

三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの ビーチアース部分に発生した析出物の調査

田中伸一^{*†}・外西奈津美^{**}・篠原雅尚^{***}

Precipitates on Beach Electrical Ground of Optical-cable-type Ocean-bottom Seismometer and Tsunami Meter System off the Sanriku Coast

Shinichi S. TANAKA^{*†}, Natsumi HOKANISHI^{**}, and Masanao SHINOHARA^{***}

Abstract

We found precipitates on the beach electrical ground (negative electrode) of the optical-cable-type ocean-bottom seismometer and tsunami meter system off the Sanriku coast (Sanriku system). These precipitates formed from 2014 to 2018. The DC voltage that feeds the Sanriku system began to increase and fluctuate in June 2017. This fluctuation suggests instability in the Sanriku system. To investigate the relationship between the precipitate growth and supply voltage fluctuation, we sampled and analyzed the precipitates in September 2018. The main components of the precipitates were calcium carbonate (CaCO_3) and dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), which are abundant in seawater. The metallic positive ions in seawater were drawn to the negative electrode, precipitating on the beach electrical ground and increasing its electrical resistance. This change in electrical resistance caused the observed DC voltage fluctuation. The beach electrical ground should be regularly cleaned to maintain the stability of the Sanriku system.

Key words : Optical-cable-type ocean-bottom seismometer and tsunami meter system, Electrical power supply system, Beach ground, Precipitates, Chemical analysis

1. はじめに

日本周辺は、太平洋プレート、北米プレート、ユーラシアプレート、フィリピン海プレートの4つのプレートが衝突する複雑な構造を持っている。過去にもプレートの沈み込みに連動する巨大地震が発生しているが、その地震の多くは海域のプレート沈み込み帯において発生するため、その現象の解明には、海域における地震観測が必要不可欠である。

海域における地震観測には、大きく2つの方法がある。1つは、船舶を用いて自己浮上型海底地震計を設置し、数

か月～数年の間観測をさせて回収する方法である。自己浮上型海底地震計を用いた観測は、研究の目的に合わせて観測の空間スケールを決められるため、強力な海域地震観測の手法であるが、海底への設置期間のみデータが得られるため、時間スケールが短くなる。もう1つの方法は、地震計を耐圧容器に入れ、海底ケーブルに接続して海底に敷設し、陸上と海域を有線で結んで観測する方法である。この方法であれば、空間的な制約があるものの、陸上の定常地震観測と同じように長期連続観測が行えるというメリットがある。

三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム（通称釜石海底ケーブルシステム）は1996年に設置された。このシステムは、3つの地震計と2つの津波計、データを集約してテレメートする陸上局舎部分（岩手県釜石市）から構成されている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際も、震源の近くにおいて、貴重な地震や津波のデータを得ることができた。一方で、大津波によって陸上局舎部分は完全に流失してしまったが、海底ケーブルの部分は無事であったため、2014年に陸上局舎を再建し、陸

2019年11月28日受付, 2019年12月27日受理.

[†] sst@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室

^{**} 東京大学地震研究所技術部技術開発室

^{***} 東京大学地震研究所観測開発基盤センター

^{*} Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{**} Laboratory for Technical Support (Analysis Group), Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{***} Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

上側システムを導入して観測を再開した（田中ら 2014）。便宜上、このシステムを旧システムと呼称する。

また、2015年には、およそ20年間運用している旧システムを更新して、次世代型の海底ケーブル式地震・津波システムを新たに設置した。便宜上、このシステムを新システムと呼称する。旧システムおよび新システムと、2017年に東北沖に敷設された防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網（S-net）と合わせると、釜石沖は世界で最も稠密に地震や津波を観測できる海域となっている。

新/旧システムの海底地震計・津波計やデータ通信装置を駆動させるために、陸上局舎から直流電流（DC）を与えている。DCを流すため、海底ケーブル本線（計測機器側）の先端および陸上局側には、それぞれ電極が接続されている。陸上局側の電極は、その接地抵抗を下げるために海浜部の海中に設置されており、それをビーチアースと呼んでいる。

三陸沖システムの陸上局舎は、釜石市のリアス式海岸の湾内に設置されている。半円の湾状のため、ひとたび荒天が発生すると、非常に波が高くなり、しばしば海岸部分が波で掘り起こされて地形が変わる。場合によっては、海岸部に埋設した海底ケーブルが露出することもある。そこで、海底ケーブルにダメージがないかを確かめるために、月に1回の頻度で地元の保安業者に海岸線の状態を目視確認してもらっている。また、1年に1回程度の頻度で、ダイバーによって海岸部から沖合数十mの間を目視点検すると同時に、水中カメラにて画像や動画の記録を取っている。

2017年4月にダイバー調査を実施したところ、旧システムのコンクリートで防護されたビーチアース部分に、灰白色の析出物が見られ、さらにその一部分より定期的に気泡が発生していた。過去のダイバー調査結果を精査したところ、このビーチアース部分の変異は、2014年の旧システム復旧直後より始まっていた。また、2017年6月ごろより、旧システムの海底ケーブルに供給しているDCの電圧に、過去に見られない大きな変化が見られた。これらの異変や異常が、旧システムを構成する機器類に影響を及ぼす可能性がある。

