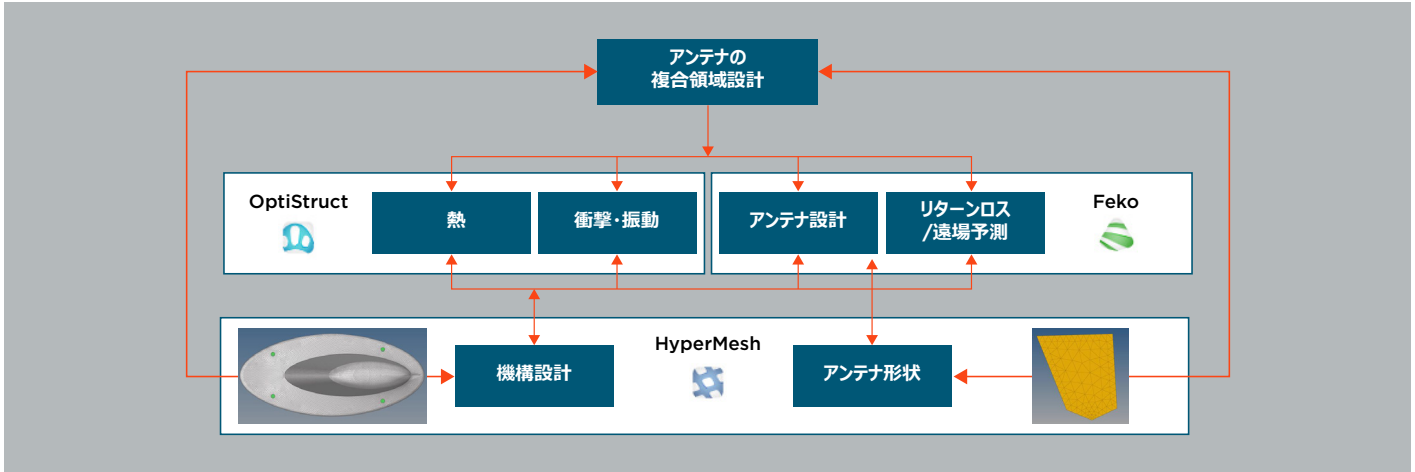


環境仕様に合わせたシミュレーション駆動アンテナ設計

Jean-Baptiste Mouillet - Multiphysics Solutions Architect, Altair / D.V.B. Murthy- Application Engineer, Altair / C.J. Reddy- Vice President-Business Development - Electromagnetics, Americas, Altair / November 2020



序章

通信の発展に伴い、今日ではミッションクリティカルなアンテナシステムの高度化が進んでいます。Altair Feko[1] のような電磁界 (EM) シミュレーションツールの進歩により、このようなシステムの設計プロセスが大幅に改善され、試験時間とコストの削減につながりました。システム要件を満たすために、アンテナは、反射損失、利得、偏波、帯域幅などの要素を考慮して設計されます。アンテナの基本構造が設計されると、環境によってアンテナに与えられる物理的な要求に耐えられるかどうかを証明するために、機械エンジニアに引き渡されます。アンテナが設計通りに機能し続けることは、航空機、船舶、地上車両、IoT/M2M アプリケーションなどの様々なプラットフォームへの長期的な展開や安全性を確保するために非常に重要です。具体的には、飛行中のアンテナは、MIL-STD810[2] などの規格で定められた仕様を満たすために、極低温・高温、振動、衝撃などの厳しい動作条件にさらされることが日常的に行われています。通常、アンテナの機械設計は勘と経験則に基づいて行われます。一度試作品を作成した後、[3,4] のような試験場で環境適合性を物理的に試験し、すべての環境仕様に合格するまでに何度も設計を繰り返すこととなります。これは非常に高価で時間のかかるプロセスであり、コストの増加や製品開発の遅れにつながっています。本稿では、アンテナが設計プロセス中に環境仕様に満たすための Altair HyperWorks Suite [5] を使用したシミュレーション主導のワークフロープロセスを例示し、試験と認証にかかる時間を最小限に抑えることで、コスト削減と製品開発サイクルの短縮を実現します。

