

## 〔報告〕 高輪築堤から採取された目地資料の分析調査

犬塚 将英・高橋 佳久\*・紀 芝蓮・中山 俊介・中村 舞・  
建石 徹・鈴木 美和\*\*・斉藤 進\*\*・天野 武弘\*\*\*

### 1. はじめに

日本では1872（明治5）年に、新橋と横浜とを結ぶ約29 kmの区間において、最初の鉄道が開業された<sup>1,2)</sup>。鉄道の導入に際しては、岩倉具視、大隈重信、伊藤博文などを中心とした明治政府により、1869（明治2）年に鉄道を建設することが正式決定されたが、一方で政府内には軍備を優先すべきという反対論も根強かった。このような事情もあり、鉄道建設のために必要な測量は1870（明治3）年に開始されたが、高輪付近の土地を測量することを当時の陸軍から許可されなかった。その結果として、陸地ではなく海上に鉄道用の堤が築かれた。これが高輪築堤である。1876（明治9）年に複線化し、1899（明治32）年には築堤の山側が埋め立てられて3線に拡幅された。その後、高輪築堤は大正時代に行われた東京湾の埋め立ての時に地中に姿を消したが、2019（平成31）年、品川駅改良工事の際に石垣の一部が発見され、2020（令和2）年の港区教育委員会による試掘調査により、再び地上に姿を現し、その存在が確認された<sup>1)</sup>。そして、2021（令和3）年に国史跡「旧新橋停車場跡」に追加指定され、史跡の名称が「旧新橋停車場跡及び高輪築堤跡」に変更された。

高輪築堤には、新橋駅から数えて5番目から8番目に相当する4つの橋梁が設置された。これらの橋梁が高輪築堤に設置された目的は、漁船等を東京湾へ出すための航路の確保である。2020（令和2）年の試掘調査では、第7橋梁の橋台部が発見された<sup>1)</sup>（図1）。橋台部は整形された石材が積まれて構築（布積み）されており、石材と石材の間には目地材が用いられていて、石材は接着及び固定されている。鉄道建設に必要な資材、機械、車両等はイギリスから輸入されたが、築堤や橋梁の基礎に利用された石材や土砂等の材料は国内でまかなわれたと考えられている<sup>1)</sup>。目地材については、コンクリート工法で施工する場合に必要なセメントは当時は輸入品であり高価であったことから、その使用は限定的だった。一方、日本には江戸時代から、例えば消石灰と真砂土（風化花崗岩による土壌）を主な材料として作られた練土を叩き固める「たたき」と呼ばれる在来の左官技術があるが<sup>3)</sup>、高輪築堤の建設方法を理解するためには、高輪築堤で用いられた目地材と在来の左官材料との比較は重要である。また、わが国の土木工法の変遷の歴史を考察する上で、1876（明治9）年に服部長七によって開発されたセメントを使用しない人造石工法との比較も興味深い<sup>3)</sup>。

本研究では、自然科学的手法を用いた材料調査を目的として、第7橋梁橋台部等から採取された目地材の材料分析を実施した。本報では、これらの分析結果を速報する。

\*北海道博物館、\*\*港区教育委員会、\*\*\*愛知大学



図1 高輪築堤 第7橋梁橋台部 (画像提供：港区立郷土歴史館)

## 2. 資料

2021(令和3)年5月24日に採取され、本研究で分析調査に供した14種類の目地資料に関する情報を表1に示す。

第7橋梁橋台部では12箇所から採取された(A-1~F-1)。ただし、資料F-1に関しては目地材ではなく石材である可能性もある。それぞれの資料の採取箇所の詳細は表1の2列目の通りであるが、図2ではこれらの採取箇所を図面上に、図3ではA1~A3の採取箇所をさらに詳細に示す。また、これらの採取箇所が築造された想定時期(開業期(1872(明治5)年)、もしくは3線への拡幅期(1899(明治32)年))を表1の3列目に示す。目視観察によると、資料Aと資料Dについては補修が行われた可能性も考えられた。

