

## 宇宙線による世界遺産建造物の 内部構造探査

花里 利一\*<sup>1</sup>, 田中 宏幸\*<sup>2</sup>

Hanazato Toshikazu Tanaka Hiroyuki

### 1. はじめに

宇宙線が大気に衝突した際に発生する素粒子ミュオンは、私たちの周りにいろいろな方向から常に降り注いでいる。手のひらの広さに、毎秒1個程度は飛んできている。このミュオンは、厚さ1 km程度の岩盤をも透過する能力を持っていて、物質を通過する際に吸収されるが、その吸収率が密度に依存する性質を持っている。この性質を用いて、X線レントゲン撮影と同じように、物体を透過するミュオン粒子を測定して、透過する内部構造を画像化する方法をミュオグラフィと呼び、筆者の一人(田中)は、火山内部のマグマの位置や大きさ<sup>1)</sup>、活断層の位置<sup>2)</sup>を知るための防災研究を行っているほか、非破壊調査法として鉄鋼メーカの溶鉱炉壁における耐火煉瓦壁厚の測定や電炉等反応炉内部の操業状態のモニタリングにも応用している。このミュオグラフィ探査技術は、最近では、2011年東日本大震災で損傷した福島第一原子力発電所の炉心の状態を知るための調査に適用されていることも報道されている。このように、ミュオグラフィは、自然防災分野から産業機器分野まで幅広い分野に応用がなされるようになった。遺跡や歴史的建造物の調査への適用もその1つである。本稿では、海外の地震国における世界遺産建造物の内部構造に関する非破壊調査法として、実際にミュオグラフィによ

る調査を行い、その結果を用いて耐震性を評価した成果を報告する。実は、ミュオンによる遺産建造物の内部探査は1960年代後半にエジプトのピラミッドの内部空間探査で試みられていた(結果的に未知の空間は見いだされなかった)。それから、約40年が経過し、ミュオン観測技術も進歩し、当時は大掛かりだった機器も今では、かなり小型化が進んでいる。

### 2. 地震で被災した世界遺産プランバナン寺院

インドネシア・ジャワ島の中部の古都ジョグジャカルタは、2006年5月に強い地震動に見舞われた。マグニチュードは6.2と中規模の地震ではあったが、直下型で震源が浅かったために地震動が大きかったこと、耐震的に脆弱な作りの煉瓦造の庶民住宅が多数倒壊したことから、阪神淡路大震災と同等の約6,000人を超える犠牲者を出した地震である。このジョグジャカルタ近郊には、2つの世界遺産建造物がある。プランバナン寺院(遺跡)とボルヴドール寺院(遺跡)である。このジャワ島中部地震では、古都ジョグジャカルタとその周辺の文化遺産も大きな被害を受けた。本稿で紹介するプランバナン寺院群(写真1参照)も大きな被害を受け、地震直後には、インドネシア政府の要請による日本政府の修復支援調査が始まった。筆者の一人(田中)は、その調査団に参加して以来、

プランバナン寺院の修復計画を支援するための構造調査に携わってきた<sup>3,4)</sup>。このプランバナン寺院は、その内陣に8棟の建造物を有する荘厳な建造物群を形成している。9世紀頃に石造のヒンズー寺院として建造された宗教建築で、上部の構造は安山岩、基礎は凝灰岩のブロックが積まれている。しかし、長い歴史の中で、人々の信仰宗教もイスラム教に変わり、放置され、地震や風雨などの自然外力や人為的な石材の持ち出しなどで、20世紀初めまでには崩れてほぼ廃墟になっていた。その後、オランダ統治時代になると、1930年代後半にオランダ人技術者により、高さ47mで最大規模の建造物であるシヴァ祠堂（写真2参照）の再建が着手された。日本統治時代、インドネシア独立を経て、竣工は1953年のことである。この再建事業に当たって、オランダ人技術者は、近代の建設技術である鉄筋コンクリート構造を導入したのである。崩れていた石材を積みながら型枠代わりにして、鉄筋コンクリートの骨組を設ける工法であり、西欧らしい合理的な方法といえよう。その後、同じ工法を用い、1980年代後半からほかの7棟の再建事業がインドネシア人技術者によって行われ、全ての祠堂の再建事業が竣工した後、1993年に世界遺産に登録された。祠堂は内部に空間を持ち、下部の内室にはそれぞれヒンズー神像が安置されており、礼拝できるように出入り口が設けられている。1980年代後半に行われた建造物の再建における詳細な設計図書は残されており、内部構造を知ることができる。しかし、20世紀半ばに再建されたシヴァ祠堂は、簡易な図面は残されていて、上部に空間（空洞）を有することは確かであるが、その寸法など詳しい内部構造はよく分かっていなかった。一方、被災したプランバナン寺院の修復において、地震時の挙動はどうであったか、なぜ被害を受けたのか、亀裂は発生しているが構造的に安定しているのか、また、内部の鉄筋コンクリート構造は地震で損傷したのか、修復計画上の課題になっていた。構造調査

