[特別講演]

東京スカイツリー ®
地上デジタルテレビ放送用送信アンテナ

2022年1月20日

川上　春夫 ， 高野　俊幸
（（株）加藤電気工業所）（ エイチ・シー・ネットワークス（株））

＜ご注意＞

・本pptは，2022年1月20日（木）に，オンラインにおいて開催されたアン テナ・伝播研究会におけるAP研「アンテナの歴史」委員会主催の特別講演で使用したものです．

・その際に，大学における講義等での使用希望があり，また，「アンテナの歴史」委員会としてアーカイブスとして記録しておきたいとの要望があったので，提供するものです．

・ただし，本pptには，著作権の上で問題になるものが多く含まれていますので，大学における講義等の教育目的以外の転用および無断使用はお断りします．

はじめに

本稿では，東京スカイツリー®地上デジタルテレビ放送用アンテナの構造，電気的特性などについて述べる．

各章は下記の様な内容である．

第1章　まえがき
第2章　東京スカイツリーアンテナの概要と建設
第3章　東京スカイツリーアンテナの内部及び給電構造設計
第4章　東京スカイツリーアンテナの特性
第5章　むすび

東京スカイツリー®は東武鉄道・東武タワースカイツリー（株）の登録商標

第1章　まえがき

1.1　大広域圏の地上デジタル放送の電波塔

2003 年（平成15 年）12 月から地上デジタル放送を開始した関東，中京，近畿広域圏の放送事業者，すなわちNHK および民放16 社は，総務省に免許を申請.

地上デジタル放送の各広域圏での電波は関東広域圏では東京タワー（**写真1.1**）から，近畿広域圏は生駒山（**写真1.2**）からそれぞれ発射.

生駒山は**写真1.2** に示すように南からYTV 読売テレビ放送，ABC 朝日放送，KTV 関西テレビ，MBS 毎日放送，NHK，在阪局の電波塔など，一連の「電波塔群」を形成. **写真1.3**はタワーの外観.

中京広域圏は**写真1.4**の既設タワー（栄テレビ塔，中京テレビ鉄塔）では，スペースと強度が不足しているために，瀬戸市に共同テレビ塔/ 局舎として瀬戸デジタルタワー（**写真1.4**）を建設.

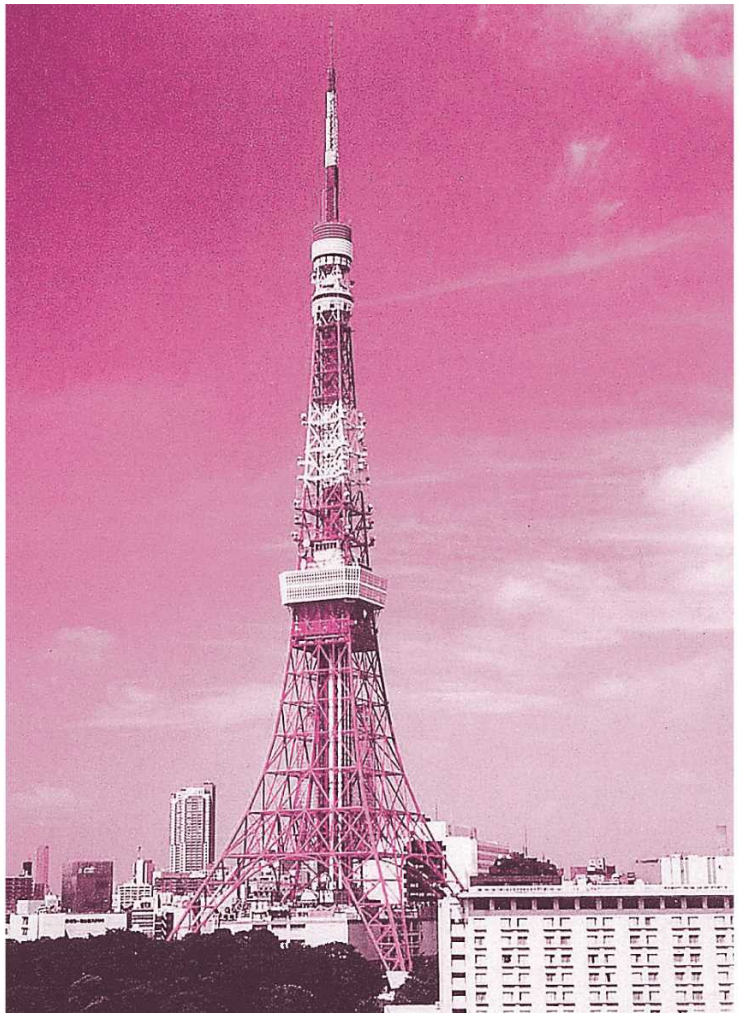


写真1.1　関東広域圏へ放送する東京タワー

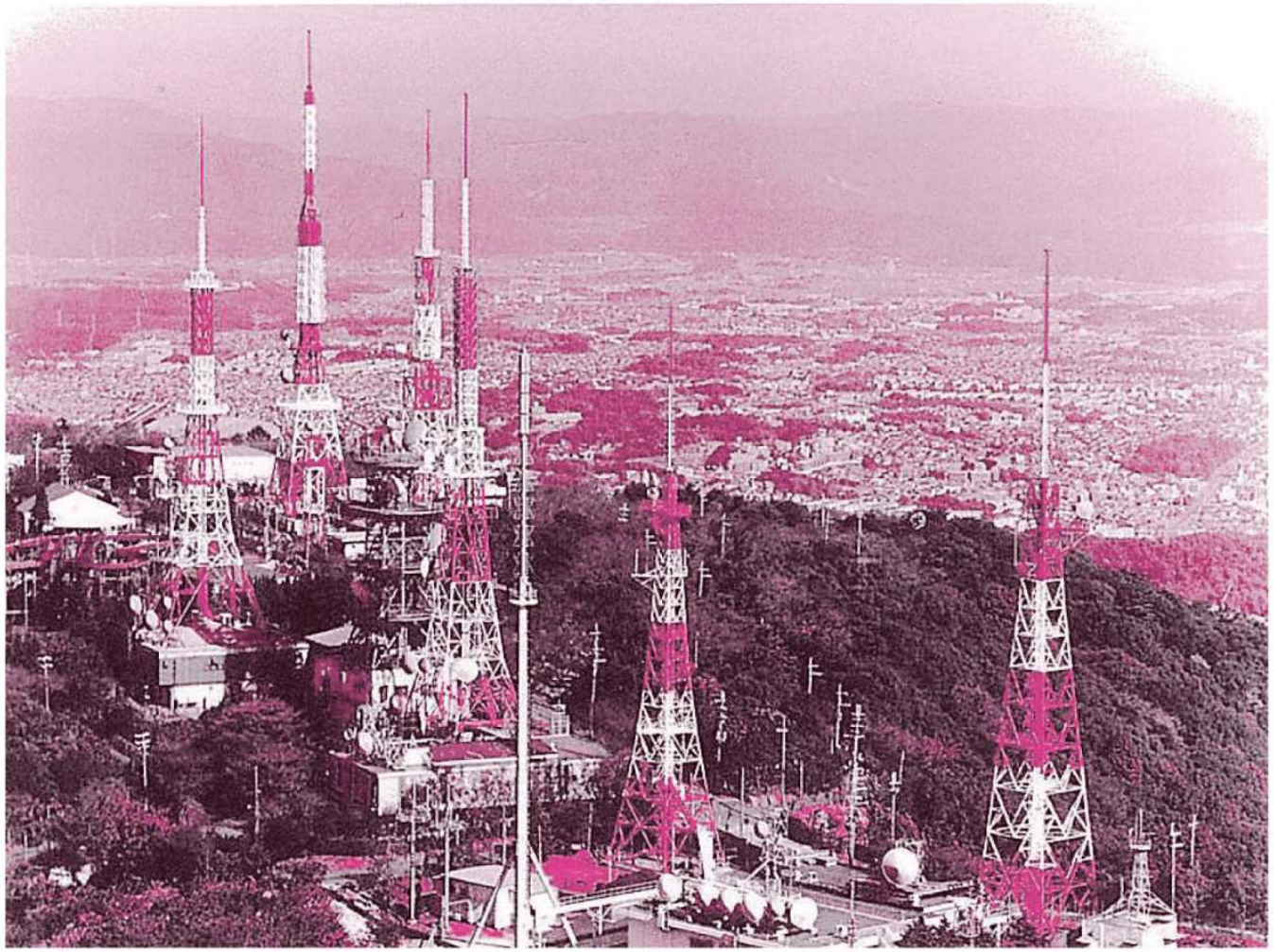
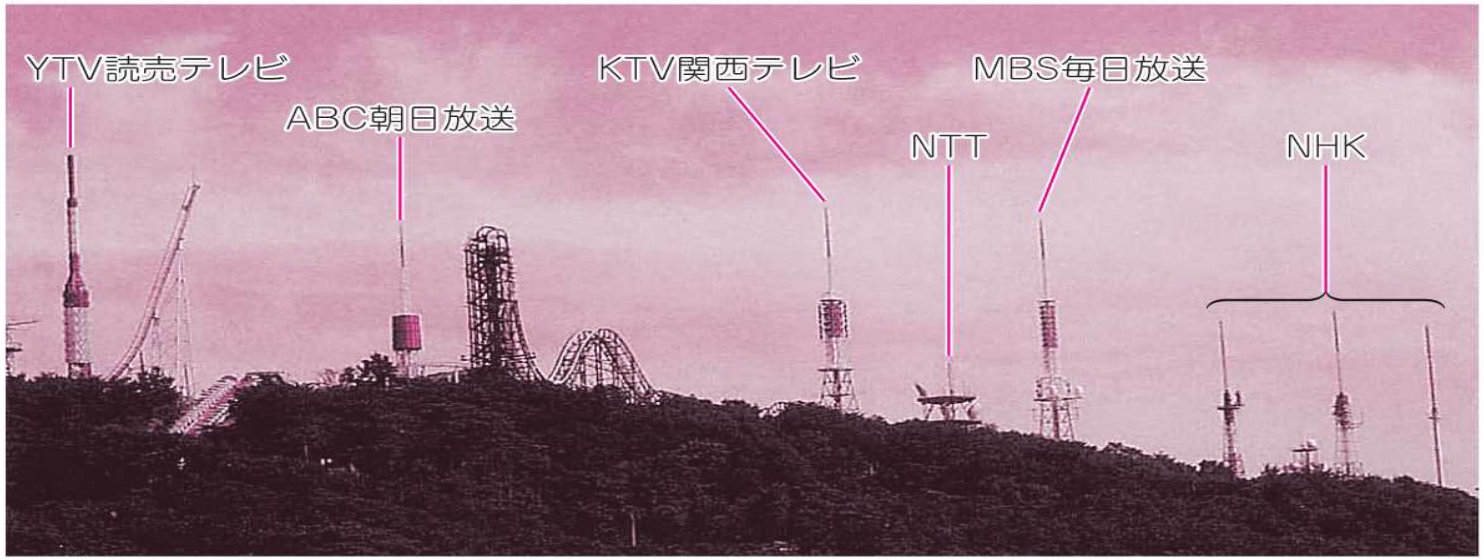


写真1.2　近畿広域圏へ放送する生駒山の放送アンテナ群



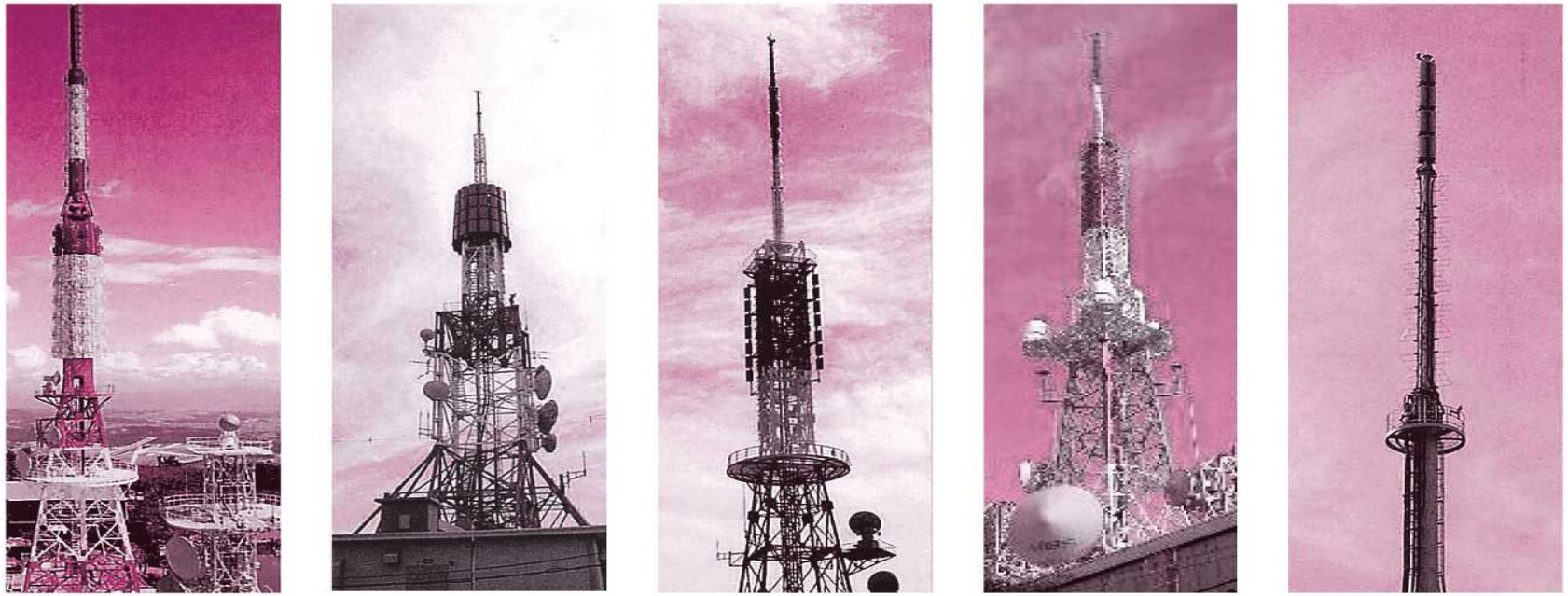
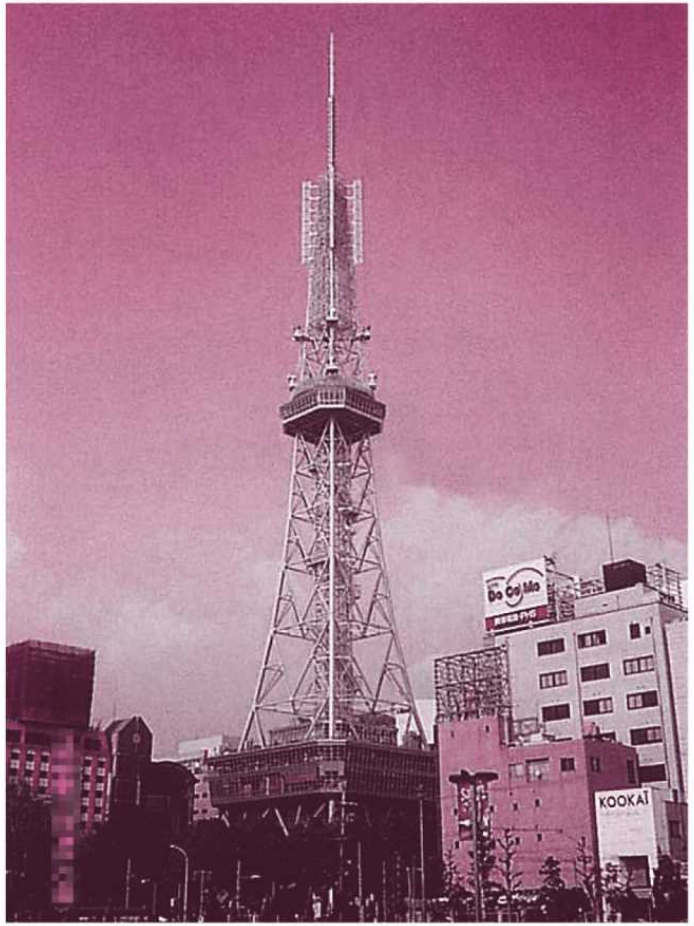
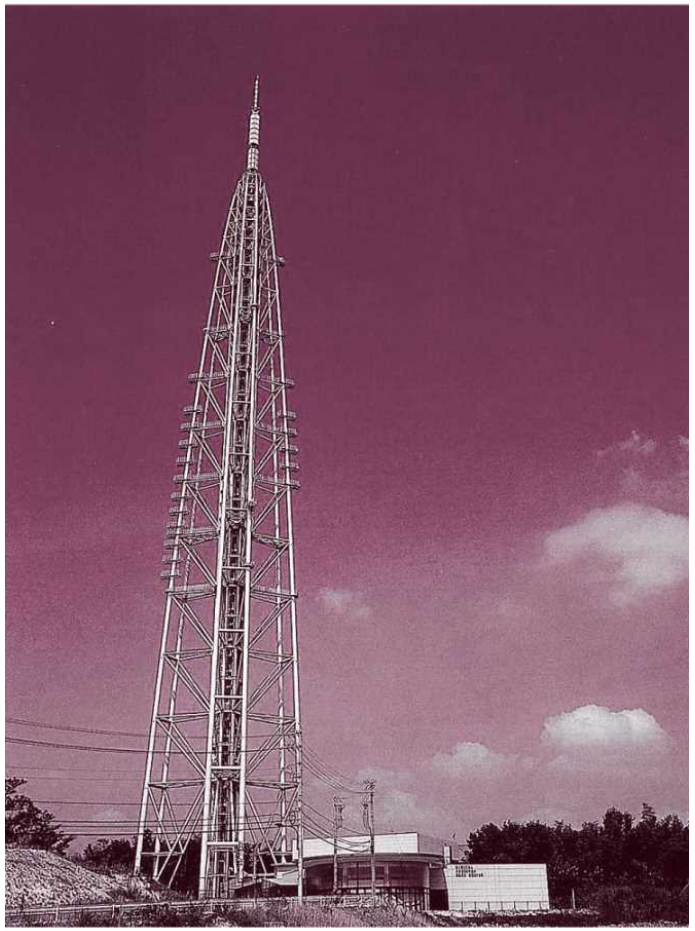


