

地殻変動連続観測における季節変化

寺石眞弘・大谷文夫・竹内文朗・森井亙・尾上謙介*
細 善信・園田保美・和田安男・中村佳重郎

*京都光華女子大

要 旨

これまで京都大学では、多くの観測坑道で伸縮計・傾斜計などによる地殻変動連続観測を行ってきた。これらの連続観測は観測坑道を取り巻く環境・立地条件により、経年変化速度、季節(年周)変化など、観測点毎に非常に多様性に富んでいる。一方近年においては、センサーやデータ収録の電子化、データ伝送の発達により、歪分解能や時間分解能の高精度化が進められ、スロースリップの検出、超長周期の表面波や地球自由振動等の地震波形など、地震学分野への取り組みがなされるようになって来た。このような動きの中、これまでの連続観測記録、観測施設の系統的評価が必要だと考えられる。本稿では防災研究所地震予知研究センターで展開している各地の地殻変動連続観測点の歪データの季節変化を同一方法で抽出し、ノイズレベルなどの比較・評価を行った。

キーワード: 地殻変動連続観測, 季節調整プログラム, 季節変化, 経年変化

1. はじめに

地殻変動連続観測における個々の観測坑道は、連続観測の目的で新たに掘削した坑道や、鉱山の廃坑・旧防空壕を整備したものなど様々で、観測坑の被りや地質・地形などの違いにより、観測記録は主に気温や降雨による短期間の影響のみならず、数ヶ月にも及ぶ長期間の擾乱を受ける。このため、温度や降雨の影響は、長期間の連続記録においては季節変化として記録され、各観測点の環境の違いにより季節変化はそれぞれ違った様相を示している(寺石ら, 1996)。連続観測の経年変化を検討する上で、季節変化は大きなノイズであり、季節変化の解析は重要な課題となっている。

これまで地殻変動連続観測における伸縮記録や傾斜記録に対し、その長周期成分の解析において、季節変化は1年周期であるので、365日移動平均を行えば季節変動はなくなる、ということから移動平均をトレンド(経年変化)とし、またオリジナルデータからトレンド成分を差し引いた結果を季節変化として分離してきた。この方法は簡単であるが、解析の目的である必要なシグナルをもならしてしまい、また時系列の最初と最後に欠測が生じる。今回は統計的

モデリングの方法、季節調整プログラムを適用し、伸縮計記録の長周期変動における年周変化パターンをモデル化して季節変化の抽出を試みた。またこの方法では、坑内温度や気圧記録などの並行観測値を使わないため、並行観測のない場合に有効で、各観測記録に対して同じ条件で解析できる。解析の対象としては、地震予知研究センターが観測を管理している稼働中の主な観測点で、近畿地方とその周辺部、および宮崎観測所で管轄している日向灘地殻活動総合観測線の7点とした。今回解析対照とした観測点の配置をFig.1に、本文の最後の方になるがTable 1に観測点情報を示す。

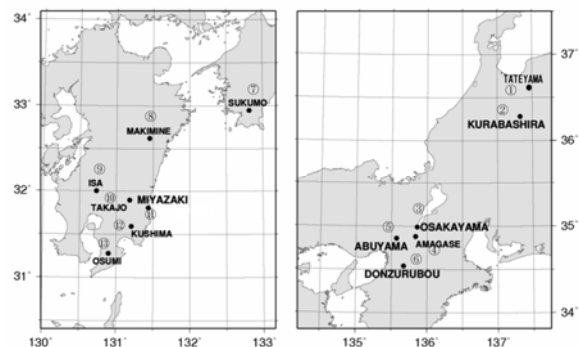


Fig. 1 Location map of observatories.

2. 解析プログラムとデータ

使用した解析プログラムにおける季節調整とは、経済統計の時系列データから季節要因を取り除き、分析しやすい形にすることで、解析プログラムは、時刻 n における時系列 y_n を

$$y_n = t_n + s_n + p_n + w_n \quad (1)$$

のように、トレンド成分 t_n 、季節成分 s_n 、定常AR成分 p_n 、観測ノイズ w_n の4成分に分解する。但し、各成分は、

$$\Delta^k t_n = v_{n1} \quad (2)$$

ここではトレンドの滑らかさを表示する式 $k=2$ を使用、

$$s_n = s_{n-p} + v_{n2} \quad (3)$$

p は季節変化周期、

$$p_n = \sum_{i=1}^{m3} a_i p_{n-i} + v_{n3} \quad (4)$$

$m3$ は自己回帰項数、誤差項は

$w_n \sim N(0, \sigma^2)$, $v_{n1} \sim N(0, \tau_1^2)$, $v_{n2} \sim N(0, \sigma_2^2)$, $v_{n3} \sim N(0, \sigma_3^2)$ のようになる。このプログラムを地殻変動連続観測の伸縮計記録に適応し、オリジナルデータ(OR)を季節成分(SE)、定常AR(自己回帰)成分、トレンド成分(TR)、観測ノイズ(WN)の4つの成分に分解した。各成分を簡単に説明すると、

