

〈一般研究課題〉 歴史的な組積造建造物の保存と活用に関する研究

助成研究者 名古屋市立大学大学院 青木 孝義



歴史的な組積造建造物の保存と活用に関する研究

青木 孝義

(名古屋市立大学大学院芸術工学研究科)

1. はじめに

イタリア、ローマのパンテオン（2世紀）、サン・ピエトロ聖堂（16世紀）、フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂（15世紀）は宗教建築として建設され、それぞれの時代・都市・様式・文化を代表する重要建築物である。これらの歴史的な組積造建造物の多くは、その崩壊に関する構造的安定性が現在進行中の亀裂により脅かされているように、保存や補強の面からその力学特性の解明が切望されている。一方、中部国際空港の建設で現在大きく変わりつつある常滑市の景観には、まちのシンボルともいえる窯場に付属する赤いレンガ煙突や工場の黒い板塀が不可欠である。しかし、かつては市内に300本以上もあったと言われている煙突は、台風、地震などで崩壊、ないしその恐れがあったため使用していない煙突を取り壊したり半分の高さにしたりして、残念なことに今ではその数は50本弱に減少している。

以上を背景として、本研究は、歴史的な組積造建造物の保存に関する実験的・解析的研究、およびその活用に関する調査研究を行うことを目的としている。本研究で対象としている組積造建造物は、第2章で論じるイタリアのヴィコフォルテ教会堂と、第3章で論じる常滑市のレンガ煙突である。

2. ヴィコフォルテ教会堂

2.1 ヴィコフォルテ教会堂の現状、建設経緯と修復の歴史

イタリア、ピエモンテ州のモンドヴィ市近郊に位置するヴィコフォルテ教会堂（1596年建設開始、1731年ドーム建設、1733年ランタン完成、図2-1～図2-4）は、長軸約37.15m、短軸約24.80m、高さ約16.60mの世界最大規模の組積造楕円形ドームを持ち、地上からランタン上部までの高さは約84mに及ぶ。ドームの規模は勿論、その建設の歴史や時代背景、建築的特徴からも教会堂は1880年にイタリアの国宝に指定され、現在は多くの人々が訪れる信仰や観光の場となっている（図2-7）。



(a) 南面



(b) 西面



(c) 北面



(d) 東面

図2-1 ヴィコフォルテ教会堂外観



図2-2 ヴィコフォルテ教会堂内観



図2-3 ヴィコフォルテ教会堂ドーム

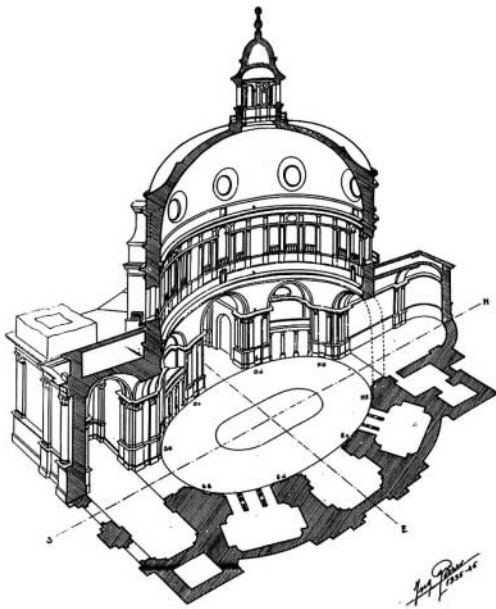


図2-4 ヴィコフォルテ教会堂の構造概略¹⁾

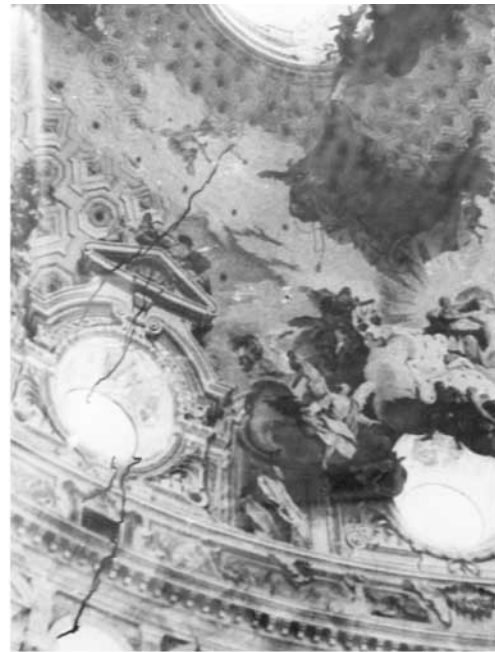


図2-5 1987年の修復前のクラック状況

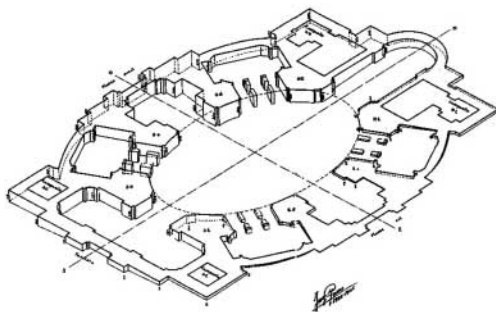


図2-6 不同沈下の様子¹⁾



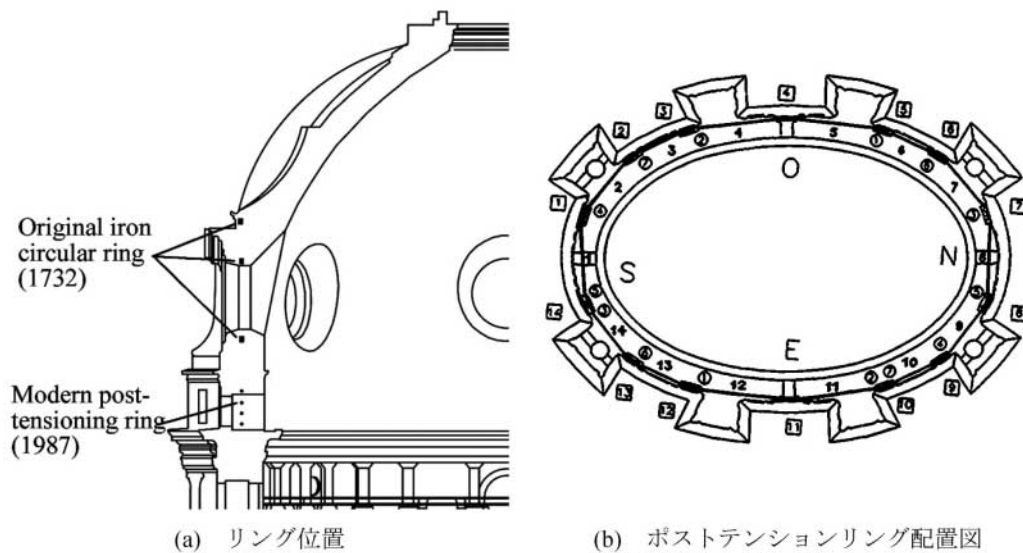
図2-7 ヴィコフォルテ教会堂前広場

しかし、その崩壊に関する構造的安定性は1600年代の建設中止、1700年代始めのドラム再建に見られるように、建設当初から敷地選択の誤りによる不同沈下（図2-6）やドームの自重による亀裂（図2-5）の進行により脅かされてきた。ドームの構造的安定性については注目を集め、1962年にはGarro¹⁾による、1983年にはRodio²⁾による調査報告が、またいくつかの研究発表もなされている^{3), 4)}。1983年には地下水位の制御を目的とする水路構が設置され、1987年にはドーム基部にポストテンションリング（図2-8、図2-9）が挿入され、フレスコ画の修復が行われている。表2-1に教会堂の建設経緯と修復の歴史を示す^{5)・10)}。



(a) 外観（扉） (b) ポストテンションリング (c) ジャッキシステム

図2-8 ドーム基部に設置されたポストテンションリング



(a) リング位置

(b) ポストテンションリング配置図

図2-9 Galloによる補強リング(1732)とポストテンションリング(1987)

2.2 現地調査

2.2.1 現地調査の概要

ヴィコフォルテ教会堂は、石や大理石で覆われ、ドーム内側はフレスコ画で装飾されている。そのため、構造物内部の状況を調べることは非常に難しく、このことは歴史的建築物の一般的な現状である。ヴィコフォルテ教会堂の保存や補強のためには劣化現況を把握する必要があるが、歴史的価値の高い建築物ほど実際に材料のサンプルを採取して実験を行うことが厳しく禁止されているという問題を抱えている。架構維持のための補強と仕上げ材の保存に向けた補修

表2-1 ヴィコフォルテ教会堂の建設経緯と修復の歴史

年	事 項	備考
1596 年	Ascanio Vittozzi により教会堂の建設開始	A. Vittozzi に よる工事
1600 年	最初の地盤沈下	
1615 年	A. Vittozzi の死と工事の中断	
1615 – 1701 年	長い中断の後建設再開（歪さを持ったアーチ，下部ヴォールト，楕円形第一コーニス，ドラムの一部分の建設） 地盤沈下の継続	
1701 年	Francesco Gallo に大聖堂の完成の任務が下りる 損傷しバランスの崩れたドラム，および亀裂のある古い内側のコーニスの取り壊し	F. Gallo に よる工事
1701 – 05 年	第一コーニス，ドラム基部から大窓までの再建	
1710 年	8 組の 3 連窓の完成	
1710 – 11 年	第二コーニスまでドラムが完成	
1722 年	足場のための準備に着手	
1723 – 24 年	アーチ枠を支える 6 本の組積造メイン柱の建設	
1724 – 30 年	足場建設の継続	
1728 年 12 月 2 日	工事見積り 150,991 リラを管理組合に提出	
1729 年春	組積工事の再開	
1730 年	第三コーニス（ドームの起拱点）までドラムが完成	
1730 年秋	ドーム建設用の巨大な足場が完成 雨や雪除けのため，藁で覆われる メインドームの建設用レンガを焼く窯の準備を開始	
1731 年春	足場に修正や修繕の必要な箇所が見つかる	
1731 年 6 – 10 月	ドームの建設	
1731 年 11 月	ドームの仮の覆いを設置	
1732 年 5 月 22 日	ドームの足場組の解体 足場は絵画装飾のために 1748 年まで残される	
1732 年秋	ランタンの工事とドームのレンガ屋根工事の開始	
1733 年 9 月	ランタンの工事の完成	
1733 年 10 月	ドームの瓦の覆いとランタンの鉛の覆いが完成（ドームの屋根は経済的理由で予定していた鉛の覆いから変更）	
1750 年	F. Gallo の死	
1800 年代初頭	ドームにひび割れ発生（ドラムとドームのいくつかの亀裂は，下から見えるほどだった）	
1825 年	建築家 Bonsignore が主要ファサードを設計，1829 年に実施	
1830 年	技師 Bordino が教会堂の排水システムを改良	
1832 年	Remondini と Panizza による報告	
1877 年	Jacod と San Quintino による報告	

年	事 項	備考
1880 年 2 月 8 日	イタリアの国宝に指定される	
1883 年	ドームの瓦の覆いを銅の覆いに葺き替える	
1890 - 94 年	主要ファサードが完成	
1904 年	鐘楼の尖塔を取り壊す	
1917 年	新しい鐘楼のための競技設計を実施	
1934 - 63 年	技師 Martino Garro が教会堂の観察（測量と危機の原因に関する調査研究を実施）	M. Garro に よる調査
1972 - 74 年	傾いた屋根の修復（コンクリート）	
1973 - 76 年	ランタンの修復	
1975 年	文化庁より教会堂を全面的に調査研究するための資金援助	
1976 年	基礎地盤と組積造に関する地質工学的調査研究 主要なひび割れには 2 つの変位計を、50 箇所の小さなひび割れには温度計を組み合わせたものを設置	
1976 年 3 月 26 日	写真測量	
1976 年 11 月	有限要素法による最初の解析モデル	
1983 年	別の 10 個の温度計と 8 つの変位計の設置	
1984 年	補強リングシステムの計画 補強リングの導入張力を計算するための有限要素法による第 2 解析モデル エポキシ樹脂の注入と補強リングによる組積造の補強 ポリウレタンによるひび割れの修復	
1985 年	補強のためドラムの組積造壁へ 2 度目の注入	
1985 - 86 年	補強リングの設置工事	
1987 年 4 月	第 1 回目の補強リング緊張	
1987 年 7 月	第 2 回目の補強リング緊張	
1987 年 11 月	第 3 回目の補強リング緊張（設計者により最適とされた緊張力の 40%が導入）	
1986 - 88 年	フレスコ画の修復	
1986 - 87 年	教会堂の基礎設備の修理	
1986 - 87 年	建築物の構造の大修復	
1990 - 91 年	アプシスと主要な柱廊玄関の修復	
1992 年	工事の検査	
1993 年	既存装置の改良の決定	
1994 年	別の 15 個の温度計を設置 既存装置の全てに関して、データ収集の自動化のための設備の設置	
2002 年	今後の修復に向けて、Vicoforte2002-2006 プロジェクト（イタリアー日本国際学術研究）開始	

近年の
修復工事

計画を立案するための基礎データを得ることを目的に実施した第一回調査（2002年2月12日～25日）では、目視現況調査、周辺地盤踏査に加え、電磁波レーダ法と衝撃弾性波法による構造部材厚測定、補強筋探査、衝撃弾性波法によるテンションリングの破断調査、赤外線サーモグラフィ法による外壁石貼りと礼拝室フレスコ画の浮き調査、および反発硬度法、超音波法によるレンガ・目地の強度推定に関する調査を行った^{11), 12)}。第二回調査（同年9月17日～24日）では、目視現況調査、赤外線サーモグラフィ法によるメインドームフレスコ画の浮き調査、レーザ変位計による不同沈下の進行度チェック、ウィンザーピン法によるレンガ・目地の強度推定に関する調査^{13)・15)}、固有振動数を推定するための常時微動測定¹⁶⁾を実施した。第1回および第2回の日本側調査団メンバーと調査項目をまとめて表2-2、表2-3にそれぞれ示す。以下の節では、現地調査で得られたいくつかの結果の概略を示し、詳細については引用・参考文献、発表論文を参照していただきたい。

表2-2 日本側調査団メンバー

第1回調査	青木 孝義（名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 助教授・工博）
	谷川 恭雄（名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博）
	込山 貴仁（株式会社コンステック開発技術事業本部 工博）
	大橋 幾世（名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生）*
第2回調査	青木 孝義（名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 助教授・工博）
	谷川 恭雄（名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博）
	込山 貴仁（株式会社コンステック開発技術事業本部 工博）
	畑中 重光（三重大学工学部建築学科 教授・工博）
	湯浅 昇（日本大学生産工学部建築工学科 助教授・工博）
	濱崎 仁（独立行政法人建築研究所材料グループ 工修）
	大橋 幾世（名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生）*

*調査当時の所属

2.2.2 構造部材の厚さ調査

構造解析のためのモデル化には、構造物の正確な寸法の把握が必要となる。Garroにより作成された図面¹⁾のデータを補うために、電磁波レーダ装置（N社製：コンクリートの場合は測定深度60cm，N社製：コンクリートの場合は測定深度30cm）により、メインドームと礼拝室・祭壇の天井を中心に厚さ調査を行った（図2-10）。代表的な電磁波レーダによる厚さ測定結果を図2-11に示す。メインドームの厚さは、90cm～100cmとなっており、貫通コアを抜いて厚さを測定した134cm～145cmの結果²⁾に比べ、かなり薄い値となった。コンクリートと組積造との誘電率の違いによる誤差を補正するため、厚さが80cmの部分で測定したところ、電磁波レーダの測定値は60cmとなり、補正係数1.33が求まった。メインドームの補正後の測定値は、120cm～133cmである。図2-11 (a), (b) より、メインドームの厚さは上にいくほど薄くなっていることが、頂部（ランタン基部）での厚さは、長軸の方が短軸より薄いことが分かる。また、図2-11 (c) より、礼拝室の天井厚さは、27cm～133cmと推定できる。

表2-3 調査項目

調査内容	調査箇所	使用機器および手法	備考
構造部材の厚さ調査	メインドーム 礼拝室・祭壇の天井	電磁波レーダ装置	2. 2. 2 節 参考文献 11), 12), 17)
構造補強材探査	ドーム部分	電磁波レーダ装置 鉄筋探査計	2. 2. 3 節 参考文献 11), 12), 17)
構造補強材破断調査	ドーム部分 ドラム部分	衝撃弾性波装置	2. 2. 4 節 参考文献 11), 12), 17)
ひび割れ・浮き調査	外壁石貼り部分 礼拝室フレスコ画 ドラム下方部分 ドームコーニスレベル	赤外線サーモグラフィ装置 目視調査 打音法	2. 2. 5 節 2. 2. 6 節 参考文献 11) - 13), 17)
レベル測量	教会堂周り 教会堂内部地上階 ドームコーニスレベル	レーザ距離計	2. 2. 7 節 参考文献 13), 17)
構造材料の調査	ドーム部分 ドラム下方部分 屋根裏部分 外壁石貼り部分 サンプル	反発硬度法 ウィンザーピン法 超音波測定装置 圧縮強度・静弾性係数試験 (サンプルのみ)	2. 2. 8 節 参考文献 11) - 15), 17)
凍害調査	庇, ドラム下方部分 外壁石貼り部分 サンプル	反発硬度法 ウィンザーピン法 目視調査	参考文献 13), 17)
レンガ・モルタルの 化学分析	ドーム・屋根裏部分 サンプル	四ホウ酸リチウム融解 ICP 発光分光分析法	参考文献 17)
常時微動	ドーム, 教会堂各点, 地下室, 地盤	常時微動計	2. 2. 9 節 参考文献 16)