写真1.3　生駒山の代表的な放送アンテナ群の内訳



（a）栄テレビ塔

（b）中京テレビ鉄塔



（c）瀬戸デジタルタワー

写真1.4　中京広域圏へ放送するアンテナ群

1.2　地上デジタル放送の来歴

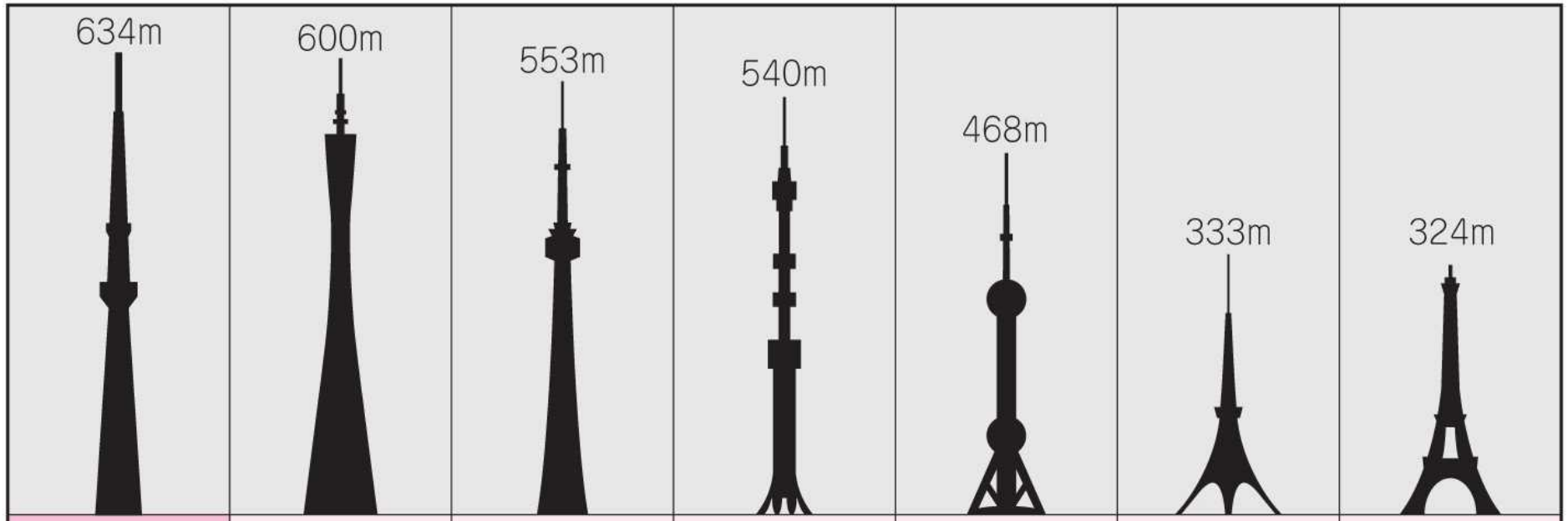
アナログ方式のテレビ放送は1953 年（昭和28 年）2月に始まり，2003 年（平成15 年）12 月に放送開始50 周年．2003 年は奇しくも地上デジタル放送が3 大都市圏（東京，名古屋，大阪）で始まった年．

1.2.1　立地条件

関東広域圏のアナログ放送は高さ333 m の東京タワーにアンテナを設置し，半径100 km の関東広域圏をカバー．デジタル放送は関東一円のモバイル端末や携帯メディアにも障害なく安定に電波を届けるのが「目玉」の一つである．そのため，より高い鉄塔にアンテナを設置することが望ましく，鉄塔は理想的には高さ500 ～600 m が必要で，東京タワーの2 倍近くに及ぶ．

図1.1 は世界各国のタワーである．ニューヨークのエンパイア・ステート・ビル（443 m）よりも高く，トロントのCN タワー（553 m）やモスクワのオスタンキノ・タワー（540 m）と同等かそれ以上の高さである．

地上デジタル放送の売り物は，携帯テレビ，携帯電話や車載端末にも鮮明な画像を送ることである．しかし，東京タワーでは，その最大の障害の原因は高層ビルなどの影響で放送電波を正常に受信できない地域が多くあり，放送局側は約600 m の新タワーが必要と判断しました．



東京スカイツリー	広州塔	CNタワー	オスタンキノ・タワー	オリエンタル・パールタワー（上海タワー）	東京タワー	エッフェル塔
東京	広州	トロント	モスクワ	上海	東京	パリ
2012年	2009年	1976年	1967年	1995年	1958年	1889年
日本	中国	カナダ	ロシア	中国	日本	フランス

図1.1　世界各の主なタワー

1.2.2　新テレビ塔構想の浮上

● 候補地の選定

東京タワーは建設されて以来，45 年にわたりNHKと民放のアナログ放送親局として電波を送信してきました．デジタル放送開始を目前に，東京タワーに代わる「新テレビ塔構想」が首都圏に浮かび上がり，いくつかの候補地で，それぞれの立地条件と思惑が複雑に絡み合い取りざたされました．例えば，新宿高層ビル，秋葉原，多摩地区，さいたま市（旧大宮市）や墨田地区などである．

話題になった上野公園案（高さ600 m）は，今の東京タワーを建設する際にも候補地として挙げられたのであるが，当時はNHK（内幸町）やラジオ東京（赤坂）にも近いというロケーションの良さで現在の場所に決定したといわれている．

● 墨田区押上/業平橋地区に決定

鉄塔建設はどう安く見積もっても数百億円規模の事業．新しい放送のための理想的な放送塔ができれば，それにこしたことはないとの期待は放送局側にありました．しかし大半の放送局の本音は，東京タワーを当面大切に使っていくのが最も現実的だという考えがあったかもしれません．

そこで，これを契機として，民放5 社とNHK は，この重要な役割を担う新タワーの建設地として，2006年3 月に「墨田区押上/ 業平橋地区」を最終決定し，600m 級テレビ塔からのデジタル放送に向けて準備を進めることになったのである．

最終的に墨田区押上/ 業平橋地区の広大な地区に高さ634 m の新テレビ塔「東京スカイツリー」（**写真1.5**）が約650億円かけて建設されました．

写真1.5　東京スカイツリー（写真提供：東武鉄道）

それ以来，2001 年（平成13 年）までに東京タワーに設置されたテレビ放送局はNHK 総合テレビ，NHK教育テレビ，日本テレビ，テレビ朝日， TBS，テレビ東京，フジテレビ，放送大学，東京メトロポリタンの9 局，FM放送局がNHK エフエム，東京FM（エフエム東京），FM ジャパン，放送大学FM，インターFMの5局からなる14局のアナログ放送局の送信アンテナが所狭しと設置されている．そして，東京タワーは「とりあえず当面」という形で関東広域圏をサービスする地上デジタル・テレビ放送の東京送信所（親局）としてスタートしました．さらに，関東県域圏の東京メトロポリタン・テレビジョンも関東広域圏と一緒にデジタル放送を開始． **写真1.6**は昭和40 年頃と現在の東京タワーである．

写真1.6　新旧の東京タワー

1.3 UHF 帯テレビ放送と双ループ・アンテナ

1.3.1 UHF 帯テレビ放送

日本で初めてUHF帯のテレビ電波を発射したのは，NHK の日立テレビ中継放送実験局（チャネル52，60 W，本放送では100 W）であり，1961年（昭和36 年）12 月1 日のことでした．使用したアンテナは，NHKの設計によるヘリカル・アンテナ．中継局はサテライト局と呼ばれました．

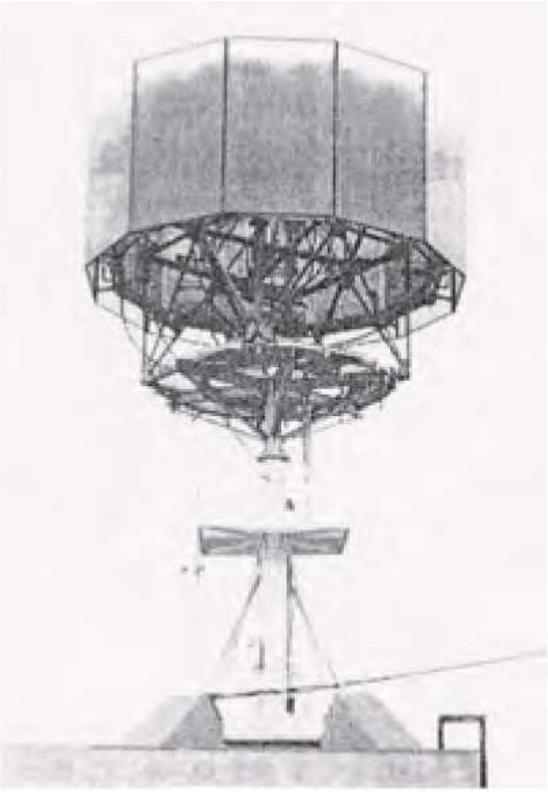
翌年12 月に，NHK 十王テレビ中継放送実験局（高萩市，チャネル51，出力60 W；本放送では100 W）が運用を開始しました．これに使ったのは，NHK が独自に開発した双ループ・アンテナ（英文ではStacked Loop Antenna）でした．このアンテナについて，NHK の技術研究所の遠藤敬二氏が発表．

「これらの要求を満たすアンテナとして，いろいろの型式のものについて，電気的特性，機械的強度，および経済的設計の点から検討を加えた結果，現在の技術で最も有利と思われる双ループ・アンテナを採用．このアンテナは，我が国独自の考案発明によるものである．」と記している．双ループ・アンテナの詳細については，次節に述べる．

次は1967 年（昭和42 年）2 月に，NHK 徳島教育テレビ実験局がやはり双ループ・アンテナを使って開局し，翌年の2 月20 日には正式に徳島教育テレビ局として30 kW の大電力で放送を開始．さらに大電力の50 kW として，NHK は1970 年（昭和45 年）12月に大阪UHF 大電力実験局（写真1.7）を設置しました．そのアンテナとして写真1.8に示す双ループ・アンテナ（2 素子2 列型4 L 3 段12 面）を採用しました．この実験は昭和47 年2 月に終了し，廃局となりました．これにより50 kW というUHF 大電力局に関する技術に十分な自信をもち，成功裡に終了しました．

このようにして，双ループ・アンテナはUHF 帯の小電力の中継局用，そして大電力の基幹局用のアンテナの代表的なものとなりました．すなわちこのアンテナは，VHF 帯用の大電力基幹局で代表的なスーパーターンスタイル・アンテナに相当するものである．

（a）レドームを外した１段分のアンテナ



（b）レドーム付き

写真1.7　NHK大阪UHF
大電力実験局
（2素子2列型4L双ループアンテナ
12面×3段構成）

写真1.8　NHK大阪UHF大電力実験局
（2素子2列型4L双ループアンテナ12面×1段構成）

1.3.2　双ループ・アンテナの発表

図1.2 は実用新案出願公告（考案者：遠藤敬二，岡村浩志，出願：昭和37 年11 月21 日，公告：昭和40 年5 月10 日）に記載された原理図であり，反射板の上方約4 分の1 波長の位置に円形状の放射導体（これをループと呼ぶ）を配置した構造のもので，1 個のループは適当な間隔で平行に配置された2 個の半波長アンテナに相当する特性をもっている．

ループが2，4，6 個のものがあり，電波を放射するのは，その周囲長が約1 波長のループと称される円環状の部分であり，これの長さが半波長の平行給電線により順次接続され，その中央部から分岐同軸ケーブル（特性インピーダンス50 Ω）によって給電される構造である．

電流はループに沿って円環状に流れて，それから放射される電界は垂直成分ももちうるが，上下両ループには反対方向の電流が流れるので，垂直成分は相殺される．その結果，このアンテナから放射される電界は水平成分だけとなります．さらに反射板の存在によって，このアンテナの前方に強い電波が放射され，すなわち高い利得をもつのである．

その入力インピーダンスは，ループの自身の自己放射インピーダンス，ループ間の相互放射インピーダンス，および場合によっては終端部のループの中央部と反射板との間に接続される平行給電線で構成されるリアクタンス補償回路の短絡片の位置によって調整され，非常な広帯域特性を呈しうる．

このアンテナの諸特性は，考案者遠藤敬二博士らの論文や本に詳記されている．

● 遠藤敬二著；「TV・FM放送アンテナ」，日本放送出版協会，昭和41 年11 月．

このアンテナは金属製ループと平行給電線とで構成され，ループの個数に拘らずに1 本の分岐同軸ケーブルによって給電されるので，その構造が非常に簡単で安価である．

入力インピーダンスは分岐同軸ケーブルの特性インピーダンス50 Ωに近く，かつ非常に広帯域特性をもちます．必要とするアンテナの指向性や利得に応じて，ループ数が2個（2 L型），4個（4 L型）または6個（6 L型）を選択．

ループと平行給電線は反射板上に設置され，これをレドームで覆ったものをユニットと呼ぶ構成単位としています．水平面内の必要とする指向性に応じて，それらのユニットを横に並列とか，あるいは円環状に設置します．このように水平面内或は垂直面内の必要とする指向性に応じて，これらのユニットを横方向（水平面内）に，あるいは縦方向（垂直面方向）に，必要に応じて多数個を任意に設置し，所要のアンテナ利得，所要の水平面指向性および垂直面指向性を実現することができ，非常に汎用性が高い．

UHF 帯放送用アンテナは全数の半分以上を双ループ・アンテナが占めている．これは，いかにこのアンテナが優れているかを示すものでしょう．今日，地上デジタル放送用アンテナとしても使用されている．

1.3.3　双ループ・アンテナの理論的研究

このアンテナは基本的には反射板上に円形ループ・アンテナを配置した構造であり，従来の方法に従えば，そこに流れる電流は正弦波的に分布すると仮定し，水平面および垂直面指向性を近似的に算出できる．

NHK では1 個のループ・アンテナは先の図1.2 に示したように，2 個の半波長アンテナをある間隔（0.27 波長）で配列したものに等価であると考え，その水平面および垂直面の指向性を計算した．なお，反射板の広さは無限大としている．このようにして求めた計算値とその実測値とは，非常によく一致すると報じている．

次はループを多数個配列した多段の場合である．NHK では実際にこのアンテナを製作し，各ループおよび給電線に流れる電流を実測した結果，給電点より離れるにしたがって減衰することが判りました．これは損失のある給電線に流れる電流分布に類似しているとして計算を行い，その結果は実際の特性を説明するのに十分なものでした．これらの研究は，

● 遠藤敬二，遠藤幸男，岡村浩志；「双ループ・アンテナ」，電気通信学会，昭和38 年9 月．を最初とし，その後の詳細な研究結果がNHK 技術研究（昭和39年4月），テレビジョン学会誌（昭和39年5月）に発表されている．これらのものはすべて昭和30年代終わり頃であり，モーメント法が発表される以前である．

佐藤，川上らは2 L，4 L，6 L ループ・アンテナを試作し，終端のリアクタンス補償回路の短絡片位置および周波数を種々変化した場合の水平面および垂直面指向性の実測を行い，その結果を種々発表しました．

その最終のものは，

● 佐藤源貞，川上春夫，佐藤光央，石井康義；「モーメント解法による2L 形双ループ・アンテナの理論解析および実験」，テレビジョン学会誌，昭和57 年2 月である．

これらの結果を海外ではInternational Symposium IEEE AP-S（昭和56 年6 月），IEEE AP-S Newsletter（平成元年6 月）にそれぞれ発表しました．

特性インピーダンス50 Ωに対する定在波比の一例として，図1.3～1.5 に示すような広い周波数帯域にわたり良好な特性のものを得ている．これらの研究により，とくに2 L 双ループ・アンテナの諸特性が厳密に計算され，かつその実験も行われ，よく一致した結果となっている．

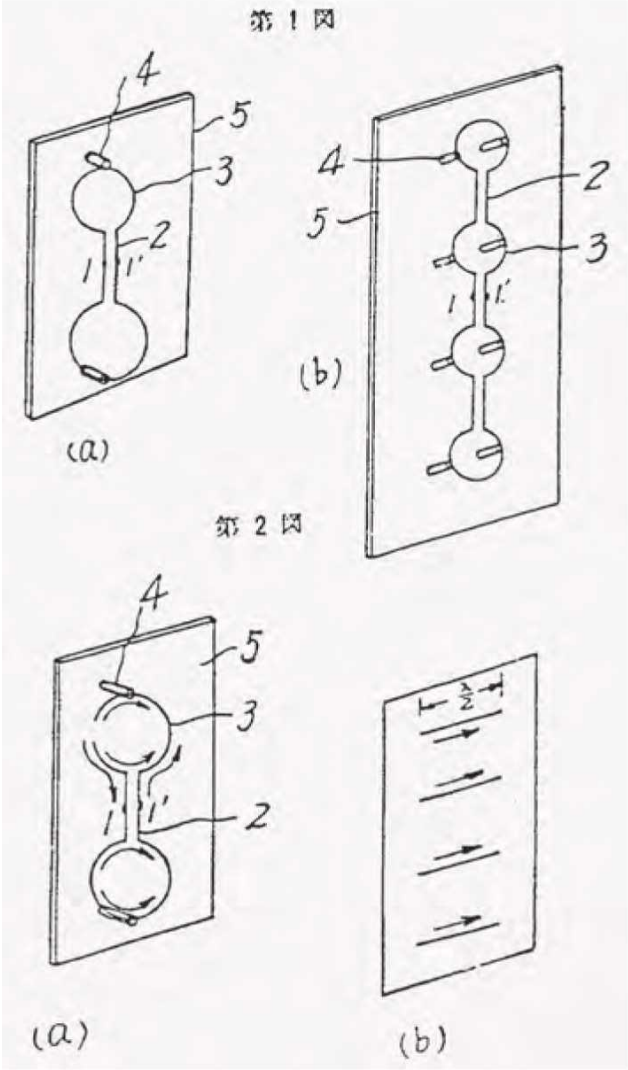
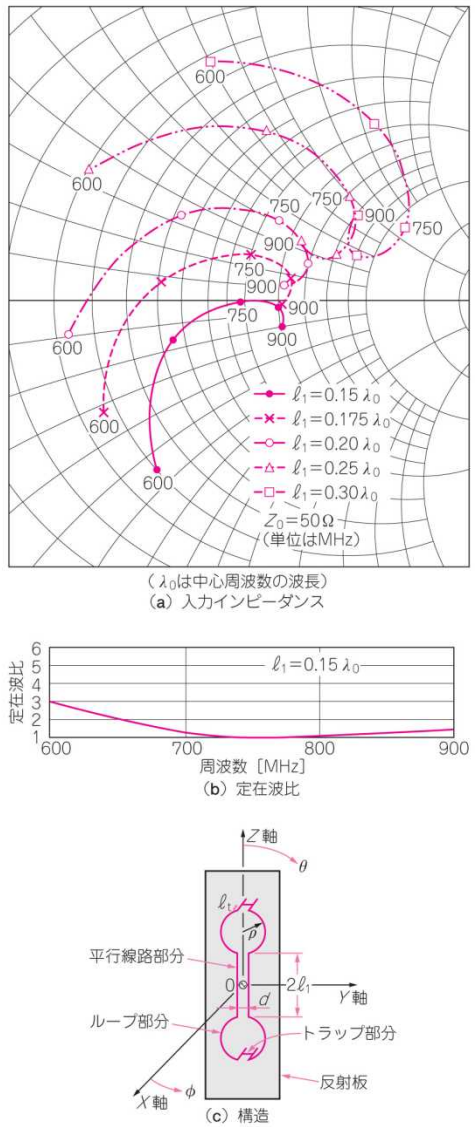