- ・季節成分(SE)：統計モデリング上では、毎年繰り返して現れる変動パターンの部分であり、毎年同じパターン。
- ・定常AR成分(AR)：自己回帰モデル、循環変動な

どの短期的な変動成分。

- ・トレンド成分(TR)：長期的傾向変動
- ・観測ノイズ(WN)：上記3つの変動の残差で、不規則要素で起きる変動。

である。一方、地殻変動で表現する季節変化(or年周変化)はオリジナルデータからトレンド成分(経年変化)を差し引いた残差であり、毎年同じパターンとは限らない(大谷ら, 1992; 寺石ら, 1996)。特に降雨による擾乱が大きく、また長期に及ぶ場合は、降雨量や降雨時期の違いにより年毎の変動量や位相が大きく異なる。

解析は各観測点の約10年間について行うが、使用するデータはできるだけ周期性を保持するため、基の1日1点(毎0時)365日(閏年では366日)データから、8月31日及び閏年の場合2月29日を省いて1年364データにそろえ、そこから7日毎のデータを抜き取り1年52データとした。

3. 解析結果

伸縮記録に対し、季節調整プログラムを適用した解析結果をFig. 2に示す。全観測点のうち、立山、天ヶ瀬、宿毛の3観測点の結果で、観測ノイズを除く主な分解成分である季節成分(SE)、定常AR成分(AR)、トレンド成分(TR)、及びオリジナルデータ(OR)について示した。またFig. 3に全観測点の季節成分と定常AR成分が示されている。この2つの図から、季節調整プログラムで分解された伸縮記録の季節成分(SE)と定常AR成分が、伸縮記録における季節変化に相当すると想定される。すなわち、分解された季節成分は全期間(今回の場合10年間)の平均化された年周変化成分で、さらに各年で年周変化から逸脱した部分を、短期的変動成分として自己回帰モデルで抽出されるのが、定常AR成分であると考えられる。またトレンド成分(TR)は、連続観測記録の365日移動平均処理で表現される経年変化に相当すると考えられる。以降、季節調整プログラムで求めた伸縮記録の季

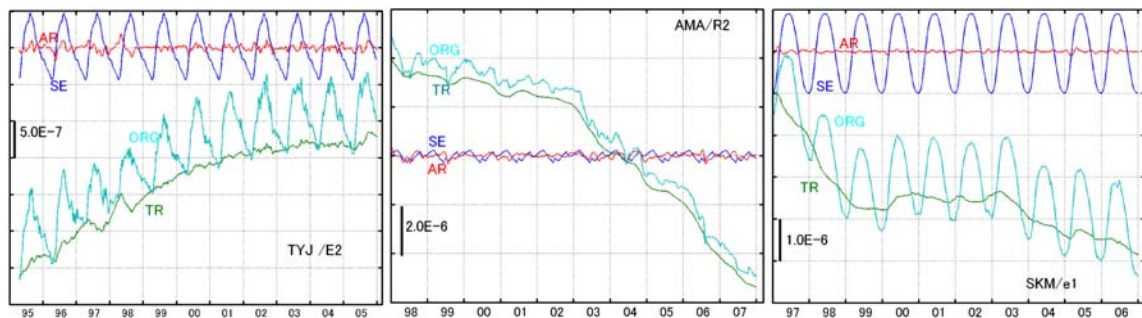


Fig. 2 An analysis result of the ground-strain by seasonal adjustment model. (SE):seasonal component. (AR):stationary AR component. (TR):trend component. (ORG):original data.