そこで、旧システムに発生している異変に関して、過去の記録を精査するとともに、ビーチアース部分に発生した析出物の化学分析を行った。

2. 釜石海底ケーブル旧システムのアース

旧システムの構成の概要を図1(a)に示す。旧システム全体の構成については、田中ら（2014）が詳しいため、そちらを参照されたい。海底ケーブル本線は、陸上局舎のDC電源のプラス極に接続されている。海底ケーブル本線は、3つの地震計と2つの津波計が直列に接続され、その先端に海中アースが接続されている。陸上局側からDCを与える際、プラス極側の海中アースは、電子の放出に伴っ

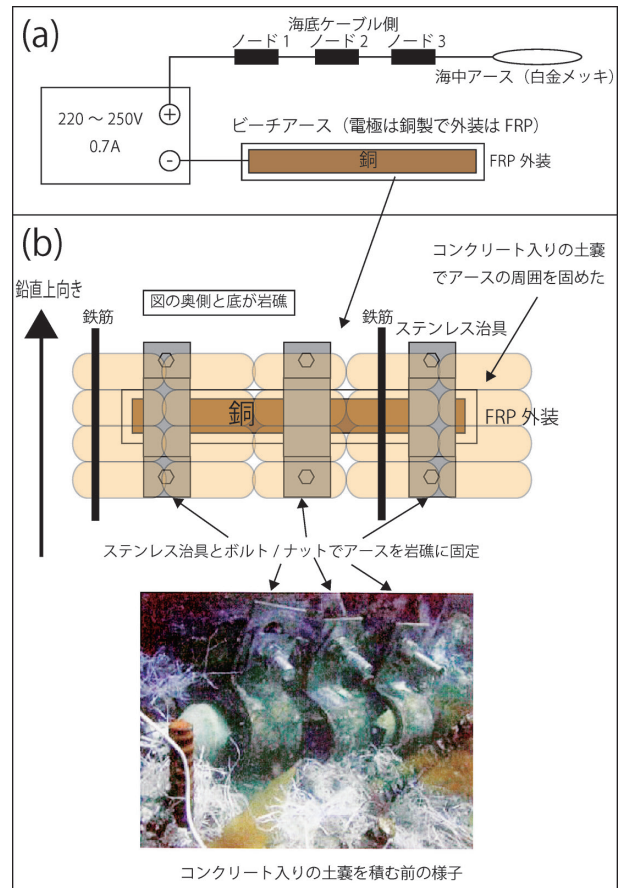


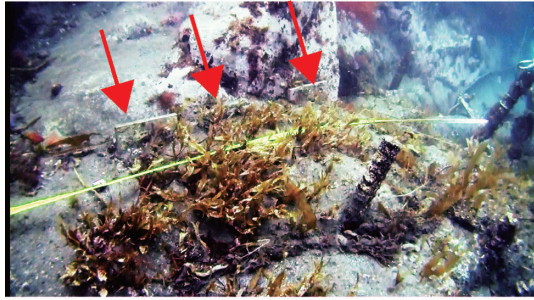
図1. 旧システムの構成の概要 (a) 海底ケーブル側とビーチアース、DCを給電する電源 (b) ビーチアースの岩礁への固定状況

て金属がイオン化して溶出する傾向になる。これを強制電蝕という。この強制電蝕を防ぐため、海中アースは、イオン化傾向が非常に低くて溶けにくい白金でコーティングされている。

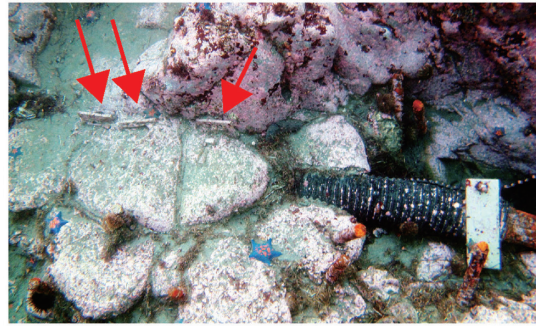
DC電源のマイナス極に接続されているビーチアースは、ビーチアース線（アーマードケーブル）を介して、海中の岩礁に設置されている。マイナス極側では、海水中に豊富に含まれる Na^+ や Ca^{2+} 、その他の金属イオンが引き付けられる。従って、海底ケーブルアース線の先端には、比較的イオン化傾向が低く、金属イオンが吸着しにくい銅製のビーチアースを接続している。

冒頭にも述べたように、釜石海底ケーブルシステムの海岸線は、強い荒天を受けると高波によって海岸線の地形が変わってしまう。過去にも観測ケーブル本線やビーチアース線が露出したり、ビーチアース線が破断する事故が発生した。2009年4月中旬にも荒天によりビーチアース線の露出および損傷が確認された。このため、2009年6月下旬にビーチアース線の補修と再埋設、およびビーチアースの岩礁へ再固定する工事が行われた。ビーチアースは、ステンレス製の治具によって岩礁にボルト止めされている。そ

