

Blue Ocean Domeの構造設計

Structural design of blue ocean dome

伊藤 潤一郎*1、滝口 雅之*2、筑帛 啓太*3

1. はじめに

本プロジェクトは2025大阪・関西万博の企業パビリオンとして建てられるブルーオーシャンドームで、建築は坂茂建築設計である。建物規模は約2500m²の1階建てである。構造設計はArup、紙管の実験は東京電機大学の笹谷研究室、CFRPの実験は豊橋技術科学大学の松本研究室、竹集成材の実験は滋賀県立大学の陶器研究室にて行った。

2. 構造概要

敷地は埋め立て地であり、万博協会からは「2.5m以上の掘削禁止」および「地盤沈下への配慮」が求められている地盤だった。平板載荷の結果から地耐力は50kN/m²以上が確認できたが、20mまたは40mスパンのドームを杭なしで実現するには軽量の構造躯体が必須であった。そこで3つの新素材を採用した。1つ目は紙管のドームであり、これまで紙管を構造材に用いた建築事例は国内で3件しか存在しない。次にCFRP（炭素繊維強化プラスチック）のドームである。CFRPは旧建築基準法38条が有効であった時期に東レ株式会社が屋根の2次部材として実現した例が2件ある。しかし、今回のように水平力を負担する主架構として実用化されるのは、国内では初めてとなる。3つ目は、竹集成材を利用したドームだ。竹集成材を利用した建物を国内で実現した例はなく、強度も特性も明確ではなかった。各ドームは基礎を含めエキスパンションジョイントによって独立したドームとした。

3. 基礎

一般的な建築では上部構造がRC・鉄骨・木造にかかわらずコンクリートを使用した基礎とするケースが多い。これは基礎の耐久性と地盤沈下に対する不等沈下対策、浮き上がり防止などが理由となる。今回は、万博終了後に移築することを前提としていることから、鉄骨基礎を採用した。鉄骨基礎梁と板厚75mmの鋼板による構成である（図-1）。接地圧を削減させるためには鉄骨基礎は大きなメリットを持つが、建物は滑動や浮き上がりにも対応できるよう設計する必要がある、バランスが重要である。浮き上がり・滑動を考慮し、鉄骨鉄板基礎の上に土を500mm程度乗せる計画とした（写真-1）。