(a) メインドーム



(b) 礼拝室天井

図2-10 電磁波レーダ装置による構造部材厚さ測定・構造補強材探査状況

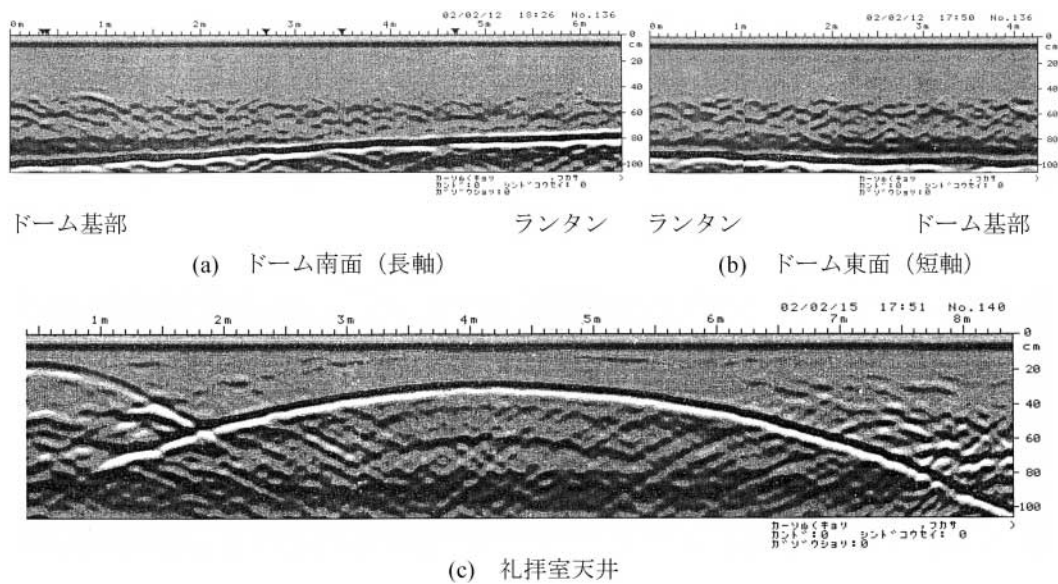


図2-11 レーダ画像

2.2.3 構造補強材探査

1962年になされた調査報告¹⁾の中で、Garroは「将来、場合によって補強リングを入れる」という図版を残しているが、実際に補強リングが挿入されたかどうかは明らかではない。資料に示された位置付近を中心に、メインドームをドラム上部からランタン下部まで、電磁波レーダ装置と鉄筋探査計（P社製）で走査した（図2-10、図2-12）。Garroのリングは、挿入の可能性を示唆したランタンの下部とドームの2箇所のみならず、ドームのどのレベルでも見つからなかった。ドーム中段では、過去に掘削して調査した時にも見つかっていないことから、Garroのリングは計画のみで工事は行われなかったと推定される。



(a) ランタン基部



(b) ドーム中段

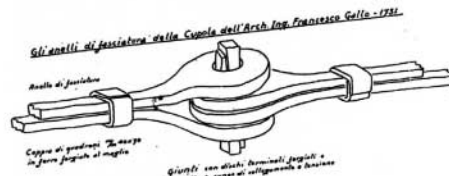
図2-12 電磁波レーダ装置，鉄筋探査計による補強筋探査状況

2.2.4 構造補強材破断調査

1588年から90年にかけて、Della Portaはローマのサン・ピエトロ寺院にオリジナルの補強リング（3本、総断面積 $60\sim 70\text{cm}^2$ ）を設置したが、時代の経過とともに生じた亀裂を防ぐことはできず、リングが破断していたことが知られている。その後、1743年から48年にかけて、PoleniとVanvitelliにより、サン・ピエトロ寺院には5本計 207cm^2 の断面積の補強リングが挿入された。同時期の1732年に、Francesco Galloにより、ヴィコフォルテ教会堂には3列5本計 140cm^2 の断面積の補強リングが挿入された（図2-13）。このリングが、ドーム周りを破断せずに1周しているかどうかは、教会堂の構造を把握する上で重要である。そこで、衝撃弾性波装置により、その破断の有無を判定する調査を行った（図2-14）。第1回調査では、露出したリングの一部を打撃し、ドームを1周する弾性波を測定したが、この方法では仮に補強リングの破断が認められたとしてもその位置を特定できないため、第2回調査では、補強リングをいくつかのブロックに分け、その間を透過する弾性波を測定した（図2-15）。



(a) 継手部分の写真



(b) 継手詳細¹⁾

図2-13 Galloによる構造補強材



(a) 衝撃弾性波装置



(b) 試験状況

図2-14 衝撃弾性波装置による構造補強材破断調査状況

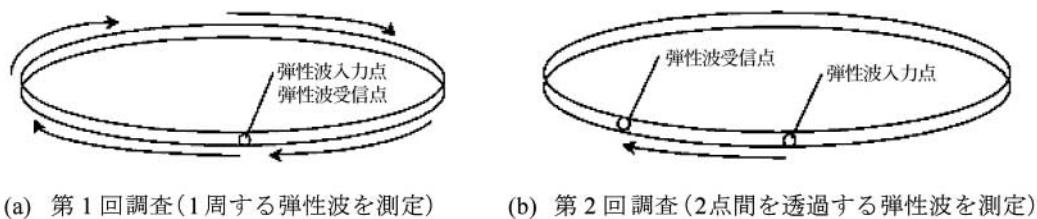


図2-15 衝撃弾性波による構造補強材破断の調査方式

測定波形を図2-16に示す。ドームの周長を約104mとし、鉄筋内部の波が伝わる速さを5000m/sと仮定すると、補強リングが破断していない場合、約0.0208s辺りにピークがくるはずである。図2-16ではこの辺りに顕著な反射波が認められ、第1回調査では、補強リングに破断はないものと推定された。しかし、受信波の再現性に乏しかったため、第2回調査では、2チャンネル方式による、より詳細な調査を行った。しかし、装置の故障により、南面1箇所(探触子間14m)しか破断調査を実施できなかった。

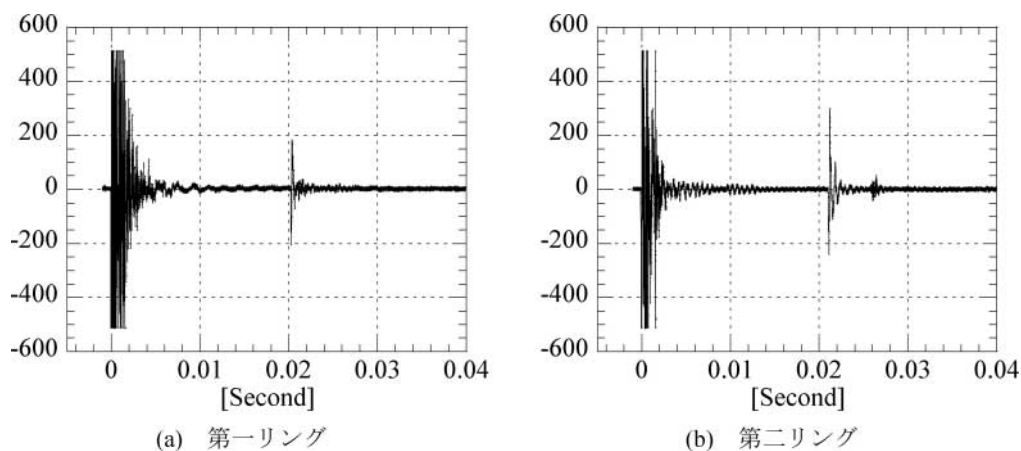


図2-16 測定波形

2.2.5 外壁石貼り、フレスコ画の浮き調査

対象としている歴史的組積造建造物には、自重や不同沈下によるひび割れ、長年の風雪に耐えたことによる劣化等で浮きが生じていると考えられるが、下部構造は石や大理石で覆われ、メインドームのフレスコ画は1987年の修復工事で補修され、現況が目視でははっきりと確認できない部分がほとんどである。また、外部は、教会堂の規模が大きく、足場もないことから、打音法などの接近しての調査が非常に難しいのが現状である。そのため、広範囲に遠隔からの調査が可能な赤外線サーモグラフィ法を用いて浮きを調査した（図2-17）。また、屋内のドームコーニス部分については、目視と打音法により浮き、およびひび割れの調査を行った。目視と打音法による調査結果については、引用・参考文献17)を参照していただきたい。

外壁石貼りの浮き調査結果を、可視像と赤外線サーモグラフィ熱画像をあわせて、図2-18から図2-20に示す。屋外の調査では、教会堂本体の組積造部分だけでなく、一見、ほとんど損傷の見られなかった鐘楼下の石貼りにおいても多数の浮きが検出された。これらの浮きのほとんどが、第三者被害に繋がる剥落危険度の高いものであった。

北西に位置する礼拝室フレスコ画の浮き調査では、赤外線サーモグラフィ法を適用するための熱源として、小型の電気ヒーターを用いた。図2-21、図2-22から分かるように、ひび割れに沿うフレスコ画の浮きが明瞭に検出されている。メインドームフレスコ画の浮き調査では、サーカス小屋用の大型ヒーターを用いて教会堂内部全体を加熱した。約2時間かけ、メインドームフレスコ画の表面温度は、約21.8℃から24.0℃に上昇し、多数の浮きが検出された（図2-23、図2-24）。しかし、赤外線サーモグラフィ法の適用に十分な温度上昇とはいえないため、メインドームには、本調査で検出できなかった浮きが多数存在するものと考えられる。しかしながら、これ以上の強力なヒーターを現地で調達することは困難であるため、より高精度の調査結果を得るためには、より高感度の赤外線装置による測定が望ましいものと考えられる。



(a) 外壁石貼り

(b) 堂内フレスコ画

図2-17 赤外線サーモグラフィ法による浮き調査状況



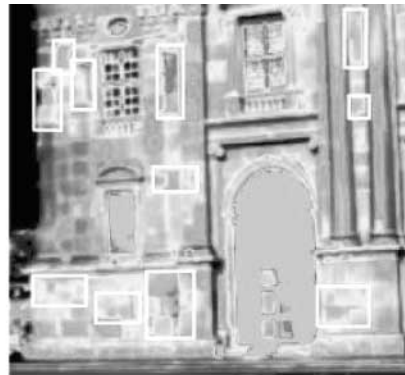
(a) 可視像

(b) 熱画像

図2-18 赤外線サーモグラフィ法による外壁石貼りの浮き調査結果（南東面）



(a) 可視像



(b) 熱画像

図2-19 赤外線サーモグラフィ法による外壁石貼りの浮き調査結果（南西面）



(a) 可視像



(b) 熱画像

図2-20 赤外線サーモグラフィ法による外壁石貼りの浮き調査結果（西面）



(a) 可視像



(b) 熱画像

図2-21 赤外線サーモグラフィ法による北西に位置する礼拝室の浮き調査結果



(a) 可視像

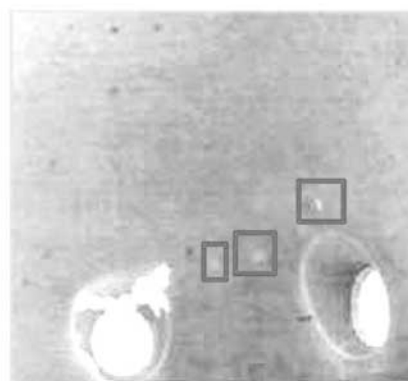


(b) 熱画像

図2-22 赤外線サーモグラフィ法による北西に位置する礼拝室の浮き調査結果



(a) 可視像

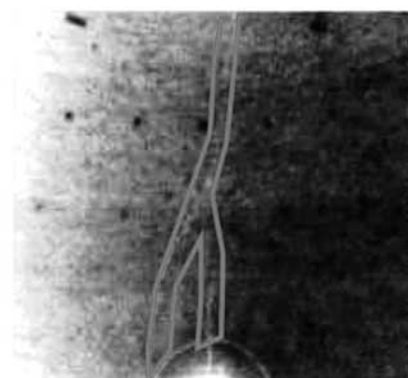


(b) 熱画像

図2-23 赤外線サーモグラフィ法によるメインドームの浮き調査結果（北面）



(a) 可視像



(b) 熱画像

図2-24 赤外線サーモグラフィ法によるメインドームの浮き調査結果（西面）

2.2.6 目視調査・打音法によるひび割れ・浮き調査

ドームコーニスレベルのフレスコ画の浮き調査を目視調査と打音法により、ドラムおよび外壁石貼り部分のひび割れを目視調査により調査した。また、ひび割れ幅のモニタリングを目的としたコインの貼り付けを行った(図2-25)。ここでは、結果については割愛し、引用・参考文献17)を参照していただきたい。

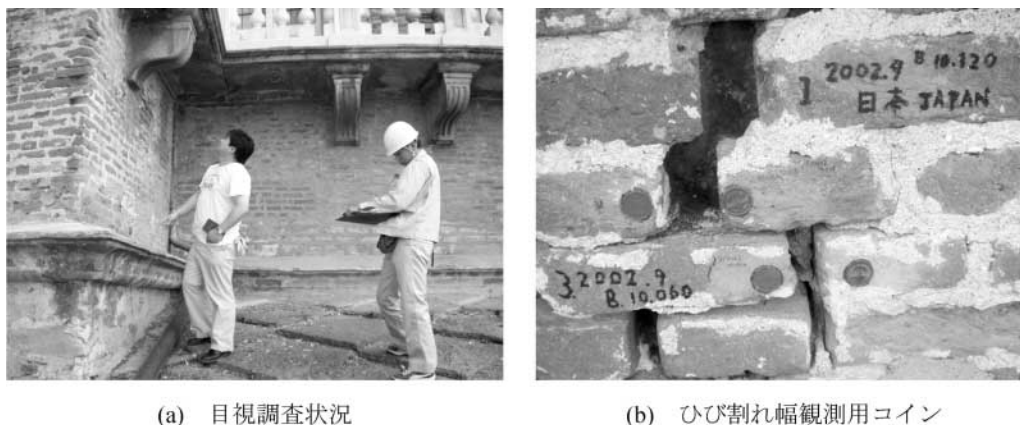


図2-25 目視調査状況

2.2.7 レベル測量による不同沈下調査

不同沈下量測定は、レーザ距離計を用いた簡便な方法で行った(図2-26)。地上レベルにおける不同沈下の測定結果を図2-27 (a) に示す。測定結果は、Gallo による測定結果¹⁾とほぼ一致しており、新たな進捗が認められないことから、不同沈下は現在ではほぼ収束しているものと考えられる。また、図2-27 (b) にドームコーニスレベルにおける不同沈下測定結果を示す。測定結果は、教会堂の北西側が大きく沈下したことを示しており、ドームに発生した西側および北側のひび割れの原因を顕著に示す結果となっている。



