



特集記事・9

鉄の環境との共生

# 鋼構造から見た鉄鋼の高強度化に対する期待

## Expectation to Higher Strength Steel from a Viewpoint of Steel Construction

(株) 竹中工務店 常務取締役 最上公彦 Kimihiko Mogami

(株) 竹中工務店 エンジニアリング本部 副本部長 油川真広 Masahiro Aburakawa

### 1 はじめに

日本における鉄鋼材料は、1901年の国内生産開始を起点として幅広い分野で利用が拡大し、近年では年間およそ6千万トンが消費され、様々な製品の素材になっている(図1)。

鉄鋼材料は、強さ(比強度が大)、加工性(補修が容易)、安さ、信頼性(等方・等質性、変形能力が大)、供給安定性など、幅広い分野で利用されるための優れた特徴を有している。一方、防錆処理が必要なことや、動的荷重で振動や騒音を生じやすい、などの解決すべき点もある。このように、長所と短所をもつ鉄鋼材料であるが、建設分野は鋼材需要の約50%(年3,000万トン)に及ぶ最大の利用分野である。また、日本における建築物の中で鉄骨造やSRC(Steel Reinforced Concrete)造が占める割合は約30%に達しており、これまでの建築物の発展を振り返ると、建物の超高層化、大スパン化など建築技術の高度化を、新しい鉄鋼製品が支えてきたといっても過言ではない(図2)。

本稿では、材料技術に関する新しい流れを紹介し、鋼材の高強度化による環境的側面での効果及び新しい鋼構造物実現の可能性について紹介し、最後に今後の鋼材開発への期待

について言及する。

### 2 鋼材の高強度化の現状

鋼材の高強度化へのニーズは古くから存在するが、最近では建設コスト低減や地球環境問題といった視点から、より高強度鋼へのニーズが顕在化している。特に水圧鉄管、造船分野で高強度化が進展しており、HT950(HT100)まで実用化されている。これに対し、一般構造物においては、様々な環境下での溶接接合が要求されるが、明石海峡大橋で採用された予熱低減型HT780鋼が開発され、その後橋梁、建築に適用されている。

また、これらの特性向上は熱処理、合金元素添加等の技術によって行われてきたが、省エネ、省資源、環境調和性等の社会的要請により、リサイクル性に優れた材料開発が急務で

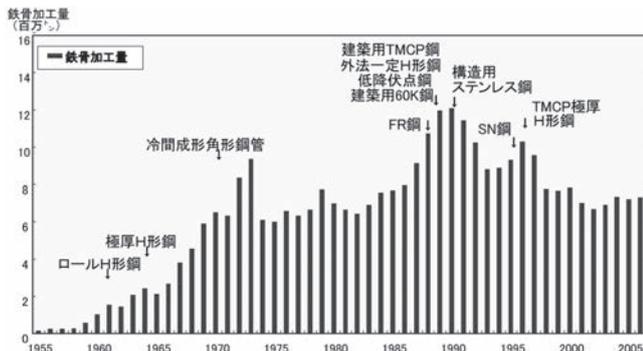


図1 鉄骨加工量の経年変化



図2 超高層化を支えた鉄鋼材料

ある。近年の基礎的研究により、材料の結晶粒径を微細化することで、強度、靱性、耐食性等が大きく向上することが確認されてきており、微細結晶粒金属材料開発が国家プロジェクトとして進められている(図3)。

### 3 鋼材の高強度化による環境的側面での効果と新しい構造物実現の可能性

図4に日本のCO<sub>2</sub>排出量の内訳を示す。建築に関わる部分のCO<sub>2</sub>排出量は施工時まで含めると全体の18.3%であり、非常に大きな割合を占めている。この中で鋼材は建設資材(全体の8.3%)の中に含まれるが、その中でも大きな割合を占めていると考えられる。

