

サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの レンガ造水平アーチの構造的役割について

青木孝義*

Structural Role of the Horizontal Brick Arches of the Dome of Santa Maria del Fiore

by

Takayoshi AOKI*

The dome of Santa Maria del Fiore consists of two shells, an inner one and an outer one, which are connected by eight massive ribs and sixteen intermediate ribs. The principal rib and the intermediate rib are linked through little horizontal brick arches. As to the structural role of the horizontal brick arches, there are currently four opinions. 1) They are connecting rings, 2) They are load-transmitting rings, 3) They contributed to the self-support of the outer shell during its construction, and 4) They are for their geometrical rather than their structural properties.

From the structural point of view, the horizontal brick arches must have been an appropriate contribution to the self-supporting of the outer shell.

序

フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂の交差部をおおうドームにはよく知られているように、主リブと副リブを結ぶ9列(計144本)のレンガ造水平アーチ(構造的には水平リブに対して以下この言葉を用いることにする)が(連続した円として)設置されている(図1, 図2)。このレンガ造水平アーチはドームの施工時に設置されたもので、外殻に直角に設置されている。主リブと連結する部分で1.13mあるその断面幅は徐々に減少し、副リブと連結する部分では0.24mの断面幅となる。また、その厚さは主リブと連結する部分では0.73m, 副リブと連結する部分では0.80m, そして最小断面は0.64mである(注1)。第1レンガ造水平アーチは会堂床面より約67.8m上方に位置し、第3歩廊床面までをほぼ等間隔に第

2~4のアーチが設置され、第5のアーチは会堂床面より約77.2m上方に位置し、第4歩廊までをほぼ等間



図1 サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂
外観

平成4年4月30日受理

*構造工学科 (Department of Structural Engineering)

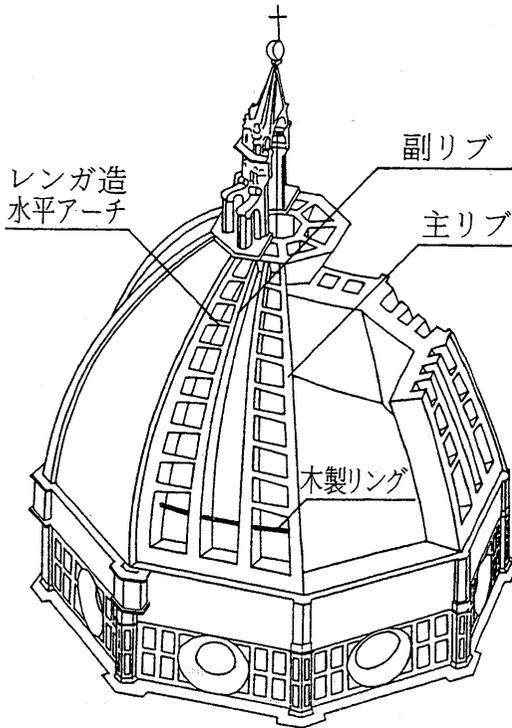


図2 ドームの構造の概略

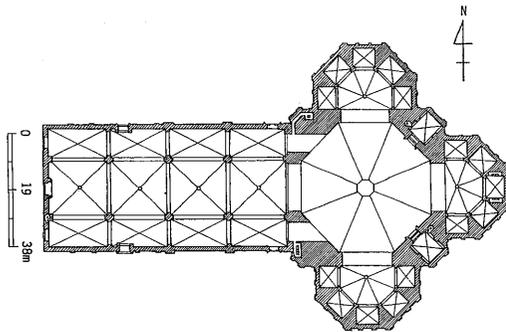


図3 サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂平面図

隔に第6～9のアーチが設置されている。これらのアーチは、ドームの中間部に設けられた歩廊からもよく確認できる。

本論文は、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの建設と構造特性の解析を目的としてなされてきた一連の研究を概観し（第1章）、レンガ造水平アーチの計画、施工の経緯を整理して、その構造的役割に関してこれまで論じられてきた諸説を検討し（第2章）、構造解析によってその構造的機能を推定すること（第3章）を目的としている。

第1章 サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの建設と構造に関する研究 — その系譜と特徴 —

サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂は、フィレンツェの中心に位置し、1298年から頂部のランタンが完成した1461年まで工事は及んでいる。ドーム部分については、1420年から1436年にわたる16年間で完成された。

サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームは、フィリッポ・ブルネッレスキが建設に関与する前から、フィレンツェを中心とする当時のイタリアの関心を集め、ブルネッレスキの時代には、その建設が非常に注目されていた。したがって、ドームに関する同時代の記述は非常に多い（注2）。しかし、そのほとんどは、ドームをソロモンの神殿にたとえたり、ブルネッレスキをアレキサンダー大王のお抱え建築家ダエダロスにたとえるなど、ドームの壮大さとブルネッレスキの偉大さを神話的・文学的に讃え、新しい文化の担い手としての当時のフィレンツェの気運に結びつけたものである。その一方で、建設事業の実情をあまり把握していなかったと推定される。ドームの構造的合理性、建設の施工方法に関する記述は非常に少なく、しかも曖昧であり、例えば、

1. ほとんど仮枠を用いることなく施工された
2. 8本の主リブと16本の副リブで構成された二重殻のドーム

ということが知られるにすぎない。このうち1. は、特に同時代の文献で繰り返し強調されており、当時の人々にとってはまさに、前例のない目を見張る構法であったと考えられる。

同時代の建築家レオン・バッティスタ・アルベルティは、ドームの絶対的な寸法と仮枠なしで施工されたという事実に加えて単に驚くだけでなく、『多角形ドーム（経線方向断面は円弧、緯線方向断面は多角形）は、その（水平）断面内に円形ドームが含まれるとき、仮枠なしで建設することができる（ただし括弧内は著者による説明）』という考察を行なっているが、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームは、その考察の重要な源になっているといわれている（図2、注3）。そして、バルトロメオ・スカーラは、彼の「フィレンツェの歴史」の中で、大聖堂とドームについて、仮枠なしで施工されたことを誉め讃えるばかりではなく、施工中において利用された技術と機械のいくつかを強調した（注4）。また、ブルネッレスキの伝記作家アントニオ・マネッティは、ドームに関するもっとも重要な同時代の報告を行なっている。正確な事実だ

けでなく建物を取り囲む人間のドラマは、彼を魅惑させた。その中で彼は、ブルネッレスキはサン・ジョヴァンニ洗礼堂のブロンズ製扉の競技設計でギベルティに敗れローマへ行き、ローマ滞在中に優れたものをたくさん見、建築術を学び、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの設計が可能となった、と述べている(注5)。しかし、ドームの構造および形態との合理性、その構造および形態と仮枠を使わない構法との関係については、同時代資料からは全く知ることができない。これは、ブルネッレスキ自身がその独創的な設計案に関する記録を残さず、彼と共にドームの設計を進めた大聖堂造営局の資料がドーム形態のごく表面的な描写、建設資材の出納記録に終始しているからである(注6)。また当時、建築物の構法と構造を客観的かつ正確に記述するための概念・言葉・伝統・習慣が全く存在しなかったことは、さらに決定的であった。したがって、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの構造的合理性を当時の人々が、そして特に、ブルネッレスキが直観と経験則からどのように理解し実践していったかという問題に対しては、むしろ一時的に同時代の資料を離れ、現在の構造解析の手法を適用して、その力学特性を明らかにすることがきわめて重要であると考えられる。

ドームの建設が一応の完成をみた1436年以降も、その構造に関する記述は、前代と変わらなかった。しかし、17世紀後半(1696年)、大聖堂とドームの管理・保全の責任者であったジョヴァンニ・バッティスタ・ネッリは、大聖堂とドーム、ランタンの最初の科学的実測——彼以前の大聖堂の建築家の仕事は、大聖堂の修復や維持に限られていた——を行ない、その結果は彼の死後、詳しい銅版画の図版として出版された(注7)。これらの図版は、その後のドームの研究の出発点となった重要なもので、現在なお高い信頼性を得ているが(注8)、例えば内外殻間の構造機構を表現するための図版では、主リブ間の中央を通るドームの縦断面を円弧として描くなど、いくつかの誤りも見い出される。その後の実測によれば、ドームは隅部の主リブで円弧(1/5尖頭)をとり、殻面(ドームの内殻あるいは外殻を構成する8個の曲面三角形(楕円筒面三角形)のそれぞれに対して以下この言葉を用いることにする)は雨傘状にリブ間を連結して作られているので、ネッリの位置ではドーム縦断面のプロフィールは楕円形にならなければならない。また、ネッリによるドームの外観図では、バッチオ・ダニョロの周回廊(1508年に南東面を除いて建設中止)が完成予想図として加えられているなど、理想的な表現も見られる。

しかし一方で、ドーム基部での木製リングの位置と様子、ドームのリブをつなぐレンガ造水平アーチの描写(図2)、会堂側廊部の補強部材の記述などは、いずれも十分に正確であり、その資料価値は高い。

また、ネッリは実測を通じてドームの構造にも関心を持ち、彼の技術者、建築家としての経験に一部基づく直感的な再建設の試みであるその構法の合理性を論じた小論を表わしたが、これも死後、公刊された(注9)。ネッリはこの小論の中で、荷積み作業するプラットフォーム、ヴォールトの曲率の調節、レンガの付着の三つの建設方法が、ドームを建設するために必要だったと明確に理解した。ネッリは調査により、仮枠なしでドームを建設するためには、レンガが半球ヴォールトの中心一点に収束する杉綾模様に積まれなければならないことを理解した。また彼は、各々の水平レンガの層はしっかりしており、円が閉じられた瞬間からドームが自立しうることに気付いた。しかし、彼は上述のようにドームの構造的合理性をあきらかにしようと試みているものの、その考察のモデルとして、規模が大きくまた複雑なサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームを直接取り上げず、それから多くのヒントを得たと思われるピストイアのマドンナ・デルミルタ聖堂のドームを選んでいる。ネッリは、フランチェスコ・フォンターナにより提案された鉄の鎖(リング)に関する論争(注10)のあった年以後、このような鎖が不必要でおそらく有害であったと納得した。彼は、内殻と外殻の間のまきに目に見える木製リングの存在に反してどんな鎖もかつて計画されなかったと信じ始め、ブルネッレスキはどんな石や木あるいは他の取り囲む鎖も規定せず、さらに大聖堂のドーム建設中、ブルネッレスキは鎖の指示を考えなかったと公言した(注11)。このように、ネッリはこのモデルに基づいてドーム基部のテンションリングの構造的役割を疑問視したが、ヴァザーリがプラマンテ伝であきらかにしているように、ピストイアのドームは、テンションリングの補強によって建設が可能になったと考えられ、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームとは状況を異とする(注12)。この点に見られるように、ネッリの考察には、当時の不十分な資料研究、および構造力学的理解による限界があることを注意しなくてはならない。