シミュレーションによるアンテナのマルチフィジックス設計

Altair のシミュレーション駆動型マルチフィジックス設計のためのアプローチを説明するために、ブレードアンテナを例に挙げました。ブレードアンテナは航空宇宙産業で広く使用されています。一般的な航空機であれ、高性能な軍用機や民間旅客機であれ、航空機には複数のアンテナが必要とされます。民間航空機に搭載される各種アンテナの一例を図1に示します。図2に示すようなブレードアンテナは、VHF/UHF 通信、DME (距離測定器)、トランスポンダなど様々な用途に広く使用されています。

これらのアンテナは、MIL-STD810 で規定されている環境仕様に満たすために、一般的にはレドームに封入されています。ブレードアンテナは、通常、ポリウレタンフォームなどの材料で充填されています。

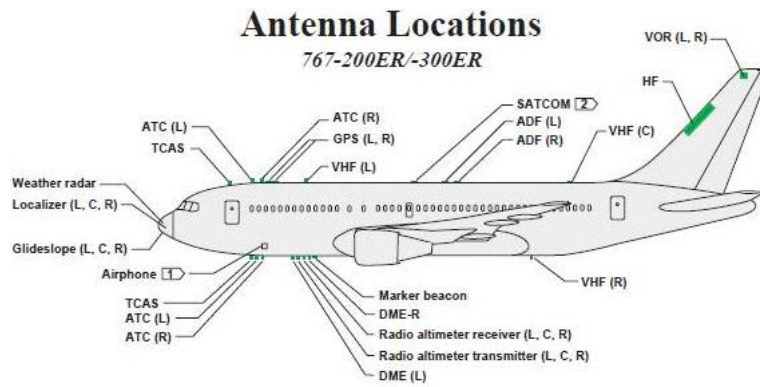


図 1 - ボーイング 767-200ER/-300ER のアンテナ位置

(出典 : <https://aviation.stackexchange.com/questions/48077/which-antenna-on-an-commercial-airplane-is-used-for-the-transponder-ssr>)



図 2 航空機の胴体に取り付けられた代表的なブレードアンテナ

プロセスの説明

このプロセスでは、アンテナの電磁設計と機械設計の両方が行われます。ワークフロープロセスを図 3 に示します。電磁設計は Altair Feko を使用し、機械設計は構造シミュレーションソルバー Altair OptiStruct と連携した Altair HyperMesh を使用しています。