一方業種別のCO<sub>2</sub>排出量の比率を図5に示す。鉄鋼は最もCO<sub>2</sub>排出量が多い業種であり、全体の41%を占めている。したがって、建設業の立場からCO<sub>2</sub>排出量削減を促進するにあたって、鋼材の3R(リサイクル、リユース、リデュース)は喫緊の課題である。その中で、鋼材は、もともとリサイクルはかなり行われており、リデュースを行うためには、鋼材の高強度化による効果は大きい。また、現状平均50年以下の周期でスクラップ&ビルドが行われている多くの建物を長寿命化すれば、建設に絡むCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きな

効果が期待される。建物を100年、200年と利用することは西欧では当たり前のことであるが、大地震においてもその資産価値を失わないような設計を行い、建物を長寿命化することが、建設に絡むCO<sub>2</sub>排出量の削減に最も効果的である。

そこで、以下に鋼材の高強度化による新しい構造物実現の可能性について検討した事例を紹介し、鋼材量削減の効果を検証する。

#### 3.1 新構造システム建築物の開発

「新構造システム建築物」は従来の鋼材の約2倍の強度を有し、従来の高強度鋼と比較して安価な高強度鋼(H-SA700)を用いて実現される新しい高耐久性の構造システムで、そのコンセプトは以下の通りである。

- ①超耐震性(震度7クラスの地震に対しても無損傷)を有する構造システムの実現
- ②用途機能の変化に幅広い受容力があるフレキシブルな架構システムの実現
- ③資源の循環を基本とするリユースシステムの実現

本開発は、平成14年6月に政府の「骨太の方針」において「ナノテクノロジー・材料」分野の「産業発掘戦略」が策定され、これを受けた総合科学技術会議(議長:小泉首相当時)におけるNTPT(ナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチーム)及び革新的構造材料WGの設置による調査検討を踏まえ、平成15年7月に決定された「府省連携プロジェクト」である。平成16年度から平成20年度まで5カ年の研究開発が終了し、平成21年度からは事業化・産業化を目指し、活動を継続している。開発の詳細は「ふえらむ Vol.14 (2009) No.2」に紹介されているので、ご覧いただきたい<sup>1)</sup>。

また今まで鋼材は溶接による組立が主体であり、仮設材以外はリユースはあまり行われていないのが現状である。そこで、本開発では溶接を一切使わない架構システムの開発を行い、リユース可能な架構を実現した。詳細は上記記事をご覧いただきたい。