図1.2　実用新案「反射板付双ループアンテナ」に記された図（公告：昭40-12414）



〈図5.3〉[22] 分岐同軸ケーブル（特性インピーダンス50Ω）に対する電圧定在波比の周波数特性の理論値

図1.3　分岐同軸ケーブルに対するVSWRの理論値

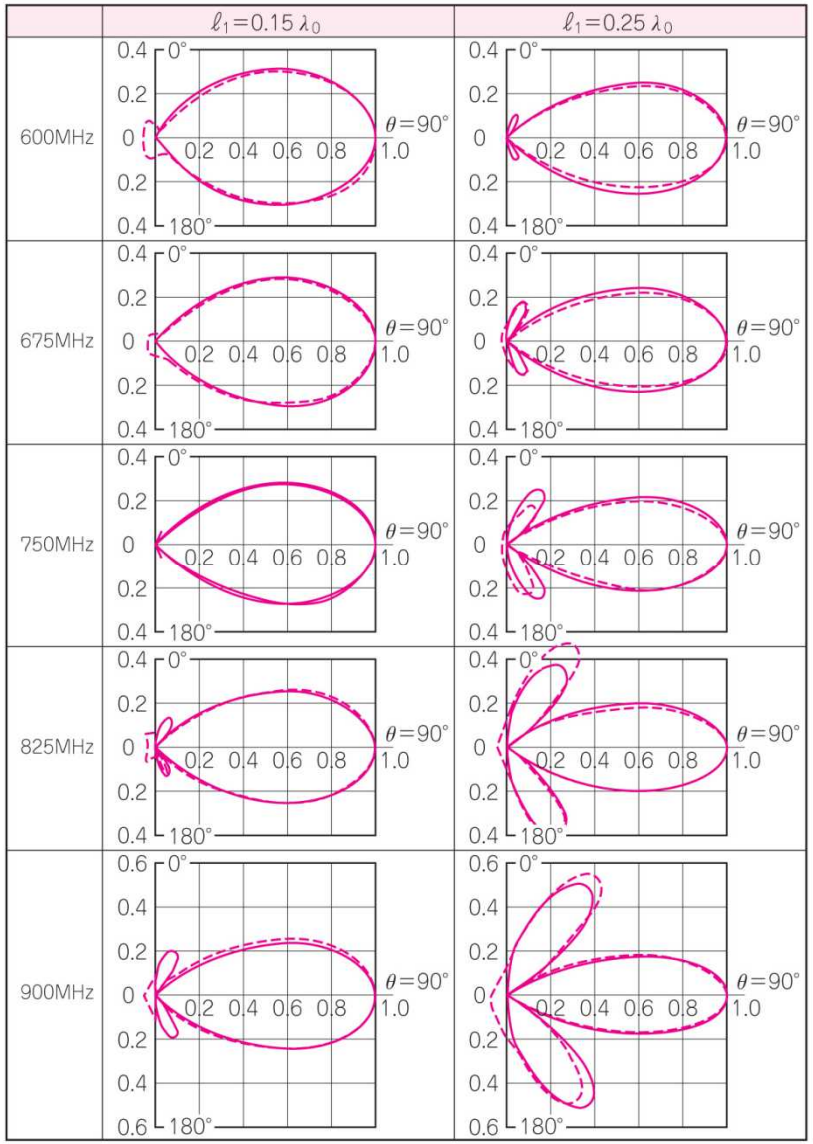
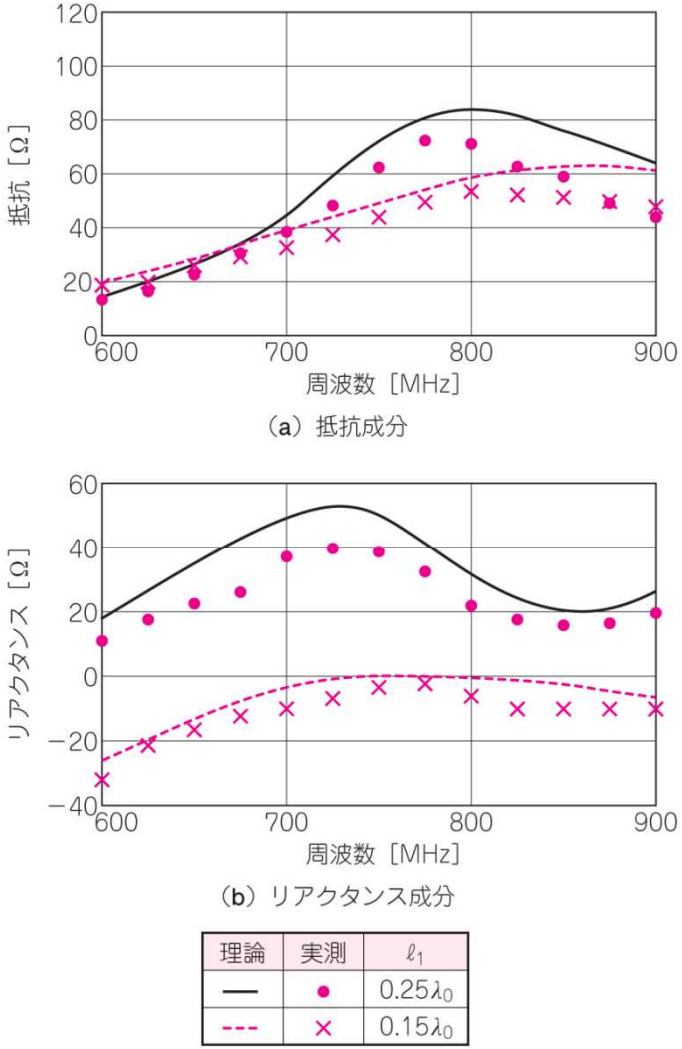


図1.4　2L型双ループアンテナの垂直面指向性



〈図5.5〉[22] 2L型双ループ・アンテナの入力インピーダンス周波数特性

図1.5　2L型双ループアンテナの入力インピーダンス

1.3.4 双ループ・アンテナを改良し，地上デジタル放送送信アンテナ用へ

本章では地上デジタル・テレビ放送用としての双ループ・アンテナの考案から，2002 年（平成14 年）5 月10 日に地上デジタル放送用送信設備共通仕様書（通称「オレンジブック」）が発行されるまでの双ループ・アンテナ開発の経緯について記す．

日本の地上デジタル放送送信用アンテナとして使われるものは従来のアナログ・テレビ送信に使われてきた双ループ・アンテナおよびダイポール・アンテナ（反射板付き金属棒支持1 波長アンテナ）を基礎とするものである．双ループ・アンテナは先述の通りNHK の遠藤敬二氏らが開発したもので，その英語名称はスタックド・ループ・アンテナである．

地上デジタル放送送信用のものは，このアンテナの給電回路系を改良したもので，とくに「広帯域」の名を冠して広帯域双ループ・アンテナと呼ばれている．これが発表された論文は，

- 有城正彦（NHK），武藤正晴（古河電気工業）;「広帯域双ループ・アンテナ（24 U）の開発」，電子情報通信学会，電子情報通信学会技術研究報告，平成14年3 月．
- 坂口正嗣（古河電気工業），武藤正晴（同）;「垂直偏波用広帯域双ループ・アンテナ（24 U）」，映像情報メディア学会，技術報告，平成15 年7 月．
- 有城正彦（NHK）;「地上デジタル放送用広帯域UHFアンテナの開発・実用化」，電波産業会（ARIB）機関誌，平成15 年7 月号．
- 山森一之（古河電気工業），武藤正晴（同），坂口正嗣（同），有城正彦（NHK）;「空中線の広帯域化」，映像情報メディア学会年次大会，平成15 年8 月．などがありる．

その特許関係には，次のものがありる．

- 特許第3374110 号;「送信アンテナ装置および放送塔」，発明者：小暮和男（古河電気工業），山森一之（同），金井隆夫（同），茂田和夫（同），福原黎児（同）．
- 特許第3459637号;「アンテナ・ユニット」，発明者：武藤正晴（古河電気工業），有城正彦（NHK），野上一三（NHK），藤田 浩（NHK），山下隆之（NHK）．
- 特開2003−133840;「双ループ・アンテナおよび双ループ・アンテナ・アレイ」，発明者：松原亮滋（日立電線），高野俊幸（日立電線），有城正彦（NHK）．

1.3.5　東京タワーの地上デジタル送信用アンテナ

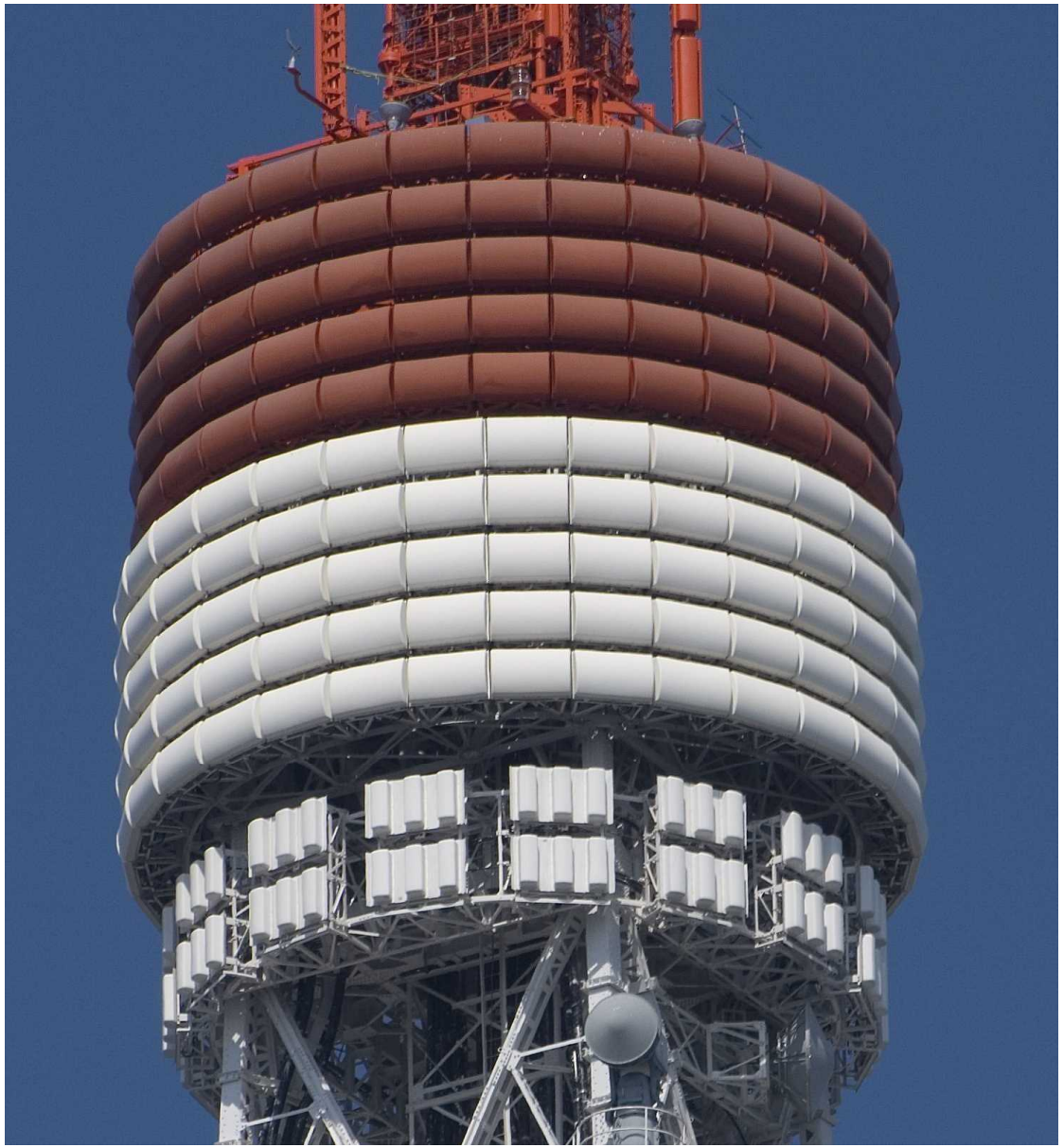
平成15(2003)年12 月1 日から関東(東京タワー)，中京(瀬戸デジタルタワー)，京阪(生駒山)の3 地区において地上デジタルテレビ放送が開始されました．その送信アンテナの主力は，広帯域双ループアンテナである．

写真1.9 が東京タワーの地上デジタルテレビ放送用アンテナ群で，図1.6 はその構造である．ドーナツ状のアンテナ構成群は「3 素子2L 双ループアンテナ5 段15 面4 系統」と呼ばれる無指向性で水平偏波のものである．アンテナ素子が3 個ずつ入ったパネル(写真1.10)が，東京タワーの外周に合わせて1 段に30 枚，各5 段ずつ配置されている．これを上段と下段の2段に配置した構成である．

このアンテナ群は，東京タワーの地上高約250 m 付近に，東京MX テレビと放送大学の送信アンテナ間の約12 m に設置され，合計7 波の地上デジタル放送の電波を発射する．

白いドーナッツ状アンテナの下側にあるのは，東京タワーの地デジ送信用アンテナMX テレビのもので，アナログ/地上デジタルを共用しており「UHF3 素子配列　2L 双ループ・アンテナ2段15 面」と呼ばれる指向性で水平偏波のものである．

東京タワーを利用する地上デジタル・テレビ放送に割り当てられたチャネル番号と周波数は，表1.1 の通りである．



A,Bアンテナ群

C,Dアンテナ群

写真1.9　東京タワーの地上デジタル送信用アンテナ群

写真1.10　3 素子2L 双ループアンテナ

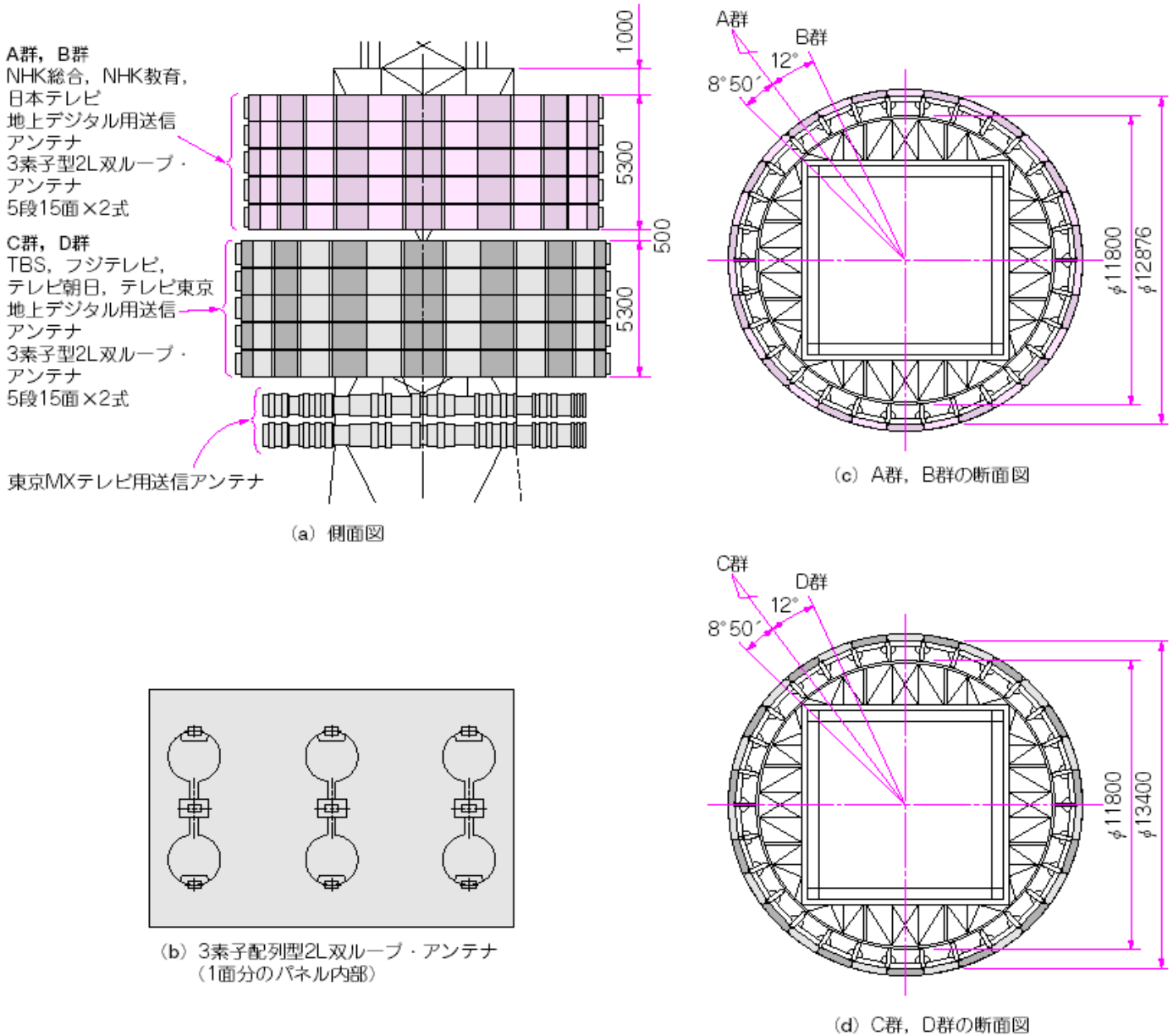


図1.6　東京タワーの地上デジタル・テレビジョン放送用アンテナ群の構成

チャネル	局名	周波数［MHz］
20	東京 MX	512 ～ 518
21	フジテレビ	518 ～ 524
22	東京放送(TBS)	524 ～ 530
23	テレビ東京	530 ～ 536
24	テレビ朝日	536 ～ 542
25	日本テレビ	542 ～ 548
26	NHK 教育	548 ～ 554
27	NHK 総合	554 ～ 560
28	放送大学	560 ～ 566

