

明治7年に竣工した旧大阪府庁舎の基礎に見られた石灰コンクリート

Lime concrete observed at the foundation of old Osaka prefectural government building completed in 1874

吉田 夏樹^{*1}

1. はじめに

平成23年5月～9月、大阪市西区江之子島において、旧大阪府庁舎跡の大規模な発掘調査が行われた¹⁾。その建物は、明治7年～大正15年まで大阪府庁舎（写真-1）として活躍したのち、昭和20年の大阪大空襲でほぼ焼失し、その後の変遷を経て主にその基礎構造物が地中に眠っていた。

発掘調査では、明治初期に建築された旧大阪府庁舎の基礎や排水溝、大正初期に増築された北館と南館の基礎、煉瓦壁、暖炉などの構造物や設備などが出土した¹⁾。出土品には、煉瓦、瓦、陶磁器、タイルなどが見られ、特に煉瓦については、平成18年の試掘調査においても精査され、その刻印から、一部の煉瓦が、国内で煉瓦生産が始まったばかりの明治初期に授産所で製造されたものと明らかになるなど、話題となった²⁾。

一方で、あまり注目されてはいないが、明治期に建築された中央棟の基礎に「石灰コンクリート」と呼ばれる材料が見つかった。設計図書が見つかっておらず、材料の詳細は分からないが、葛野壮一郎の回顧文³⁾には、旧大阪府庁舎の基礎に「石灰コンクリート」が用いられていたと記されている。筆者は、特にセメント系材料の化学を専門として学んできたが、恥ずかしながら「石灰コンクリート」という名称は、初めて聞いたものであった。本稿では、この石灰コンクリートが主役となる。

石灰とは、石灰石（ CaCO_3 が主成分）などを原料として造られる生石灰（ CaO ）、消石灰（ Ca(OH)_2 ）を指す。石灰を用いた材料は、セメントが普及する以前に活躍し、古くは紀元前3000年頃のエジプト、紀元前800年頃のギリシャ、約2000年前のローマなどで見られ⁴⁾、日本でも

漆喰に代表される石灰材料が用いられてきた。石灰コンクリートは、このような材料の一種で、石灰を結合材とするコンクリートであろうことは容易に類推できた。しかし、石灰モルタルは国内で多く見つかるものの、コンクリート状の石灰材料が見つかった例は聞いたことがなかった。

筆者は、この珍しい材料を分析する機会を得た。材料構成を記録するとともに、時代背景や関連する材料の歴史を調べることにした。期待される成果は考古学的な意義ばかりではない。例えば、当時に近い材料で歴史的建造物の補修を行うために古い材料の分析が必要とされる場合や、長期耐久性を要する構造物の材料設計者・研究者には、古い材料の分析結果が物質の長期安定性を考察する基礎的データとなる場合があるなど、有用なデータとなりうる。

本稿では、石灰コンクリートの構成を明らかにすることを主目的としながら、石灰・セメント・コンクリートの歴史を調べた結果をご紹介します。



写真-1 旧大阪府庁舎（明治期撮影）⁵⁾

^{*1} YOSHIDA Natsuki：（一財）日本建築総合試験所 試験研究センター材料部材料試験室 主査 博士（工学）

2. 旧大阪府庁舎の歴史

石灰コンクリートの話を始める前に、旧大阪府庁舎について、建築から発掘調査に至るまでの歴史を概説する。

明治の新政が始まった慶應4年（9月から明治元年）に誕生した大阪府は、当初、現在の中央区本町橋に位置した旧西町奉行所を庁舎としていた⁶⁾。江之子島の庁舎は、明治5年に着工、明治7年に竣工した新築の庁舎である。建物は、明治初期を代表する西洋建築で、煉瓦造2階建て、建築面積は延べ830坪である⁷⁾。なお、庁舎の設計図書は未だ見つからないようで、不明なところが多い。図-1は、庁舎の新築の際に大蔵省へ提出された上申書⁸⁾に付されていた絵図で、当時の設計図に近いものと推定されている¹⁾。正面玄関に建つ4本の支柱、中央のドームやその装飾がひととき目を引く。同時期に建築された他府県の庁舎を見ても西洋建築は異例であった。府民には、「江之子島政府」と呼ばれていたようである。

設計者は、同時期に現・北区天満に建築された造幣寮（現・造幣局）の設計者トーマス・ウォートルス（明治初期を代表する建築家）や、造幣寮の首長キンドル（いずれも英国人）とも言われているが、詳しくは分かっていない。報酬が高額なため、図面を写しとって建築は日本人が行ったとの逸話が残されている³⁾。

江之子島は、当時、川に囲まれた島であった。庁舎の西には木津川が、東には百間堀川（ひゃっけんぼりがわ）

が流れていた（現在は、木津川以外は埋め立てられている）。また、西の対岸の川口町には外国人居留地が栄えていた。現在この辺りを散策すると、西町奉行所跡、川口居留地跡、大阪府庁舎跡などの石碑を見つけることができる（図-2）。ただし、明治の面影は、ほとんど見ることはできない。