図2-26 レーザ距離計を用いた不同沈下調査状況

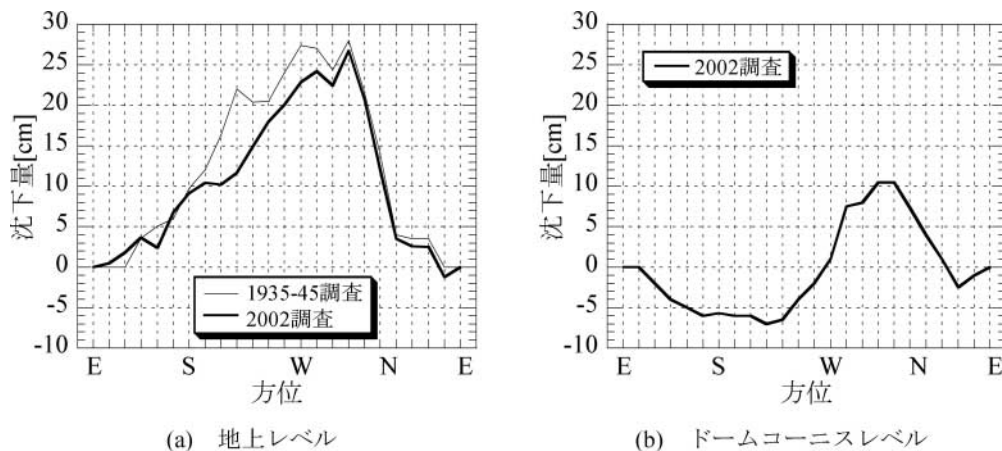


図2-27 レーザ距離計を用いた不同沈下調査結果

2.2.8 構造材料の調査

反発硬度法（P社製，シュミットハンマーL型：レンガ用，PM型：モルタル用，図2-28），超音波法（P社製，パンジット，周波数20～500kHz，図2-29），ウィンザーピン法（J社製，図2-30）によるレンガ・目地の強度推定に関する調査を行った。ウィンザーピン法は，長さ30.5mm，直径3.56mmのピンをスプリングの反発力を用いた押し付け式ピストルで打ち込み，専用のマイクロメータによりその貫入深さを測定し，貫入値から圧縮強度を推定する方法である。貫入深さが浅いほど，マイクロメータの読みは大きくなるように設定されているため，マイクロメータの読み値を貫入抵抗値と呼ぶこととする。また，フィルム簡易吸水試験によるレンガの吸水速度，表乾密度，吸水率，測色計（M社製）による色彩値，引っかかり試験器（N工業会）による引っかかり傷幅，ウィンザーピン貫入抵抗値と圧縮強度，静弾性係数に関する室内実験を行った。ここでは，結果については割愛し，引用・参考文献11)～15)，17)を参照していただきたい。

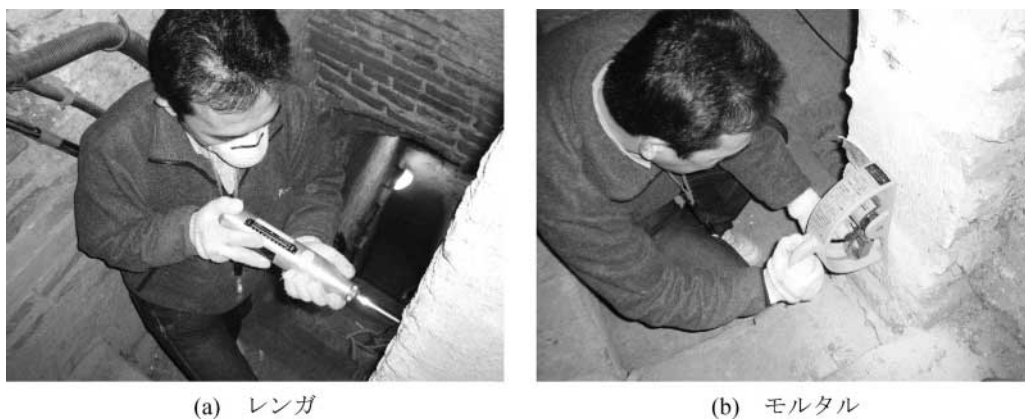


図2-28 反発硬度の測定状況



(a) 直接伝播法



(b) 間接伝播法

図2-29 超音波速度の測定状況



図2-30 ウィンザーピン貫入抵抗値の測定状況

2.2.9 常時微動測定

基本的な振動特性である固有振動数を推定するため、ヴィコフォルテ教会堂の常時微動測定を実施した(図2-31)。今回の現地調査では、地盤、建築構造物の振動特性を把握するための調査法のなかでも、特別な振動源を必要としない常時微動測定を採用した。

測定機器として、小型換振器(S社製:動電型速度計,水平2成分,上下1成分,固有周期1秒(測定周波数1.4~30Hz),固有周期5秒(測定周波数0.3~30Hz))と増幅器(S社製:ローパスフィルター42Hz)を用いた。常時微動は速度の形で測定し,AD変換器を通して,サンプリング周波数100Hzで1分間収録した。なお,地盤レベルについては,増幅器内で一回積分した変位の形で測定を行った。

常時微動測定は2002年9月の昼夜に実施した。測定点は,図2-32,図2-33に示すように地下室レベル1点(×印),地盤レベル2点(◆G印),2階床レベル3点(高さ約17.14m,★F印),バルコニーレベル7点(高さ約22.5m,■B印),ドームコーニスレベル4点(高さ約31.18m,□C印),ドームレベル4点(高さ約42.66m,◎D印),ドーム中段レベル2点(高さ約46.85m,

○M印), ドーム頂部レベル3点(高さ約51.6m, ●L印)の計27点で, 対象構造物の振動性状が全体的に把握できるように選んだ。教会堂の平面形状が南北軸, 東西軸に対してほぼ対象であることを考慮し, 各々の点についてそれぞれ南北, 東西, 上下方向の常時微動を測定した。バルコニーレベルのいくつかの点については, ドームの平面形状が楕円形であることを考慮し, 南北, 東西, 上下方向に加えて, 半径, 円周方向の常時微動も測定した。各点で, 水平2成分, 上下1成分の3成分の同時測定を3~4回行った。また, 教会堂南西部に位置する鐘楼については, 頂部1点で南北, 東西, 上下方向の常時微動を4回測定した。



図2-31 常時微動測定状況

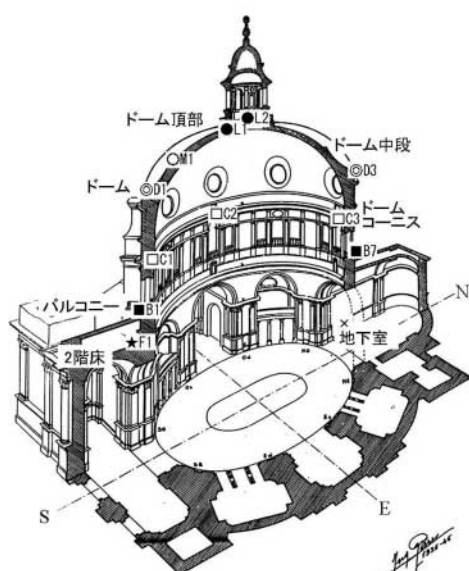


図2-32 常時微動測定点 (Garro1962⁵⁾)

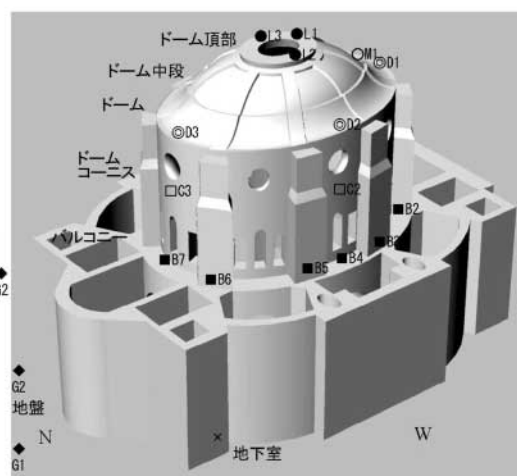


図2-33 常時微動測定点

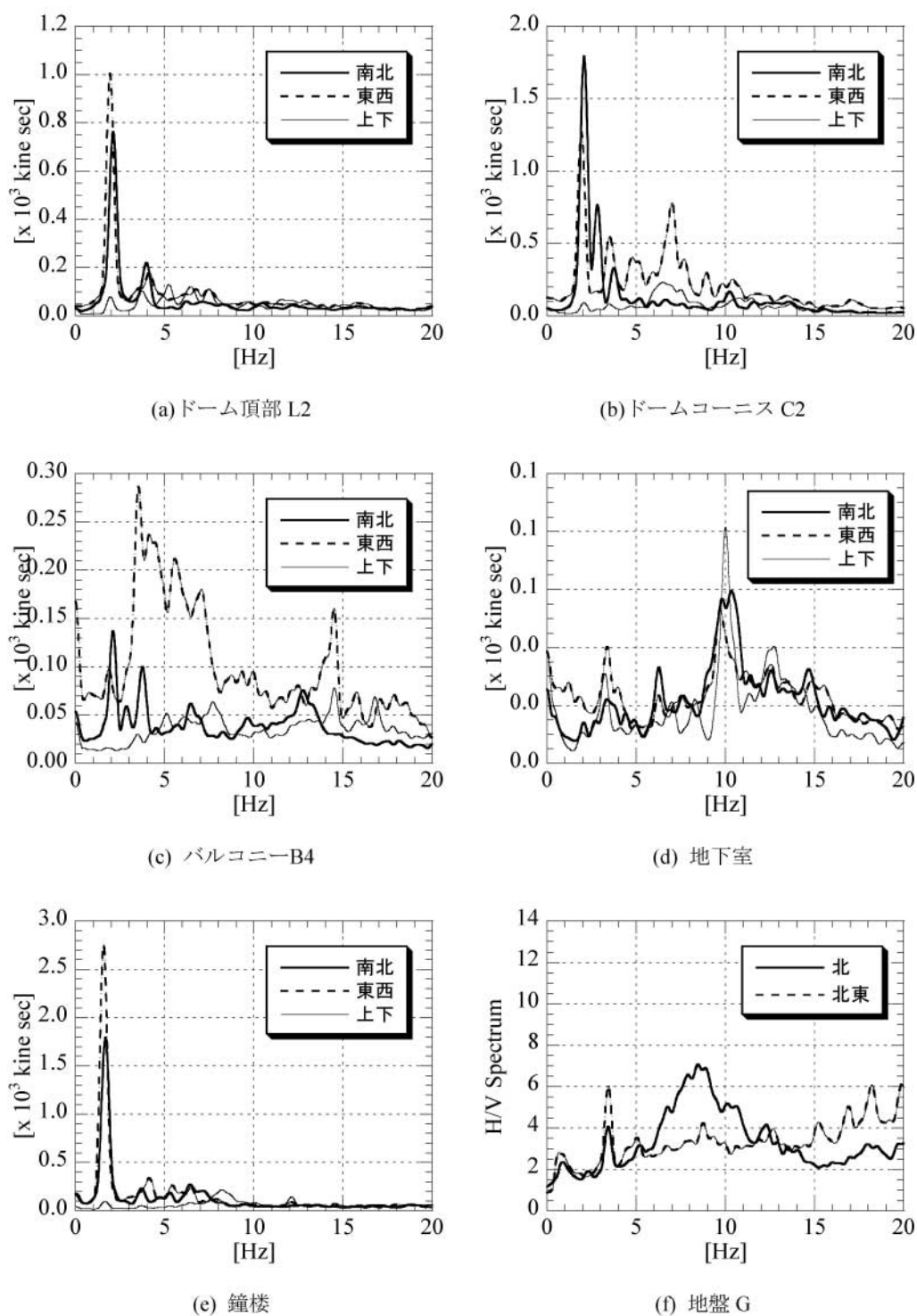


図2-34 観測されたフーリエスペクトル

ヴィコフォルテ教会堂の各点で測定された代表的なフーリエスペクトルを図2-34に示す。スペクトルの平滑化はParzenのウィンドウ幅を0.5Hzとして行っている。図中、太実線は南北方向、太破線は東西方向、細実線は上下方向のスペクトルを示している。

常時微動測定によるフーリエスペクトルと固有振動数は、局部での測定であったにも関わらず、教会堂内部の各々の測定点で同様の傾向が測定された。また、異なる時期に実施された測定からも同様の傾向が得られた。これより、ヴィコフォルテ教会堂ドームの固有振動数は南北方向約2.12Hz、東西方向約1.95Hzと推定できる。一方、下部構造の固有振動数は、地上階におけるその周辺の影響で3.50Hzから14.5Hzに渡り、水平剛性が高いものと考えられる。また、鐘楼の固有振動数は南北方向約1.70Hz、東西方向約1.59Hzと測定できた。不同沈下の生じている北側と生じていない北東側で、支持地盤の違いがH/Vスペクトルに見られた。

2.3 構造解析

ヴィコフォルテ教会堂の構造特性は、下部構造の特性も含めて全体で考察する必要があることから、図2-35に示した教会堂全体有限要素モデルを設定した。解析に用いた有限要素は、10節点三角錐ソリッド要素である。構造解析の第一歩として、定性的傾向、ならびにある程度の定量的傾向を見るため、ここでは弾性解析を行った。解析に用いた材料定数は、単位体積重量 $\gamma = 0.00002\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E = 1500\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ である²⁾。また、地面と接する部分は完全固定とし、荷重条件としては自重のみ（鉛直荷重）を想定した。

図2-36に、自重を受けるヴィコフォルテ教会堂の変形図を示す。南北（長軸）方向についてはドーム上部からの推力により外側に倒れ広がる様子（図2-37）が、逆に東西（短軸）方向については下部構造に対するドーム上部からの偏心荷重の影響で内側に倒れ込む様子（図2-38）が分かる。この結果は現状のドームの変形とよく一致している。

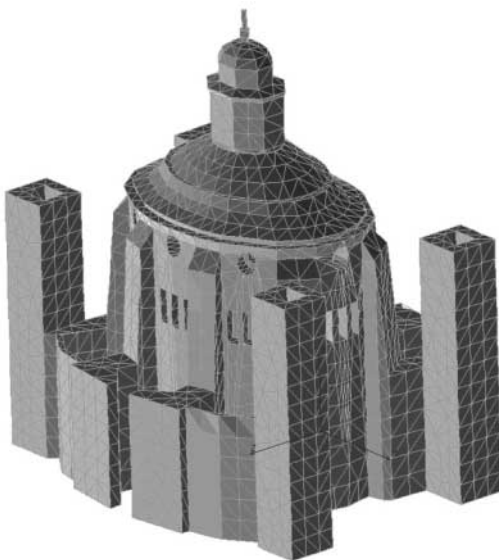


図2-35 解析モデル

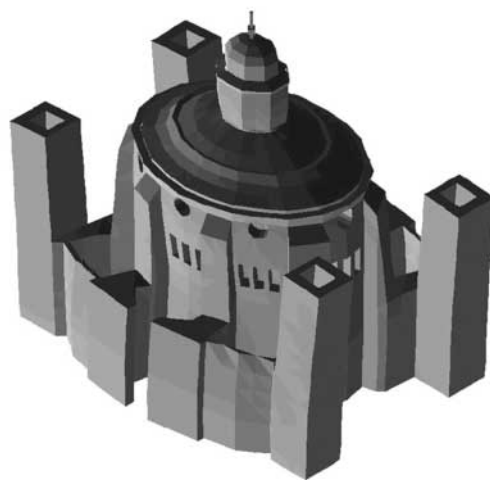
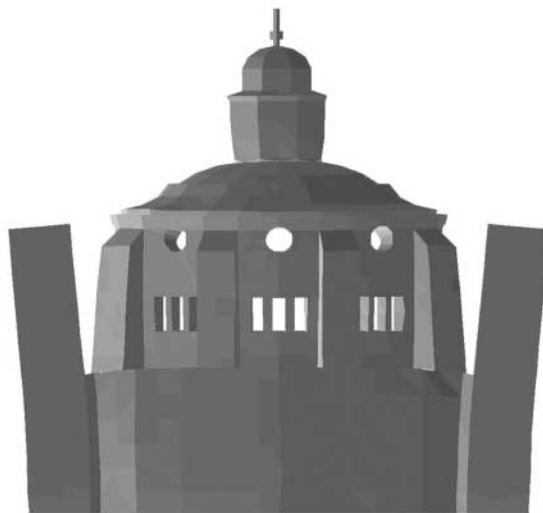


図2-36 変形図



(a) 変形図



(b) バットレスのクラック

図2-37 南北（長軸）方向変形図とバットレスに生じているクラック



(a) 変形図



(b) バットレス

図2-38 東西（短軸）方向変形図とバットレス

図2-39に示した主応力度1のベクトル図から分かるように、ドーム基部ないし大窓（大窓による壁面の欠損の影響により応力集中が発生）付近で周方向引張応力度が大きくなっていることが分かる。短軸方向（西側と東側）に顕著なクラックが現状のドームに見られるが（図2-39、図2-41）、解析結果はその傾向をよく表現していることが分かる。主応力度3のベクトル表示を図2-40に示した。これよりドーム上部からの荷重は、ドーム殻面を流れ、地面に伝わる様子を示している。長辺方向に関しては、外側に力が流れる傾向がよく分かる。