第7橋梁橋台部から南へ約350 mの地点では、信号機跡が発見された。この信号機が設置さ

表1 高輪築堤から採取された目地資料

資料番号	採取地点	想定時期	備考
A-1	第7橋台北側石組側面	開業期	採取地点は開業期に該当するが補修の可能性もあり
A-2	第7橋台北側石組側面	開業期	採取地点は開業期に該当するが補修の可能性もあり
A-3	第7橋台北側石組側面	開業期	採取地点は開業期に該当するが補修の可能性もあり
B-1	第7橋台南側石組側面	拡幅期	
C-1	第7橋台南側石組天端	開業期	肉眼観察では「たたき」か
C-2	第7橋台南側石組天端	開業期	肉眼観察では「たたき」か
C-3	第7橋台南側石組天端	開業期	肉眼観察では「たたき」か
D-1	築堤海側石垣	不明	補修の可能性が高い
D-2	築堤海側石垣	不明	補修の可能性が高い
E-1	第7橋台南側石組天端	拡幅期	
E-2	第7橋台南側石組天端	拡幅機	
F-1	第7橋台南側橋台内部(石材の可能性もある)	開業期	
G-1	信号機跡石垣	不明	補修の可能性が高い
G-2	信号機跡石垣	不明	補修の可能性が高い



図2 分析資料 (A-1~F-1) の採取箇所

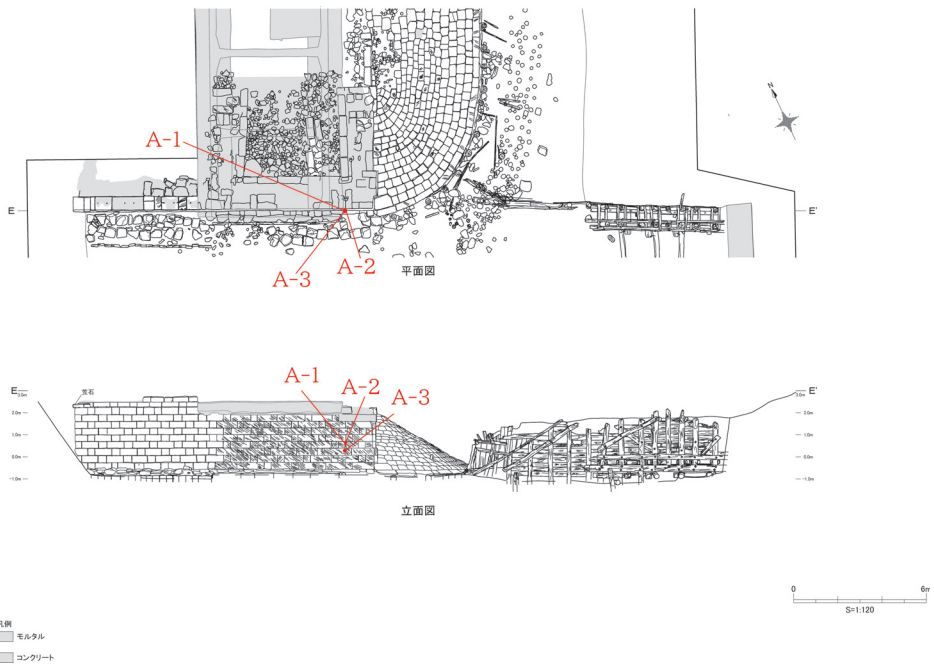


図3 分析資料 (A-1~A-3) の採取箇所の詳細

れた時期は不明であるが(表1), 第7橋梁橋台部で用いられた目地材との比較のために, 石垣に用いられている目地材が図4に示す2箇所から採取された(G-1, G-2)。