大正3～5年には庁舎の増改築が行われた。写真-2の左上の写真が増改築後の庁舎で、北館と南館は増築されたものであり、地上2階、地下1階の木造建築であった¹⁾。その後、大正15年に庁舎が現在の大手前に移転するまでの延べ約50年間、大阪府の行政を支えた。

府庁舎としての役割を終えたのちは、昭和4年から大阪府工業奨励館として利用されたが、昭和20年の大阪大空襲により焼失してしまう。戦後にその跡地に建設された府立産業技術総合研究所が平成8年に和泉市に移転したのちは、大阪高等技術研修所として利用されたが、平成12年に閉館となる。平成17年、その土地に土壤汚染が見つかり、翌年に改良工事が行われた際、煉瓦壁の一部や基礎が発見された¹⁾。平成24年現在、その地には高層マンションが建設中であり、新たな出発の時を迎えている。この開発（長谷工コーポレーションらの企業グループによる）に伴い、大規模な発掘調査が行われることになった（写真-3）¹⁾。



図-1 旧大阪府庁舎の絵図⁸⁾



写真-2 大正の増改築前後の旧大阪府庁舎⁹⁾

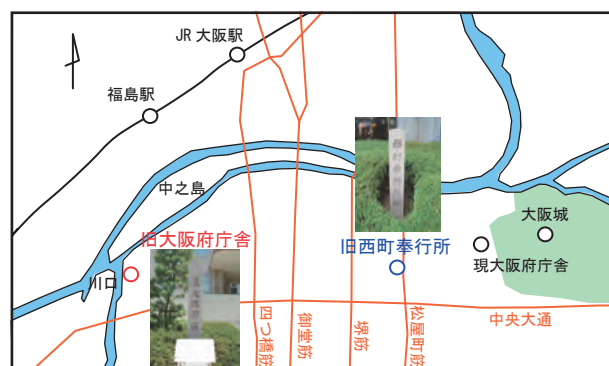


図-2 旧西町奉行所・旧大阪府庁舎等の位置



写真-3 発掘調査の様子

3. 石灰コンクリートの試験

3.1 発掘調査で見つかった石灰コンクリート

旧大阪府庁舎跡の発掘調査は、大阪府文化財センターにより行われた（長谷工コーポレーションからの委託による）。

図-3に、発掘調査により出土した基礎構造物の全体図を示す。石灰コンクリートが見つかった場所は、明治初期に建築された中央棟の基礎である。

発掘調査報告書¹⁾によると、基礎に打設されていた石灰コンクリートは、厚さ15～20cmを1層として、3～5層で打設されており、層の間に炭層や礫層が見られる箇所がある。図-3のAの位置で撮影された写真を写真-4に例示する。この写真の石灰コンクリートは5層に分けて打設され、合計の厚みが約80cmである。石灰コンクリートの上には、御影石の礎石が並べられ、そのうえに煉瓦が石灰モルタルで積まれていた。

