

短基線による地電位差観測の長期安定性に関する調査

森永健司¹, 外谷 健²

¹地磁気観測所観測課, ²元地磁気観測所観測課

2015年5月25日受領, 2015年10月5日改訂, 2015年10月9日受理

要 旨

地磁気観測所における地電位差観測において、降水時の接触電位差の変動は長年の課題となっている。この課題解決に向けて、本研究では複数の銅板電極を使用した多極法による地電位差観測と、平衡電極を使用した観測を実施し、観測データの長期安定性や降水による影響の違いについて調査した。

調査の結果、以下のことが確認できた。

- ①平衡電極は長期的な地電位差観測には適さない。
- ②降水の影響はペアとなる電極埋設場所のローム層の厚さの違いと関連している。
- ③電極間に温度差がある場合、温度差に比例する電位差変動が観測される可能性が高い。

1. はじめに

地磁気観測所は1932年の第2回国際極年を機に地電位差観測を開始し、現在まで80年以上にわたり東西、南北の2成分の地電位差の観測を行ってきた。しかしながら、常に同じ場所、同じ電極を使用して観測を行って来たわけではない。表1に地磁気観測所における地電位差観測に使用されてきた電極間の距離を示す基線長及び、電極の変遷を、図1に地電位差観測の長期安定性の評価の目安として観測値の月平均値のプロットを示す。

地電位差観測の変遷で特に大きな変更として、1988年に地磁気観測所構外に電極を埋設して実施していた観測（長基線による観測）が土地借用などの諸事情によりできなくなり、構内に埋設した電極を使用した観測（短基線による観測）に切替えたことが上げられる。

当所の地電位差観測の主な目的は、地磁気変動に伴う電位差（誘導電位差）の変動を観測することである。地電位差の観測値には、誘導電位差と電極と土壌との分極による電位差（接触電位差）が混在している。誘導電位差は電極間の距離に比例して大きくなるが、接触電位差は電極間の距離に依存しない。長基線による観測から短基線による観測に変更する場合、誘導電位差は小さくなるが接触電位差の大きさは変わらないため、結果として得られる電位

差（誘導電位差+接触電位差）に占める接触電位差の割合が大きくなる。接触電位差が常に一定であれば問題は無いが、接触電位差は、周辺土壌の状態の変化により変動し、特に短時間で大量の降水があった場合に顕著に変動することがわかっている（山口 石井 (1984)）。短基線による観測に変更する際に、降水による接触電位差の変動をいかに小さくできるかが大きな課題となっていた。

このような理由から、短基線による観測に変更するにあたって接触電位差が小さく安定性に優れているとされていた平衡電極（鉛・塩化鉛）を使用することとなった（長谷川 他 (1987), 小池 他 (1988)）。しかし、図1で分かるようにこの平衡電極による観測はすぐに非常に不安定となり、報告値の計算方法から見直さねばならない事態に陥った。

このため、1991~92年に銅板電極を製作して埋設し、定常観測のN,S,E,W極を平衡電極から順次銅板電極に切り換えた（大和田 他 (1992), 小池 他 (1994)）。現在までこの銅板電極を使用した観測が継続されているが、図1を見てもわかるように、平衡電極を使用していた期間より安定した観測データが得られているものの、長基線による観測の時代に比べると安定しているとは言いがたい。

銅板電極を使用した短基線による観測は、平衡電極の不安定さという問題に関しての緊急的な対応で

あり、短基線による観測に変更する際に課題となっていた、降水による接触電位差の変動をいかに小さくするかという課題については検討されていない。

銅板電極を使用した短基線による地電位差観測の開始とほぼ並行して、山崎らは複数の電極を使用した多極法による地電位差観測手法についての調査研究を行っている(山崎 他(1990), 清水 山崎(1991), 大川 他(1995))。多極法は多数の電極により得られる信号から、降水による接触電位差の変動を除去することを目的としている。しかしながら、多極法による地電位差観測は研究担当者の人事異動や雷災による収録装置の故障により、その有効性への結論は出ておらず、依然として接触電位差をいかに小さくするかという課題は未解決の問題として残されている。

本研究では、未解決のままとなっている接触電位差の変動を小さくするという問題の解決に向けて、多極法による地電位差観測のために埋設された試験電極を使用した複数のペアによる地電位差観測を実施し、観測データと地磁気観測所構内のVLF-MT観測結果と比較して、電極埋設場所の違いによる降水時の変動の違いについて確認した。並行して市販の平衡電極を購入し、定常観測で使用している銅板電極とはほぼ同じ場所に埋設し、平衡電極による地電位差観測の再検証を行った。また、観測データに見られた年周変化について地温データと比較し、接触電位差の変動と地温変化の関係について調査した。

2. 観測機器

2.1 電極

地磁気観測所構内には、定常観測で使用している電極のほかに多くの試験電極が埋設されている。表2に、電極と観測室間の通線がなされている電極の一覧を示す。本研究ではこれらの内、銅板で作られ

た電極のみを使用し、92C電極を中心極として他の電極を組み合わせた多極法と同様の観測を実施した。

合わせて、現用電極(銅板)と同じ位置に新規に平衡電極を埋設し、現用電極との比較を行った。平衡電極は、中のゲルを交換せずに数年間使用可能な市販品の鉛-塩化鉛電極(「自然電位長期観測用非分極性電極(PE6)」(Phoenix geophysics Limited製)を購入し、定常観測に使用している電極(N,S,E,W)の傍の深さ約0.8mに埋設した。新たに埋設した平衡電極は埋設場所に応じて06N, 06S, 06E, 06Wと名づけた。

2.2 収録装置

多電極を用いた地電位差データを観測するために、横河電機株式会社のModel 4370 μ R1800打点式記録計を使用した。収録チャンネル数は、12chで、サンプリング間隔は5秒である。 μ R1800は打点式のペンレコーダーであるが、オプション機能としてRS422-Aに準拠した通信用インターフェースを兼ね備えている。データを効率よく収集、解析するために、RS422-Aの出力データをRS232C準拠の信号に変換するシグナルコンバーターを取り付け、PC端