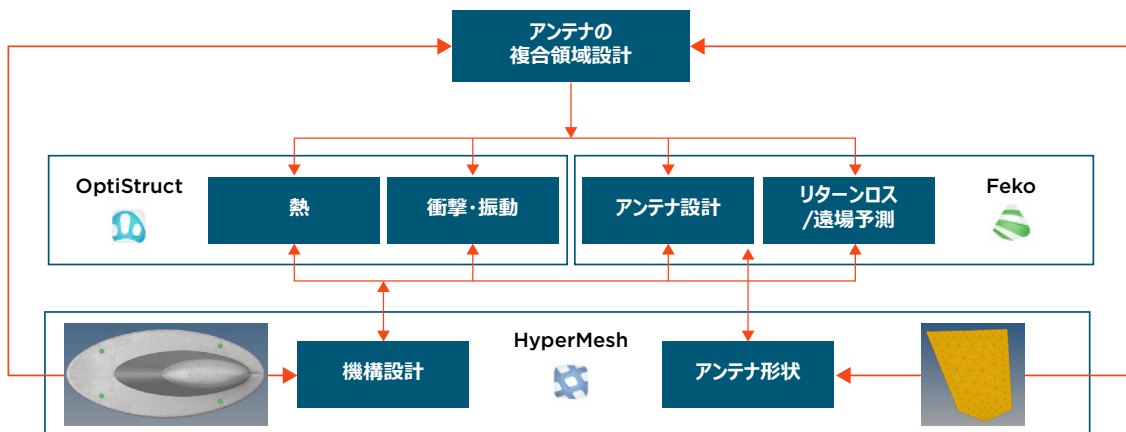


図 3 - アンテナのシミュレーション駆動マルチフィジックス設計のためのワークフロープロセス

ブレードアンテナの電磁設計

空中通信システムでは、風の抵抗を低減するために、軽量で空力形状の広帯域アンテナが必要とされています。モノポールアンテナは、広帯域を実現することができるシンプルな構造であり、通常は軽量です。ブレードアンテナは、風抵抗係数が低く、軽量で、製作が簡単で、広帯域幅を実現できるため、空中通信システムでは好ましいアンテナ構造となっています。ブレードアンテナは、以下の2つの技術を利用してインピーダンス帯域幅を改善するモノポールです。

- 1) アンテナの長さ (l) と直径 (d) の比 (l/d) を下げる。
- 2) 角度によるアンテナ構造の定義 : 円錐形や三角シートアンテナは、この手法を利用した広帯域構造です。

保護レドームのないブレードアンテナの形状を図4に示します。寸法は $W=53\text{mm}$ 、 $W1=27\text{mm}$ 、 $H=87\text{mm}$ 、 $H1=11\text{mm}$ です。Feko のシミュレーションのために無限の接地面に取り付けられています。寸法 H は帯域内の低周波数を決定します。 H が $\lambda/4$ (λ は自由空間波長) 以下の周波数では、アンテナの放射抵抗が減少し、アンテナの入力インピーダンスは虚数部が大きく容量性になります。ブレードアンテナの励振にはワイヤポートが使用されます。

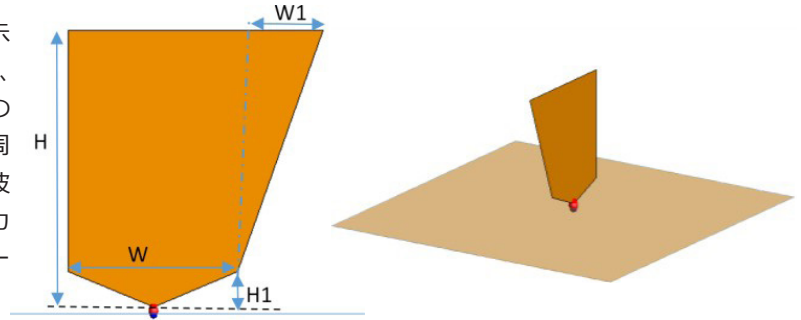


図4 - 保護レドームなしのブレードアンテナ形状

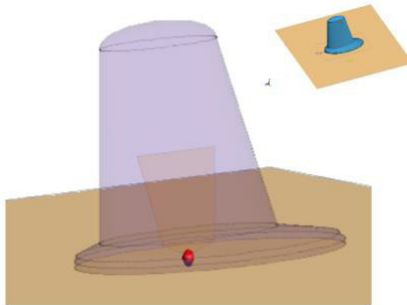


図5 - 保護レドームポッティング材を用いたブレードアンテナの形状

ブレードアンテナは、適切な保護材 (誘電率 2.1、損失正接 0.01 の発泡ポリウレタン) で覆われており、図5に示すように、高さ 210mm、長さ 260mm、幅 110mm の全体の最大寸法となっています。

図4に示すブレードアンテナについて Feko でシミュレーションを行った結果、図6 (青線) に示すように、1.06GHz ~ 2.1GHz の周波数範囲で動作帯域幅は、反射損失 (反射係数) が -10dB 以下で、中心周波数は 1.8GHz であることがわかりました。

レドームポッティング材の導入により、図6 (緑線) に示すように、反射係数応答が高周波側にシフトしていることが観察されます。

ブレードアンテナの寸法を変更し、反射係数応答がレドーム材を使用していない場合と同様になるように、ブレードアンテナの寸法を $W=56\text{mm}$ 、 $W1=28\text{mm}$ 、 $H=91\text{mm}$ 、 $H1=12\text{mm}$ に変更し、中心周波数を 1.8GHz に戻しました (図6の赤い曲線)。