このような基礎から石灰コンクリートのコアが採取され（写真-5）、構成材料の分析（記録）を目的として、当センターへ搬入された。コアの外観を観察すると、粗

骨材や細骨材が見え、確かにコンクリートと呼べる材料構成をしている。

3.2 試験方法

石灰コンクリートの試験項目は、表-1に示す9項目とした。マクロからミクロな視点まで、外観の特徴や物理的・化学的性質を記録することを心がけた。

石灰コンクリートは非常に脆かったため、観察や表面分析を行う際には、樹脂を含浸させるなどの前処理を施し、試料を固めてから分析を行うなど工夫が必要であった。



写真-4 石灰コンクリートの施工状況

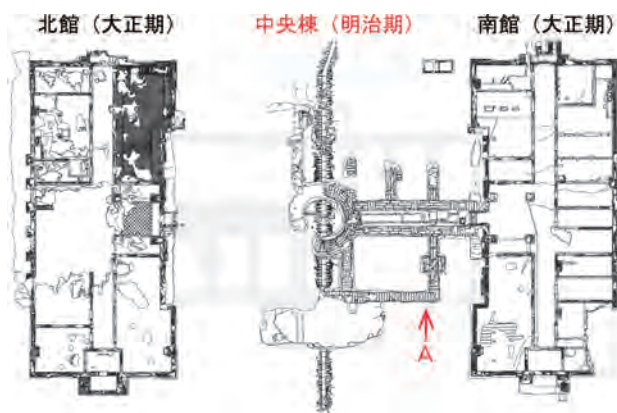


図-3 発掘調査により出土した基礎構造物の全体図¹⁾



写真-5 コアの写真（採取コアの一部）

表-1 試験項目

試験項目	目的	概要
圧縮強度	材料強度の確認。	JIS A 1107 に従い、コアの圧縮強度を求めた。
塩化物含有量	混練水に海水を用いた可能性などの確認。	JIS A 1154 に従い、塩化物含有量を求めた。
目視観察 実体顕微鏡観察	外観の特徴を記録。	コアの側面および任意の断面の観察を行った。
粗骨材の構成比	各粗骨材種の構成割合の分析。	線積分法により、各種骨材の構成割合（体積%）を推定した。
偏光顕微鏡観察	各使用材料を構成する鉱物の観察。	任意の粗骨材およびモルタル部分から薄片を作製し、観察を行った。
粉末 X 線回折	各使用材料を構成する鉱物の定性分析。	コンクリートから粗骨材とモルタル部分を採取した後、それぞれを微粉砕し、粉末 X 線回折法により構成鉱物の定性分析を行い、蛍光 X 線分析（FP 法）により構成元素の半定量分析を行った。
蛍光 X 線分析	各使用材料を構成する元素の半定量分析。	
電子線マイクロアナライザ	結合材を構成する元素の分析。	モルタル部分の欠片を採取し、樹脂を含浸させて硬化させたのち、任意の断面を鏡面状に研磨した。結合材が存在する微小領域を対象に、Mg、Al、Si、S、Ca、Fe（6 元素）の面分析を行った。
石灰と骨材の構成割合の推定	生石灰と骨材の混合割合を推定。	微粉砕試料を塩酸で溶解し、不溶残分量、ろ液の CaO 量、強熱減量と、試料量からこれらを引いたその他の成分量を求めた。不溶残分量とその他を足して骨材量とし、骨材と生石灰の構成割合を推定した。

3.3 試験結果

(1) 石灰コンクリートの強度

石灰コンクリートのコアを手にしたとき、容易に崩れるものや、幾らか固結しているものがあり、その硬さは様々であった。おおよそ硬さの異なる3本のコアを代表試料として、圧縮強度試験を行った結果を表-2に示す。圧縮強度は、0.55～8.55N/mm²であり、崩れやすいものは、ほぼ強度を有していない。なお、最も強度の高いコアは、玄関の土間から採取されたもので、特に入念に締固めなどが行われたのであろう。

(2) 粗骨材の分析結果

石灰コンクリートの切断面を写真-6に示す。

粗骨材について、石炭、煉瓦片、砂岩または泥岩が観察される。線積分法によって構成割合を分析すると、石炭73%、煉瓦片11%、砂岩または泥岩16%であった。石炭および煉瓦片は、現在、国内のコンクリートでは使われない材料であり、非常に特徴的である。これらの粗骨材をコアから抜き出し、分析を行った結果を表-3に示す。

石炭は、層状構造が見られ、微小な石英が散在している。黒色のマトリックスを構成する大部分は炭素化合物と考えられる。なお、強熱減量の測定結果から炭素量は低く、「亜炭」と呼べるものである。

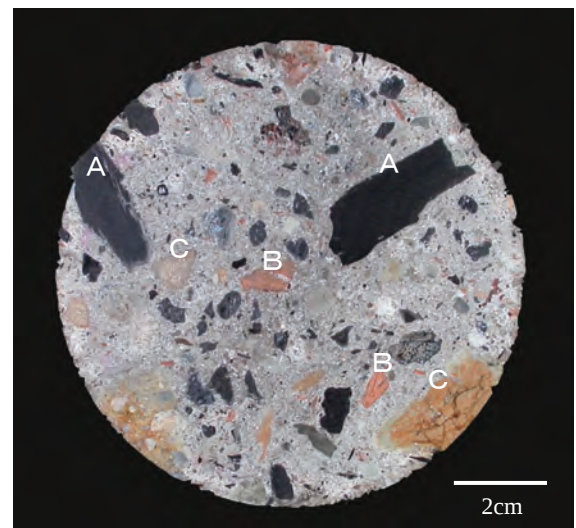
煉瓦片は、層状構造を有する。微細物質の集合で、その種類は鏡下では分からない。粉末X線回折試験の結果から、微細物質はムライトや非晶質物質などで構成されていると考えられる。

泥岩は、マトリックス中に粒径約0.5mm以下の石英片が散在しており、黒雲母や粘土鉱物が観察される。変質しており、粉末X線回折試験ではカオリナイトが同定された。

なお、カルサイトまたはアラゴナイト (CaCO₃) は、骨材に付着または侵入している結合材 (石灰) の成分である。

表-2 圧縮強度試験の結果 (単位: N/mm²)

試験体外観			
	強度	0.551	3.10



A: 石炭	黒色。粒径は主に 20mm 以下。層状構造、空隙が多く脆い
B: 煉瓦片	赤褐色。粒径は主に 20mm 以下。層状構造、空隙が多く脆い
C: 砂岩・泥岩	黄土色、褐色。粒径は主に 20mm 以下。丸みがある。変質している。

写真-6 石灰コンクリートの断面 (粗骨材の観察)

