

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18254004  
 研究課題名（和文）  
 イタリアにおける歴史的な組積造建築とRC建築の構造・材料と修復に関する調査  
 研究課題名（英文）  
 Investigations on Structural System, Material and Restoration Strategies of Historical Masonry Structures and RC Structures in Italy  
 研究代表者  
 青木 孝義（AOKI TAKAYOSHI）  
 名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・准教授  
 研究者番号：10202467

## 研究成果の概要：

本研究は、イタリアにおける歴史的な組積造建築であるヴィコフォルテ教会堂（国宝）とRC建築である飛行船格納庫（国宝）、および関連する歴史的建造物の a) 目視、非破壊・微破壊・破壊検査による劣化現況調査、b) 構造・振動調査、c) 構造解析による構造特性の把握と分析に関する海外学術調査を実施し、その後の研究の出発点となるような資料価値の高い調査報告書を作成することを目標に進めたものである。

## 交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2006年度 | 10,900,000 | 3,270,000 | 14,170,000 |
| 2007年度 | 8,100,000  | 2,430,000 | 10,530,000 |
| 2008年度 | 5,700,000  | 1,710,000 | 7,410,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 24,700,000 | 7,410,000 | 32,110,000 |

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：イタリア、組積造、RC造、劣化現況、保存修復、海外調査

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 研究開始当初の背景

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）など、観光地にある歴史的な組積造建築は、日本でよく知られている。しかし、モンドヴィ近郊のヴィコフォルテ教会堂（写真1、1596年建設開始、1731年ドーム建設、1880年国宝指定）は、宗教建築として建設され、時代・都市・様式・文化を代表する

重要建築物であり、また長軸 37.15m、短軸 24.80m、高さ 16.60m の世界最大規模の楕円形ドームを持つ優れた空間構造としても位置づけられているにも関わらず、一般には知られていない。また、アウグスタの飛行船格納庫（写真2、1917年建設開始、1987年国宝指定）は、世界で現存する鉄筋コンクリートで作られた唯一の例であるが、日本ではほとんど紹介されていない。イタリアには、他にも歴史的な組積造建築やRC建築が数多く残っている。



写真1 ヴィコフォルテ教会堂



写真2 飛行船格納庫

しかし、前者は、建設当初から不同沈下やドームの自重による進行中の亀裂により、ドームの崩壊に関する構造的安定性が脅かされてきた。また、ドームの構造的安定性については注目を集め、1962年にはGarroによる、1983年にはRodioによる調査報告がなされ、1987年にはドーム基部にポステンションリングが挿入されたが、導入張力については未だに確定しておらず、保存や補強の面から構造特性の解明が切望されている。一方、後者も、鉄製の扉の重量による不同沈下などの影響で、屋根スラブと壁面には大きな亀裂が生じ、その構造的安定性が危惧されている。1989年には扉の倒れ防止のためのワイヤとアンカーが設置され、1994年には右側バットレスが補修され、1996年から土質調査が開始されている。

#### (2) 国内・国外の研究動向及び位置づけ

国内では、西洋建築史の研究者を中心として進められてきたハギア・ソフィア大聖堂の調査に代表されるように、歴史的建築遺産に関する従来の学術調査は、一部構造的・材料的観点から進められているものの、主に美術・様式・歴史的観点から実施されていた。一方、構造的・材料的観点からの学術調査は、地震後の被災調査が主であった。これに対して、本研究の学術的な特色は、材料・構造に関する劣化現況調査・診断と保存修復に主眼をおいていることである。

構造力学の専門家メインストーンは、調査と鋭い構造的直感によってハギア・ソフィア大聖堂ドームの力学特性をかなりの程度的確に表現したが、その判断は構造解析に裏付けられたものではなかった。しかし、その資料価値は高く、現在なお、ハギア・ソフィア大聖堂に関する研究の出発点となっている。ヴィコフォルテ教会堂に関する研究は、海外共同研究者のトリノ工科大学のChiorino教授を中心とするグループのみが実施しており、RC飛行船格納庫に関する研究はほとんどない。

## 2. 研究の目的

以上を背景として、

- (1) イタリアにおける歴史的な組積造建築とRC建築の学術調査を実施して、資料価値の高い調査報告書を作成すること、および
- (2) 劣化現況調査・診断と構造解析による耐震性能の評価に基づき、具体的な補修・補強方法を提案すること

