

## 論文・報告

## 福岡ドームの設計・施工

Design and Construction of FUKUOKA Dome

高田和守\*  
Kazumori TAKADA梅澤宣雄\*\*  
Nobuo UMEZAWA森井一茂\*\*\*  
Kazushige MORII川原正明\*\*\*\*  
Masaaki KA WAHARA高橋泰文\*\*\*\*\*  
Yasufumi TAKAHASHI湯田誠\*\*\*\*\*  
Makoto YUDA

Fukuoka Dome is a multipurpose facility, for which the large scale opening and closing type roof structure was adopted for the first time in Japan. For the steel frame roof structure, the lamellar truss structure was adopted, in which member stress acts relatively uniform, therefore the number of panel points and the number of members required are less than other structural types, and the executability, functional and economical efficiency are excellent. Prior to the manufacture, changes in the structure are made on the method of arranging the members of subtrusses, on the structure of the panel points where radial and circumferential trusses intersect, and on the structure of column bases and purlines. Those outlines are described in this report. Moreover, the welded parts of the circular column cast steel nodes (SCW 480) used for the panel points become the problem of welding of different materials. Therefore, the welding performance tests using small blocks and full size specimens were carried out, and it was confirmed that the joints possess the sufficient performance under the conventional working method and control criteria. This investigation is also summarized here.

Keywords : Fukuoka Dome, steel flame, welding

## 1.はじめに

福岡ダイエーホークスの新しい本拠地球場として建設中の「福岡ドーム」は、野球以外にも各種のスポーツ、コンサートなど多目的な利用に対応できる。直径222 m のドームは、わが国初の大規模開閉式の鉄骨屋根構造である。

当社製作は、屋根鉄骨の2/3(約6 600 t)であるが、

製作を考慮しての構造変更(VE)および格点部に使用する溶接構造用鉄鋼(SCW480)の溶接性能確認試験を行った。

本報告は、それらの結果をまとめたものである。

2.建築概要<sup>1)</sup>

工事名称：福岡ドーム

所在地：福岡市中央区地行浜1-29

表-1 架構形式の特性比較<sup>2)</sup>

形態	ラメラドーム	パラレルドーム	ジオデシックドーム	シェベトラドーム
力の流れ	軸力一様タイプ	軸力増加タイプ	軸力一様タイプ	軸力増加タイプ
部材応力の均一性	○	×	○	×
面外方向安定性	○	△	○	△
境界	○	○	×	○
加工性	部材種類数 部材JOINT数	○ 少	○ 少	× 多

\*川田工業㈱生産事業部四国工場次長 \*\*川田工業㈱生産事業部次長 \*\*\*川田工業㈱生産事業部四国工場生産技術二課課長

\*\*\*\*川田工業㈱生産事業部四国工場生産技術二課 \*\*\*\*\*川田工業㈱生産事業部鉄構設計課 \*\*\*\*\*川田工業㈱技術本部溶接研究室

施 主: (株)福岡ダイエー・リアル・エステート  
 設計・施工: (株)竹中工務店・前田建設工業(株)共同企業体  
 工 期: 平成3年4月～平成5年3月(予定)  
 建築面積: 72 740 m<sup>2</sup>  
 ドーム直径: 222 m  
 最高高さ: 地上84 m  
 鉄骨重量: 9 900 t (当社製作分6 600 t)  
 鉄骨材質: SM480A, B (メイン部材)

### 3. 屋根鉄骨構造

屋根鉄骨は、ラメラトラス構造と呼ばれるもので、ドームの平面を中心から約30度ずつに分割した放射状のトラスと同芯円方向の周方向トラスで、三角形のグリッドを構成する架構形式である。ラメラ構造の特長としては、

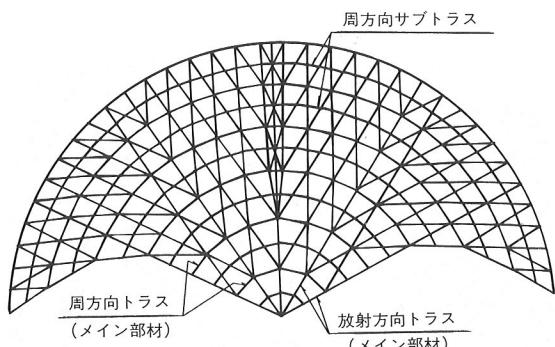


図-1 平面図

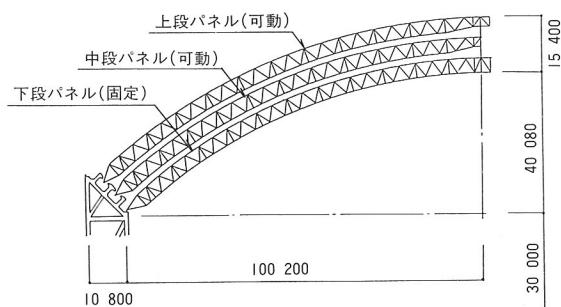


図-2 軸組図

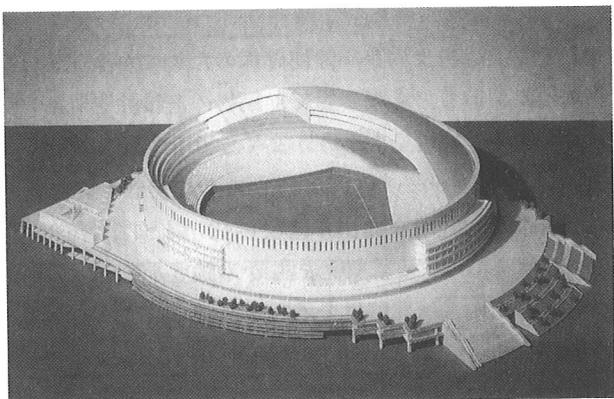


写真-1 完成予想写真

部材応力が比較的均一に作用すること、また、他の構造形式より格点数、部材数が少なくなることが挙げられる。表-1に示すように架構形式の特性比較を行った結果、施工性・機能性・経済性を考慮してラメラ構造に決定された。

開閉形式は、最大スパン221.8 mの3分割したパネル3段で構成された屋根の下段の1枚が固定され、上段と中段の2枚のパネルが旋回移動して開閉する。開閉にかかる時間は20分で、全開時の開口率は60%である。開口時の完成予想写真を写真-1に示す。