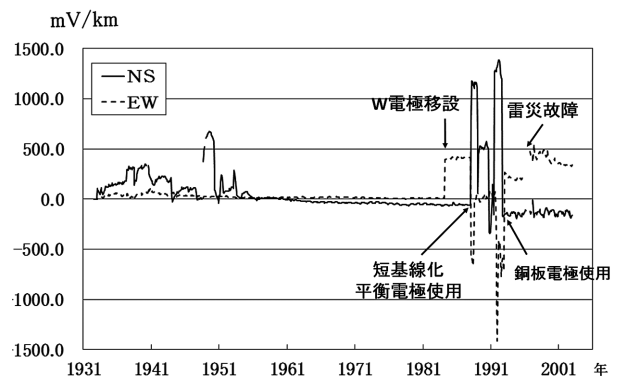


図1 地電位差観測値の月平均値プロット

表1 基線長および電極の変遷

年月	南北 (NS)					備考
	基線長	電極素材	電極寸法	枚数	埋設深度	
1932.08~	100m	銅板	70cm×70cm	2枚/極	3m	カシの木の炭素粉でコーティング
1933.08~	1,120m		100cm×100cm			
1937.05~	1,040m					
1944.01~	895m					
1948.08~	900m	炭素棒	5cmφ×30cm			
1988.03~	180m	鉛・塩化鉛	5cmφ×20cm	2本/極	4to1.5m	
1990.09~	300m				~3m	
1991.07~	180m				~3m	
1992.09~	180m				~3m	
年	東西 (EW)					備考
	基線長	電極素材	電極寸法	枚数	埋設深度	
1932.08~	100m	銅板	70cm×70cm	2枚/極	3m	カシの木の炭素粉でコーティング
1933.08~	1,500m		100cm×100cm			
1983.03~	1,200m	銅板(W)	140cm×37cm		4m	W極のみ移設
1988.03~	190m	鉛・塩化鉛	5cmφ×20cm	2本/極	4to1.5m	
1993.01~		銅板	100cm×50cm	4枚/極	3m	

末で多電極のデータを収録するソフトウェアの開発をおこなった。図3に収録システムの写真を示す。データ収録プログラムはC++言語で作成し、12ch分のデータを1日毎にテキスト形式で保存した。収録されるデータの最小分解能は0.1mVである。

2.3 収録チャンネルについて

多電極による地電位差観測装置は12chの電極間データを収録できる。1から8チャンネルは92C1電極を中心とした多極法のデータ（順に91N3, 92NE4, 92SE1, 91S3, 91E3, 92SW1, 91W3, 72N5との組み合わせ）を、9と10チャンネルは新

規埋設した平衡電極データ（06N-06S, 06E-06W）を、11と12チャンネルは定常観測と同じ電極の組み合わせ（91N2-91S1, 91E2-91W1）のデータを収録することとし観測を開始した。

しかしながら、この期間に定常観測の収録器や信号ケーブルの不調等のトラブルが発生し、対応のために何度かチャンネル構成の変更を行っている。表3に、多電極観測における収録チャンネルの更新履歴を示す。

観測は2006年8月に開始し、2009年7月まで続けられたが、2008年8月以降は収録装置の故障が多発し正常なデータが取れない状態となったため、本研

表2 地磁気観測所構内に埋設されている電極一覧
本研究で使用した電極は太字で示している。

電極名	電極素材	埋設深度(m)	埋設年	座標(m)		備考
				X(N+)	Y(E+)	
72N1	鉛極	3.0	1972	91	-8	木炭で電極周りをコーティング
72N3	炭素棒	1.5				
72N5	銅板	3.0				
72N2	鉛極	3.0	1972	144	-10	
72N4	炭素棒	3.0				
72S1	鉛極	3.0	1972	-119	-10	木炭で電極周りをコーティング
72S2	鉛極	3.0				
72S3	炭素棒	3.0				
72S4	銅板	1.5				
72S5	銅板	3.0				
86N1	鉛・塩化鉛	15.0				1986
87N1	白金	1.5	1987	108	17	鉛・塩化鉛電極は地磁気観測所職員が作成
87N2	白金	1.5				
87N3	鉛・塩化鉛	1.5				
87N4	鉛・塩化鉛	1.5				
87N5	鉛・塩化鉛	1.5				
87N6	銅板	1.5				
87S1	白金	1.5	1987	-116	-54	鉛・塩化鉛電極は地磁気観測所職員が作成
87S2	白金	1.5				
87S3	鉛・塩化鉛	1.5				
87S4	鉛・塩化鉛	1.5				
87S5	鉛・塩化鉛	1.5				
87S6	銅板	1.5				
91N1	銅板	2.2	1991	64	6	1992.9より定常観測用として使用 4枚目のみ黒鉛粉でコーティング
91N2	銅板	2.2				
91N3	銅板	2.2				
91N4	銅板(黒鉛粉)	2.2				
91S1	銅板	2.5	1991	-116	6	1992.9より定常観測用として使用 4枚目のみ黒鉛粉でコーティング
91S2	銅板	2.5				
91S3	銅板	2.5				
91S4	銅板(黒鉛粉)	2.5				
91E1	銅板	2.5	1991	-125	-10	1993.1より定常観測用として使用 4枚目のみ黒鉛粉でコーティング
91E2	銅板	2.5				
91E3	銅板	2.5				
91E4	銅板(黒鉛粉)	2.5				
91W1	銅板	2.5	1991	-125	200	1993.1より定常観測用として使用 4枚目のみ黒鉛粉でコーティング
91W2	銅板	2.5				
91W3	銅板	2.5				
91W4	銅板(黒鉛粉)	2.5				
92C1	銅板	1.5	1992	0	0	多極法の中心電極 電極位置座標中心
92C2	銅板	1.5				
92C3	銅板	1.5				
92C4	銅板	1.5				
92NE1	銅板	1.7	1992	11	98	
92NE2	銅板	1.7				
92NE3	銅板	1.7				
92NE4	銅板	1.7				
92SW1	銅板	1.5	1992	-155	-124	
92SW2	銅板	1.5				
92SW3	銅板	1.5				
92SW4	銅板	1.5				
92SE1	銅板	1.5	1992	-66	55	
92SE2	銅板	1.5				
92SE3	銅板	1.5				
92SE4	銅板	1.5				
06N	鉛・塩化鉛	0.8	2006	64	6	電極はPhoenix geophysics Limited製
06S	鉛・塩化鉛	0.8	2006	-116	6	
06E	鉛・塩化鉛	0.8	2006	-125	-10	
06W	鉛・塩化鉛	0.8	2006	-125	200	

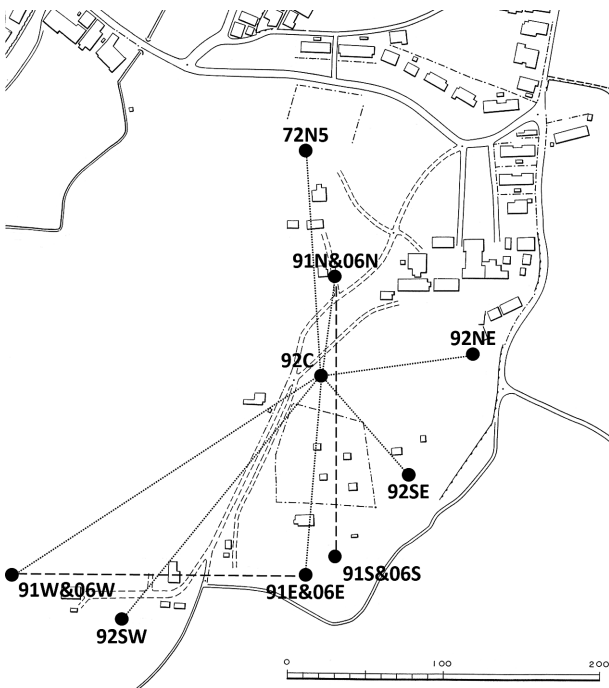


図2 本研究で使した電極の配置図
92C 電極を中心に点線で繋いでいるのが多極法による基線、破線で繋いであるペアは定常観測基線および新規埋設した平衡電極の基線を表している。