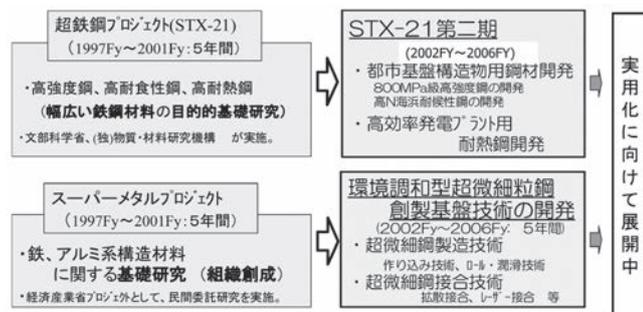


図3 新しい鉄鋼材料を目指した研究プロジェクト

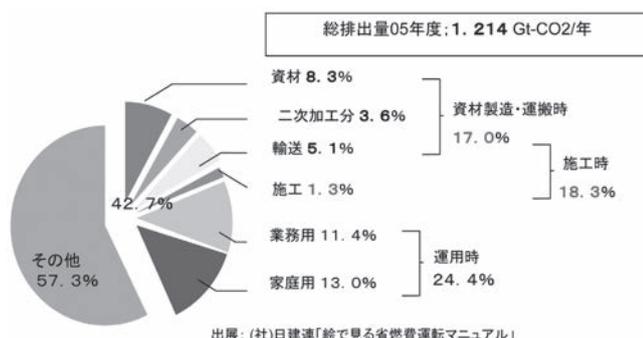


図4 日本のCO<sub>2</sub>排出量内訳(1999年)……建設分野のかかわり<sup>2)</sup>

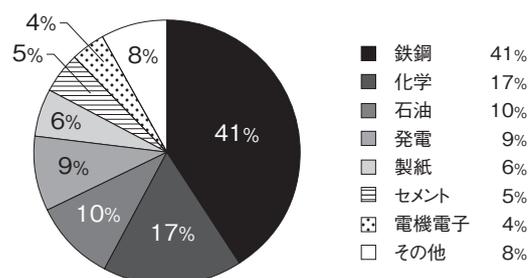


図5 業種別CO<sub>2</sub>排出量(2005年度、経産省資料)

ここでは、鋼材の高強度化による効果を確認するために、高強度鋼 (H-SA700) と従来鋼 (SN490 鋼) を用いた場合の鉄骨量の違いについて紹介する。

(1) 検討モデル

検討モデルは地域防災拠点機能を有する高性能庁舎ビルである。人口10万人～40万人程度、在庁職員は1,000～2,000人程度の特別区または市の庁舎を対象とし、変化の著しい行政需要に迅速に対応可能なフレキシビリティに富んだ空間構成をもつ開かれた庁舎、大規模災害時の地域防災拠点、緑化・省エネルギー・リサイクル等の地球環境への貢献を基本コンセプトとしている。庁舎棟は、階数地上8階、PH1階、床面積17,813m<sup>2</sup>である (図6)。

架構モデルを図7に、ダンパー配置計画を図8に示す。ブレースダンパーの組替えにより内部空間を自由に変更できる機能を持った架構システムである。ダンパーはコア周り及び外周部に均等に配置している。

(2) 検討結果

表1に主架構に高強度鋼 (H-SA700) を用いた場合と、従



図6 高性能庁舎の都市景観イメージ

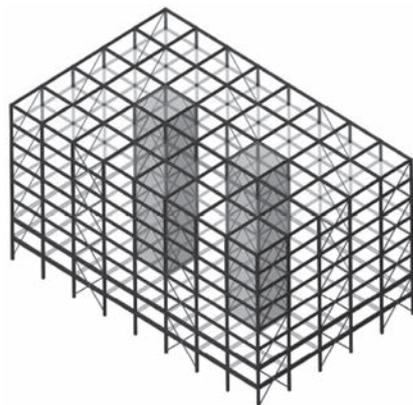


図7 高性能庁舎の架構モデル

来鋼 (SN490 鋼) を用い、ラーメン架構及びラーメン+ブレース架構の場合、計3ケースについて、それぞれ耐震レベルとして、現行法 (震度6強弾塑性)、準超耐震設計法 (震度6強弾性) 及び超耐震設計法 (震度7弾性) の3水準とした場合の鉄骨量の比較を示す。

耐震レベルを同じとした場合、高強度鋼を用いることで従来鋼に比べて30～40%程度鉄骨量を削減できることが確認された。また、耐震レベルを震度7クラス無損傷 (弾性) とした場合でも、高強度鋼 (H-SA700) を用いることで従来鋼を用いた現行基準での設計と比べて、ほぼ同等の鋼材量で設計可能であることが確認された。

一方耐震レベルを震度7クラス無損傷 (弾性) とすることで、大震災後も継続使用が可能であり、建物の長寿命化が実現できる。本開発では耐用年数200年と設定しており、これを実現すれば、現状平均50年以下の周期でスクラップ&ビルドされているのに対し、単純に建設に伴う鋼材のCO<sub>2</sub>排出量を1/4に削減することが可能となる。

3.2 大空間構造物への適用

鋼材が高強度化すれば、鉄骨量の削減が可能で、建物重量の軽減化につながる。一般の中高層建築物では、建物全重量に占める鉄骨重量は15～20%程度であり、上記検討のように鉄骨量が30%程度低減しても建物全重量に与える影響は小さいものの、基礎構造や輸送、建設コストの低減も期待できる。