チェザレ・ガスティは、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂建設局所蔵の膨大な資料を調査し、1857年にドームに関する建設記録の一部をまとめて出版した(注13)。このガスティの資料集は、ドームの計画と建設に関わるすべての記録を収録したもので

はないが、少なくともきわめて重要なものは大部分含まれているので、現在なお、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの研究にとっては欠くことのできない基本文献となっている。この中で、資料と実際のドームの各部位、部材を対応させて総合的に理解しようとする試みはなされておらず、このことはガスティが大聖堂造営局の文書係であり建築家ではなかったため、当然そのような対応はできなかったものと思われる。

19世紀は、それまで数世紀にわたって未完のまま放置されてきた大聖堂のファサードの完成を願う気運が高まった時代である(注14)。したがって、建築家はドームよりも正面ファサードにより高い関心を示していた。しかし、他のルネッサンス建築同様、今世紀へ連なる研究史の端緒を開いたのは、1880年代から1910年代にかけて活動したシュテグマン、ガイミュラー、ドゥルム、フライ、ファブリッツィーら一連のドイツ人研究者であった(注15)。

ナルディーニ・デスポッティ・モスピニョッティは、1420年のドーム計画案以前、以降の大聖堂建設の歴史に関する本を出版した(注16)。しかし、彼は実際のドームのドラムと二重殻構成(彼は、ドームが二重殻になるレベルの下の固く積まれた組積造は、ドーム計画案が書かれた時点で完成されていたと断言したが、実際には1420年秋にドームの建設が始められた時に建設された最初のものであった)などが、既に1367年の計画の一部であり、1420年に承認されたドーム計画案は、長く受け継がれた計画の実施に関する設計明細書だけであったと断言するなど、資料の誤った解釈もあるが(注17)、一方でドームの5分の1尖頭曲率(ドーム計画案第一項)は、1360年代に決定され、1417~18年に決定されたのではないというジョヴァンニ・ディ・ゲラルド・ダ・プラートの報告書を参照するなど、1367年の計画案を重視した点は、その後の研究にとって重要であった。また、二重殻をもつリブ構造のドームの先例として、サン・ジョヴァンニ洗礼堂(フィレンツェ)を重視し、その構造とサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの構造との類似性を指摘している(注18)。

フライ(注19)とファブリッツィ(注20)は、ドイツの文献実証主義に基づく研究を進めたが、ドームの構造には関心を示さなかった。しかし、フライの後の試みは、ミケランジェロとサン・ピエトロ聖堂の重要な研究を含み、ファブリッツィは、それまでの研究で整理された資料をドームの部材、例えば石の鎖に結びつけて理解しようという姿勢を示している(注21)。

これに対して、ドゥルムは、ファブリッツィに欠けていた構造的知識を備えており、最初からドームの構造に強い関心を持っていた。彼はドームを実際に詳しく調査して、リブと水平アーチをもつ二重殻構造の詳細を図示した(注22)。特に杉綾積み最初に注目した点は、その後の研究にとって重要であった。逆に、彼は建築史家ではなかったため、1420年のドーム計画案、1422年、1426年の設計変更を誤解するなど、資料の扱いには慣れていなかったことが感じられる。

シュテグマンとガイミュラーは、さらに非常に詳しい実測を行なった(注23)。特にランタンの断面、立体図は非常に正確にできていて、現在なお、これをしのご資料はない。彼らによる大部な著作がその後のルネッサンス研究に残した貢献はきわめて大きい。サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームに関しては1世紀以上前に出版されたネッリの図版(注24)と基本的に類似しており、殻面中心部を通る断面図で、本来楕円弧となるべき断面を円弧として描くなど、誤った描写も踏襲されている(注25)。

第一次大戦の空白期を経て、ドーム竣工(1436年)後500年が近づいた1934年、聖堂内ピア上部のいくつかの箇所でクラックが目立っていたことから、ドームの構造的安定性を検討するための委員会がフィレンツェで組織された。この技術者と建築家で構成された委員会での中心的役割を果たしたのは構道家として名を知られていたピエール・ルイジ・ネルヴィであった。委員会の目的は、ドームが構造的に安全であるか否かを予測し、判断することであり、このために、はじめて詳しい実測調査がなされた(注26)。しかし、構造解析とよべるほどの作業はなされていない。委員会としての結論は、1939年に公開された小冊子にまとめられたが、そこでは、クラックの規則的な膨張と収縮の原因が主として気温の季節変動に帰せられること、現状で観測されるクラックの存在自体はドームの構造的安定性にとって大きな脅威とはならないこと、周辺交通の振動はドームの安定性に大きな影響に及ぼさないことが報告されている(注27)。このようにクラックの性質に注目した点は重要であるが、その発生原因とその時期に関する結論はみられなかった。また、ドームの曲率(楕円形)に関する調査結果も、このなかに大まかに報告されている。

ネルヴィを中心とする委員会の調査と並行して、フィレンツェ大学のアレッサンドロ・グェッレーラの指揮下にドームのセオドライトを用いた実測調査が行なわれた。その成果の一部はドーム竣工500年を記念して1936年にフィレンツェで開催された第一回イタリア

建築史学会に展示されたが、惜しむべきことにこの時の展示資料は、ごく一部分を除き結局出版されなかった(注28)。

1935～36年には、ハンス・ジーベンヒューナーがドームの基部位置での八角形形状の実測調査を行ない、その測定図を発表した(注29)。これらは、ドームの新しいアイソメ断面図を作るための基礎となったが、彼は殻面の曲率について、独自の調査は試みなかった。

1941年、サンパオレージはサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームに関するモノグラフを著した(注30)。彼は、歴史的建築物を様式史的な視点ではなく、構造的、工学的な視点から理解することを試み、ドームの基本構造と杉綾積みの方法を詳しく観察した。彼は、レンガの傾斜角がクーポラ計画により要求された尖頭1/5曲率よりも、むしろ半円形で建設が始められたというジョヴァンニ・ディ・ゲラルド・ダ・プラートの主張を示しているという仮説を提出した(注31)。しかし、ハワード・ザールマンが指摘したように、彼のモノグラフには、先行する成果と比べて新しい内容は少なく、構造的直観に頼りすぎた強引な論理が認められる。ドーム中空部の各所から撮影された写真は当時として貴重であったが、あわせて掲載されたドームの断面透視図をはじめとするいくつかの図版にはあきらかな誤りないし省略がある。公刊されてから数多くの関係図書にサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの解説図として用いられてきた断面透視図の場合、ドーム基部外側に突出した石のブロックの数は、実際には一辺につき12であるが14となっていること、およびリブとリブを連結するレンガ造の水平アーチは一つの殻面につき9本であるが8本となっていることは、なかでも初歩的な誤りである(図2, 注32)。石の鎖に関しては、役に立たなかったので実施されなかったという判断を、木製リングに関しては、複数本が計画され、第一のリング(すなわち現存の木製リング)の設置後それが無意味であると考えられてその後の設置工事が行なわれなかったという判断を示しているが、その根拠は明らかにされていない(注33)。また彼は、イラン北西部のソルタニエの14世紀霊廟とサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームが構造的に関係していると述べている(注34)。日高・青木・加藤の共著論文は、サンパオレージの研究に関し、次のように述べている。「彼は歴史的構築物に対して幅広い関心を示した最初の構造家であり、当時知られていなかった二重殻ドームの作例を紹介するなど、史料批判と様式比較からは得られない

刺激をルネッサンス建築史に与えた(注35)。」(注36)。

サンパオレージの研究は後続の研究者にドームの正確な実測値を得る必要性を痛感させることになった。1964～65年には、ハワード・ザールマンとピエール・ルイージ・ジャンニーニがセオドライトを用いた実測調査を、1969年からはフィレンツェ大学のグループが写真測量を行なった(注37)。1975年春、エウジェニオ・バッティスティを中心とするフィレンツェ大学のグループはドームの南東側殻面の詳しい実測調査を行ない、その成果はドーム中空部の多数部写真とともに直ちに出版された(注38)。しかし、公刊されたいくつかの資料(13のレベルでのドームの水平断面図、ドーム内面のクラックの現況図)は貴重であるが、ドームの力学的特性あるいは木製リングに関する新しい判断は特に示されていない。

フレデリック・プレイガーは、建設機械の発明者としてのブルネッレスキに興味を示した(注39)。さらに、プレイガーはグステイーナ・スカリアとの共著のなかで(注40)、ドームの建設において、ブルネッレスキにより設計され使用されたと思われる機械について考察している。これらは、ドームを作った道具に注目している点、非常に新しく、かつ興味深い。

ローランド・メインストーンとザールマンの研究グループが、西洋建築史専攻者と建築構造学専攻者の共同研究という建築学の枠内での学際的な体制で1967年からサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの研究を開始したことは、きわめて重要である。構造学の専門家メインストーンは、鋭い構造的直観によって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。その考察の出発点になったのは、『多角形ドームは、その断面内に円形ドームが含まれるとき、仮枠なしで建設することができる』というアルベルティの記述である(図2, 注41)。彼は、ドームの水平断面内にコンプレッションリングが形成されることを指摘し、それによって施工途中のドームの自立性が確保され、大規模な仮枠を用いることなくその建設を進めることが可能であったと論じている(注42)。また、ドームの施工面(施工の各段階でその先端をなす上面)が逆円錐面となることを予測し、ロープによるその施工面の決定方法を推定するなど、その視点と立論方法においてその後の研究者に大きな刺激を与えた。その研究成果はザールマンの大著にもとり入れられている。ドーム内面では、ピアを連結する大アーチの中央に対応する位置よりも、ピア上部により大きなクラックがみられるが、彼はこれについてもドーム下端の水平推