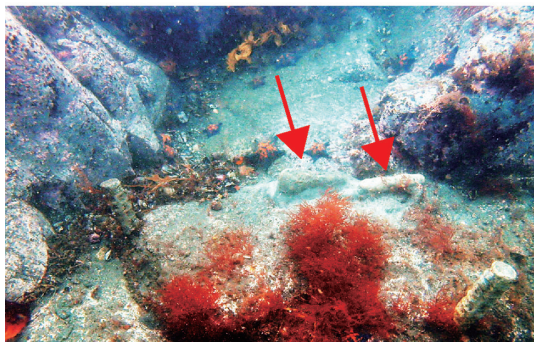
(a)2012/07/28



(b)2014/01/30



(c)2014/08/27



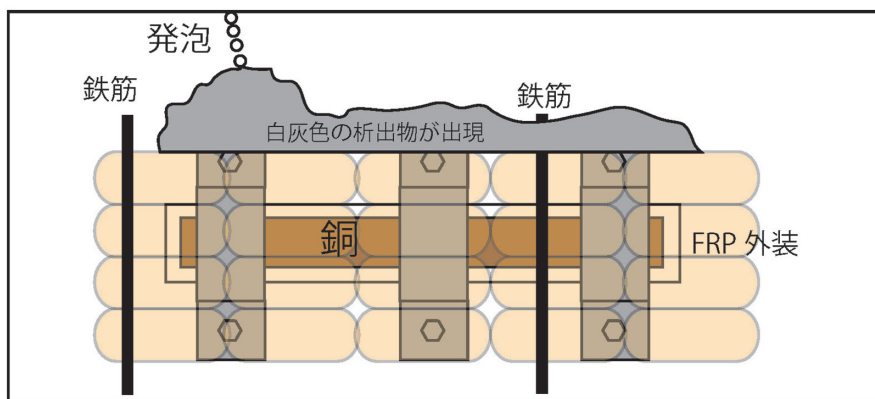
(d)2016/05/13



(e)2017/04/16



(f)2018/09/26



(g) 2017年4月時点のイメージ図

図 2. 旧システムビーチアース部分の時系列変化

の周囲に、水中コンクリートをつめた土嚢を積んで防護した(図1b)。

3. ビーチアース部外観の異変ならびに DC 電圧の時間変化

2009年4月に、旧システムのビーチアースの補修工事が行われた後、2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、局舎部分が大津波によって流出した。システムがダウンしていた2012年7月28日(図2a)および2014年1月30日(図2b)にダイバー調査を行ったが、ビーチアース部分に異変は見られなかった。その後、局舎が再建され、2014年3月末に旧システムを稼働させた。システム稼働後の2014年8月27日にダイバー調査を行った(図2c)。この時、ビーチアース部分の上部には砂が被さり、海藻が繁茂する状況であった。よく見ると、海中に露出したステンレス治具部分が白色系の物質に覆われており体積が増えている、その色は周りの砂と似ていた。

2016年5月13日のダイバー調査を行った際には、ビーチアース部分の上部に、さらに砂が覆っており、状況が見えにくい(図2d)。しかし、水中カメラの写真や動画を併せて検証すると、ステンレス治具部分の付着が進行し、2014年8月の調査時に比べて体積が増して、盛り上がっている。また、わずかであるが、その析出物の一部から発泡を確認した。

2017年4月16日のダイバー調査時には、前述の析出物がさらに成長していた(図2e)。その析出物は、白色や灰色がまだらのように入り混じっていた。特に画面向かって左側は、その析出物がより大きくなっている。また、大きく盛り上がっている部分から、定常的な発泡が見られた。我々は、この時点でビーチアース部分に異変が発生していることを認識した。写真では判りづらいため、イメージを図2(g)に示す。

2018年9月26日のダイバー調査時には、ビーチアース部分の析出物がさらに成長しており、その色は、周囲の砂と同じ灰色に見える(図2f)。しかし、2017年4月の時点で発生していた発泡は止まっていた。

次に旧システムの電源電圧の時系列変動について記述する。DC電源には、松定プレジジョン社製のPR-500を用いている。PR-500は、定電流モードで海底ケーブルにDCを供給しているため、海底ケーブル各部の抵抗が変動すると、それに応じて電圧が上下する。

釜石局舎は、1か月に1回の頻度で保守業者により点検を行っており、2014年4月よりDC電源の電圧値を記録している。観測を開始してから2017年5月12日までは、DC電源の電圧は225Vで安定していた。しかし、2017年6月の点検時より226Vとわずかに電圧が上昇した。その後、2017年12月に突然11Vも電圧が上昇し、237Vとなる。