節成分(SE)と定常AR成分(AR)の和を伸縮記録の季節変化として取り扱い、各観測点の季節変化について述べる。また、定常AR成分(AR)を単にAR成分と表記する。

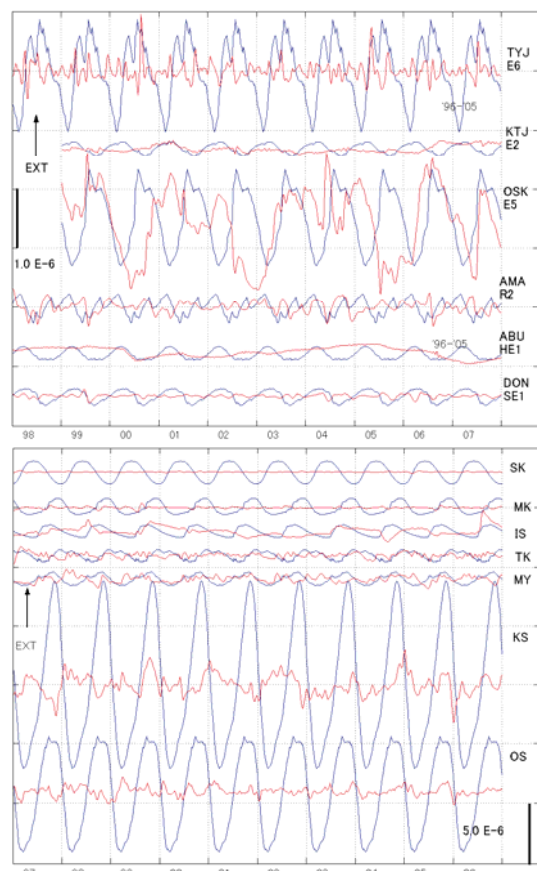


Fig. 3 Seasonal component(SE) and stationary AR component of ground-strain at each station.

Fig. 2及びFig. 3で明らかなように、各観測点の季節変化はそれぞれ違った様相を示すが、季節成分(SE)とAR成分の特徴や相互関係から、系統的に区分することができる。例えば、Fig. 3で分かるように、

- ・AR成分に比べ季節成分(SE)が大きい変化量で現れる場合、或いは同程度の場合。
- ・季節成分(SE)成分の周期曲線の滑らかさの違い。

後述するが、季節成分(SE)成分とAR成分の和である、

- ・季節変化の年毎の相違程度。

により区分できる。各観測点の伸縮記録は主に降雨か温度の影響を受け、それが季節変化を引き起こす大きな要因となっているが、上記の特徴の違いと季節変化を引き起こす要因とを関連づけると、各観測点について次の3つに大別できた。

[1]気温の影響が大きい観測点。

AR成分に比べ季節成分(SE)が大きく、季節成分(SE)の周期曲線が滑らかな場合で、季節変化の年毎の差は小さい。

[2]降雨の影響が大きい観測点。

AR成分と季節成分(SE)が同程度で、季節成分(SE)の周期曲線に凹凸が、特に降雨時期に現れる。季節変の年毎の差は大きい。

[3]気温と降雨の両方、同程度に影響を受ける観測点。

基本的には[1]の特徴と同様に、AR成分に比べ季節成分(SE)が大きい、季節成分(SE)の周期曲線に凹凸が見られる。したがって、季節変化は毎年同形の曲線を示すが、降雨時期に大きな乱れが生じる。

以下に、項目ごの詳細を述べ、各観測点について3つに区分した項目を適用した結果を示す。Fig. 4は、すでに[1], [2], [3]の項目に振り分けた各観測点の季節成分(SE)を並べた結果である。