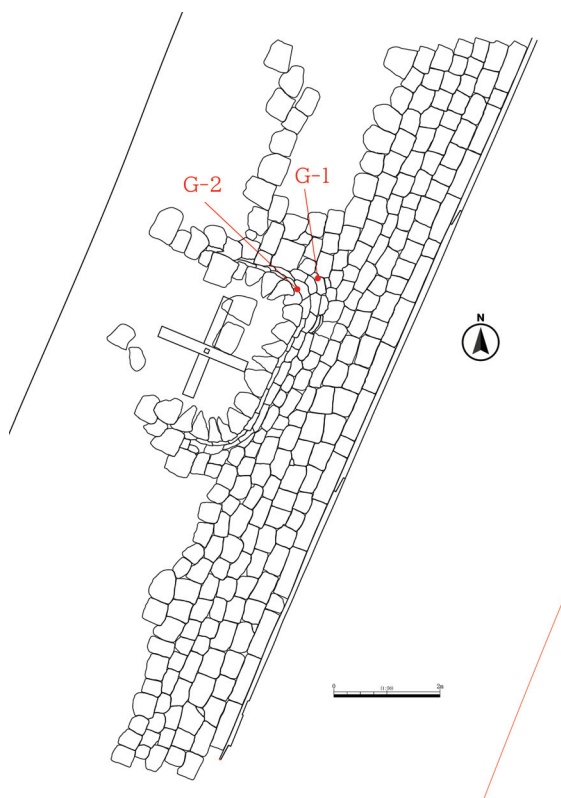


図4 分析資料(G-1, G-2)の採取箇所

### 3. 分析方法

高輪築堤で用いられた目地材に消石灰が用いられた間接的な証拠を得るために, 表1の資料についてX線回折分析を適用して, カルサイト( $\text{CaCO}_3$ )の有無を調べた。また, これらの資料の主成分として考えられる消石灰と種土の配合比を調べるために, 蛍光X線分析による定量分析を行った。

#### 3-1. X線回折分析

施工ときに目地材に消石灰が配合された場合, それらの消石灰は時間の経過とともに炭酸化され, 現在はカルサイトとして存在していると考えられる<sup>3,4)</sup>。従って, 採取された資料中のカルサイトの有無を調べることにより, 施工当時, 目地材に消石灰が配合された可能性の有無を間接的に調べることができる。ここではパナリティカル社製X線回折分析装置(X'Pert PRO)を用いて, 表2に示す条件で分析を行った。

表2 X線回折分析の分析条件

X線管球	Cu (銅)
管電圧	40 kV
管電流	40 mA
雰囲気	大気
2 $\theta$ 測定範囲	5°~70°
ステップ角度	0.020°

表3 蛍光X線分析の分析条件

X線管球	Rh (ロジウム)
管電圧	50 kV
管電流	600 $\mu$ A
一次X線フィルター	Al 12.5 $\mu$ m
雰囲気	真空
マッピング領域	8.5 mm $\times$ 8.5 mm
ピクセルサイズ	85 $\mu$ m
測定時間	50 ms/ピクセル
繰り返し走査数	3

### 3-2. 蛍光X線分析

高輪築堤で用いられた目地材の消石灰と種土の配合比を調べるために、1876 (明治9) 年以降の土木工事に用いられた人造石の材料分析に関する先行研究<sup>3,4)</sup>の手法に従い、蛍光X線分析による定量分析を行った。ただし、本研究では資料の不均一効果を取り除くためのガラスビー卜法<sup>5)</sup>は用いなかった。

分析の最初の手順として、次節 (3-2-1.) に示すような分析条件を用いて、元素の含有率が既知である標準物質から得られた測定値と標準物質の表示値との比較を行うことにより、測定値から元素の含有率を算出するためのデータの補正方法を検討した (3-2-2.)。次に、先行研究<sup>3)</sup>で定量分析が行われた資料の分析を行うことにより、本研究の分析手法の妥当性の評価を行った (3-2-3.)。

#### 3-2-1. 分析条件

分析時における資料の散逸を防ぐために、資料は内径12 mm、深さ1 mmのPET製試料板に充填し、表面を厚さ2.5  $\mu$ mの高分子フィルムで保護した。このように調製した資料に対して、ブルカー社製蛍光X線分析装置 (M4 TORNADO) を用いて、表3に示すような条件で分析を行った。その際に、資料の不均一さによる影響を軽減するために、ポイント分析ではなくマッピング分析を行い、積算されたデータを用いて fundamental parameter 法 (FP 法) による定量解析を行った。資料ごとに3回ずつ分析を行い、定量値の平均値と標準偏差を算出した。

#### 3-2-2. 標準物質を用いた定量分析のための補正值の算出

標準物質として、1968年から1989年の間に通産省工業技術院地質調査所から提供された4種類の地球化学標準物質 JB-1, JSI-1, JSd-1, JSd-3を使用した。各標準物質に含まれる主要10元素の表示値を表4に示す。