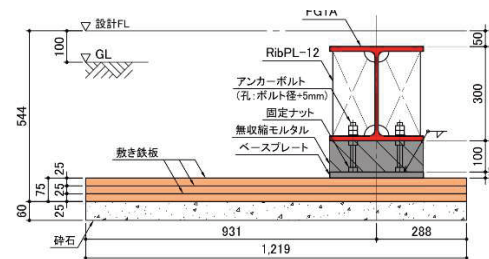


図-1 鉄骨基礎詳細図



写真-1 鉄骨基礎 施工状況

*1 ITO Junichiro : Arup

*2 TAKIGUCHI Masayuki : Arup

*3 TSUKUHJI Keita : Arup

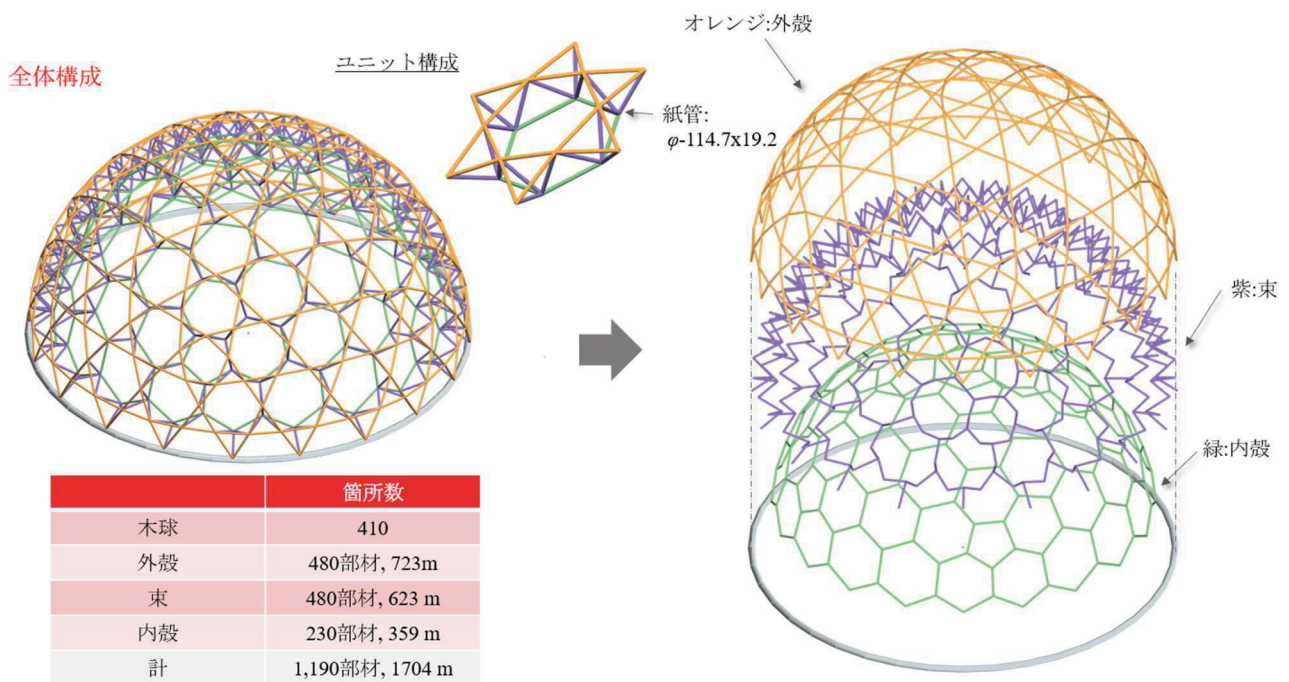


図-2 紙管ドーム 部材構成図

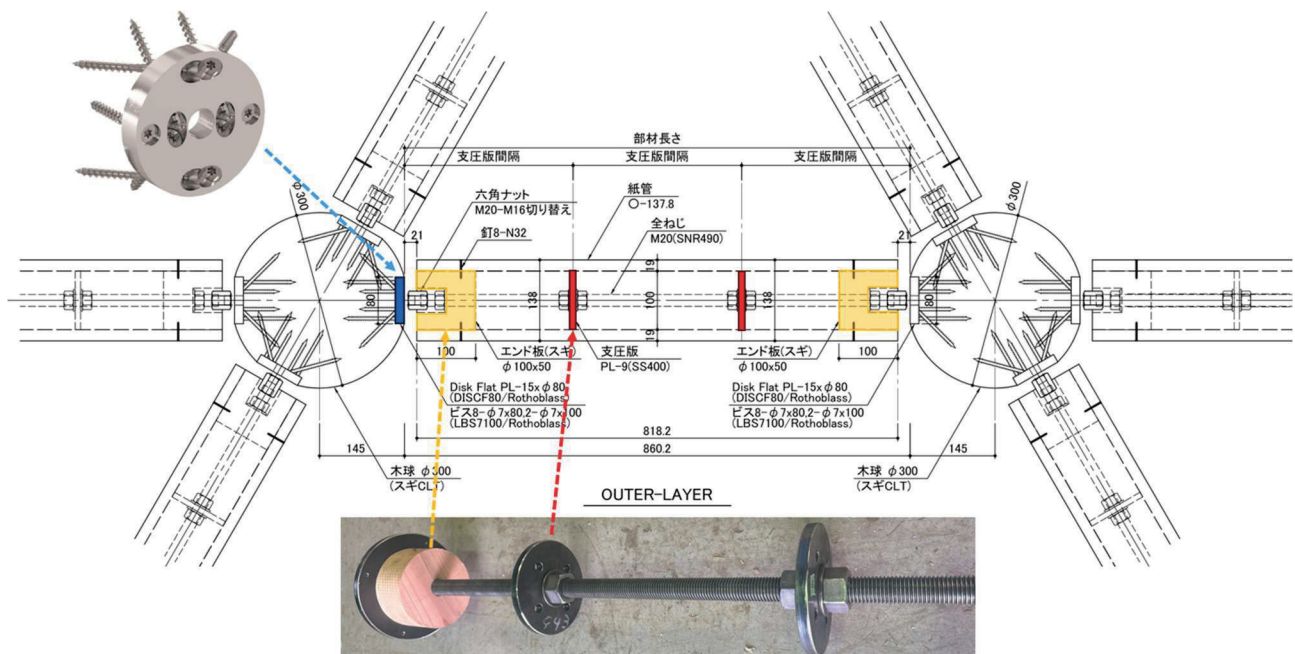


図-3 紙管ドーム 部材詳細図

4. 紙管ドーム

紙管は坂氏が過去に数多くの実証実験を行っていることから、その構造的特性は理解できていた。紙管は100%再生紙によって作られることから、環境配慮の側面では最高レベルである。しかし、大スパンを実現するうえで問題となるのは、紙管の耐力が低い点である。圧縮耐力が木材のおよそ1/10程度しかない。今回は長スパン化を目指しダブルレイヤーのノード型トラスアーチ屋根で20mスパンを実現することとした。

ジオメトリーは外殻を三角形+六角形、内殻は六角形としている。20mスパンをトラス構成としても紙管で構成させることは容易ではなく、紙管内部に13mmまたは16mmの鉄骨を挿入し、紙管が座屈補剛として機能する構成とした(図-2, 3)。紙管を直接構造物としなかった理由は、紙管は湿度に敏感で、湿度変化による伸縮応力で紙管自体が大きな応力を受けるためである。接合部(木球)は実験の結果CLTを採用した。1970年の大阪万博お祭り広場で採用されたノード型トラスの2025

年版と考えている。木球には様々な方向から応力が加えられるため、素材の選択に頭を悩まされた。実験の結果、CLTのみが必要強度を満足できたため、木球はCLTを利用し、鉄骨との接合部は斜めビスを多用したディスクフラット (Rotho Blaas 社) を使用している。東京電機大学の笹谷研究室には紙管の材料実験、紙管と鉄骨のハイブリッド部材の圧縮耐力試験、CLT接合部の引張試験 (写真-3)、CLT接合部のせん断試験を依頼した。