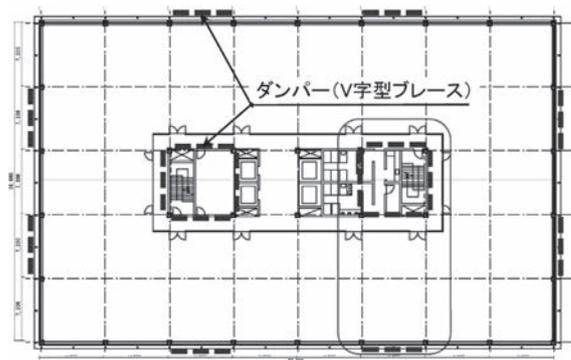


図8 ダンパー (V字型ブレース) の配置計画

表1 各種構造形式における鉄骨量比較

		現行法規設計法 (震度6強弾塑性)	準超耐震設計法 (震度6強弾性)	超耐震設計法 (震度7弾性)
新鋼材	ラーメン 制震デバイス	—	0.95~1.00	1.10
	ラーメン + ブレース	0.97	1.30~1.40	1.52
従来鋼		1.00	1.30~1.40	1.65

一方、鋼材の高強度化の効果が大きい架構の一例として、建物重量に対して鉄骨重量の占める割合が大きい大空間構造物が考えられる。今後の社会ニーズの一つの方向として、最先端の製造施設や商業施設・娯楽施設をより広い大空間構造で覆うというニーズが顕在化している。さらには中東やシベリアなどの厳しい環境地域において、超大空間によるコンパクトシティも現実のものとして検討され始めている。そこで、高強度鋼材がこれからの大空間構造に如何に適用可能かを検討した事例を以下に紹介する。

(1) スパン 300m 級ドームの検討

検討用に設定したモデルは、完全球殻形状のドーム構造であり、スパン：289.8m、ライズ：46.997m、最高高さ：GL + 80mの規模である。検討モデルの諸元を表2及び図9に示す。今回の検討では、高強度鋼の適用部材としては、主トラスの上下弦材とテンションリングとする。

従来鋼及び高強度鋼の設計基準強度 (F値) を表3に示す。荷重としては、固定荷重、風荷重及び地震荷重を考慮した。

検討の結果得られた知見並びに考察を以下にまとめる。

①最終的に設計した部材断面で、主架構の鉄骨重量 (2次部材と仕上げを除いた重量) を比較すると、従来鋼モデル (11,409t、160.5kg/m<sup>2</sup>) に対し、高強度鋼モデル (8,895t、125.1kg/m<sup>2</sup>) となった。すなわち、高強度鋼を使用することで22%程度の鉄骨量が削減された。なお、この鉄骨量に

はSN400材を用いたラチス材、束材の重量約1,300トンが共通に含まれており、それ以外の主トラスの上下弦材とテンションリングで比較すると削減率は約25%となる。

②鋼材強度 (F値) は、従来鋼 (325MPa) に対し、高強度鋼 (540MPa) であり、単純に強度比の逆数が部材断面席の比になると考えた場合、 $1 - (325/540) = 1 - 0.6 = 0.4$ となり、最大40%の鉄骨量削減効果が期待される。上記結果は、この理想値に対しておよそ半分程度の効果であるといえる。

③最終的に設計した弦材の細長比 (部材の強軸周り) は、70~90程度の部材が大半であり、許容圧縮応力度でみると、従来鋼と高強度鋼で大きな差は生じない。すなわち、今回の検討モデルにおける弦材の細長比は、高強度鋼の高強度性を効果的に活用できる範囲ではないといえる。

④一方、引張材であるテンションリングに高強度鋼を適用することは非常に有効である。今回の検討モデルでは、全体の重量に占めるテンションリング部材の割合は約30%程度もあるため、断面のサイズダウンによる鉄骨量の削減効果は大きい。