表-3 各粗骨材の分析結果

分析対象	石炭				煉瓦片				泥岩			
偏光顕微鏡観察												
	0.5mm				0.5mm				0.5mm			
XRD ^{*2}	石英、雲母類、カルサイト、(ブロードなピークが出現 (有機化合物か))				ムライト、石英、長石類、カルサイト、(ブロードなピークが出現 (非晶質物質))				石英、長石類、雲母類、カオリナイト、カルサイト、アラゴナイト			
XRF ^{*3} 半定量分析 (%)	Ig.loss	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ig.loss	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ig.loss	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
	25.7	0.4	24.5	45.0	11.3	0.7	19.6	40.8	13.8	0.8	18.2	45.9
	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	others	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	others	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	others
	0.6	2.2	0.2	1.3	0.2	21.6	2.5	3.4	0.1	12.9	4.6	3.7

*1: 左写真が開放ニコル、右写真が直交ニコルによる観察 *2: 粉末 X 線回折試験 *3: 蛍光 X 線分析試験 (Ig.loss は別途測定)

る。構成元素の量比をおおまかに捉えるため、各元素の含有量（半定量値）を参考として記したが、値の見方には注意が必要である（ CaCO_3 がIg.lossとCaO量に影響）。

さらに、一部のコアには、一辺が10cmを超える花崗岩が見られたが、発掘調査報告書¹⁾を参照すると、石灰コンクリートの層間に並べられた花崗岩の破砕片と考えられ、骨材として利用されたものではないであろう。

(3) 細骨材と結合材の分析結果

分析対象をさらに微小な部分に移し、モルタル部分を構成する細骨材と結合材を分析した結果を表-4に示す。

観察された細骨材は、垂炭や煉瓦片が細かく砕かれたもの、石英、アルカリ長石などの鉱物砂粒と、岩片砂粒であった。

結合材は、色は白色で、接着性は低くて脆い。粉末X線回折試験（XRD）で同定されたカルサイト、バテライト、アラゴナイト、モノカーボネートが結合材の結晶相成分と考えられる。

ここで、モノカーボネートとは組成式 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ で表されるアルミン酸カルシウム水和物の一種である。石灰（CaO）が原料と考えられる結合材に、なぜAlを含む化合物が生成しているのか。さらに詳しく電子線マイクロアナライザ（以下、EPMA）で微小範囲の元素分析を行った（図-4）。

濃度の高低は色で表される（凡例のカラーバーを参照）。まず、使用骨材はCaを主成分とせず、結合材はCaを主成分とするため、低Ca濃度の箇所が骨材由来の粉

末、高Ca濃度の箇所が結合材部分と判別できる。次に、他元素のデータで結合材部分を見ると、SiおよびAl濃度が比較的高いことが分かる。さらに、結合材部分のピクセルを抽出して元素濃度を算出する手法¹⁰⁾により、表-5に示す結果が得られる。SiやAlを多く含むことが定量的に明らかである。石灰を主成分とする結合材に、Ca以外の元素を含む要因について、骨材起源のAlやSiが溶出し、石灰と化学的に反応している可能性が高い。モノカーボネートはそうにして生成した物質の一種と考えられる。ケイ酸カルシウム水和物なども生成している可能性が考えられるが、今回は、これ以上の分析は行わなかった。

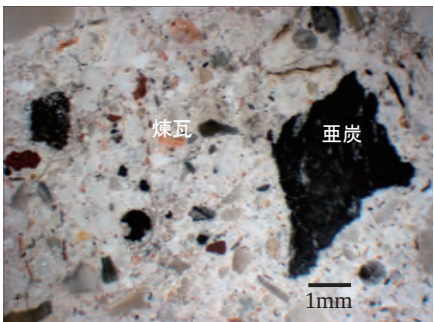
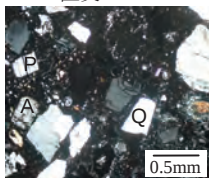
なお、色や強度、顕微鏡観察の特徴から、結合材の主成分は石灰であり、セメントが幾らか混入している可能性は低いものと判断された。

(4) その他

石灰コンクリートの単位容積質量は、比較的固結しているもので $1,360\text{kg/m}^3$ 、脆いもので $1,200\text{kg/m}^3$ であった。現在のコンクリートが標準的に $2,200 \sim 2,300\text{kg/m}^3$ であることからすると、大変軽いものである。

塩化物含有量は、最大で 0.29kg/m^3 であった。現在のコンクリートを基準に考えると低い含有量であり、例えば、海水などの塩水が練り混ぜ水に使用された可能性は低いと言える。

酸溶解法により推定した骨材と石灰（生石灰）の混合割合は、骨材：生石灰＝約6.5～8.5：1（体積比）であった。

対象	モルタル部分
実体顕微鏡観察	
偏光顕微鏡観察	開放ニコル  直交ニコル  Q:石英、A:アルカリ長石、P:斜長石
XRD	カルサイト、バテライト、アラゴナイト、モノカーボネート、石英、（長石類は同定できず）