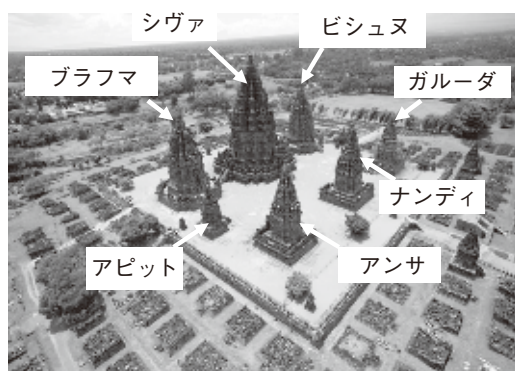


写真1 プランバナン寺院全景



写真2 シヴァ祠堂

は、他の祠堂の修理事業と並行して行われてきたが、世界遺産建造物であり、非破壊による調査が原則であることから、地震時挙動を把握するための地震観測、地震で生じた亀裂の変位変動を計測するモニタリングとともに、地震時に生じた内部応力を推定するための構造解析を行うこととなった。この構造解析には、詳細なモデルの解析が可能な3次元有限要素法を用いたが、それには内部構造をモデル化する必要がある。しかし、シヴァ祠堂の場合、前述したようにその上部の内部空間の寸法・位置が明確に分かっておらず、非破壊調査法として、ミュオグラフィを適用したのである。

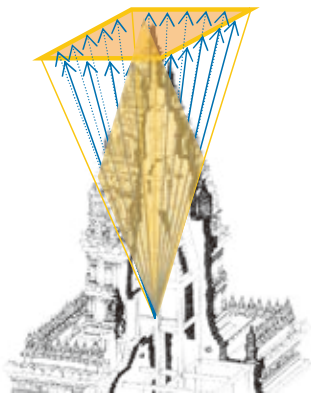


図1 ミュオン観測  
(構造は設計図書があるガルダ祠堂)

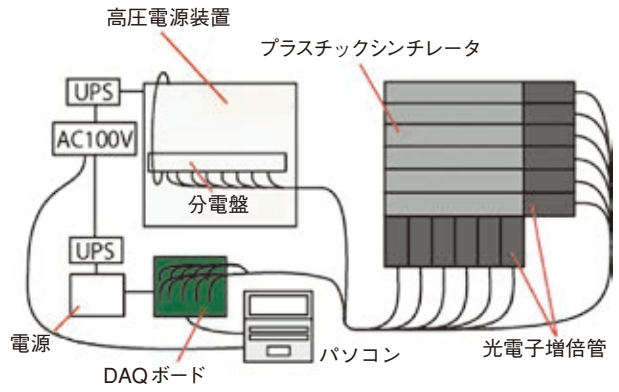


図2 観測システム

### 3. ミュオン探査に基づく耐震評価

今回の国際共同プロジェクトでは、シヴァ祠堂の中央内室（図1参照）に、2013年10月中旬に観測機器を設置し、約4か月間観測を行った。観測に用いたミュオン検出器は、ミュオンが通過する際に、微弱な光を発するプラスチックシンチレータ、その光を電子に変換して増幅する光電子増倍管を組み合わせ、シンチレーションカウンターでミュオンをカウントするものである（図2参照）。あるタイミングでほぼ同時にミュオンを検出した2つのセグメントの位置関係から飛来方向を特定する（図3参照）。