表2 検討モデルの諸元

●架構形式、架構分割	
球殻ドーム	
鉄骨複層トラス形式 (トラスデブス 4m)	
ネットワーク型分割法 (テンションリング部 80分割)	
●規模	
スパン	: 289.8 m
ライズ	: 46.997 m
ライズ/スパン比	: 0.162
屋根最高高さ	: GL + 80 m
ドーム曲率半径	: 246.873 m
ドーム半開角	: 35.9 °
表面積(上弦面)	: 71,080.3 m <sup>2</sup>
●屋根重量 ※	
主材鉄骨	: 8,707.1 tf ( 122 kgf / m <sup>2</sup> )
テンションリング	: 4,372.9 tf ( 62 kgf / m <sup>2</sup> )
2次部材(母屋等)	: 2,132.4 tf ( 30 kgf / m <sup>2</sup> )
仕上げ材、設備	: 3,554.0 tf ( 50 kgf / m <sup>2</sup> )
全体合計	: 18,766.4 tf ( 264 kgf / m <sup>2</sup> )

※ 鉄骨は初期仮定断面。ノード重量込み。  
歩掛は上弦面表面積当たり。

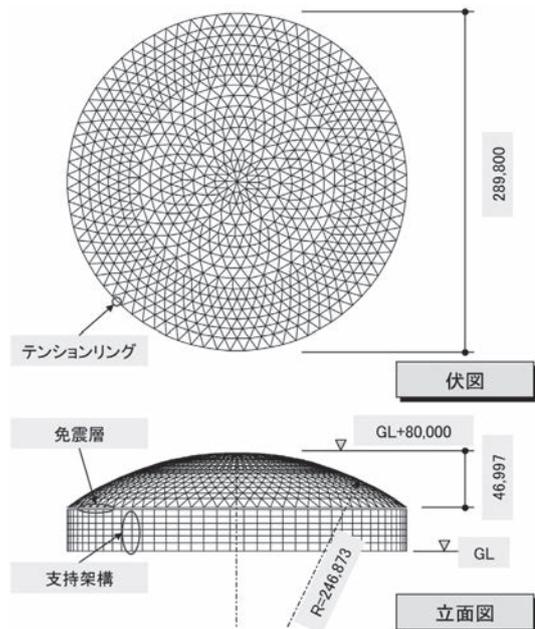


図9 検討モデルの形態・規模

表3 鋼材の材料特性

材料	設計基準強度 (F値、MPa)
従来鋼 (SN490) 弦材、テンションリング	325 (3.3tf/cm <sup>2</sup> )
高強度鋼 弦材、テンションリング	540 (5.5tf/cm <sup>2</sup> )
従来鋼 (SN400) ラチス材、束材	235 (2.4tf/cm <sup>2</sup> )

注: 高強度鋼のF値は仮に設定した数字です

- ⑤高強度鋼を用いた重量削減効果により、免震装置1個あたりが負担する鉛直荷重は、従来鋼モデル (17,095÷80点支持=214tf) に対し、高強度鋼モデル (14,581÷80点支持=182tf) となり、仕上げも含んだ鉛直荷重は約15%低減している。仮に免震装置の面圧を8MPa程度と考えると、免震装置のサイズは従来鋼モデルではφ600、高強度鋼モデルではφ550程度となる。
- ⑥両モデルの変形性状を比較すると、高強度鋼モデルの方が変形量は大きく架構剛性が低下していることは明らかである。しかしながら、同時に自重も低減しているため、全体として構造特性に大きな変化はない。

なお、本検討は「超鉄鋼研究プロジェクト」において、竹中工務店が分担して検討した内容である。

(2) 夢の1,000m級ドームの可能性検討

鋼材の高強度化による効果として、都市レベルを覆う夢のプロジェクトの検討例を紹介する。検討用に設定したモデルは、完全球殻形状のドーム構造であり、スパン：1,000m、ライズ：300m、最高高さ：GL+310mの規模である。検討モデルの諸元を図10に示す。