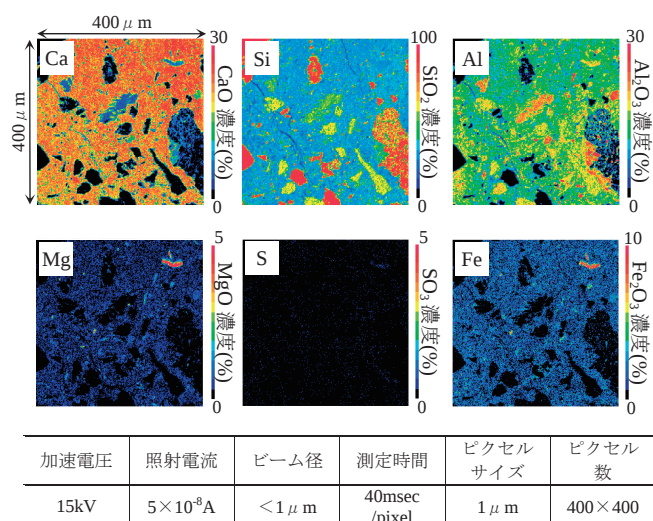


図-4 EPMAによる結合材部分の面分析結果

表-5 面分析結果から算出した結合材の元素の構成割合（%）

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	CaO	Fe_2O_3
0.6	19.6	44.9	0.2	32.4	2.3

4. 石灰コンクリートとはどのような材料か

4.1 石灰を用いた材料の歴史

石灰コンクリートとは、どのような材料であったのだろうか。石灰材料の変遷から、材料設計や使用目的を紐解く。

石灰は、人類が火を使い始めた頃から利用されていたと想像される。石灰石や貝殻などを焼いて生石灰 (CaO) を造り、これを水と反応させて造る消石灰 (Ca(OH)_2) のペーストは、気中で水分蒸発や炭酸化により、ある程度硬化する (気硬性)。煉瓦や石材を用いた組積造を主体とする地域では、目地材などとして砂を混合した石灰モルタルが発展した。

この石灰材料を改質し、水硬性を付与したのが、ローマ時代 (299BC ~ 476AC) の技術者である⁴⁾。彼らは、イタリアのナポリ近郊に位置するポツォーリで採られた火山灰 (ポツォラーナと呼ばれる) を石灰と混合し、水を加えて練ると徐々に硬化することを発見した。ポツォラーナは、現在のフライアッシュなど「ボゾラン」の語源である。火山灰のガラス相に含まれる SiO_2 が消石灰、水と反応してケイ酸カルシウム水和物を徐々に生成して緻密化し、硬化したのであろう (いわゆる、ボゾラン反応)。また、ローマンコンクリートには、凝灰岩や煉瓦の粗骨材が用いられている。これらの骨材はガラス相を持ち、同様に水硬性を付与する役目が期待されたのかもしれない。古代ローマでは、このような石灰材料を用いたモルタルやコンクリートが、土木工事や建築工事に用いられた。その後、ローマ帝国の滅亡 (476年) とともに、これらの技術はいったん失われるが、1414年に古代ローマ時代の建築家ウィトルウィウスの建築書が見つかり、水硬性石灰の利用が再び進んだ⁴⁾。

18世紀からは水硬性石灰の研究が発展し、ついにはセメントの発明に至る。イギリスやフランスで、粘土質な石灰石を焼いて造った石灰が水硬性を持つことなどが発見されたのち、1824年、イギリスのアスプディンが、石灰に粘土を混ぜてクリンカーを焼成し、これをポルトランドセメントと名付けた¹¹⁾。クリンカーにはケイ酸カルシウム、アルミン酸カルシウムなどが生成し、それ自身が水と反応して硬化する。1830年代の洋書^{12), 13)}を見ると、セメントの研究が盛んに行われ、石灰材料の知見がかなり蓄積されていることに驚かされる。

一方、木造を主体とする日本では、欧州ほどの石灰材料の発展は見られないものの、石灰は古くから用いられ、漆喰やたたきなど、独自の石灰材料が発達していく。ここで、たたきの技術は、ボゾランとは異なる方法で石灰

に水硬性を付与した技術であり、大変興味深い。たたきとは、石灰と種土 (主に風化花崗岩) を混合し、水を加えて練り上げたもので、これをたたき締めて土間・流し場・かまどなどを造った¹⁴⁾。材料構成は、西洋の石灰モルタルに近い。水硬性のメカニズムは詳しく分かっていないが、種土に含まれる主に粘土鉱物と Ca(OH)_2 が反応し、ケイ酸カルシウム水和物やアルミン酸カルシウム水和物を生成して硬化したのではないだろうか。近年、ベントナイトと Ca(OH)_2 の化学反応が研究されており参考になる^{15), 16)}。

もう一つの材料、漆喰は、消石灰、糊 (海藻を煮出した液)、スサ (ワラ、麻、紙) を練ったもので、基本的に砂を混入しない壁塗り材料である。築城を契機に盛んに用いられたことから、石灰石を用いた石灰の工業生産は、1600年頃から徐々に普遍化している¹⁷⁾。漆喰には水硬性は無く、気硬性の材料である。国内では石灰材料の全てを漆喰と慣例的に呼ぶ場合があるが、材料の構成や性質、使用目的などを考慮すると、石灰モルタルやたたきと区別して呼んだほうが誤解は無い。

