

# Shaken, not stirred

## ローマ帝国時代に建造された大聖堂の秘密

Nature Vol.443(390-391)/28 September 2006

トルコのイスタンブールにある見事なビザンチン建築の大聖堂、ハギアソフィア。このおごそかな建築物は、1500年近くの間、数多くの地震が起こる地域で堅固に立ち続けている。そのわけを Virginia Hughes 記者が探った。

イスタンブールは動いている都市だ。仕事を求めて地方から流れ込む移住者の増加により、その人口はここわずか40年の間に200万人から1000万人へと急増した。移住者の多くは、大急ぎで建設された耐震性の考慮されていない高層コンクリート建築に住む。

これは問題だ。というのも、イスタンブールは北アナトリア断層（次ページ地図参照）の近くにあり、文字通り「動いている」からである。1999年、マグニチュード7.4の地震が起こり、イスタンブールから東へ100キロにある都市イズミットとその周辺の約1万8000人が死亡、1万5000棟を超える建物が崩壊した<sup>1</sup>。イスタンブールにあるボアジチ大学の地震工学者 Mustafa Erdik らが

行った最近の分析によると、もし、同規模の地震がトルコ最大の都市であるイスタンブールを襲えば、死者はおよそ2倍、約4万棟の建物が壊れるかもしれないという<sup>2</sup>。そして心配なことに、そうした地震が起こる可能性は高い。

しかし、イスタンブールの著名な建築物の中には、1500年もの間さまざまな地震に耐えてきた歴史をもつものがある。それがハギアソフィアだ。高さ55メートルで円蓋（ドーム）をもつ、レンガとモルタルでできた建造物である。この建造物はどうやって地震の応力に耐えてきたのか。はたして設計者は耐震性を考慮に入れて設計を行ったのか。建築史学者たちは、何十年もそうした議論を繰り返してきた。近年、コンピューターに

よるモデル解析と化学分析が進み、こうした長年の議論を再燃させるような手がかりが得られつつある。東ローマ帝国時代の建設者は、新技術を発明したのだろうか。あるいは単に幸運に恵まれただけだったのだろうか。イスタンブールが次の大地震に見舞われたとき、ハギアソフィアは崩壊するのだろうか。あるいは、がれきの中に立ち残る、唯一の建築物となるのだろうか。

### 斬新な構造

ハギアソフィアは、地球物理学的にも政治的にも宗教的にも不安定なことで有名な、この土地で持ちこたえてきた。イスラム教のオスマントルコが1453年に侵入してきたとき、彼らはハギアソフィア



をキリスト教のバシリカ式聖堂からモスク（イスラム教寺院）に変えた。そして1935年、トルコ政府は、ハギアソフィアを博物館に変え、宗教色を打ち消した。

もともとの建物の建設が始まったのは西暦532年。東ローマ帝国の皇帝ユスティニアヌス1世の命令で作られた。ハギアソフィアはギリシャ語で「聖なる英知」を意味し、伝統的なバシリカ式聖堂の長方形の設計と、ローマのパンテオンなどの帝国の建物にみられる、中央部に円蓋のある作りを組み合わせた最初の建造物となった。皇帝は費用を惜しまなかった。この教会の建設には、金に換算して14万5000キロ（現在の約3500億円相当）の費用がかかり、かつて作られたものの中でも最も高価な建造物の1つである。

そして、世界最高の教会を建てるにあたり、当時の最高の専門家2人選ばれた。トラレスのアンテミオスと、ミレトスのイシドロスである。プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の地震工学の名誉教授であるAhmet Çakmakは「アンテミオスはユスティニアヌス大帝が抱えていた最高の軍事工学者だった。イシドロスは世界最大の科学アカデミーのトップだった。いわば、自宅を建てるのに（物理学者で原爆開発を指揮した）オープンハイマーを雇うようなものだ」と話す。

Çakmakは子供時代にハギアソフィアを何度も訪れたが、ずっと地震に興味を持ち続けた。そして23歳のとき、プリンストン大学で教えるためにトルコを去り、10年あまり後にイスタンブールの人口が急増し始めるときには、すでに工学系学科の教授になっていた。Çakmakの興味の中心は理論的な研究にあり、子供時代によく訪れた建造物の実際的な研究に関心をもったのは、1980年代も半ばになってからのことだったという。

彼の工学的研究の共同研究者であるRobert Markは当時、建造物がどうやってその荷重を支えるのかを示すコンピュータモデルを作っていた。Markの研究で明らかになったことの1つに、

中世の建築者たちはおそらく、モルタルのひびを観察することで「フライング・バットレス（飛び梁＝建物の壁を横から支えるために控え壁へ渡した弓形の梁）」を発明したであろうということがある<sup>3</sup>。ÇakmakはMarkに、ハギアソフィアを対象に同種の研究をするようにすすめた。「この技術はまだ使われ始めたばかりだった」とMarkはその頃を振り返って話す。

