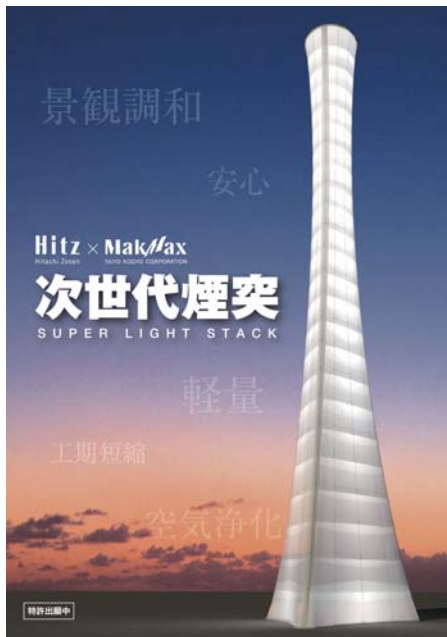


次世代煙突の開発 — 煙突外壁への膜素材の適用 —

Development of SUPER-LIGHT SACK

— Application of the Membrane Material for the Stack Exterior Wall —



増田 智成	Tomonari Masuda	①
高鍋 浩二	Koji Takanabe	②
畑中 章秀	Akihide Hatanaka	③
野口 明裕	Akihiro Noguchi	④
徳永 吉昭	Yoshiaki Tokunaga	⑤

あ ら ま し

防災・減災への取り組みとして耐震性向上と情報発信機能を併せ持つ次世代煙突を開発した。特徴は空気に含まれるNOxの浄化機能を持つ「フッ素樹脂酸化チタン光触媒膜」を煙突外壁に用いることで軽量化を図り、膜素材の特徴を生かした高いデザイン性を可能にした。

本稿では開発製品の特長ならびに外壁膜を外部足場なしに施工する施工新技術の検証結果について報告する。またLEDライティングによる演色性実証結果、風洞実験による耐風安全性の検証結果も提示する。本技術は平成25年5月末に（一社）日本膜構造協会の技術審査を受け構造安全性について支障ない旨の結果を得た。本製品は火力発電所や都市ごみ焼却施設、各種煙突鉄塔工作物を対象とし、国内外へ技術展開している。

Abstract

We have developed the innovative SUPER-LIGHT STACK which can be designed in any shape. The membrane material of the outer wall weighs light and is flexible enough to withstand deformation. Simply put, SUPER-LIGHT STACK is flexible and strong enough to withstand an earthquake. The LED soft lighting enhances the landscape and can be used as a public screen that displays disaster-related information. In comparison with the RC structure for stack, the construction time is minimized. The lightweight membrane wall may be installed without external scaffolding, and no exterior painting is required.

1. 緒 言

火力発電所・製鉄工場など排ガス処理目的で様々な構造の煙突が世の中には存在している。鉄塔支持型鋼

製自立煙突や排ガスを通気する内筒を有する外壁コンクリート製景観煙突などが代表例である。

わが国は地震国であり過去の地震において外壁コンクリートに亀裂を生じたり、変形による外壁ALC版（軽量気泡コンクリート版）の落下等の被害を受け施設の稼働停止を余儀なくされた例が報告されている。このような事態を避けるためにも耐震性に優れた製品開発が求められていた。

我々はこれらの問題を抜本的に解決すべく平成23年から次世代煙突の開発を進めてきた。主に環境プラント施

① Hitiz日立造船㈱ 環境・エネルギー・プラント本部 プラント設計部 一級建築士

② Hitiz日立造船㈱ 技術開発本部 環境・プラント研究室

③ ㈱ニチゾウテック 技術コンサルティング事業本部 構造技術部 博士(工学)技術士(建設部門)

④ 太陽工業㈱ 空間デザインカンパニー技術部

⑤ 太陽工業㈱ 産業施設カンパニー営業部

設の建設で多用される外壁コンクリート製景観煙突に代わる新製品として外壁に軽量で耐候性の高い膜素材を適用することを考案し、耐震性向上、工期短縮、情報発信、環境負荷低減、メンテナンス性向上など従来にない特徴を有する製品を開発した。開発モデルを図1に、膜素材を図2に示す。独立型煙突はもちろんのこと図3に示す建屋一体型の煙突についても新製品として提案する。