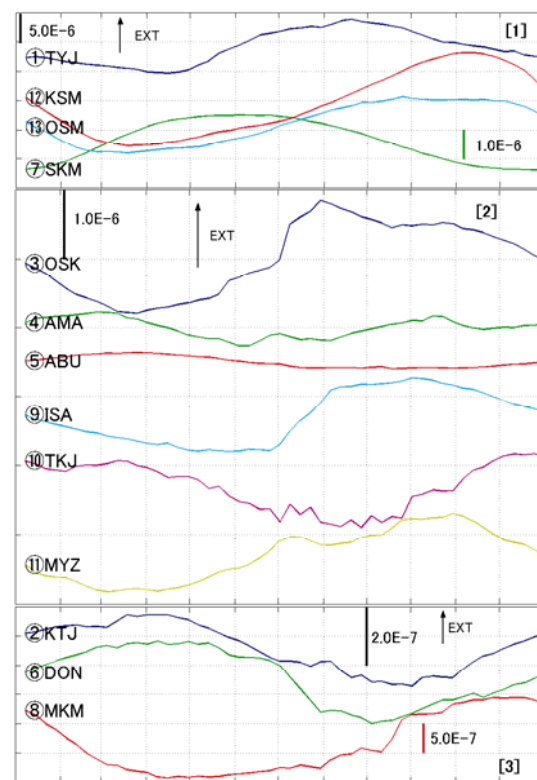


Fig. 4 Seasonal component(SE) of ground-strains at each station. [1]:prime factor of disturbance source is temperature. [2]:prime factor of disturbance source is rainfall. [3]:prime factor of disturbance source is temperature and rainfall.

3.1 温度の影響が大きい観測点

伸縮記録において温度による擾乱が大きい観測点は、観測坑道の長さが短くかぶりの厚さが薄い観測坑で、このため外気温が大きく影響していると思われる。温度変化による変動は、観測坑周辺の岩盤の熱膨張変化と観測計器に依存する変化等が考えられるが、外気温変動の伝導としての影響は、長期的に緩やかな擾乱として現れるので、Fig. 4の上段に見ら

れるように、

- ・季節成分(SE)は滑らかな周期曲線を示す。

また観測坑内や地盤の温度変化は、外気温変化に比べ位相や変化量に関して年毎の差が少ないと考えられ、季節成分(SE)だけで季節変化のパターンが示されると想定される。このため、

- ・季節成分(SE)に比べAR成分が小さい。

さらに、季節変化は季節成分(SE)とAR成分の和であるので、年毎に重ねてプロットすると、

- ・年毎の季節変化曲線は重なる。

季節変化の例としてFig. 5に立山と宿毛の10年間で年毎に重ねて(横軸を1年の時間軸で)示す。宿毛観測点は毎年の季節変化がきれいに重なり、季節成分(SE)も正弦波に似た滑らかな周期曲線で現れ、温度の影響を受けている事は明白である。立山の場合は、日照変化の影響が非常に大きいという特異性があり(京都大学防災研究所上宝観測所, 1989), Fig. 3やFig. 4[1]に示す季節成分(SE)は滑らかさに欠け、AR成分も凹凸が激しい。このように短期的な温度変化の影響も現れているが、Fig. 5に示すように年毎の季節変化は同じような傾向に重なる。季節成分の滑らかさという基準には反するが、後述したTable 1にも示すようにSE/AR比が2.54とAR成分に比べ季節成分(SE)は大きく、坑内温度や外気温との相関も強く温度の影響を大きく受けている事は明らかである。他に温度の影響が大きい観測点は、串間(KSM),大隈(OSM)がこれに当てはまるが、多雨時期に季節成分(SE)の滑らかさにやや欠ける部分もある。

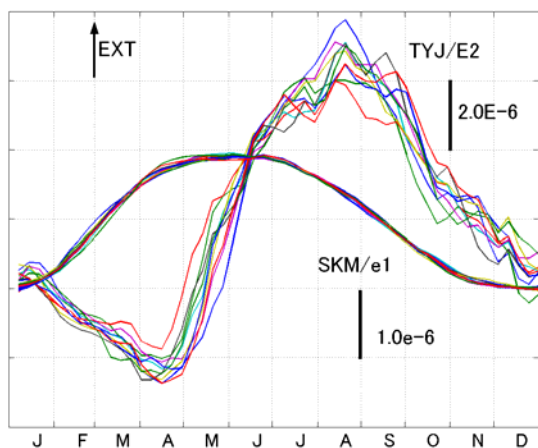


Fig. 5 Seasonal variations(SE+AR) of ground strains at TATEYAMA and SUKUMO Observatory.

3.2 降雨の影響が大きい観測点

降雨の影響が大きく現れる観測点は、観測坑道が長くかぶりが厚い観測坑道の場合である。ほとんどの観測点において、降雨の影響による伸縮変化は、

伸張と収縮(或いは収縮と伸張)を繰り返すが、かぶりが厚い観測坑道の場合、坑道内の恒温性は保たれる反面、降雨時の保水力が大きくなり、降雨後の回復変動が長期に及ぶと考えられる。これらの観測点の解析結果の特徴としては、温度変化の影響に比べ短い周期で急激な擾乱を受けるため、Fig. 4の中段に示されるように、