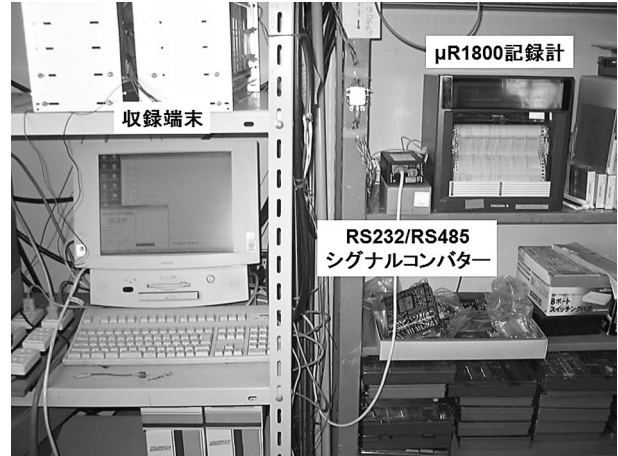


図3 多電極による地電位差観測装置のハードウェア構成

表3 収録装置への接続電極の履歴

年.月.日	ch01	ch02	ch03	ch04	ch05	ch06
2006. 8. 20	92C1-91N3	92C1-92NE4	92C1-92SE1	92C1-91S3	92C1-91E3	92C1-92SW1
2007. 5. 18				91N1-91S1		
2007. 7. 12				92C1-仮設S		
2007. 7. 30				91N1-91S2		
2007. 8. 8						
2007. 8. 20						

年.月.日	ch07	ch08	ch09	ch10	ch11	ch12
2006. 8. 20	92C1-91W3	91C1-72N5	06N1-06S1	06E1-06W1	91N2-91S1	91E2-91W1
2007. 5. 18	91N2-91S2					
2007. 7. 12	92C1-仮設N					
2007. 7. 30	92C1-91W2					
2007. 8. 8		欠測				
2007. 8. 20		91E1-91W1				

究で使用したデータ期間は、2006年8月から2008年7月までの2年間とした。

3. 観測結果

観測データの長期安定性を評価するために、5秒サンプリングで得られた各チャンネルの観測データを24時間平均して日平均値を作成した。図4に92C1極を中心とした多極法の各チャンネルの日平均値と日降水量のプロットを、図5に定常観測電極である91N-91S, 91E-91W (銅板) と、新規埋設した06N-06S, 06E-06W (鉛・塩化鉛) の観測データの日平均値と日降水量のプロットを示す。

図4の多極法で収録したデータを見ると、72N5, 91E3, 92SW1, 91W2との組み合わせは降水による影響が少ない(変動が小さく比較的早く元の状態に戻る)。逆に、91N3, 92NE4, 91S3, 92SE1との組み合わせは降水の影響が大きい(変動が大きく元に戻るのに時間がかかる)。

降水時のデータを見ると、ほとんどが降水により急激に変動した後、元の状態に戻ろうとするが、2006年12月下旬の91S3と2007年7月中旬の91N3は降水時に大きくステップ状に変化し元に戻っていない。原因は不明である。