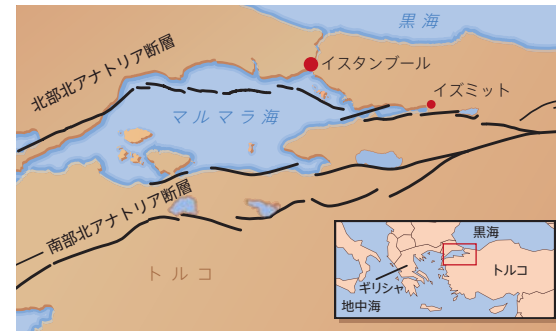
2人は協力して、地震などのさまざまな条件のもとでハギアソフィアがどのように揺れるかをシミュレーションできるコンピュータモデルを作り上げた。以来、2人はシミュレーション結果について議論を繰り返すことになる。

現在のハギアソフィアは、円蓋、バットレス（控え壁＝建物の壁を外から支える出っ張り構造）、支持壁、そしてミナレット（イスラム教寺院に付属する高い塔）の寄せ集めだ。これらは宗教上や修復の名目で何度もつけ加えられた。しかし、コンピュータモデルは、ハギアソフィアの構造上の強さは、もともとある四角形の中心部に由来することを示している。

ハーバード大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の建築史学者Rabun Taylorは「ハギアソフィア以前のほぼすべての円蓋構造は、基本的に円筒形の上に円蓋を載せる構造だった」と話す。対照的に、ハギアソフィアは、四角形の各側面に作られた4つのアーチの最上部に円蓋が載っている構造で、円蓋を支えるアーチはそれぞれ、四角形の隅にある支柱まで延びている。「これは新しい構造だった」とTaylorは話す。

ハギアソフィアのペンデンティブも新しいものだった。ペンデンティブとは、正方形の平面の上に円蓋を作るために四隅に設けられた三角形の曲面部分のことだ。レンガとモルタルで作られ、円蓋の下辺と4つのアーチの頂上との間が滑らかにつながるようになっている。

しかし、アンテミオスとイシドロスは、微積分やニュートンの力学法則の発見の前に、どうやってこうした構造



を設計したのだろうか。工学者と建築史学者の間では、2人が持っていたであろう知識と技術革新の程度については意見に食い違いがあるものの、当時の建築家は、単純な幾何学的比率とパンテオンなどの既存の建物の実例にもとづいて設計したはずだという点で大多数は一致している。

### 窓と軽いレンガと特殊なモルタル

Markが1980年代後半にパンテオンの円蓋をモデル化するまで、ほとんどの建築史学者は、ハギアソフィアの円蓋の窓は単に視覚的効果のために設けられたものと考えていた。直径31メートルの円蓋には全部で40個の窓があり、円蓋を支えるレンガとモルタルのリブ（ろっ骨状の補強）の間に1つずつある。Markの研究で、この窓はひび割れを避けるためにつけ加えられたらしいことがわかった<sup>4</sup>。「当時の建築家はパンテオンを調べ、その場所では窓の軸方向に沿ってひび割れる傾向があることを知った。だから彼らは、ひび割れをある意味あえて自らつける目的で窓を作ったのだ」と彼は説明する。

コンスタンチノーブル（イスタンブールの旧称）で地震活動が活発なことは、当時から知られていた。円蓋に設けられた窓は効果があったはずだ。ハギアソフィアはゆうに10回を超える大地震にあったが、損害は部分的なものにとどまり、持ちこたえた。その理由として、まずはアーチとペンデンティブが考えられる。揺さぶられたとき、それらが円蓋の重さを4つの支柱に均等に分配するからだ。しかし、この教会を作り上げているレン

ガとモルタルそのものにも理由があった。

現代の耐震ビルは、振動に耐えるために、軽かつ柔軟に設計されている。ハギアソフィアも軽くて柔軟で、時代のはるか先を行っていた。レンガは、帝国の当時のほかの建物で使われたレンガよりもずっと軽く、より多孔質だ。Çakmakの研究で、レンガは砂と石灰を正しく反応させるため、約750°C未満という比較的低温で焼かれたにちがいないことがわかった<sup>5</sup>。「温度がそれより高ければ、砂はガラス質で、高密度になる」と彼は話す。

ハギアソフィアの建築者は、特殊な種類のモルタルも使用した。Çakmakはアテネ国立技術大学（ギリシャ）の研究者との共同研究で、モルタルには今日のポルトランドセメントに使われているものと似たカルシウムとケイ素の化合物が含まれていることを見いだした<sup>6</sup>。この混合物は張力に対する強度が高く、そのおかげでハギアソフィアは大地震の振動を吸収できるのだ、とÇakmakはいう。研究チームは2002年、驚くべきことに1500年たっとなお、モルタルの中のカルシウムとケイ素がいまだに反応することを報告した<sup>7</sup>。「このモルタルは自分自身を修復することができる。地震のたびに微小なひび割れができるが、それは時間とともに修復される」とÇakmakは説明する（一

方Markは、モルタルの高い堅牢性は、建造物の中でも使用されている場所によって異なるかもしれない、ハギアソフィアの耐久性のすべてを説明することはできないと主張している）。