力がピアに及ぼす影響を考慮して合理的な説明を行なっている(注43)。

パオロ・アルベルト・ロッシは、ドームの構造と構成に関する彼の仮説を図版を添えて出版した(注44)。

1977年10月、フィレンツェで行なわれたブルネッレスキ生誕600年記念行事は、ブルネッレスキ研究が再検討され、大きな成果をもたらす契機となり、その後のブルネッレスキ研究に対して大きな影響を与えた。国際学会も開催され、この学会講演集が出版された(注45)。主としてブルネッレスキの建築と都市との関係を研究した、学問的観点にたった展覧会も開催された。この会議において、ドームに関する静力学的問題の重要性を強調したサンパオレージの業績にも様々な議論が加えられた(注46)。メインストーンは、建築構造の研究者としてドームの構造に再度注目し、各構成部材の役割、内殻面に内包される平面リング効果、施工上面に表される圧縮リング — 特に水平アーチの存在する位置では、外殻にも圧縮リングが形成される — などに言及した(注47)。また、彼は二重殻ドームの先例として、イラン北西部のソルタニエの14世紀霊廟に注目している。これに対しサルヴァトーレ・ディ・パスクワーレは、ドームに生じているクラックの性質についての考察、実測調査に基づくレンガの配置と構成原理について述べ、また施工面についてもサンパオレージと異なった仮説を提出している(注48)。ロベルト・ディ・ステファノは、ローマのサン・ピエトロ聖堂とフィレンツェ大聖堂のドームを類比的に扱ったことは興味深い、その考察は資料面に限られ、むしろこれを読むと、構造力学に基づいたドームの理解が必要だということを感じる(注49)。

組積造建築の構造解析に関心をもつ構造力学の専門家サルヴァトーレ・ディ・パスクワーレは、フィレンツェ大学建築学科で研究グループを組織し、ドームの力学特性の分析を進めている(注50)。彼は、1955年8月にドーム内部に変位計を設置してクラックの進行状況の測定を開始し、1977年1月まで(1960年12月～1965年3月、1966年9月～1969年2月の間測定中断)の経年変化データを分析し、将来のクラックの伸展を推定した(注51)。さらにこの予測を補うために、資料研究によって代表的なクラックの発生時期および現在までのその進行経緯の推定を行なっている(注52)。かつてサンパオレージは、施工面が逆八角錐面をなすようにしてドームの工事が進められたと推定したが、これに対しディ・パスクワーレは、施工面が逆円錐面をなすことを確認し、ドームの施工方法に関してもサンパオレージとは異なった杉綾積みを提案した(注

53)。ドームの施工方法に関しては、壁体内のレンガ積みの状況が確認できないため不明点が多いが、彼は小形の石膏片による10分の1の模型の積み上げ実験を実施している。しかし、その詳細は明らかにされていない。

また、ディ・パスクワーレの研究グループは、初めて構造解析を行なった点でも注目される。構造解析を行なうためには、レンガとモルタルの材料特性を知る必要があり、彼らはドーム殻面の3ヵ所(第二步廊から2ヵ所、第三步廊から1ヵ所)について直径7cmのコア・サンプリングテストを実施した(注54)。ドームに使用されたレンガとモルタルの材料特性は、現在使用されているものと比較して大差がなく、その強度も非常に高いという報告がなされている。さらに、構造解析の前提として、対象建造物の基礎と地盤との関係を知ることも重要であるが、ディ・パスクワーレは大聖堂広場の3ヵ所でボーリング試験を行ない、地層、地下水位、聖堂基礎の調査を行なった(注55)。教会堂は3方向を道路に囲まれ、近年激しくなった交通振動による影響も確認する必要があり、これについて彼は街路4ヵ所、堂内のピア3ヵ所、およびドーム7ヵ所に加速度計を設置して振動測定を行ない、建造物としてのドームの固有周期などを求めている(注56)。

解析理論の面では、ディ・パスクワーレはツイエンキーヴィッツにより提案された解析手法を組積造の解析に適用し、組積造に適したノー・テンション・モデルを工夫し、静力学的な問題に関する理論を展開している(注57)。彼によって提案されたノー・テンション・モデルを用いると、物理的にはクラックの発生を意味する初期歪み項を加えることにより、剛性マトリックスを修正せずに収束計算を行なうことができ、計算時間を短縮することが可能となる。このノー・テンション・モデルの有限要素法への適用例として、彼は球殻および懸垂線断面をもつドームの解析例を示している(注58)が、フィレンツェのドームのようなより大規模な構造への適用は今後の課題である。

構造解析は大きく静的構造解析と動的構造解析の二つに分けられる。前者について、研究グループのメンバーであるジャコモ・テンペスタは、シェル要素(4節点24自由度アイソパラメトリック要素、構造解析は既成プログラムSAP IVを使用)を用い、ドーム8分の1部分をクラックがまったく存在しない場合とクラックが完全に伸展した場合に分けて弾性解析を行なっている(注59)。この解析によると、クラックが発生していない状態での木製リング位置におけるドームの周方向引張応力は、約0.6kg f/cm²である。同じくメ

ンバーの一人である、シルヴィア・ブリッコリ・バータは、ドーム8分の1について、ディッシンガー理論によるドーム施工時および完成時の膜応力解析、曲げ応力解析を行なったが、この解析によれば、同じ条件におけるドームの周方向引張応力は、約 1.9kg f/cm^2 である(注60)。後者、すなわち動的構造解析に関しては、この研究グループによって、交通振動解析および地震応答解析(EI Centro 1940 NS 0.3gal)が行なわれた(注61)。それによれば、交通振動の影響はそれほど大きくないという結論が得られている。

フィレンツェ大学では、土木工学科にもアンドレア・キアルージを中心として独立した研究グループが組織され、建築学科の研究同様、ドームのクラックに関して資料と実測とからその発生時期および伸展経過が推定されている。彼らによれば、クラックの伸展速度は一世紀で約 7.5mm と推定され、クラック進行の原因は温度応力、地震力、風荷重にあるのではなく、ドームの自重および形状(ライズ)にあると考えられる(注62)。季節変化によるクラックの伸展に関する経年データの分析、およびドームに及ぼされる温度応力の影響は、彼らとは独立してブルーノ・ダッディによっても考察されている(注63)。ドームの施工については、この研究グループもディ・パスクワレによって提案された逆円錐面の施工面を確認している。大聖堂のドームに関して1984年にラヴェンナで開かれた会議では、彼らはラヴェンナのレンガ職人組合の協力をえて4分の1の縮尺で実際にレンガの積み上げ実験を行なった(注64)。ドームおよび教会堂の力学的特性の分析には、構造解析と並行してさまざまな手法を適用することが必要であり、模型レンガによる施工実験あるいは模型による載荷実験など今後も新しい試みがなされるであろう。土木工学科の研究グループは、大聖堂身廊に設置されたタイバーの振動数を測定することにより、タイバーに発生している張力を調べ、タイバーの安全性を確認するとともに身廊が各部分でどの方向に変形しているかを観測している(注65)。さらにこのグループは、季節風によるドーム頂部の振動測定を行ない、南北軸(1.75Hz)および東西軸方向(1.80Hz)のドームの固有周期を求めているが、詳細は明らかにされていない。構造解析の前提となるさまざまな定数と支持条件がより正確に決定されるためには、この種のさまざまなデータが蓄積されることが重要である。最も新しい成果のひとつとして、ディ・パスクワレ、キアルージ両者を中心とするグループが合同でドームおよび下部構造のクラックを精査し、報告書が作成されている(注66)。

フィレンツェ大学土木工学科のグループもドームの静的構造解析を行なっている。構造解析はいずれもドーム4分の1部分について、15節点あるいは20節点アイソパラメトリック要素を用いる有限要素法(既成のプログラム FIESTA を使用)によって行なわれ、ドーム部分、ドラム部分、ドラムを含む下方の大アーチとピアの部分それぞれ別個に解析し、得られた解析解を重ね合わせて結論を導いている(注67)。この構造解析では、荷重として自重と季節変化による温度応力が考慮され、断面内に引張力が生じた場合、その部分の拘束を自由にして再計算を行ない、断面内に引張力が存在しなくなるまで繰り返すいわゆる疑似弾塑性解析の方法がとられている。提出された解析結果は、現状のドームのクラックの状態(ドーム殻面3分の2の高さまで進行)とほぼ一致し、モデル化の正しさを裏付けている。特に、ドラムを含む下方の大アーチとピアの部分の解析では、ドームの各殻面のうち下方にピアが存在する部分のみに顕著なクラックがみられる理由を説明していることは注目される。フィレンツェ大学建築学科のグループ同様、現状のドームの力学的挙動の把握、構造安定性の評価、将来の保全のための指針を得る努力がなされている。また、プレツピアは、境界要素法による古代建造物のシミュレーションとしてサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームを取り上げている(注68)。1980年代半ばからドームの内装フレスコ画の修復作業が開始されたが、その足場の建設という機会をとらえて、実際のドームでブルネッレスキがドームの建設にあたって採用したであろうと推定される方法が試みられた。この足場の構造設計のために行なわれたドームの構造解析では、回転体として初期計算がなされ、ヴォールトとしての殻面とそれに対してパットレスの機能をもつ下部構造に関する解析を重ね合わせることによって8角形ドームの解析結果を得るという手法が紹介されている(注69)。

これまでの諸研究では、ドームを構成する個々の構造要素に注目した詳細な構造解析は行なわれていない。この点で、新しい傾向として注目されるのは、ドームの水平アーチ群と関連構造を直接の対象としたトーマス・セトルの研究である(注70)。ドーム内殻はすべての高さにおいてその厚さ内に水平な圧縮リングを得るのに十分な厚さを有する(注71)。メインストーンは、1426年の補足規定で定められたレンガ造水平アーチが施工途中の外殻の自立性に寄与した可能性を指摘したが(注72)、セトルはこれと異なった解釈を提案している。すなわち、彼は、一つの殻面につき9段のレンガ造水平アーチが挿入されたのは構造的機能