このように、江戸末期まで漆喰やたたきが使われていた日本に、西洋の石灰材料やセメントの技術が輸入されるのは、明治維新前後のことである。

4.2 明治の文献に見る石灰コンクリート

明治の文献には、西洋の石灰利用法の解説を幾つか見ることができる^{18), 19)}。石灰コンクリートの記述は、明治19年発行の「造家必携²⁰⁾：コンドルの口述録」などに



写真-7 東京大学建築学科前に建つコンドルの銅像

表-6 造家必携の石灰コンクリートと分析結果の比較

項目	造家必携	分析結果
粗骨材	山砂利、川砂利、碎石、煉瓦碎片	亜炭、煉瓦碎片、砂岩・泥岩
細骨材	川砂、山砂、鉱さい	鉱物砂粒、岩片砂粒、亜炭、煉瓦碎片
混和材	火山灰 (パゾラナ、トラッス (原文通り))、陶器・煉瓦の粉末	煉瓦の粉末 (混和材としての利用かは不明) 火山灰は見られない
調合	生石灰：砂：砂利＝1：2：5～6 (体積)	生石灰：骨材＝1：6.5～8.5 (体積)

見つけることができた。コンドルは、明治10年に政府に招へいされ英国から来日した建築家で、工部大学校造家学科（現・東京大学工学部建築学科）で教師としても活躍した人物である（写真-7）。

造家必携によると、石灰コンクリートとは、石灰を結合材とし、砂利、砂と混ぜ合わせたものと書かれている（明治の文献では、コンクリートは煉砂利^{20),21)}、結成石¹⁹⁾、混凝土²²⁾などと漢字表記されている）。日本国内の石灰は純粋で、天然の水硬性が期待できないことから、ポゾランの併用例が示されており、火山灰（ドイツの火山灰トラスも記されている）のほか、陶磁器や煉瓦の粉末の使用が紹介されている。なお、煉瓦粉末などは、1830年代の洋書¹³⁾にも「人工ポゾラン」として紹介されている。

造家必携に記されている石灰コンクリートの仕様と、府庁舎の石灰コンクリートの分析結果を対比して表-6に示す。煉瓦碎片の使用は例示され、煉瓦粉末も見られる。コンクリートの調合は容積比で、生石灰と骨材の構成割合は近いことが分かった。これより、府庁舎の石灰コンクリートは、一般に定義されていたものと同様の材料構成をしていることが分かった。なお、亜炭は量が豊富にあったため利用されたのであろう。変質して粘土鉱物を含む砂岩・泥岩は水硬性を期待して使用されたのかもしれない。水硬性を期待したと思われる材料設計により、石灰の結合材部分にAlやSiが多く溶出して化合物が生成し、品質は一定しないが、幾らか硬化したのであろう。

なお、コンクリートの使用目的は明瞭で、基礎の築造に有用と記されている²⁰⁾。これは、1830年代の洋書¹³⁾にも共通する。構造体には用いられず、「地盤改良材」

に近い。府庁舎新築時の大蔵省への上申書⁸⁾には、地盤工事を厳重に行う旨が記されている。河川に囲まれた江之子島地区に大規模な庁舎を建築するには、緩んだ地盤を改良する必要があるものと想像され、国内では目新しい石灰コンクリートの使用が英国人設計者によって提案されたのではないだろうか。

4.3 セメントの普及と石灰材料

一方のセメントの技術について、明治維新前後から、外国産のセメントが輸入されて横須賀の造船所などの建設に用いられ、明治6年からは国内でセメント生産が始まった¹¹⁾。セメントは、自身が水硬性を持ち、強度が高く、硬化速度が速いなど、石灰材料よりその性質は優れていた。しかし、セメントの普及は急には進まなかった。これは、セメントが高価であったこと（外国産だけではなく国産も同様）²³⁾、国産の品質改良に時間を要したこと、横浜築港（明治25年）のコンクリート劣化²⁴⁾に見られるようにセメントコンクリートの施工技術や知見が十分ではなかったことなどが理由として挙げられる。

セメントの普及が進むのは、明治20年代にセメント価格が安くなり始めたころからである²³⁾。建築においては、明治24年に発生した濃尾大地震以降、モルタル目地への普及が進んだ²⁵⁾。港湾工事では、横浜築港以降も、大阪築港（明治30～38年）²³⁾や、廣井勇の小樽築港（明治30～41年）²⁶⁾などに用いられる。小樽築港では、火山灰を用いて耐海水性が高められた。鉄筋コンクリートも使われ始める。琵琶湖疏水の山科運河の橋に明治36年に用いられたものが最初とされ²⁷⁾、鉄道においても明治43年以降に利用が進んだ²³⁾。鉄筋コンクリート建築は、明