これらの標準物質に対してFP法を適用し酸化物換算して得られた測定値を表5に示す。分析の結果、いずれの試料についてもNaとPは検出限界以下だったため、本研究では、その他の8元素 (Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe) の酸化物に関して解析を行うことにした。

これら8元素の酸化物の含有率の測定値と表示値の相関、及び直線回帰の結果を図5に示す。検出効率が低いMgやAlのような軽元素の酸化物では回帰直線の傾きが小さくなり、解析を行った8元素の酸化物の含有率の合計を100%としていることから原子番号が大きい元素の酸化物に関する回帰直線の傾きが大きくなる傾向が見られた。このようにして得られた回帰直線の

傾きと切片を補正值として、次節以降ではFP法から各元素の含有率への補正を行った。

### 3-2-3. 分析手法の評価

以上の分析手法の妥当性を評価するために、先行研究<sup>3)</sup>で定量分析が行われた資料の分析を行った。ここでは、服部長七の工事により施工された愛知県大府市の明神樋門（資料番号：No.38）と愛知県豊川市の松原用水（資料番号：No.58）から採取された人造石資料<sup>3)</sup>を分析にした。

分析を行う前に、資料中に含まれる揮発性物質（主に有機物）の含有率を求めるために、資料約2gをラボネクト社製の小型粉碎機ミニスピードミルを用いて2分間粉碎し、JIS A 1226:2020に基づいて強熱減量試験（Ignition Loss Test）を行った。

以上のような前処理を行った資料に対して蛍光X線分析の結果得られた8元素の酸化物の含有率（wt%）を、先行研究<sup>3)</sup>の分析結果と併せて表6に示す。また、資料中に含まれるCaは全て施工当時に配合された消石灰（Ca(OH)<sub>2</sub>）に起因すると仮定をすると、CaOとCa(OH)<sub>2</sub>の分子量の比を用いることにより、当時配合された消石灰の量を算出することができる。消石灰とIgnition Lossを除いた部分が種土の構成要素と仮定をして、施工当時の消石灰と種土の配合比を算出した結果を表6の右列に示す。

本研究の分析で得られた各元素の含有比を先行研究<sup>3)</sup>で示されている結果と比較をするとMgOやAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のような軽元素の酸化物で相異が大きかった。これは、MgやAlの検出効率が低いことが要因として考えられる。このような誤差が生じたものの、各元素の酸化物の含有率の大小関係に大きな相違はなかったため、以上に示した分析手法を高輪築堤から採取された目地材に対しても適用することにした。

表4 標準物質に含まれる主要10元素の表示値（wt%）

試料名	種類	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
JB-1	玄武岩（均質）	2.77	7.71	14.53	52.37	0.255	1.43	9.25	1.32	0.153	8.99
JSI-1	粘板岩（不均質）	2.184	2.413	17.60	59.47	0.202	2.845	1.479	0.725	0.0599	6.764
JSd-1	河川堆積物（均質）	2.727	1.813	14.65	66.55	0.122	2.183	3.034	0.643	0.0924	5.059
JSd-3	河川堆積物（均質）	0.411	1.17	9.908	76.00	0.0817	1.971	0.560	0.403	0.148	4.368

表5 FP法によって得られた測定値（wt%）と標準偏差

試料名		MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
JB-1	平均値	1.42	12.37	50.85	2.27	12.31	2.24	0.29	18.25
	標準偏差	0.05	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09
JSI-1	平均値	0.00	15.09	60.55	5.01	2.27	1.34	0.12	15.62
	標準偏差	0.00	0.05	0.09	0.02	0.00	0.01	0.00	0.11
JSd-1	平均値	0.00	12.64	68.01	3.72	4.26	1.16	0.17	10.04
	標準偏差	0.00	0.04	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.08
JSd-3	平均値	0.00	10.01	77.04	3.62	0.73	0.71	0.25	7.65
	標準偏差	0.00	0.03	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04