降水以外の変化傾向に着目すると、72N5, 91N3,

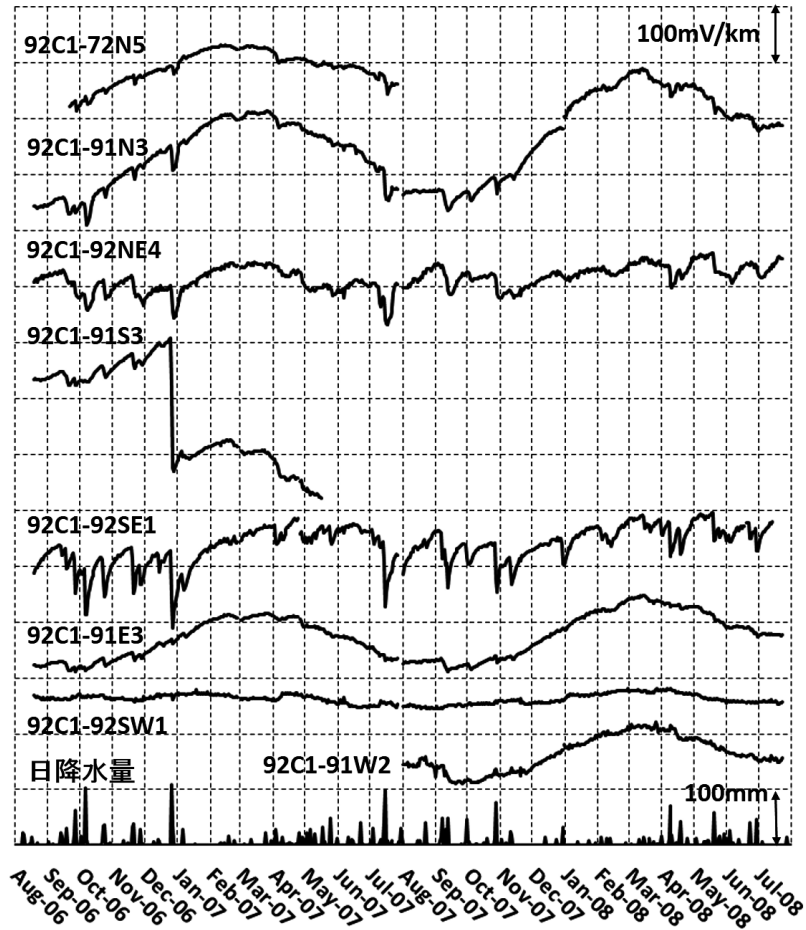


図4 92C1電極を中心とした多極法による観測データの日平均値の変動と日降水量
 プロット表示用に各観測データのオフセット値を調整している。

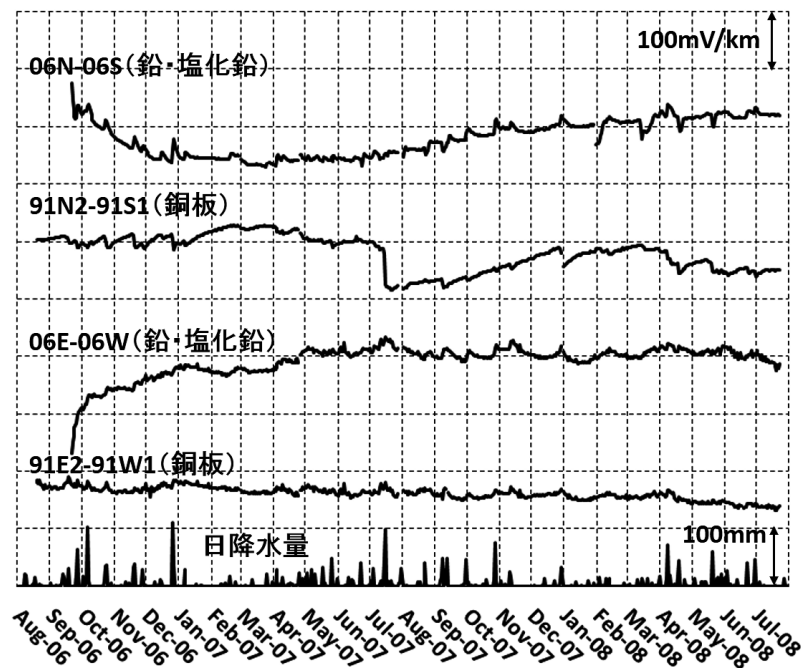


図5 定常観測電極（銅板）と、平衡電極（鉛・塩化鉛）による観測データの
 日平均の変動と日降水量
 プロット表示用に各観測データのオフセット値を調整している。

91E3, 91W2との組み合わせでは明瞭な年周変化が見られる。途中で大きくステップ状に変化した91S3も、このステップ状の変化を除くと年周変化があるように見える。92NE4, 92SE1は降水による変動が多発しており、年周変化があるのかどうかの判別がつかない。92SW1は非常に小さな年周変化があるようにも見えるが、他の年周変化が見られた電極との組み合わせと比較するとほとんど無いといっていよう。

次に図5の銅板電極による定常観測データ(91N2-91S1, 91E2-91W1)と、平衡電極による並列観測データ(06N-06S, 06E-06W)を見ると、ともにNS成分のほうが降水による影響が大きい。

91N2-91S1は、2007年7月中旬の降水時に大きくステップ状に変化し戻っていない。これは多極法の92C1-91N3で見られた変化と同じである。しかし、92C1-91S3で見られた2006年12月下旬のステップ状の変化は91N2-91S1では見られない。

平衡電極を使用した06N-06S及び06E-06Wのデータには、埋設後半年ほど初期ドリフトと見られる変動が確認できる。その後、06N-06Sは緩やかに上昇し続けるような変化が見られる。06E-06Wは初期ドリフト後ほぼ横ばいで推移するが、91E2-91W1と見比べると、波打つような変動が大きくなっている。

4. 考察

4.1 平衡電極

鉛・塩化鉛で製作された平衡電極は、電極と周辺土壌間で電荷のやり取りがなく周辺土壌のイオン濃度の変化を少なくすることができるため、銅板電極よりも接触電位差の変動が小さく安定した計測ができると期待されていた(小池, 仲谷 1986)。しかしながら、先に述べたように、1988年の短基線化時に開始した平衡電極による地電位差観測は非常に不安定であった。

今回改めて市販の鉛・塩化鉛平衡電極による試験観測を実施したが、降水による異常変動は平衡電極でも見られた。降水の影響が小さいことが期待されていたが、埋設深度が浅いことを考慮しても、期待通りの結果は得られなかった。さらに、銅板電極と比較して測定値のオフセット値が不安定な印象を受ける。埋設後しばらくは埋め戻した土が締まってゆく過程での初期ドリフトがあることは予想できたが、その後も06N-06Sは不自然な上昇をしているし、06E-06Wは銅板電極のペアである91E2-91W1と比較して、不安定な印象を受ける。

購入した平衡電極のカタログでは、3年間は使用できるとのことであったが、鉛・塩化鉛の軸の周囲

に充填されている接地抵抗低減剤が徐々に劣化してゆくことにより、長期的に不自然な変化が現れている可能性がある。

過去の観測結果および、今回の調査結果を踏まえると、平衡電極は長期的な地電位差観測には適さないと考えられる。

4.2 埋設場所による降水の影響の違い

降水による影響は電極の組み合わせにより大きく異なっていた。電極は同じ銅板を使い、同じ加工をして同じように埋設していることから、埋設場所の地下構造が大きく影響していること推測される。

地磁気観測所構内の地下構造を示すものとして、1989年に92SWと91W電極の中間あたりで実施されたボーリングによる地質調査の結果が残されている。調査結果によると、ボーリング実施場所では、地下約2.5mまでがローム層、2.5m~5.5mが粘土層であった。

また、2007年に構内407点でのVLF-MT観測による構内の比抵抗分布が調査されている。その結果を基に構内の表層の厚さを2層構造と仮定し、1989年に実施したボーリングによる地質調査の結果と整合するように表層の比抵抗を150Ωmと固定して、表層の厚さと下層の比抵抗をsimplex法により最適化して求めた資料が残されている。図6にVLF-MT観測結果から解析した表層の深さと電極埋設位置を重ねた図を、図7に解析した下層の比抵抗と電極埋設位置を重ねた図を示す。

図6の表層の厚さと各電極の埋設場所の関係をみると、92C, 92SWは0-4m, 91E, 72Nは約5m, 91N, 92NW, 91Sは7.5m-10m, 92SEは10m以上という配置となっている(91WはVLF-MT観測範囲外のため不明)。図4の観測データと比較すると、中心極である92C埋設場所の表層の厚さと、ペアとなる電極埋設場所の表層の厚さとの差が大きいほど降水の影響が大きい傾向がある。図7の下層の比抵抗と電極埋設場所による降水の影響の違いについては関連性が見られない。

土壌の性質として、ロームは浸水率が高く、粘土は浸水率が低い。降水により発生した地下水は図8で示す模式図のように、粘土層に到達すると粘土層の傾斜に沿って高いほうから低いほうへ流れてゆくと考えられる。粘土層が浅い場所には地下水は溜まらないため比較的早く乾燥するが、粘土層が深い場所には地下水が溜まりやすく長時間にわたり湿った状態になる。