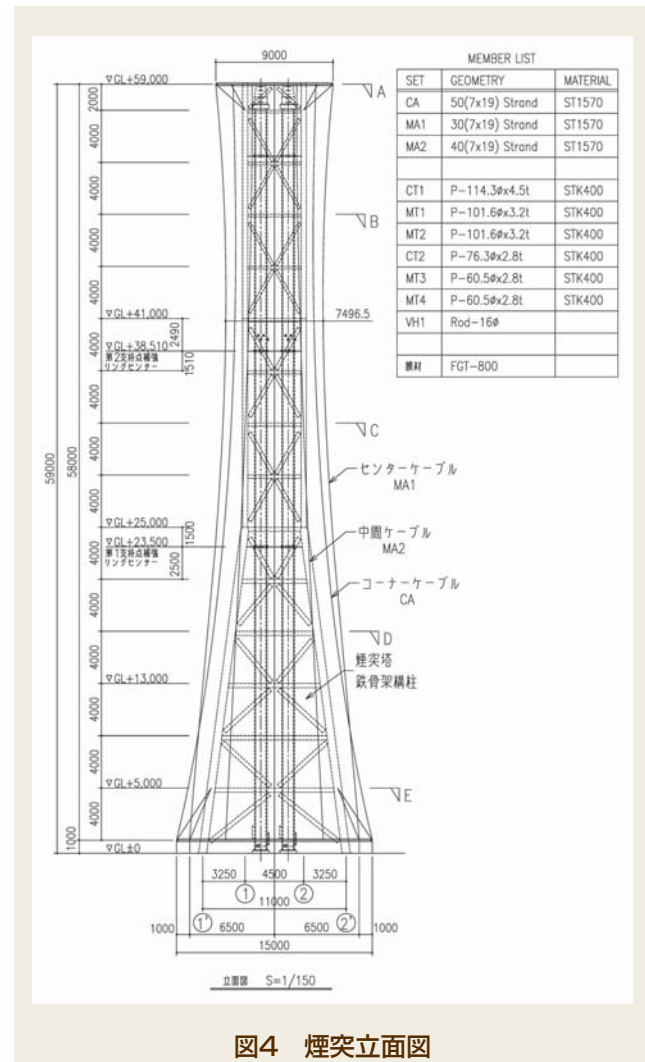
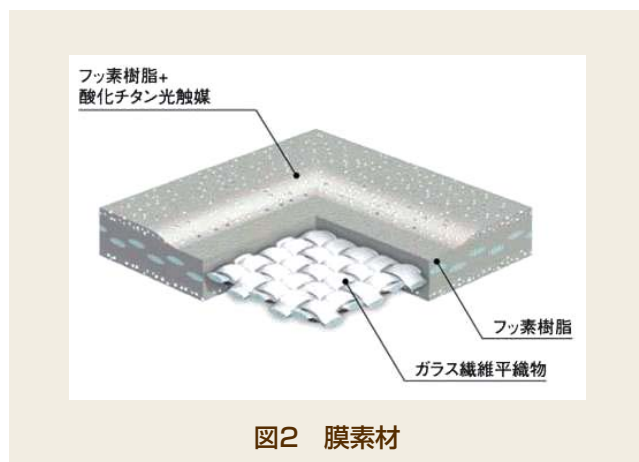
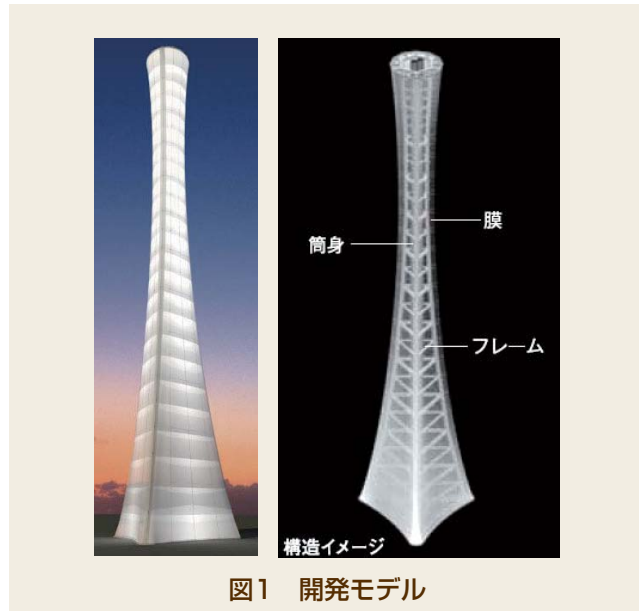
2. 開発内容と結果