が、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 劣化現況調査

劣化現況調査・診断のための手法が確立されていない歴史的な組積造建築や80年を経過したRC建築に対して、積極的にコンクリート工学の分野で使用されている各種非破壊・微破壊検査技術の適用を試み、ヴィコフォルテ教会堂とRC飛行船格納庫の劣化現況調査を実施する。従来の研究で検討している試験方法や、ASTM、RILEM TC 127-MSで規定されている試験方法を適用することにより、歴史的な組積造建築や80年を経過したRC建築の調査・診断のための非破壊・微破壊検査技術の確立を試みる。

### (2) モニタリング調査

補修・補強方法提案の基礎資料となるヴィコフォルテ教会堂とドーム内外の温湿度、変位、ドーム基部に設置された補強リングの張力変化に関するモニタリング（平成16年11月開始）を継続して行い、データの分析に基づき今後の予測と対策を講じる。RC飛行船格納庫については、予備調査として温度、変位、傾斜、ワイヤのひずみのモニタリングを平成15年11月末から開始（夏季のデータが欠測）しているが、そのデータの分析に基づき、本格的なモニタリングを開始する。

### (3) 振動調査

多点同時常時微動計測に基づき、ヴィコフォルテ教会堂とRC飛行船格納庫の固有振動数、固有モード、減衰定数の同定を行う。

### (4) 構造解析

構造解析によるヴィコフォルテ教会堂ドームとRC飛行船格納庫の構造特性の把握、耐震性能の評価を行う。ドームの構造的安定性を確保するために必要なドーム基部に設置された補強リングの導入張力を決定する。

### (5) 補修・補強方法の提案

劣化現況調査・診断と耐震性能の評価に基づき、コンクリートの再アルカリ化などを含む具体的な材料の補修や構造補強方法の提案を行う。

### (6) 調査報告書の作成

以上の成果を踏まえて、ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的な組積造建築とRC飛行船格納庫を中心とするRC建築の資料価値の高い調査報告書を作成する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 劣化現況調査

三次元レーザーキャニングを実施して、ヴィコフォルテ教会堂(図1)とRC飛行船格納庫(図3)の形状計測を行った。また、床面、外周、第1コーニス、第2コーニスのレベル測量を実施して、教会堂の施工過程と不同沈下の様子を確認した結果、建物西側が沈下していること、1階床面はやり直された可能性が高いこと、レベルBはレベルCと沈下傾向は同じものの沈下量が1/3と小さくやり直された可能性が高いことが分かった(図2)。