電極埋設場所の表層の厚さが異なるペアによる観測ほど降水時の変動が大きくその影響が長時間に及

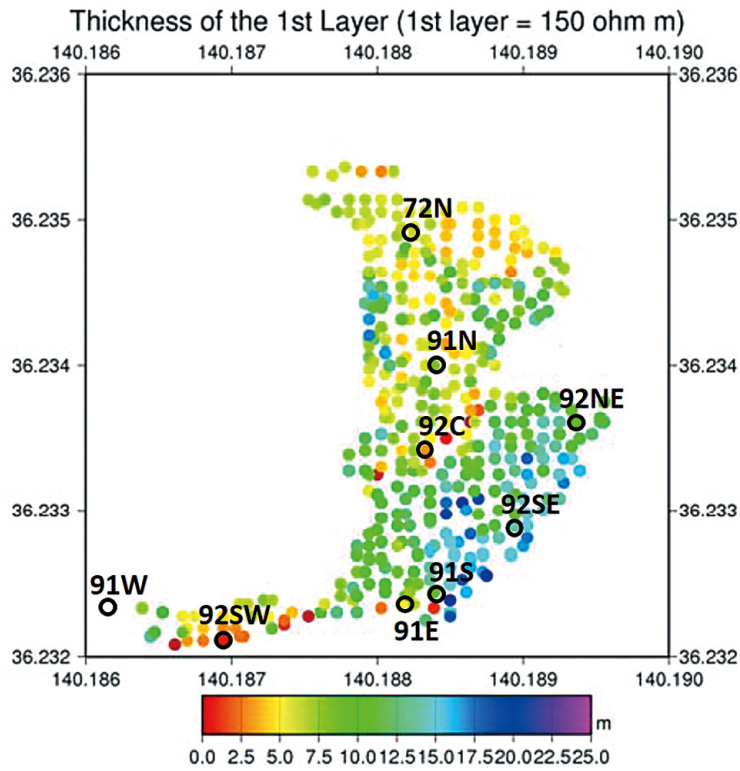


図6 VLF-MT 観測結果から2層モデルで解析した地磁気観測所構内の表層の厚さ
黒丸は本研究で使用した電極の埋設場所を示す。

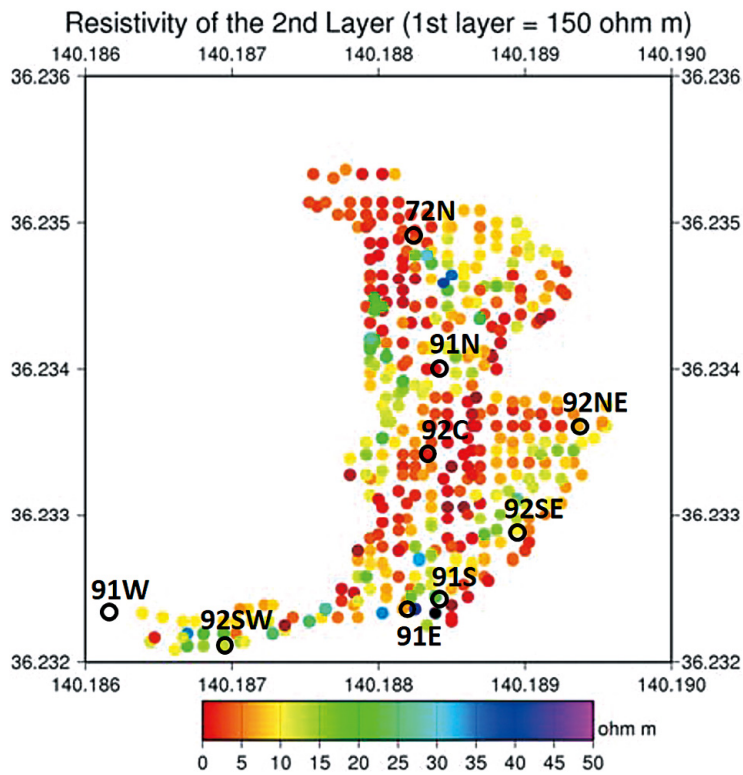


図7 VLF-MT 観測結果から2層モデルで解析した地磁気観測所構内の下層の比抵抗
黒丸は本研究で使用した電極の埋設場所を示す。

ぶのは、地下水による電極周辺の状態の変化傾向がローム層の厚さにより異なるためと推測される。

4.3 年周変化と地温との関係について

91C1を中心とした多極法で観測したデータを見ると、降水の影響で不安定なペアのデータを除くと、年周変化と思われる変動が見て取れる。周期はほぼ一致しているものの、振幅は電極のペアにより異なっている。年周的に変化していることから、温度変化等に関連する変動と推測されるが、多極法による地電位差観測を実施していた期間（2006年8月～2009年7月）には地磁気観測所構内において地温は観測されていなかった。しかし、2010年12月より、周辺土壤の磁化の変化を確認することを目的として、1989年にボーリング調査を実施した場所の地下1m、2m、3mの地温観測が開始されている。観測期間が違うものの、地温の年周変化の傾向は数年程度では変わらないと推測されることから、地温の年周変化との関係を比較する。図9に2012年8月から2014年7月の地下1m、2m、3mの地温データと、2006年8月から2008年7月の92C1-91E3の地

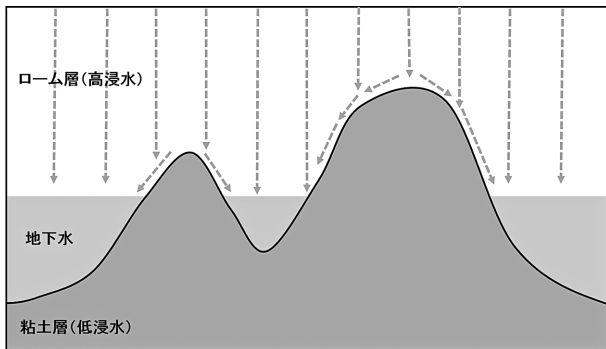


図8 降水により発生した地下水の流れの模式図

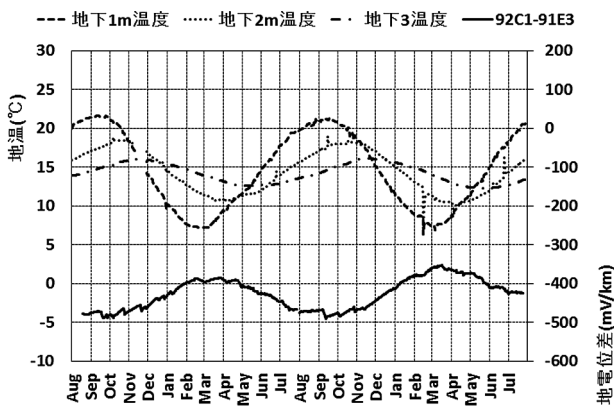


図9 2012年8月から2014年7月の地下1m、2m、3mの地温変化と、2006年8月から2008年7月の92C1-91E3による地電位差変化

電位差データのプロットを示す。図9を見るとわかるように、地温は深度により変化の振幅、位相が異なるものの、92C1-91E3ペアの地電位差と同様にきれいな年周変化を示している。

地電位差の年周変化が地温の変化と関係しているとして、その原因として考えられるのは、①土壤の電気伝導度の温度変化、②接触電位差の温度変化の2つである。

①に関しては、高倉（2004）で紹介されており、地温が下がると地中の岩石の比抵抗が低く（電気伝導度が高く）なる。この変化は、土壤の誘導電流の変化として現れるので、単位長さあたりの電位差（mV/km）に換算すると基線長によらず、どの電極ペアでもほとんど同じになる。

②に関しては、橋本（1994）が電気化学的な視点から電極周辺の温度変化にともなう接触電位差の変動について紹介している。この変化は、接触電位差の変動なので、単位長さあたりの電位差に変換すると基線長に依存し電極のペア毎に大きさが異なる。

92C1を中心とした多極法による地電位差観測データでは年周変化の振幅が電極のペア毎に異なっていることから、②の接触電位差の温度変化が主たる要因の可能性が高い。

92C1を中心とした多極法のデータのうち、年周変化が明瞭なのは、72N5、91N3、91E3、91W2である。92SW1は明瞭な年周変化は見られない。92NE4、92SE1は降水の影響が大きく年周変化が不明瞭である。91S3は観測期間が短い上に、途中で不連続となるため調査対象外とした。中心極である92C1は地下1.5mに埋設されているものの、72N5、91N3、91E3、91W2は地下2.2m、2.5m、3.0mに埋設されており、ペアとなる電極の埋設深度が違うという特徴がある。地温の変化を見ると地下1m、2m、3mでそれぞれ振幅、位相が異なっており、この地下深度による温度差が、地電位差に反映されたものと推測される。