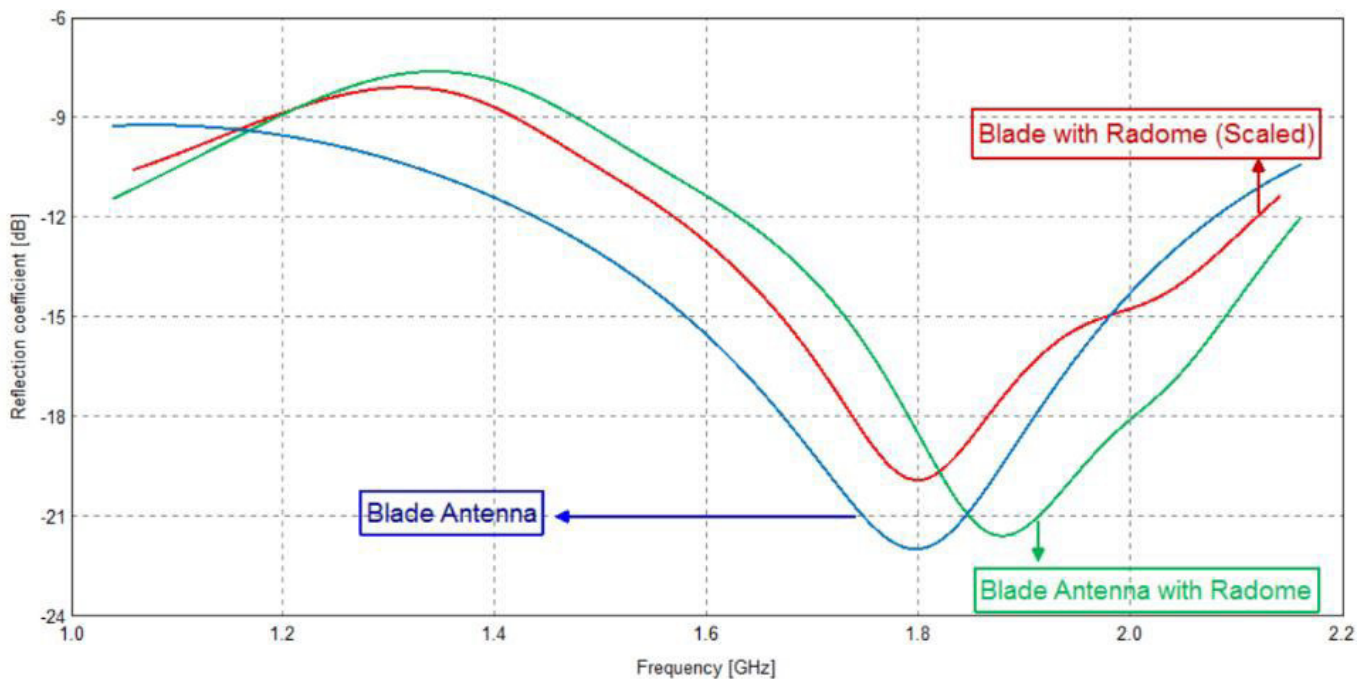


図6 - ブレードアンテナ (青線) とレドーム付き (緑線) と縮小版 (赤線) の反射率応答

構造・熱有限要素モデル

前項で述べたように、ポリウレタンポッティング材を用いたアンテナの構造全体の最大寸法は、高さ210mm、長さ260mm、幅110mmです。また、ブレード構造(図4)は銅製を想定しています。アンテナの構造有限要素(FE)モデルを図7に示します。

レドームは数本のボルトで胴体に固定されています。最適なボルトの数や配置の検討は次章で述べます。ボルトの数は最小限に抑え、構造設計は環境仕様を満足させるために安全性を確保する必要があります。

材料データ: 構造物のFE解析のためには、銅とポリウレタンポッティング材の材料特性が必要であり、Altair Material Data Center [6] から抽出されています。銅の材料データを表1に示します。