表1.1　東京タワーを利用する地上デジタル・テレビ放送に割り当てられたチャネル番号と周波数

第2章　東京スカイツリーアンテナの概要と建設

２．１　概要

　東京スカイツリー®は，自立式電波塔として世界一の高さである634mとして建設され，取り付けられた地上デジタル放送用送信アンテナは，ゲイン塔（アンテナを取り付ける柱）の頂部付近に設置されている．
在京放送事業者6社（日本放送協会(NHK),日本テレビ放送網，テレビ朝日，TBSテレビ，テレビ東京，フジテレビション）により発注され，2010年12 月から取り付けが開始された．

東京スカイツリー®，スカイツリーは東武鉄道・東武タワースカイツリー（株）の登録商標

＜アンテナ設備仕様＞

アンテナ形式:4L双ループ4段×20面
各メディア1式（スペース共用）

耐風速:110m/s

水平面指向性:無指向性

耐震性:応答加速度3G

給電線:CX-120D×2条給電（各メディア上下段各1条）

東京スカイツリーのゲイン塔は高さが約140mもあり，耐風・耐震性を考慮し，断面形状は六角形で直径約6m（中心周波数540MHzとして約10波長）となっている．このため，ゲイン塔側面に取り付けるアンテナは，東京タワーと同様に多面構成としている．

送信アンテナ1式あたりの高さは約10m，NHKと民放各社合わせて7メディアあるため，アンテナ中心高低差は60mにもなってしまう．そこで，2メディアのアンテナを交互に配置してスペース共用を行うことにより半分の30mに抑えサービスエリアに差が出ないよう配慮されている．

東京スカイツリーに設置されているアンテナの単体は，反射板とアンテナ素子部，カバーで構成されている．この単体40面を円筒の外周360°に縦向きに配置し，4段重ねたものを1ユニットとし，在京6社分を4ユニットで対応している．東京スカイツリーに設置するうえで，従来のアンテナから改良された部分は500m越えという高さへの対応である．

従来の高さ100～200m規模の電波塔では耐風速は75㎧だったが，理論上，1350年に1度，吹くか吹かないかという極めて強い暴風でも耐えられるよう耐風速110㎧で設計されている．

２．２　建設

　東京スカイツリーは,電波塔として放送・通信分野のみならず,社会・歴史・文化的な意味合いからも広がりの大きい存在である.まず,東京スカイツリー建設の概要を説明する.

　東京スカイツリーの建設場所が墨田区押上に決定されるや否や,2008年7月より約3年半の工期を掛けて2012年3月に竣工した.

　事業主体は,東武タワースカイツリー株式会社,東武鉄道株式会社.日本の伝統美と近未来的デザインが融合し,日本古来の建築である五重塔の構造になぞられた新たな制振システム「心柱制振」が採用された東京スカイツリーの高さは634(むさし)m,自立式電波塔として世界一の高さを誇るものである（高層ビルとしてはドバイのブルジュ・ハリファ(828m)が世界一）.ゲイン塔の頂部には,地上デジタルテレビ放送用送信アンテナが合計640面設置され関東近郊に送信された.

２．３　3.11東日本大震災時の状況

地上デジタルテレビ放送の送信アンテナ取り付け作業が始まったのは2010年12月18日からである．寒風の中，497mの踊り場に送信アンテナ及び架台を搬入し，まず最上部からゲイン塔に取り付ける作業が始まった．以下在京6社の送信アンテナを取り付けていった．（写真2.1～写真2.3）

2011年3月1日ゲイン塔のリフトアップが行われ，13時7分に600メートルに到達，さらに13時29分には高さ601メートルに達し，広州塔を抜いて自立式電波塔として世界一の高さとなる．同日中に604メートルまで到着した．2011年3月11日14時46分東北地方太平洋沖地震（東日本大震災震度M9）が起きたのである．

　その時ゲイン塔のリフトアップしている最中であったと思われる．このような大地震でもタワーへの損傷は勿論,送信アンテナにも問題がなかったことが確認され、東京スカイツリーの芯となる心柱制振に代表される制振システムの有効性がこの激震によって証明された．作業員全員の無事も確認された.

　2011年3月12日625メートル到着し，3月14日，震災後の塔構造体への被害がなく，地震後のアンテナ精度・性能とも問題がなかったことを確認した．この大震災の影響はなくて済んだのであった.

　3月18日13時34分完成時の高さ634メートルに到達し,無事に2012年3月2日東京スカイツリーの竣工式が行われた.

写真2.1　アンテナ取り付け作業

写真2.2　アンテナつり上げ作業

写真2.3　アンテナ取り付け中と完了（文献６より転記）

第3章　東京スカイツリーアンテナの内部及び給電構造設計[1]-[10]

　このアンテナの放射素子は，双ループアンテナで構成されている．
　一般にループアンテナの入力インピーダンスは110Ω程度と言われているが，給電する平衡線路におけるお互いの線路間隔が数ミリと狭くなり耐電力の低下が懸念された．東京スカイツリーから発射される大電力にも耐え得るよう20mm程度の間隔を確保するため，約200Ωの高インピーダンスで給電し，それに合わせたループ形状としている．次に，東京スカイツリー地上デジタル放送用アンテナ構造の詳細について述べる．

写真3.1，写真3.2に示す様に双ループアンテナの入力インピーダンス100Ωと，同軸2分配給電線50Ωとのインピーダンス整合と平衡不平衡の変換を担うバラン部に同軸2分配回路で給電している．

その内部構造を図3.1,図3.2示す．大電力用を考慮してこの双ループアンテナ素子は黄銅板にて構成されている．また，素子下側には，水平面指向性の周波数偏差を最小限に抑えるための指向性制御板が設けられている．反射板は耐久性，軽量化を考慮してステンレス板で構成されている．尚，これらのアンテナ素子は，FRP製の防雪カバーで覆われている．

写真3.1　双ループアンテナの内部構造（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）

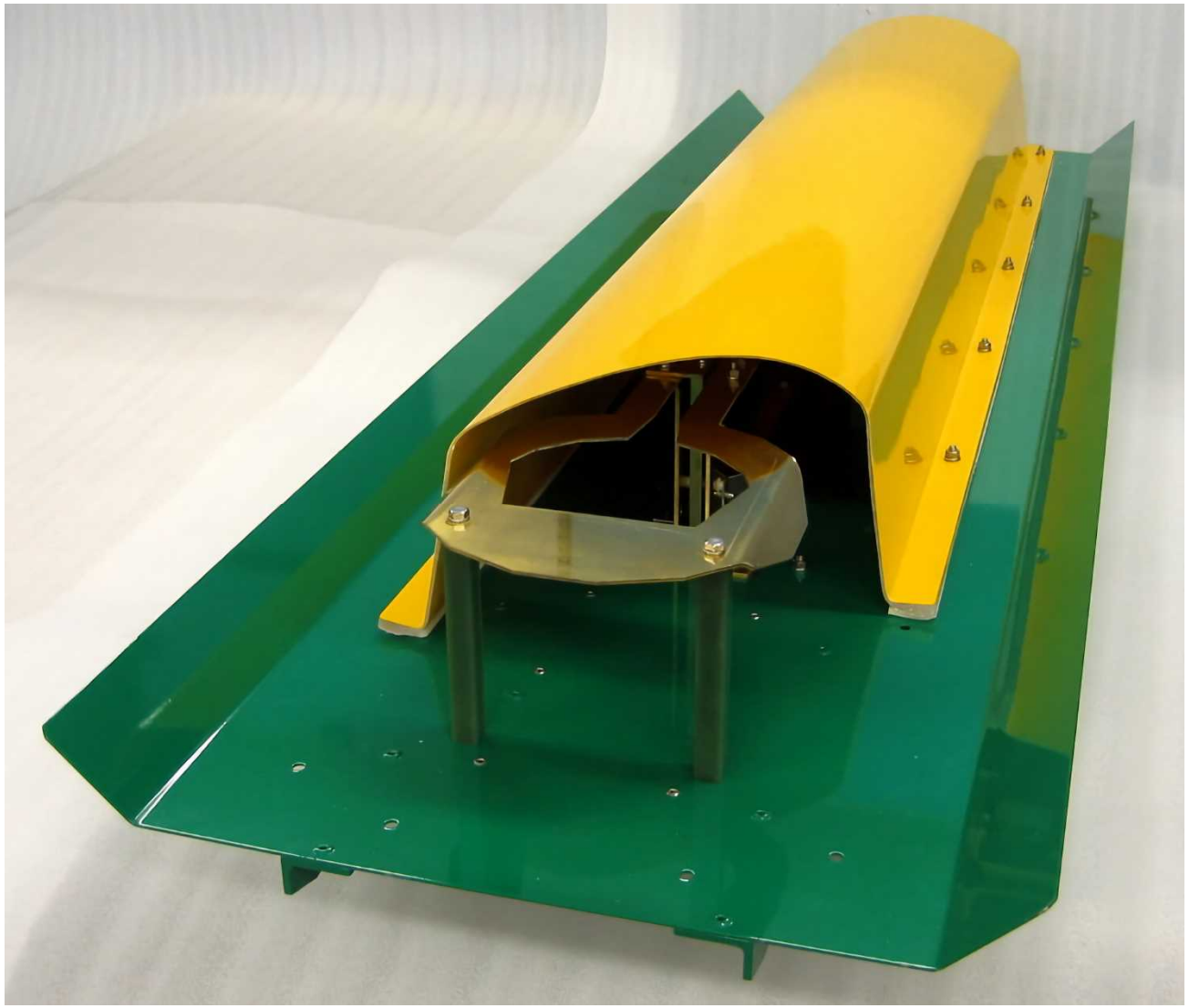
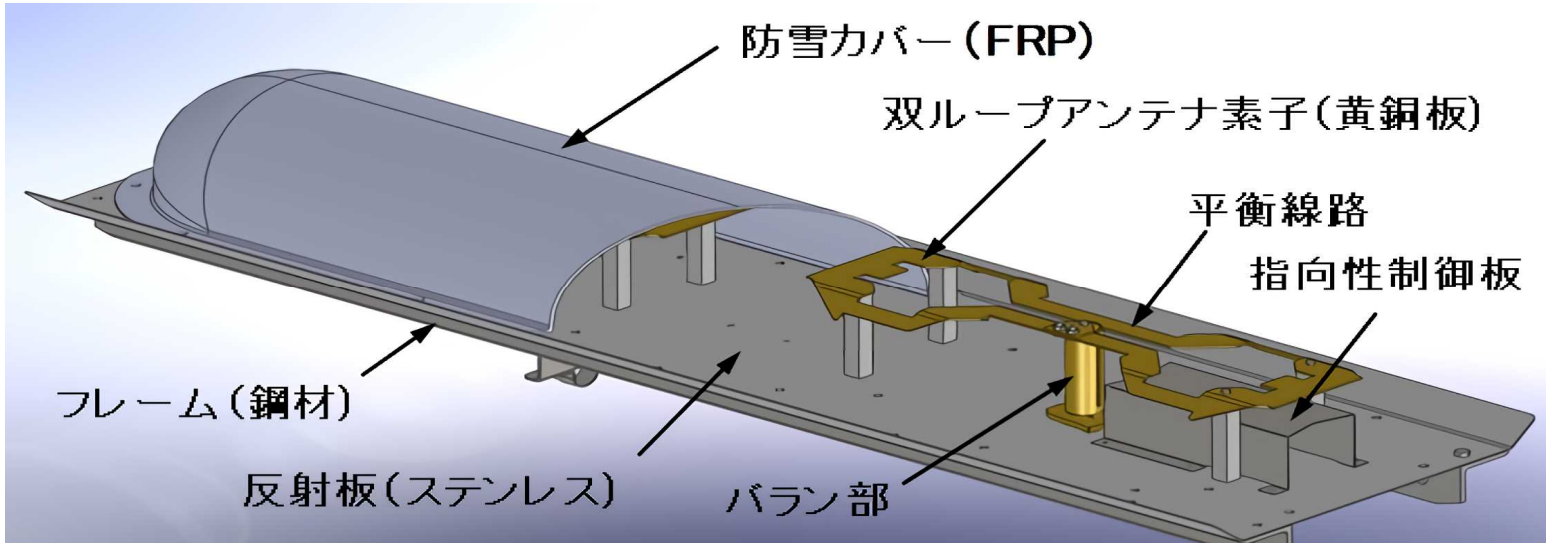


写真3.2　双ループアンテナの素子のカットサンプル（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）



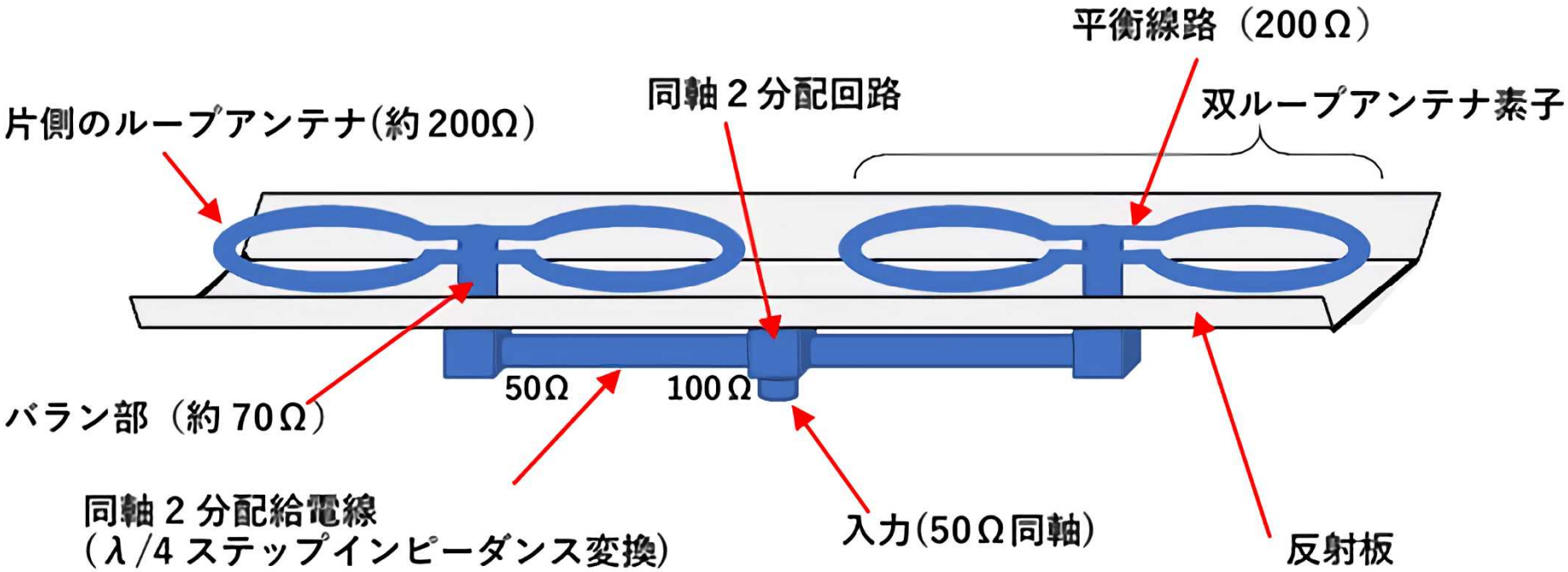


図3.1～3.２　双ループアンテナの素子の内部と給電系の構造（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）

第4章　東京スカイツリーアンテナの特性

東京スカイツリーアンテナの多面構成や指向性について詳細に述べる.

4.1　アンテナ構成

多面構成に用いるアンテナは，ゲイン塔直径やスペース共用などの条件下でも水平面指向性の偏差が少なくできる4L双ループアンテナ素子を用いている．構成方法は，１素子収容型アンテナパネル×20面と，3素子収容型アンテナパネル×12面が考えられたが，比較検討の結果，両者の特性上の差異はなく，メンテナンス性で有利な1素子収容型アンテナパネル×20面の多面構成を採用している.