によるのではなく、幾何学的に配置されたこの水平アーチがロープとともにドーム施工面のガイドラインとして役立った可能性を強調している。彼も指摘しているように、1426年の補足規定には、ドームの完成後このレンガ造水平アーチは取り壊してもかまわないという記述がみられ、当時の建築家がこのレンガ造水平アーチの構造的機能をどのように認識していたかを考察する場合、このやや例外的な補足文の意味は重要な出発点となろう。

ロバート・マークの研究は、ゴシックの大聖堂を対象に構造解析と光弾性実験を行なったもので(注73)、建築遺産をその構造的成立ちをも含めた広い視野から理解し、後世にそれを伝えるための保全行為としてその知識を実用化しようとする研究動向は、国際的な流れでもある。この研究動向を反映して、1988年、イスタンブールで古代から現代までのドームに関するIASS国際会議が開催された。有限要素法による歴史的構造物の力学的特性と架構法に関する研究や、補強に関する研究が発表された(注74)。また、この研究動向をうけて1989年、歴史的建造物の力学的研究および保存・保全に関する第一回 STREMA89国際会議がフィレンツェで、1991年、第二回 STREMA91国際会議がセビリアで開催された。同じく有限要素法、境界要素法による歴史的構造物の力学的特性と架構法に関する研究や、補強に関する研究が発表された(注75)。バス(イギリス)において1993年、第三回 STREMA93国際会議が、またローマにおいて1993年、建築遺産の構造的保存に関するIABSE国際会議が開催される予定である。

このような研究の系譜に示されているように、構造的な視点からドームを捉えようとする研究は、構造理論の専門研究者が積極的に加わることにより、近年になって特にイタリアで活発に展開されている。その過程で、これまでの資料研究では得られなかったいくつかの研究成果がもたらされ、歴史的建築物を構造的な視点から分析し、理解しようとする研究手法は、建築史学の研究手法として確立されつつある(注76)。

組積造構造物の力学的挙動をより正確に表現しうる解析理論を構築し、歴史的建築物がいかなる力学特性をもち、どのような構造的合理性を有するか、またその特性は推定される架構方法とどのような関連をもつか、をその解析手法を援用した構造解析と同時代資料の研究によって調査し、それらを構造的に、また歴史的要因により正確に理解しようとするのが、さらに後世にそれらを伝えるための保存行為としてその知識を実用化しようとするのが著者の研究目標である。

第2章 レンガ造水平アーチの建設経緯とその役割に関する諸説

ドームの計画案を記録した1420年の資料(G51, 注77)は、その前文に明記されているように、ドナテッロとナンニ・ディ・バンコの協力をえてブルネッレスキが制作した木-レンガ造模型の「すべての部分」を文書の形に残したものである(注78)。この模型の縮尺は約8分の1と想像され(注79)、内殻、リブ等の躯体のみならず、一部の装飾も含む細かい計画と工事の実際を表現した精密な模型であったと考えられる(注80)。このG51には半円筒ヴォールトに関し、次のような記述がみられる(ただし括弧内は著者による説明)：上述のヴォールト(これはドーム内殻をさす)に沿って約12ブラッチャ(ただし、1ブラッチャ≒0.5836m)ごとに、クーポラ内部の通路としてリブとリブの間に小さな半円筒ヴォールトを設ける(注81)。

この簡単な記載からは、半円筒ヴォールトが複数(間隔を12ブラッチャとすれば4)計画されたことが知られる。しかし、このG51にはレンガ造水平アーチに関する記述はみられない。G51の規定を補うために1422年、1426年に建設計画の補足規定が定められた。1426年の建設計画の補足規定には1420年のドーム計画案で規定された半円筒ヴォールトの建設に関する記述はみられないが、レンガ造水平アーチに関し、次のような記述がみられる：さらに、第2歩廊のドア(通路)のわき柱を越えて、(ドームの)外殻を取り巻く円の完成のために、この突き出ている円弧が完全に壊れないためにアーチを描くようにレンガを並べる。(このレンガ造アーチの)幅は外殻に等しく、約1ブラッチャの高さである。そして、もしこの建て増し部分が目に対して粗野に見えたり歩行や階段を妨げるならば、ドームは大きな(ドームの崩壊に関する構造的)安全性をもって完成されるので、ひとたびドームが完成したらそれを取り壊してもよい(注82)。

1420年のドームの計画案では、前述のようにドーム内部の通路としてリブとリブの間に小さな半円筒ヴォールトを設けるという記述がみられるが、大聖堂の面するサン・ジョヴァンニ洗礼堂のドームにも床面を支える小ヴォールトが設置されていることが、この計画の根拠となっていたと推定される。ドームの現状から確認されるように1420年のドーム建設計画で計画された小ヴォールトは結局建設されなかった。1423年8月27日付の資料(G177)は、この小ヴォールトの建設が予定されていた第2歩廊位置に、それにかわって砂岩の棒材をクランプで緊結した石造リングが建設されたことを伝えている(注83)。小ヴォールト建設中

止の利点に関し、ザールマンは次の2点の仮説を提案している(注84)。1) 第2歩廊と第3歩廊間の殻面の勾配が第3歩廊と第4歩廊間の殻面にくらべて急なため、殻面の中央を登る階段をつくるのが不可能であったが、小ヴォールトの建設中止により内殻面に沿う段階を建設することが可能となった、2) この小ヴォールトは、ドームを高さ方向に4つに分けその間をすべて覆うため工事が大変で維持、修復もまた難しかったため、上記1)の理由とあわせて9列のレンガ造水平アーチの建設にとって代わられた可能性を示している。

1426年の建設計画の変更では、上述のように外殻に圧縮リングが入るようというレンガ造水平アーチに関する記述がみられるが、最初の1組だけ明記されているものの他の8本の建設を示唆する資料はみられない。メインストーンに代表されるようにほとんどの研究は、レンガ造水平アーチはある構造的機能をもってると仮定している(注85)。このレンガ造水平アーチの構造的役割については、これまでいくつかの判断が述べられてきたが、それらは主として次の4点に分類できる。

- 1) 主リブ、副リブを結ぶリング説
- 2) 主リブ、副リブに荷重を伝えるとする説
- 3) 施工途中における外殻の自立性に役立ったとする説
- 4) その力学的特性のためよりむしろ、水平アーチを適当な間隔でえるために幾何学的に設置したとする説

アルベルティは、レンガ造水平アーチを木製リング、石造リング、半円筒ヴォールト(1423年8月27日に建設中止)と同様にドームの構成要素を接合する部材として考えていた(注86)。その考察の出発点になったのは、彼の『多角形ドームは、その断面内に円形ドームが含まれるとき、仮柱なしで建設することができる』という記述である。リング説は、樽に箍(たが)を嵌めるようにレンガ造水平アーチがドームを接合していると考えられるもので、建築家のみならず、人々の力学的直感ないし力学的経験によく合致した理解であったため、ドーム竣工後から現在にいたるまで最も一般的であった。このリング説1)は、近年ではサンパオレージにより支持されている(注87)。

ザールマンはレンガ造水平アーチが外殻面の荷重を主リブ、副リブに伝える有効な機能を及ぼすと考えた(2)説、注88)。

3) 施工途中における外殻の自立性に役立ったとする説はメインストーンによるものである。ネッリの図

版によれば、レンガ造水平アーチはドームの水平断面に対して連続した円を描く(注89)。しかし、メインストーンのその後の調査では、レンガ造水平アーチは副リブとの接合部から隅部の主リブとの接合部にかけて上に曲がっていることが確認されている。彼はドーム内殻はすべてのレベルで水平アーチが存在するのに十分な厚さをもっているが、外殻においてはレンガ造水平アーチを円錐形の施工面に従い一緒につくることによりそのレベルで水平アーチを確保し、施工中における外殻の自立性に役立った可能性を示唆している(注90)。

これに対しセトルは、ブルネッレスキがレンガ造水平アーチをその力学的特性よりむしろ水平アーチを適当な間隔で得るため幾何学的に設置した可能性を示唆している(注91)。すなわち彼はドームの建設方法に関し、幾何学的に配置された水平アーチがロープとともにドーム施工面のガイドラインとして役立った可能性を強調している。

レンガ造水平アーチの上下面がシェル面にはほぼ垂直であり、副リブ間にアーチが存在しないことから、レンガ造水平アーチは鉛直荷重に対して設けられていないことが分かる。また、1426年の建設計画の変更では、前述のようにドーム完成後少なくとも最初の1組のアーチは取り去ってもよいと明記されている。したがって、主リブ、副リブを結ぶリング説1)とレンガ造水平アーチが外殻面の荷重を主リブ、副リブに伝える有効な機能を及ぼすと考えたザールマンの仮説2)は、当時ブルネッレスキがレンガ造水平アーチを常設的なものとして扱っていなかったことからあきらかに歴史的事実に反している。

サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームのレンガ造水平アーチを巡るこれらの諸説に共通する点は、構造的問題を扱いながら構造解析の手法を適用せず、一部を資料、一部を組積造構造に関わる直感的理解に基づいて立論しているという点である。もちろん、当時の建築家、特にブルネッレスキが現代的意味での構造計算の手法を備えていたとは考えられないが、歴史的な建築物を理解する場合、より現代的な手法でその構造に関する的確な知見を得ておくことは、建築史研究にとってのきわめて重要な前提になるはずである。このような観点から著者は、構造理論研究と建築史研究による学際的研究という形で、フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの構造解析を行なった。

第3章 構造解析とその結果

レンガ造水平アーチの構造的役割を評価するための構造解析では立体トラスモデル, 立体有限要素モデル, および弾塑性接合要素を用いた施工上面モデルを用いる。ドームの対称性を考慮し, その8分の1, あるいは16分の1をモデル化する。

1. 立体トラスモデル

これは組積造を均質な連続体とみなし, 構造的に等価な立体トラスに置換する方法で, 立体骨組モデルとよばれる。この方法は耐震壁のブレース置換法として現在の構造計算でしばしば用いられている。軸応力,