紙管の材料実験の結果を表-1に示す。引張強度は実験をするのが困難かつ、純引張を期待する部材がないため、圧縮耐力と同等とした。曲げ強度は 18 N/mm^2 と木に近い耐力を示す (表-1)。ヤング係数は木の半分以下である。紙管は原紙と呼ばれる紙の強度によって左右されるが、過去の知見からSTKという原紙を採用している。紙管の特徴は湿度に対して敏感であるということである。図-4に含水率と紙管軸方向の寸法変化率を示す。平均的な含水率が8%程度とした場合、含水率が1%変化すると長さが0.1%変化する。これは構造部材として設計するにはかなり大きな変位である。このことから、ドーム構造のような閉鎖した軸力系の構設計画に適していないと判断し、紙管は座屈補剛として役割をもたせ、

軸材に鉄骨を配置した。

座屈補剛としての紙管の利用も初の試みである。日本においては座屈補剛ブレースが多く建物で採用されており、多くの知見がある。重要なポイントは紙管が鉄骨の座屈力に対して耐えられるか、剛性が十分かということであった。最終的に紙管114mm + 鉄骨13mm、紙管137mm + 鉄骨16mmという組み合わせで圧縮耐力試験を行った。結果として、@300mm以内に支圧版を配置した試験体においては、鉄骨の理論耐力と同等以上の性能を発揮できることを確認した (写真-2)。

木球の実験はCLTか超極厚合板の2パターンで耐力検討を行った。超極厚合板は、面内方向の耐力が高いと予想し実験を行ったが、結果として、面外方向の耐力が想定以上に低いことが明らかとなった。CLTについても面内耐力より面外耐力のほうが小さかった。しかし、CLTの面外耐力は設計応力より十分に大きいことが明らかとなったことから、木球はCLTを使用することとした。

5. CFRP ドーム

CFRPは、鉄を上回る強度を持ちながら、重量は数分の1に抑えられるという特性を有する素材である。一方、



写真-2 紙管ドームの部材実験 (左から紙管曲げ実験・圧縮実験・部材圧縮実験)