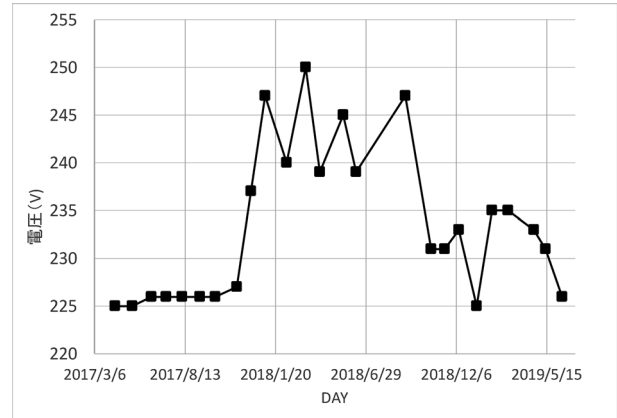


図 3. DC 給電電圧の時系列変化

そこからしばらく電圧の乱高下が続き、2018年3月の時点で最大値となる250Vまで上昇した(図3)。これは平常時の電圧である225Vに比べて電圧が25V高くなっており、電流が0.7Aであるので、オームの法則により、電気抵抗が35.7Ωも増加したことになる。この電圧の乱高下は、システムが不安定であることを示している。

ところが、旧システムの地震や津波の観測値に問題は見られず、安定して観測を続けているため、計測機器側に問題がある可能性は低い。

旧システムにおいて、明らかに時間変化が見られる部分は、旧システムビーチアース部分の析出物の成長である。もし、この析出物がビーチアース部分の抵抗を高くしているならば、旧システムの消費電力が不安定であることの説明がつく。

しかし、この析出物を構成している物質が不明なため、いったい何が起きているのか、DC電源の電圧の変化とどのように関係しているのかは不明であった。

そこで、2018年9月26日のダイバー調査時に、この析出物の一部をハンマーで砕いてサンプリングし、化学分析を行うことにした。

なお、析出物を破壊した直後に、発泡が始まった。この発泡をペットボトル内に水中置換で採取し、陸上の広い安全な場所で火をつけたところ爆発的に燃焼したので、この発泡の主成分は可燃性ガスである水素の可能性が高い。

また、析出物を破壊した後に、DC電源の電圧が230V付近まで下がり、電圧の変動幅も小さくなった。

4. ビーチアース部分の析出物の化学分析とその結果

採取された析出物の試料表面はコンクリートに類似したテクスチャーを示している。試料小片の断面部は白色部分と灰褐色部分からなる互層構造を示しており、肉眼の観察において各層の厚さおよび構成粒子に違いが認められた(図4)。析出物の構成物質を明らかにするため、薄片試料を作製した。小片1は試料断面の観察用に、小片2および

3は分析用に各層の断面積が最大になるよう薄片を作製している。本試料をEPMA (JEOL JXA-8800R) を用いて形態観察および化学組成の分析を行った。観察および分析条件は以下の通りである。

装置条件 15keV, 12nA
 ビーム径 1 μ m 以下または 10 μ m
 測定元素 Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, V, Ni, Cr, S, Cl

主要元素に関する相対誤差 (relative errors, 1σ) は以下の通りである。Si は <0.7 rel.%, Al および Fe, Mg, Ca は <1 rel.%, Ti および Na は <5 rel.%, K は <10 rel.%, Mn は <20 rel.% (Nagasaki et al., 2017)。

図5に薄片試料の反射電子組成像を示す。反射電子組成像は試料の構成元素により輝度が異なり、原子番号が大きい (重い) ほど明るく光る性質を持つ。そのため試料中の組成分布を認識する手段として良く用いられる手法である。本試料の場合、肉眼で白色に見える部分は反射電子組成像では灰色に、肉眼で灰色に見える部分は白色の色調を示した。

図5 (a) は小片1の一部の拡大部分である。上方の試料表面に向かって白・灰の層厚が徐々に細くなり、表層部分は白層が厚い。また各層には生物遺骸の一部と思われる多孔質の破片や鉱物と思われる粒子が点在しているが、その分布に規則性は認められなかった。図5 (b) に小片2の反射電子組成像を示す。小片2はEPMA分析が行い易いよう、分析面積を大きくするため試料断面を斜めに調整・研磨し薄片を作製している。色調の違いにより黒色、灰色、白色の粒子をそれぞれ5粒ずつ、さらに灰色、白色の帯状部分について組成分析をおこなった。

その結果を表1に示す。黒色粒子はSiO₂が99.8wt.%以上の石英の組成を示すものが一つ、その他SiO₂が64.5~73.9wt.%, Al₂O₃が12.8~21.6wt.%, Na₂Oが4.2~10.3wt.%とガラスの組成を示すものがあった。灰色粒子はCaOが55.9~57.4wt.%, それ以外は1wt.%以下の組成を示した。経験的に、その特徴的な組成と色調から灰色粒子は炭酸カルシウム (CaCO₃) であると推察した。白色粒子はSiO₂が44.4~49.7wt.%, Al₂O₃が3.8~9.2wt.%, FeOが18.5~22.4wt.%, MgOが6.9~11.9wt.%, CaOが9.8~12.1wt.%を示し、角閃石類に相当すると判断した。

また、灰色の帯状部分についてはMgOとCaOがそれぞれ約30wt.%を示し、その組成から石灰石が海水中で変質し生成されるドロマイト (CaMg(CO₃)₂) であると推察した。白色の帯状部分についてはCaOが約50wt.%, MgOが約2wt.%, それ以外は1wt.%以下の組成を示し、白色粒子同様、炭酸カルシウム (CaCO₃) であると推察した。