意匠的には、円形ドームを3等分した扇形の形状が理想であるが、地震や強風の時にバランスを維持できなくなるおそれがあるため、図-1に示すような安定性のある形状となった。

### 4. 製作を考えての構造変更(VE)

#### (1) 部材配置

メイン部材である放射方向トラス、周方向トラスとパネル受けと、座屈の関係から必要となってくるサブトラスの部材配置方法は図-2に示すように、トラス構成が4mでトラス間隔が1.7 mという15.4 m厚みの屋根鉄骨となるため、綿密な検討を行った。

上段パネル部を例に、図-3に示す部材配置方法を述べ

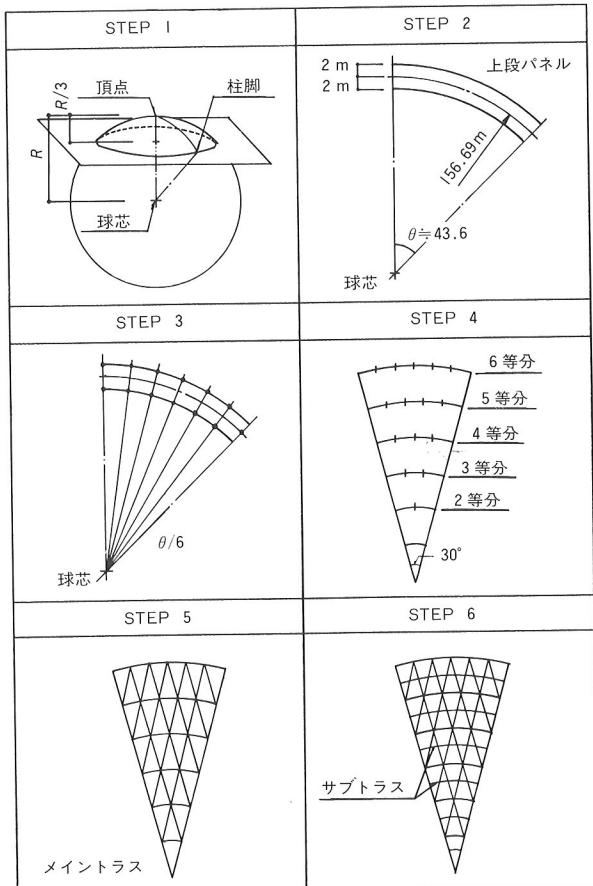


図-3 部材配置方法

る。

- ① 半径  $R=156.69\text{ m}$  の球の、約  $1/3$  の部分に部材を配置する。
- ② 頂点と柱脚の円弧と同芯円に±2mの曲線を上弦材、下弦材とする。
- ③ 頂点・球芯・柱脚の3点からなる角度  $\theta$  (約43.6度) を6等分した交点を格点部とする。
- ④  $30^\circ$ を1グリッドとして格点部位置で水平に切断して、円弧上を各々等分する。
- ⑤ 各交点間を球芯からの円弧で結び部材を配置する。
- ⑥ 周方向にさらに2等分した位置に部材を配置する。

以上のように部材配置方法を決めたが、水平に等分割した各交点に配置するトラスは、平面的な同芯円としての曲率と、球芯方向の曲率を有することになり、部材がねじれてしまう。そこで、平面的な曲率を無視して、球芯方向の曲げだけを考慮することとした。

## (2) 格点部(ノード部)

放射方向トラスと周方向トラスの交差するノード部は平面的に最大7部材、立面まで考えると13部材が集中している。それぞれの平面的な取合い角度は場所により変化しており、球面を構成しているために立面上にも角度変化が生じている。

つまり、すべての部材に対応できるとともに、最大13部材が集中するために、応力がスムーズに伝達される構造でなければならない。

そこで、いくつかの案から表-2の格点構造比較表の3案に絞り、①力学的性状 ②加工度 ③溶接性 ④美観 ⑤経済性 ⑥輸送・建方——の6項目について比較検討を行った。

結果は、力学的性状と加工度および観客席から屋根鉄骨構造が見えるという点を考慮して、美観的にも鋳鋼リング(SCW480)案が総合評価1番となった。

この鋳鋼リングは、すべてのノード部を統一でき、平面的な取合い角度にも対応でき、垂直材を鋳鋼に溶接することにより、写真-2、3のように斜材の立面上的角度変化にも対応が可能である。

ただし、鋳鋼に厚板( $t_{max}=90\text{ mm}$ )を溶接する時の予熱温度等の溶接条件や、割れ、靭性等の鋳鋼の溶接性を確認するために、別に溶接性能確認試験を行うこととして鋳鋼リングの採用に決定した。

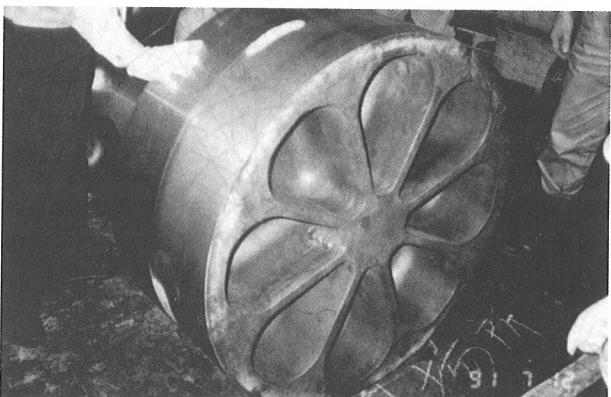


写真-2 鋳鋼リング

表-2 格点構造比較表

	第1案 鋳鋼リング案	第2案 ビルトアップリング案	第3案 ビルトアップ案	◎ 良 ○ 並 △ 不良
平面形状				
立面形状				
力学的性状	◎ 応力の流れがスムーズ	◎ 応力の流れがスムーズ	△ 曲げ加工部の応力伝達が複雑	
加工度	◎ 鋳鋼種類が少ないので大量生産可能	○ 単品数、組付け工数が多い	△ 曲げ加工が多く、組付けが困難	
溶接性	○ 鋳鋼の溶接性の確認必要	◎ 従来の技術で対応できる	△ 開先形状が複雑になる	
美観	◎ リングが同型	○ リング径がやや大きい	○ あまりよくない	
経済性	○ 鋳鋼が割高であるが、溶接長が少ない	○ 溶接長、UTの回数が多い	○ 同型のものが多く、工数がかかる	
輸送・建方	○	○	○	
総合評価	①	②	③	