2.1 対象モデル 高さ59m、頂部幅9m、底部幅15mの上部円形、下部矩形煙突で外壁を膜素材とし鉄骨束材、水平振れ止め、膜定着ケーブルで支持された図4に示すモデルを対象に建築基準法に準拠した設計を行った。煙突上部平面を図5に下部平面を図6に示す。本図は(一社)日本膜構造協会の技術審査対象モデルである。

独立煙突の場合、建築基準法上工作物に分類されるが、建屋一体型煙突は建築物の一部塔屋として扱われる。いずれにおいても建築基準法が基本である。

主要構造部は鉄骨造(鉄塔支持)とし煙突構造設計指針(日本建築学会)¹⁾に準拠した構造計算を行うことが義務付けられる一方、壁材料としては別の建築基準法施行令82条の4の規定となり外壁仕上げ材として安全性の確保が義務付けられる。その場合は材料特性が重視され全体変形の規定はない。

膜材料を部材として設計するには初期張力の概念が必要である。また二次部材として構造ケーブルを使用する。ケーブルは主部材として荷重伝達するため単に金属材料やパネル壁などの仕上げ材と同じと考えることは妥当ではない。建築基準法では膜構造の規定があり、平



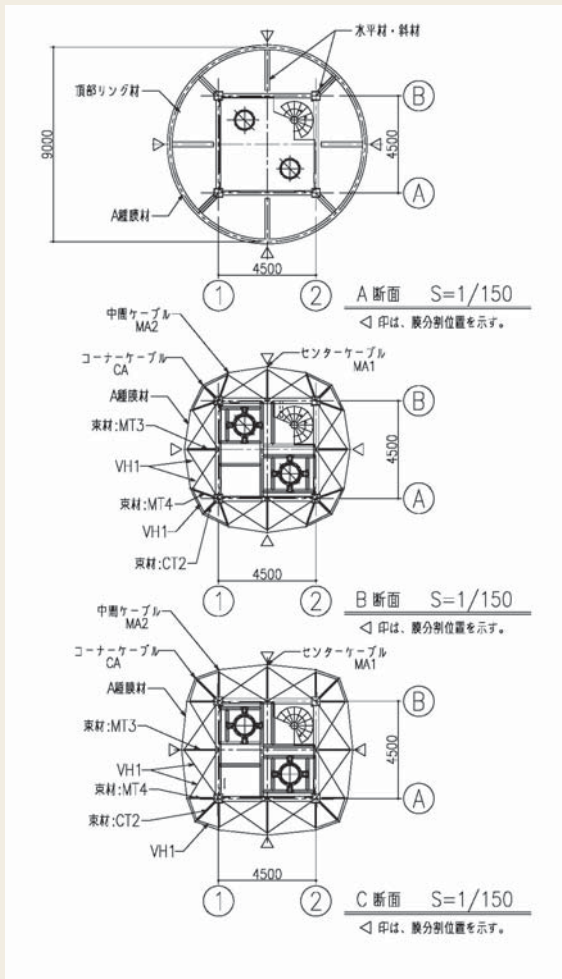


図5 煙突上部平面図

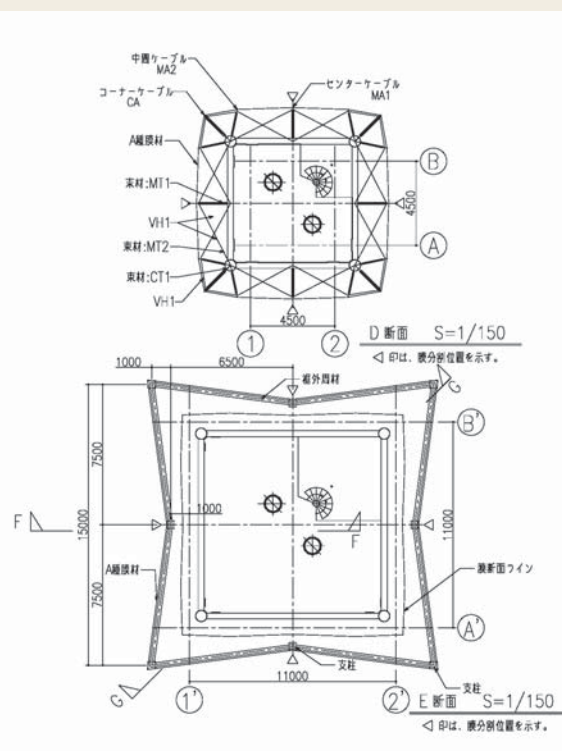


図6 煙突下部平面図

成14年告示666号がひとつの拠り所となる。しかし告示666号は膜構造の建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する規定であり今回のような煙突工作物の外壁仕上げ材の構造計算を規定しているものではない。そこで対象モデルで技術検討を行うことにした。設計条件を以下に示す。