4か月間の観測で得た単位時間当たりのミュオン強度（カウント）分布に対して、空洞の規模をパラメータとしてシミュレーションを行った。このときに必要なデータは、方向別のミュオン経路長（ミュオンが建造物を透過する長さ）と建造物の密度である。本調査では、空洞の体積規模を、推定図面の0倍（空洞無）、0.5倍、1.0倍、2.0倍、3.0倍、4.0倍としてそれぞれの経路長を計算した。建造物の材料密度は、別の祠堂における材料調査結果から、 $2.0 \text{ g/cm}^3$ とした。計算に当たって、建造物は0.5 mの立方体を要素としたことから、精度は0.5 mとなる。シミュレーションの結果と観測結果が合致する空洞モデルが、求める空洞規模になる。こ

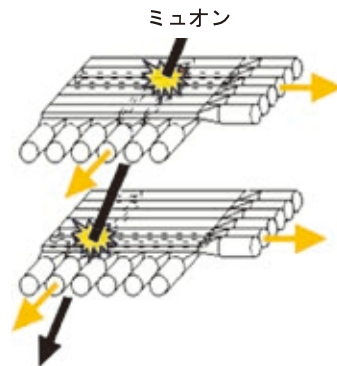


図3 ミュオン飛来方向の同定



写真3 中央内室に設置した観測機器

こで、ミュオンはランダムに飛来するため、確率的な評価が必要になる。シミュレーションの結果、最も確からしいのは、空洞体積が推定図

の2.0倍のモデルであることが分かった。得られた観測結果を補間してミュオグラフィとして表したものが図4である。

さらに、この結果に基づいて空洞寸法を決

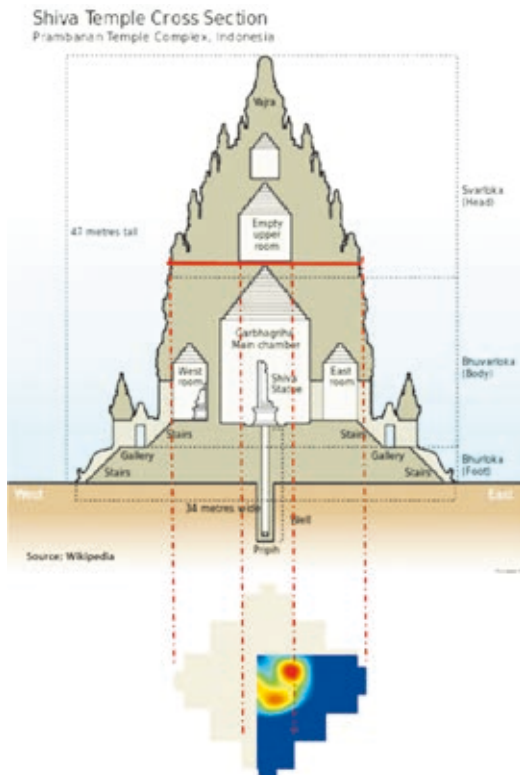


図4 観測記録に基づくミュオグラフィ

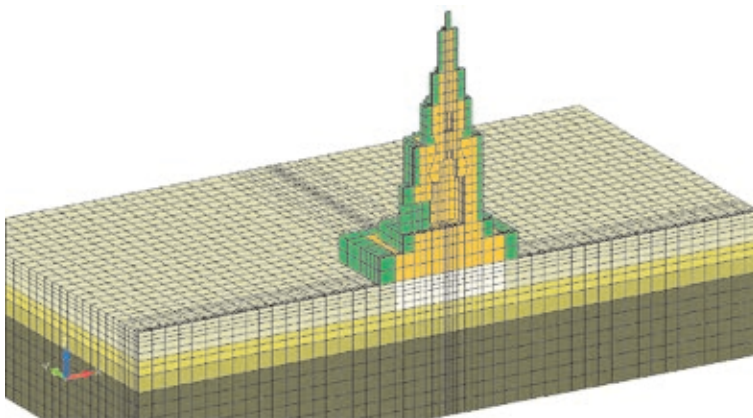


図5 耐震解析に用いた構造物—地盤系の3次元有限要素モデル

め、図5に示すように3次元有限要素法による耐震解析を行った。解析の主目的は、2006年ジャワ島中部地震で内部構造が損傷したのかどうか判断することである。もし、損傷していると判断されれば、大掛かりな修理工事が必要となり、解体修理等の大規模な工事を検討する必要があった。解析には入力地震動が必要である。2006年ジャワ島中部地震では、プランバナン寺院を含むジョグジャカルタ周辺では地震記録が得られていない。本調査では、地震がおおむね同程度の規模で、歴史的組積造建造物が被災し、かつ、震源距離が同程度の観測地の記録を用いることとし、1999年アテネ近郊地震の観測波形を用いることとし、2006年ジャワ島中部地震による推定地震動レベルに基準化した地震波形を入力動とした。解析の結果、内部の石材に生じる最大応力は、材料試験から得た強度を超えないこと、鉄筋コンクリート骨組に生じる応力も許容応力度以下に収まっており、内部の構造が損傷している可能性は低いと結論付けられた。

#### 4. おわりに

プランバナン寺院では、修復事業が完了した順に、祠堂の一般公開がなされてきた。このミュオン探査終了後、最後まで本格的な修理工事が未着手であったシヴァ祠堂の修復事業が始まり、2015年9月に完了して祠堂内部が一般にも公開されるようになった。世界遺産プランバナン寺院は、インドネシア国の所有の史跡として、再び、多くの観光客で賑わいを取り戻している。地震発生から約9年、調査を伴いながらの文化財建造物の修復は、一般に長い年月が掛かることが多い。しかし、この貴重な建築遺産の長い歴史の中