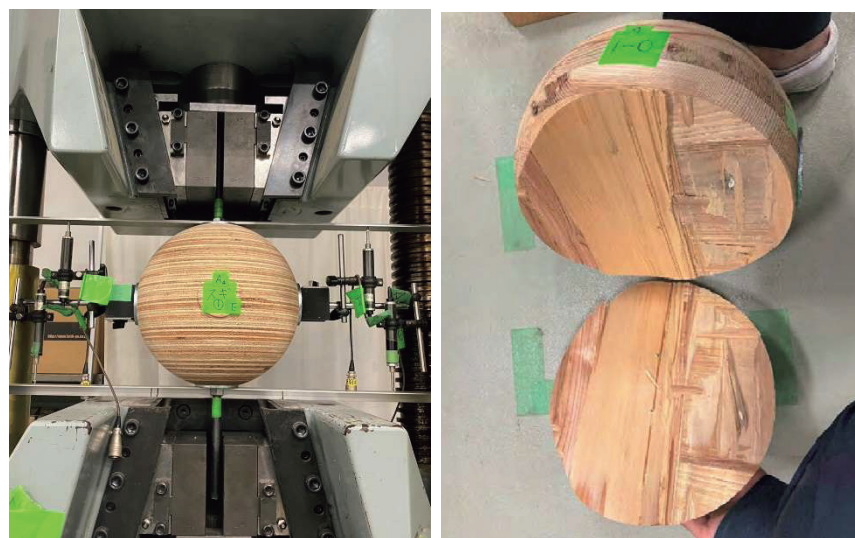


写真-3 紙管ドームの木接合部実験 (左：極厚合板 (不採用)、右：CLT (採用))

表-1 紙管の材料強度

	F値 (N/mm^2)	長期 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
圧縮	8.88	2.73	2.19
引張	8.88	2.73	
曲げ	18.37	5.65	
せん断	3.47	1.07	

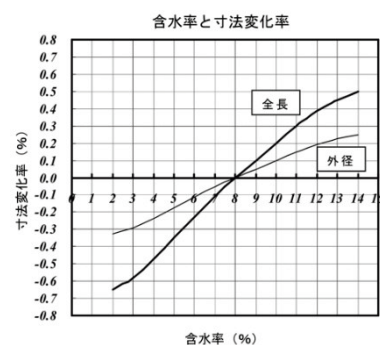


図-4 紙管の含水率と寸法変化率

構造構成

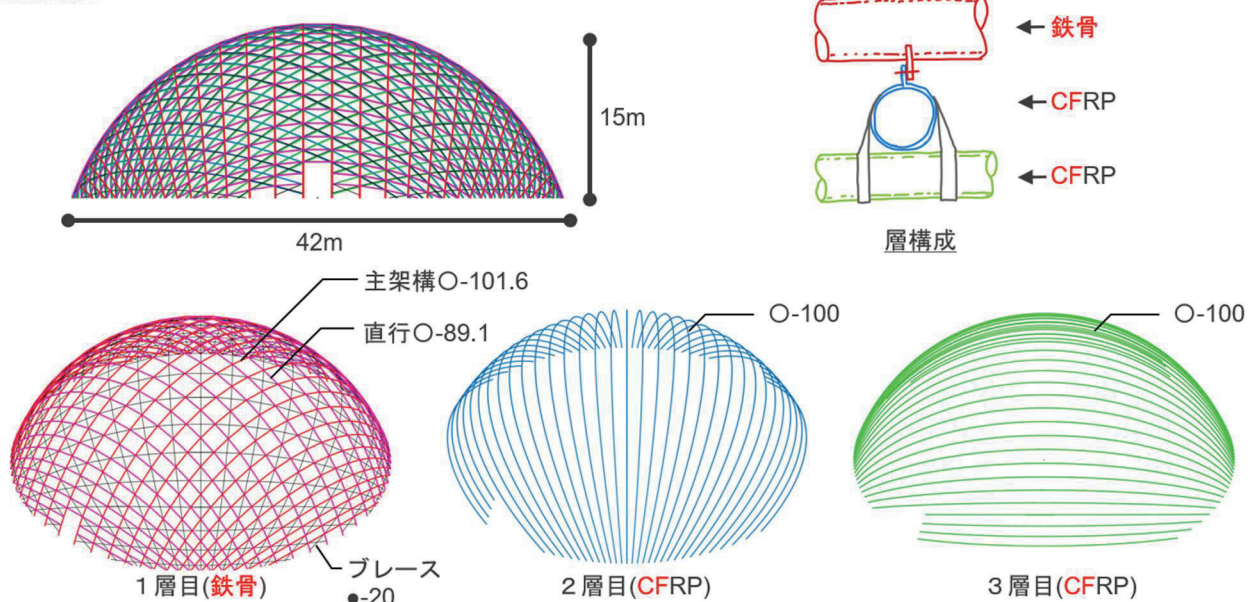


図-5 CFRPドームの部材構成

建築用途での利用が難しい理由としては、耐熱性の低さが挙げられる。火災時の高温環境における構造耐力の低下に加え、空調が困難なドーム型建築などでは、室温の上昇によっても同様の影響が生じる可能性がある。そのため、設計時には温度変化に伴う耐力・剛性の低下を考慮する必要がある。CFRPは素材耐力が明確でないため、東レ・カーボンマジック株式会社に素材実験を、豊橋技