各層ともに、析出物形成のきっかけとして、ビーチアースの岩礁に固定するためのステンレス製治具の溶出が疑われていたが、NiおよびCrの含有量が1wt.%以下であることから、今回の分析結果からは治具の変質の可能性は低いと推察される。

5. ビーチアース部分で起こっている現象の考察

ビーチアースを岩礁に固定するステンレス治具の周辺に発生した析出物は、化学分析の結果により、ドロマイトを主成分とする層と炭酸塩を主成分とする層が積層したもので構成されていた。それぞれの層の中にはガラス、石英、角閃石類、生物遺骸の一部などの粒が取り込まれて存在していた。これらの鉱物類は周辺の堆積物や浮遊物が析出物に付着したのち取り込まれた可能性が高い。また、クロムやニッケルなどの成分は非常に微量であった。

海水中にはおよそ3.5%の塩分が含まれており、それに含まれる金属イオン (陽イオン) は、濃度の高い順に、Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺である。これらの金属はイオン化傾向が比較的大きい。また、陰イオンは、濃度の高い順に、Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻である。

最も高濃度であるNa⁺は陰イオンと化合してNaClやNa₂SO₄, NaHCO₃などを作るが、それらの溶解度は非常に高く、水中で化合物を作りにくい。一方で、Mg²⁺やCa²⁺の化合物は溶解度が非常に低い。これらのことから、マイナス電極に金属イオンが集まってそれらの濃度が高まり、飽和濃度を越えた化合物が少しずつ沈着して、最終的にドロマイトや炭酸塩として析出物を形成したと考えられる。

互層構造の析出物が形成される原因として、ビーチアースの設置環境から推察するに、季節による海水温の変化、河川水や降雨による海水中の各イオン濃度やpHの変化などが挙げられるだろう。

さらに、析出物周辺で可燃性ガスの発泡が確認されているので、これらの事実を併せると、ステンレス治具がマイナス極となり、DC給電による海水の電気分解が起こっていることは間違いない。一方で、析出物の中にステンレスの主成分であるクロムやニッケルが非常に低いことから、ステンレス治具が溶けだしている可能性は低い。

これらのことから、現在、水中コンクリートで防護された銅製のビーチアースは海水と接触しておらず、ビーチアースとステンレス治具が導通し、ステンレス治具と海水が接触していると考えられる。

この析出物は、2009年6月のビーチアース補修工事から2011年3月の東北地方太平洋沖地震の大津波による被災で観測停止した期間には発生していなかった。これらの期間は、コンクリート防護部分に十分な隙間があり、ビーチアース本体と海水が十分に接触しており、電流も海中に流れやすい状態になっていたと考えられる。その後、何ら