- 主要構造部である鉄骨フレームは風・地震による外力のほか、膜定着用ケーブルからの張力を負担する。
- 膜材は膜定着用ケーブル、束材、鉄骨材で適切に補強されており初期張力を導入することで外装仕上げ材としての構造安全性を確保する。
- 膜定着用ケーブルは一定のピッチで束材に支持されており、膜面が受ける風荷重は束材を介して一定ピッチで鉄骨フレームに伝達する。
- 束材は一定のピッチで鉄骨フレームに固定されておりその先端について鉛直方向は膜定着用ケーブルに、水平方向はブレース材にて拘束されている。
- 膜定着用ケーブル両端部は頂部を鉄骨フレームに固定し、下部を基礎もしくは鉄骨フレームに固定する。
- 膜・ケーブルが経年変化により張力減少した際はケーブルの再緊張、張力導入が可能な構造とする。

2.2 施工性検証

膜素材は軽量で柔軟性があるため取付工事を内部側からのみとし外部足場を不要とすることで大幅な工期短縮を目指した。独自の施工技術を確認するため図7.1に示す高さ8mの試作機を製作し施工性の検証を行った。



図7.1 施工検証状況

これら得られた検証結果は煙突外壁膜固定方法として特許出願した。内部固定部詳細を図7.2に示す。



図7.2 内部固定部詳細

2.3 情報発信 従来、建築物・インフラ施設のライトアップは外部照射によるものが一般的であり、その場合光が拡散することにより局部に限定されることが多い。本提案では各種情報（防災情報）発信機能を有する煙突として、外壁に膜素材を適用することで内部照

明からの膜を通した透過光が創り出す柔らかな光により外部から幻想的なイメージを与える効果に着目した。この効果は従来の外部照射のようなグレアが少なく人の眼に優しい光として写る。その他のメリットとしては光源と機材は煙突内部に設置するため外部から見えないことも有利な点となる。膜材の特性として指向性の高い膜材は明視光に適し、拡散性の高い膜材は周囲に暖色の雰囲気を出し出す効果がある。今回、試作モデルに照明装置をセットし内部から照射したLED照明の演出効果を確認した。その状況を図8に示す。膜全体の色の見え方特にグラデーションの効果を検証した。検証は観客者へのアンケートを実施・分析することでその効果を確認した。

2.4 風洞実験 軽量な膜材料は構造全体系に対して耐震性の観点からは非常に優れているが風に対する応答、特に渦励振などの空力振動の発生が懸念される。

今回、空力振動に対する耐風安全性を検証することを目的として、図9に示す風洞実験を実施し渦励振・発散振動発生の有無を確認した。構造物に作用する自然風の条件として地表面粗度区分Ⅲ（都市周辺の住宅地や工業地帯、森林地帯）と想定し境界層乱流を生成するための乱流生成装置（粗度ブロック、スパイヤ）を設置した。

模型は6分割にした外装材と振動モード形状を相似させるための剛性棒で構成される。模型頂部の振動変位を光学式センサーにより計測した。また風路内に設置したピトー管により模型に作用する風速を測定した。

基準風速 $V_0=34\text{m/s}$ 、設計風速（再現期間100年） $=38.4\text{m/s}$ 、空力不安定振動照査風速（再現期間1000年） $=44.9\text{m/s}$ とした。また後述する空力振動実験で得られた発散振動発生風速と空力不安定振動照査風速と比較した。おもな実験結果の概要を以下に示す。