- ・季節成分(SE)の周期曲線は滑らかさに欠け、特に降雨量の増える6月下旬から11月上旬の乱れが大きい。

また、年毎に降雨の時期や降雨量が異なるため、季節成分(SE)だけでは季節変化を充分平均化できず、残りをAR成分で抽出すると考えられ、

- ・季節成分(SE)とAR成分とが同程度の振幅で抽出される。

Fig. 6に逢坂山と伊佐の季節変化の様子を年毎に重ねて示すが、

- ・年毎の季節変化曲線は位相がずれ、降雨量の違いにより振幅も年毎に違っているため、一様には重ならない。

逢坂山(OSK)、伊佐(ISA)の他、天ヶ瀬(AMA)、阿武山(ABU)、宮崎(MYZ)観測点がこれに当てはまる。高城(TKJ)観測点は、かぶりは薄い降雨の状況により極端ではないが坑内温度まで変化し、降雨時の影響は複雑で長期に及んでいると思われる。

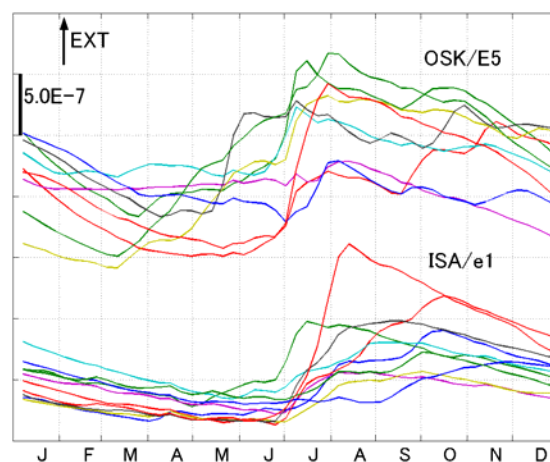


Fig. 6 Seasonal variations(SE+AR) of ground strains at OSAKAYAMA and ISA Observatory.

3.3 温度と降雨、同じ程度の影響を受ける観測点

この観測点は、蔵柱(KTJ)、屯鶴峯(DON)、槇峰(MKM)の3観測点で、季節成分(SE)をFig. 4の下段に、Fig. 7に屯鶴峯、槇峰の季節変化を年毎に重ねた結果を示す。主としての影響は温度であると思われ、Fig. 7で示されるように毎年ほとんど重なり合う季節変化ではあるが、季節変化のなだらかな曲線から

大きく逸脱している年が見受けられ、これらは降雨による擾乱と一致する。また季節成分(SE)の変化もFig. 4で示されるように、温度の影響が大きい観測点における曲線より凹凸があり、降雨の場合よりはなだらかで、変動量から見て降雨と温度の影響を同程度に受けていると考えられる。

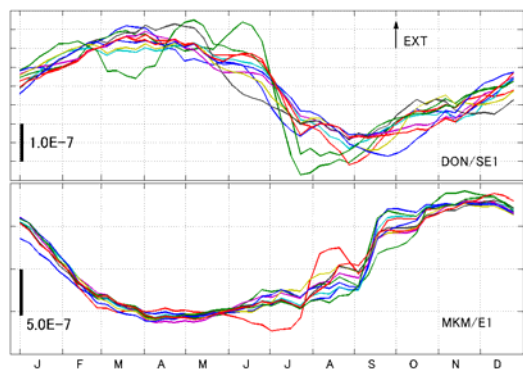


Fig. 7 Seasonal variations(SE+AR) of ground-strains at DONZURUBOU and MAKIMINE Observatory.

4. 気象データと伸縮記録

さらに季節変化の主因そのものである、降雨及び温度変化(坑内温度)と伸縮記録との相関を見るため、降雨量変化や温度変化についても季節調整プログラムを適用し、季節成分(SE)とAR成分から季節変化を求めた。降雨量の変動データとして、日雨量そのままでは短周期の変動が大きすぎるので、30日移動平均で平滑化し、伸縮記録と同様7日毎の値をデータとし解析した。解析結果の例として、宮崎における雨量の季節変化と伸縮記録(E1)の季節変化についての比較をFig. 8に示す。雨の降り方は非常に多様性があり、影響を受ける伸縮記録と対応しないように見える点もあるが、相関を取って見ると相関係数+0.70、降雨に対して伸縮変化は3週間遅れとなる。