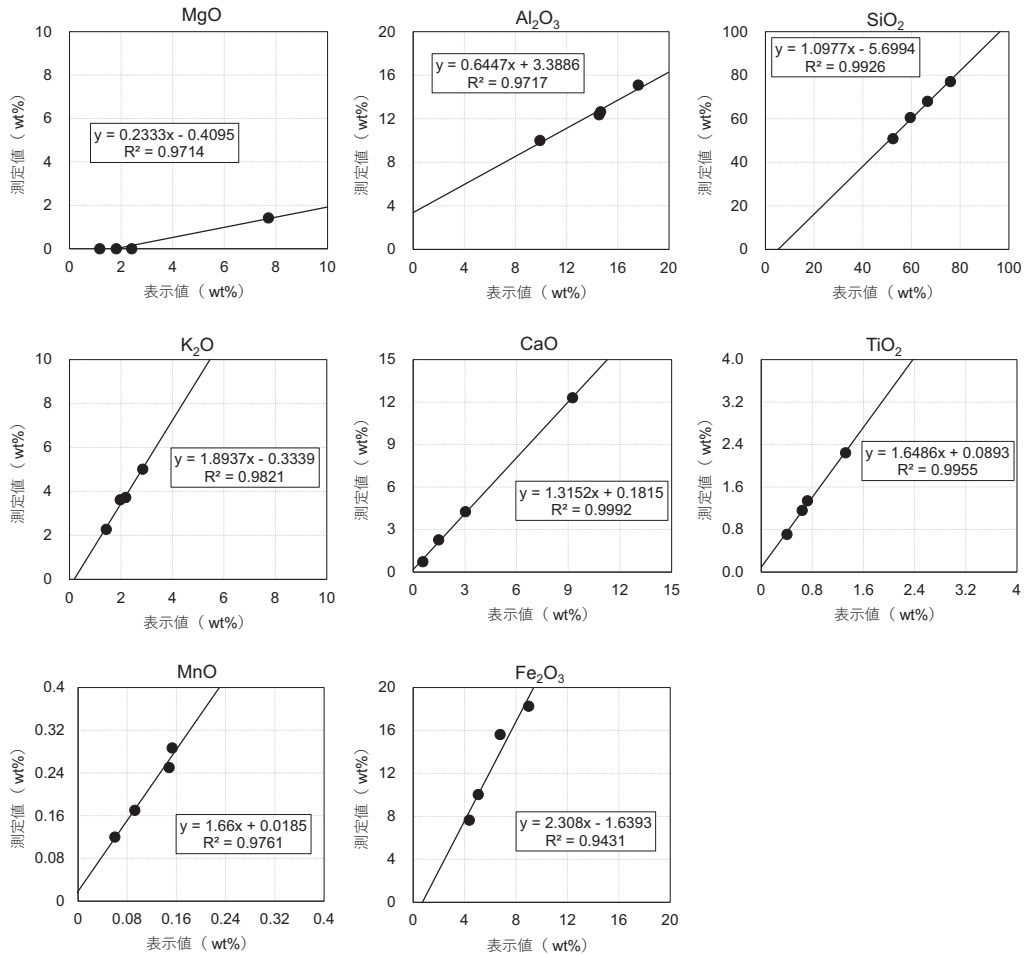


図5 測定値と表示値の相関から算出した補正值

表6 本研究と先行研究<sup>3)</sup>で得られた人造石の分析結果 (wt%) の比較

資料番号		MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ig.loss	消石灰：種土
No.38	先行研究	0.3	10.3	69.3	2.9	7.7	0.2	—	1.4	7.0	1 : 8.8
	本研究	1.8	7.7	69.0	2.6	9.2	0.2	0.1	3.0	6.5	1 : 7.2
No.58	先行研究	0.6	11.1	72.5	1.8	4.8	0.3	—	2.4	5.4	1 : 14.9
	本研究	1.7	18.8	64.3	3.7	2.6	0.3	0.1	3.6	4.9	1 : 28.4

## 4. 分析結果

### 4-1. X線回折分析の結果

高輪築堤から採取された14種類の資料から得られた回折パターンを表7の2列目に示す。資料Aについては、A-2からはカルサイトを検出することができず、A-1とA-3ではカルサイトが存在する可能性は否定できないが、カルサイトに帰属するピークは鮮明ではなかった。F-1の回折パターンからもカルサイトの鮮明なピークは得られず、G-2からはカルサイトを検出する