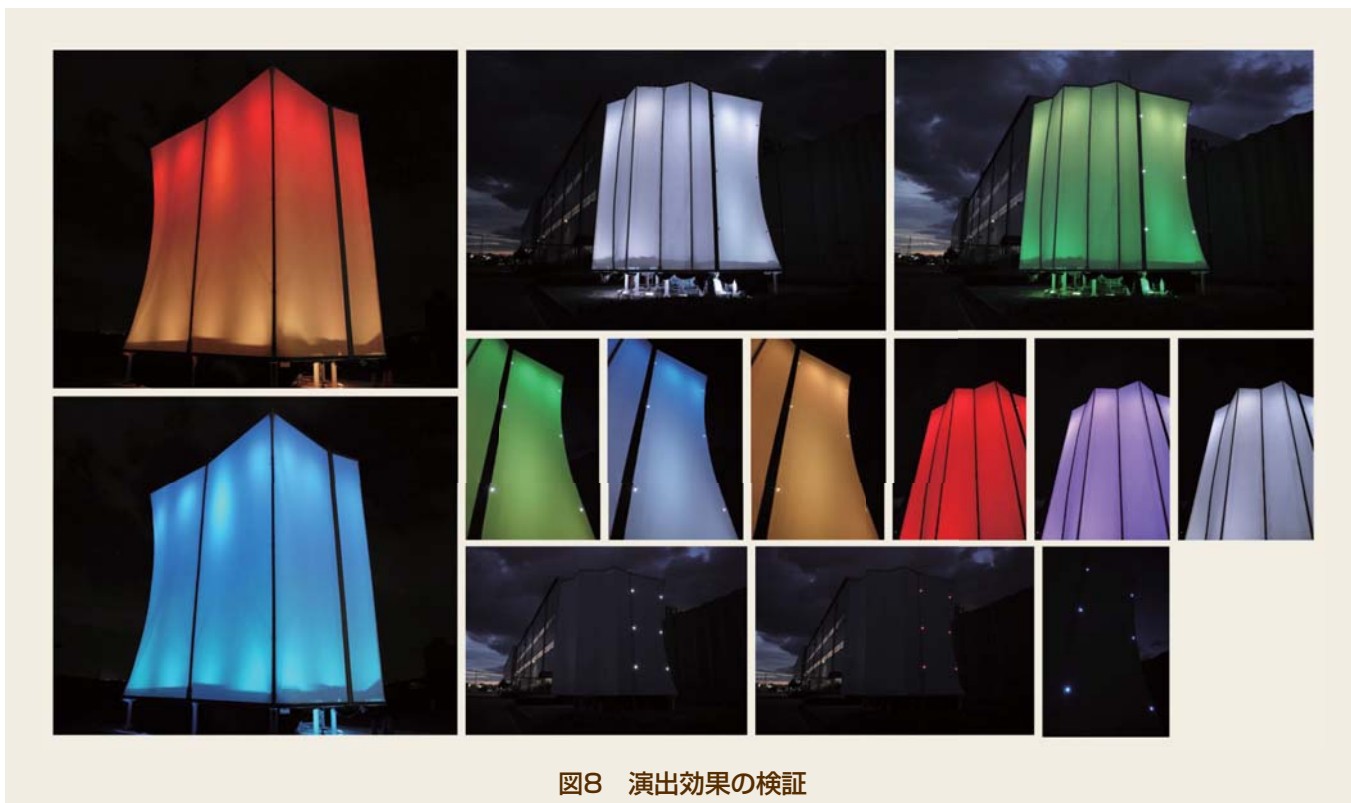


図8 演出効果の検証



図9 風洞実験の状況

(a) 本実験結果とCFD解析との比較を行い妥当性について検証した。解析はANSYS社汎用熱流体解析ソフトFLUENT13.0を使用し、実機煙突（高さ59m）を対象にRANS乱流モデルによる定常解析とした。風向 0° における煙突中心断面の流速ベクトルを図10に示す。また風向 $0 \sim 45^\circ$ における煙突基部せん断力を図11に示す。図中の記号 F_x および F_y はそれぞれ水平断面のx方向およびy方向のせん断力を表す。本図から実験値（平均値）と解析値（風変動成分を考慮しない条件下における）は良好に一致していることが確認できる。

