 九大農学芸誌, **61**, 261-272.
- 竹中 潤・宮越憲明・吉田明夫 (2001): 東海地域の体積歪計で観測された異常変化の特徴, 験震時報, **64**, 1-22.
- 田中寅夫 (1979): 傾斜計・伸縮計記録に現われる降雨の影響とそのシミュレーション, 測地学会誌, **25**, 91-100.
- 田中丸治哉 (1995): タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, **178**, 503-512.
- 土 隆一 (2007): 富士山の地下水・湧水のメカニズム, 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道 (編) 富士火山, 山梨県環境科学研究所, 375-387.
- 土木学会 編 (2000): 土木工学における逆問題入門, 土木学会, 158pp.
- 永井明博 (1995): 洪水流出タンクモデルの総合化に向けて, 農業土木学会論文集, **176**, 95-103.
- 中井専人・横山宏太郎 (2009): 降水量計の捕捉損失補正の重要性 - 測器メタデータ整備の必要性 -, 天気, **56**, 69-74.
- 西前裕司・涌井仙一郎 (1996): 松代における伸縮計および水管傾斜計に現れた降雨の影響とそのシミュレーション, 精密地震観測室技術報告, **13**, 17-27.
- 二瓶信一・檜皮久義 (1984): 三ヶ日における埋込式体積歪計に対する降雨の影響, 験震時報, **48**, 18-22.
- 二瓶信一・佐藤 馨 (1987): 埋込式体積歪計による観測 (2) - 歪観測における地下水調査, 験震時報, **51**, 93-106.
- 檜皮久義・佐藤 馨・二瓶信一・福留篤男・竹内 新・古屋逸夫 (1983): 埋込式体積歪計の気圧補正, 験震時報, **47**, 91-111.
- 福留篤男 (1984): 埋込式体積歪計による地球潮汐の観測, 験震時報, **48**, 23-34.
- 古屋逸夫・檜皮久義 (1984): 気圧変化及びレーリー波入射に対する埋込式体積歪計の応答, 験震時報, **48**, 1-6.
- 松島 功・田口陽介・木村一洋 (2008): 伊良湖歪計における地下水汲み上げによる歪変化の補正装置の概要, 験震時報, **71**, 137-141.
- 松本則夫・高橋 誠 (1993): 地震にともなう地下水位変化検知のための時系列解析 - 静岡県浜岡観測井への適用 -, 地震 2, **45**, 407-415.
- 山内常生・志知龍一・飯田汲事 (1971): 地殻変動の連続記録に現われる降雨によるノイズについて, 測地学会誌, **16**, 202-208.
- 山内常生 (1981): 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, **27**, 40-49.
- 山本剛靖・小林昭夫 (2009): 近畿地方北部で観測された地殻歪の長期的変化, 気象研究所研究報告, **60**, 17-24.
- 吉田明夫・二瓶信一・太田金房・薄田真司 (1984): 静岡と網代における体積歪観測孔内の水位変化と歪変化, 気象研究所研究報告, **35**, 199-207.
- Duan, Q., S. Sorooshian and V. K. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resource Research, **28**, 1015-1031.
- Hagiwara, T (1938): Observation of changes in the Inclination of the Earth Surface at Mt. Tsukuba (1st report), Bull, Earthq. Res. Inst., **16**, 366-371.
- Hagiwara, T (1941): Observation of changes in the Inclination of the Earth Surface at Mt. Tsukuba (second report), Bull, Earthq. Res. Inst., **19**, 218-227.
- Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., **29**, 27-43.
- Manabe, S. (1969): The Atmospheric Circulation and the Hydrology of the Earth's Surface, Monthly Weather Review, **97**, 739-774.
- Sacks I. S., S. Suyehiro, D. W. Evertson and Y. Yamagishi (1971): Sacks-Evertson Strainmeter, Its Installation in

Japan and Some Preliminary Results Concerning Strain Steps, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **22**, 195-208.

Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991): A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.

(編集担当 坂井孝行・森 滋男・瀧山弘明)