４．２　水平面及び垂直面指向性

　東京スカイツリーの電波は全方向で偏差の少ない無指向性を得るため，直径6m程のゲイン塔側面に，１系統あたり4段×20面のアンテナを配置している．在京5民放，ＮＨＫ総合とＮＨＫ教育など8系統であるが，各系統における放射中心高さの差を最小限にするため，図4.1(b)のように，Ａ群アンテナの間に別系統であるＢ群アンテナを交互に配置し，１ブロックあたり4段40面，地上デジタルテレビ放送用として4ブロックで総計640面を配置している．

図4.1(a),(b)の送信アンテナの形状は4L双ループアンテナ[1],[2]で，アンテナ単体は，正面方向が一番強くなる指向性を持っている．図4.2のように，水平方向の電力半値幅は約60°，45°方向では正面より6dB下がるが，隣接するアンテナとの電界合成により上昇し，図4.6の4面合成ではちょうど全方向3dB以内の偏差となる指向性を得ることができる．

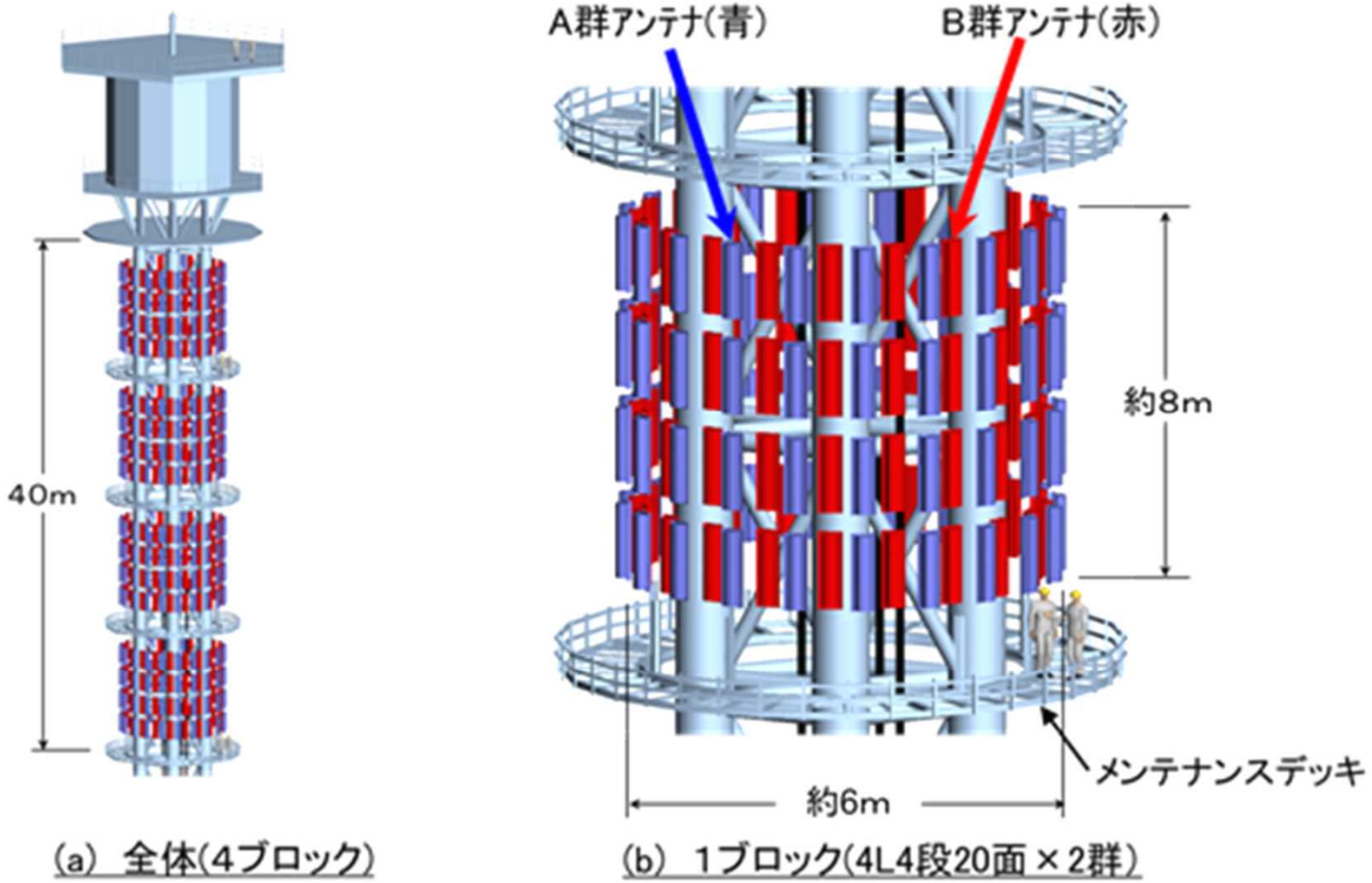


図4.1(a),(b) アンテナの配置

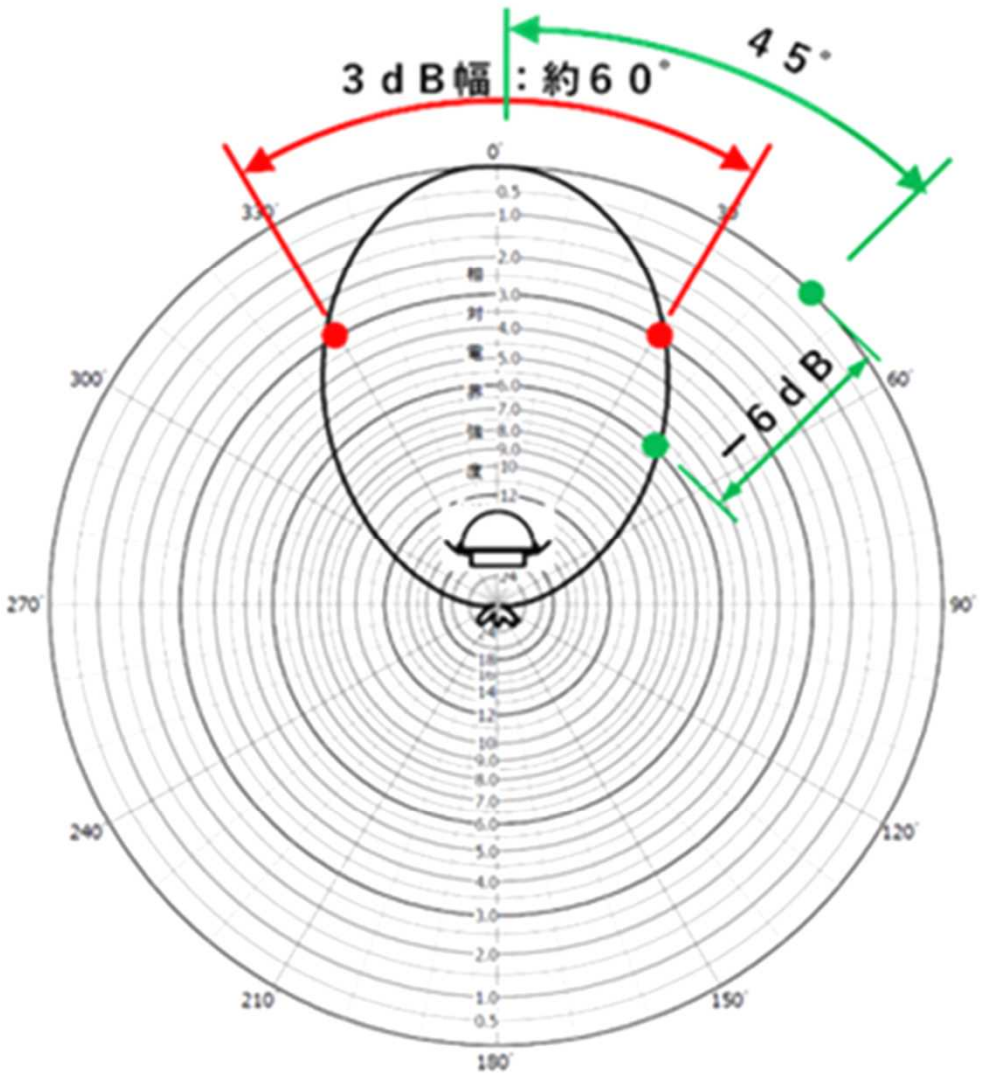


図4.2 単体指向性

この場合，中心からのアンテナの突き出し量は，わずか30cm，50cm突き出し量を多くすると図4.3,図4.4のようにアンテナ正面と合成面の間の落ち込みが大きくなり，方向によっては十分な電界強度を得られなくなってしまう．このため，図4.5ように，さらに間にアンテナを追加し，8面合成にすると直径1.2mまで配置径を広げることができる．