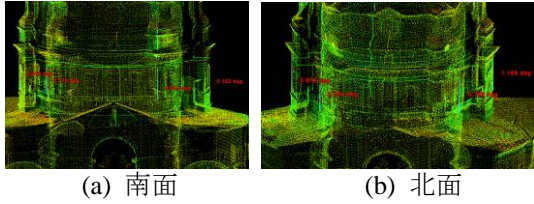


図1 ヴィコフォルテ教会堂バットレスの傾き

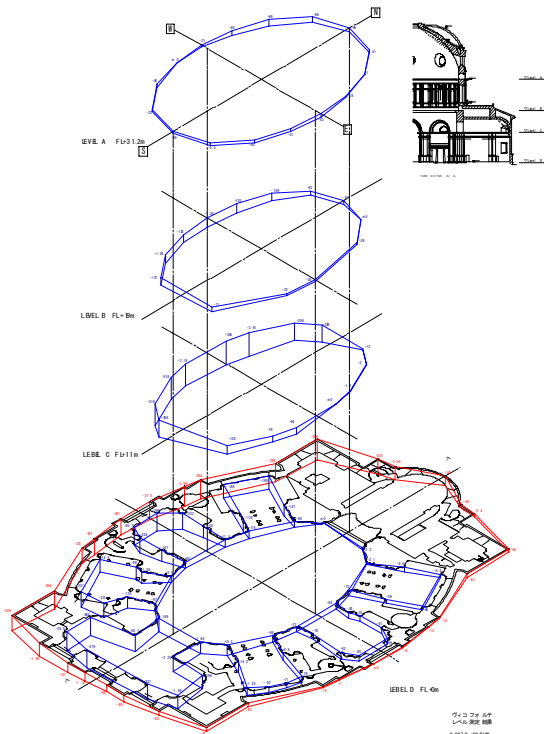


図2 ヴィコフォルテ教会堂レベル測定結果

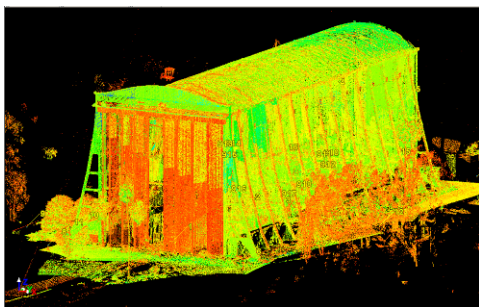


図3 飛行船格納庫の3D スキャナ結果

目視および赤外線サーモグラフィ法により、教会堂のメインドーム内殻面と礼拝堂天井のフレスコ画の浮き箇所特定、および補修工事後の外壁石貼りの状況を確認した(図4)。また、RC飛行船格納庫に赤外線サーモグラフィ法を適用した。



(a) 可視画像 (b) 熱画像  
図4 ヴィコフォルテ教会堂メインドーム

Galloによりドームに設置された3組の補強リングのうち、一番上の1組について衝撃弾性波法により破断調査を行った結果、連続していることを確認した(図5)。

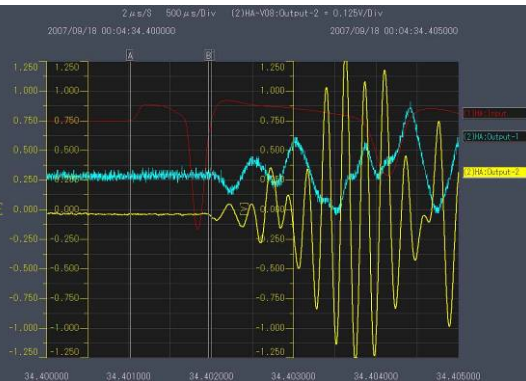
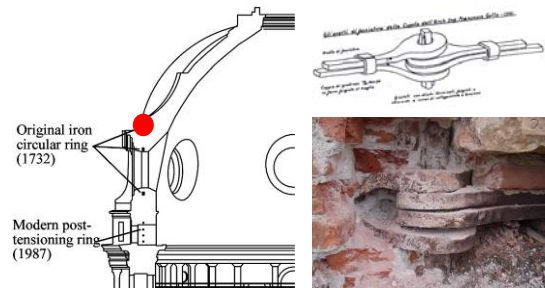


図5 補強リングと衝撃弾性波法による波形

目視、非破壊・微破壊・破壊試験により、煉瓦とモルタルの劣化現況を調査するとともに、ウィンザーピン法を適用して煉瓦の強度とウィンザーピン貫入抵抗値の関係をあきらかにした。また、フラット・ジャッキ法の組積造建築への適用可能性について、パドヴァ大学と一緒に調査を行った。RC飛行船格納庫、RC倉庫Rotonda(ヴェローナ)の劣化現況調査、および材料の強度と耐久性に関する調査を行った。強度と中性化深さ、塩化物イオン量の関係を調査するとともに、RC飛行船格納庫については、修復工事中の足場を利用して高さ方向の分布についても調査を行った。



(2) モニタリング調査

ヴィコフォルテ教会堂とドーム内外の温湿度、変位、ドーム基部に設置された補強リングの張力変化に関するモニタリング、RC 飛行船格納庫の温度、変位のモニタリングを行った結果、季節変動以外の動きは見られず、安定していることが分かった。

(3) 振動調査

ヴィコフォルテ教会堂（表 1、2）と RC 飛行船格納庫（図 6～8）の多点同時常時微動測定を行い、固有振動数と固有モードの推定を行った。また、地盤の常時微動測定を行った。ヴィコフォルテ教会堂の第 2 コーニスレベルにおける水平振動成分の南北方向は 2.11Hz、東西方向は 1.95Hz が固有周波数であると推定された。

表 1 第 2 コーニスレベル平面の振動モード

|      | 固有周波数          | その他ピーク周波数      |                |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 南北方向 | 2.11Hz<br>(伸縮) | 3.52Hz<br>(並進) | —              |
|      |                |                | —              |
| 東西方向 | 1.95Hz<br>(並進) | 2.87Hz<br>(回転) | 3.53Hz<br>(伸縮) |
|      |                |                |                |
|      |                |                |                |