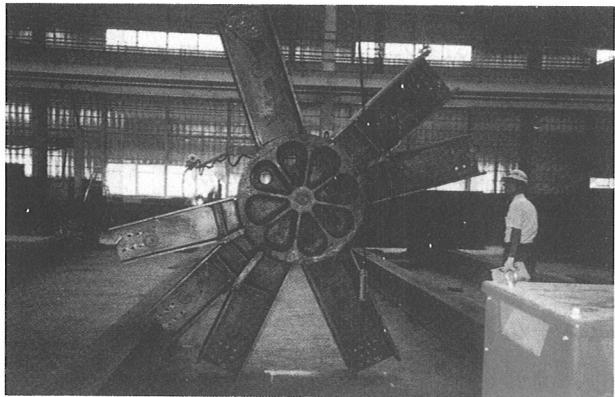


写真-3 鋸鋼リングと各部材の取付け風景

## (3) 柱脚部

可動屋根2枚には、それぞれ24個の支点に駆動台車が12支点、従動台車が12支点配置されている。駆動台車と従動台車の配置については、図-4に示すように反力の小さな部分では車輪の空回りが心配されるため、最も荷重がかかる両端の踏ん張り部を中心に駆動台車を配置している。図-5に示すように、台車は上下左右に反力をとれる構造である。台車の製作は当社の範囲外であるが、脚台座までは製作範囲である。この台座部も、最大8部材が集中する個所であり、開閉式屋根としての最重要部分である。また、精密な機械部分との取合いであるので、製作誤差の許されない部分である。

そこで、当社としては、図-6に示す原設計では工場溶接が困難との判断から、改良案をいくつか考えて最終的に図-7のように変更し、はさみ板の配置を4方向のトラス弦材が干渉しない位置とした。

また、台車間の継ぎ材の配置は、他の部材配置とは異なっていて、台座面は球芯方向を向いているが、図-8に示すように、台車間はすべて同じレベルとしなければならない。つまり、原設計のH形鋼では、2軸方向に曲げる必要がある。

以上の理由より、H形鋼断面(H-400×400×13×21)と同等の断面性能を有するパイプ材であれば、1方向の曲げで2方向の曲率を有することができるので、パイプ材(Pipe-558.8×12.7)を使用することを提案して採用となった。