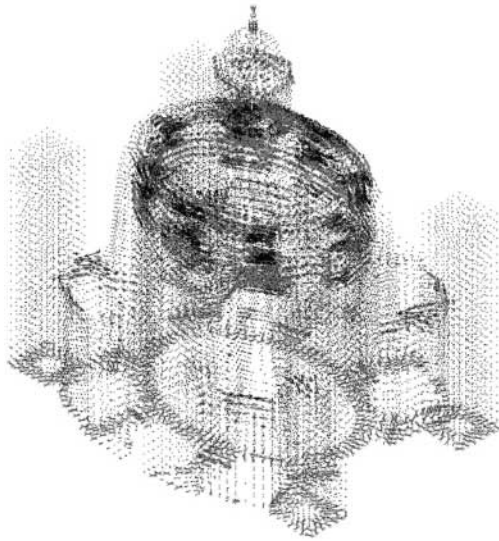


図2-39 主応力度1

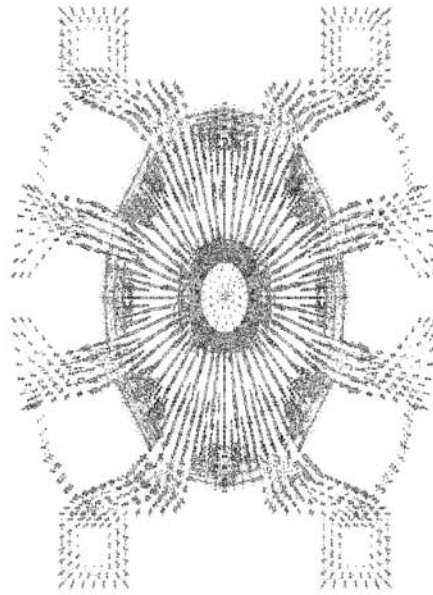
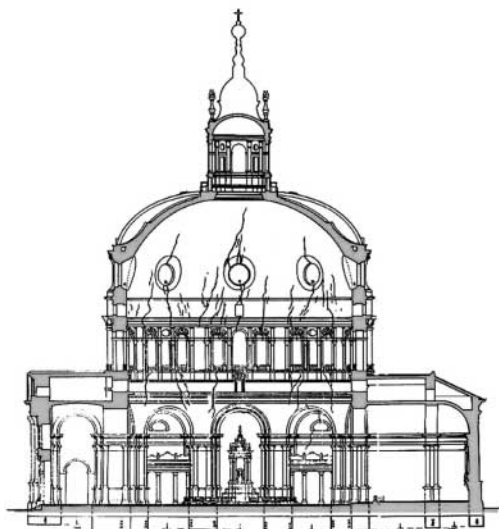
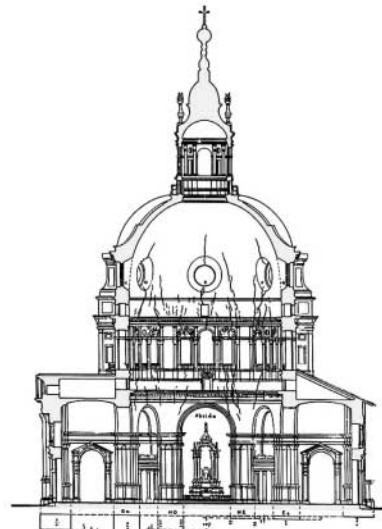


図2-40 主応力度3



(a) 南北（長軸）方向



(b) 東西（短軸）方向

図2-41 クラック図（Garro1962^{51）}）

2.4 まとめ

ヴィコフォルテ教会堂に関する研究で得られた知見は以下の通りである^{11)・17)・19)}。

- 1) 電磁波レーダ法によりドームの厚さを調査した結果、ドーム頂部の部材厚は、長軸方向より短軸方向の方がわずかに厚いことが分かった。
- 2) ドームレベルには、Galloのリング以外の構造補強材は存在しないと推定された。
- 3) 衝撃弾性波法による構造補強材破断調査の結果、ドラムレベルの補強リングは、破断していない可能性が高いことが分かった。

- 4) 赤外線サーモグラフィ法による浮き調査の結果、外壁に数多くの浮きが存在することが分かった。特に鐘楼下の石貼り部分は早急な落下防止対策が必要である。
- 5) 外壁部分の浮きに関する目視調査と赤外線サーモグラフィの結果は、ほぼ一致した。
- 6) 屋内のフレスコ画には、ひび割れに沿った浮きが存在することが分かった。
- 7) レベル測量の結果、20世紀中葉のM. Garroの時代以降は、不同沈下はほとんど進行していないと推定された。
- 8) 地盤の不同沈下とドラム部分のひび割れ位置との間に一定の関係が認められた。
- 9) 反発硬度と超音波伝播速度からレンガの圧縮強度を推定する回帰式が得られた。
- 10) レンガの圧縮強度、反発硬度およびウィンザーピン貫入抵抗値の間に相関関係が認められた。
- 11) ウィンザーピン貫入抵抗値によって、凍害による劣化の程度が判定できる。
- 12) 2種類のレンガサンプルは、主成分は類似しているが、微量成分において差がみられた。
- 13) 2種類のモルタルのサンプルは、主成分に差があることから、調合が異なる可能性が高いことが分かった。
- 14) レンガのウィンザーピン貫入抵抗値とレンガの小径コアの圧縮強度は、非常に高い相関を示す。
- 15) ウィンザーピン法は、低強度材料の強度推定に適している。
- 16) ウィンザーピン法による貫入抵抗値は、圧定力が1.2MPa以上であれば、ほぼ安定する。
- 17) ヴィコフォルテ教会堂ドームの固有振動数は南北方向約2.12Hz、東西方向約1.95Hzと推定できた。我々が過去に経験した地震がこの振動数付近で卓越していることから、教会堂は多大な地震力を受けることが予想され、耐震問題としては注意が必要であると言える。
- 18) 上部構造と下部構造の水平剛性が異なり、かつドームの固有振動数が2Hz程度であることから、地震時には上部構造が大きく変形すると推定される。したがって、上部構造のせん断力とともに、上部構造と下部構造の接合部付近に大きな応力が作用すると考えられ、耐震問題としては、それらの補強が必要とされる。
- 19) フィレンツェの大聖堂の固有振動数が約1.8Hzと報告されているように、ヴィコフォルテ教会堂を中心とするこれら大規模な組積造ドームを持つ歴史的建築物の固有振動数は、1.8Hzから4Hzに分布している可能性がある¹⁸⁾。
- 20) 構造解析の結果は、現状のドームの変形とよく一致している。

今後は、多点同時常時微動測定に加え、Vicoforte2002-2006プロジェクトにより堂内に強震計を設置し、強震観測を実施する予定である。ヴィコフォルテ教会堂の耐震性については、常時微動測定や強震観測による固有モード、減衰の推定という実挙動の調査とともに、3次元有限要素法解析^{19), 20)}によりヤング係数等の材料定数を同定し、静的構造解析や地震応答解析により耐力の評価をする予定である。

図2-43は、Vicoforte教会堂で調査報告会を行った日の朝刊、図2-44は、調査期間中に取材を受けたときの記事である。また、10月3日には、調査報告会の様子が新聞で大きく取り上げられた。

OGGI RIUNIONE DEL GRUPPO DI LAVORO CHE PROCEDERÀ GRAZIE AI CONTRIBUTI DELLA FONDAZIONE CRC

Dal Giappone per «curare» la cupola

Vicoforte, un progetto con il Politecnico di Mondovì

Paola Scola

VICOFORTE

Il «paziente» è la cupola ellittica più grande del mondo, quella del santuario Regina Montis Regalis. A studiarla sono undici tecnici e docenti universitari giapponesi, che oggi illustreranno i risultati delle analisi al gruppo di ricerca del progetto «Vicoforte 2002-2006», di cui fanno parte anche l'Amministrazione del Santuario, la Fondazione Crc (che lo finanzia) e il Politecnico di Mondovì.

Lo scopo dell'incontro ristretto, in programma alle 14,30, è di «verificare lo stato di avanzamento dei lavori di indagine e ricerca sul monumento e di dare avvio definitivo alle operazioni di monitoraggio e di rilievo geometrico-strutturale». A coordinare gli interventi è Mario Alberto Chiorino del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'ateneo torinese.

Nei giorni scorsi, per verificare le condizioni statiche della basilica e la situazione delle crepe sul lato ovest, è stato condotto un curioso esperimento, l'analisi termografica. L'interno del santuario è stato scaldato per un'intera notte con un termocanvettore da 600 mila calorie: il calore comporta il rilevamento di temperature diverse in presenza di muri pieni oppure vuoti. Un esame «significativo» per valutare la consistenza delle pareti portanti, grazie alle misurazioni di una so-



Quella del santuario basilica di Vicoforte è la cupola ellittica più grande del mondo: da anni le sue condizioni sono monitorate

sticata apparecchiatura, giunta dal Giappone. A capo della delegazione di studiosi del Sol Levante, che si occupano esclusivamente di cupole in muratura, c'è l'ingegner Aoki Takayoshi dell'università di Nagoya City, che ha spiegato come gli studi

dovranno portare a un modello matematico da trasmettere al Politecnico per verifiche e interventi. L'iniziativa è stata resa possibile da un cospicuo contributo del ministero della Cultura nipponico.

Secondo i tecnici, le condizio-

ni complessive della basilica sono buone.

Non si sarebbero più registrati cedimenti strutturali: due delle tre catene inserite nel tamburo della cupola sono intatte, mentre proseguono gli accertamenti sulla terza. Qualche

Un esperimento fatto dai tecnici nipponici per verificare la stabilità di struttura e fessure. È stato usato il calore per realizzare una mappa sulle condizioni dei muri

movimento, invece, interessa le crepe sul lato occidentale dell'edificio.

I lavori del gruppo di ricerca oggi riguarderanno gli aspetti organizzativi del progetto «Vicoforte 2002-2006», gli «obiettivi dell'Amministrazione del Santuario», le «caratteristiche operative degli interventi, le possibilità offerte dalla tecnica delle emissioni acustiche» per il monitoraggio delle fessure, gli «aspetti idrogeologici nel monitoraggio del monumento e del sito», la verifica strutturale dell'edificio, l'applicazione dell'analisi alla verifica di stabilità del sistema cupola-tamburo.

Il professor Sebastiano Sardo, vicepresidente della Fondazione Crc, illustrerà l'intervento dell'organismo per la conservazione del patrimonio artistico e culturale, nel caso del santuario vicese.

FIG. 2-42 LA STAMPA 記事 ドームの治療のために日本から (2002年9月24日)



CONTIENE LE
SETTIMANALE CATTOLICO DI INFORMAZIONE

MONREGALESE

MONDOVI, 26 settembre 2002 - anno CIV - N. 34 - Una copia euro 0,88 (lire 1.700)

Redazione: piazza S. Maria, 6 - Tel. 0174.552900 (4 linee) - Fax 0174.42473 - Mondovì - Ufficio Abbonamenti e Pubblicità: p.zza S. Maria, 6 - Tel. 0174.552256 - Fax 0174.552252 - Mondovì - Spedizione in a.p. - 45% - art. 2 comma 20/b legge 662/96 - aut. 648/D.C.I. del 26/10/90 n. 372000 - Filiale di Cuneo - «Linea percussiva» - «Linea riscossa» - Abbonamenti Poste - Abbonamento Posta - 12100 Cuneo C.P. (Italy) - CEP: piazza S. Maria Maggiore, 6 - 12084 Mondovì Brio - Tel. (0174) 552256 E-mail: unione@iol.it



GSC
General Systems Cuneo

Computers & Copying

CUNEO-MAD. CLMO. 0171.412286

Panasonic

COMUNI PICCOLI DA NON ASFISSIARE, SENZA... MITIZZARLI

di corrado avagnina

La questione è complessa ma anche urgente. Va presa con le molle. Per evitare cambi di marcia che possono incoinciare in suscettibilità magari anche giustificate. Eppure avanti così forse non si può andare. Si tratta del futuro dei piccoli Comuni, di cui l'area cuneese (e monregalese in particolare) è investita su vasta scala. In «Granda» su 250 Comuni ben 226 hanno meno di 5.000 abitanti. Ma molti sono sotto i mille, qualcuno sotto i cento. Al Lingotto di Torino si è tenuta, nei giorni scorsi, la Conferenza nazionale dei Comuni di minor dimensione demografica, all'interno dell'ANCI. Attivissima è poi l'Associazione dei Piccoli Comuni che ha avuto impulso fondamentale dalle nostre parti.

Si sfiora una porta aperta a ricordare che un centro comunale con poco più di cento-ducento-trecento abitanti non può essere considerato dalla burocrazia alla stregua di una grande città. E viceversa.

VERIFICHE Una équipe del Sol Levante ha compiuto una serie di esperimenti

“Santuario in discreta salute”, dicono i tecnici giapponesi

La Basilica non avrebbe subito cedimenti da 70 anni - Crepe sotto controllo



SANTUARIO - Per una settimana un gruppo di ingegneri, docenti universitari e tecnici del Giappone, in sinergia con il Politecnico di Torino sede di Mondovì (con cui, grazie anche ad un finanziamento della Fondazione Crc, l'Amministrazione della Basilica ha firmato una convenzione su un Piano quinquennale di interventi denominato «Vicoforte 2002-2006»), ha vagliato la staticità del Santuario, compiendo pure

un ardito esperimento per radiografare la consistenza dei muri. Per una notte si è riscaldato il tempio mariano in Valle Irmense, per misurare la qualità e la quantità delle pareti del tamburo. Una prima conclusione dei giapponesi è confortante. «La Basilica è in discreta salute. Solo le crepe ad ovest andranno tenute sotto osservazione».

SERVIZIO A PAGINA 3

FIG. 2-43 宗教新聞記事 (2002年9月26日)

3. 常滑市のレンガ煙突

3.1 常滑市のレンガ煙突の現状

常滑焼の産業遺産である窯場に付属する赤いレンガ煙突や工場の黒い板塀は、常滑市の独特な景観を構成している。しかし、かつては市内に300本以上もあったと言われている煙突は、陶管の需要が低下し生産が中止されたことにより、窯や煙突も多く取り壊されてきた（図3-1から図3-7、『常滑郷土文化会つちのこ（会長 杉江恵子氏）』の提供による）^{21)・23)}。さらに、台風、地震などで崩壊、ないしその恐れがあったため使用していない煙突を取り壊したり半分の高さにしたりして、残念なことに今ではその数は50本弱に減少している。

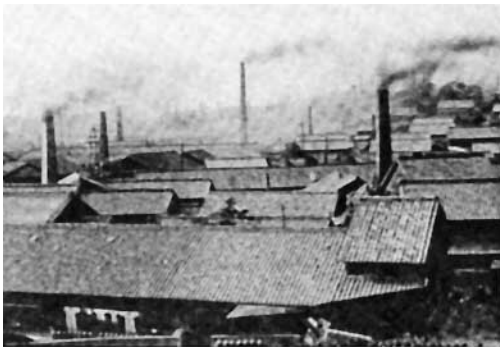


図3-1 窯業最盛期の常滑の景観（昭和前期）



図3-2 伊奈製陶(株)の八角形煙突（大正10年）



図3-3 いちき橋の上から南を望む
（昭和30年代）



図3-4 日本陶業の東辺りから光明寺を望む
（昭和30年代）



図3-5 瓦窯試験用窯（現ニッタイ梶間工場内）
（山本組）（昭和25年頃）



図3-6 新築煙突作業風景（山本組）



図3-7 常滑のレンガ煙突の風景

元・窯のある広場資料館館長の柿田富造氏が行った調査^{21), 24)}によれば、平成8年8月現在における高さ9m以上のレンガ煙突は、55本（A型＜全国的に最も普及している蛇腹のついた煙突＞22本、B型＜蛇腹の四隅が欠けた常滑独特の煙突＞27本、C型＜蛇腹のついていない簡易型煙突＞6本）、高さ9m以下の上部を解体して短くした半壊レンガ煙突＜E型＞38本、また、高さ9m以上の土管煙突（D型＜土管を積み上げアングルで補強した煙突＞）は13本となっている（表3-1）。

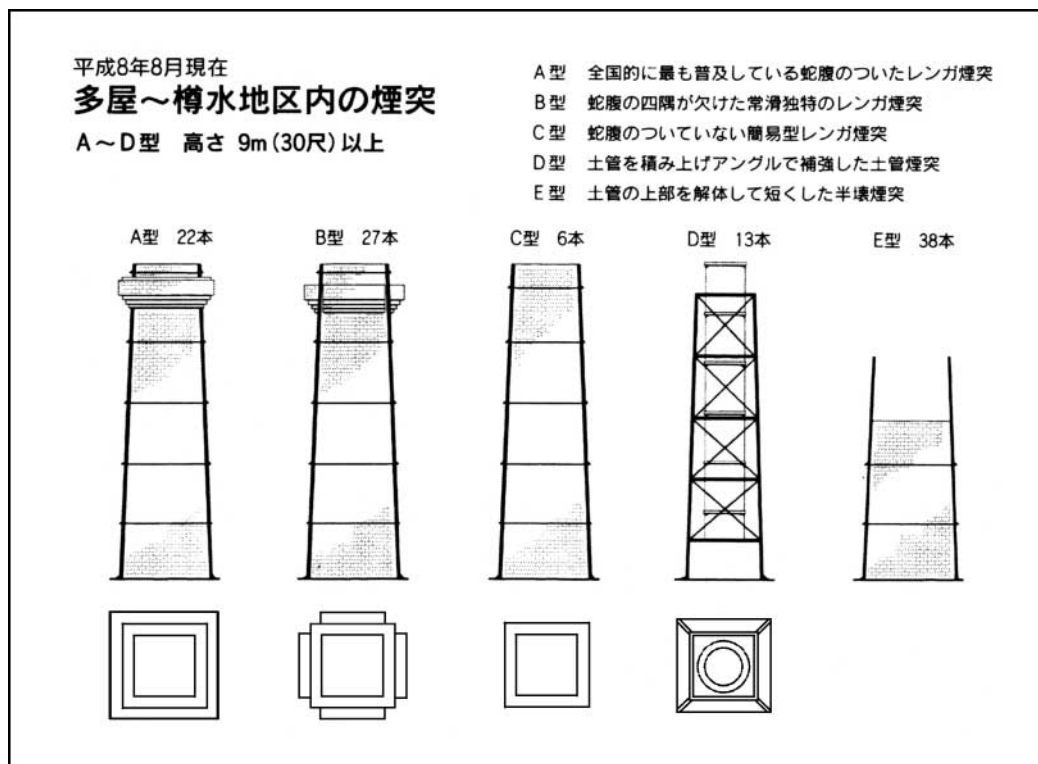
常滑を代表する煙突が減少することによって景観が変わりつつある中、

- 1) 今回改めて現状を把握し、今後の景観保全等まちづくりの資料とすること、
- 2) 東海地震の強化地域に指定されたこともあり、煙突の状態、および周辺状況も調査することにより、防災上の資料とすること、