東京スカイツリーでは図4.6の通り20面配置し，直径約6mのゲイン塔の側面に取り付けても無指向性を得られるように突き出し量を設定している．

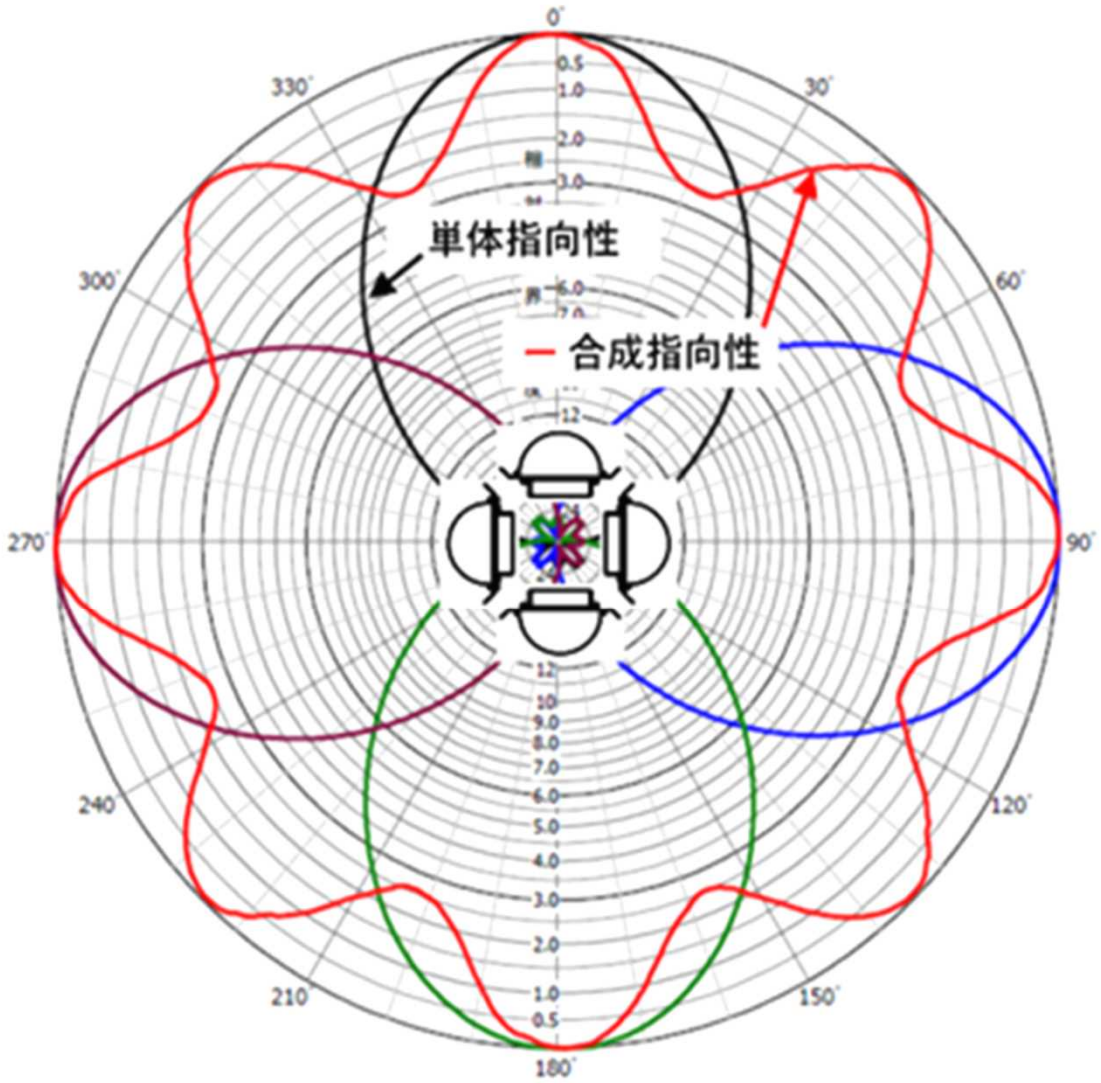


図4.3 4面合成
（突き出し30cm）

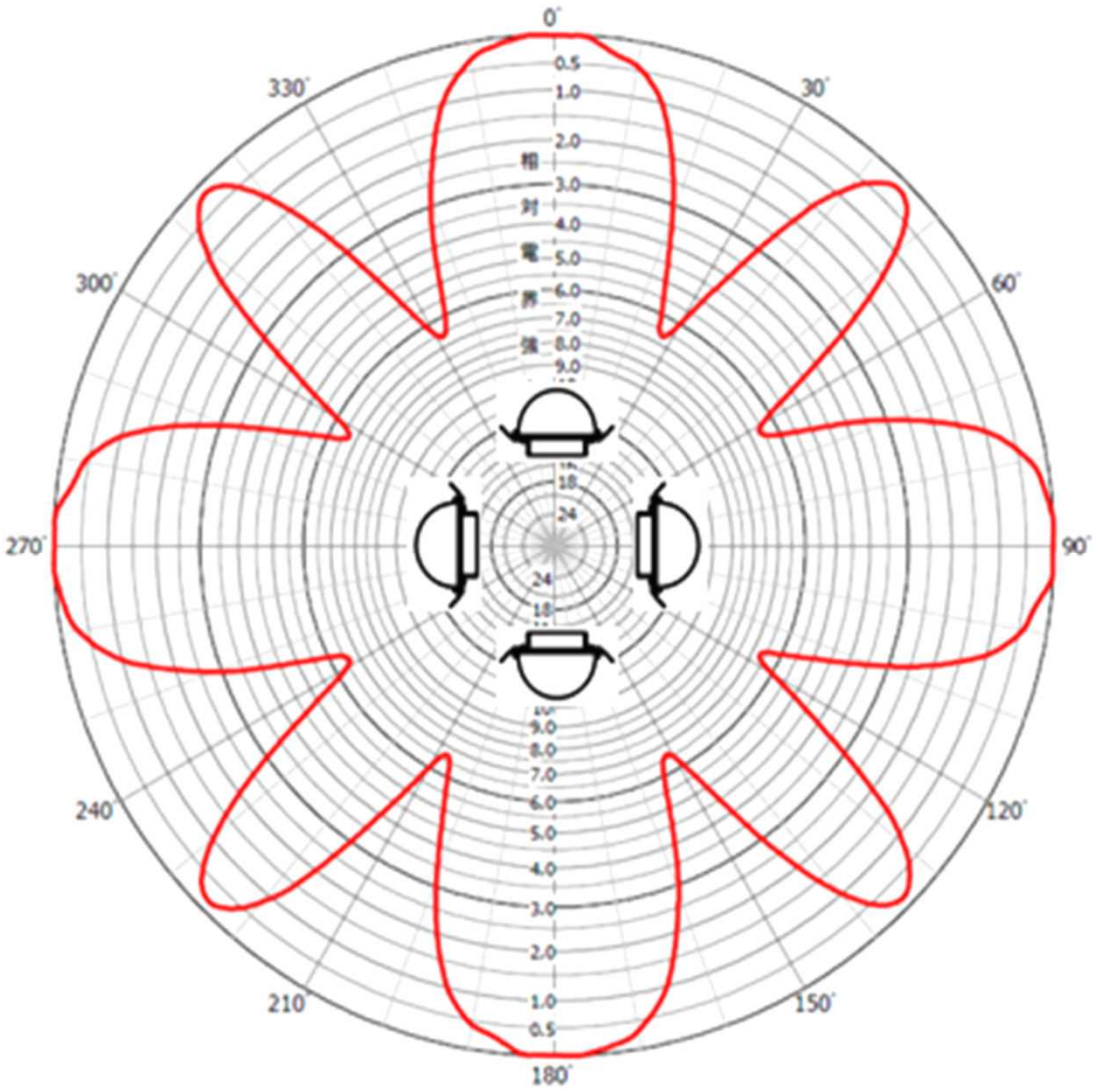


図4.4 4面合成
（突き出し50cm）

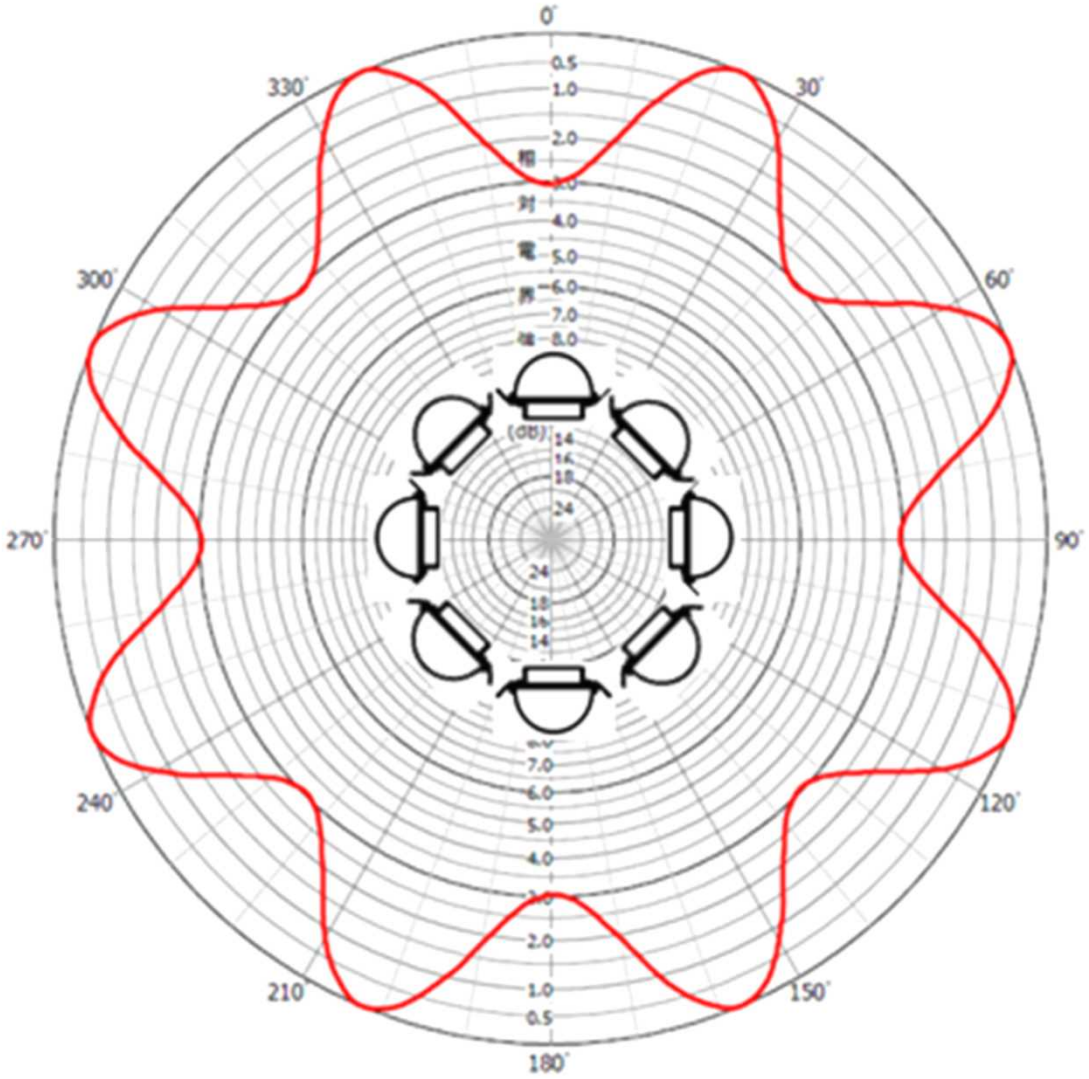


図4.5 8面合成
（直径1.2mに配置）

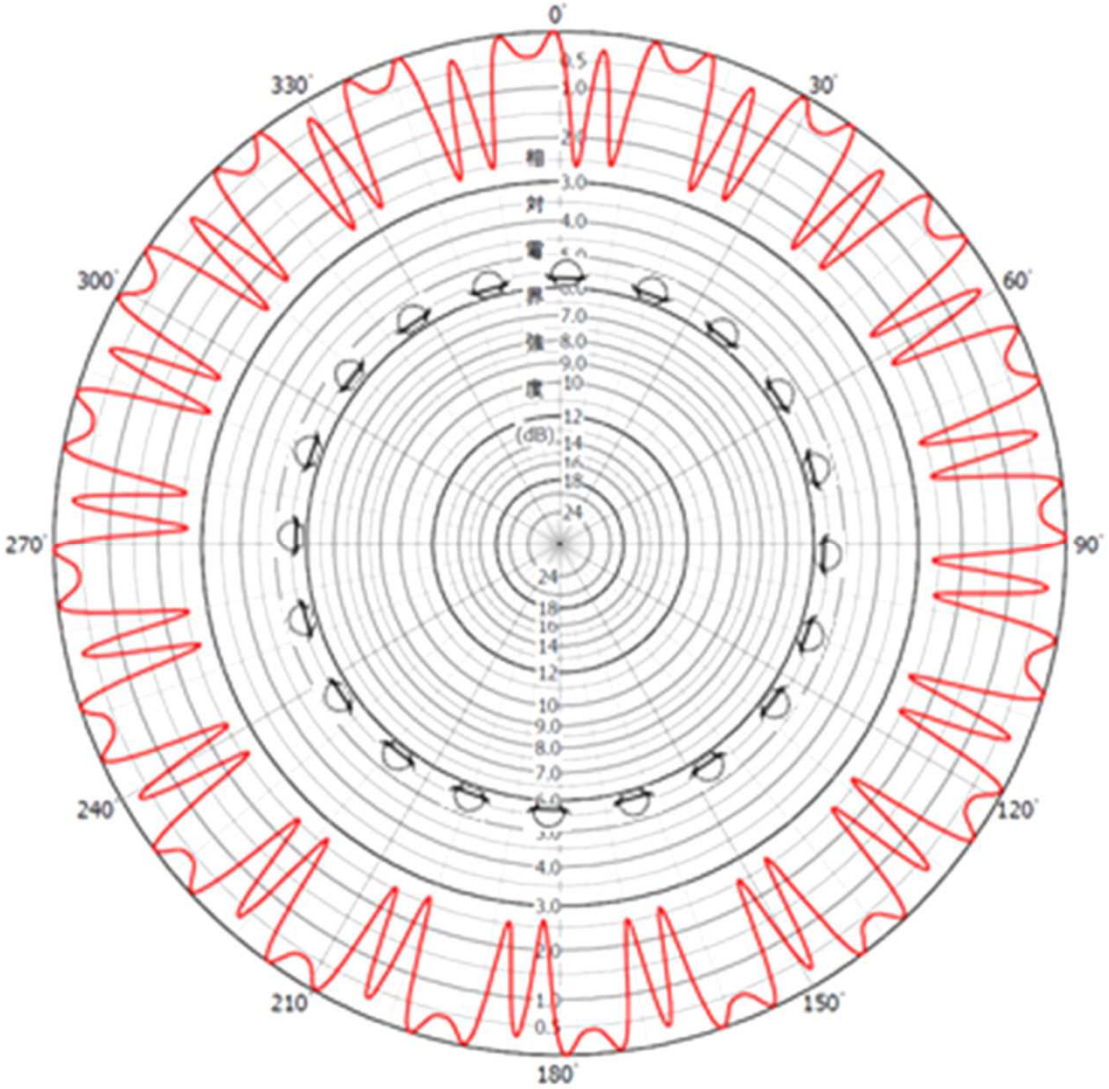


図4.6 20面合成
（直径約6mに配置）

また，隣接して設置するメディア間の指向性差を少なくするために，図4.7のようにA群，B群のアンテナを同一方位に向けたまま，左右に数10cmオフセットさせる“左右スキューアンテナ共用システム”（特許取得済み）を採用している．１素子収容型アンテナパネルの採用により，各使用周波数に合わせ最適な突き出し量とすることが容易になると共に，位置や方向なども，おのおの単独で調整が可能となるため，実測した指向性から位置の微調整を繰り返し行い，すべてのメディアで偏差の少ない無指向性を得ている．

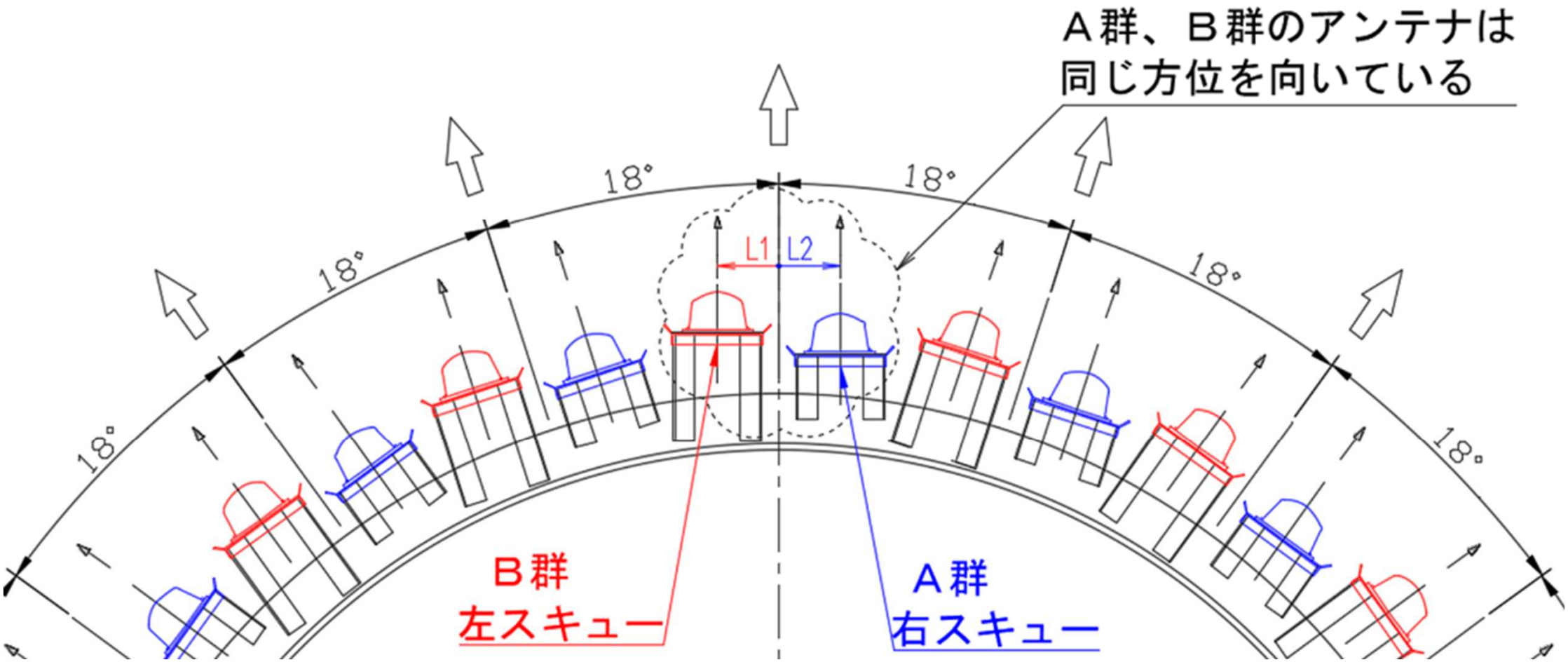


図4.7 左右スキューアンテナ共用システム

垂直指向性は,都市部の電界を厚くするため,水平方向より下向きにチルトさせた指向性となっている.アンテナを垂直に取り付けたまま下向きに放射できるように,4段のアンテナに給電する電波は,振幅や位相を変えている.

図4.8のアンテナ4段のうち,一番上のアンテナから進み位相の電波が出て,4段目から出る電波が遅れ位相で放射されると,等位相面が図の様に下向きとなり主ビームは水平より下方向に放射される.

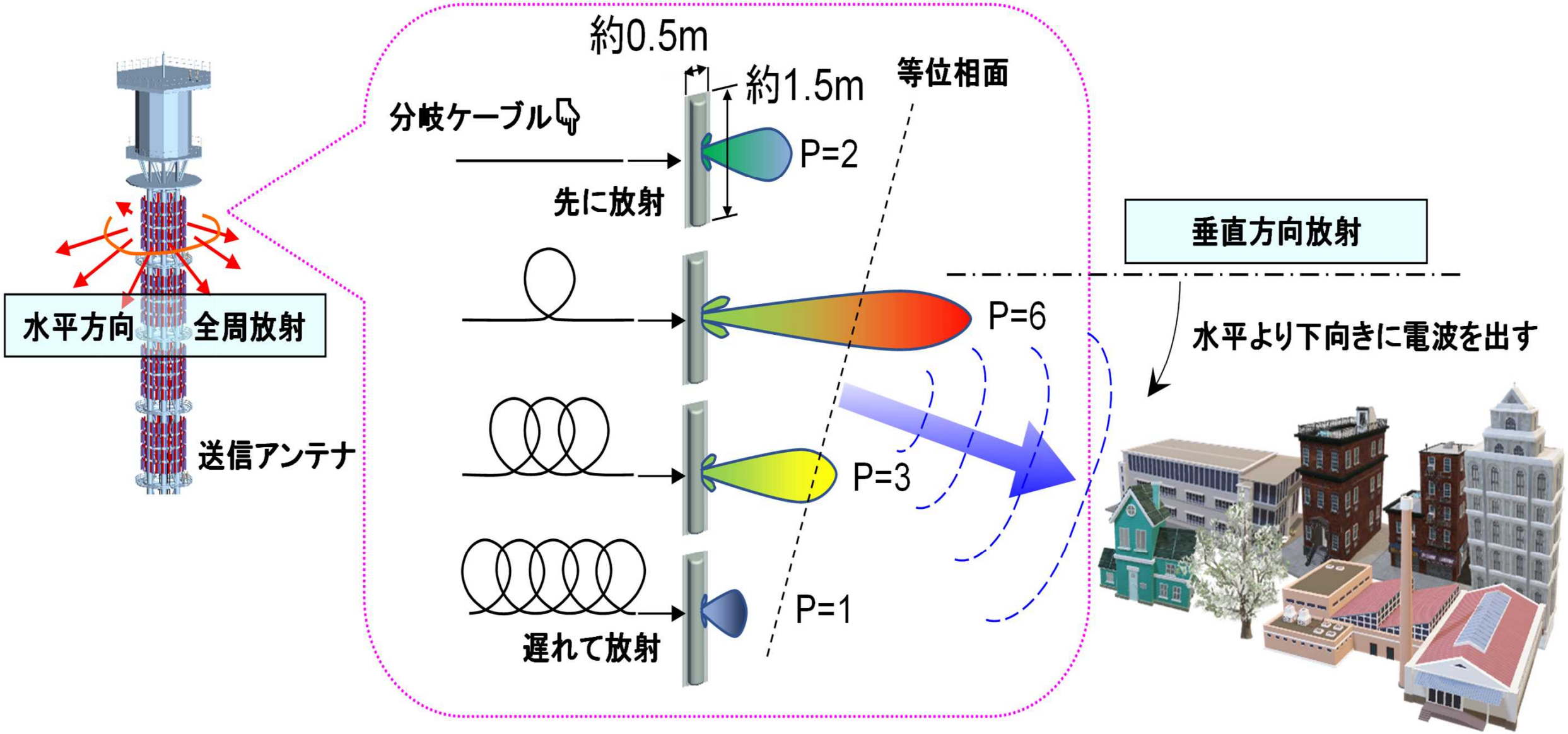


図4.8 下向きに電波を出す電気チルトの方法

しかし,給電位相のみで各段の電力をすべて等しい電力で給電すると,図4.9の破線のように,俯角（ふかく）7～9°,16°付近に位相反転によるヌルが発生して電波の弱くなる地域が出てしまう.

各段のアンテナに給電する電力分配比を変えて2：6：3：1とすることにより落ち込みを軽減させ,遠方から距離の近い足元まで一定の電界強度が確保できる様にしている.

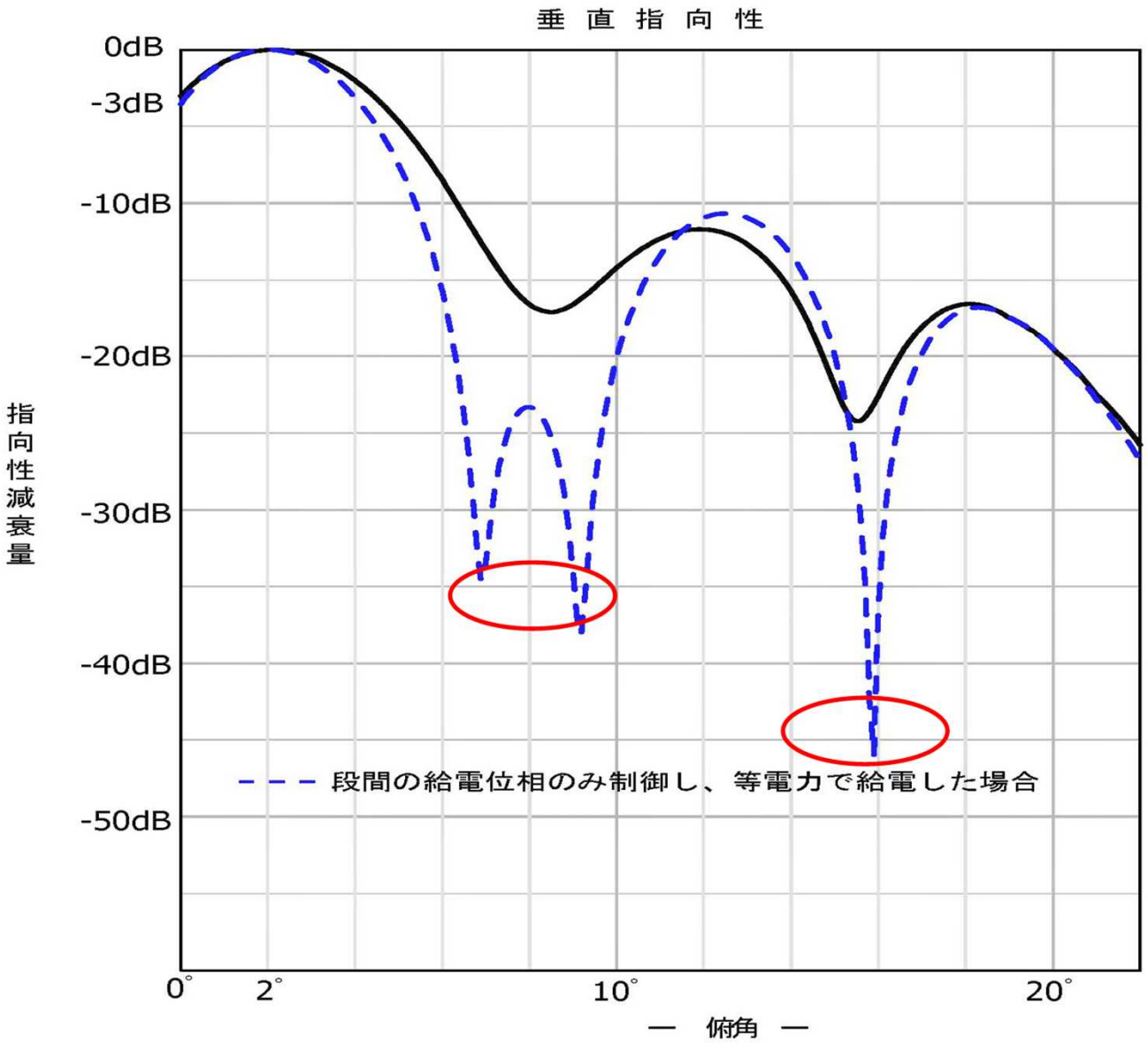


図4.9　等電力給電時のヌル発生角度

4.3　メンテナンスデッキの影響

　送信アンテナをメンテナンスするため各ブロックには図4.1(b)のようにメンテナンスデッキを設けており,転落防止のための手すりも設置されている.

　デッキはメッシュ状の金属板で,金属棒の手すりや中桟も,水平偏波である送信波の電界と同じ向きで,足元エリアへの放射に影響する可能性が考えられたため,指向性に対するシミュレーション検討や検証も実施した.

図4.10のシミュレーションモデルで得られた結果の一例が図4.11である.0°～20°付近まではデッキの影響を全く受けていないが,下向き40°付近にわずかながら1～2dB程度の変化が出ることが分かる.しかし,この角度はタワーの足元で離隔距離も少なく元々強電界であるため受信への影響は,ほとんどないことも確認できた.

写真4.1は,これらの影響をエイチ・シー・ネットワークス㈱の工場で測定検証している風景である.1面4段で上下のデッキと手すりも模擬して垂直方向の指向性を測定している（写真右側が大地側）.

