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

STRUCTURAL ROLE OF THE HORIZONTAL BRICK ARCHES OF THE DOME OF SANTA MARIA DEL FIORE

青木 孝義*
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 for the structural role of the horizontal brick arches, there are currently four interpretations; 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.

Structurally, the horizontal brick arches must have provided an appropriate contribution to the self-supporting of the outer shell (interpretation 3)).

Keywords: *Santa Maria del Fiore, dome, masonry, horizontal arch, structural role*

サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂, ドーム, レンガ造, 水平アーチ, 構造的役割

1. はじめに

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。設計者はアルノルフォ・ディ・カンビオ, フランチェスコ・タレンティを経てドームを設計したフィリッポ・ブルネッレスキへと移行している(注 1)。大聖堂はラテン十字形平面を持つ三廊式会堂で(図 1), 8 角形の交差部を覆うドームは内殻と外殻を隅部の 8 本の主リブとその中間の 16 本の副リブで連結した二重殻構造である(図 3)。ドームの縦断面は 8 角形の隅部で 5 分の 4 アーチの円弧を描き, 内側の 8 角形に外接する円の直径は約 45.5m, 内接する円の直径は約 42.0m である。ドームは地上約 40.85m(図 2, B3) から約 53.49m(B2) に及ぶ高さ約 12.64m の 8 角形のドラムの上に載り, ドームの起拱点(SP) から第 4 歩廊(U4) までは約 31.89m にも及ぶ。ドーム頂部の要石の上には, 高さ約 24.4m の大理石のランタンが位置する(注 2)。

大聖堂の交差部を覆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 3)。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 3)。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。

本研究は, 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比較検討するとともに, 新たに構造解析によりその構造的機能を推定することを目的としている。

2. 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 4)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・パンコの協力を得てブルネッレスキが制作した木-レンガ造模型の「す

本論文の一部は既に文献(2), (3)において発表している。

* 名古屋市立大学芸術工学部生活環境デザイン学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Human Environmental Design, School of Design and Architecture, Nagoya City University, Dr. Eng.

図1 サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂 平面図

図2 サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂 断面図

図3 ドームの構造の概略とレンガ造水平アーチの位置

すべての部分」を文書の形に残したものである(注5)。この模型の縮尺は約8分の1と想像され(注6)、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7)。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8)。

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ヶ所)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(注9)。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10)。

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11)。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12)。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歩廊間の殻面に比べて急なため、殻面の中央を登る階段をつくること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階段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、さらに維持や修復も難しかったため、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よ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していると仮定している(注13)。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得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14）。その考察の出発点になったのは、彼の「角形ドーム（経線方向断面は円弧、緯線方向断面は多角形）もまた、殻面の厚さの中に球面を組み込んで構成されている場合には仮柱なしで築くことができる」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たもので、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至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15）。

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もっていると考えた（2）説、注16）。

施工途中における外殻の自立性に役立ったとする3）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17）。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18）。

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（4）説、注19）。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一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。

3. 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の3種を設定した。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。

3.1 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、立体骨組モデルと呼ばれる。この方法は耐震壁のブレース置換法として現在の構造解析でしばしば用いられている。今回対象としているドームでは、a) 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できる

図4 ドーム1/8部分の立体トラスモデルと解析結果（(a)解析モデルの側面図が(g)に対応）

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。図中●印は周方向クラックを示す。

と考えられること、および b) レンガがきわめて密に積まれて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あきらかにそれよりも低いと考えられること、を考慮して、ここで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の効果を考慮した梁部材でモデル化した(図4)。

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、完成状態のモデルの計6通りのモデルを作成した(図4)。完成状態のモデルの節点数は293、部材数は1263である。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に基づく解析も行なった。解析計算は、いわゆる剛性法によるが、引張力が低い(2kgf/cm²を仮定)という組積造構造物の力学的特性を表現するため全部材有効の段階より計算を始め、引張り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。

3.2 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モデルを設定した(図5)。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、モデル化する際にその変化を省略して一様断面とした。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の計2通りのモデルを作成した(図5)。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。

(a) 施工段階 (b) 完成時の変形図
図5 立体有限要素モデル(ロッシの図に加筆(注20))

3.3 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的挙動は、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6、注21)。

図6 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
石材、レンガ間の目地(モルタル)を接合要素で表現。