術科学大学の松本研究室に部材実験（曲げ・圧縮・座屈）と接合部の実験を依頼した。

素材実験の結果を表-2に示す。引張強度が最も大きく、曲げ強度と圧縮強度は同等となる。CFRPは断面構成により耐力が変化するため、設計強度に対して十分な剛性・耐力が得られるかどうかについて逐次素材実験が求められる。最終的な積層構成を表-3に示す。素材実

表-2 CFRP 素材耐力

	F値 (N/mm ²)	長期 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
圧縮	486	162	84.37
引張	683	228	
曲げ	486	162	
せん断	20	7	

表-3 CFRP層構成

2 (0/90)方向炭素繊維クロス材	TORAY
1 方向炭素繊維NCF材	CHOMARAT
2 (0/90)方向ガラス繊維メッシュ材	CHOMARAT
1 方向炭素繊維NCF材	CHOMARAT
2 (0/90)方向炭素繊維クロス材	TORAY

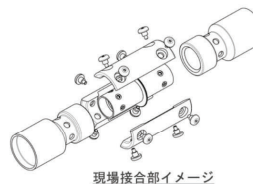
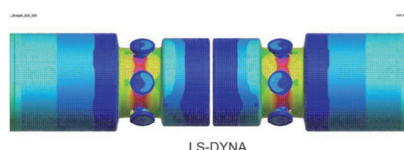


図-6 CFRPドームの接合部構成イメージとFEM解析



写真-4 CFRPドームの部材実験および接合部実験

験を行った後、素材実験の耐力と同等以上の耐力が部材で得られることを確認するため部材実験を行った。また、接合部にはカプラーによる支圧接合を採用した。その剛性および耐力を確認するため、接合部試験も実施している(写真-4)。

接合部についてはCFRPに適し、移築が可能な案とする必要があった。CFRPは繊維で構成され、樹脂で成形されていることから摩擦接合を採用することが難しい。最終的に、せん断力伝達のためのインナーカプラー、軸力伝達のための3枚のスプライスプレートで構成された継ぎ手を採用している。

CFRP同士はベルト接合により一体化されており、接合部の滑り耐力を確認するための試験も実施した。40mスパンのドームでありながら、鉄骨は 15kg/m^2 、CFRPは 4kg/m^2 と超軽量で設計できたことはCFRPという材料の特殊性が表れていると考えられる。

6. 竹集成材ドーム

竹を利用した建築は東日本大震災の後に滋賀県立大学の陶器先生によって2件実現されている。竹は四国や九州地方に広く分布しているが、適切に管理されていないケースも多く、資源としての有効活用が求められている。また、竹は油分を多く含むことから一般的な集成材のようにフィンガージョイントにて板継ぎをするのが極めて困難である。最終的に本プロジェクトは万博終了後に移築する予定であることから、接合部はすべて機械式とすることを条件とした。2m程度の1方向曲げ集成材を作り、機械式継ぎ手により竹を連結させる計画である。竹集成材の実験は滋賀県立大学の陶器研究室が行い、ヤング係数・比重・各種許容応力度を定め、接合の実験も行った。

構造の構成は3方向で6層のアーチ構造とした。集成材の断面は厚さ48mmで幅185mmである。一般的な木断面の場合、105mmや120mmのような断面が最小となるが、竹は1枚のラミナが幅20mm、厚さ4mmと非常に小さく、更に、材料が非常に高価であるため、接合部や応力・座屈の検討を行い、最小断面を採用した。集成材を6レイヤー積層させ、隙間ができる部分には束を挿入している。2m以上の竹集成材をフィンガージョイントで作ることを試みたが、竹は油分を多く含むことから接着方法に問題があることが分かった。そのため、1方向曲げで長さ2mの竹集成材を作り、現場で継ぐ方式を採用した。接合部の剛性も重要となるため、実験にて接合部の剛性を確認して、解析モデルに反映している。