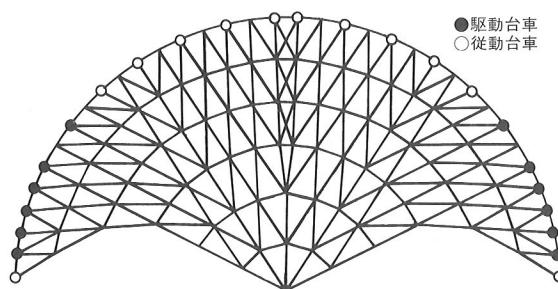


図-4 台車配置図

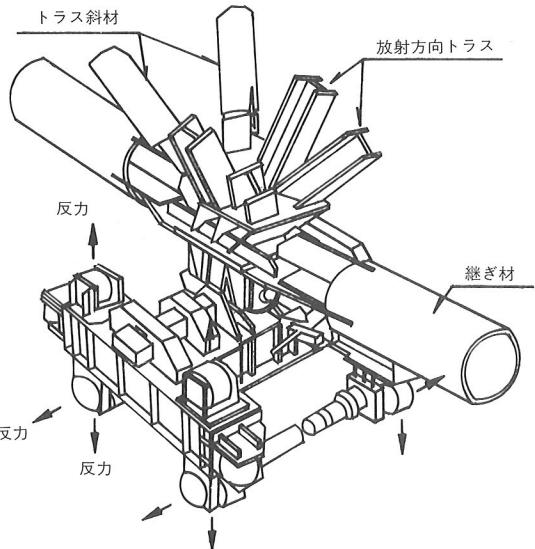


図-5 台車部詳細図

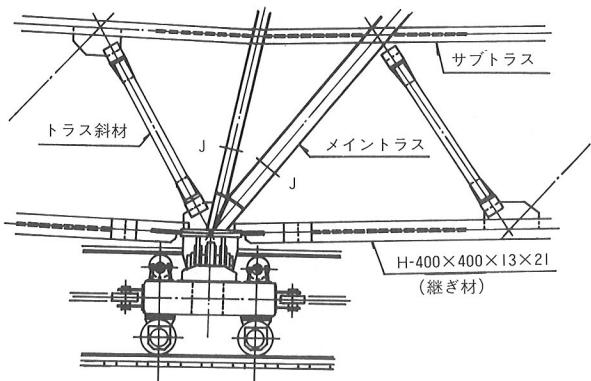


図-6 台車部原設計詳細図

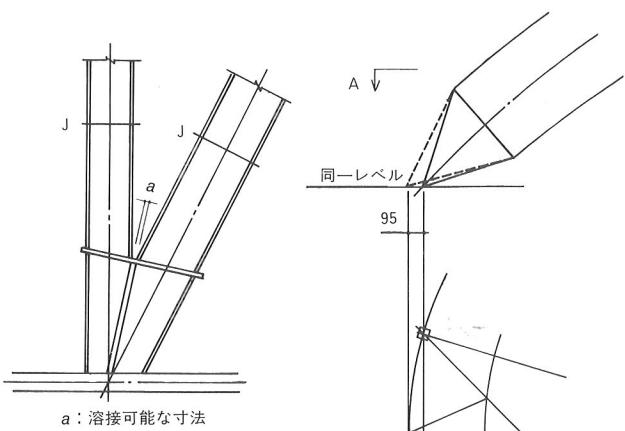


図-7 柱脚部詳細図

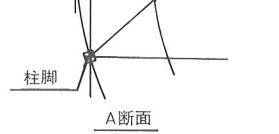


図-8 柱脚トラス詳細図

また、パイプ材を使用することによって、トラス斜材のガセットプレート溶接部も、図-9に示すように比較的容易な溶接形状となった。

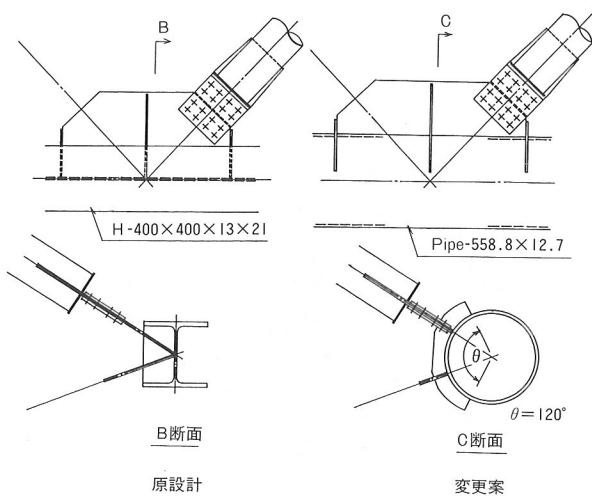


図-9 柱脚トラス斜材詳細図

## (4) 母屋

母屋材および母屋受け小梁の配置は、平面角度30度の1グリッドを取り出すと、図-10のようになる。

母屋材に山形鋼や溝形鋼を使用すると、母屋材の本数が多くなったり、受けピースと母屋受け小梁の部材数も多くなる。

そこで、母屋断面をH形鋼（H-194×150×6×9）として、取付けピッチを3mと大きくした。

しかし、母屋先端が上弦材の芯から300mm上りであるため、メイントラス部材およびサブトラス部材と干渉するところは、母屋材を切断しなければならない。

また、メイントラス、サブトラス上にも母屋材に代わ

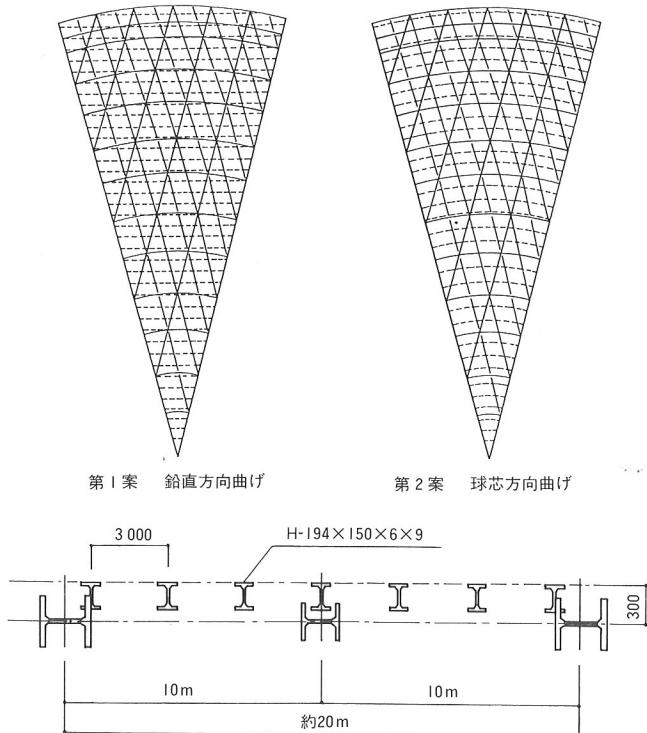


図-10 母屋配置図

る受けピースが必要となる。特に格点部は、図-11のように小さい部材が多く、トラス上弦材の継手部に干渉するところもあり、さらに複雑な取合いとなる。

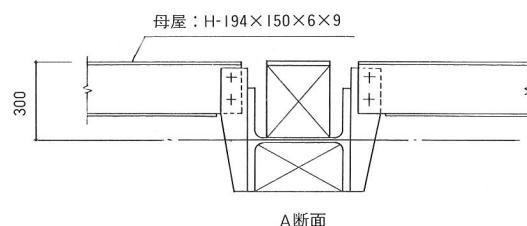
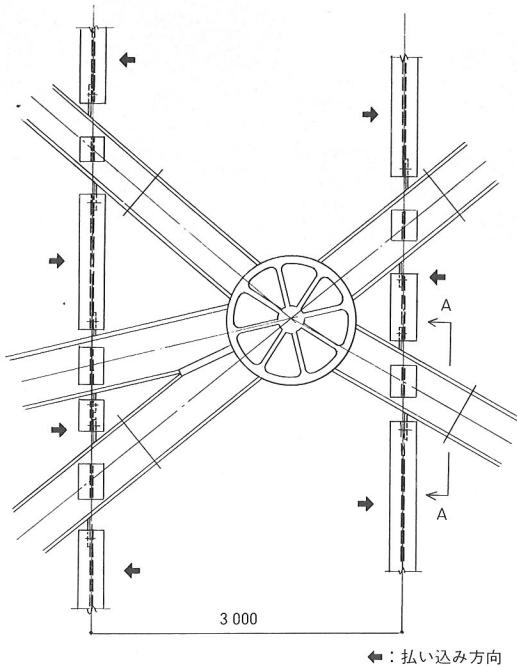