坑内温度との相関についてはFig. 9に宿毛と立山の場合について示すが、オリジナルデータをどうしの比較からだけでも、伸縮変化の大きな変動は温度に起因していることが分かる典型的な観測点である。宿毛についてはFig. 9下部に、坑内温度(T2：坑口に近い場所に設置)と伸縮記録(E1)について、季節変化の結果を並べて示した。坑内温度と伸縮記録の季節変化の相関は強く、坑内温度変化に対する伸縮変化は4週間遅れ、相関係数-0.98が求まる。同様にFig. 9の上部に示した立山の場合、温度の影響を受ける観測坑道のなかでも特異なケースで、坑口に近い坑内温度は年間10℃の変動があり、坑内温度の季節変化も滑らかさに欠ける。温度変化の影響は伸縮記録に

強く反映され、坑口に近い温度変化と伸縮記録(E2)の季節変化の相関係数は0.94で位相は1週間遅れとなっている。Table. 1には最寄の気象庁の日平均気温との相関係数を示したが、外気温とも強い相関を示す。

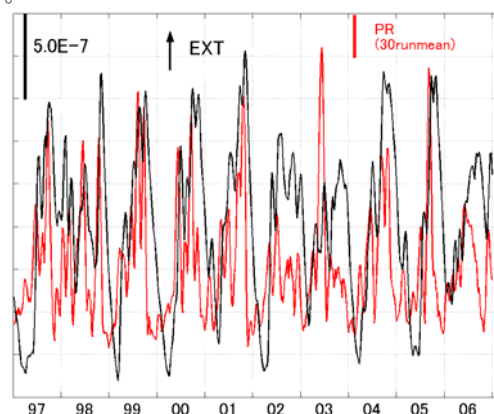


Fig. 8 Seasonal variations(SE+AR) of precipitation and ground-strains at MIYAZAKI Observatory.

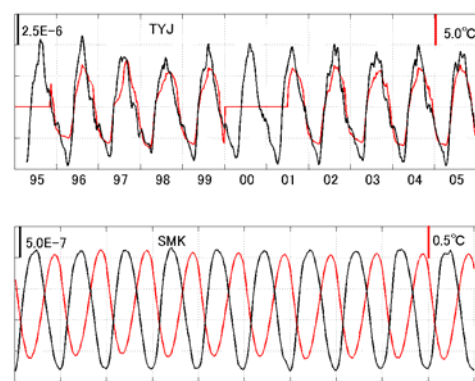


Fig. 9 Seasonal variations(SE+AR) of vault temperature and ground-strains at TATEYAMA(TYJ) and SUKUMO(AKM) Observatory.

5. まとめ

地殻変動連続観測における観測施設・観測データの系統的評価の一環として、近畿地方および周辺地域・日向灘地殻活動総合観測線の各観測点、13箇所約10年間の伸縮記録について季節変化の抽出・評価を行った。解析には季節調整プログラムを適用し、解析結果の季節成分(SE)と定常AR成分の和が伸縮記録における季節変化として、またトレンド成分は経年変化として抽出できることが分かった。今回のケース(季節調整プログラムによる解析)では、雨量や気温など伸縮記録に影響を及ぼす並行観測記録を必要とせず、季節変化を抜き出す方法として有効で

Table 1 The environment information of observation vaults, and an analysis result of the ground-strains by seasonal adjustment model.

観測点	略称	成分	被り (m)	入口距 離(m)	主な影 響	SE成分の 振幅	AR成分 の平均振	SE/AR	気温と の相関	坑内年間温度変化
①立山	TYJ	TTE2	40	4	温度	9.18E-06	3.62E-06	2.54	0.90	入口11.℃/奥1.0℃
②蔵柱	KTJ	KRE2	40	55	雨&温	2.47E-07	2.48E-07	1.00	-0.71	
③逢坂山	OSK	OSKE5	90	250	降雨	1.64E-06	2.39E-06	0.69		0.01℃
④天ヶ瀬	AMA	AMR2	140	400	降雨	4.87E-07	6.54E-07	0.74		0.01℃
⑤阿武山	ABU	ABHE1	40	82	降雨	2.33E-07	3.42E-07	0.68	-0.65	
⑥屯鶴峯	DON	DNSE1	30	50	雨&温	2.83E-07	2.19E-07	1.29	-0.88	
⑦宿毛	SKM	SKE1	28	8	温度	1.90E-06	2.26E-07	8.41	-0.90	T1=0.7℃,T2=1.8℃
⑧槇峰	MKM	MKE1	25	100	雨&温	1.37E-06	7.54E-07	1.82	0.92	3.0℃
⑨伊佐	ISA	ISE1	60	100	降雨	1.07E-06	2.63E-06	0.41		0.01℃
⑩高城	TKJ	TKE1	20	10	降雨	1.06E-06	1.52E-06	0.70	-0.77	1.0℃
⑪宮崎	MYZ	MYE1	60	100	降雨	1.13E-06	1.66E-06	0.68		0.01℃
⑫串間	KSM	KSE1	15	4.5	温度	1.59E-05	6.14E-06	2.59	0.93	4.0℃
⑬大隅	OSM	OSE1	15	2.5	温度	9.18E-06	2.33E-06	3.94	0.92	2.5℃