図7 - アンテナの構造有限要素モデル

表1 - アンテナの構造有限要素解析で使用する銅の材料特性

密度	8.90 t/m ³
ヤング率	150000 MPa
ポアソン比	0.33
最大許容応力	202 MPa
熱膨張係数	17.0 E-6 m/m/K

ポリウレタンの材料データを表2に、応力 - ひずみ曲線を図8に示します。

表2 - アンテナの構造有限要素法解析に使用するポリウレタンの材料特性

密度	1.30 t/m ³
ヤング率	1300 MPa
ポアソン比	0.1
最大許容応力	15 MPa
熱膨張係数	20.0 E-6 m/m/K

構造解析: 有限要素モデルは Altair HyperMesh [7] を使用して作成し、有限要素構造シミュレーションは Altair HyperWorks ソフトウェアスイート [5] の Altair OptiStruct [8] を使用して行いました。構造用FEメッシュは2mmの四面体要素で作成され、要素数はボルトの数により変動しますが、およそ550,000個の要素が生成されます(図9)。

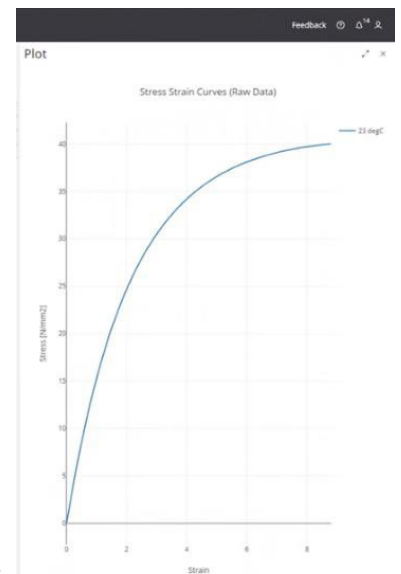


図8 - ポリウレタン材料の応力 - ひずみ曲線

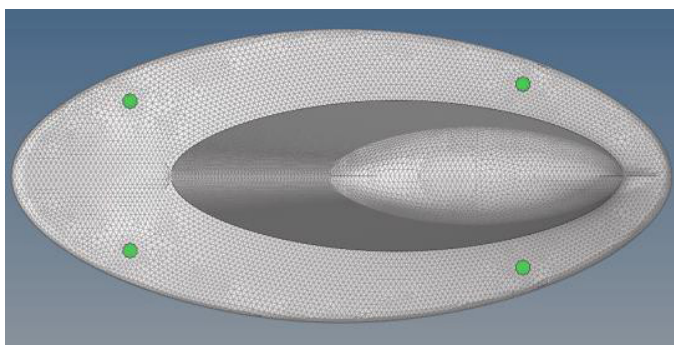


図9 - レドーム付きアンテナの有限要素モデル

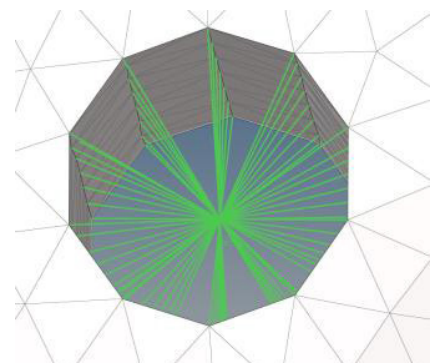


図10 - ボルトのモデリング

ボルトは剛体結合(RBE2)でモデル化されています(図10)。ボルト穴面のすべてのノードは単一の剛体として振舞うため、穴の形状は不変となります。各RBE2のマスターノードは完全拘束され、ボルトは移動できないように設定されます。

ブレードアンテナメッシュはFekoからエクスポートされ、銅の材料特性と共にHyperMeshにインポートされ、要素の厚さ0.1mmの2~12mmの三角形要素でメッシュ化され、要素数は202個となります。

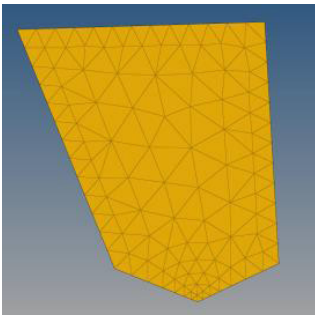


図11 ブレードアンテナ (銅) FEAモデル

レドーム素材とアンテナの接続は、タイドコンタクトで行われています。アンテナの変位は、レドームの局所変位に追従します。アンテナのメッシュとレドームのメッシュを一致させる必要がないため、タイドコンタクトはモデル構築プロセスを容易にします。そのため、異なるアンテナとレドームの設計を、追加の手間をかけずにメッシュ化してシミュレーションすることができます。