地温の年周変化と地電位差の温度変化の関係をより詳しく調べるために、各地温データと92C1と72N5、91N3、91E3、91W2、92SW1の地電位差データについて、周期を365日で固定した三角関数の最小二乗法で年周変化成分のみを抽出し、その振幅、位相を抜き出した。表4に年周変化が見られた地電位差データの年周変化の最大値、最小値、振幅、最大最小出現月（0.1月単位）を、表5に1m、2m、3mの地温及び、1-2m、2-3mの地温差の年周変化の最大値、最小値、振幅、最大最小出現月を示す。

表4を見ると、振幅は基線長を考慮しないmV単位で見ると92C1-91W1のみ大きい印象を受ける。位

表4 年周変化が見られた地電位差データの最大値, 最小値, 振幅, 最大最小出現月

電極ペア	92C1-72N5		92C1-91N3		92C1-91E3		92C1-91W1		92C1-92SW1	
基線長	91m		64m		125m		236m		198m	
埋設深度差	1.5m		0.8m		1.0m		1.0m		0m	
単位系	mV/km	mV	mV/km	mV	mV/km	mV	mV/km	mV	mV/km	mV
最大値	-323.39	-29.43	-302.41	-19.35	-375.02	-46.88	5.93	1.40	21.32	4.22
最小値	-410.07	-37.32	-489.23	-31.31	-479.99	-60.00	-78.03	-18.41	3.29	0.65
振幅	86.68	7.89	186.82	11.96	104.97	13.12	83.96	19.81	18.03	3.57
最大出現月	3.3		3.2		3.3		3.7		2.8	
最小出現月	9.3		9.2		9.3		9.7		8.8	

表5 1m, 2m, 3mの地温及び, 1-2m, 2-3mの地温差の年周変化の最大値, 最小値, 振幅, 最大最小出現月

埋設深度	地温			地温差	
	1m	2m	3m	1m-2m	2m-3m
最大値(°C)	22.7	19.3	16.5	19.3	16.5
最小値(°C)	9.4	12.6	13.4	12.6	13.4
振幅(°C)	13.4	6.8	3.1	6.8	3.1
最大出現月	8.9	10.1	11.8	8.0	9.2
最小出現月	3.0	4.3	6.0	2.1	3.4

相は, おおむね3.5月に最大となり, 9.5月に最小となる変化で, すべての電極のペアでほぼ一致していると考えてよいであろう。

表5の地温データと比較すると, 地電位差の年周変化に一番近いのは, 3.4月に最小となり, 9.2月に最大となる地下2m-3mの地温差である。電極埋設深度が違う地電位差観測データで見られた年周変化と, 地下2m-3mの地温差の年周変化は逆相関となる。

橋本(1994)の研究結果を踏まえると, このように埋設深度が違う電極ペアによる地電位差観測において地温差に依存した変動が見られるのは, 個々の電極の接触電位差が温度依存性を持つため, 埋設深度の地温変化の違いによる電極間の温度差変動が反映された結果と考えられる。

地下2m-3mの地温差と, 92C1と72N5, 91N3, 91E3, 91W2, 92SW1の地電位差との相関を図10に示す。横軸の地温差は2012年8月から2014年7月の観測データ, 縦軸の電位差は2006年8月から2008年7月の基線長を考慮しないmV単位の観測データを使用している。

図10を見ると, どの電極ペアでも温度差が大きくなるほど電位差が小さくなる傾向がある。ただし, 電極の埋設深度が同じである92C1-92SW1の組み合わせはこの傾向が小さい。

表6に温度差と各電極ペアの電位差の関係を線形近似した場合の傾き, 決定係数, データ個数を示す。電極の埋設深度差が無い92C1-92SW1以外は決定係数がおおむね0.8程度であり, この結果を見る限りでは線形の関係に有るといってもよいであろう。ただし, 地温の観測場所, 観測時期が地電位差

観測と違うことや, 電極の埋設深度差が電極ペアにより違うため, あくまで参考にしかならない。電極間の温度差と電位差の関係について厳密な検証を行うためには, 電極と同じ場所に温度計を埋設し並行観測したデータ同士で比較する必要があるだろう。

4.4 降水による地温変化

最後に, 降水時の地温の変化に着目し, 4.2節で示した降水時の異常変動に, 地温の変化による影響が含まれているかどうかを検証した。図11に2013年1月から12月の1年間の日降水量と, 地下1m, 2m, 3mの温度の日平均値のプロットを示す。地下1mおよび2mの温度に関して, 顕著な降水が発生した日に対応して温度変化が発生しているのがわかる。

さらに, 降水時の地温の変化の詳細を見るために, 2013年9月3日から4日にかけての, 10分間降水量と地温データの毎分値のプロットを, 図12に示す。19:30から20:00にかけての顕著な雨を観測した時刻に対応して, 地下2mの温度が急激に変化している。短時間に大量の雨が降った場合, 急激に地下に水が浸みこんでゆくため, 地下に浸みこむ水の温度が周辺の土壌の温度よりも高い(または低い)状態で地下深くまで浸透し地温を急激に変化させるものと推測できる。地下1mに関しては, おそらくこの事例では雨水の温度と地温が同程度であったために, 温度変化が見られないのであろう。地下3mは, ボーリング調査の結果ですでに粘土層に達しているため, 地下にしみこんだ雨水がこの深さまで浸透していないと考えられる。

地温の観測点は1箇所なので, 場所により降水時に発生する地温の変化の違いがあるのかは確認できない。しかし, 図6を見ると, 地磁気観測所構内の地下構造はかなり起伏があり, 場所により水の浸みこみかたや, 降水後に地下水の流れによる水の溜まりやすさに違いがあるはずで, 降水時の地温の変化傾向も場所により違いがあってもおかしくない。