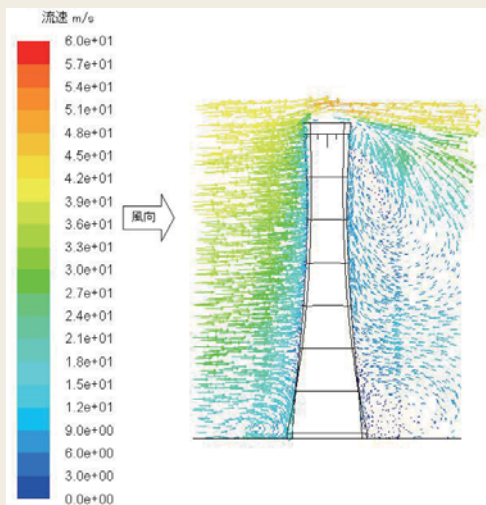


図10 流速ベクトル

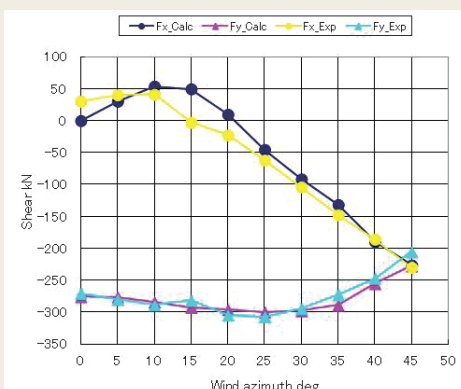


図11 実験結果と解析結果との比較(基部せん断力)

(b) 風力実験を行い風荷重の評価を行った。煙突高さ方向に対する層せん断力分布の結果を図12に示す。実験結果（図中赤色ライン）と建築基準法にもとづく設計値（図中青色ライン）との比較を示す。基準法での設計値は自然風の乱れを再現した実験結果（風の変動成分を含む）と比較して約1.5倍程度大きく安全側の設定であることがわかった。

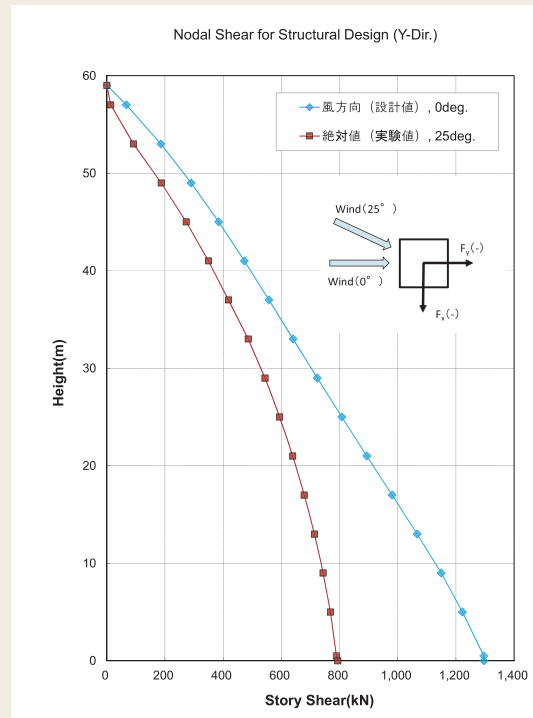
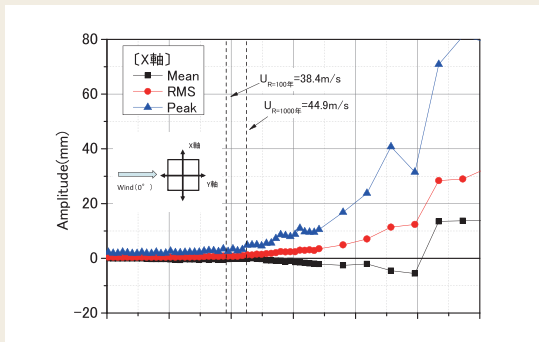


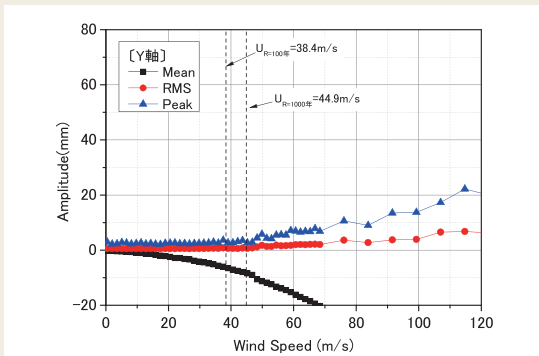
図12 高さ方向の層せん断力分布

(c) 煙突に生じる渦励振および発散振動（空力不安定振動）の発生有無を確認する。ここでは風向 0° （N：北風）の結果について図13に示す。本図から一様流中および境界層乱流中ともに、渦励振の発現は認められず、X・Y軸ともに風速とともに振動変位が大きくなっていることが分かる。本構造物は頂部の円形断面から基部の矩形断面まで連続的に外形形状が変化している。仮に円形断面であれば、風速39m/s（代表寸法として煙突高さの2/3の高さにおける代表径4.5m、ストローハル数 $St=0.2$ を採用）³⁾で、矩形断面であれば風速65m/s（同じくストローハル数 $St=0.12$ ）²⁾で渦励振が発生するものと予想される。しかし形状が連続的に変化することで、渦励振により励振される断面と、空気抵抗として振動が減衰される断面が混在するために、構造物全体としては、 Σ 減衰力 $>$ Σ 励振力となるため、渦励振が起振されるには至らなかったものと考えられる。