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7)。施工直後のモルタルは引張力に対して非常に弱い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。また荷重としては面内荷重を考慮した。モデル化にあたっては、前述した目的で次の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11a)。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11b)。解析モデルの節点数は352、要素数は49である。

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11c)。解析モデルの節点数は238、要素数は33である。

図7 弾塑性接合要素を用いた施工上面モデル

図 7 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、表 2 に接合要素の材料定数、図 8 に降伏条件をそれぞれ示す。

表 1 解析に用いた材料定数

ヤング係数	$E = 8.62 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	ポアソン比	$\nu = 1/6$
単位体積重量	$\gamma_D = 1.7 \text{ tf/m}^3$	圧縮耐力	$\sigma_c = 200 \text{ kgf/cm}^2$
	$\gamma_L = 2.0 \text{ tf/m}^3$	引張耐力	$\sigma_t = 2 \text{ kgf/cm}^2$

表 2 接合要素の材料定数

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

図 8 降伏条件

4. 解析結果とその考察

立体トラスモデルの解析結果は図 4 に示され、先端部は施工途中であって周方向の圧縮力を受けるが、その値は工事が進むにしたがって次第に減少し、引張強度 2 kgf/cm^2 を越えた部分に対応してドーム基部からクラックが進行する(図 4 (b) から (f)、●印)。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で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

図 9 完成時(a)および施工途中(b)のドームに発生する周方向クラック
陰影部分が周方向クラックに対応

(図 4 (g))。図 5 (b) に立体有限要素モデルによる完成時の変形図を、図 9 に施工途中と完成時のクラック図をそれぞれ示す。立体トラスモデル同様、先端部は施工途中にあつて圧縮力を受けるが(図 9 (b))、完成状態では同じ部分が引張力を受け、これに対応してクラックが発生する(図 9 (a))。いずれのモデルにおいても、解析によるクラック状況は現状のクラックとほぼ一致した(図 10)。また、立体トラスモデルによる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(図 4 (h))。

施工上面モデルの解析結果は図 11 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 11a)。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の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 11b)。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 11c)。この解析結果に対応し、1420 年のドームの計画案でブ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注目される。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 22)。

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るドームの軽快さ)

また施工上面の応力状態に注目すると、図 11 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。

図 10 現状のクラック図(注 23)

(a) レンガ造水平アーチを含まないモデル A
(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 B
(内外殻に圧縮リング想定)

(c) 外殻を取り除いたモデル C
(内殻に圧縮リング想定)

図 11 施工上面モデルによって求められた応力図

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・バットISTA・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 24）。したがって、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。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。

5. まとめ

本研究では、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、1)主リブ、副リブを結びリング説、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得るために幾何学的に設置したとする説、を比較検討するとともに、新たに構造解析によりその構造的機能を施工途中における外殻の自立性に役立ったとする説 3)と推定した。本研究で得られた結果を列記すると、

- 1) 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リングを形成すること、
- 2) 完成時のドームではフープ方向の圧縮力が生じないこと、
- 3) ドームは外殻なしでも成立すること、
- 4) 内殻壁の厚さは圧縮応力状態から判断される 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こと、

である。今後は、新たに構造解析により一部を人々の力学的直感あるいは力学的経験に基づき提唱されている歴史的建築物の構造特性に関する通説の理論的根拠をあきらかにするとともに、これらの貴重な建築物を保存するための学際的研究を展開していきたい。このことは、文化の中核をなす歴史的建築物を世界遺産委員会が世界遺産条約の「世界遺産」に指定して保存しようというユネスコの活動動向を反映しているともいえる。

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きました。心から感謝致します。また、フィレンツェ大学建築学部のサルヴァトーレ・ディ・パスクワー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きました。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致します。