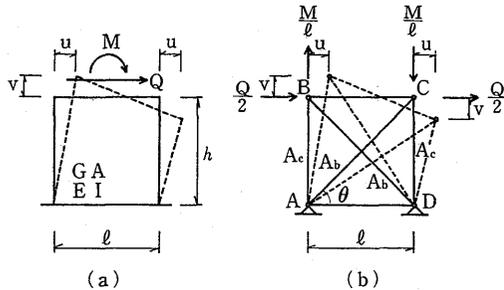


図4 連続体としての組積造壁体(a)のトラス構造(立体トラス) (b)への置換

曲げ応力, せん断応力による実際の壁体の変位 (図4 a) と, 同じ応力を受けるモデルの変位 (図4 b) とが等しくなるようにトラスへの置換が行なわれる。今回対象としているドームでは, 1) 経線方向においては, 経線方向曲げモーメントの影響を解析計算に正しく反映させなければならないが, 周方向においては周方向曲げモーメントが無視しようと考えられること (図5), および, 2) レンガがきわめて密に積まれて

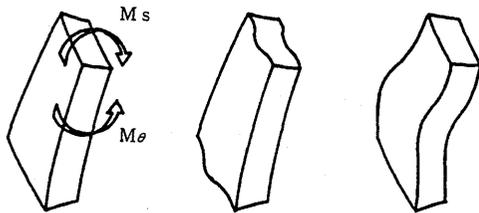


図5 ドーム殻面の変形

いる主リブと副リブはいわゆる耐震壁に相当する挙動を示すことが期待されるものの, リブ中間部の耐力は明らかにそれよりも低いと考えられること, を考慮して, 著者はリブ部分に相当するトラス構造を水平の連結材で結合した立体トラスモデルを設定することとした。下部構造については, 断面形状の変化による偏心

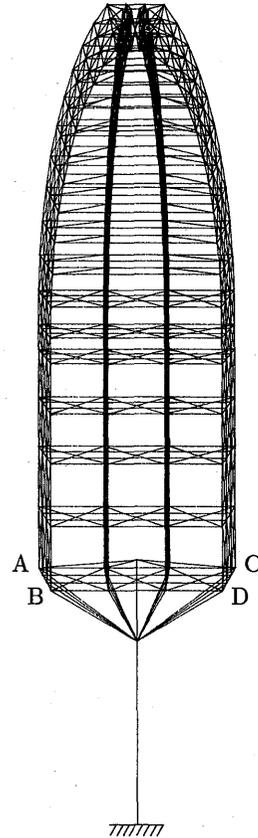


図6 ドーム1/8部分の立体トラスモデル
面 ABCD を含みそれ以下の部分は力学的に十分高い剛性をもつ部材で構成されている。

の効果を考慮した梁部材でモデル化した (図6)。

レンガ造水平アーチの構造的役割の評価は, ドームの施工途中および完成後にわたって考察されねばならないので, 今回のモデル化では施工途中の状態に対応するモデル5種, 完成状態のモデル, 計6通りのモデルを作成した。完成状態のモデルの節点数は293, 部材数は1263である (図6)。さらにドーム外殻の構造効果を調べるために, 内殻と主リブ, 副リブでドームが構成されているという仮定の解析も行なった。解析計算の手法は, いわゆる剛性法であるが, 引張力が低い (2 kg f/cm² を仮定) という組積造構造物の力学特性を表現するため全部材有効の段階より計算を始め, 引張ひずみを受ける部材の弾性定数を低めて再計算を繰り返す方法 (疑似弾塑性解析) をとった (注92)。

2. 立体有限要素モデル

ドーム形状の対称性を考慮してドームの1/16部分を主リブ, 副リブ, 内殻, 外殻に着目し, アイソパラメトリック15節点三角柱要素で置換した立体有限要素

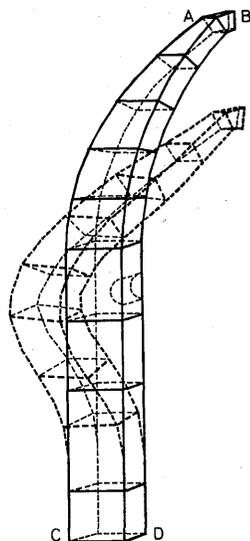


図7 立体有限要素モデル

モデルを設定した(図7)。上部構造と下部構造の間の断面形状が大きく変化する部分についてはモデル化する際に省略した。上記立体トラスモデル同様、今回のモデル化では施工途中の状態に対応するモデルと完成状態のモデル、計2通りのモデルを作成した。完成状態のモデルの節点数は2993、要素数は370である。解析計算の手法は、有限要素間にバネ要素を挿入し(単位長さのバネを仮定し、その定数はモルタルのヤング係数とバネの支配面積から算定した)、そのバネ要素の剛性を引張りずみにより変化させる疑似弾塑性解析をとった(注93)。

3. 弾塑性接合要素を用いた施工上面モデル

石材、レンガ材とその間をうめる相対的に強度の低いモルタルで構成される組積造構造物の力学挙動は、構造物全体を弾性体として解析することによってもある程度把握することができる。しかし、引張力に弱いという組積造構造物の特徴を考慮した場合、その力学的特性はレンガ接着面(モルタル部分)での破壊を含む弾塑性域での解析、すなわち、その破壊面に弾塑性

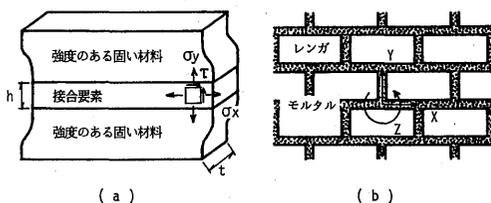


図8 組積造構造物の弾塑性解析に適用される接合要素の概念図

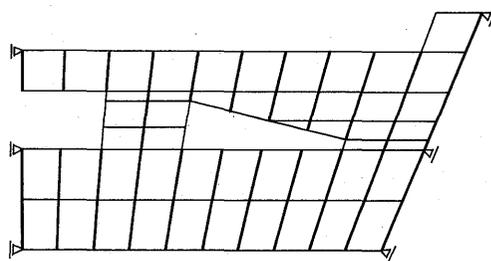


図9 弾塑性接合要素を用いた施工上面モデル

接合要素を用いる解析を進めることによって、より高い精度でとらえることができる(図8、注94)。

施工上面におけるレンガ造水平アーチの構造的役割を調べるために、ドーム形状の対称性を考慮して、その水平断面(施工途中45°)の1/16部分に弾塑性接合要素を用いた平面有限要素モデルを設定した(図9)。施工直後のモルタルは引張力に対して非常に弱いためレンガはドーム内側に滑りやすく、切り出した施工上面とその下面の間にローラー支持を仮定した。また荷重としては水平荷重を考慮した。モデル化にあたっては、上述した目的で次の3種類のモデルを想定した。

モデルA：施工上面がレンガ造水平アーチを含まない位置にあるときのモデルで、施工上面は主リブ、副リブと内・外殻で構成されている(図12a)。解析モデルの節点数は310、要素数は43である。

モデルB：施工上面がレンガ造水平アーチを含む位置にあるときのモデルで、施工上面は主リブ、副リブ、レンガ造水平アーチと内・外殻で構成されている(図12b)。解析モデルの節点数は352、要素数は49で

表1 接合要素の材料定数

角 度	$\phi_0 = 45^\circ$
要 素 厚	$t = 1.0\text{cm}$
要 素 高	$h = 1.0\text{cm}$
ヤング係数	$E_{sd} = 8.62 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$
	$E_{sv} = 5.95 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$
強度特性	$\sigma_{cd} = 50 \text{kgf/cm}^2$
	$\sigma_{cv} = 150 \text{kgf/cm}^2$
	$\sigma_{td} = 1.89 \text{kgf/cm}^2$
	$\sigma_{tv} = 1.16 \text{kgf/cm}^2$

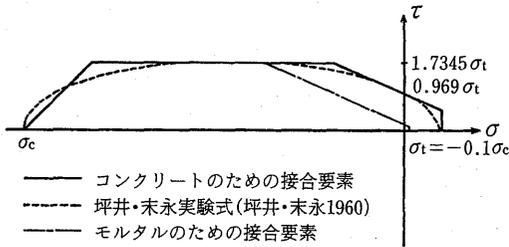


図10 降伏条件

ある。

モデルC：上記モデルA，モデルBとは異なり，外殻なしでドームが施工されたという仮定のもとに施工上面を設定したモデルで，施工上面は主リブ，副リブと内殻のみで構成されている（図12c）。解析モデルの節点数は238，要素数は33である。

図9中，細線は有限要素分割，太線は接合要素を配した位置を示す。また表1に解析に用いた材料定数，図10に降伏条件を示す（注95）。

4. 解析結果とその考察

上記モデル1，2の解析結果は図11に示され，先端部は施工途中にあって圧縮力を受けるが，その値は工事が進むにしたがって次第に減少し，完成状態では，同じ部分が引張力を受け，これに対応してドーム基部

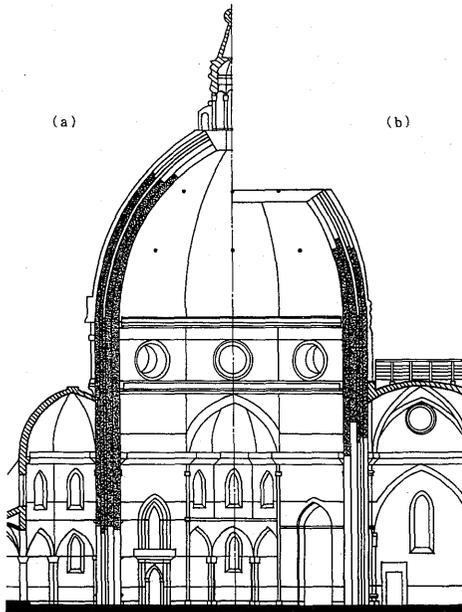
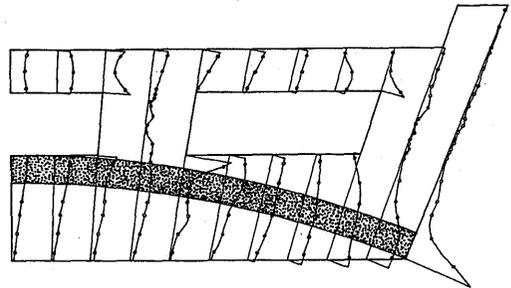