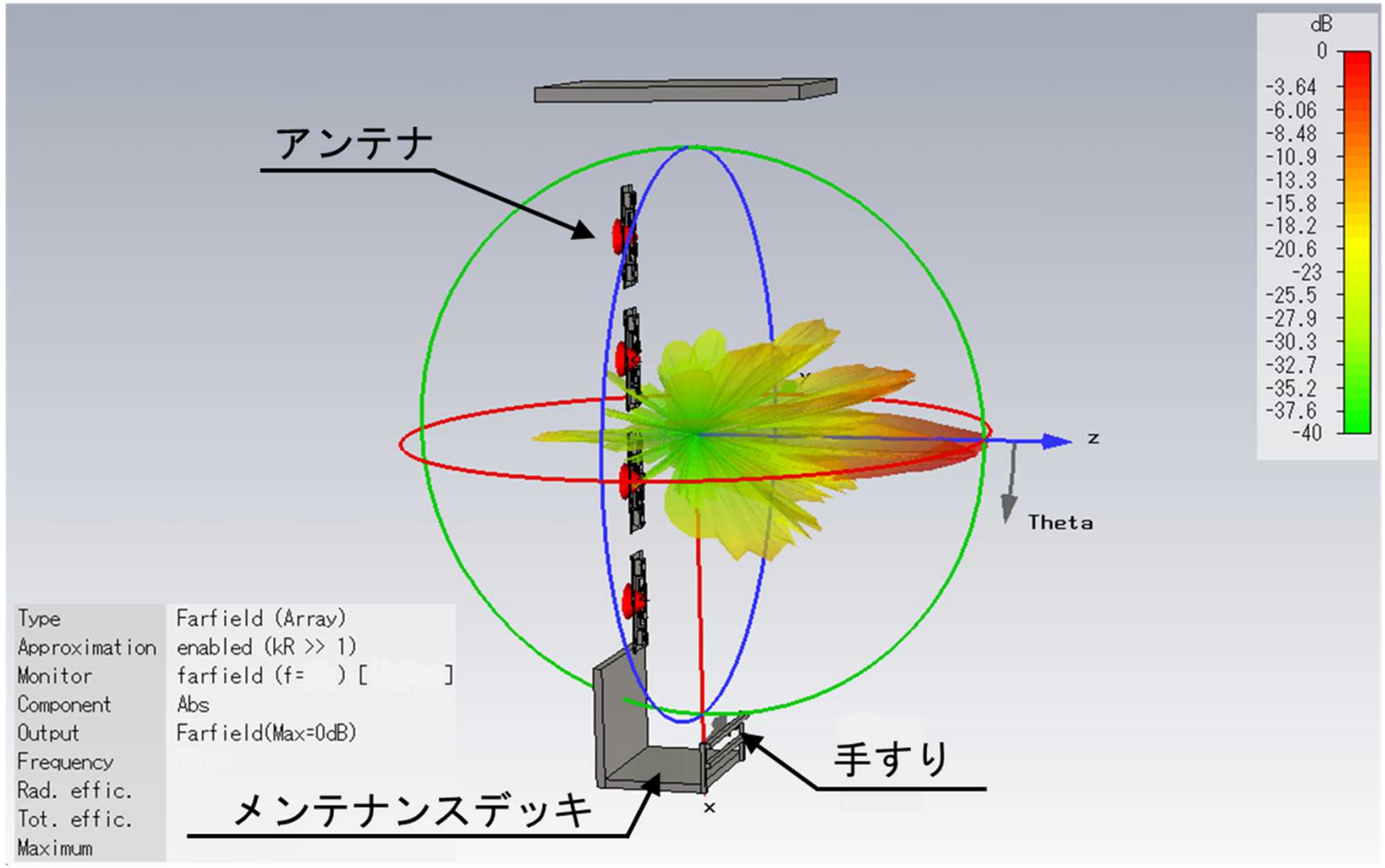


図4.10　メンテナンスデッキの指向性影響モデル

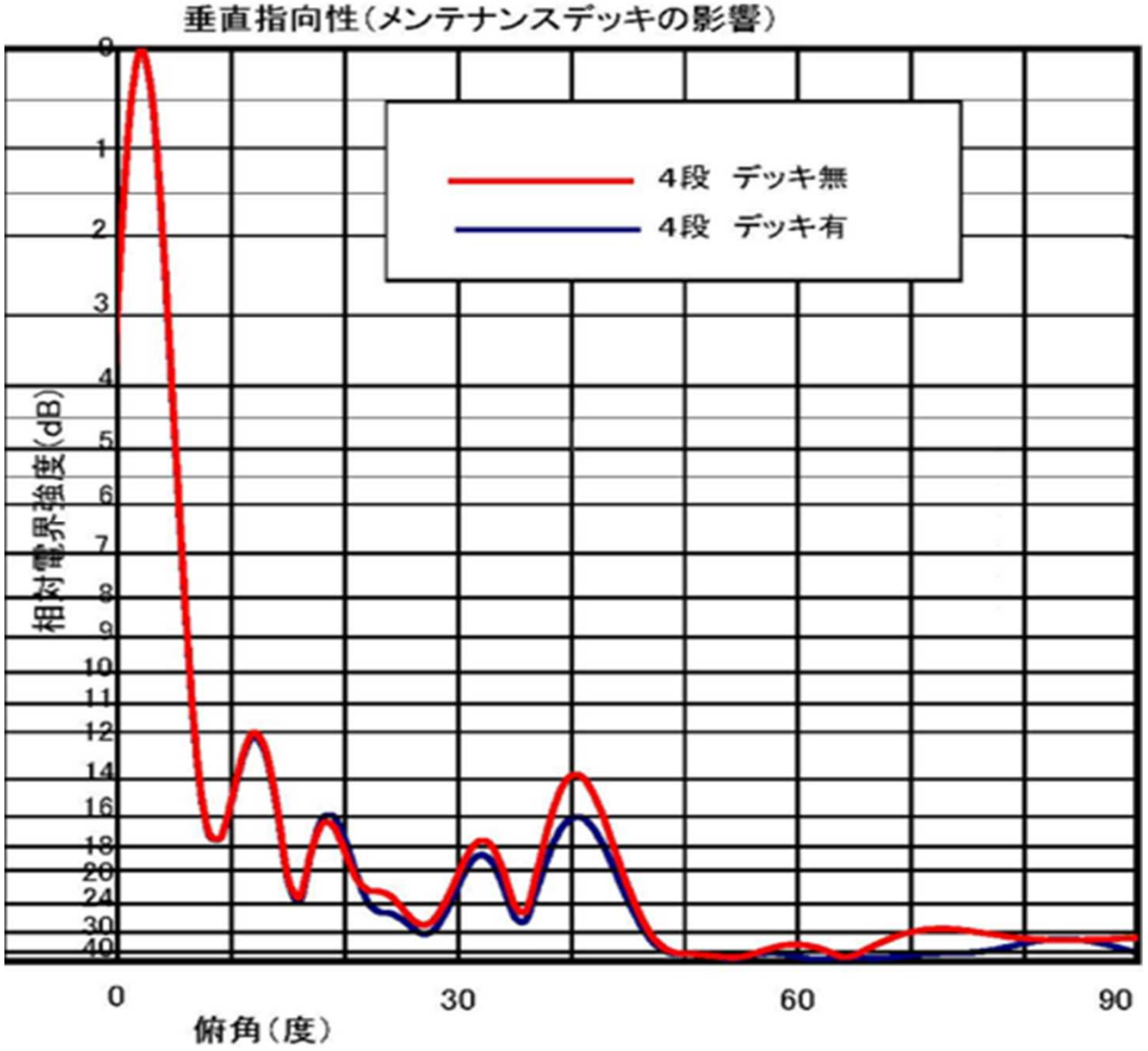


図4.11　メンテナンスデッキの影響計算結果一例

写真4.1 工場における測定検証風景

4.4　ネットの電波に対する影響検証

　冬季になるとスカイツリー送信アンテナの周りにはネットが試験的に設置されている.

　地上が雨でも600mの高所では雪で強風となっている場合もあり,アンテナやメンテナンスデッキ,ゲイン塔にも雪が付着する.たとえ付着した雪の塊や氷が落下しても大きな塊のまま塔体の外に飛び出さないよう安全を考慮して期間限定で仮設しているのである.

　このネットは,特殊な超高強力ポリエチレン繊維（イザナス®）で作られており,低温で強風が吹く真冬の環境下でも十分な性能を維持することができる材料である.

IZANAS®,イザナス®は東洋紡の登録商標である.

また,軽く,吸水率も低いなど,さまざまな特徴があるが,実際にアンテナ正面にネットを張るとなると電波にどのような影響が出るのか,また,ネットを固定するための金具の影響などは未知の領域であったため,いろいろな材質や太さをアンテナの前に設置すると共に,使用環境も模擬した実験も工場で実施したうえで選定している.

写真4.2は同工場でアンテナ正面にネットを張って減衰量を測定している風景,写真4.3は雨や雪を想定しネットに水を噴霧している様子,写真4.4は,実際のゲイン塔に設置されたネットである.

上下のデッキ間に張られたワイヤに通したカラビナでネットを固定している.デッキ上に準備したネットを一気に昇降させることができるため,数日の間に設置や撤去が行えるようになっている.

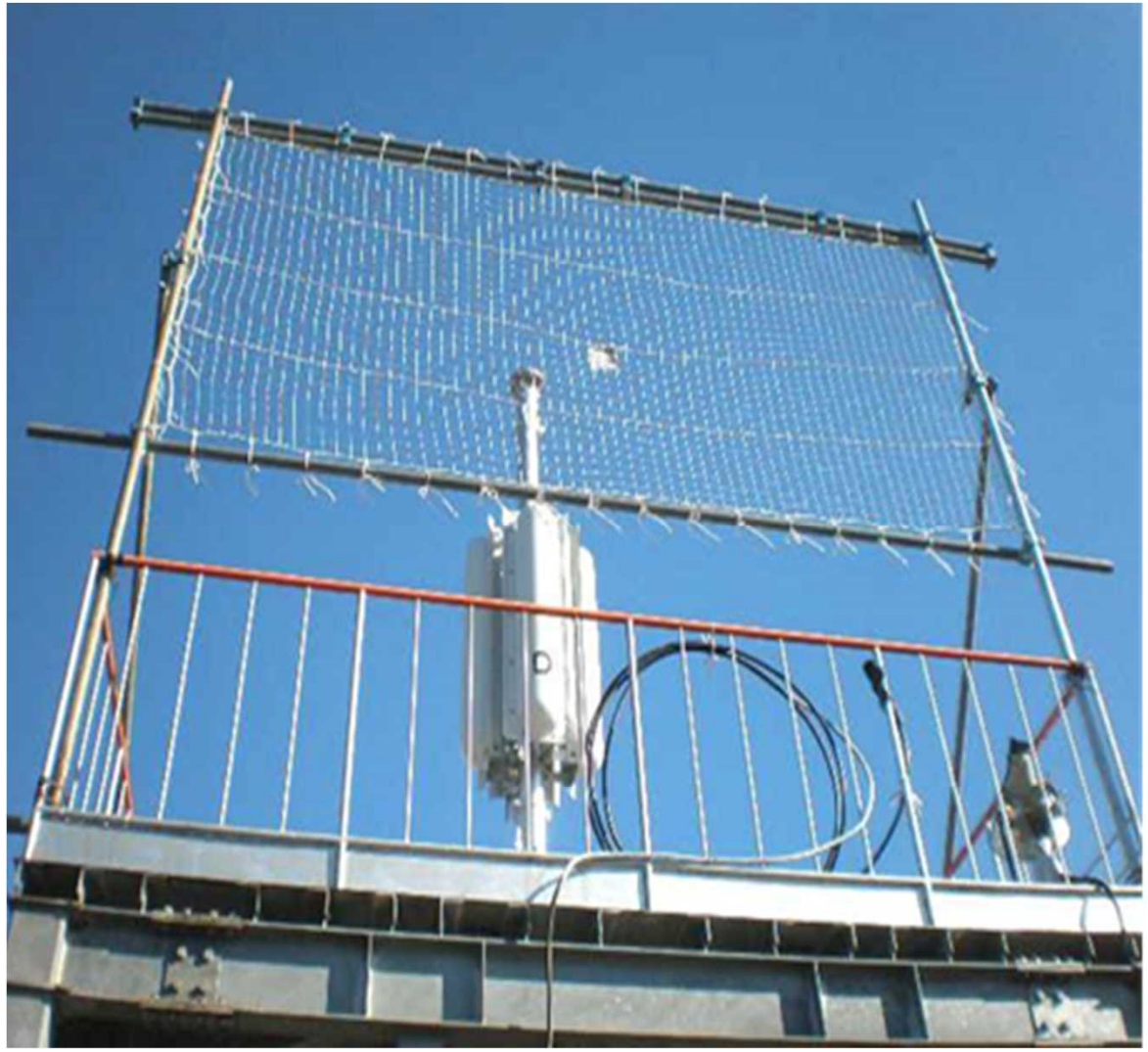


写真4.2　アンテナ正面に張ったネット

写真4.3　ネットに水を噴霧

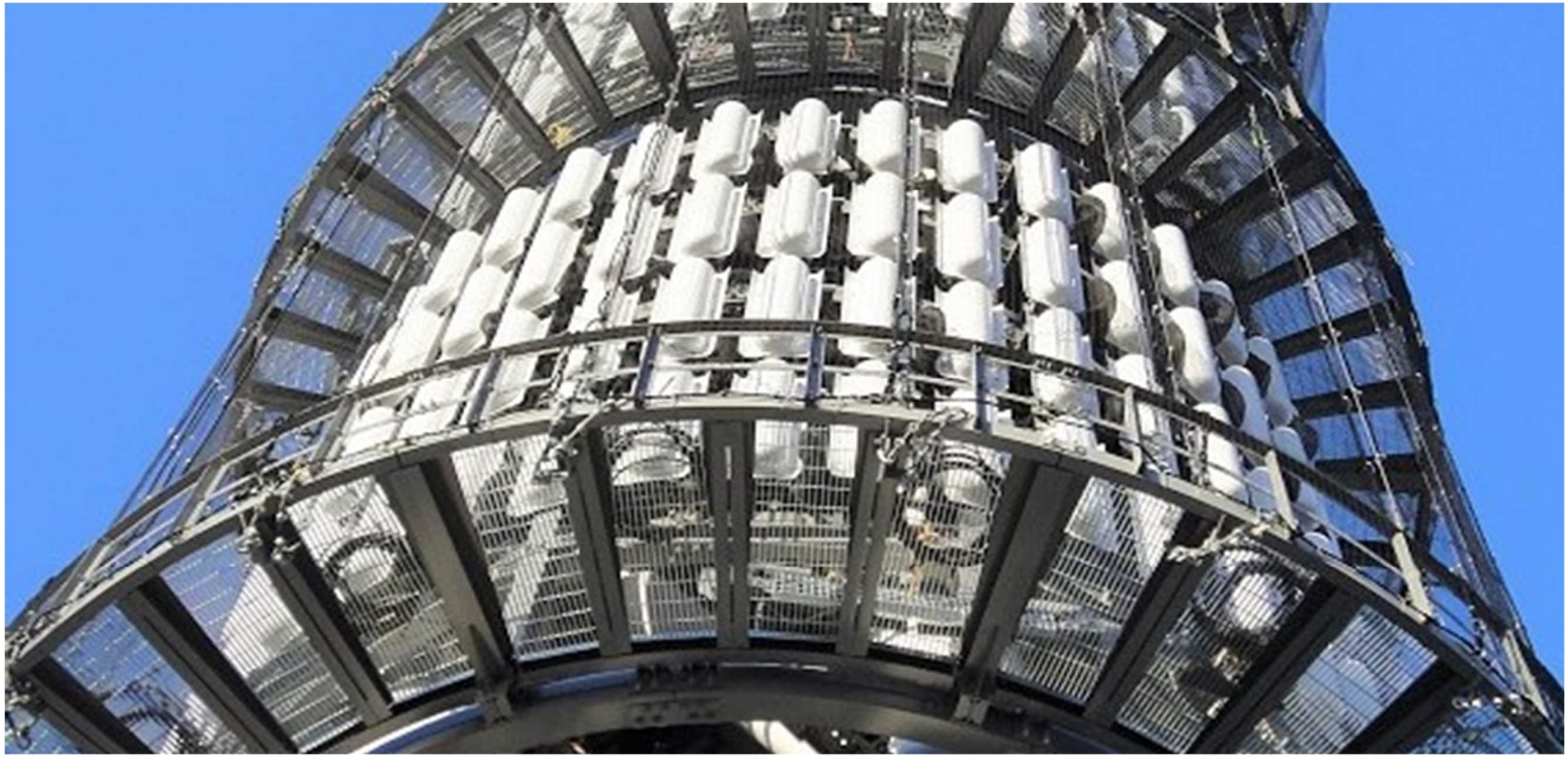


写真4.4　冬季限定で設置されるネット

4.5　アンテナのVSWR特性

　１０kWもの大きな電力を印加するアンテナシステムでは,VSWRが重要なファクターとなる.東京スカイツリーのアンテナ単体VSWRは使用周波数内で1.05以下に抑え,効率よく電波を放射し,送信機に戻る反射電力が最小限になる様６４０面のアンテナを各メディアに合わせ最適化している.

　アナログ放送時代に広く用いられてきた双ループアンテナの素子は,φ10mmの黄銅棒を加熱しながら円環状に曲げ,素子給電部への接続には銀ロウ付けをするなど,すべて一つずつ手作業で製作していた.そのため微妙な加工誤差が生じ,同じ様に作ったアンテナでもVSWRには,大きなばらつきが発生していた.

東京スカイツリーのアンテナは,精密板金加工用N C制御タレットパンチプレスにより黄銅板から打ち抜きや曲げ加工を行った板状の素子を採用しているため,組み立て後のVSWRもほとんど同じ特性となり,使用周波数の違いによる差分を微調整するのみであった.

第5章　むすび

　東京スカイツリーにおけるアンテナ設置時の様子や電気的諸特性について述べた.

　今まで,アンテナ内部構造については,自社のノウハウや技術の保持,流出防止の観点から,従来品の構造カットサンプルでの開示のみとしていた.開発着手以降,10 年以上の歳月が経過し,開発時における経緯や当時の記憶なども薄れてきているので,内部の構造などを開示し,来るデジタル設備更新時期には,さらに地上デジタル放送の技術が向上するための足掛かりになればと考えている.