を目的とし、柿田氏が平成7年から8年にかけて調査した資料に基づき、常滑市が平成14年11月に現地調査を行った²⁵⁾。調査項目は、上部、下部、素材、煙突の完全性、煙突頂部、工場名、住所、調査日、煙突の状態、周辺状況で、煙突の状況をデジタルカメラ（全景、部分）で記録している。調査件数は、約150件である。

表3-1 煙突調査凡例（柿田²¹⁾）

上部		下部		素材		煙突の完全性		煙突頂部		蛇腹の形式	
A	□	A	□	1	赤煉瓦	L	完形煙突	A	蛇腹下までアングル	A	普及型
B	多角形	B	多角形	2	煙突土管	M	半壊煙突	B	頂部までアングル	B	常滑型
C	○	C	○	3	コンクリート			C	蛇腹なし	C	簡易型
E	無	D	土台または窯	4	鉄管			D	土管	D	土管
										E	半壊



常滑市が行った平成14年11月の調査結果は、煙突の素材・形状・高さ・所有者・所在地・状態・周囲の状況・第3者への危険度などを項目とした調査リスト、煙突写真、煙突位置図、CD-R（データ・写真等を記録）で構成されている。この調査以降、空港島へのアクセス道路工事で2本の煙突が取り壊されたのを含め、平成8年8月に152本あった煙突は、平成15年1月末現在では119本と、33本減少している。柿田氏の分類に基づく煙突の増減を、それぞれ表3-2、表3-3に示す。平成15年1月末現在における高さ9m以上のレンガ煙突は、45本（A型＜普及型蛇腹煙突＞15本、B型＜常滑型蛇腹煙突＞20本、C型＜簡易型煙突＞6本）と、平成8年の55本から10本減少していることが分かった（表3-3）。高さ9m以下の上部を解体して短くした半壊レンガ煙突＜E型＞は33本で平成8年から5本減少、また、高さ9m以上の土管煙突＜D型＞は11本で2本減少となっている（表3-3）。

柿田氏による昭和5年当時、39年当時、平成8年の煙突分布図と、調査結果に基づく平成15年1月末の煙突分布図を、それぞれ図3-8から図3-11に示す。

表3-2 現存煙突

形 式	記 号	2003 年	1996 年	取壊し
上部：四角形レンガ・下部：四角形レンガ・完全	A1A1L	59	74	15
上部：四角形レンガ・下部：窯・完全	A1DL	1	1	0
上部：多角形レンガ・下部：多角形レンガ・完全	B1B1L	1	1	0
上部：丸土管・下部：四角形レンガ・完全	C2A1L	10	12	2
上部：丸土管・下部：丸土管・完全	C2C2L	5	5	0
上部：丸土管・下部：窯・完全	C2DL	0	1	1
上部：丸コンクリート・下部：丸コンクリート・完全	C3C3L	1	4	3
上部：丸鉄管・下部：四角形レンガ・完全	C4A1L	4	7	3
上部：丸鉄管・下部：丸鉄管・完全	C4C4L	5	7	2
上部なし・下部：四角形レンガ・半壊	EA1M	32	39	7
上部なし・下部：多角形レンガ・半壊	EB1M	1	1	0
合 計		119	152	33

表3-3 高さ9m以上の煙突（レンガ煙突と土管煙突）

形 式	型	2003 年	1996 年	取壊し
①全国的に最も普及している蛇腹のついたレンガ煙突	A	15	22	7
②蛇腹の四隅が欠けた常滑独特のレンガ煙突	B	20	27	7
③蛇腹のついていない簡易型レンガ煙突	C	10	6	△4
④土管を積み上げアングルで補強した土管煙突	D	11	13	2
⑤上部を解体して短くした半壊レンガ煙突	E	33	38	5
合 計		89	106	17

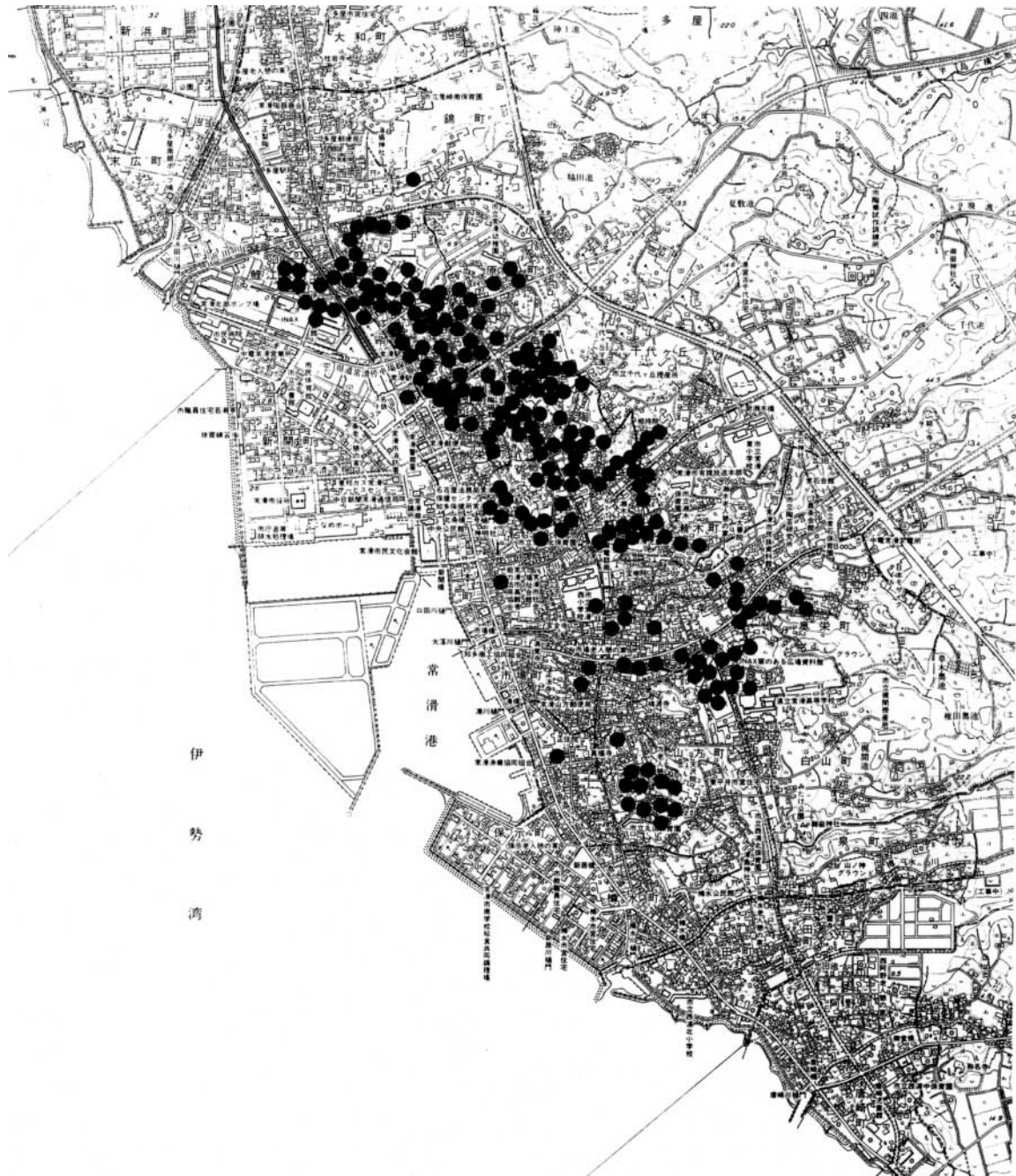


図3-8 昭和5年当時の常滑町のレンガ煙突分布図（柿田²⁴⁾）



図3-9 昭和39年当時の常滑市内の煙突分布図（柿田²⁴⁾）

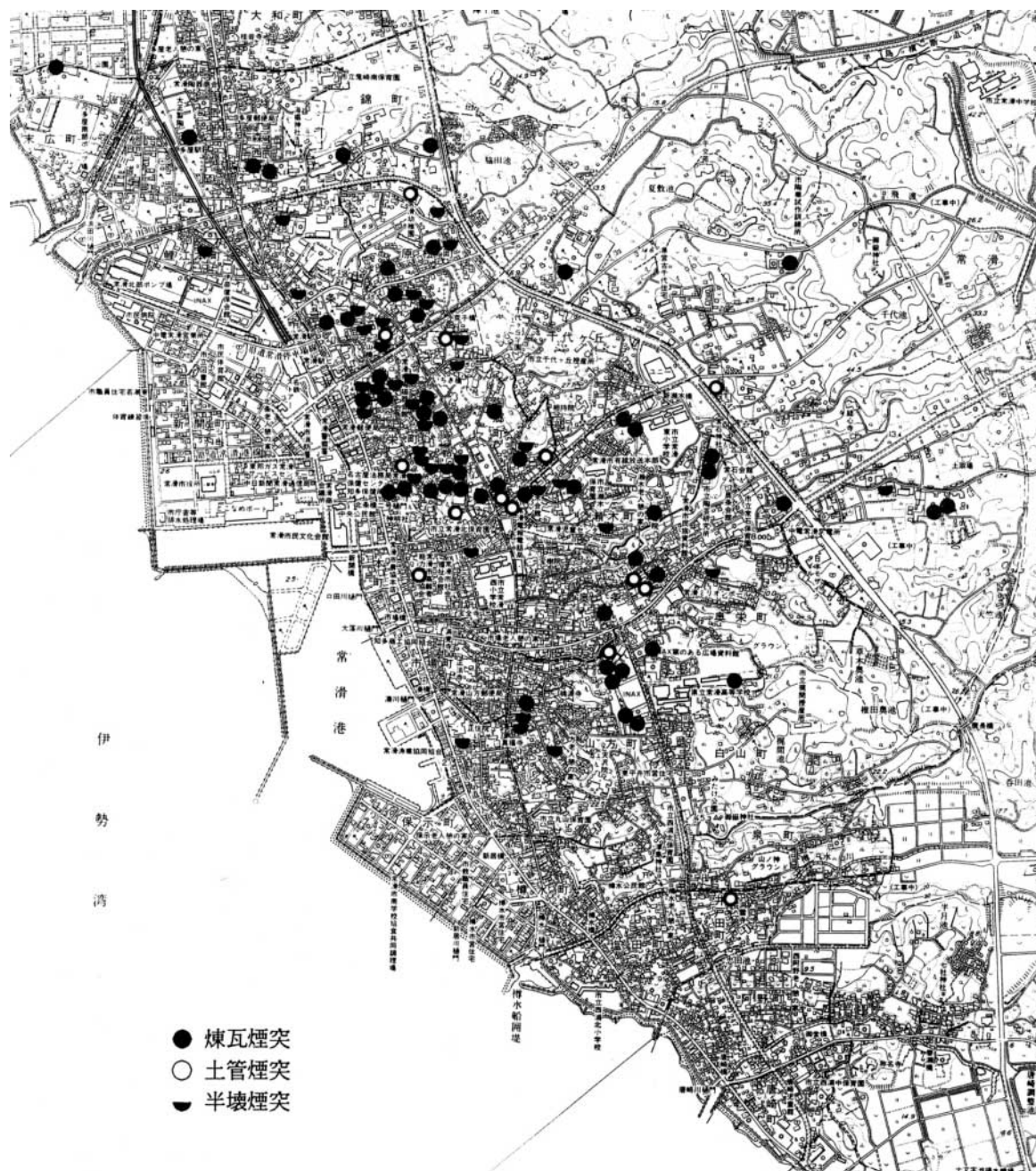


図3-10 平成8年の常滑市内の煙突分布図（柿田²⁴⁾）

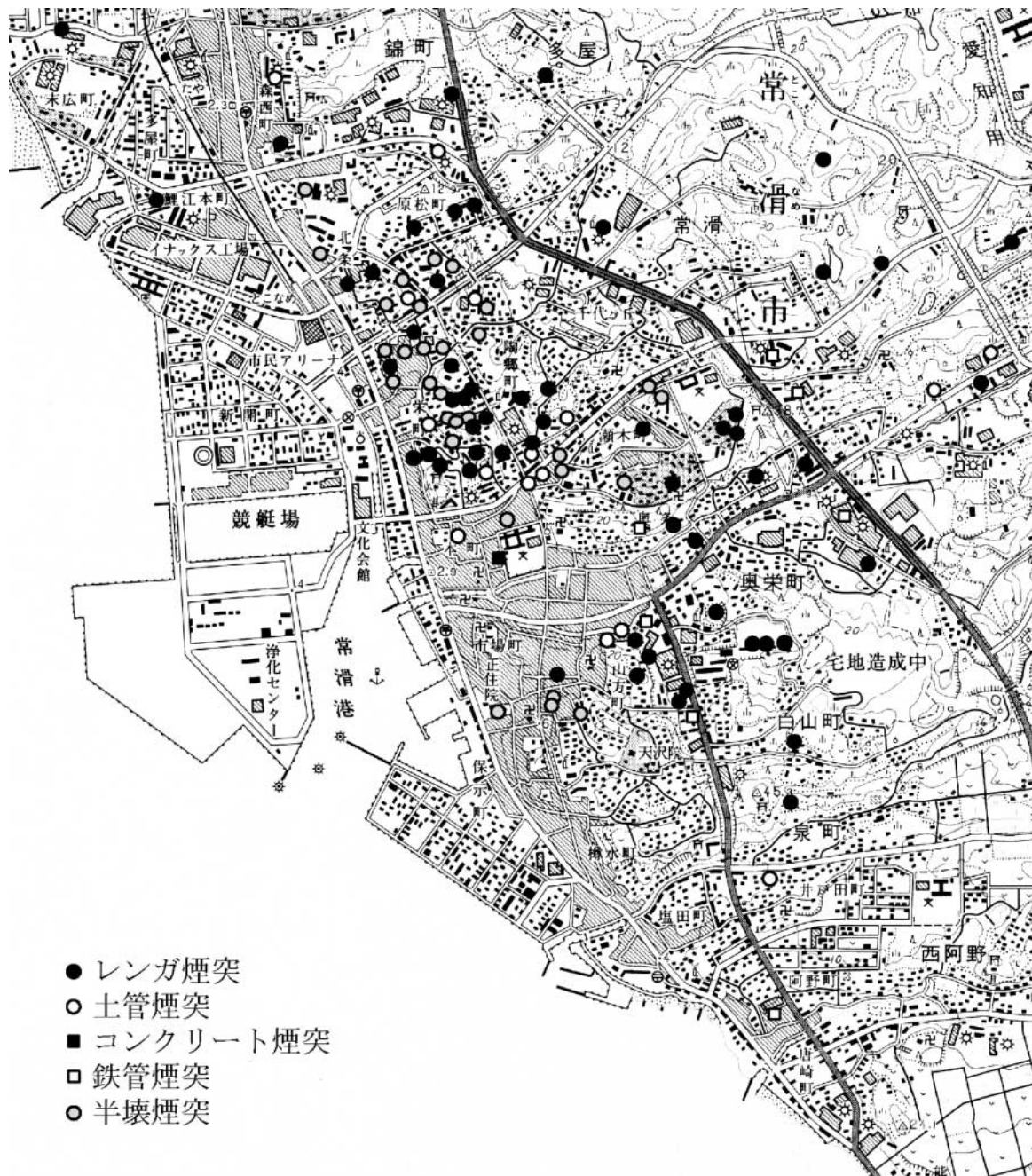


図3-11 平成14年の常滑市内の煙突分布図（国土地理院の1:25,000地図にプロット）

3.2 煙突の所有者に対するアンケート調査

レンガ煙突や窯の保存，そしてそれらの活用のためには，市の条例による規制のない現在，所有者の意向が最大限に尊重されなければならない。そこで，所有者に対する意向調査を平成14年10月から平成15年1月にかけて実施した。回答数は，完全レンガ煙突35本，完全土管煙突1本，半壊レンガ煙突2本の計38本である。