では、ごく短いできごとだったと思われる。その中で、世界遺産として恐らく初めてのミュオン探査による非破壊調査による成果が得られたことは、歴史の1コマになろう。また、この成果はインドネシア政府にも報告しており、修復計画を支援することができたことは、文化遺産国際協力に寄与したと思われる。

#### 【謝辞】

本調査研究は、平成25-26年度科学研究費挑戦的萌芽研究『素粒子を用いた歴史的組積造建造物の内部構造探査に基づく耐震調査』による研究助成を受けて実施しました。調査の許可をいただいたインドネシア政府文化観光省 Harry Widianto 博士及び調査に協力いただいたジョグジャカルタ特別州遺跡管理事務所の関係者に感謝いたします。調査に当たっては、筑波大学世界文化遺産学専攻 上北恭史教授、サイバー大学 小野邦彦教授、ガジャマダ大学工学部 ヨヨク・スプロト准教授に協力いただきました。ミュオン観測データの解析は、東京大学地震研究所博士課程 草茅太郎氏、構造解析はエスパ

ス建築設計事務所 岡本裕美子氏（当時、三重大学大学院修士課程）によるものです。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Tanaka, H.K.M., Nakano, T., *et al.*, High Resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography : The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan, *Earth and Planetary Science Letters* 263, ELSEVIER, pp.104-113 (2007)
- 2) Tanaka, H.K.M., Miyajima, H., *et al.*, Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zone : Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, *Earth and Planetary Science Letters* 306, ELSEVIER, pp.156-162 (2011)
- 3) 東京文化財研究所文化遺産国際協力コンソーシアム, 世界遺産プランバナナ遺跡修復協力事業報告 (2008)
- 4) 上北恭史, 世界遺産プランバナナ遺跡群の地震被害と修復に関する保存工学的研究, 平成20-23年度科学研究費補助金 研究成果報告書 (2008)

(\*1 三重大学, \*2 東京大学)