この建物に使われているレンガとモルタルの比率も、その強さに貢献している可能性がある。石工は、より速く建てるためだろう、時にはレンガそのものよりも厚いくらい、極端に厚いモルタルを使った。厚いモルタルは、材料を「鉄筋コンクリートのようにする」とÇakmakは話す。ただし、この技術はハギアソフィアで使われたような強いモルタルがあってこそ可能な話だ。

はたして建築者は、耐震性をもつべく意図的に設計したのだろうか。「ハギアソフィア以前の建築家たちは、地震に耐えるようにしたいときは、単にとても重い建物を作っていた」とÇakmakは話す。しかし、アンテミオスは耐震性の問題に興味をもち、伝えられるところによると、独自に地震模擬装置さえ作ったという。「力学系における力は質量に比例することを、彼は理解していた。だから、石の代わりにより軽いレンガと柔軟なモルタルを使うという彼の考えは極めて合理的だった」とÇakmakはいう。

しかし、MarkはÇakmakとは意見が異なり、多くの建築史学者の見方を

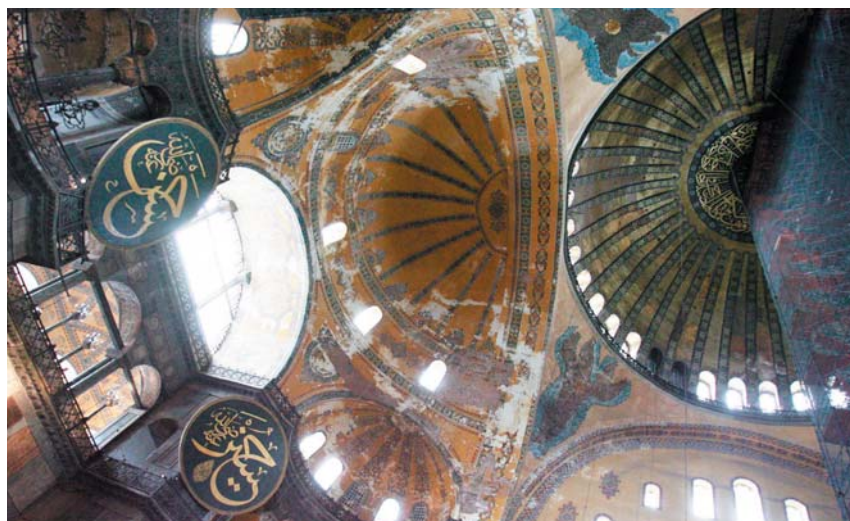
支持している。「Çakmakは、当時の建築家はもっていなかったはずだと私が考える知識を、彼らもっていたと考えているようだ」とMarkは話す。

### M7.5にも耐える

そのような疑問は別にしても、多くの人は、ハギアソフィアは次の大地震に耐えることができるのかを気にしている。イスタンブールのすぐ南の地域では、今後数十年のうちにマグニチュードがイズミット地震と同程度かさらに大きな地震が2回起こると予測されている<sup>8</sup>。1991年、トルコと米国の研究者チームは、ハギアソフィアにいくつかの振動センサーを取り付けた。Çakmakは、小地震で集めたデータをもとに、大地震の際にどのように建物が動くかを予測できる、3次元のコンピュータシミュレーションを作った<sup>9</sup>。このモデルから、マグニチュード7.5の地震の振動が襲ったとき、ハギアソフィアの壁は震え、前後に大きく揺れ動くことがわかった。アーチの頂上には最大の応力がかかる。しかし、円蓋は無傷のまま残り、教会は地震後も立っているだろう。

もし、地震がマグニチュード7.5よりも大きかったら？「地震がマグニチュード7.5よりも大きかったら、私たちにできることはほとんどない」とÇakmakはいう。確かにもしも最悪の予測が現実になったなら、ハギアソフィアが立ち残るかどうかが、人々にとってはそれどころの話ではないのかもしれない。 ■

Virginia Hughes はニューヨーク市のサイエンスライター。



大昔の新機軸：三角形のペンデンティブが、巨大な円蓋と支持アーチをつないでいる。

1. Parsons, T. *et al. Science* **288**, 661-665 (2000).
2. Erdik, M. & Durukal, E. *Nat. Hazards* (in the press).
3. Bork, R., Mark, R. & Murray, S. *J. Soc. Arch. Hist.* **56**, 478-493 (1997).
4. Mark, R. *Am. Sci. March/April* 142-150 (1987).
5. Moropoulou, A., Çakmak, A. & Polikreti, K. *J. Am. Ceram. Soc.* **85**, 366-372 (2002).
6. Moropoulou, A. *et al. in Wessex Inst. Trans. Built Environ.* **15**, (eds Brebbia, C. A., Hernandez, S. & El-Sayed, M.) (WIT Press, 1995).
7. Moropoulou, A., Çakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A. & Zendri, E. *Constr. Bldg Mater.* **16**, 543-552 (2002).
8. Hubert-Ferrari, A. *et al. Nature* **404**, 269-273 (2000).
9. Çakmak, A., Moropoulou, A. & Mullen, C. L. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* **14**, 125-133 (1995).