煙突と窯の使用状況を，図3-12と図3-13に示す。これより，約40%の煙突と窯が現在も使用されていることが分かる。煙突の保存に関するアンケートの結果を，図3-14に示す。現在も煙突を使用している人の方が，使用していない人よりも保存に対して意識が高く，現状維持までを含めた割合は，87.0%である。これに対して，現在使用していない人は，煙突の劣化や地震，台風などの災害時における危険性から，壊すことを考えている割合が大きくなっている。窯の保存に対しても，同様の結果が得られている（図3-15）。34.2%の煙突所有者が，保存活動に協力したいと考えているが，協力できないと回答した13.2%の人を除けば，意見を聞いた範囲では，条件次第で協力が得られるものと考えられる（図3-16）。また，保存のための現状調査に関しては，協力できないと回答した15.8%の人を除けば，84.2%の人が協力してくれると考えられ，所有者の保存に対する意識の高さが分かった（図3-17）。

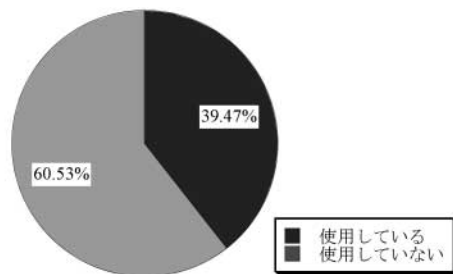


図3-12 煙突の使用状況

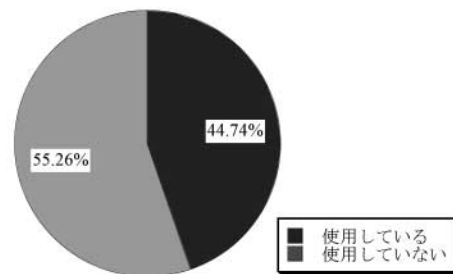


図3-13 窯の使用状況

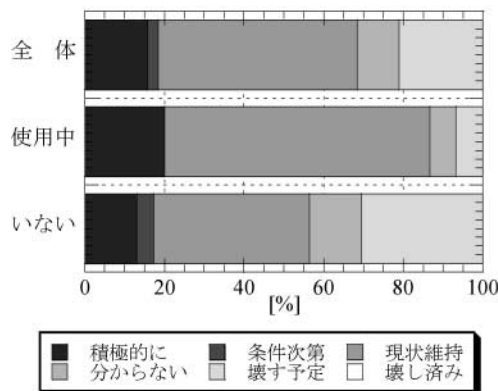


図3-14 煙突の保存について

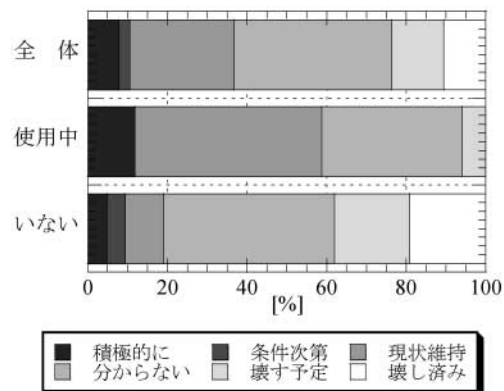


図3-15 窯の保存について

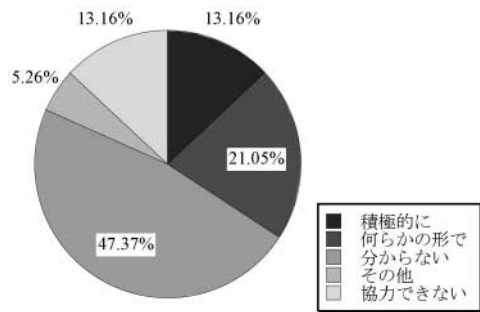


図3-16 保存活動に対する協力について

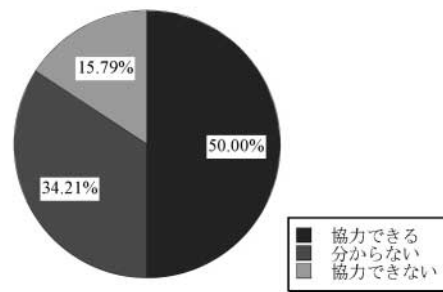


図3-17 現況調査について

以下に、聞き取りアンケート調査で得られた意見をまとめる。煙突の安全性に対する危惧，維持・管理のための経済的問題が窺える。

<煙突や窯の保存の理由>

- ・ 鯉江家が焼物にたずさわっていた証になる
- ・ 先々代や自分が窯業に携わり色々と苦楽を焼物と共に生きてきた証になる
- ・ 国の登録有形文化財に指定されている
- ・ 当社の観光的イメージシンボル
- ・ 保存の為の工事済み

<煙突や窯を壊す理由>

- ・ 廃業による土地売却
- ・ 焚かないから
- ・ 気持ちは積極的に保存したいが経済的に補修等困難
- ・ 維持・管理が出来ないため
- ・ 後を継ぐ人がいない（病人だから）
- ・ 居住家屋を建設の予定

<保存活動について>

- ・ 良いことだと思う。窯の歴史や常滑の歴史，常滑の移り変わりが分かる

<その他>

- ・ 使用しなくなれば壊すつもり
- ・ 当分現状維持，経年老朽化で倒壊の恐れが出た場合取り壊しの予定
- ・ 維持するのに必要な費用が捻出できれば保存したい
- ・ 現在も使用しており煙突を壊す理由もありません。ですが将来窯を造り直すことになれば壊すかも知れません。又安全上修復しなければならないときには経費もかかるので壊すかも知れません。
- ・ 煙突が傾斜しているので地震・台風時に不安あり
- ・ 県，市の援助が96%以上あれば保存維持したい
- ・ 景観の保存・整備は交流人口を増やす計画の市として強力にやるべきこと
- ・ 観光客の目玉がなくなるので保存した方がよい

3.3 レンガ煙突の現地調査，振動・静的破壊実験

東海地震の強化地域に指定された常滑市においては，防災上，煙突の耐震性の検討が必要となる。本節では，その基礎資料の蓄積を目的に，空港島へのアクセス道路工事で取り壊しが予定されていた2本のレンガ煙突（豊和製陶，岩田弘製陶）について行った現地調査，ならびに平成15年1月24日と30日に実施した振動・静的破壊実験の結果について報告する。

3.3.1 構造部材の厚さ調査

構造解析のためのモデル化には，構造物の正確な寸法の把握が必要となる。電磁波レーダ装置（N社製：コンクリートの場合は測定深度60cm）により，レンガ煙突の厚さ調査を行った（図3-18 (a)）。電磁波レーダによる厚さ測定結果を図3-20，図3-21に示す。これより，豊和製陶のレンガ煙突は，厚さが頂部から21.0cm，31.5cm，42.0cm，53.0cmと4段階で変化していることが，岩田弘製陶のレンガ煙突は，厚さが頂部から11.0cm，21.0cmと変化していることが分かる。ヴィコフォルテ教会堂の場合，コンクリートと組積造との誘電率の違いによる誤差を補正するための補正係数は1.33であったが，レンガ煙突の場合，雨上がりに測定した影響でコンクリートと同じ（1.00）であった。

測定された豊和製陶と岩田弘製陶のレンガ煙突の構造寸法を表3-4に示す。また，3.1節の調査結果に基づく煙突のプロポーシオンを図3-22に示す。これより，両レンガ煙突は，常滑の煙突の平均的なプロポーシオンであることが分かる。

表3-4 測定されたレンガ煙突の構造寸法

レンガ煙突	高さ(m)	底部外径(m)	頂部外径(m)	底部厚さ(m)	頂部厚さ(m)
豊和製陶	15.0	1.96	1.06	0.53	0.21
岩田弘製陶	8.2	1.16	0.68	0.21	0.11

3.3.2 構造材料の調査

ウィンザーピン法（J社製，図3-24）と引っかき法（N工業会，図3-25）によるレンガ・目地の強度推定に関する調査を行った。また，採取したレンガの表乾密度，圧縮強度，静弾性係数に関する室内実験を行った。圧縮強度試験と静弾性係数試験は，コアドリルにより作製した小径コア（試験体寸法：外径約33mm，高さ約50mm）で実施した。

レンガの実験結果を表3-5に示す。これより，レンガの圧縮強度は約7.5MPa，静弾性係数は約3200N/mm²であることが分かる。ここでは，その他の結果については割愛し，引用・参考文献15)を参照していただきたい。

豊和製陶のレンガ煙突の隅部には，等辺山形鋼（75mm×75mm×6mm）とそれを緊結する丸鋼φ16mmが12列，岩田弘製陶のレンガ煙突の隅部には，等辺山形鋼（40mm×40mm×3mm）とそれを緊結する丸鋼φ9mmが6列設置されていた。



(a) 厚さ測定状況



(b) 常時微動測定状況



(c) 加速度測定状況



(d) 静的崩壊実験状況



(e) 中央部の亀裂発生状況



(f) 崩壊状況

図3-18 現地調査，振動・静的破壊実験状況（豊和製陶）



(a) 加速度測定状況



(b) 加速度測定状況



(c) 静的崩壊実験状況



(d) 基部の亀裂発生状況



(e) 崩壊状況



(f) 基礎の様子

図3-19 現地調査，振動・静的破壊実験状況（岩田弘製陶）



図3-20 可視像とレーダ画像（豊和製陶）

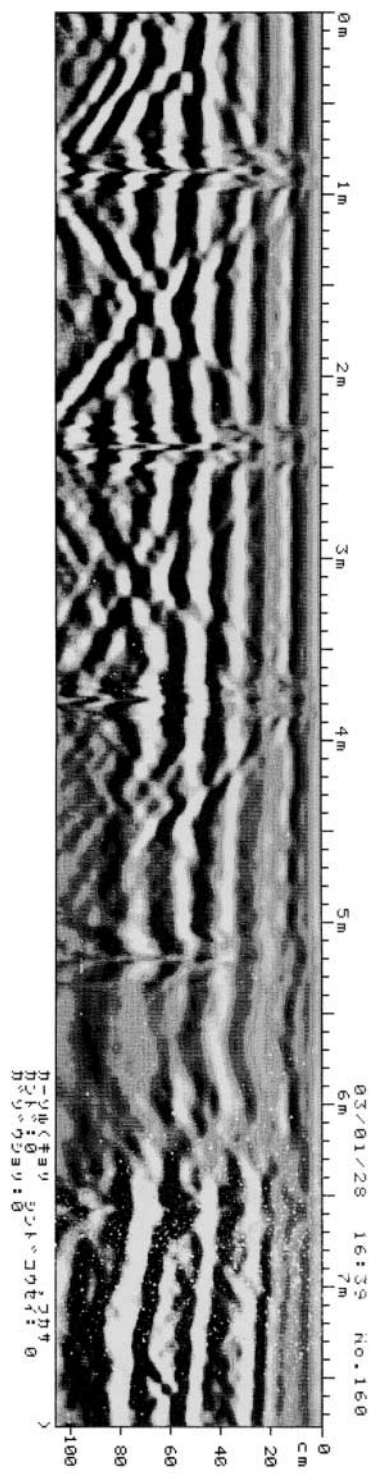


図3-21 可視像とレーダ画像（岩田弘製陶）

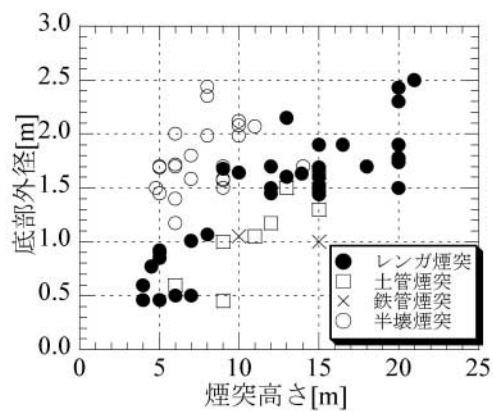


図3-22 現存する煙突の幅と高さの関係

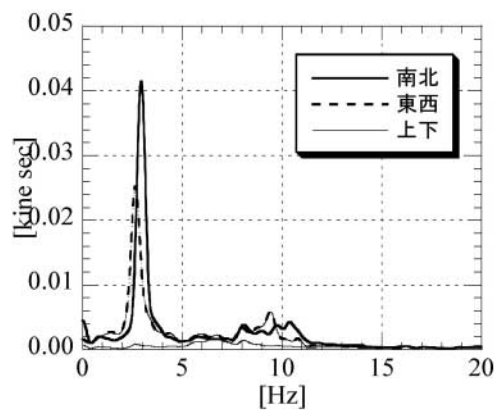


図3-23 フーリエスペクトル (豊和製陶)



図3-24 ウィンザーピン貫入抵抗値測定状況



図3-25 引っかかり傷幅測定状況

表3-5 レンガの実験結果

試験体	表乾密度	気乾密度	最大荷重(kN)	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(N/mm ²)
S1 I1	2.000	1.524	9.85	10.96	11820.02
S1 O1	1.962	1.417	11.75	13.02	5460.65
S2 I1	2.000	1.488	9.55	10.60	3453.68
S2 O1	1.980	1.475	5.15	5.75	2351.31
S3 I1	2.064	1.613	4.55	5.07	2745.49
S3 O1	2.022	1.633	3.50	3.89	4145.62
S4 I1	2.022	1.658	3.45	3.84	1927.17
S4 O1	2.022	1.663	5.85	6.51	2301.18

3.3.3 常時微動測定

基本的な振動特性である固有振動数を推定するため、豊和製陶のレンガ煙突の常時微動測定を実施した（図3-18 (b)）。測定機器として、小型換振器（S社製：動電型速度計、水平2成分、上下1成分、固有周期1秒（測定周波数1.4～30Hz）、固有周期5秒（測定周波数0.3～30Hz））と増幅器（S社製：ローパスフィルター42Hz）を用いた。常時微動は速度の形で測定し、AD変換器を通して、サンプリング周波数100Hzで1分間収録した。測定点は頂部1点である。

観測されたフーリエスペクトルを図3-23に示す。スペクトルの平滑化はParzenのウィンドウ幅を0.5Hzとして行っている。図中、太実線は南北方向、太破線は東西方向、細実線は上下方向のスペクトルを示している。これより、豊和製陶のレンガ煙突の固有振動数は、煙道の影響により、南北方向約2.95Hz、東西方向約2.67Hzと推定できる。また、岩田弘製陶のレンガ煙突は、頂部の厚さが薄くて常時微動計を設置できず、測定ができなかった。

3.3.4 多点同時加速度測定

固有振動数、固有モードと減衰を推定するため、豊和製陶と岩田製陶のレンガ煙突の多点同時加速度測定を実施した（図3-18 (c)、図3-19 (a)、(b)）。測定機器として、加速度計（S社製：サーボ型、固有周波数約200Hz、減衰比0.6～0.7）と直流増幅器（T社製）を用いた。測定点は、煙突の基部1点、頂部1点、高さ方向等間隔に4点、計6点である。外乱は重機による地盤振動で、その応答を南北方向、東西方向について測定した。