振動仕様：MIL-STD 810E に準拠し、振動負荷は 3 方向 (x、y、z) に連続して印加されるパワースペクトル密度 (PSD) です。最大振幅は 0.3 g²/Hz です。

PSD 負荷曲線 (g² vs Hz) を図 12 に示します。応答は、0 ~ 1000Hz の間の構造体の固有振動数に等しいすべての周波数、およびその値の 20%、40%、60%、80% の周波数について計算されています。ダンピング係数は 5% に設定されています。

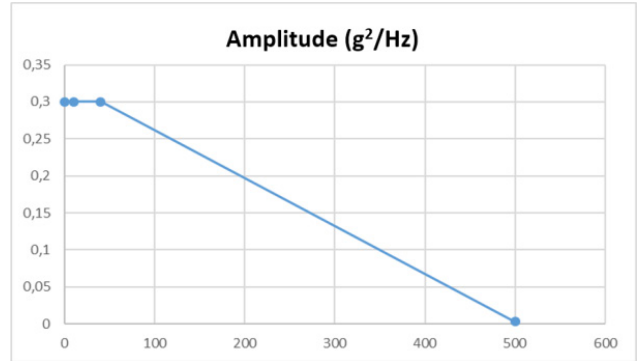


図 12 - MIL-STD 810E によるアンテナの PSD ローディング

機械的衝撃の仕様：機械的衝撃荷重は、各方向に1つずつ、すなわち3つの15g、11msの衝撃計算に基づいています。各方向に15gのグローバル荷重が11msの間適用され、構造物の応答が解析されます。実施したシミュレーションは、過渡モード応答解析です。考慮した周波数は、振動解析と同じです。

サーマル仕様：標準 MIL-STD-810C、メソッド 504.1

PROC.I は、熱変動に対するデバイスの認証を定義しています。現象時間の長さから準静的な問題としてとらえることができるため、-54°C および 55°C におけるアンテナの2つの静的シミュレーションとして定義することができます。ここでも、ミーゼス応力がチェックされます。主なチェック箇所はレドーム周辺の穴およびアンテナとレドームの接触部で、銅とポリウレタンの熱膨張係数の違いが応力を発生させる可能性があります。機械的荷重のケースと同じモデルで Optistruct を用いて解析計算を行います。荷重ケースのみ変更しています。

アンテナモデル：ボルトの本数と位置を変えて4種類のアンテナモデルを検討しました。ボルト数を増やすことで、振動や衝撃による応力の低減が期待できますが、穴周辺のレドームの膨張を抑制してしまうため、熱応力が大きくなる可能性があります。また、重量、メンテナンス性、コスト、設計の簡素化を考慮して、ボルトの数を最小限にする必要があります。

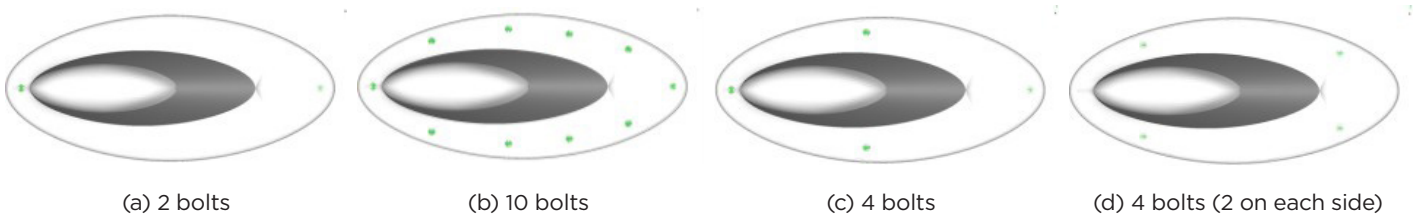


図 13 - 異なるボルト構成によるアンテナ設計のバリエーション

振動・衝撃荷重の結果：図 13 に示すように、ボルトの数と位置を変えて数回のシミュレーションを行いました。主な評価指標はレドームにかかる最大ミーゼス応力です。これは、アンテナの不可逆的な損傷を避けるために、15MPa を超えないことを確認する必要があります。同様に、ブレード (銅) 上のミーゼス応力は 202MPa に制限されています。