あった。季節調整プログラムにおいて、伸縮記録に対してAR(自己回帰)モデルが妥当であるかは保証されていないが、今回の実際の適用の結果では議論に耐える程度の近似は出来ると考える。Table 1に解析結果と各観測坑道の立地状況(被り、入口から観測坑までの距離等)の情報もまとめて掲載する。Table 1には坑内温度測定のある場合は年間変化量や、観測点によっては各地域の気象庁の気温変化との相関についても示した。

季節変化の要因としては主に温度と降雨で、温度の影響は年毎のパターンが類似しており、ノイズレベルは大きいを取り除くことができる。また今回解析に当たった伸縮記録については、分解された季節成分(SE)とAR成分の変化量の比によって、季節変化の主因がほぼ特定できた。Table 1からSE/ARの値が大きい(2.54~8.41)観測点の季節変化の主因は温度、SE/ARの値が小さい(0.41~0.74)観測点の場合は降雨、温度及び降雨の両方の影響を受けている場合の値としては、(1.0~1.82)となる。しかしこの結果は、別の新たな記録に対して当てはまるとは限らず、第一段階としての目安であり、最終的には前記した[1],[2],[3]で示される各解析成分の特徴や相互関係と照合する必要がある。

今回は全観測点について同一の手順で一様に解析を行ったが、季節変化の主因が降雨の場合や、温度と降雨が重なって影響を受けている場合、またAR(自己回帰)モデルにおいても全て同じ次数3を用いたが、各記録毎に最適な次数を採用するなど、個々

の観測点(観測成分)についてそれぞれの詳細な検討が必要である。今回のように、解析データの全期間に付いて季節調整プログラムを適用した場合、たとえば数年に一度の豪雨による大きな変化分も平均化され、季節成分に反映される。解消策としては、異常な降雨の部分を省いたデータを通常の時系列変化として解析する、或いはある区間に分けて、季節成分をモデル化し抽出するなど、各成分に適した工夫が考えられる。

謝 辞

データ解析にあたり、「岩波コンピュータサイエンス FORTRAN 77 時系列解析プログラミング(北川源四郎 1993)」から、「季節調整プログラム」を使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 京都大学防災研究所上宝地殻変動観測所 (1989) : 立山における地殻変動観測 (1989年9月~1989年1月), 地震予知連絡会会報, 42,355-358
- 寺石眞弘・大谷文夫・園田保美・古沢 保 (1996) : 日向灘地殻活動総合観測線による地殻変動連続観測—経年変化と季節変動—, 京都大学防災研究所年報, 第39号B-1, pp. 227-240.
- 北川源四郎 (1993) : 岩波コンピュータサイエンス FORTRAN 77 時系列解析プログラミング

Seasonal Variations in the Continuous Observations of the Crustal Movement

Masahiro TERAISHI, Kensuke ONOUE*, Fumio OHYA, Kajuro NAKAMURA, Fumiaki TAKEUCHI,
Wataru MORII, Yoshinobu HOSO, Yasumi SONODA and Yasuo WADA

*Kyoto Koka Women's University

Synopsis

We have operated some observatories for crustal deformations with extensometer, but these instruments and observation vaults have various characteristics because of long history of installation and configuration of the observation network. In recent years, extensometer records have been used not only for crustal movement research but also for DC-seismology. We intend to improve the accuracy of the observation to the level enough to study recent interested geophysical phenomena. As the second step of quantitatively assessment of each instrument, we will evaluate the seasonal variations and noise level by the common procedure in all available records with extensometers operated by RCEP .(The first step was the report about the tidal constants.)

Keywords: continuous observations of the crustal movement, seasonal adjustment model, seasonal variation, secular variation