ことができなかつた。その他の9つの資料については、回折パターンからカルサイトの存在を確認することができた(表7の3列目)。

分析から検出されたカルサイト以外の化合物を表7の4列目に示す。全ての資料から Quartz が検出された。その他には曹長石 (albite) (曹微斜長石 (anorthoclase) の可能性も考えられる) や灰長石 (anorthite) 等の長石類, 白雲母 (muscovite) 等の雲母類に帰属するピークが検出された。頑火輝石 (enstatite) 等の輝石類の鉱物が含まれる可能性のある資料もあった。一方、セメントの材料として用いられる石膏 (gypsum) は、いずれの資料からも検出されなかつた。

表7 各資料から得られた回折パターン, カルサイトの有無, 検出された化合物

資料番号	各資料から得られたXRDの結果 (Calciteの回折パターンは赤線で示す)	Calcite 有無	他に得られた化合物の回折 パターン
A-1		△	Quartz、Albite、Enstatite
A-2		—	Quartz、Albite、Muscovite
A-3		△	Quartz、Albite
B-1		○	Quartz、Anorthite
C-1		○	Quartz、Albite
C-2		○	Quartz、Albite
C-3		○	Quartz、Albite
D-1		○	Quartz、Anorthite
D-2		○	Quartz、Anorthite
E-1		○	Quartz、Anorthite
E-2		○	Quartz、Anorthite
F-1		△	Albite、Pigeonite
G-1		○	Quartz、Albite
G-2		—	Quartz、Albite



## 4-2. 蛍光X線分析の結果

高輪築堤から採取された14種類の目地資料についても、3-2-3. で示した人造石資料と同様の前処理を行ってから蛍光X線分析を実施した。分析の結果得られた8元素の酸化物の含有率、及びそれらの結果から算出した各資料の消石灰と種土の配合比を表8に示す。

資料Aについては、他の資料と比較すると消石灰の配合比が小さく、特にA-2の配合比が小さかった。また、他の資料と比較するとF-1の消石灰の配合比が小さめであり、G-2では非常に小さかった。これらの結果は、X線回折分析から得られたカルサイトに帰属するピークの強度(4-1.)と良く対応している。

資料B～Eについては、消石灰と種土の配合比は1:2.3～1:7.0の範囲の値が得られた。先行研究<sup>3)</sup>で報告されている服部長七の工事で用いられた8点の人造石資料に関しては、消石灰と種土の配合比が1:6.6～1:44.5の範囲の分析結果が得られているので、高輪築堤から採取された資料B～Eの方が、消石灰の含有率が高い傾向が見られた。しかし、開業期に施工されたと考えられる資料Cと拡幅期に施工されたと考えられる資料B・Eとの間に有意な差を確認することはできなかった。

表8 高輪築堤から採取された目地資料の分析結果 (wt%), 及び消石灰と種土の配合比

資料番号	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Igloss	消石灰：種土
A-1	14.2	6.5	43.4	0.6	3.9	0.5	0.5	14.3	16.2	1:18.3
A-2	1.7	20.8	53.9	1.6	1.8	0.9	0.2	9.4	9.8	1:40.9
A-3	23.0	6.6	37.6	0.5	7.9	0.5	0.5	9.2	14.2	1:8.6
B-1	9.6	10.7	43.2	0.5	9.4	0.6	0.3	9.9	15.8	1:7.0
C-1	5.7	8.5	47.7	0.9	17.4	0.5	0.1	4.9	14.3	1:3.4
C-2	1.8	11.3	56.7	0.8	14.1	0.6	0.1	5.8	8.9	1:4.4
C-3	4.2	9.1	46.4	0.8	18.8	0.5	0.1	5.0	15.1	1:3.0
D-1	11.5	11.1	47.6	0.7	10.6	0.6	0.3	6.3	11.3	1:6.1
D-2	4.4	8.9	41.8	0.5	22.9	0.6	0.2	7.5	13.1	1:2.3
E-1	1.8	11.0	56.8	1.0	14.2	0.5	0.2	6.6	7.9	1:4.3
E-2	1.8	11.5	61.2	1.1	11.5	0.5	0.2	6.6	5.6	1:5.6
F-1	1.9	17.3	56.7	0.7	7.3	1.0	0.3	10.9	4.1	1:9.4
G-1	4.4	10.0	56.1	0.9	11.0	0.4	0.3	5.1	11.8	1:5.9
G-2	1.9	6.6	80.9	1.2	1.7	0.4	0.1	5.5	1.8	1:44.5