謝辞

本稿の執筆にあたり，ご協力いただきました官界ならびに関係各社殿，特に日本放送協会殿，日本テレビ放送網株式会社殿，株式会社テレビ朝日殿，株式会社TBSテレビ殿，株式会社テレビ東京殿，株式会社フジテレビジョン殿，株式会社大林組殿，東武タワースカイツリー株式会社殿各位に深謝致します．

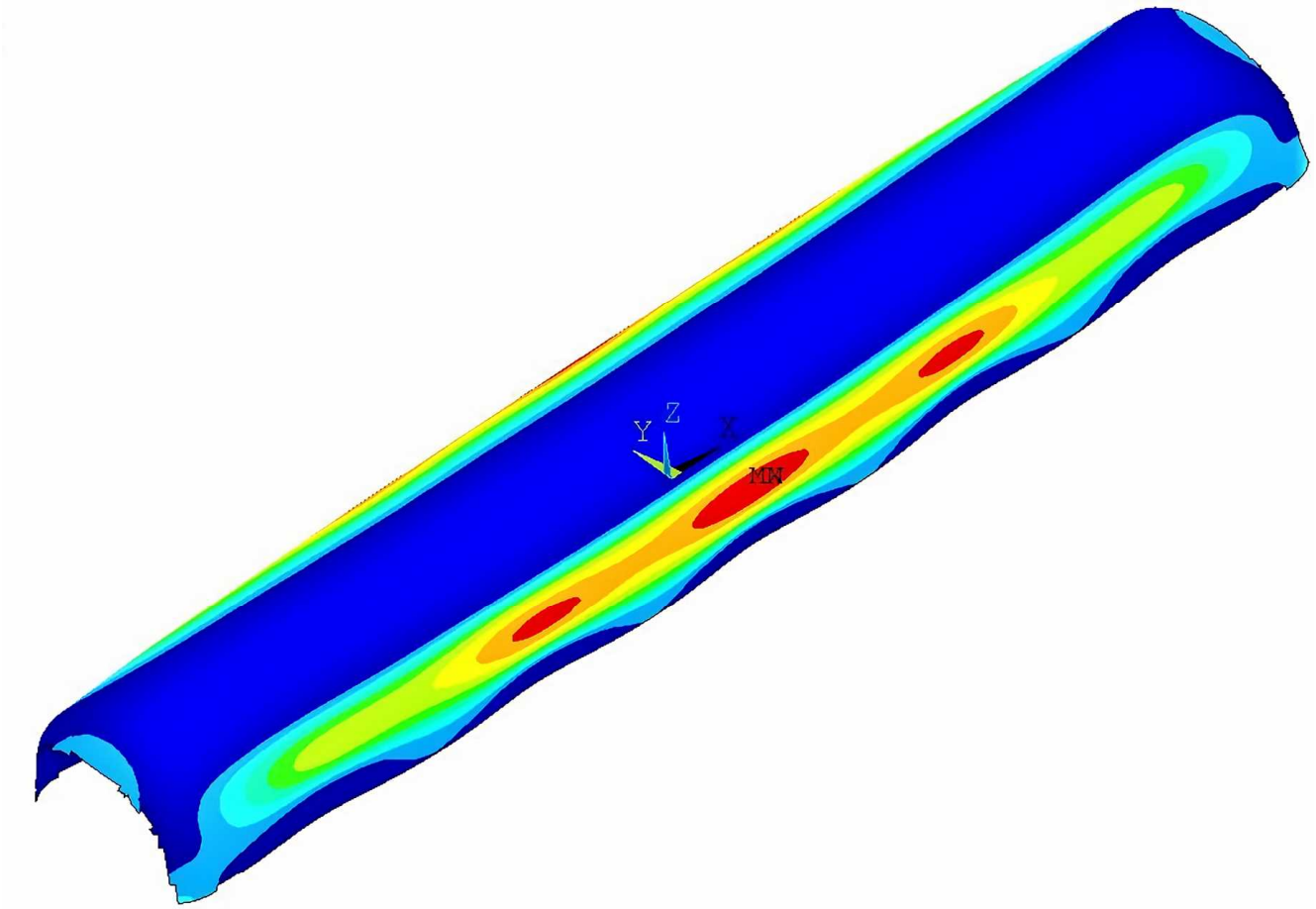
また，執筆に際し，エイチ・シー・ネットワークス㈱及び㈱加藤電気工業所の関係者の皆さまには，多くのご支援・ご配慮を頂きましたこと心から感謝致します．最後に，本稿が関係各位のご参考になれば幸いであります．

参考文献:

1. 全国デジタル送信設備検討会:“地上デジタル放送用送信設備共通仕様書，”2005年4月（改訂Ⅰ版），2007年3月（改訂Ⅱ版）.
2. 遠藤(敬)，遠藤(幸)，岡村:“UHF放送用双ループアンテナ，”テレビジョン学会誌,18,5,pp.281-287,昭和39年5月.
3. 佐藤（源），川上，佐藤（光），石井:“モーメント解法による2L形双ループアンテナの理論解析および実験”，テレビジョン学会誌,36,2,pp.132-137，昭和57年2月.
4. K. Endo, G. Sato, H. Kawakami, M. Sato and Y. Ishii :“Moment method for a twin loop antenna,”IEEE AP-S Int. Symp., pp.675-678 (June 1981).
5. 多視済済“秒速110mの風に耐えるこの物体の設置場所とは”，Nikkei Monozukuri pp.17-19,平成23年2月.
6. 大谷誠:“東京スカイツリーRの空中線”，映像情報メディア学会誌，Vol.66,No.7,pp.541-544,平成24 年7 月.
7. 川上春夫，田口光雄:“ICT・IoTのためのアンテナ工学,”東京電機大学出版局,2019年3月.
8. 川上春夫:“地上デジタル放送のアンテナと電波塔,”RFワールド,No.49,CQ出版社,2020年2月.
9. 高野俊幸，川上春夫:“東京スカイツリーRの地上デジタルテレビ放送用送信アンテナの諸特性,”放送技術，Vol.74,No.8,pp.120-126,令和3年8月.
10. 斎藤利夫:“現場から見た「地上波テレビのデジタル化」回顧録,”RFワールド,No.56,CQ出版社,2021年11月.

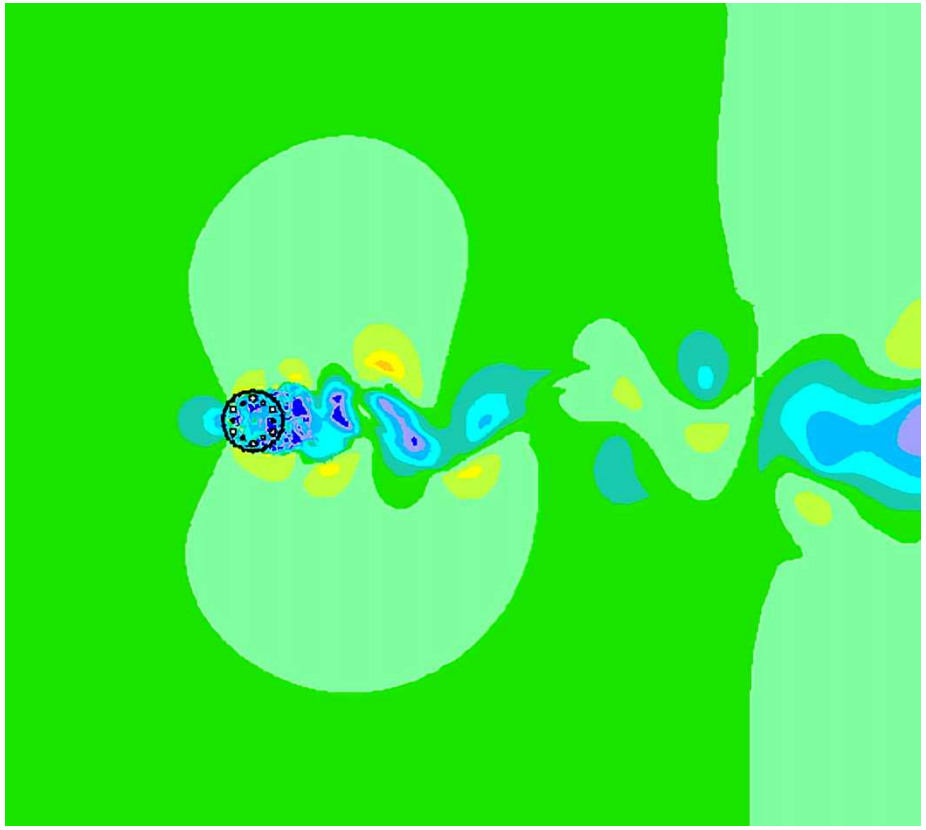
ご聴講ありがとうございました

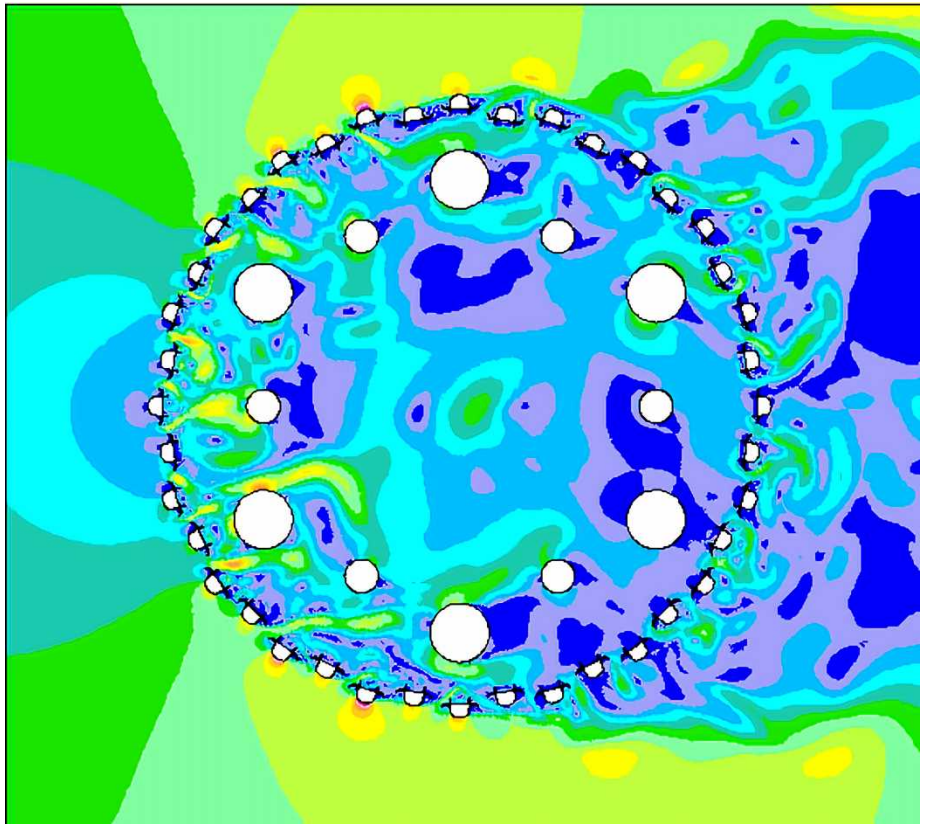
付録



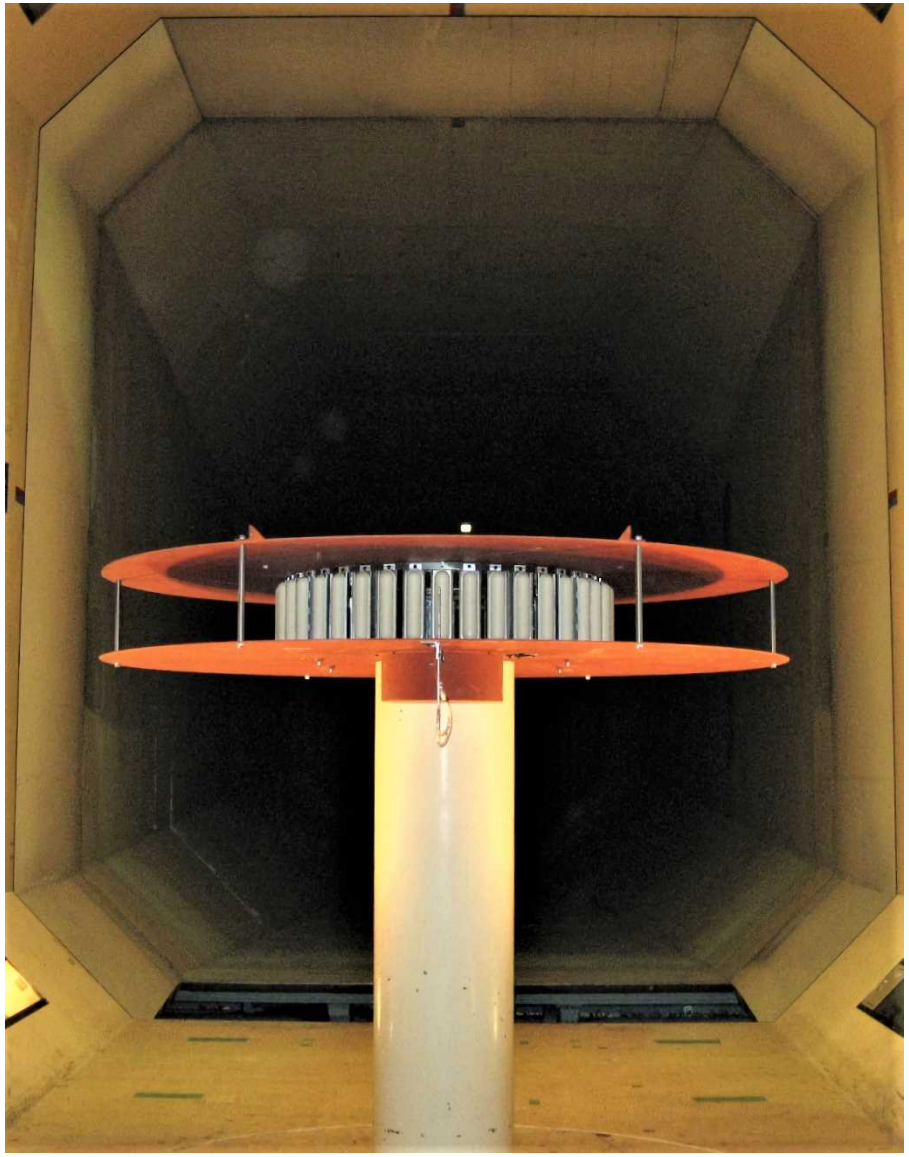
双ループアンテナの素子の従来品カバーの応力分布図（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）

スーパースリットナット（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）

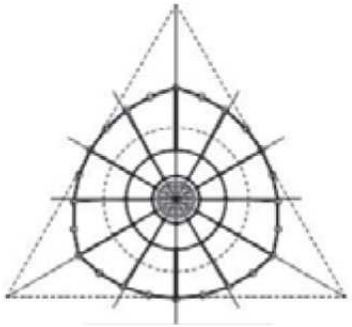




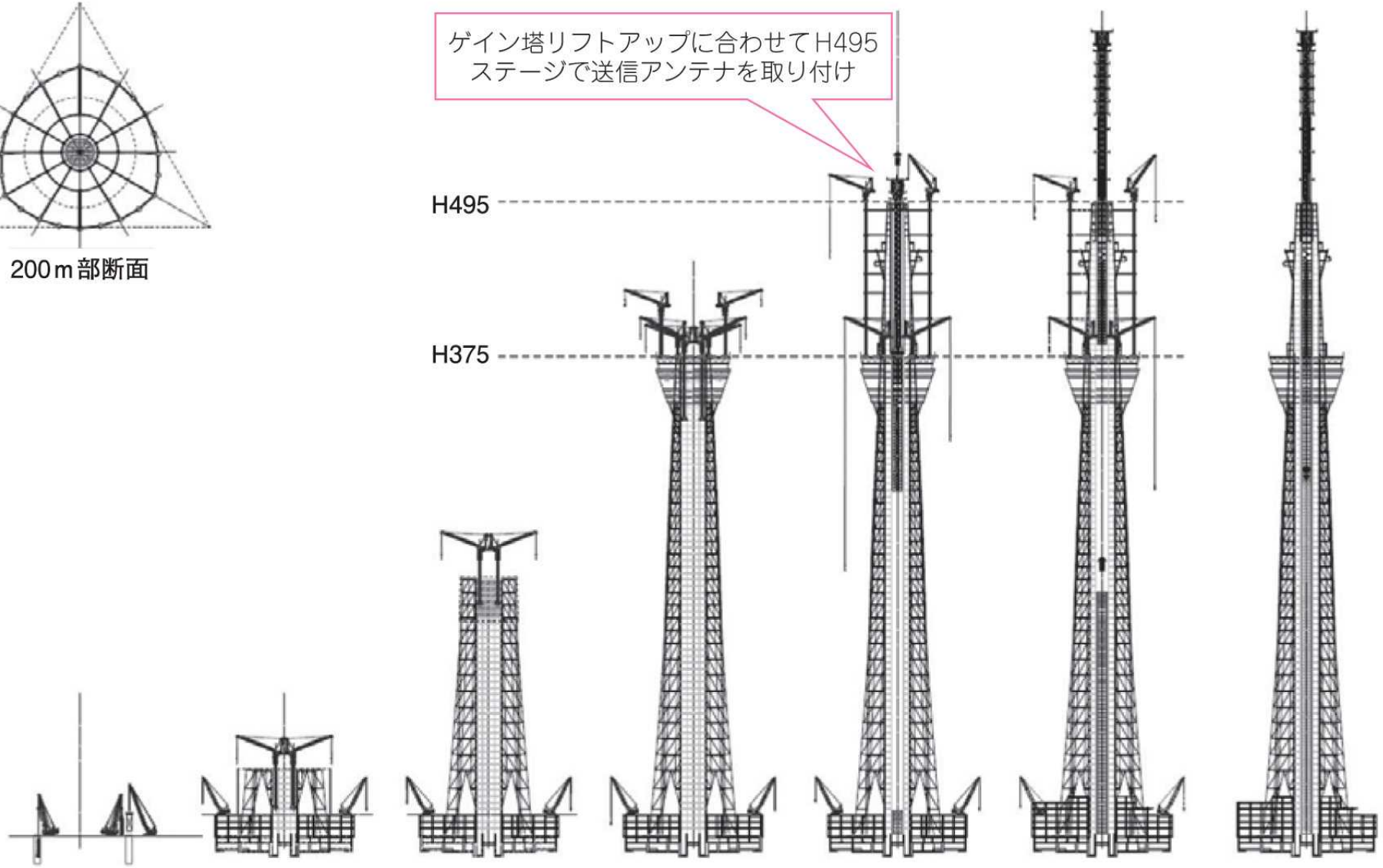
ゲイン塔の風の流れをシミュレーションした結果（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）



風洞試験（資料提供：エイチ・シー・ネットワークス）



200ｍ部断面



リフトアップ工法（文献６より転記）

7段の紅白塗装や点滅式の赤色障害灯

航空法の規定で，高さ60m以上の鉄塔には紅白塗装を施し，夜間は赤色ライトを点灯して航空機からはっきり視認できるようにすることが義務付けられています．

紅白塗装は昼間障害標識といい，全長210m以下のものは7段（下から赤，白，赤，白，赤，白，赤）で構成されています．鉄塔の最頂部のみが赤塗装されているのも昼間障害標識です．航空法の改定により，鉄塔の塗装方法が多少緩和され，上部だけを赤白に塗るという簡易塗装が認められました．なお，飛行場付近では60m以下でも紅白塗装が存在します．

法改正によって，昼間でも白色のストロボを点滅させれば紅白塗装はしなくても良いことになりましたので，東京スカイツリーは高さ634mですが，紅白塗装に代えて白色フラッシュの航空障害灯が点滅しています．昼夜とも点滅し，7段も設置され28個もあります．特にイベントなどが行われるときには綺麗なフラッシュ灯が点滅します．