スパン1,000mは銀座1丁目～8丁目までをほぼ覆うことができるスパンであり、高さ310mは東京タワーがほぼすっぽり入る高さである。都市レベルを覆うことで、自然環境を制御することにより快適な都市環境を実現することが可能となる(図11)。

構造モデルのトラス材の構成を図12に示す。荷重としては、固定荷重、風荷重、温度荷重及び地震荷重を考慮した。また、設計のクライテリアとして、下記条件を設定した。

- ・屋根の変形：長期荷重時 頂部変形1.0m程度
- ・全体座屈耐力：長期荷重に対し座屈荷重係数10以上
- ・脚部支持条件：長期荷重に対しては水平方向ローラー支持  
その他荷重時は積層ゴム水平ばねを設定

解析の結果、屋根自重による屋根頂部変位は約110cm(スパンの1/900)、脚部の水平変位は約60cmである(図13)。屋根トラスの最大圧縮力、テンションリングの最大引張力はそれぞれ約1万トン、3.5万トンであり、全体座屈については



図11 スペースシティ イメージパース

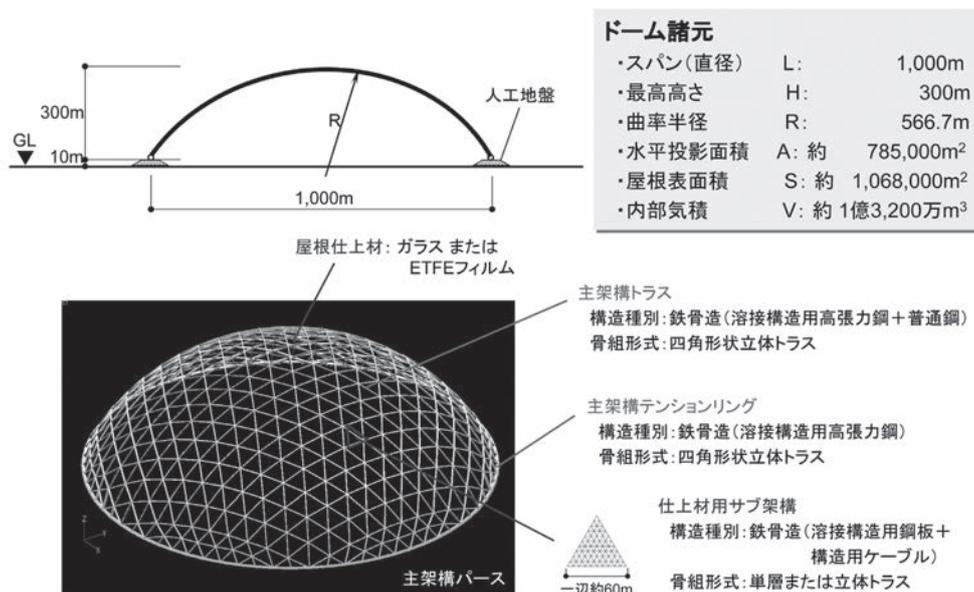


図10 1,000ドーム検討モデル

自重に対し約10倍の座屈安全率(線形座屈解)を有する。また、設定した風荷重に対する屋根頂部近傍の最大鉛直変位は約57cm(図14)、地震時の最大水平変位は約57cm(図15)、脚部の免震層の変位は約26cmであり、風荷重時、地震時とも部材応力度においても屋根架構の安全性は十分に確保されている。また、使用鋼材の構成比率は高強度鋼(HT780)が約38%を占めており、高強度鋼を用いることで、夢のプロジェクトが実現可能であることが確認できた。

スパンが大きくなればなるほど自重との戦いとなり、普通鋼では断面アップ→重量増→さらなる断面アップという連鎖となり、鉄骨量の増大につながるため、高強度鋼を使用することによるメリットは非常に大きいと考えられる。

## 4 今後の鋼材開発への期待

鋼材の高強度化による効果について、実例を含めて紹介した。

今後さらなる超高強度鋼の開発ならびに架構を組み立てるための超高強度ボルト、超高強度溶接材料開発が望まれる。なお、車や橋梁のケーブルの分野では既に1,000Nを超える