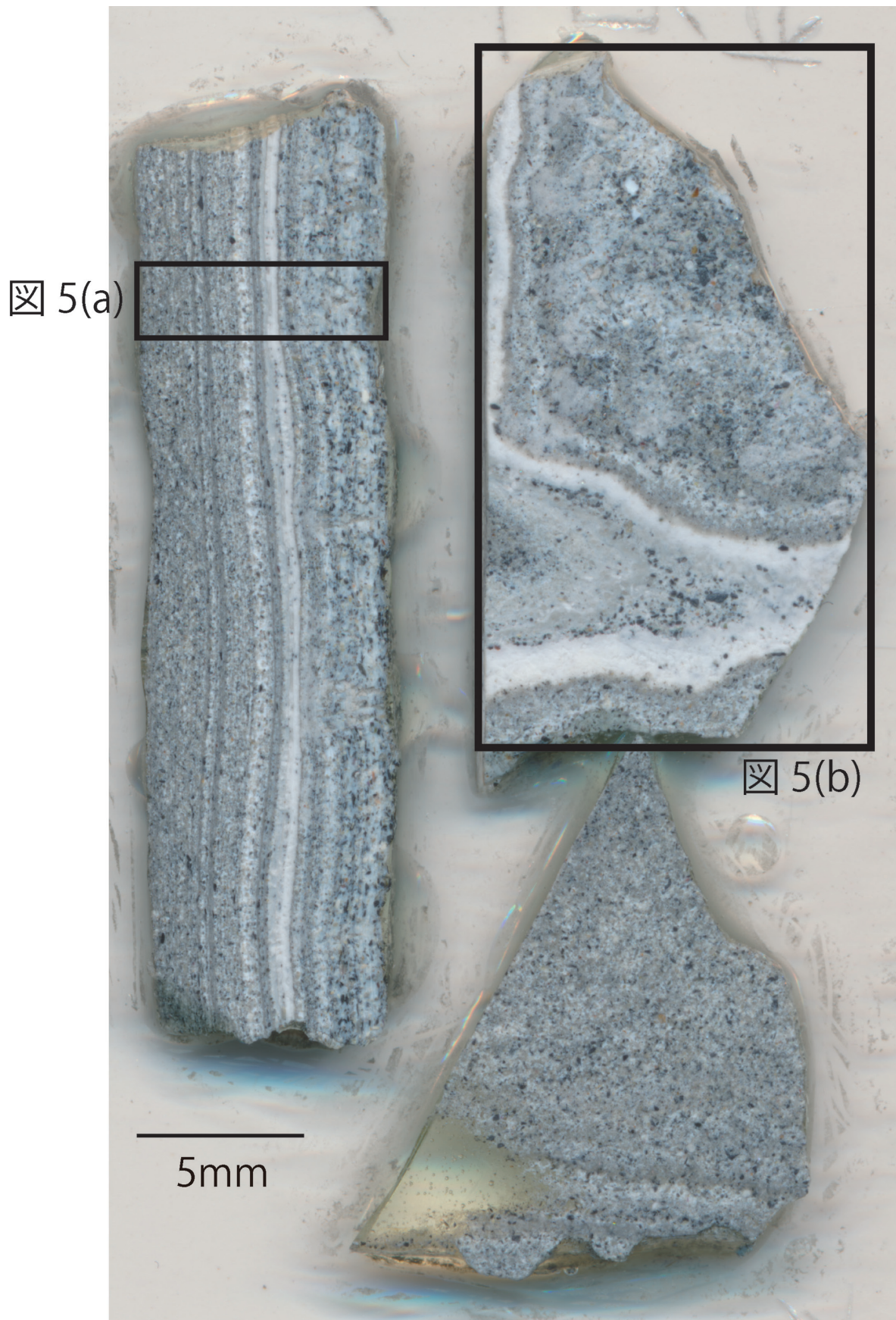


図 4. 析出物のサンプル薄片の写真

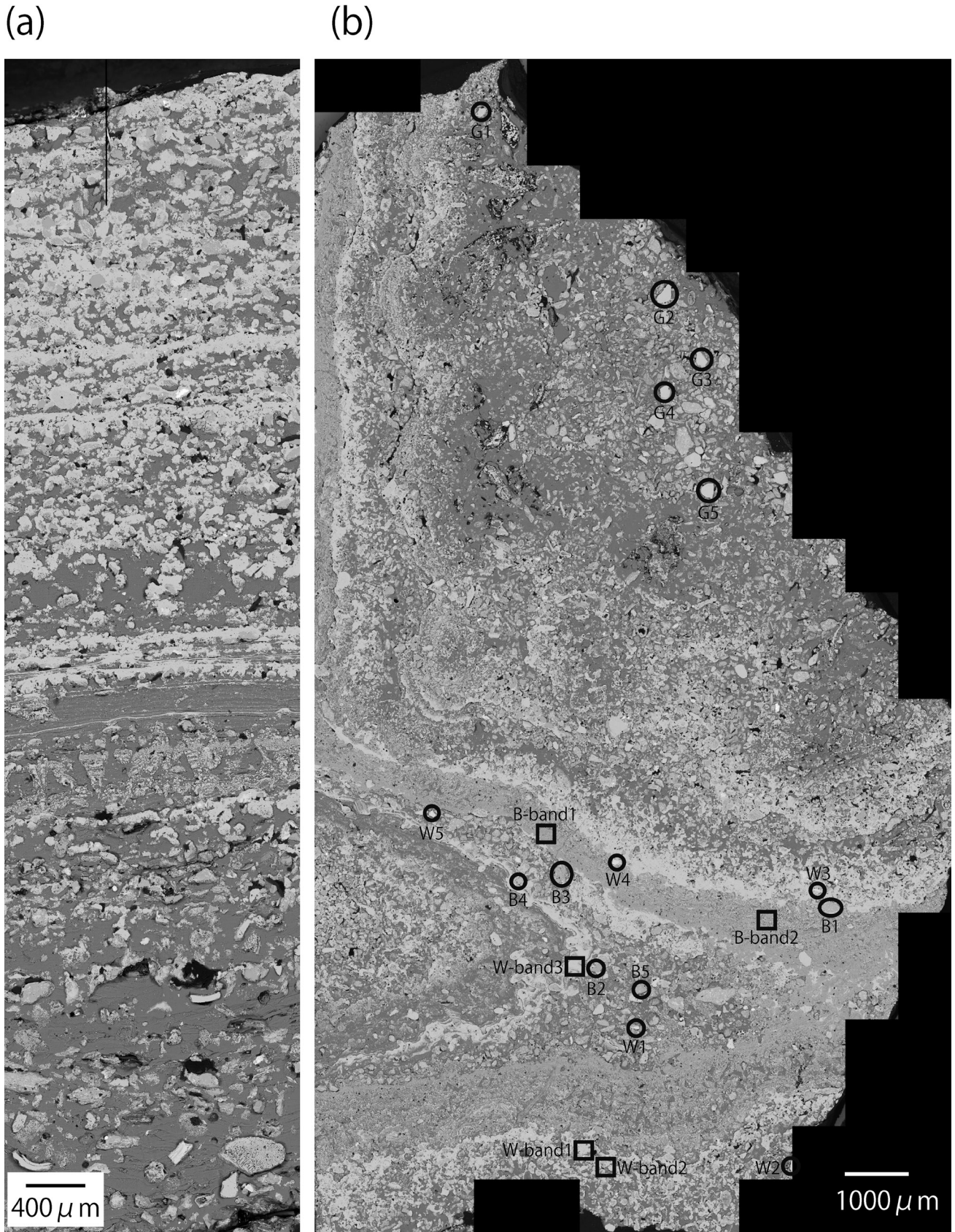


図 5. 薄片試料の反射電子組成像 (a) 小片 1 試料 (垂直カット) の断面 ※上面が試料表層部 (b) 小片 2 試料 (斜めにカット) の断面, 丸や四角で示した部分の名前は表 1 のサンプル名と対応する.