表 3 は、荷重ケースと設計案に応じたすべての結果を示しています。最も重要なケースは、y 方向の振動と衝撃です。

表 3 - 結果のまとめ：荷重ケースと設計による最大応力 (MPa) の変化

	Vibrations x	Vibrations y	Vibrations z	Shock x	Shock y	Shock z
	14.8	72.7	19.6	15.8	92.0	19.12
	1.1	3.6	0.33	2.6	4.0	2.9
	6.5	13.9	2.3	6.5	12.2	7.2
	7.6	11.4	2.1	4.6	6.8	4.1

最適な設計は、片側2本のボルトで構成された「4本ボルト設計」です(図13(d))。このボルト配置が最適であり、ボルト数を最小限に抑えつつ、安全マージンを最適化(最大応力 11.4MPa) しています。

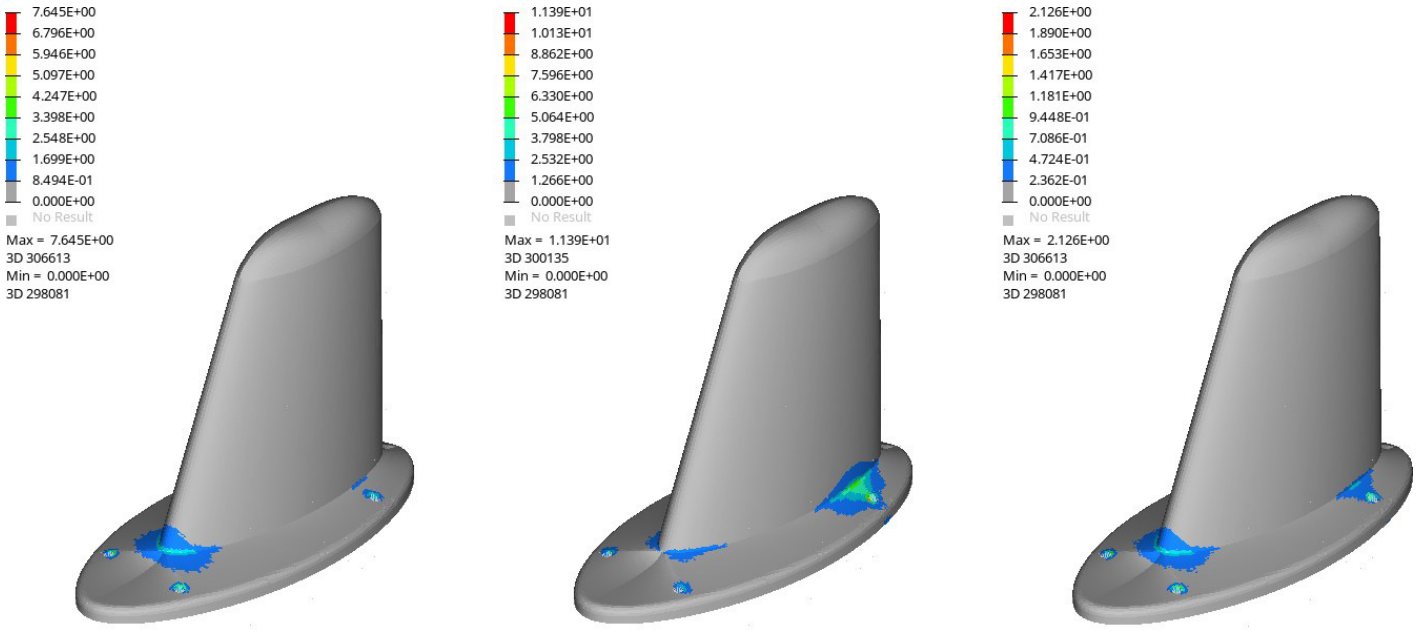


図 14 - 最適な 4 ボルト構成 (図 13 (d)) の振動負荷応力プロット

図 15 は、最適設計の場合の 3 方向の衝撃荷重に対する最大応力を示したものです。機械的な衝撃荷重のケースにおいては、振動応答のケースと比べて、より安全側に制約条件を満たす解が得られています。