図-11 格点部母屋詳細図

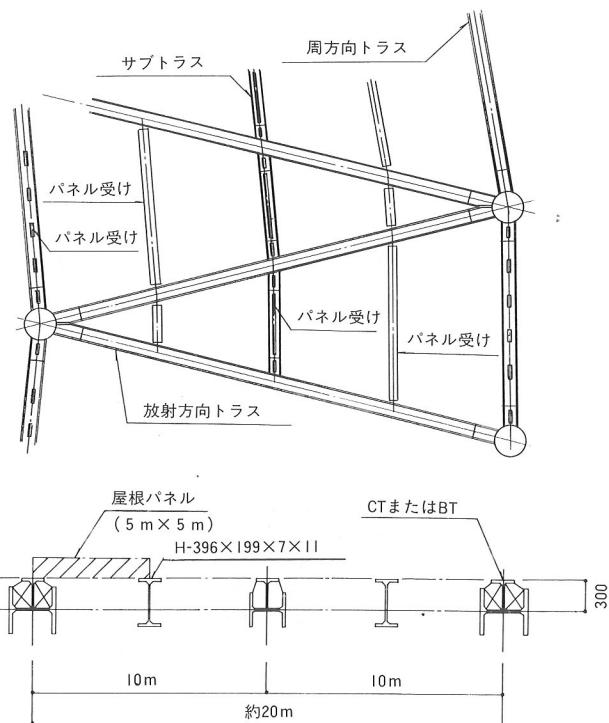


図-12 パネル受け詳細図

さらに、トラス上弦材の平面的角度によって、建方時の払い込み方向が図-11のように統一できないので、部材によって違ってくる。

以上のように、製作上も建方上も困難な構造である。

そこで、屋根仕上材を5m×5mのパネル化して母屋材をなくすことになった。図-12のようにパネル受け小梁(H-396×199×7×11)を周方向のトラス間に配置して周方向トラスに受けピースを取付ける。このように仕上材をパネル化したことによって、複雑な取合部もなく、部材数も少なく、工作図も製作も建方も容易になった。

以上、VE提案の大きな4項目について報告した。今回のVE提案は、ゼネコンの設計段階で行ったものであるので、設計図にそのまま反映された。

## 5. 鋸鋼の品質と溶接性

工場内製作において、特に注目されたのが格点部である。この格点部では、鋸鋼ノード(SCW480)の大型ブロックが適用され、溶接継手部については、仕口部(SM490B)との異材継手となる。溶接に関して事前に行われた検討事項を以下に示す。

- ① 鋸鋼の品質と鋸鋼試作品における $C_{eq}$ (炭素当量)、 $P_{cm}$ (割れ感受性組成)の確認。
- ② 大型ブロックの溶接施工を踏まえた予熱温度の決定。
- ③ 異材継手における溶接継手性能の確認。

以上の検討確認を行うことで、鋸鋼の溶接に関する認識を深めるものとした。

### (1) 鋸鋼の品質

鋸鋼ノードは図-13に示すように、径が1000~1200mm、高さ400mmほどの大きさをもち、内側は中抜きが施された形状となっている。この複雑な形状から部位によっては、鋸造中の冷却速度の差異が品質に与える影響(内部欠陥、引け巣)を無視できないとされた。今回のノード製作を担当した日立金属㈱では、数回にわたり試作テストを行っており、鋸造方法の改善策が検討された。

表-3にJISに基づく鋸鋼の規定を示す<sup>3)</sup>。溶接構造用圧延鋼板(SM材)と比較しても $C_{eq}$ は0.45以下とやや高めに規定されている。また $P_{cm}$ の規定はない。この点に関し、これまでの鋸鋼の実績<sup>4)</sup>( $C_{eq}$ と $P_{cm}$ の相関図)を示したのが図-14である。鋸鋼では、強度確保を考えると $C_{eq}$ は0.38が下限値とされ、この図から $C_{eq}$ が0.38から0.44の範囲なら $P_{cm}$ も0.28以下と傾向づけられることから、良好な溶接性が期待できる。今回の試作品についても、ほぼこの範囲に収まる結果となった。また、試作品についてはロット別に機械的性質の調査も行われた<sup>5)</sup>。結果を図-15に示す。

この結果から、降伏点、引張強度は規格値を満足して

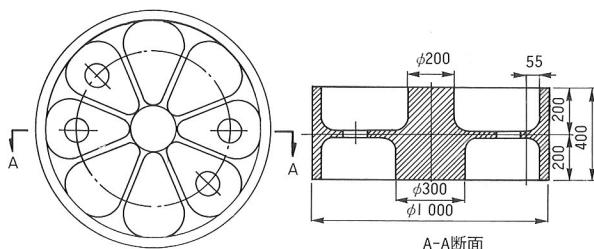


図-13 鋸鋼ノードの形状

表-3 鋸鋼の諸性質 (SCW480)

化 学 成 分 お よ び 炭 素 当 量				
化 学 成 分 (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.22以下	0.80以下	1.50以下	0.040以下	0.040以下
Ni	Cr			
0.50以下	0.50以下			

炭素当量 (%)				
0.45以下				
機 械 的 性 質				
引 張 試 験		衝 撃 試 験		
降 伏 点 N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	引 張 強 さ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び %	試 験 温 度 ℃	シャルビー呼吸エネルギー J (kgf·m) 3個の平均値
275 (28)	481 (49)	20以上	0	27 (2.8) 以上

$$\text{炭素当量} (\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

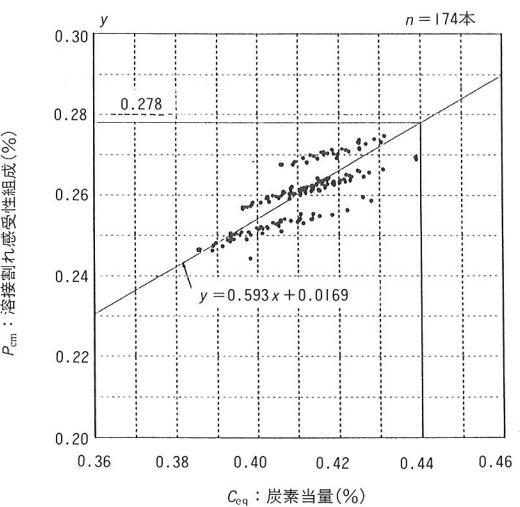


図-14  $C_{eq}$  と  $P_{cm}$  の相関図<sup>4)</sup>

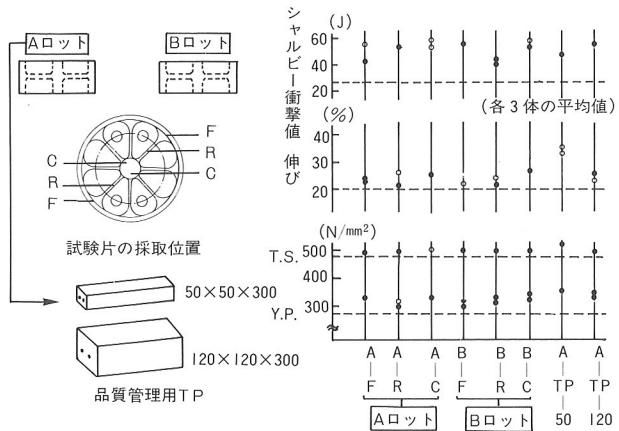


図-15 鋸鋼ノード試作品の機械試験結果の比較<sup>5)</sup>

おりロット間、各部位間の差は小さい値となった。これに対し、衝撃値は比較的バラツキが大きく、その値はSM材によく見られる値と比較してもかなり低い範囲に位置している。