表 2 教会堂南側高さ方向の振動モード

|              | 固有周波数      | その他ピーク周波数  |            |             |
|--------------|------------|------------|------------|-------------|
| 南北方向<br>面外方向 | 2.11Hz<br> | 4.08Hz<br> | 8.61Hz<br> | 10.75Hz<br> |
|              | 1.95Hz<br> | 4.53Hz<br> | —          | —           |

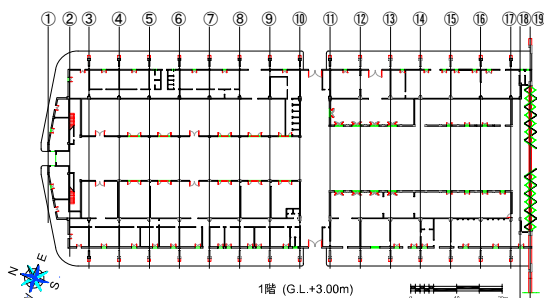


図 6 RC 飛行船格納庫平面図と柱番号割付

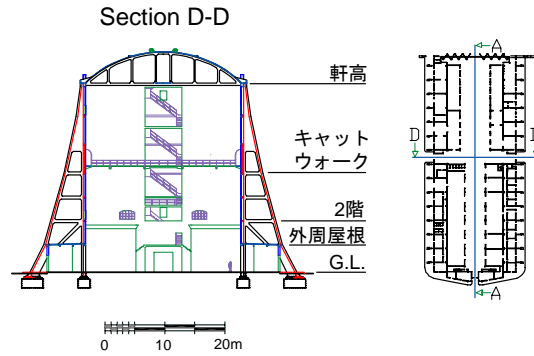


図 7 RC 飛行船格納庫断面図と柱番号割付

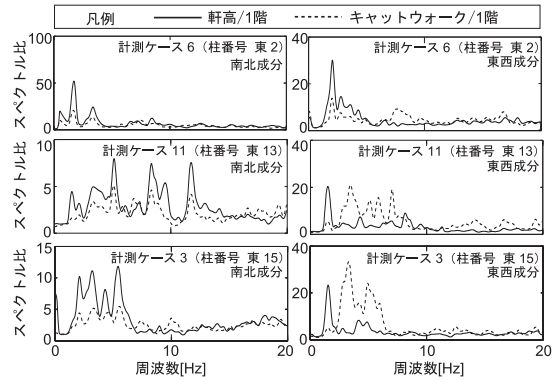


図 8 1 階に対する軒高およびキャットウォークレベルの伝達関数

図 8 に 1 階のレベルに対する軒高およびキャットウォークレベルでの伝達関数を示す。階段室から離れている計測ケースでは、軒高レベルよりもキャットウォークレベルのピーク周波数が高く、キャットウォーク部分で高次の振動モードが卓越していると考えられる。

(4) 構造解析

構造解析により、ヴィコフォルテ教会堂全体の荷重の伝達メカニズムとクラックの発生原因をあきらかにした（図 9）。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。

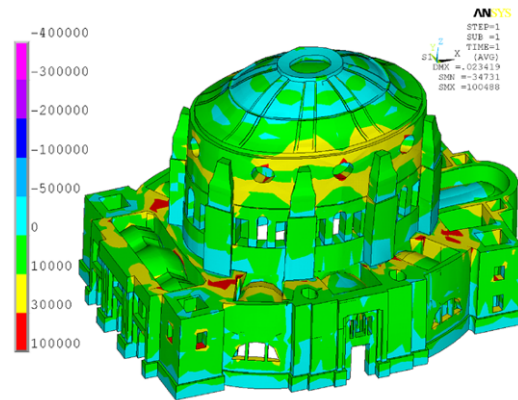


図 9 主応力度 1（補強リングなし）

補強リングを挿入した解析結果を図 10 に示す。図 9 と比較して、ドーム基部ないし大窓付近で周方向引張応力度が小さくなっていることが分かる。

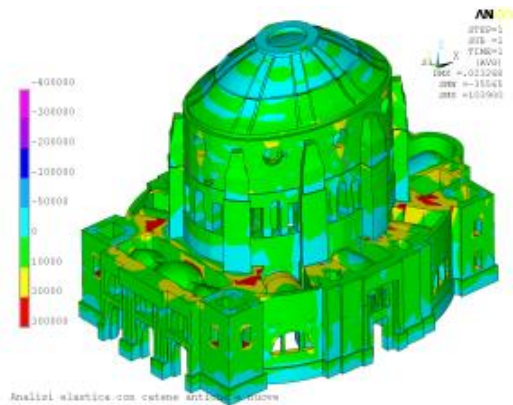


図 10 主応力度 1 (補強リング)