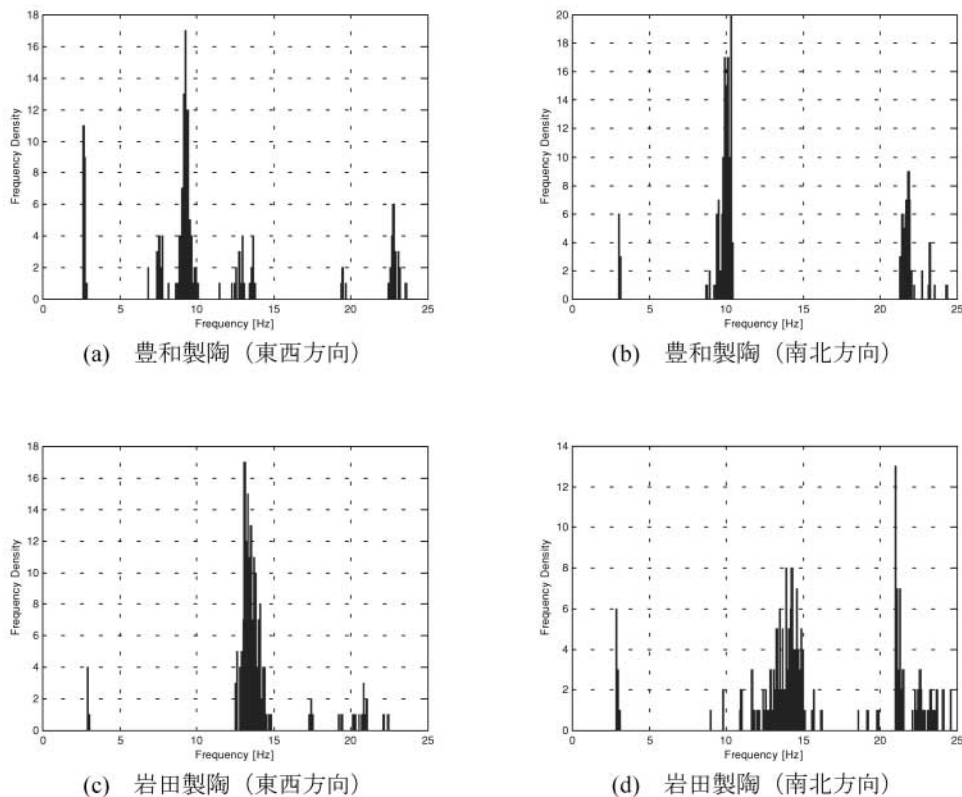


図3-26 ARMAVモデルによる固有振動数の同定結果

図3-26に、ARMAVモデル²⁶⁾による固有振動数の同定結果を、図3-27に固有モードの同定結果を示す。また、20節点アイソパラメトリックソリッド要素による固有値解析を行った。豊和製陶のレンガ煙突の基礎は鉄筋コンクリートのため、煙突の基部の境界条件は完全固定とし、ロッキングなどの影響はないものとした。これに対して、図3-27の固有モードから分かるように、岩田弘製陶のレンガ煙突の基礎は土で、ロッキングの影響を考慮するために、地盤もモデル化している。解析には、3.3.2節で得られたレンガの単位体積重量 $\gamma_B=0.0000165\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E=3200\text{N/mm}^2$ を用いた。有限要素解析による固有モードを図3-28に示す。有限要素解析では、ねじれが5次モードに現れた。表3-6に、ARMAVモデル²⁶⁾による固有振動数、減衰の同定結果と有限要素解析による固有振動数を示す。

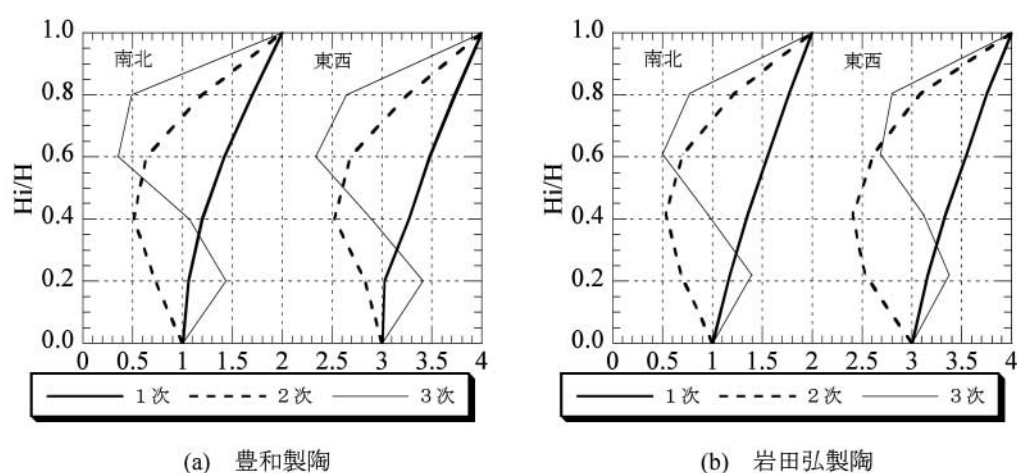


図3-27 ARMAVモデルによる固有モードの同定結果

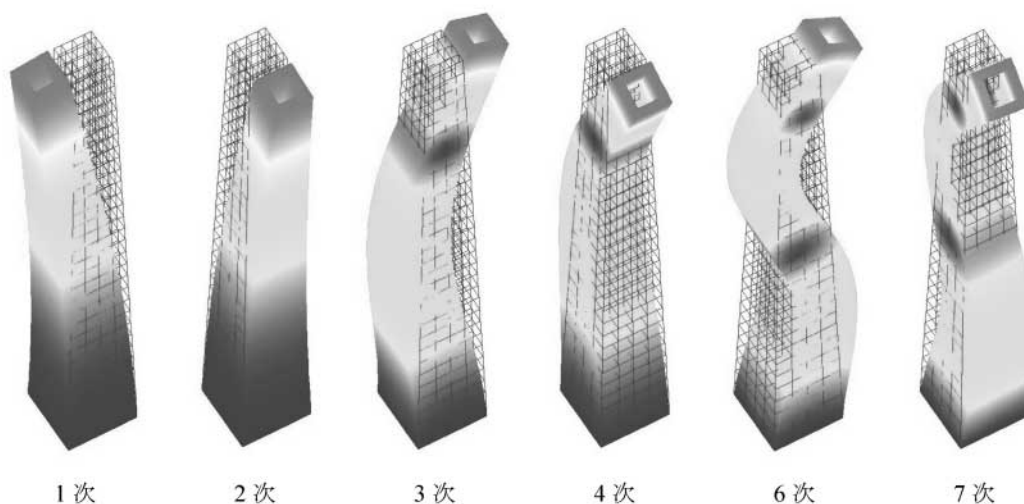


図3-28 固有値解析による固有モード（豊和製陶）

表3-6 固有振動数と減衰

煙突	方向	モード	固有振動数 (Hz)		減衰 (%)
			ARMAV	FEM	ARMAV
豊和製陶	南北	1次	3.0603	2.7572	7.953
		2次	9.9725	11.1547	4.187
		3次	22.3372	25.6448	5.372
	東西	1次	2.6918	2.6924	3.069
		2次	9.3494	10.9514	3.157
		3次	22.7584	25.4511	4.613
岩田弘製陶	南北	1次	2.933	2.9547	4.739
		2次	14.4932	15.5084	7.370
		3次	21.8729	23.0881	3.882
	東西	1次	2.9356	2.9547	6.984
		2次	13.7789	15.5084	6.750
		3次	19.9204	23.0881	9.061

3.3.5 煙突の耐震性能

本節では、線形弾性地震応答解析に基づいて、レンガ煙突の耐震性の評価を試みる^{18), 27)}。ここで用いている地震応答解析は、多質点系の曲げ系振動解析モデルに基づいている。

解析にあたっては、以下の仮定を用いる。

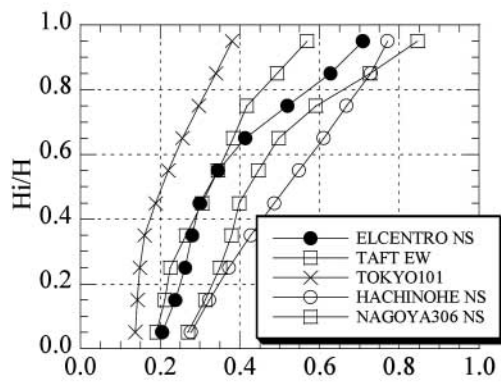
- 1) 豊和製陶のレンガ煙突の支持基盤は強固なものであるので、基礎固定と仮定する。
- 2) 解析におけるモデル化としては、a)煙突を高さ方向に区切り、質量をその中央に集める多質点系モデルとする、b)区間内では肉厚が一定である等断面とする。
- 3) レンガのヤング係数は、前節で推定された値を用いる。
- 4) 減衰は質量比例型を用いる。なお、減衰は一次モードに対して2%を用いる。

解析に用いた地震波は、EL Centro 1940(NS), Taft 1952(EW), 東京101, 八戸 (NS), 名古屋306 (NS) の計5波である。解析における最大加速度はすべての地震波に対して100galとした。

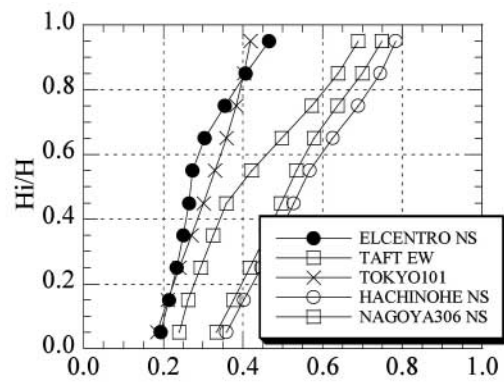
図3-29 (a), (b) に、豊和製陶と岩田弘製陶のレンガ煙突の応答せん断力係数を示す。これより、頂部から約1/3の高さの位置付近で、応答性状が少し変わっていることが分かる。

図3-30から図3-35に、豊和製陶と岩田弘製陶のレンガ煙突に関する5波平均の応答最大加速度、応答最大速度、応答最大変位、応答最大せん断力、応答最大曲げモーメント、応答最大せん断力係数を示す。図3-35よりベースシャー係数は約0.25となっていることが分かる。

図3-36に基部での値 Q_B で無次元化したせん断力分布、図3-37に M_B で無次元化した曲げモーメント分布を示す。これより、せん断力分布も曲げモーメント分布も、両煙突でほぼ同じ値をとっていると言える。



(a) 豊和製陶



(b) 岩田弘製陶

図3-29 応答最大せん断力係数

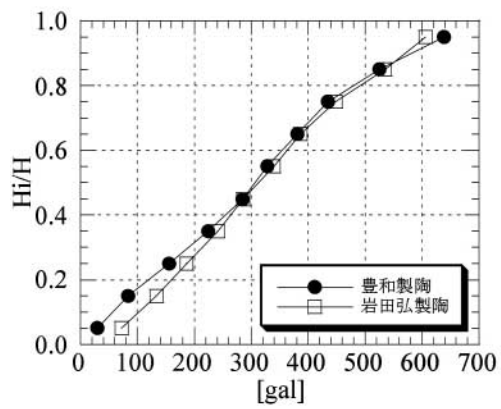


図3-30 応答最大加速度

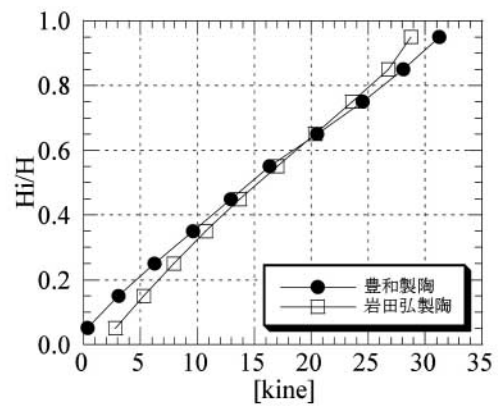


図3-31 応答最大速度

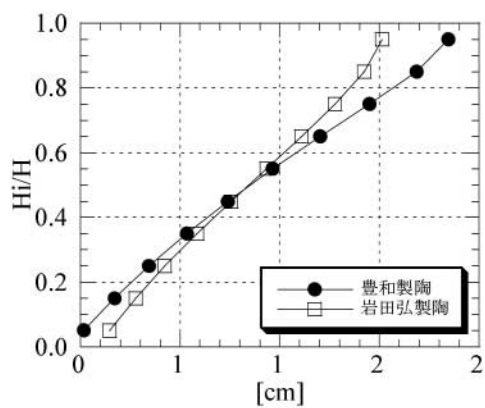


図3-32 応答最大変位

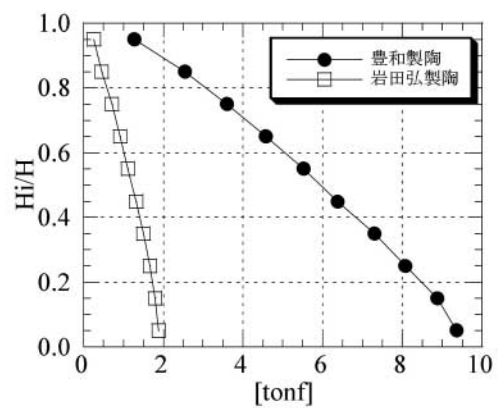


図3-33 応答最大せん断力

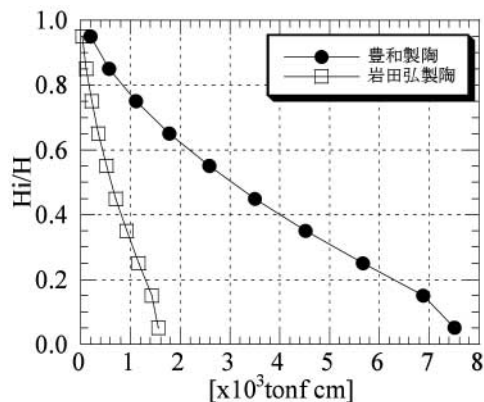


図3-34 応答最大曲げモーメント

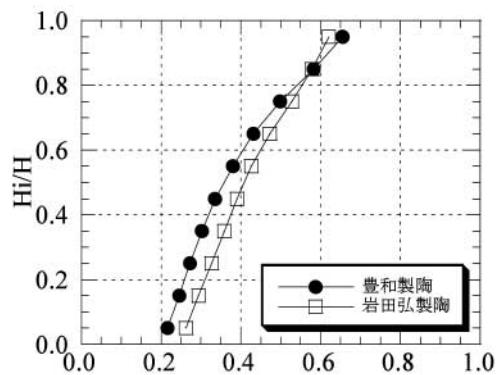


図3-35 応答最大せん断力係数

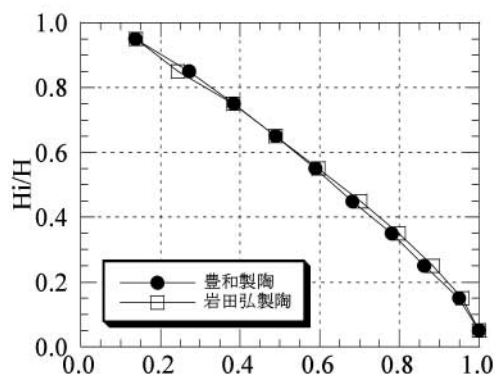


図3-36 せん断力分布 (Q_i/Q_B)

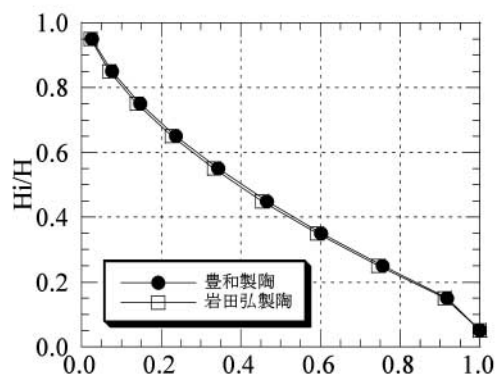


図3-37 曲げモーメント分布 (M_i/M_B)

弾性線形地震応答解析結果に基づき、レンガ煙突の耐震性能についての考察を以下に試みる。煙突は静定構造物であるので、その崩壊はレンガの間の目地（モルタル）の引張破壊によって定まると予想される。ここでは、モルタルの引張強度を $\sigma_t = 3\text{kgf/cm}^2$ と仮定し、煙突の各断面においてこの引張強度に至ったところで煙突の崩壊と定義する。また、その崩壊に至らしめるのに必要な入力波の最小加速度を、崩壊最小加速度 α と呼ぶこととする。 α は、最大加速度 100gal の応答最大曲げモーメントの解析結果 $M(100)$ を用いることにより、次式で得られる。

$$\alpha = (\sigma_t + N/A) \times Z \times 100 / M(100)$$

ここで、 α : 崩壊最小加速度 (gal)

$M(100)$: 入力波の最大加速度が 100gal の場合の応答最大曲げモーメント

σ_t : 引張強度 (0.003tf/cm^2)

N : 軸力 (tf)

A : 断面積 (cm^2)

Z : 断面係数 (cm^3)

前式と弾性地震応答解析結果（図3-34）に基づいて求めた豊和製陶と岩田弘製陶のレンガ煙突の崩壊最小加速度 α は、62galと49galである。モルタルの引張破壊する位置は煙突基部で、一次モードが卓越する結果となっている。材料の非線形性等を考慮すると、崩壊加速度は、線形弾性解析によりここで推定した崩壊加速度よりも多少大きいと考えられる。ここで、求めた値の1.5倍と仮定すると、崩壊加速度は93と74gal程度と推定できる。この加速度値は中震に相当する。せん断力係数の応答倍率は、図3-35によれば2.5程度であるので、煙突に対する崩壊せん断力係数は、0.23と0.19になる。

3.3.6 煙突の静的破壊実験

煙突の補強方法を検討するためには、煙突の構造特性の把握が必要となる。本節では、静的破壊実験と有限要素解析の結果について報告する。

平成15年1月24日に豊和製陶の、1月30日に岩田弘製陶のレンガ煙突の静的破壊実験を実施した（図3-18、図3-19）。加力は、レンガ煙突の上部にワイヤーを掛け、重機でワイヤーを引っ張る方法で行った。煙突の崩壊まで加力を行ったが、弾性範囲における荷重をワイヤーに介した荷重計で測定し、水平距離（変形量）は煙突頂部に設置したプリズムをレーザ距離計で読むことにより測定した。