## (2) 予熱

溶接継手部の鋳鋼側が極厚部に位置することから、継手の拘束度を考え鋳鋼の斜めY形溶接割れ試験を行い、予熱条件を検討した。板厚は継手の拘束度が飽和するといわれている下限値<sup>6)</sup>50 mmを採用した。

試験の結果を図-16に示す。このことから50°Cの予熱であれば、いずれの割れも生じない結果となった。50°Cに

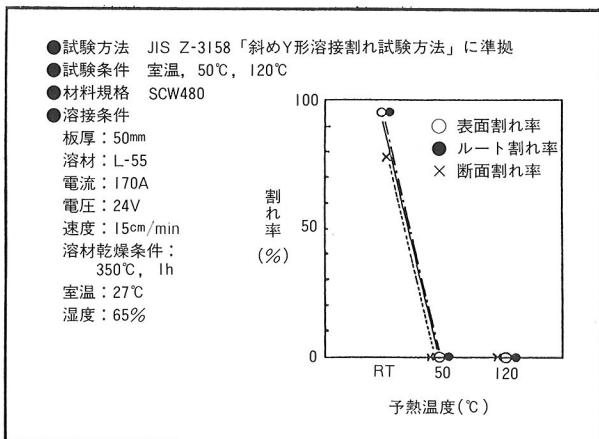


図-16 鋳鋼の斜めY形溶接割れ試験結果

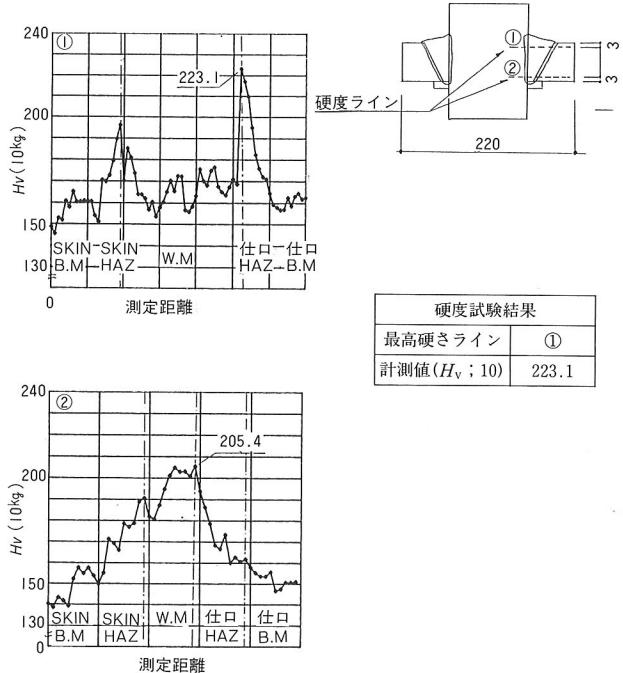


図-18 硬度試験結果（裏当てタイプ、裏はつりタイプ）

については、さらに繰り返し2体の試験体で試験を行ったが、いずれも1回目と同様の結果が得られた。

## (3) 溶接施工試験

### a) 小型ブロックによる溶接施工試験

鋳鋼を含む溶接継手性能の確認を行うために、CO<sub>2</sub>半自動溶接による小型ブロック溶接施工試験を行った。

試験体形状を図-17に示す。試験体は、中央挟み板に鋳鋼(92 mm)を用いた十字継手とし、開先形状は裏はつりタイプと裏当てタイプの比較検討となった。

試験結果を表-4に、タイプ別硬度試験結果を図-18に示す。各種機械試験の結果、いずれも母材規格値を十分に満足する結果が得られた。また硬度試験では、両タイ

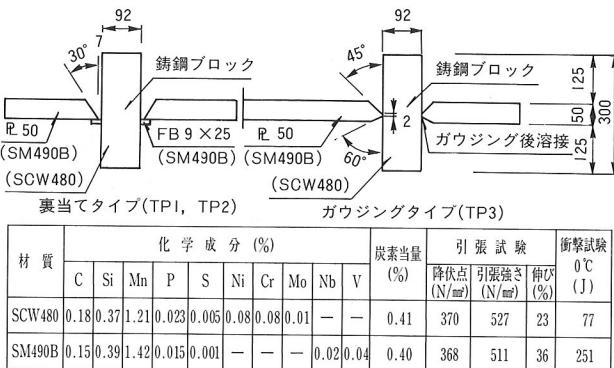


図-17 十字形溶接試験体形状および供試鋼材の化学成分・機械的性質

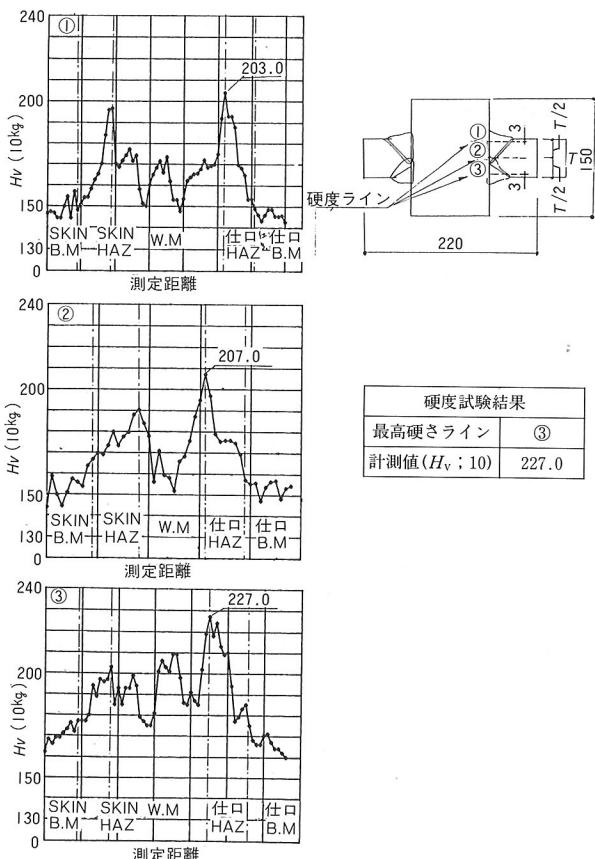


表-4 十字形溶接試験項目および試験結果

試験体	材質	試験項目	判定基準	試験結果	判定
裏当てタイプ十字形継手 (2体)	SCW480 (92 mm) *	十字形引張試験	母材の規格値以上 ( $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ )	518N/mm <sup>2</sup> 521N/mm <sup>2</sup>	合格
		全溶着金属引張試験	母材の規格値以上 ( $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ )	524N/mm <sup>2</sup> 527N/mm <sup>2</sup>	合格
		曲げ試験	3 mmを超えるワレがあつてはならない	最大で0.5 mm (鋳鋼部)	合格
		衝撃試験	熱影響部 融 合 部 溶着金属部	衝撃値の平均が 母材の規格値以上 ( $\geq 27.5 \text{ J}$ )	102.8J 106.7J 59.4J
		マクロ試験	著しい欠陥のないこと	欠陥なし	合格
	SM490B (50 mm)	硬度試験	350以下	223.1	合格