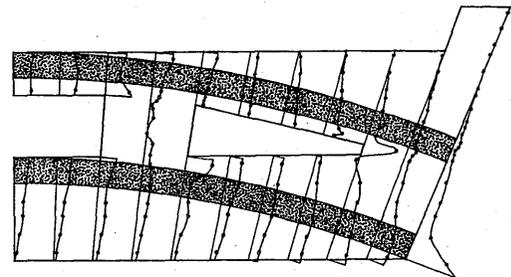
図11 完成時(a)および施工途中 (b)のドームに発生する周方向引張力
 陰影響部分が周方向引張力に対応

からクラックが進行する。したがってレンガ造水平アーチは，ドームの施工時にはその先端が有効に作用しているが，完成時にはその下方で引張力を受ける。また，外殻を取り除いた解析結果より，ドームは外殻なしでも成立すると推定される。

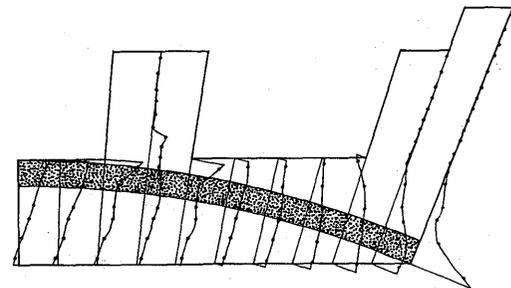
上記モデル3の解析結果は図12に示され，レンガ造水平アーチを含まないモデルAでは，（応力状態より判断される）内殻に陰影で示した圧縮リングが形成され，施工上面内で閉じた水平リングを形成する（図12a）。この圧縮リングは，施工の各段階で施工上面を安定させる大きな役割を果していると推定される。こ



(a) レンガ造水平アーチを含まないモデル
 (内殻に圧縮リング想定)



(b) レンガ造水平アーチを含むモデル
 (内外殻に圧縮リング想定)



(c) 外殻を取り除いたモデル
 (内殻に圧縮リング想定)

図12 施工上面モデルによって求められた応力図

れに対して、レンガ造水平アーチを含むモデルBでは、この圧縮リングが外殻とレンガ造水平アーチを含む面内にも形成され、二重の水平リングが確保される(図12b)。この解析結果は、メインストーンの施工途中における外殻の自立性に役立ったとする説3)とよく一致する。一方、外殻を取り除いたモデルCでは、モデルAと同様に内殻に圧縮リングが形成され、ドームはこの仮定のもとでも自立することが確認される(図12c)。この解析結果に対応し、1420年のドームの計画案でプルネッレスキがドームの外殻について造形美的効果を強調し、構造的必要性にふれていないという史実が目される。すなわち彼によれば、外殻建設の理由は次の2点である(注96)。

1. 内殻を湿度から守る
2. 美的効果(殻面のセットバックによりドームに軽快さを与える)

また施工上面の応力状態に注目すると、図12に示されるように圧縮応力状態から判断される圧縮リングがそれぞれ形成され、内殻壁の厚さは1ブラッチャの圧縮リングがその断面内に内包されるように、外殻壁の厚さはレンガ造水平アーチの存在する位置で1ブラッチャの圧縮リングがその断面内に内包されるように決定されたと推定される。

レンガ造水平アーチは、各施工段階の先端部にあるとき、仮枠なしで外殻の自立性を確保するのに必要な圧縮力を負担し、有効な力学的機能を果たしている。この解析結果に対応し、初期ルネッサンス時代の建築理論家レオン・バッティスタ・アルベルティが「建築論」の中でドーム構造における水平リングのアーチ作用を強調したことからも想像されるように、これははっきりと意識された力学的効果をもつ構造であった(注97)。したがって、プルネッレスキがレンガ造水平アーチをその力学的特性よりむしろ水平アーチを適当な間隔で得るため幾何学的に設置したとするセトルの説4)は、当時の構造的認識と矛盾することになる。

建築物は、その施工方法により異なるが、完成したときに静的に安定であればよいものと、施工途中においても常に安定していなければならないものの二種類に分類できる。仮枠の上にレンガを並べて施工し、完成後に仮枠を取り外すゴシックのアーチ構造、ヴォールト構造などは、もちろん仮枠自体は安定した構造でなければならないが、仮枠を取り外したときに構造物が安定であればよい構造物の例である。これに対し、サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームは仮枠なしで施工するため、ドームの自立性については施工途中においても常に安定したものでなければなら

ない。このことに関し、内殻に想定される水平リング構造と、外殻、レンガ造水平アーチによる水平リング構造は、ドームの自立性を確保するための有効な力学的機能を果たしている。

しかし、アーチ作用の形成もドームが完成するに従い引張力へと変化する。すなわち、完成時には下層部の水平リングにはもはや圧縮力が働いていない。レンガ造水平アーチをドーム竣工後に取り外してもかまわない(ドームの崩壊に関する構造的安定性には問題がない)と述べた1426年の建設計画の補足規定は、レンガ造水平アーチが施工中の圧縮リングを形成するための一時的機能をもつ部材であり、頂部を共有するアーチ束となる完成時のドームでは、逆にフープ方向の圧縮力が生じないことを意識した記録であると考えられる。プルネッレスキはドームの施工段階で、また完成後何が必要とされ、何が不要であるかを自らの構造的直感に照らして決定した才能の持ち主であったと考えられる。

謝 辞

豊橋技術科学大学教授の加藤史郎博士、筑波大学助教授の日高健一郎博士からは終始適切にして厳正なる御指導と御助言をいただいた。心から感謝いたします。また、フィレンツェ大学建築学部のサルヴァトーレ・ディ・バスクワレ教授からは貴重な御意見をいただき、昭和61年度盛田国際教育振興財団奨学生としてイタリア滞在中に多くの便宜と施設供与をはかっていただいた。教授、大学と関連施設の助手、スタッフの方々、ならびに財団に深く感謝いたします。

注

- 1) Saalman 1980 (参考文献参照, 以下同様), p.107
- 2) Saalman 1980, pp. 11-13
- 3) De re aed, III, xiv; 相川 1982; Saalman 1980, p.90
- 4) Scala 1677, pp.23-24 (Saalman 1980, p.13)
- 5) Manetti 1976; 浅井 1989
- 6) Guasti 1857; Guasti 1887
- 7) Nelli 1753; Nelli 1755
- 8) Saalman 1980, pp.17-18
- 9) Nelli 1753. 特に、ドームの建設に関しては、この中に、Ragionamento sopra la maniera di voltar le Cupola senza adoperarvi le Centine,と題した考察がある(Saalman 1980, p.19)。
- 10) Saalman 1980, p.216, pp. 236-238, Addendum VII, 2
- 11) Saalman 1980, p.19

- 12) Pistoia 1977, p.41; Vasari 1880, p.167
- 13) Guasti 1857
- 14) 現在のファサードは2度にわたる競技設計を経て、エミリオ・デ・ファブリスにより、1871～87年に建設された (Saalman 1980, p.21)。
- 15) Stegmann-Geymüller 1885; Durm 1887; Frey 1887; Fabriczy 1892; Fabriczy 1907
- 16) Nardini-Despotti-Mospignotti 1885 (Saalman 1980, p.22)
- 17) Saalman 1980, p.22
- 18) Nardini 1902 (Saalman 1980, p.22)
- 19) Frey 1887 (Saalman 1980, pp.24-25)
- 20) Fabriczy 1892 (Saalman 1980, p.25)
- 21) Fabriczy 1907 (Saalman 1980, p.25)
- 22) Durm 1887 (Saalman 1980, pp.25-26)
- 23) Stegmann-Geymüller 1885 (Saalman 1980, p.26)
- 24) Nelli 1755
- 25) Saalman 1980, p.18, p.220
- 26) Rilievi 1939
- 27) Rilievi 1939, pp.44-49
- 28) Rilievo 1937; この調査の経緯については, Saalman 1980, p.27参照。
- 29) Saalman 1980, p.244
- 30) Sanpaolesi 1941
- 31) Sanpaolesi 1941 (Saalman 1980, p.27)
- 32) Saalman 1980, p.221
- 33) Sanpaolesi 1941, p.26
- 34) Sanpaolesi 1972, p.221f (Saalman 1980, p.29)
- 35) Sanpaolesi 1972, Sanpaolesi 1980
- 36) 日高-青木-加藤 1990, p.26
- 37) Saalman 1980, pp.241-243 所収の 'Reports of Geom. Luigi Giannini on the Surveying of Internal and External Cupola Curvature, 1967-68' および Ferri-Fondelli-Franchi-Greco 1971
- 38) Battisti 1981, pp.114-171
- 39) Prager 1980 (Saalman 1980, p.29) ; 日高-青木-加藤 1990
- 40) Prager-Scaglia 1970 (Saalman 1980, p.29)
- 41) De re aed, III, xiv; 相川 1982
- 42) Mainstone 1977, pp.158-161
- 43) Mainstone 1969-70, p.120f; Mainstone 1980
- 44) Rossi 1977a; Rossi 1977b; Rossi 1978a; Rossi 1978b (Saalman 1980, p.31)
- 45) Atti 1980
- 46) Sanpaolesi 1980
- 47) Mainstone 1980
- 48) Di Pasquale 1980
- 49) Di Stefano 1980
- 50) Di Pasquale 1976
- 51) Di Pasquale-Bandini-Paolini-Strigelli 1977; Paolini-Puccetti 1983
- 52) Barbi-Di Teodoro 1983
- 53) Di Pasquale 1977; Di Pasquale-Bandini-Tempesta 1978; Di Pasquale 1980
- 54) Di Pasquale 1983; Leggeri-Messini-Vasari 1985
- 55) Vasarri 1983
- 56) Di Pasquale-Bove-Blasi-Paolini-Puccetti-Marilli-Regoli-Salvini 1983
- 57) Di Pasquale 1979; Di Pasquale 1984
- 58) Di Pasquale-Aoki 1988
- 59) Tempesta 1983; Di Pasquale 1983
- 60) Bati 1983; Di Pasquale 1983
- 61) Di Pasquale 1983; Di Pasquale-Bove-Blasi-Paolini-Puccetti-Marilli-Regoli-Salvini 1983
- 62) Blasi-Ceccotti 1984
- 63) Daddi 1977
- 64) Chiarugi 1984; Chiarugi-Quilghini 1984
- 65) Blasi-Spinelli-Vignoli 1987
- 66) Rapporto 1985。クラックに関する調査は、ドーム内外殻面、隅部、ドラム丸窓、トリプーナモルテ、ピア、身廊に分けて詳しく図示されている。
- 67) Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983a; Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983b; Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983c; Fanelli-Giuseppetti 1984; Blasi-Ceccotti 1984
- 68) Brebbia-Baynham 1989
- 69) Spinelli 1981
- 70) Settle 1978
- 71) 日高-青木-加藤-河辺 1984; 青木-日高-加藤-河辺 1984
- 72) Mainstone 1977, pp.159-161
- 73) Mark 1982
- 74) IASS 1988
- 75) STREMA89; STREMA91
- 76) 日高-青木-加藤 1990
- 77) Guasti 1857, p.28資料51。以下 Guasti 1857 の資料番号には G を付す。
- 78) "Qui appresso faremo menzione di tutte le parti che si contengono nel modello fatto per esempio della Cupola maggiore" (G51)
- 79) Saalman 1980, p.62
- 80) この模型が外殻およびその稜部の大理石装飾を含