強度の鋼材が使われている。建築分野で超高強度鋼を採用するためには、コスト的に比強度レベルで同等以下になることが必要である。

また、高機能鋼として、錆びやすい、火災に弱いという鋼材の弱点を補うための、美しい耐候性鋼板の開発、超高温耐火鋼の開発が望まれる。

さらには、鋼材は強度が上がってもヤング率は変わらないという材料である。そのため、強度的には余裕があるのに、たわみや振動によって断面が決定するケースが多い。このため、高ヤング率鋼の開発ができれば、鋼材の適用範囲はより増大するものと思われる。

今後の鋼材メーカーの開発に期待したい。

### 参考文献

- 1) 高梨晃一, 志村保美, 油川真広: ふえらむ, 14 (2009), 71.
- 2) 絵で見る省燃費運転マニュアル, (社)日本建設業団体連合会, (2002), 4.

(2009年8月31日受付)

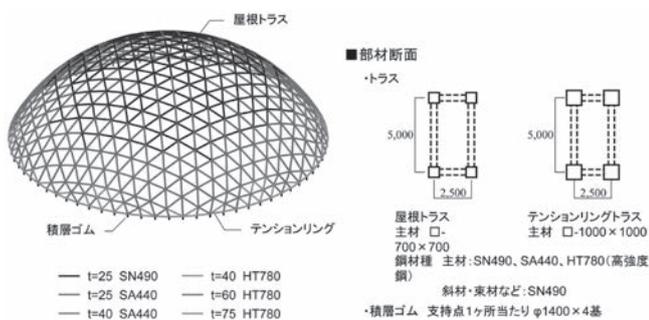


図12 トラス材の構成

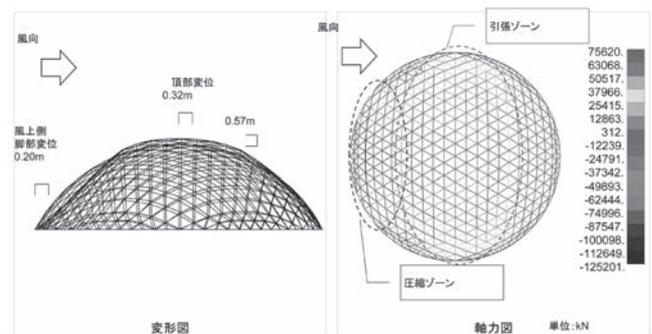


図14 風荷重に関する検討結果

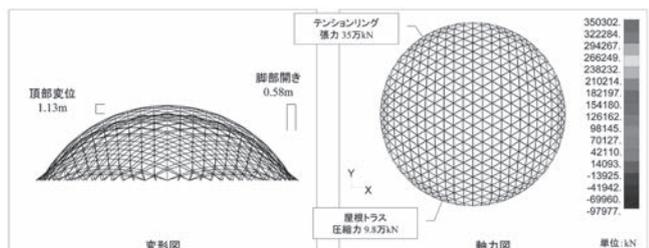


図13 長期鉛直荷重に関する検討結果

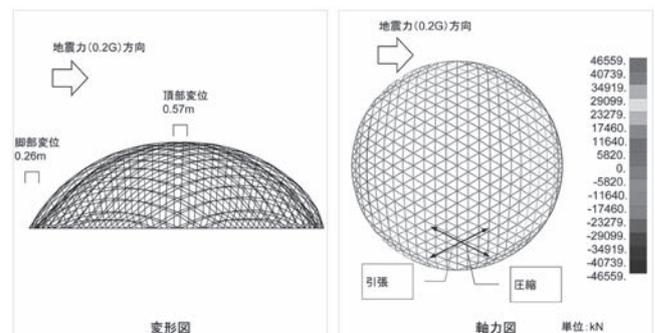


図15 地震荷重に関する検討結果