		十字形引張試験	母材の規格値以上 ( $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ )	520N/mm <sup>2</sup>	合格
		曲げ試験	3 mmを超えるワレがあつてはならない	最大で2.0 mm (鋳鋼部)	合格
		衝撃試験	熱影響部 融 合 部 溶着金属部	衝撃値の平均が 母材の規格値以上 ( $\geq 27.5 \text{ J}$ )	79.4J 101.2J 54.5J
		マクロ試験	著しい欠陥のないこと	欠陥なし	合格
		硬度試験	350以下	227.0	合格

とともに継手板側(SM490B)融合部近傍で最高硬さが得られ、裏はつりタイプ； $H_{VMAX}=223$ 、裏当てタイプ； $H_{VMAX}=227$ と同レベルの値を示した。以上のことから、小型ブロック試験体においては、両タイプの溶接継手性能に大きな違いは見られなかった。

### b) 実大試作試験

小型ブロック試験体を踏まえ、さらに実際の品物と同様の試作試験体を製作し検討を行った。図-19に試験体の形状を示す。ここでは、格点部としての寸法精度をチェックするとともに、溶接に関しては、放射方向の仕口フランジ部(板厚40 mm；裏はつり部)と鋳鋼部との溶接部(裏はつり開先部)に着目し、欠陥部手直し作業による複数回の裏はつりが継手性能に与える影響を検討した。

表-5 機械試験結果

継手内容	材質	試験項目	判定基準	試験結果	判定
仕口*鋳鋼部混在継手	タイプA SCW480	継手引張試験	母材の規格値以上 ( $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ )	494(N/mm <sup>2</sup> ) 542 492	合
		マクロ試験	著しい欠陥のないこと	欠陥ナシ	合
		硬度試験	350以下	216.0	合
		衝撃試験	熱影響部 融 合 部 溶着金属部	衝撃値の平均が 母材の規格値以上 ( $\geq 27 \text{ J}$ )	29.1(J) 138.2(J) 104.3(J)
		継手引張試験 ( $\geq 490 \text{ N/mm}^2$ )		523(N/mm <sup>2</sup> ) 513 497	合
	タイプB SM490B	マクロ試験		欠陥ナシ	合
		硬度試験		204.5	合
		衝撃試験	熱影響部 融 合 部 溶着金属部	71.9(J) 89.3(J) 110.2(J)	合
		マクロ試験	著しい欠陥のないこと	欠陥ナシ	合
		マクロ試験	著しい欠陥のないこと	欠陥ナシ	合

図-19に試作試験体から採取したブロックを示す(裏はつり3回をAタイプ、裏はつり1回をBタイプとする)。機械試験結果を表-5に、硬度試験を図-20に示す。Aタイプの衝撃値(熱影響部)にやや低い値が生じたものの、いずれのタイプも母材規格値を満足するものであった。硬度試験では、冷却速度の影響か両タイプともに鋳鋼側融合部近傍で最高硬さが得られ、Aタイプ； $H_{VMAX}=216$ 、