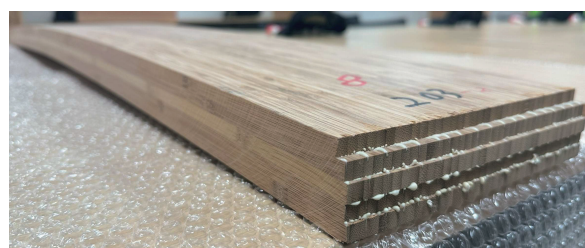


写真-5 1方向湾曲竹集成材製作過程

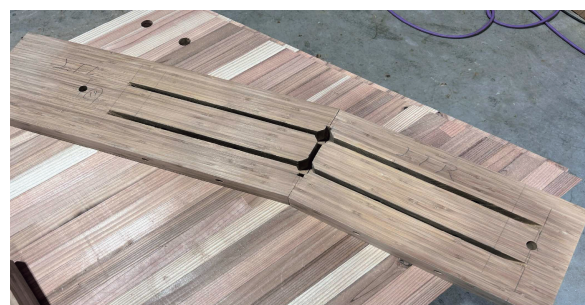


写真-6 スリット加工-1



写真-7 スリット加工-2

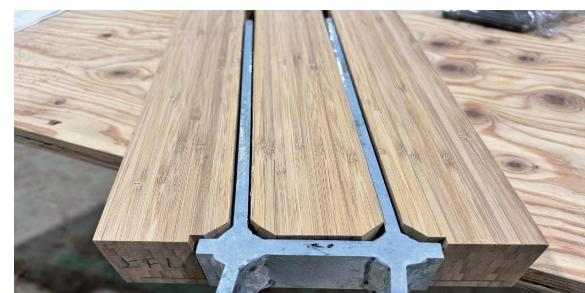


写真-8 鋼板挿入



写真-9 接合部モックアップ

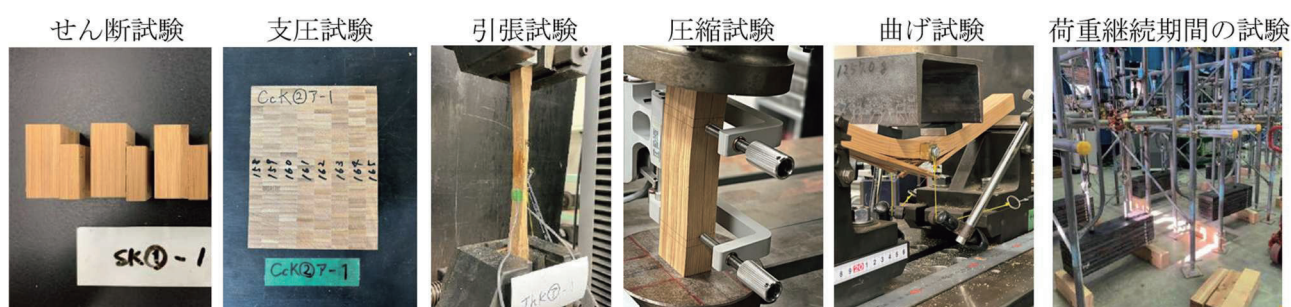


写真-10 竹集成材の材料実験

竹の材料実験の様子を写真-10に示す。竹集成材は引張耐力が最も高く、曲げ耐力・圧縮耐力という順番で耐力が低下していく。当初竹に含まれる節により耐力が低下すると考えていたため、節の有無による耐力低下についても検討を行っている。竹の材料実験方法はISOにて規定されているが、実験がうまくいかない方法もあり、適宜木の実験手法を織り交ぜながら進めた。マディソンカーブに対する差を確認する必要もあり、半年以上に及ぶ実験を行った。

7. 性能評価

性能評価はGBRCに依頼した。建物の完成期限や多数の実験量を踏まえ、事前協議は半年以上にわたった。GBRCの協力を得られたことで、実験内容および評価方法の検討も円滑に進めることが出来た。