(5) 補修・補強方法の提案

2007年11月に始まったRC飛行船格納庫の修復・補強工事の現状を調査するとともに、補修・補強方法の提案を行う。

(6) 調査報告書の作成

以上の研究成果をまとめて、調査報告書を作成する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① 長谷川哲也, 畑中重光, 三島直生, 谷川恭雄: ドリル型削孔試験機の開発と歴史的建造物の表層強度測定への適用, コンクリート工学, 査読無, Vol.46, No.6, 2008.6, pp.10-17
- ② T. Aoki, D. Sabia, D. Rivella, “Influence of Experimental Data and FE Model on Updating Results of a Brick Chimney”, Journal of Advances in Engineering Software, Elsevier, 査読有, Vol.39, No.4, 2008.4, pp.327-335
- ③ 谷川恭雄: コンクリート建造物の非破壊調査-文化財建造物の調査・診断に関連して-, コンクリート技術フォーラム報告集, 査読無, 2008.3, pp.33-44
- ④ 谷川恭雄: コンクリートの非破壊試験法の現状と課題, 構造調査コンサルティング協会ニュース, 査読無, No.39, 2008.1, pp.2-13
- ⑤ 長谷川哲也, 畑中重光, 谷川恭雄, 長谷川直司: 歴史的建造物の表面から内部への連続した強度評価のための小径ドリル型削孔試験機の開発研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第 26 号, 2007.12, pp.421-426
- ⑥ 長谷川哲也, 畑中重光, 三島直生, 本多千絵美, 谷川恭雄: 小径ドリル型削孔試験機によるセメントペーストの圧縮強度推定: 建造物の表層強度推定手法に関する開発研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 621 号, 2007.11, pp.1-8
- ⑦ T. Aoki, D. Sabia, D. Rivella, T. Komiyama, “Structural Characterization of Rakanji Stone Arch Bridge by Experimental Tests and Numerical Model Updating”, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration, Taylor & Francis, 査読有, Vol.1, Issue 3, 2007.9, pp.227-250
- ⑧ T. Aoki, D. Sabia, D. Rivella, T. Komiyama, “Structural Characterization of Rakanji Stone Arch Bridge by Experimental Tests and Numerical Model Updating”, Proceeding of the V International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, 査読有, New Delhi, India, November 6-8, 2006.11, pp.887-895
- ⑨ T. Aoki, H. Muto, E. Murdolo, “Structural Identification and Seismic Vulnerability of the Tower of Matilde in Italy”, ibid., 査読有, 2006.11, pp.897-904
- ⑩ M. A. Chiorino, R. Roccati, C. D’Addato, T. Aoki, C. Calderini, A. Spadafora, “Monitoring and Modeling Strategies for the World’s Largest Elliptical Dome at Vicoforte”, ibid., 査読有, 2006.11, pp.1167-1176
- ⑪ T. Aoki, D. Sabia, D. Rivella, “Model Updating of a Real Multi-Span Masonry Bridge”, Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology, B.H.V. Topping, G. Montero and R. Montenegro, (Editors), Civil-Comp Press, 査読無, Stirlingshire, Scotland, Paper 81, 2006.9, pp.1-13 (CD-ROM)
- ⑫ T. Aoki, D. Sabia, “Structural Characterization of a Brick Chimney by Experimental Tests and Numerical Model Updating”, Masonry International, 査読有, Vol.19, No.2, 2006.8, pp.41-52
- ⑬ 青木孝義, 濱崎仁, 込山貴仁, 湯浅昇, 谷川恭雄: アウグスタの飛行船格納庫の劣化現況調査, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第 23 号, 2006.6, pp.53-58
- ⑭ 青木孝義, 伊藤憲雄: 6年半の実測データに基づく歴史的な組積造建造物の補修に関する消石灰モルタルの色彩と力学特性, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 602 号, 2006.4, pp.73-79

〔学会発表〕(計20件)