4.3節で示したように, ペアとなる電極間に温度差があると, 接触電位差の温度依存性に由来する電

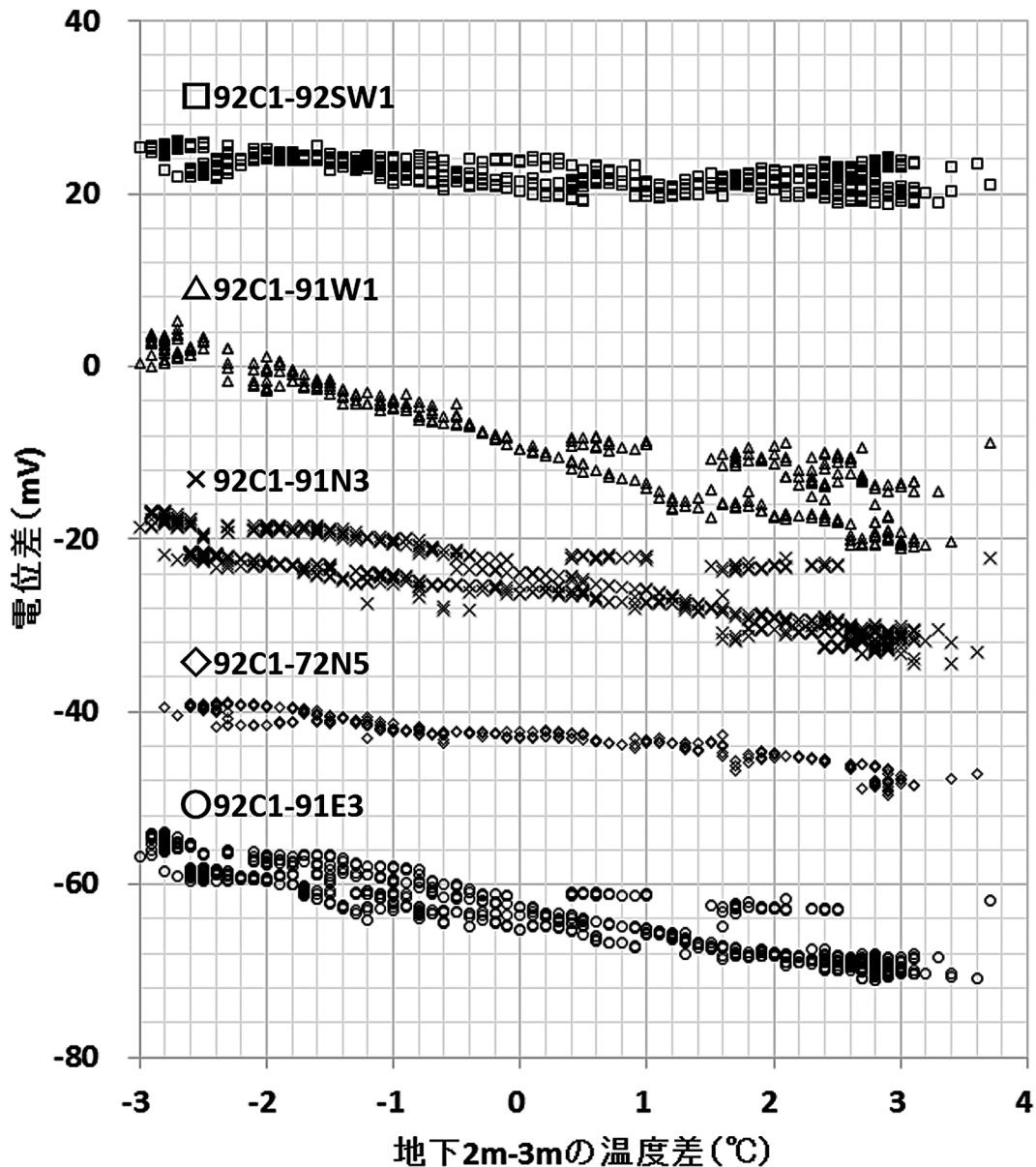


図10 地下2m-3mの地温差と地電位差の相関図
 プロット表示用に各観測データのオフセット値を調整している。

表6 年周変化が見られた地電位差データと地下2m-3mの地温差で線形近似した場合の傾き，決定係数，使用したデータ個数

電極ペア	92C1-72N5	92C1-91N3	92C1-91E3	92C1-91W1	92C1-92SW1
傾き (mV/°C)	-1.3823	-1.9872	-2.1896	-3.2043	-0.5648
決定係数	0.9159	0.7711	0.8622	0.8717	0.4605
データ個数	307	696	696	356	696

位差が発生する。降水時の地温の変化が場所によって異なることにより，電極間に温度差が発生し，温度差に応じた電位差が地電位差観測データの異常変動として現れている可能性が示唆される。

5. まとめ

本研究の成果をまとめると以下の3つがあげられる。

- ①平衡電極は長期的な地電位差観測には適さない。
 - ②降水の影響はペアとなる電極埋設場所のローム層の厚さの違いと関連している。
 - ③電極間に温度差がある場合，温度差に比例した電位差変動が観測される可能性が高い。
- ①に関しては，今回の調査でも過去の観測結果と同様に長期的にみて不安定な観測データしか得られ