表-7 石灰・セメント・コンクリートの技術発展および旧大阪府庁舎の建築に関わる出来事

年	出来事
299BC~476AC	ローマで石灰に火山灰を混合し、水硬性を有する石灰材料が盛んに利用される。
1756	John Smeaton (英) が粘土を含む石灰石から造った石灰が水中で固まることを発見する。 ¹¹⁾
1796	James Parker (英) が粘土質の石灰石から天然セメント（ローマンセメントと呼ばれた）を焼成した。 ¹¹⁾
1812	Louis Vicat (仏) が人工的な水硬石灰の合成に成功する。 ¹²⁾
1824	Joseph Aspdin (英) がポルトランドセメントを発明する。
1844	Charles Johnson (英) がポルトランドセメント製造法の基礎を固め、1850年頃より各国でセメントの製造が始まる。 （フランス：1848年、ドイツ：1850年、アメリカ：1871年） ^{11), 28)}
1868（明治元）	ウォートルスが来日する。府庁舎の設計に関わった可能性がある。大阪造幣寮（明治4年竣工）、東京竹橋陣営（明治4年竣工）、英国公使館（明治5年建築）、銀座一帯の煉瓦造建築（明治5～9年）などの建築に携わる。 ³²⁾
1872~1873（明治5～6）	東京の深川清住町に工部省のセメント工場が建築される。
1872~1874（明治5～7）	江之子島に大阪府庁舎が建築される。
1875（明治8）	宇都宮三郎が工部省セメントの品質改良に成功する。 ¹¹⁾
1877（明治10）	ジョサイア・コンドルが来日する。
1878（明治11）	服部長七の人造石工法が、土木工事に利用され始める。明治末までその利用は続く。
1891（明治24）	濃尾大地震が発生する。
1903（明治36）	国内で鉄筋コンクリートの利用が始まる。
1905（明治38）	日本において最初のポルトランドセメント試験方法が制定される。 ²³⁾
1914~1916（大正3～5）	旧大阪府庁舎の増改築が行われる。増改築では、セメントコンクリートが用いられている。

治37年に佐世保ドックにポンプ室と機関室が建築され²⁸⁾、次いで明治38年に神戸港に倉庫が建築された²⁷⁾。

石灰材料が利用されたのは、セメントが普及しなかった間である。土木では、西洋の石灰材料ではなく、古来のたたきを応用した技術が利用されている。服部長七が開発した技術で、たたきの水硬性を改善し、割石を併用した材料（服部人造石などと呼ばれる）を用いて、明治11年から大規模な土木工事（港湾・堰堤・樋門・鉄道など）を行った^{14), 29), 30)}。品質は職人の経験に頼るところがあったようだが²³⁾、安価で、材料調達が容易なことなどから、特に明治30年代まで多くの実績を残した。

西洋の石灰材料は、主に煉瓦造などの西洋建築で利用された。石灰コンクリート（幾らかセメントを含むものもある）が基礎の築造に用いられた実例として、同志社彰栄館（明治17年）、同志社礼拝堂（明治19年）、慶応義塾講堂（明治19年）、帝国大学内工科大学（明治21年）、千寿製紙会社工場（明治22年）、大阪府商品陳列所（明治23年）、鍋島邸本館（明治25年）、旧札幌電話交換局舎（明治31年）、名古屋電話交換局（明治31年（いずれも竣工年））などが報告されている³¹⁾。

石灰材料の歴史を含めて俯瞰すると（表-7）、石灰コンクリートは、古代からの知恵が詰まった材料で、明治維新前後に西洋建築とともに輸入されてセメントが普及するまでのわずかな期間に利用された材料であり、旧大阪府庁舎（明治7年竣工）の基礎に見られたものは、国内最古級の石灰コンクリートであることが分かった。

5. おわりに

旧大阪府庁舎の基礎に見られた石灰コンクリートの分析を通じ、石灰材料の変遷だけではなく、大阪府の歴史や、明治時代に今日の礎を築かれた諸先生方の偉業にふれられたことは、筆者にとって大変興味深く、有意義なことであった。

石灰材料について、石灰に水硬性を与える材料設計は、西洋だけではなく、日本でも独自にたたきの技術が開発された。石灰コンクリートの結合材は、炭酸化してCaCO₃になるだけではなく、骨材やその粉末に含まれるガラス相や粘土鉱物と化学的に反応して水和物を徐々に生成し、緻密化することで硬化していると考えられた。このような石灰と骨材成分の反応は、セメント系材料の長期にわたる化学的挙動を考えるうえでも参考になりそうである。

冒頭でも述べたように、古い材料を分析することは、考古学的な意義ばかりではなく、材料研究などの観点か

らも重要なデータを供給しうる。明治以前～大正初年の石灰・セメント系材料を分析する際には、材料の変遷に注意する必要がある。明治以前では、漆喰やたたきといった日本固有の石灰材料が利用され、明治維新前後からは、これらに加えて西洋の石灰材料とセメントが利用された。また、明治維新前後からは、火山灰が混和されている場合や、石灰に少量のセメントが混和されている場合などがある。さらには、結合材と、混和材や骨材成分の化学反応にも、十分注意を払わなくてはならない。単一の分析手法から得られた結果だけでは判断が難しく、幾つかの分析手法を組合せて材料の記録や考察ができれば理想的ではないだろうか。今後も、このような分析調査や研究において、当センターの技術が少しでもお役に立てればと考えている。