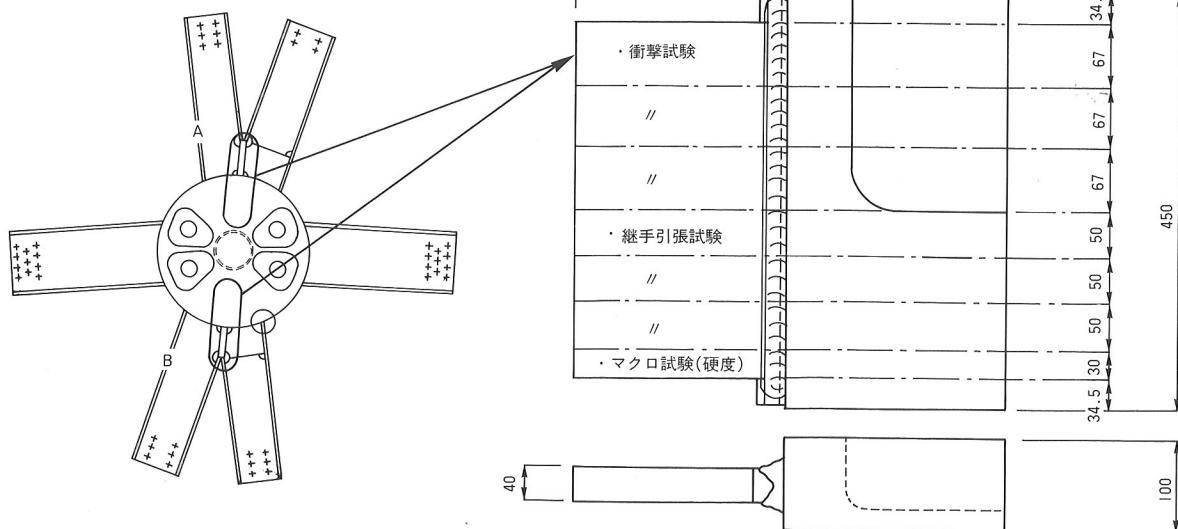


図-19 試験体形状

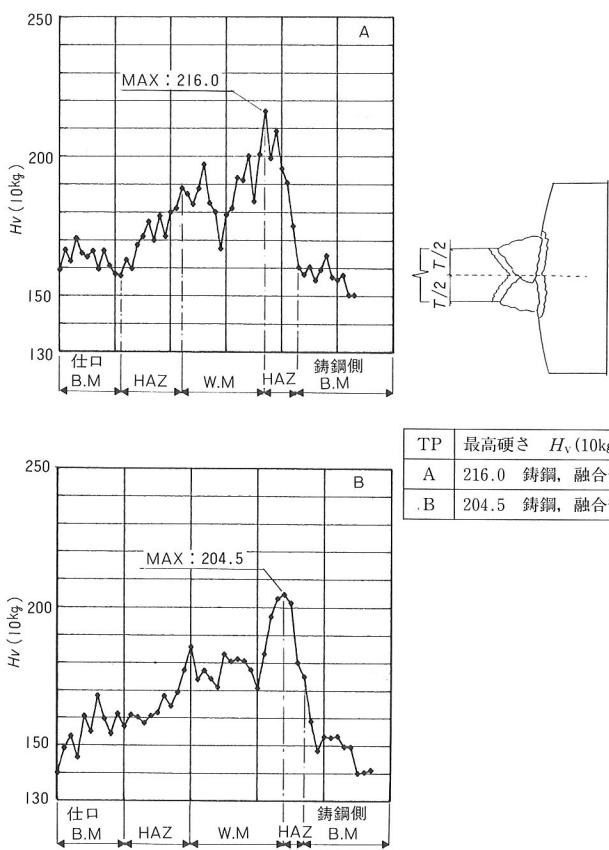


図-20 硬度試験結果

Bタイプ;  $H_{V\text{MAX}}=204.5$ と以上のような結果であった。マクロ試験片から採取したタイプ別裏はつり部のミクロ組織を写真4~7に示す。やはり裏はつり回数の影響からか、熱影響部の幅に違いが見られ、Aタイプで約2.5mm, Bタイプで約1.4mm程度となっている。Aタイプでは、はつり部初層にわずかではあるがはつり2回目の溶着金属が残留しており、熱影響部の重なりから、衝撃試験片は2回目の熱影響部が大きく含まれたものと考えられる。また得られた組織から簡単に考察すると、Aタイプでは複数回の熱履歴の影響からか、融合部近傍に大塊状に成長したフェライトとそのまわりに炭化物の析出がみられる。それ以降は、A, B同様にはほぼベイナイト的な様相を呈しており、写真から判断するかぎりではこの範囲は熱履歴の影響は小さかったものと考えられる。

以上、今回の検討結果から、鋳鋼は従来の施工方法および管理基準のもとで、十分な継手性能を確保できることがわかった。

## 6.まとめ

わが国の大規模開閉式ドームということもあり、本工事は各方面から注目を浴びている。その中で現場の建設工事も順調に進み、現在では天頂部を残すのみとなつた。特に大きな問題もなく現在に至った一つには、やはり設計側と製作側が一体となり、構造設計段階から参画

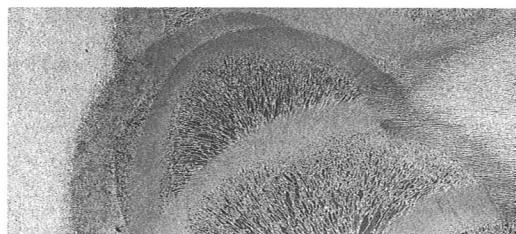
Aタイプ；3回裏はつり ( $\times 5$ )

写真-4 Aタイプ裏はつり部

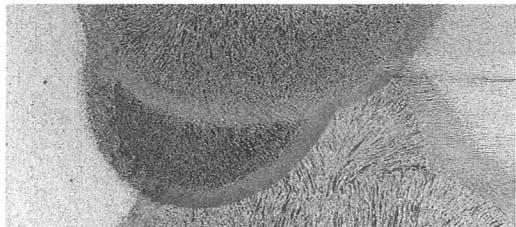
Bタイプ；1回裏はつり ( $\times 5$ )

写真-5 Bタイプ裏はつり部

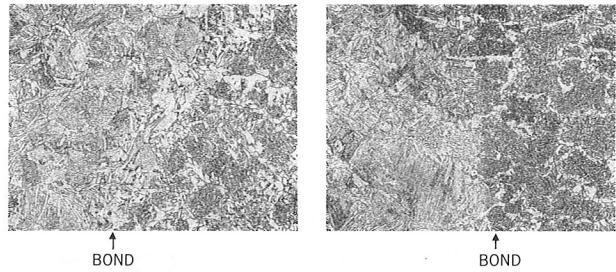
A; BOND近傍 ( $\times 200$ )

写真-6 AタイプBOND部

B; BOND近傍 ( $\times 200$ )

写真-7 BタイプBOND部

して製作サイドの意見を反映し、事前検討を十分行ったことが大きいと考える。今後も同じような大空間ドームの建設も増えてくると思うが、今回の経験を貴重な技術の蓄積として生かしていきたい。

## 参考文献

- 1) 設計レポート「福岡ドーム」, 日経アーキテクチュア, 1991年10月.
- 2) 架構形式の特性, 日経アーキテクチュア, 1983年2月.
- 3) JIS G 5102溶接構造用鋳鋼品, JISハンドブック 鉄鋼, pp.1556~1558.
- 4) 日立金属実績資料, 日立金属㈱.
- 5) 丹野ら：我が国の大規模開閉式ドーム「福岡ドーム」の構造設計, 鉄構技術, pp.15~20, 1992年1月.
- 6) 大形溶接構造物の溶接割れに関する研究, その2斜めY開先拘束割れ試験片の極厚材への適用に関する検討, JSSC, Vol.11, No.114, pp.24~28, 1975年6月.