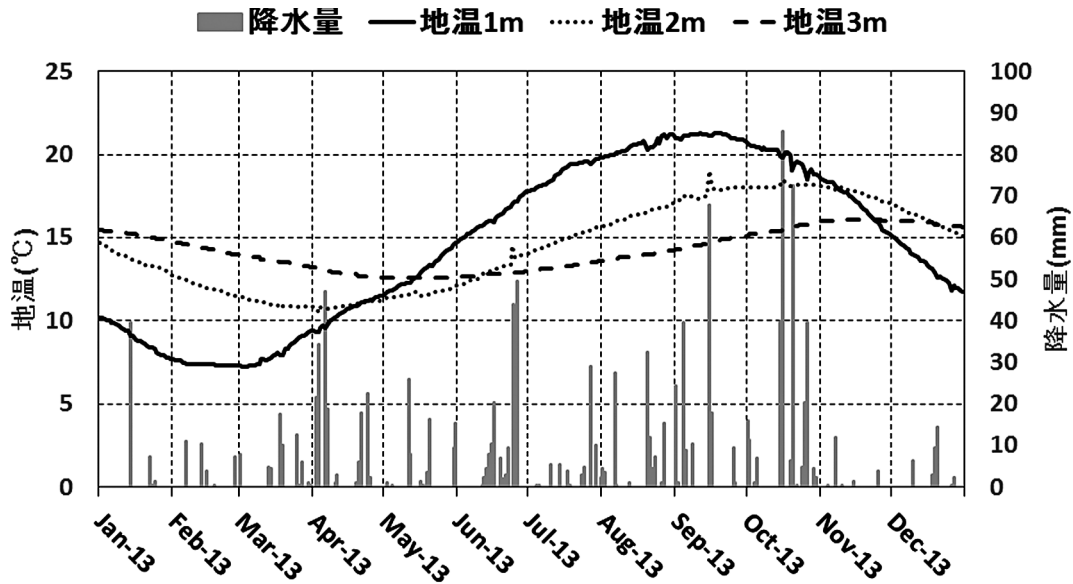


図11 2013年1月から12月の日降水量と地下1m, 2m, 3mの日平均温度

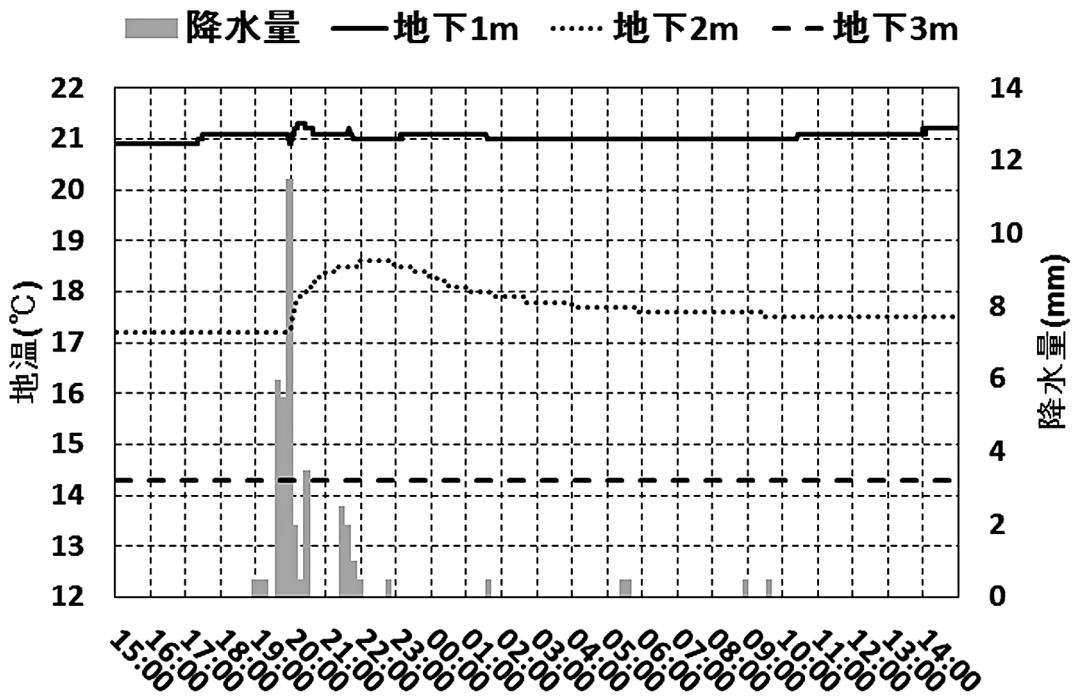


図12 2013年9月3日15時 (UTC) から9月4日14時の10分間降水量と地下1m, 2m, 3mの温度の毎分値

なかった。平衡電極は長期的な地電位差観測には不向きと考えられる。

②に関しては、降水後の地下水のたまり方の違いに影響されていると推測される。これまで電極埋設場所の地下構造の違いに関しては余り議論されていなかったが、今回の調査結果から、ペアとなる電極埋設場所のローム層の厚さの違いは地電位差観測の安定性にかなり影響することがわかった。今回の調査結果は、今後新規に電極を埋設する際に非常に有効な情報となるであろう。

③に関して、電極間の温度差はかなり大きく地電位差観測の安定性に影響を与えることが判明した。通常の地電位差観測では、電極の埋設深度を統一するため、温度差による電位差変動が明瞭に年周変化として現れることはない。偶然的ではあるが、埋設深度が違う電極ペアで地電位差観測を長期間行ったことと、地磁気観測所で地温の観測を開始したことにより非常に興味深い現象を確認することができた。また、電極間の温度差と電位差は、線形関係となる可能性が高い。精度よく係数が求まれば地電位

差観測データから温度差変化による接触電位差の変動成分を分離できる可能性がある。

降水に対応する地温の変化も確認された。このことは、降水時の地電位差の異常変動に電極間の温度差が関係している可能性を示すものと考えられる。現状では、電極埋設位置の地温データが無いために可能性の議論しかできない。電極埋設場所に温度センサーを埋設し地電位差と同時に温度差を観測することで降水と電極間温度差と地電位差の異常変動の関係について明らかになるだろう。

謝辞

平衡電極の埋設等にご協力いただいた澤田研究官、吉武技術主任を始め、3年間にわたり多電極地電位差観測のデータ収集と観測装置のメンテナンスを実施していただいた当時の観測課職員の皆様に感謝します。気象大学校 藤井准教授には、VLF-MT観測の解析結果の提供のみならず、本稿を執筆するにあたり貴重なご意見をいただきました。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

大川隆志, 仲谷 清, 熊坂信之, 地電流観測値の長期安定性に関する調査, 地磁気観測所技術報告, 34 (03, 04), 25-29, 1995

大和田毅, 外谷 健, 山田雄二, 立川 徹, 山崎 明, 地電流観測の精度維持向上に関する調査, 地磁気観測所技術報告, 31 (03, 04), 50-55, 1992

小池捷春, 仲谷 清, 地電流電極設置法の改良とその考察, 地磁気観測所技術報告, 26 (1, 2), 1-14, 1986

小池捷春, 石井美樹, 山崎 明, 豊留修一, 地電流観測基線長変更に伴う電極試験結果, 地磁気観測所技術報告, 27 (03, 04), 15-19, 1988

小池捷春, 中山 正, 熊坂信之, 横山恵美, 山崎 明, 大和田毅, 新設電極の長期安定性について, 地磁気観測所技術報告, 33 (03, 04), 28-32, 1994

清水幸弘, 山崎 明, 多極法による地電位差観測 (II) - 二年間の観測状況 -, 地磁気観測所技術報告, 30 (03, 04), 52-55, 1991

高倉伸一, 高密度電気・電磁探索法による比抵抗構造の調査と解釈に関する研究, 博士論文, 京都大学工学部, 348p, 2004

橋本武志, 電極問題についての一考察, CA 研究会論文集, 86-97, 1994

長谷川一美, 小池捷春, 石井美樹, 地電流基線の短縮化 (柿岡) に伴う電極設置及び試験観測結果 (中間報告) 等について, 地磁気観測所技術報告, 26 (3, 4), 28-42, 1987

山口又新, 石井美樹, 比例抵抗法による電極電位変動解析, 地磁気観測所技術報告, 24 (01, 02), 30-36, 1984

山崎 明, 石井美樹, 豊留修一, 小池捷春, 山口寛司, 森俊雄, 多極法による地電位差観測, 地磁気観測所技術報告, 29 (03, 04), 104-123, 1990

Study of long term stability of geoelectric observation by a short base line

by

Kenji MORINAGA and Takeshi TOYA

Kakioka Magnetic Observatory

Received 25 May 2015; received in revised form 5 October 2015;
accepted 9 October 2015

Abstract

Instability generated by fluctuations of the contact potential difference by the precipitation is an unsolved problem in a geoelectric field observation at Kakioka magnetic observatory. To investigate the fluctuation by a precipitation and the long term stability of the observation data, we carried out the multi-electrodes observation using a number of copperplate electrodes and equilibrium electrodes.

On the basis of examinations, we obtained the following conclusions.

- ① A equilibrium electrode is unfitted for a long-term geoelectric field observation.
- ② The influence of a precipitation is related to the difference in the thicknesses of the loam layer between the pair of electrodes.
- ③ When the temperature between the pair of electrodes is different, there is a possibility that the fluctuation of the data is proportional to the temperature difference.

正誤表

地磁気観測所テクニカルレポート 第13巻 第1, 2号『短基線による地電位差観測の長期安定性に関する調査』の正誤表を以下に示します。訂正してお詫び申し上げます。

訂正箇所	(誤)	(正)
14ページ, 右段10行目	地温が 下がる と地中の岩石の比抵抗が低く	地温が 上がる と地中の岩石の比抵抗が低く