表 1. EPMA (JEOL JXA-8800R) による析出物の分析結果。Sample name の記号は、反射電子組成像上での色調を示し、それぞれ、G (灰色粒子)、B (黒色粒子)、W (白色粒子)、W_band (白色エリア)、B_band (黒色エリア) である。※実際の試料の色調とは異なるので注意。

Mineral	Sample name	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	V ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Total
		wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %	wt. %
Calcium carbonate	G1	N.D.	N.D.	0.01	N.A.	0.02	0.01	0.40	56.22	0.69	0.00	N.A.	0.02	0.02	0.40	0.03	57.81
	G2	N.D.	N.D.	N.D.	N.A.	0.04	N.D.	0.31	57.04	0.59	0.02	N.A.	N.D.	0.04	0.08	0.04	58.15
	G3	N.D.	N.D.	N.D.	N.A.	0.03	N.D.	0.51	57.39	0.43	0.03	N.A.	N.D.	0.06	0.90	0.00	59.35
	G4	N.D.	0.00	N.D.	N.A.	0.03	0.01	0.09	56.68	0.64	0.01	N.A.	0.04	0.02	0.09	0.02	57.62
	G5	0.02	N.D.	N.D.	N.A.	0.04	0.01	0.01	55.87	0.99	0.03	N.A.	N.D.	0.06	0.13	0.02	57.16
Glass	B1	64.70	N.D.	19.25	N.A.	0.08	N.D.	0.03	1.09	10.34	0.09	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	0.00	95.56
	B3	64.49	0.02	21.65	N.A.	0.40	0.01	0.19	0.89	9.23	1.74	N.A.	0.02	0.03	N.D.	0.01	98.66
	B4	73.85	0.45	12.76	N.A.	2.25	0.07	0.46	2.78	4.19	1.19	N.A.	N.D.	0.03	N.D.	0.07	98.09
	B5	73.65	0.01	15.05	N.A.	0.11	0.01	0.30	2.16	7.19	0.09	N.A.	0.00	0.03	0.01	0.01	98.62
	B2	99.82	N.D.	0.00	N.A.	0.02	N.D.	0.06	0.09	0.07	0.00	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	100.06
Amphibole Group	W1	44.40	1.34	9.25	0.03	18.53	0.53	9.82	10.42	1.21	0.50	0.00	0.03	N.D.	N.A.	N.A.	96.03
	W2	47.88	0.20	4.63	0.01	19.17	0.41	9.93	11.75	0.36	0.13	N.D.	0.07	0.03	N.A.	N.A.	94.56
	W3	45.47	0.19	7.69	0.04	21.83	0.37	6.92	12.13	0.76	0.30	0.01	0.26	N.D.	N.A.	N.A.	95.96
	W4	49.67	0.23	3.83	0.00	22.39	0.41	8.42	11.74	0.51	0.22	N.D.	0.19	0.03	N.A.	N.A.	97.62
	W5	48.09	0.66	6.48	0.01	18.66	0.73	11.95	9.78	1.02	0.30	N.D.	0.01	0.04	N.A.	N.A.	97.72
Calcium carbonate	W_band1	0.01	N.D.	0.01	N.D.	0.01	0.01	1.82	51.79	0.77	0.01	N.D.	N.D.	0.11	N.A.	N.A.	54.52
	W_band2	0.53	0.01	0.21	0.01	0.07	0.02	0.46	49.42	0.69	0.02	N.D.	N.D.	N.A.	N.A.	N.A.	51.43
	W_band3	0.75	N.D.	0.30	N.D.	0.09	0.02	0.88	50.22	0.56	0.05	N.D.	0.02	N.A.	N.A.	N.A.	52.89
Dolomite	B_band1	0.85	0.02	0.11	N.A.	0.01	N.D.	27.16	31.64	0.43	N.D.	N.A.	0.01	0.07	0.31	0.05	60.64
	B_band2	0.67	0.00	0.08	N.A.	0.01	N.D.	28.67	29.95	0.27	0.00	N.A.	N.D.	0.04	0.69	0.02	60.40

N.D. : Not Detected

N.A. : Not Analyzed

かの理由（大津波によって砂や堆積物などが隙間に詰まった and/or 隙間に生物が繁殖した）でコンクリート防護部の目が詰まり、ビーチアース本体と海水の接触が悪くなったため、導電体であるステンレス治具を通して電流が流れるようになったのだろう。