8. 現場

現場では各ドームが実際に施工的に問題ないか、各部ディテールが構造・意匠的に満足できる状態にあるかを詳細に検証した。紙管ドームについては木球同士を紙管部材で緊結するが、端部がねじ式となっているため、許容誤差が非常に少なく、設計図通り建て方が出来るかの検証を行った。CFRPについては1層目の鉄骨パイプ分岐接合部に対して溶接技量付加試験を行った。鋼管は100φ程度と小さく、裏当てを設けられない。一方で、接合部には曲げモーメントおよび軸力が発生するため、設計応力に対して十分な健全性を担保する必要がある。そこで、本構造ではほぼ完全溶け込み溶接を採用し開先を設け、裏なみがでる溶接とした。2層目と3層目のCFRPはベルト接合とした。間にピンを配置することで局部応力の低減を図り、パイプに発生する力を受け流すことが出来るような適度な強度・剛性を持つ接合部を目指した。CFRP間に滑りが生じるため、滑り耐力の向上を目的として、接合部にゴムを挟んだ。ゴムの種類によって、耐力および剛性がどの程度変化するかを確認した。



写真-11 CFRPドーム モックアップ



写真-12 紙管ドーム モックアップ



写真-13 竹集成材ドーム モックアップ

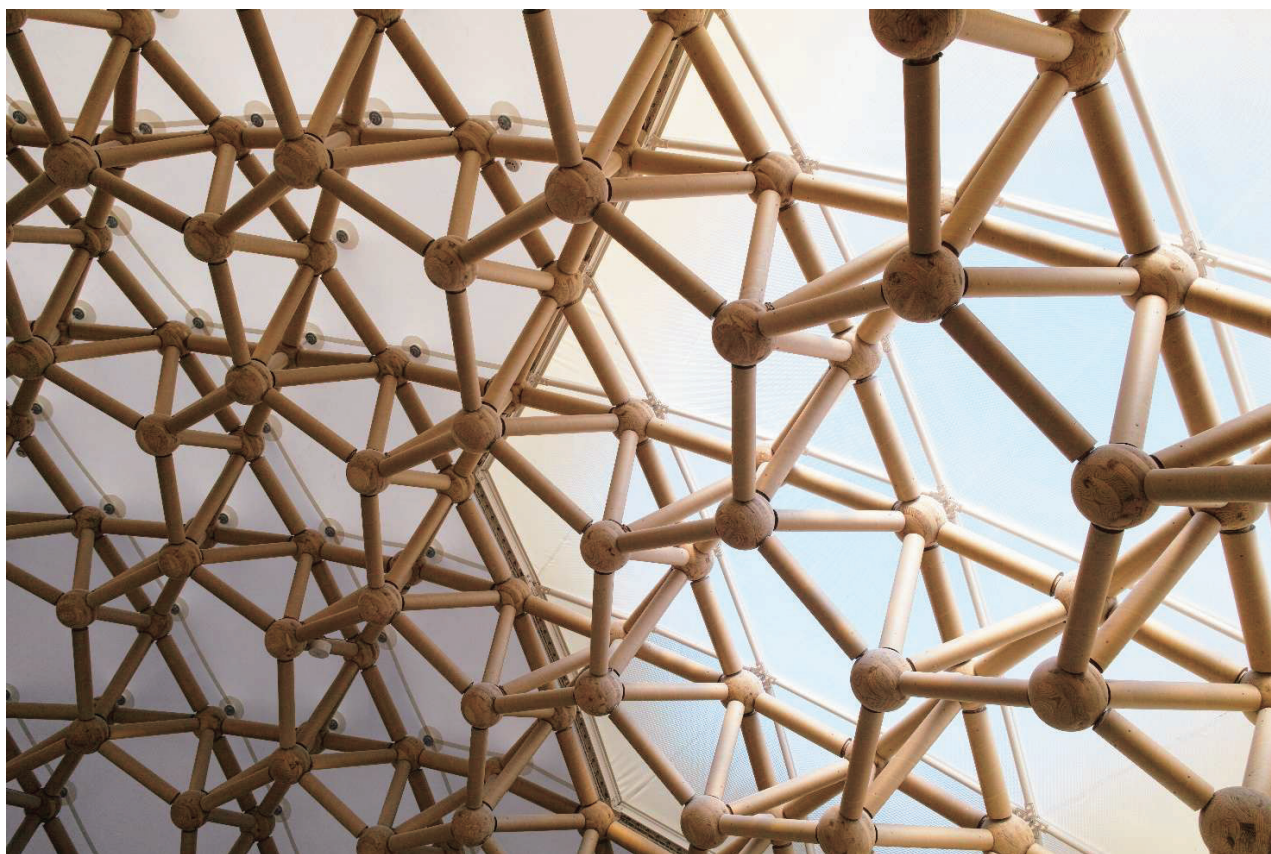