## 5. まとめ

高輪築堤は2019(平成31)年、品川駅改良工事の際に石垣の一部が発見され、2020(令和2)年の発掘調査により、その存在が確認された。鉄道建設当時、主な資材はイギリスから輸入されたが、築堤や橋梁の基礎に利用された石材や土砂等の材料は国内でまかなわれたと考えられている。

本研究では、高輪築堤で用いられた目地材に消石灰が用いられた間接的な証拠を得ること、及び消石灰と種土の配合比を調べるために、第7橋梁橋台部等から採取された目地材に対してX線回折分析及び蛍光X線分析による材料分析を実施した。X線回折分析の結果、14個のうち9個の資料については、回折パターンからカルサイトの存在を確認することができた。このこ

とから、消石灰が用いられた可能性が推測される。これらの資料については、消石灰と種土の配合比は1:2.3~1:7.0の範囲の値が得られ、服部長七の工事で用いられた8点の人造石資料よりも消石灰の含有率が高い傾向が見られた。しかし、開業期に施工されたと考えられる資料と拡幅期に施工されたと考えられる資料との間に有意な差を確認することはできなかった。今後は、近い時代に用いられた目地材等の分析事例を増やして、高輪築堤との比較検討を進めていく予定である。

### 参考文献

- 1) 『概説 高輪築堤』, 港区教育委員会 (2022)
- 2) 『鉄道開業150周年記念 人物でみる日本の鉄道開業』, 港区立郷土歴史館 (2022)
- 3) 天野武弘: 服部長七没後100年にあたり歴史的土木工法(人造石工法)に再び光を, シンポジウム「日本の技術史をみる眼」第38回講演報告資料集, 中部産業遺産研究会, 5-28 (2020)
- 4) 前浪洋輝: 人造石の固化メカニズムについて, シンポジウム「日本の技術史をみる眼」第38回講演報告資料集, 中部産業遺産研究会, 1-4 (2020)
- 5) 山田康治郎: 低希釈率ガラスビード法による岩石中の主成分・微量成分の測定, 蛍光X線分析の実際, 184-185 (2005)

キーワード: 高輪築堤 (Takanawa Chikutei); 目地材 (joint material); 消石灰 (slaked lime); X線回折分析 (X-ray diffraction analysis); 蛍光X線分析 (X-ray fluorescence analysis)

## Analytical Investigation of the Joint Materials Sampled from Takanawa Chikutei Site

INUZUKA Masahide, TAKAHASHI Yoshihisa\*, CHI Chih lien,  
NAKAYAMA Shunsuke, NAKAMURA Mai, TATEISHI Toru,  
SUZUKI Miwa\*\*, SAITO Susumu\*\* and AMANO Takehiro\*\*\*

After a part of stone walls was discovered during the construction of Takanawa Gateway station in 2019, the Takanawa Chikutei (embankment) was unearthed by the excavation in 2020. When the first Japanese railway was constructed at the beginning of the Meiji era, most of the materials necessary for the construction were imported from England, but stones and sediment for the foundation of bridges and embankments are considered to have been supplied within Japan. To understand the history of Japanese construction work, it is interesting to compare the composition of the joint material used at Takanawa Chikutei with that of joint materials made with conventional technology, and with artificial stones developed later in the Meiji era.

In order to obtain indirect evidence of the use of slaked lime mixture and to calculate its composition ratio, the joint materials sampled from Takanawa Chikutei were analyzed by X-ray diffraction analysis and X-ray fluorescence analysis. As a result of the X-ray diffraction analysis, calcite was identified in 9 of 14 samples, providing the indirect evidence of the use of slaked lime mixture in the joint materials at Takanawa Chikutei. The composition ratio obtained by X-ray fluorescence analysis indicates that the content ratio of slaked lime in the joint materials at Takanawa Chikutei might be higher than that of artificial stones developed later in the Meiji era.

---

\* Hokkaido Museum

\*\* Board of education, Minato city

\*\*\* Aichi University