〔謝辞〕

本稿でご紹介した石灰コンクリートの分析は、長谷工コーポレーションからのご依頼により実施したものです。ご厚意により、本稿に分析結果の一部を掲載させて頂きました。心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 大阪府文化財センター：大阪市旧大阪府庁舎跡（仮称）阿波座駅前プロジェクトに伴う旧大阪府庁舎跡発掘調査，大阪府文化財センター調査報告書 第225集，2012（本稿の図-3は，本文献159頁の図面を一部改変し転載した）
- 2) 大阪府教育委員会：旧府庁跡，大阪府教育委員会文化財調査事務所年報11，2007
- 3) 葛野壮一郎：舊府廳舎の建築，建築と社会，Vol.14，No.5，pp.18-21，1931
- 4) 土木学会：古代ローマコンクリート ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析，コンクリートライブラリー 131，2009
- 5) 第五回国内国勧業博覧会協賛会：大阪と博覧会，1902（国立国会図書館近代デジタルライブラリーより転載した）
- 6) 大阪府史編集専門委員会：大阪市 第七巻 近世編Ⅲ，1989
- 7) 石田潤一郎：再読 関西近代建築－モダンエイジの建築遺産－大阪府庁舎，建築と社会，Vol.92，p.61，2011
- 8) 大阪府庁新築（明治5年7月），太政類典 第二編 明治四年～明治十年 第百二巻 地方八 地方官庁措置一（国立公文書館デジタルアーカイブ）
- 9) 大阪府：大阪府写真帖，1914（国立国会図書館近代デジタルライブラリーより転載した）
- 10) 沢木大介，小林久美子，坂井悦郎：硬化コンクリートに使用されたセメントの化学組成のEPMAマッピング分析による推定，セメント・コンクリート，No.766，pp.40-45，2010
- 11) 日本セメント：百年史，1983
- 12) L.Vicat, J.Smith: A practical and scientific treatise on

- calcareous mortars and cements, John weale architectural library, 1837
- 13) C.W.Pasley: Observations on limes, calcareous cements, mortars, stuccos and concrete, John weale architectural library, 1838
 - 14) 山崎俊雄, 前田清志: 日本の産業遺産Ⅰ産業考古学研究, 玉川大学出版, 2000
 - 15) 柴田真仁ほか: ベントナイト-セメント相互作用で生成するC-S-Hゲルの検出, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.4, No.3, pp.51-55, 2005
 - 16) 柴田真仁ほか: 圧縮ベントナイトとセメント界面における相互作用の評価, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.10, No.2, pp.91-104, 2011
 - 17) 前田清志, 玉川寛治: 日本の産業遺産Ⅱ産業考古学研究, 玉川大学出版, 2000
 - 18) 新家孝正: 石灰選擇法, 建築雑誌, Vol.1, No.6, pp.99-100, 1886
 - 19) 中嶋鋭治, 亀井重磨: 石灰及セメント使用法, 建築書院, 1894
 - 20) ジョサイア・コンドル(口述) 松田周次, 曾瀬達蔵(筆記): 造家必携, 續文舎, 1886
 - 21) 中村達太郎, 千葉末吉: 建築学提要, 淵點堂, 1891
 - 22) 田邊朔郎, 井上秀二: 鉄筋コンクリート, 丸善, 1906
 - 23) 日本ポルトランドセメント同業会: 昔のコンクリート, コンクリート叢書, 第24巻, 1936
 - 24) 臨時横浜築港局: 横浜築港誌, 1896
 - 25) 工学会 啓明会: 明治工業史建築篇, 1927
 - 26) 樋口芳朗: 明治のコンクリートに学ぶ, セメント・コンクリート, No.456, pp.2-10, 1985
 - 27) 大阪建設業協会: 大阪建設業協会100年史, 2009
 - 28) 依田彰彦: 明治のコンクリートに学ぶ, セメント・コンクリート, No.612, pp.14-17, 1998
 - 29) 石田正治: 人造石工法(たたき)の遺産の調査とその保存, 土木史研究, No.11, pp.309-318, 1991
 - 30) 大橋公雄: 人造石(たたき)工法とその遺構-服部長七の業績と人造石の歴史的価値-, 産業遺産研究, Vol.5, pp.44-62, 1998
 - 31) 宮谷慶一: 明治期組積造建築における地形の仕様について, 日本建築学会計画系論文集, 第568号, pp.153-160, 2003
 - 32) 堀越三郎: 初期明治建築研究の資料, 建築雑誌, Vol.44, No.537, pp.1843-1847, 1930

【執筆者】



*1 吉田 夏樹
(YOSHIDA Natsuki)