- ① 湯浅昇, 濱崎仁, 青木孝義, 谷川恭雄, 高橋英孝: イタリア国宝 RC 造飛行船格納庫における劣化現況調査 —建物における塩化物イオン量分布—, 日本非破壊検査協会鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会, 東京, 2009.3.26, pp.19-28
- ② 湯浅昇, 濱崎仁, 青木孝義, 谷川恭雄, 高橋英孝: イタリア国宝 RC 造飛行船格納庫における劣化現況調査 —建物における塩化物イオン量分布—, 第41回日本大学生産工学部学術講演会建築部会講演概要, 千葉, 2008.12.6, pp.87-90
- ③ 高橋典之, 中埜良昭, 青木孝義: 歴史的建築物の常時微動測定に基づく振動特性評価 その2 アウグスタ飛行船格納庫(鉄筋コンクリート造建築)の振動特性評価, 日本地震工学会大会 2008 梗概集, 仙台, 2008.11.3, pp.8-9
- ④ 辻奈津子, 山根政夫, 谷川恭雄, 鈴木計夫: 各種非破壊試験法による低強度コンクリートの強度推定方法に関する研究(その3: 実建物から採取したコンクリートコア供試体に対する引っかけ傷法の適用性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 広島, A-1 (材料施工), 2008.9.20, pp.785-786
- ⑤ T. Aoki, "Research on Masonry Structures", Hans Caravanserai Symposium on Stone in Traditional & Modern Architecture, Keynote speech, Antalya, 2007.11.29, pp.305-319
- ⑥ 谷川恭雄, 木股典良, 寺西浩司, 青木孝義: 各種非破壊試験法による低強度コンクリートの強度推定方法に関する研究(その1: 反発度法、超音波速度法およびウィンザーピン貫入抵抗法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 福岡, A-1 (材料施工), 2007.8.29, pp.239-240
- ⑦ 青木孝義, 谷川恭雄, 湯浅昇, 濱崎仁: イタリア RC 造飛行船格納庫における劣化現況調査 その1 調査概要およびコンクリート強度と中性化深さに関する調査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 福岡, A-1 (材料施工), 2007.8.29, pp.247-248
- ⑧ 濱崎仁, 谷川恭雄, 青木孝義, 湯浅昇: イタリア RC 造飛行船格納庫における劣化現況調査 その2 塩化物イオン量に関する調査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 福岡, A-1 (材料施工), 2007.8.29, pp.249-250
- ⑨ 湯浅昇, 谷川恭雄, 青木孝義, 濱崎仁: イタリア RC 造飛行船格納庫における劣化現況調査 その3 非・微破壊試験による強度推定方法の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 福岡, A-1 (材料

施工), 2007.8.29, pp.251-252

- ⑩ 高橋典之, 中埜良昭, 青木孝義: 歴史的建築物の常時微動測定に基づく振動特性評価 その1 ヴィコフォルテ教会堂(組積造建築)の振動特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 福岡, C-2 (構造IV), 2007.8.31, pp.881-882

〔図書〕(計1件)

- ① 青木孝義, 奥田郁夫, 川井一義, 草間晴幸, 栗原康行, 嶋田勝彦, 瀬口哲夫, 高橋信雄, 加藤千恵子, 丹羽伸二, 三上訓顯, 水野みか子, 溝口正人, 森下良三, 山口良臣, 廣川美子: 芸術工学への誘い XI, 岐阜新聞社, 総頁478, イタリアにおける歴史的な組積造建築とRC建築—ヴィコフォルテ教会堂と飛行船格納庫—, pp.17-62, 2007.3

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 孝義 (AOKI TAKAYOSHI)  
名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・准教授  
研究者番号: 10202467

### (2) 研究分担者

谷川 恭雄 (TANIGAWA YASUO)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70023182  
中埜 良昭 (NAKANO YOSHIKI)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 10212094  
阪上 隆英 (SAKAGAMI TAKAHIDE)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50192589  
湯浅 昇 (YUASA NOBORU)  
日本大学・生産工学部・准教授  
研究者番号: 00230607  
高橋 典之 (TAKAHASHI NORIYUKI)  
東京大学・生産技術研究所・助教  
研究者番号: 60401270  
濱崎 仁 (HAMASAKI HITOSHI)  
独立行政法人建築研究所・主任研究員  
研究者番号: 30370703

### (3) 連携研究者

溝口 明則 (MIZOGUCHI AKINORI)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20297336  
永山 勝 (NAGAYAMA MASARU)  
財団法人日本建築総合試験所・試験研究センター・材料部長  
研究者番号: 50450929