また、ビーチアース本体の表面積に比べて、ステンレス治具の海水暴露部の表面積はかなり小さいこと、ステンレス治具の主成分であるニッケルやクロムはイオン化傾向が比較的高いことから、より析出物が集まりやすい状況にあったと考えられる。

析出物の主成分である炭酸カルシウムやドロマイトは、それ単体では電気を通しにくい、海水が析出物の隙間に入り込むことで電気を通すことができる。この析出物が成長して厚くなるにしたがって、ステンレス治具と海水の接触面積が小さくなるため、ビーチアース部分の電気抵抗は徐々に高くなると考えられる。その結果、ビーチアース部分の電気抵抗が大幅にあがり、DC 電源の出力電圧が高くなったのだろう。

2017年4月の時点では、析出物からの発泡が認められたが、2018年9月の時点では発泡は止まっており、DC 給電電圧も高い状態であった。この時に析出物の一部をハンマーで砕いて採取したところ、析出物からの発泡が再開し、DC 給電電圧も下がった。このことから、析出物を破壊したことにより、ステンレス治具が海水と接触しやすい状態となってビーチアース側の電気抵抗が下がったと同時に、強制電蝕が活発になり、析出物の成長も進行中であると考えられる。時間がたてば、ビーチアース側の電気抵抗が高くなり、DC 給電電圧も高くなるだろう。

ビーチアース側の電気抵抗が高い状態にあると、システムの消費電力が上がってDC 電源に負荷がかかるというデメリットだけでなく、海底ケーブル系に雷サージが入り込んだ時の電圧が高くなり、機器が故障しやすくなるというデメリットもある。局舎付近においても、年に数回の頻度で落雷が確認されているため、ビーチアース側の抵抗は可能な限り低く抑える必要がある。

旧システムDC 給電の電圧不安定を解消させるためには、コンクリート防護部の目詰まりを解消させてビーチアース本体と海水との接触を良くするか、ステンレス治具周辺に発生する析出物を定期的に取り除く必要がある。また、2014年4月にステンレス治具部分に析出が見られた後、2017年6月にDC 給電電圧の変動が始まったことから、少なくとも3年に1回の頻度で析出物を取り除くことが望ましい。

新システムのビーチアースも、海浜部海中の岩礁にステンレス治具を使って固定しており、その周りに鉄筋を組んで水中コンクリートを打設している。ビーチアースと海水を直接接触させるため、水中コンクリートには、複数の導

水管を埋め込んである。また、新システムのDC 給電は旧システムと極性が逆であり、ビーチアース側がプラス極である。このプラス極は、強制電蝕により溶ける傾向にあるため、イオン化傾向の非常に低い白金でコーティングされている。もし、導水管が砂や生物などで詰まり、ビーチアースと海水の接触が断たれた場合、ステンレス治具や鉄筋に電流が流れる可能性がある。その場合、強制電蝕によりステンレス治具や鉄筋が溶ける可能性が高い。今後は、ダイバー調査時に、導水管が詰まっているかどうか、ステンレス治具や鉄筋に異変はないかを確認する必要がある。

6. ま と め

旧システムのビーチアースはステンレス治具によって岩礁に固定され、その周辺に土嚢に詰めた水中コンクリートを積んで防護されている。ステンレス治具の海中露出部分の周辺に析出物が発生しており、それを採取して化学的に分析した。その結果、析出物の主成分は、ドロマイトや炭酸塩であり、一部に堆積物や生物が取り込まれていることがわかった。

ビーチアースがマイナス極であることを併せて考えると、ビーチアースとステンレス治具が防護水中コンクリート内で導通し、ステンレス治具がマイナス極となり、海水中に含まれる金属などの陽イオンを集積して析出したと考えられる。また、ステンレス治具が析出物で覆われて海水との導通が悪くなって電気抵抗が高くなり、それに伴って旧システムへのDC 給電電圧が変動した可能性が高い。

2009年から2011年までは析出物が発生していなかったため、2011年の東北地方太平洋沖地震の大津波や生物の繁茂などの影響によってコンクリート防護部の目が詰まってビーチアースと海水の接触が悪くなり、ステンレス治具がマイナス電極の役割を果たすようになってしまったと考えられる。旧システムのDC 給電電圧不安定を解消するためには、コンクリート防護部の目詰まりを解消するか、一定の頻度でステンレス治具の析出物を取り除く必要がある。

謝 辞：東京大学地震研究所海半球観測研究センターの塩原 肇教授および東京大学地震研究所地震予知研究センターの上嶋 誠教授には、本稿を改善するうえで大変有益なご助言を頂きました。記して深く感謝いたします。

文 献

- 田中伸一・宮川幸治・八木健夫・荻野 泉・山田知朗・酒井慎一・ト部 卓・篠原雅尚, 2014, 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム釜石陸上局舎の再建, 震研技報, **20**, 25-33.
Nagasaki, S., Ishibashi, H., Suwa, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Okura, T., Takemura, K., 2017, Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: Evidence from amphibole thermobarometry and seismicity. *Lithos*, **278-281**, 153-165.