豊和製陶のレンガ煙突の最大荷重は32.15kNで、煙突の半分より少し上の高さ（約8m）に亀裂が生じ、最終的に崩壊した（図3-18 (f)）。一方、岩田弘製陶のレンガ煙突は、基部に亀裂が生じ、最大荷重4.4kNで最終的に崩壊した（図3-19 (e)）。

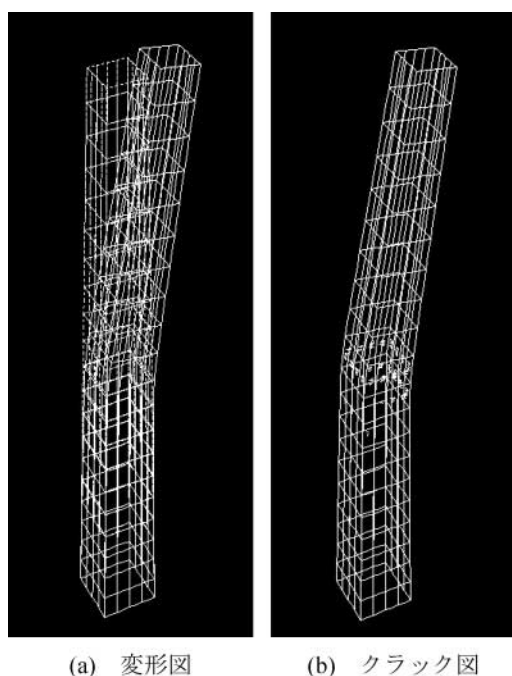


図3-38 豊和製陶

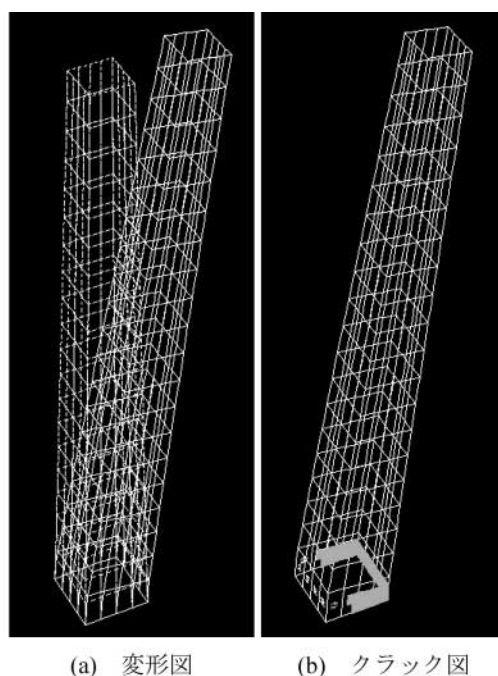


図3-39 岩田弘製陶

解析に用いた有限要素は、9節点ヘテロシスシェル要素である。レンガ煙突の基部の境界条件は、豊和製陶は完全固定とし、ロッキングなどの影響はないものと、一方、岩田弘製陶は地盤の特性を反映させるために、最下層に剛性を低減した要素を用いた。解析には、3.3.2節で得られたレンガの単位体積重量 $\gamma_B=0.0000165\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E=3200\text{N/mm}^2$ 、圧縮強度 $\sigma_c=7.5\text{MPa}$ を用いた。引張強度に関しては、 0.3MPa を仮定している。材料非線形、幾何学的非線形を考慮して解析を進めた。

図3-38 (a) に有限要素解析による豊和製陶のレンガ煙突の変形図を、図3-38 (b) にクラック図を示す。これより、煙突は半分より少し上の高さ（約8m）に亀裂が生じていることが分かる。岩田弘製陶のレンガ煙突の変形図とクラック図を、図3-39 (a)、図3-39 (b) にそれぞれ示す。これより、煙突の基部にクラックが生じていることが分かる。また、図3-40より、弾性変形の様子は実験値とよく一致していることが分かる。

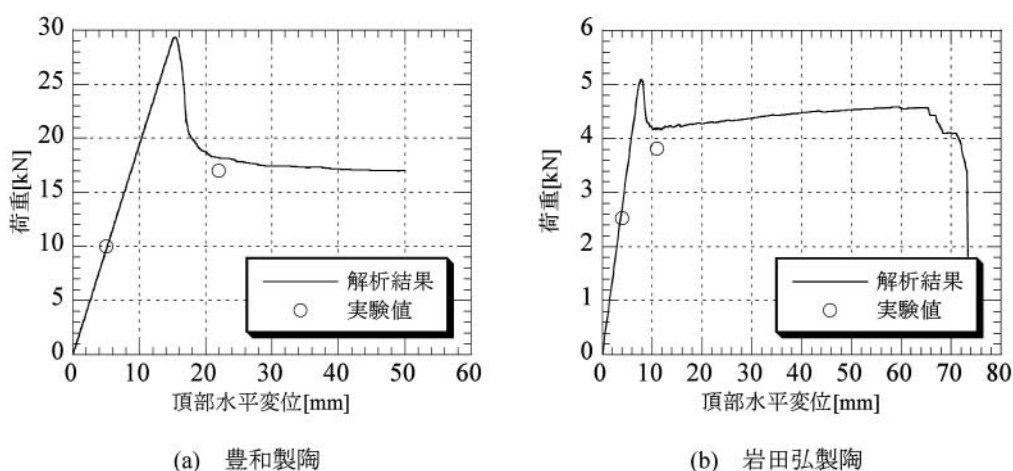


図3-40 荷重－変位曲線

3.4 まとめ

常滑市のレンガ煙突に関する研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 平成15年1月末現在における高さ9m以上のレンガ煙突は、45本（A型＜普及型蛇腹煙突＞15本、B型＜常滑型蛇腹煙突＞20本、C型＜簡易型煙突＞6本）と、平成8年の55本から10本減少していることが分かった。また、高さ9m以下の上部を解体して短くした半壊レンガ煙突＜E型＞は33本で平成8年から5本減少、また、高さ9m以上の土管煙突＜D型＞は11本で2本減少となっている。
- 2) 煙突の所有者に対する聞き取り調査の結果、煙突の保存に関する意識は高く、煙突の安全性に対する危惧、維持・管理のための経済的問題が解決できれば、煙突の保存が可能であることが分かった。
- 3) 電磁波レーダ法により煙突の厚さを調査した結果、階段状に厚さが変化していることが分かった。
- 4) レンガの圧縮強度は約7.5MPa、静弾性係数は約3200N/mm²であることが分かった。

- 5) 常時微動測定の結果、豊和製陶のレンガ煙突の固有振動数は、煙道の影響により、南北方向約2.95Hz、東西方向約2.67Hzと推定できた。
 - 6) 多点同時加速度測定データに基づき、ARMAVモデルにより固有振動数、固有モード、減衰の同定を行った。有限要素解析結果と良い一致を見た。
 - 7) 線形弾性地震応答解析により、煙突の耐震性の検討を行った結果、豊和製陶と岩田弘製陶の煙突の崩壊加速度は、それぞれ中震に相当する93galと74galであると推定できた。煙突の崩壊位置は基部で、一次モードが卓越する結果となっている。
 - 8) 煙突の静的破壊実験により、弾性範囲における煙突の挙動、および最大荷重と崩壊位置を明らかにした。有限要素解析と実験値は良い一致を見た。
- 今後は、モルタルの物理特性を室内実験により解明するとともに、数値シミュレーションにより、構造補強方法とその効果を評価する予定である。

謝辞

本研究の一部は、日比科学技術振興財団の研究助成金によってまとめられた研究であり、財団に深く謝意を表します。

イタリアのヴィコフォルテ教会堂の劣化現況調査、常時微動測定において便宜をはかっていただきましたトリノ工科大学建築学部教授のキオリーノ博士、文化財保存局、ヴィコフォルテ教会の宗教局ならびに管理局の方々に深く感謝致します。また、名古屋大学大学院環境学研究科教授の谷川恭雄博士、株式会社コンステック開発技術事業本部の込山貴仁博士、三重大学工学部建築学科教授の畑中重光博士、日本大学生産工学部建築工学科助教授の湯浅昇博士、独立行政法人建築研究所材料グループ主任研究員の濱崎仁氏、名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻大学院生（調査当時）の大橋幾世氏には劣化現況調査、常時微動測定を始め、実験で助力を得ました。また、愛知工業大学工学部建築学科教授の山田和夫博士には、衝撃弾性波装置の貸出しに便宜をはかっていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。なお本研究は、平成14年度文部科学省科学研究費補助金「基盤研究(B)(2)海外学術」（研究代表者：青木孝義）により、上記の研究メンバーで進められた研究成果の一部である。

常滑市のレンガ煙突に関する研究のきっかけは、元・窯のある広場資料館館長の柿田富造氏との出会いでした。そして、日比科学技術振興財団研究助成が、研究を実施へと導いてくれました。柿田富造氏、常滑市商工観光課の梅原啓三氏、常滑郷土文化会つちのこ代表の杉江恵子氏には、煙突の調査、実験で助力を得ました。深く感謝します。トリノ工科大学構造工学科助教授のサビア博士にはデータ分析で助言を得ました。また、佐藤商事株式会社の佐藤克己氏には、常滑のレンガ煙突の振動測定に関して、測定機器の貸出しに便宜をはかっていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1) M. Garro, “Santuario - Basilica Regina Montis Regalis, Vicoforte - Mondovì, Opere di Consolidamento e Restauro”, Relazione Riassuntiva, Vicoforte di Mondovì, 1962
- 2) Rodio SpA, “Santuario di Vicoforte, Prove di Laboratorio su Campioni di Muratura, Misure

Geofisiche ”, Relazione n.19'797, 1983

- 3) G. Pizzetti, G. Fea, “ Restoration and Strengthening of the Elliptical Dome of Vicoforte Sanctuary ”, Proc. of IASS-MSU International Symposium on DOMES from Antiquity to the Present, Istanbul, 1988, pp.289-308
- 4) M.A. Chiorino, G. Fea, G. Losana, “ Strengthening and Control of the Dome of Vicoforte Sanctuary ”, Proc. of IABSE International Symposium on Structural Preservation of Architectural Heritage, Rome, 1993, pp.723-724
- 5) L. Barosso, “ La Struttura Tamburo-Cupola del Santuario di Vicoforte : Materiali e Tecniche Costruttive ”, Società degli Ingegneri ed Architetti in Torino, 1979
- 6) G. Vacchetta, “ Nuova Storia Artistica del Santuario della Madonna di Mondovì a Vico ”, Biblioteca della Società per gli Studi Storici, Archeologici ed Artistici della Prov. di Cuneo, N.20, 1984
- 7) L'amministrazione del Santuario, “ La Madonna Santissima del Mondovì a Vico, Santuario Basilica Regina Montis Regalis ”, Stilgraf, Vicoforte, 1990
- 8) SAC. G. Conterno, “ Maria Santissima del Montereale ”, Edizioni del Santuario, 1993
- 9) A. Cecca, “ Analisi Strutturale della Cupola Ellissoidica del Santuario di Vicoforte ”, Tesi di Laurea in Architettura Anno Accademico 1993-1994, I° Facoltà di Architettura, Politecnico di Torino, 1994
- 10) A. Spadafora, “ Analisi Strutturale del Santuario di Vicoforte con il Metodo degli Elementi Finiti ”, Tesi di Laurea in Architettura Anno Accademico 2001-2002, I° Facoltà di Architettura, Politecnico di Torino, 2002
- 11) 込山貴仁, 青木孝義, 大橋幾世, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その1: 非破壊検査技術を用いた劣化・構造調査), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), A-1, 2002.8, pp.3-4
- 12) T. Aoki, T. Komiyama, Y. Tanigawa, “ Non-Destructive Tests and Structural Analysis of the Sanctuary of Vicoforte as a Preliminary Report ”, Vicoforte, 2002.9, pp.1-13
- 13) 大橋幾世, 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 畑中重光, 濱崎仁, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その2: 目視と非破壊検査技術を用いた劣化現況調査), 日本建築学会東海支部研究報告集, No.41, 2003.2, pp.137-140
- 14) 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂の劣化現況に関する非破壊検査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003.7, pp.1613-1618
- 15) 込山貴仁, 青木孝義, 湯浅昇, 畑中重光, 濱崎仁, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その3: 材料強度の推定法に関する研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1(材料施工), 2003.9, pp.153-154
- 16) 青木孝義, 込山貴仁, 濱崎仁: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その4: 常時微動測定に基づく振動特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1(材料施工), 2003.9, pp.155-156
- 17) 大橋幾世: 非破壊検査法による歴史的建築物の劣化現況調査方法に関する研究 — ヴィコフォルテ教会堂の調査を通して —, 平成14年度名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻修士論文, 2003

- 18) 青木孝義, 加藤史郎, 石川浩一郎, ミュフィット・ヨルルマズ, フェリドゥン・チュル: ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物の常時微動測定に基づく振動特性, 構造工学論文集, Vol.40B, 1994.3, pp.87-98
- 19) T. Aoki, M.A. Chiorino, R. Roccati : Structural Characteristics of the Elliptical Masonry Dome of the Sanctuary of Vicoforte, Proc. of First International Congress on Construction History, Madrid, 20-24 January 2003, Vol.1, 2003.1, pp.203-212
- 20) T. Aoki, S. Kato, K. Ishikawa, K. Hidaka, M. Yorulmaz, F. Çili, " Principle of Structural Restoration for Hagia Sophia Dome ", Proc. of the STREMAH International Symposium, San Sebastian, 1997.6, pp.467-476
- 21) 常滑郷土文化会つちのこ: 煙突のある風景, 1996.12
- 22) 常滑郷土文化会つちのこ: 写真集 なつかしき常滑, 誠進社, 2000.1
- 23) 常滑郷土文化会つちのこ: 写真集 なつかしき常滑 Part 2, 誠進社, 2001.1
- 24) 柿田富造: 煉瓦煙突の歴史と現状 ―常滑焼を中心にして―, シンポジウム日本の技術史をみる眼第15回, 常滑焼の産業遺産―れんが煙突とまちづくり―(愛知)講演報告資料集, 1997.3, pp.11-62
- 25) 常滑市環境経済部商工観光課: 平成14年度常滑市煙突調査報告書, 2003.3
- 26) A. De Stefano, D. Sabia, L. Sabia, " Structural Identification using ARMAV Models from Noisy Dynamic Response under Unknown Random Excitation ", Proc. of the DAMAS '97, Sheffield, 1997, pp.419-428
- 27) 青木孝義: ミナレットのあるイスタンブールの風景 ―ミナレットの耐震性能と保存―, シンポジウム日本の技術史をみる眼第15回, 常滑焼の産業遺産―れんが煙突とまちづくり―(愛知)講演報告資料集, 1997.3, pp.71-80
- 28) 富士市: エントツ整備ガイドブック, 富士市, 1994.3
- 29) 柿田富造: 常滑の陶業百年, とこなめ焼協同組合, 2000.11
- 30) 東京都北区教育委員会: 東京砲兵工廠銃包製造所 汽罐および鋼製耐震煙突調査報告書, 文化財研究紀要別冊第12集, 1998.3
- 31) 武藤清: 耐震設計シリーズ4 構造物の動的設計 第5章煙突, 丸善, 1966, pp.195-211
- 32) 日本建築学会, 建築構造物の振動実験, 丸善, 1978.11
- 33) 青木孝義, 杉江理代, 杉江恵子, 柿田富造: 常滑のまちづくり ―愛知県常滑市―, JUDI NEWS 都市環境デザイン会議, 5月20日号, 2000.5, pp.5-6

発表論文

- 1) 込山貴仁, 青木孝義, 大橋幾世, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その1. 非破壊検査技術を用いた劣化・構造調査), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), A-1(材料施工), 2002.8, pp.3-4
- 2) T. Aoki, T. Komiyama, Y. Tanigawa, " Non-Destructive Tests and Structural Analysis of the Sanctuary of Vicoforte as a Preliminary Report ", Vicoforte, 2002.9, pp.1-13
- 3) T. Aoki, M.A. Chiorino, R. Roccati, " Structural Characteristics of the Elliptical Masonry Dome of the

Sanctuary of Vicoforte”, Proc. of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20-24 January 2003, Vol.1, 2003.1, pp.203-212

- 4) 大橋幾世, 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 畑中重光, 濱崎仁, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その2: 目視と非破壊検査技術を用いた劣化現況調査), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第41号, 2003.2, pp.137-140
- 5) 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂の劣化現況に関する非破壊検査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003.7, pp.1613-1618
- 6) 込山貴仁, 青木孝義, 湯浅昇, 畑中重光, 濱崎仁, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その3: 材料強度の推定法に関する研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1(材料施工), 2003.9, pp.153-154
- 7) 青木孝義, 込山貴仁, 濱崎仁: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その4: 常時微動測定に基づく振動特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1(材料施工), 2003.9, pp.155-156