注

- 1) Saalman1980 (参考文献参照, 以下同様), Guasti1887
- 2) Saalman1980, p.244
- 3) Saalman1980, p.107
- 4) Guasti1857, p.28 資料 51。以下 Guasti1857 の資料番号には G を付す。
- 5) “Qui appresso faremo menzione di tutte le parti che si contengono nel modello fatto per esempio della Cupola maggiore”(G51)
- 6) Saalman1980, p.62
- 7) 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 Brunellescho dè avere lire cinquanta, soldi quindici, che sono per parte di legniam e per manifattura 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 giglio, 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、渡金は外殻稜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。
- 8) “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、Vasari1967, 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。
- 9) Saalman1980, p.74-77, G52, G75
- 10) “Anchora, che sopra i cardinali degli uscuioli 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 non rotto, si muri di mattoni in atto d'arco, di grossezza quanto è la detta Cupola di fuori, e su a alto braccia uno o circha. Et se mai paresse che detta agiunta mostrasse rustica a l'ochio, o impedisse l'andito e schale, si possa, fatto la Cupola, disfare detta agiunta, acciocchè con più sicurtà si possa guidare a murare la Cupola in sino alla fine.”(G75)
- 11) 1423 年 8 月 27 日, “Stantiaverunt Filippo ser Brunelleschi, inventori et ghubernatori maiori Cupule, pro pluribus artificis per eum factis et fiendis in dicta Opera; et maxime pro novo modello per eum ad presens tradito et dato dicte Opere supra chatenam magniam ligaminis dicte Cupule, et per ipsam ad perfectionem conducendam; in totum, flor. auri centum, stantiatos per consules Artis Lane et operarios, dicta die.
A Filippo di ser Brunellescho fiorini cento d'oro in qu., gli si donano per faticha durata per l'Opera in trovare el modello della chatena s'è mettere su nella magore Chupola, e per chondurlla a perfezione, e per più altri artifizii per lui fatti nella detta Opera; coè, che dè fare: chome trovare el modo chome deono stare e lumi alla Chupola, e chome dè stare la chatena de' macinghi, e chome dè stare le creste in sulla Chupola.” (AdO, II ,4,9,c.68; G177; Saalman1980, p.262, Doc.190) ; Saalman1980, pp.119-120
- 12) Saalman1980, p.88
- 13) Mainstone1977

- 14) Alberti1485, III, xiv; 相川 1982
- 15) Sanpaolesi1941
- 16) Saalman1980, p.87
- 17) Saalman1980, Cupola, Analytical Plan View, G.B.Nelli(pl.XII)
- 18) Mainstone1977
- 19) Settle1978
- 20) Rossi1982, p.52
- 21) 加藤 - 日高 - 青木 1986
- 22) “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 da piè braccia 11/4, e piramidamente segua, che insino all'occhio rimanga braccia 2/3.”(G51)
- 23) Rapporto1985 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、トリブーナ・モルテ、ピア、身廊に分けて詳しく図示されている。
- 24) Alberti1485, III, xiv; 相川 1982

参考文献

- 1) Alberti1485; Alberti, L. B. : De re aedificatoria, Firenze, 1485
- 2) Guasti1857; Guasti, C. : La Cupola di Santa Maria del Fiore illustrata con i documenti dell'archivio dell'opera secolare, Firenze, 1857
- 3) Guasti1887; Guasti, C. : Santa Maria del Fiore, La costruzione della chiesa e del campanile secondo i documenti tratti dall'archivio dell'opera secolare e da quello di stato, Firenze, 1887
- 4) Mainstone1977; Mainstone, R.J. : Brunelleschi's Dome, The Architectural Review, cLxii, pp.157-166, 1977
- 5) Rapporto1985 : 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, 1985
- 6) Rossi1982, Rossi, P. A. : La Cupola del Brunelleschi, Bologna, 1982
- 7) Saalman1980; Saalman, H. : Filippo Brunelleschi, The Cupola of Santa Maria del Fiore, London, 1980
- 8) Sanpaolesi1941; Sanpaolesi, P. : La cupola di Santa Maria del Fiore, Rome, 1941
- 9) Settle1978; Settle, T.B. : Brunelleschi's Horizontal Arches and Related Devices, Annali dell'istituto e museo di storia della scienza di Firenze, Anno III, Fascicolo 1, pp.65-80, 1978
- 10) Vasari1967; Vasari, G. : Le Vite, ed. By Paola della Pergola, Luigi Grassi, Giovanni Previtali, Novara, Istituto Geografico de Agostini, 9 vols, 1967
- 11) 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
- 12) 青木 1991 ; 青木孝義 : サンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂交差部円蓋の構造特性と架構法に関する研究, 東京大学博士論文, 1991.3
- 13) 青木 1992 ; 青木孝義 : 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, 長崎大学工学部研究報告, 22 巻, 39 号, pp.169-186, 1992.7
- 14) 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, pp.50-59, 1986.12
- 15) 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, pp.25-36, 1960

(1997 年 7 月 25 日原稿受理, 1998 年 1 月 16 日採用決定)