んでいたか否かは定かでない。また、レンガ部分で1426年の資料にみられるいわゆる「杉綾積み」工法が表現されていた可能性も考えられるが、G51からは確認できない。G20によると1419年7月から8月にかけて、ブルネッレスキは、ランタン、外周歩廊、百合の紋章を描いた旗の制作、および模型の一部を渡金する費用として彼がろくろ工、木工職人に支払った50リラ15ソルディの払戻しを受けている (Filipo di ser Brunelescho dè avere lire cinquanta, soldi quindici che sono per parte di legniam e per manifatura del torniaio e de legniaiuolo, della lanterna e de l'andito dello modello che facie il detto Filipo; e più per j^a bandieretta chol giglo, e per 5 pesi di stagnio, per mettere d'oro parte del modello (G20))。この模型では内殻の大部分はレンガ造であったと考えられ、渡金の必要はなく、また渡金によって強調すべき装飾部材も見あたらない。基部の外周歩廊 (ギャラリー) が付いていたことから、模型には外殻 (木造) が用意されていた可能性が大きいと思われる。この場合、渡金は外殻後部の装飾リブに施されたと考えられる。この模型は工事の進行にともない1432年2月に壊された。

- 81) "E nell'altezza d'ogni braccia 12, o circa, delle dette volte, sieno volticciuole a botte tra l'uno sprone e l'altro, per andito alla detta Cupola" (G51)。なお、Vasari 1967, p.261では小ヴォールトの間隔を9ブラッチャとしている。
- 82) "Anchora, che sopra i cardinali degli usciuoli che sono sopra l'detto secondo andito, per perfectione del cerchio che gira intorno la Cupola di fuori, acciò che detto arco vivo sia intero e nonrotto, si muri di mattoni in atto d'arco, di grosseza quanto è la detta Cupola di fuori, e su a alto braccia uno o circha. Et se maiparesse che detta agiunta mostrasse rustica a l'occhio, o impedisse l'andito e schale, si possa, fatto la Cupola, disfare detta agiunta, acciochè con più sicurtà si possa guidare a murare la Cupola in sino alla fine." (G75)
- 83) 1423年8月27日, "Stantiaverunt Filippo ser Brunelleschi, inventories ghubernatori maiori Cupule, pro pluribus artificis per eum factis et fiendis in dicta Opera: et maxime pro novo modello pereum ad presens tradito et dato dicte Opere supra chatenam magniam ligaminis dicte Cupule, et per ipsam ad perfectionem conducen-

dam: in totum flor. auri centum stantiatos per consules Artis Lane et operarios, dicta die.

A Filippo di ser Brunellescho fiorini cento d'oro i quqli denati gli si donano per faticha durata per l'Opera in trovare el modello della chatena s'a mettere su nella magore Chupola, e per chondurlla a perfezione, e per piu altri artificis per lui fatti nella datta Opera: coe, che de fare: chome trovare el modo chome deono stare e lumi alla Chupola, e chome de stare la chatena de macinghi, e chome de stare le creste in su la Chupola." (Ado, II, 4, 9, c.68; G177; Saalman 1980, p.262, Doc. 190); Saalman 1980, pp.119-120

- 84) Saalman 1980, p.88
 85) Mainstone 1977
 86) De re aed, III, xiv; 相川 1982
 87) Sanpaolesi 1941
 88) Saalman 1980, p.87
 89) Saalman 1980, Cupola, Analytical Plan View, G. B. Nelli (p. XII)
 90) Mainstone 1977
 91) Settle 1978
 92) この成果の概要は、日高-青木-加藤-河辺 1984で発表した。
 93) この成果の概要は、日高-青木-加藤-河辺 1984で発表した。
 94) 加藤-日高-青木 1986
 95) この成果の概要は、日高-青木-加藤-河辺 1984で発表した。
 96) "Facciasi un'altra Cupola di fuori sopra questa, per conservarla dallo umido; e perchè la torni più magnifica e gonfiata, e sia grossa nella sua mossa de piè braccia $1\frac{1}{4}$, e piramidalmente segua, che insino all'occhio rimanga braccia $\frac{2}{3}$." (G51)
 97) De re aed, III, xiv; 相川 1982

参考文献

- 1) Barbi-Di Teodoro 1983; L. Barbi-F. Di Teodoro, Le lesioni della cupola di Santa Maria del Fiore - Una proposta di datazione, Bollettino degli Ingegneri, n.9, Florence, Italy, 1983. 9, pp.13-18
 2) Bati 1983; S. B. Bati, La Cupola di Santa Maria del Fiore - Osservazioni sull'analisi condotta secondo la teoria di Dischinger, AttiF 11/83
 3) Battisti 1981; E. Battisti, Filippo Brunelleschi,

- Milano, 1981
- 4) Blasi-Ceccotti 1984; C. Blasi-A. Ceccoti, Note sulle lesioni nella cupola del Brunelleschi e confronto con i risultati ottenuti su un modello numerico agli elementi finiti, Edizioni centro 2P, Firenze, 1984
 - 5) Blasi-Spinelli-Vignoli 1987; C. Blasi-P. Spinelli-A. Vignoli, Dynamic Behaviour and Monitoring of Ancient Monuments, Proceedings of the IABSE International Symposium, 1987, pp.311-324
 - 6) Brebbia-Baynham 1989; C. A. Brebbia-J. M. W. Baynham, Simulation of Ancient Structures Using Boundary Elements: The Case of Santa Maria del Fiore, Proceedings of the STREMA International Symposium, 1989. 4, pp.277-285
 - 7) Chiarugi 1984; A. Chiarugi, La cupola del Brunelleschi - problemi di tracciamento e costruzione - Il modello dell'ACMAR, ACMAR, 1984, pp.31-37
 - 8) Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983a; A. Chiarugi-M. Fanelli-G. Giuseppetti, Analysis of a Brunelleschi-type Dome including Thermal Loads, Proceedings of the IABSE International Symposium, 1983, pp.169-178
 - 9) Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983b; A. Chiarugi-M. Fanelli-G. Giuseppetti, Sulla statica di cupole tipo S. Maria del Fiore in Firenze, UFIST, 1983
 - 10) Chiarugi-Fanelli-Giuseppetti 1983c; A. Chiarugi-M. Fanelli-G. Giuseppetti, Analysis of Brunelleschi-type Dome Including Thermal Loads, ENEL, 1983
 - 11) Chiarugi-Quilghini 1984; A. Chiarugi-D. Quilghini, Tracciamento della Cupola del Brunelleschi Muratorie Geometria, Critica d'arte, 1984, pp.38-47
 - 12) Daddi 1977; B. Daddi, Contributo alle ricerche sulla Cupola del Brunelleschi, Uniedit, Firenze, 1977
 - 13) De re aed; Leon Battista Alberti, De re aedificatoria
 - 14) Di Pasquale 1976; S. Di Pasquale, Una ipotesi sulla struttura della cupola di S. Maria del Fiore, published in *Restauro*, Quaderini di Restauro dei Monumenti e di Urbanistica dei Centri Antichi, V, 11-12/1976, pp.3-77
 - 15) Di Pasquale 1977; S. Di Pasquale, Primo rapporto sulla Cupola di Santa Maria del Fiore, Clusf, Firenze, 1977
 - 16) Di Pasquale 1979; S. Di Pasquale, The Dome of Santa Maria del Fiore - An Opportunity to State a Theory of Masonry Structure, Proceedings of the IASS International Symposium, 1979, pp.8. 43-8. 62
 - 17) Di Pasquale 1980; S. Di Pasquale, Recenti ricerche sulla cupola di Santa Maria del Fiore, Filippo Brunelleschi, La sua opera e il suo tempo, 1980, pp.893-902
 - 18) Di Pasquale 1983; S. Di Pasquale, Structural Analysis of the Dome in Florence, Strengthening of Building Structure - Diagnosis and Therapy, Proceedings of the IABSE International Symposium, 1983, pp.161-168
 - 19) Di Pasquale 1984; S. Di Pasquale, Statica dei solidi murari - Teoria ed esperienze, AttiF 84
 - 20) Di Pasquale-Aoki 1988; S. Di Pasquale-T. Aoki, Finite Element Analysis of Masonry Domes, Proceedings of the IASS-MSU International Symposium, 1988, pp.327-336.
 - 21) Di Pasquale-Bandini-Paolini-Strigelli 1977; S. Di Pasquale-P. L. Bandini-L. Paolini-G. Strigelli, Elaborazione dei dati concernenti il quadro fessurativo della cupola di Santa Maria del Fiore, clusf, Firenze, 1977
 - 22) Di Pasquale-Bandini-Tempesta 1978; S. Di Pasquale-P. L. Bandini-G. Tempesta, Rappresentazione analitica e grafica della Cupola di Santa Maria del Fiore, clusf, Firenze, 1978.
 - 23) Di Pasquale-Bove-Blasi-Paolini-Puccetti-Marilli-Regoli-Salvini 1983; S. Di Pasquale-A. Bove-C. Blasi-L. Paolini-P. Puccetti-F. Marilli-A. Regoli-R. Salvini, Traffico e tutela dei monumenti - Risultati dell'indagine preliminare, AttiF 22/83
 - 24) Di Stefano 1980; R. Di Stefano, Confronto fra due cupole, Filippo Brunelleschi, La sua opera e il suo tempo, 1980, pp. 871-882
 - 25) Durm 1887; J. Durm, Die Domkuppel in Florenz und die Kuppel der Peterskirche in Rom, Zeitschrift für Bauwesen, Berlin, 1887, pp.353-374, 481-500
 - 26) Fabriczy 1892; C. v. Fabriczy, Filippo Brunelleschi, sein Leben und seine Werke, Stuttgart, 1892. - The classic monograph.