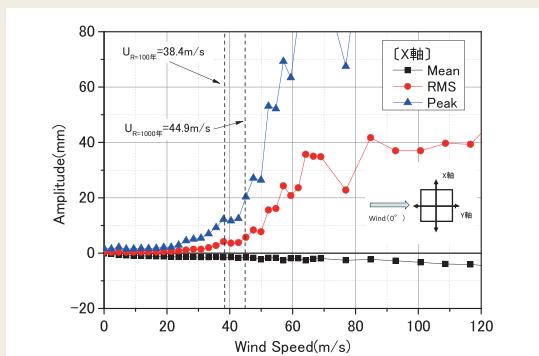
なお、風速とともに徐々に振幅が大きくなるのは、一様流中においてはカルマン渦の放出に伴う強制空気力の影響、境界層乱流中ではカルマン渦の影響に加えて変動風によるガスト空気力の影響があるものと推察される。Y軸方向応答については一様流中では静的変形の影響が大きく、境界層乱流中では静的



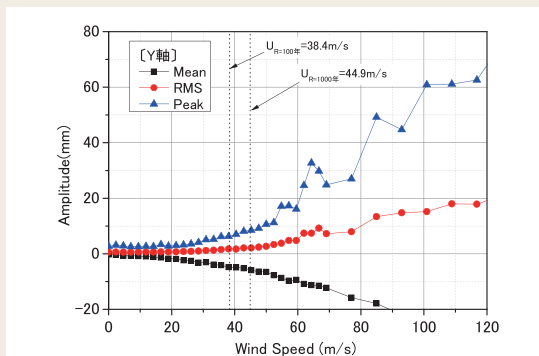
一様流、風向0° X軸



一様流、風向0° Y軸



境界層乱流、風向0° X軸



境界層乱流、風向0° Y軸

図13 風速応答図

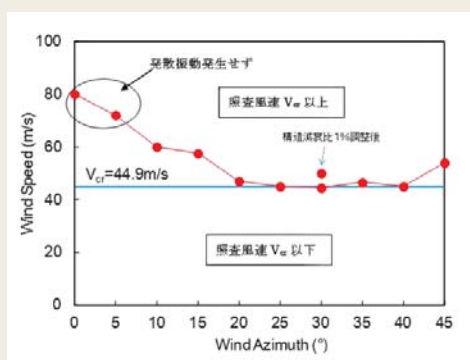


図14 一様流下における風向と発散振動発生風速比較

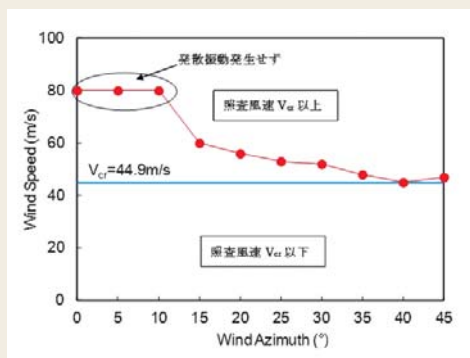


図15 境界層乱流下の風向と発散振動発生風速比較

不規則な強制振動が重畳した振動波形となるため、どの風速で発散振動が発生したかを判別することは非常に難しい。文献²⁾を参照すると、一様流中の風洞試験では、鉛直たわみモード $h_c/B=0.01 \sim 0.05$ 、ねじれモード $\theta_c=1^\circ \sim 5^\circ$ の振幅に対応する風速を振動の発生風速とするのがよいと記されている。この文献は橋梁を対象としたものであるが本煙突に対して仮に鉛直たわみモードの振幅を当てはめてみる。Bを煙突代表径として頂部外形寸法9mを採用すると、 $h_c=9 \sim 45\text{cm}$ となる。この数値を考慮しつつ振動応答全体の傾向を捉え $h_c=20\text{cm}$ を採用した。