写真-14 紙管ドーム 内観



写真-15 竹集成材ドーム 内観

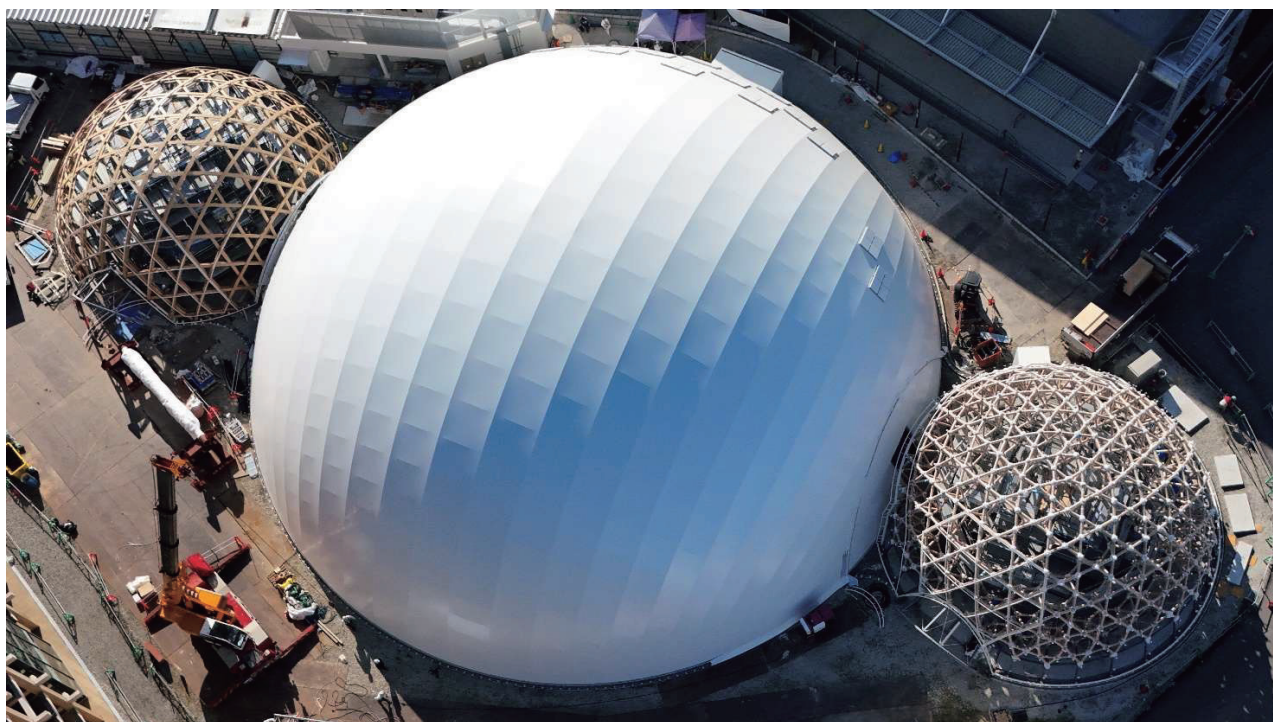


写真-16 建方中写真

9. まとめ

建築は新しい分野を取り込みつつ、環境へ配慮した建築の実現に舵を切り、構造についても環境配慮型デザインが重要視されている。新たな試みを行う場合、どうしても法律という壁が存在し、容易に実現出来ないことが実情ではあるが、本件のように大学と共同で多くの実験を行い、性能評価を経て新しい可能性を示すことも可能である。本プロジェクトは万博完了後にモルディブに移築することが決定している。CFRPは炭素繊維で構成されている。軽量の部材で構成することは移築時に発生するCO₂を削減することも可能となることを期待している。

【執筆者】



*1 伊藤 潤一郎
(ITO Junichiro)



*2 滝口 雅之
(TAKIGUCHI Masayuki)



*3 筑帙 啓太
(TSUKUHIJI Keita)

当施設の確認検査及び建築技術安全審査は、(一財)日本建築総合試験所が実施しました。



写真-17 紙管ドーム建方中



写真-18 竹集成材ドーム建方中