- 27) Fabriczy 1907; C. v. Fabriczy, Brunelleschiana, Jahrbuch der kgl. preussischen Kunstsamml. xx-viii, Beiheft, pp.1-82. - Important documents
- 28) Fanelli-Giuseppetti 1984; M. Fanelli-G. Giuseppetti, I modelli numerici di comportamento strutturale per la cupola del Brunelleschi - Loro ruolo - prime esperienze e prospettive, ACMAR, 1984, pp.17-25
- 29) Ferri-Fondelli-Franchi-Greco 1971; W. Ferri-M. Fondelli-P. Franchi-F. Greco, Il rilevamento fotogrammetrico della Cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze, I. G. M., Firenze, 1971
- 30) Frey 1887; C. Frey, ed. Le Vite di Filippo Brunelleschi Scultore e Architetto Fiorentino scritta da Giorgio Vasari e da Anonimo Autore con aggiunte, documenti e note (Sammlung ausgewaehelter Biographien Basaris, Zum Gebrauche bei Vorlesungen. IV), Berlin, 1887
- 31) Guasti 1857; C. Guasti, La Cupola di Santa Maria del Fiore illustrata con i documenti dell'archivio dell'opera secolare, Firenze, 1857
- 32) Guasti 1887; C. Guasti, Santa Maria del Fiore, La costruzione della Chiesa e del Campanile secondo i documenti tratti dall'Archivio nell'Opera Secolare e da quello di Stato, Florence, 1887
- 33) Leggeri-Messini-Vasari 1985; B. Leggeri-M. Messini-V. Vasari, Brick in Building of the Dome of Santa Maria del Fiore in Florence, 7th International Brick Masonry Conference, 1985, pp.111-121
- 34) Mainstone 1969-70; R. J. Mainstone, Brunelleschi's Dome of S. Maria del Fiore and some Related Structures, Transactions of the Newcomen Society, XLII, 1969-70, pp.107-126
- 35) Mainstone 1977; R. J. Mainstone, Brunelleschi's Dome, The Architectural Review, cLxii, 1977, pp.157-166
- 36) Mainstone 1980; R. J. Mainstone, Le origini della concezione strurale della cupola di Santa Maria del Fiore, Filippo Brunelleschi, La sua opera e il suo tempo, 1980, pp.883-892
- 37) Manetti 1976; A. Manetti, Vita di Filippo Brunelleschi, Edizioni il Polifilo, Milano, 1976
- 38) Mark 1982; R. Mark, Experiments in Gothic Structure, MIT Press, 1982
- 39) Nardini 1902; A. Nardini, Il Duomo di San Giovanni, 1902
- 40) Nardini-Despotti-Mospignotti 1885; A. Nardini-Despotti-Mospignotti, Filippo di Ser Brunellesco e la Cupola del Duomo di Firenze, Livorno, 1885
- 41) Nelli 1753; G. B. Nelli, Discorsi di Architettura del Senatore Giovan Batista Nelli, con la Vita del medesimo ... e due Ragionamenti sopra le Cupola di Alessandro Cecchini Architetto, (ed. Nelli, G. B. Clementete), Firenze, 1753
- 42) Nelli 1755; G. B. Nelli, Piante e alzati interiori ed esterni dell'insigne Chiesa di S. Maria del Fiore, metropolitana fiorentina, Florence, 1755 (Vol. iv of F. Ruggieri, Scelta di Architetture antiche e moderne della città di Firenze)
- 43) Paolini-Puccetti 1983; L. Paolini-P. Puccetti, La situazione fessurativa della cupola di S. Maria del Fiore - Ricerca di correlazioni tra le variazioni cicliche di ampienza e corrispondenti parametri climatici - con nuovi rilevamenti a scadenze biorarie, AttiF 19/83
- 44) Pistoia 1977; Ventura Vitoni e il Rinascimento a Pistoia, Amministrazione comunale di Pistoia, 1977
- 45) Prager-Scaglia 1970; F. D. Prager-G. Scaglia, Brunelleschi, Studies of his Technology and Inventions, Cambridge, Mass., 1970
- 46) Rapporto 1985; Rapporto sulla situazione del complesso strutturale cupola-basamento della cattedrale di Santa Maria del Fiore in Firenze, Soprintendenza per i Beni Ambientali e Architettonici per le provincie di Firenze e Pistoia, marzo 1985
- 47) Rilievi 1939; Rilievi e studi sulla cupola del Brunelleschi eseguiti dalla Commissione nominata il 12 Gennaio 1934, Firenze, 1939
- 48) Rilievo 1937; Il rilievo della Cupola del Duomo di Firenze, Rivista d'Arte, 1937, pp. 79-83
- 49) Rossi 1977a; P. A. Rossi, Le Otto Piattabande Curve, Priv. publ., Florence, 1977
- 49) Rossi 1977b; P. A. Rossi, Brunelleschi Vera Cupola, Priv. publ., Florence, 1977
- 50) Rossi 1978a; P. A. Rossi, Principi Costruttivi nella Cupola di S. M. del Fiore, Critica d'arte, fasc. 157-159, pp.85-118, 1978
- 51) Rossi 1978b; P. A. Rossi, La Cupola, Parliamone ancora, Pegaso, III, 1978, pp.18-21

- 52) Saalman 1980; H. Saalman, Filippo Brunelleschi, The Cupola of Santa Maria del Fiore, London, 1980
- 53) Sanpaolesi 1941; P. Sanpaolesi, La cupola di Santa Maria del Fiore, Rome, 1941
- 54) Sanpaolesi 1972; P. Sanpaolesi, La cupola di Santa Maria del Fiore ed il Mausoleo di Soltanieh, Mitteilungen der Kunsthistorischen Institutes in Florenz, xvi, 1972, p.221f
- 55) Sanpaolesi 1980; P. Sanpaolesi, Le conoscenze tecniche del Brunelleschi, Filippo Brunelleschi, La sua opera e il suo tempo, 1980, pp.145-160
- 56) Scala 1677; B. Scala, De Historia Florentinorum, ed. J. Olger, Rome, 1677, pp.23-24
- 57) Settle 1978; T. B. Settle, Brunelleschi's Horizontal Arches and Related Devices, Annali dell'istituto e museo di storia della scienza di Firenze, Anno III, 1978, Fascicolo 1, pp.65-80
- 58) Spinelli 1981; P. Spinelli, Il ponteggio Metallico all'interno della Cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze, L'industria delle Costruzioni 119, sept. 1981, pp.21-27
- 59) Stefano 1980; R. D. Stefano, Confronto fra due Cupole, Filippo Brunelleschi, La sua opera e il suo tempo, 1980, pp.871-882
- 60) Stegmann-Geymüller 1885; K. v. Stegmann-H. V. Geymüller, Die Architektur der Renaissance in der Toskana, I, Munich, 1885-1893
- 61) Tempesta 1983; G. Tempesta, La cupola di Santa Maria del Fiore - Analisi Strutturale in regime elastico-lineare, AttiF 1/83
- 62) Vasari 1880; G. Vasari, Le vite de più eccellenti pittori, scultori e architetti, Vita di Bramante, ed. Milanesi, Firenze, 1880, vol. ix, p.167
- 63) Vasarri 1983; V. Vasarri, La cupola di Santa Maria del Fiore - Indagine sul sottosuolo e sulle fondazioni, AffiF 3/83
- 64) 相川 1982; 相川浩訳, レオン・バッティスタ・アルベルティ 建築論, 中央公論美術出版, 1982
- 65) 青木-日高-加藤-河辺 1984; 青木孝義, 日高健一郎, 加藤史郎, 河辺泰宏, サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの構造特性(その2) - 全体的構造特性からみたドラムとピアの役割, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和59年10月(1984), pp.2797-2798
- 66) 浅井 1989; 浅井朋子訳, アントニオ・マネッティ プルネッレスキ伝, 中央公論美術出版, 1989
- 67) 加藤-日高-青木 1986; 加藤史郎, 日高健一郎, 青木孝義, 弾塑性接合要素のトラス置換による定式化-有効強度理論の一応用例, 日本建築学会構造系論文報告集, 第370号, 昭和61年12月(1986), pp.50-59
- 68) 坪井-末永 1960; 坪井善勝, 末永保美, Experimental Study on Failure of Plain Concrete under Combined Stress(part 3), 日本建築学会論文報告集, 第64号, 昭和35年2月(1960), pp.25-36
- 69) 日高-青木-加藤-河辺 1984; 日高健一郎, 青木孝義, 加藤史郎, 河辺泰宏, サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの構造特性(その1) - 完成時と施工時におけるドームの構造要素の役割, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和59年10月(1984), pp.2795-2796
- 70) 日高-青木-加藤 1990; 日高健一郎, 青木孝義, 加藤史郎, サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂のドームの木製リングの構造的役割について, 建築史学論文報告集, 第14号, 1990.4, pp.23-56

なお, AttiF とは, Atti del Dipartimento di Costruzioni, Facoltà di Architettura, Università di Firenze の略称である。