図より一様流中と境界層乱流で発散振動の発生風速が最も低くなる風向に差異が生じていることがわかった。その理由は乱れにより断面周りの流れが変化し式(1)中の右辺分母の空気力係数が変化するためと考えられる。得られた結果をもとに発散振動の発生風速に及ぼす構造減衰の影響を調査した。発散振動の発生風速 $U_{critical}$ は、式(1)に示すように、構造減衰 ζ が高くなれば、それに比例して高くなる傾向にある³⁾。

$$\frac{U_{critical}}{fD} = -\frac{4m(2\pi\zeta)}{\rho D} \bigg/ \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \quad (1)$$

変形に加えて変動風によるガスト空気力の影響が考えられる。

(d) 図14・図15に一様流中と境界層乱流中における風向ごとの発散振動発生風速を示す。一様流中と乱流中で定義を統一するために振幅が20cmを超過する風速を発散振動発生風速と定義した。乱流中では

ここに、 f ：たわみ振動数、 D ：代表径、 m ：単位長さあたりの質量、 ρ ：空気密度、 C_L ：揚力係数、 $dC_L/d\alpha$ ：揚力係数勾配、 C_D ：抗力係数を表す。

発散振動の発生風速が最も低くなる風向 30° の場合について構造減衰を1%とした結果を図14中に示す。構造減衰を増加させることで発散振動発生風速は50m/sとなり、照査風速を上回る結果を得た。

さらに式(1)から $U_{critical}$ はたわみ振動数に比例して高くなる事が分かる。そこで、鉄骨フレーム構造の下部柱の傾斜角をGLに対して上げることで固有振動数を高める方策を検討した。その結果変更後の固有振動数は2.33Hzとなり、変更前の1.74Hzより約1.3倍大きくなった。参考までに、図16に変更後の

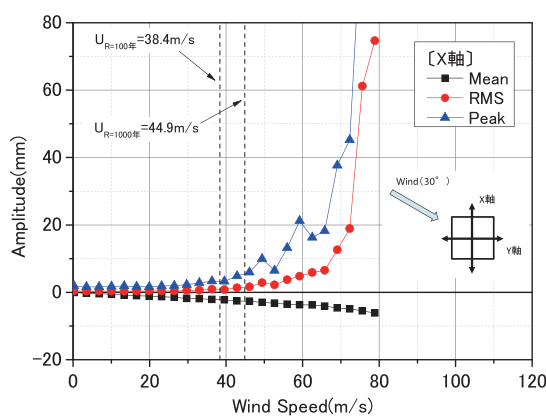
固有振動数に対する風速応答図（境界層乱流、風向 30° ）を示す。発散振動の発生風速は、照査風速を大幅に超過し、安全余裕度が高められることが分かる。

3. 結 言

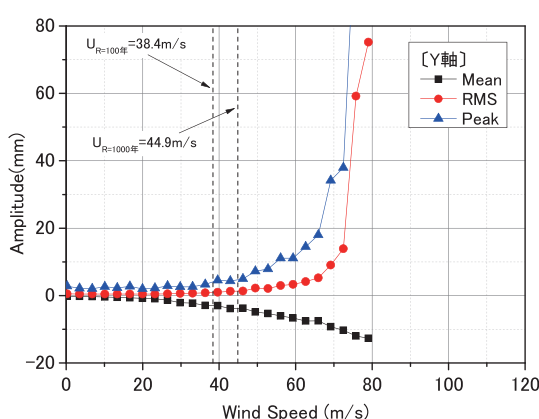
開発製品の特徴ならびに外壁膜を外部足場なしに施工する施工新技術の検証結果を報告した。またLEDライティングによる演色効果、風洞実験による耐風安全性の検証結果も提示し防災・減災に役立つ製品を提案できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：煙突構造設計指針,2007.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成19年度改訂版）,2007.12.
- 3) R.D.Blevins：flow-induced vibration, Robert E. Krieger Publishing Company, 1986.



境界層乱流、風向 30° たわみ振動数を1.3倍とした場合 X軸



境界層乱流、風向 30° たわみ振動数を1.3倍とした場合 Y軸

図16 風速応答図

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 環境・エネルギー・プラント本部
プラント設計部
増田智成
Tel : 06-6569-0142 Fax : 06-6569-0143
e-mail : masuda_to@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Environment, Energy & Plant Headquarters
Plant Design & Engineering Department
Tomonari Masuda
Tel : +81-6-6569-0142 Fax : +81-6-6569-0143
e-mail : masuda_to@hitachizosen.co.jp



増田 智成



高鍋 浩二



畑中 章秀



野口 明裕



徳永 吉昭