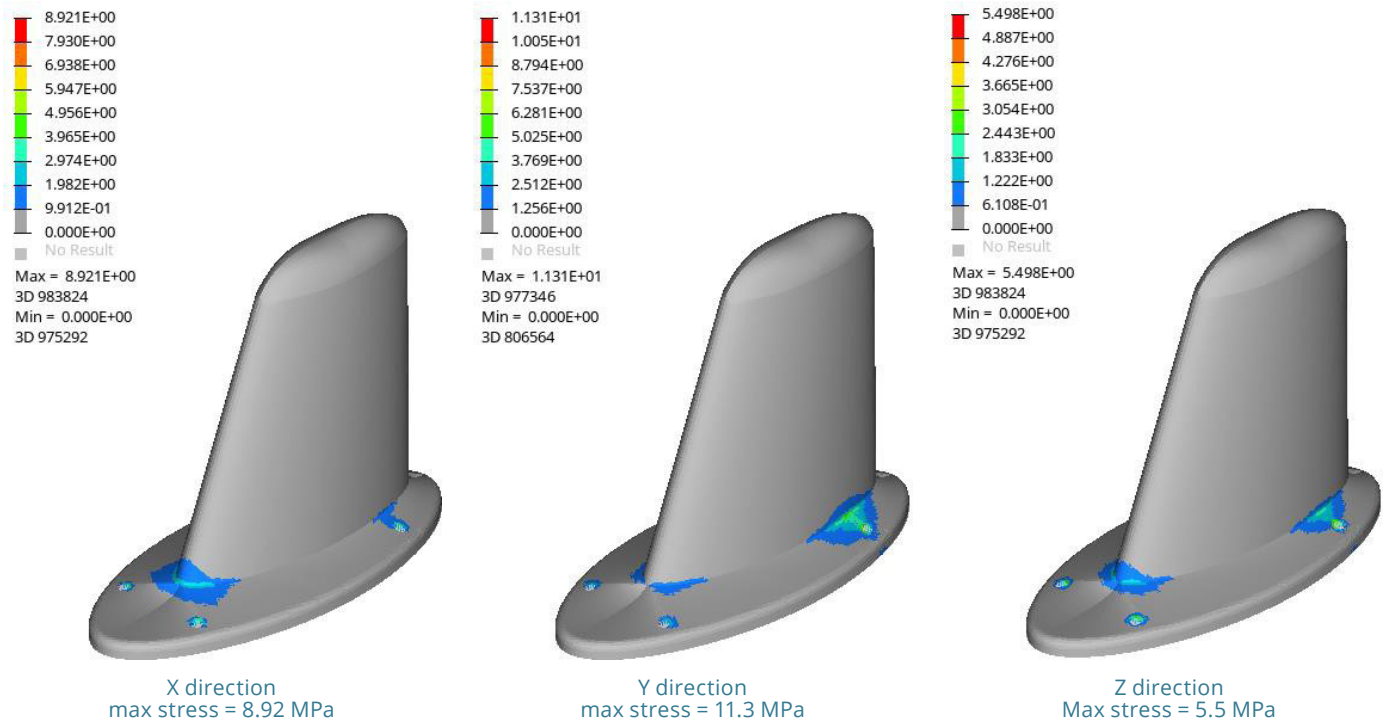


図 15 - 最適な 4 ボルト構成 (図 13 (d)) の衝撃荷重応力プロット

ブレードアンテナの挙動 : ブレードアンテナ (銅) は、機械的な負荷がかかっても大きな変形を受けないため、故障の危険性がなく、電磁性能に影響を与えることはありません。ブレードアンテナ (銅) の最大応力と相対変位を図 16 に示します。

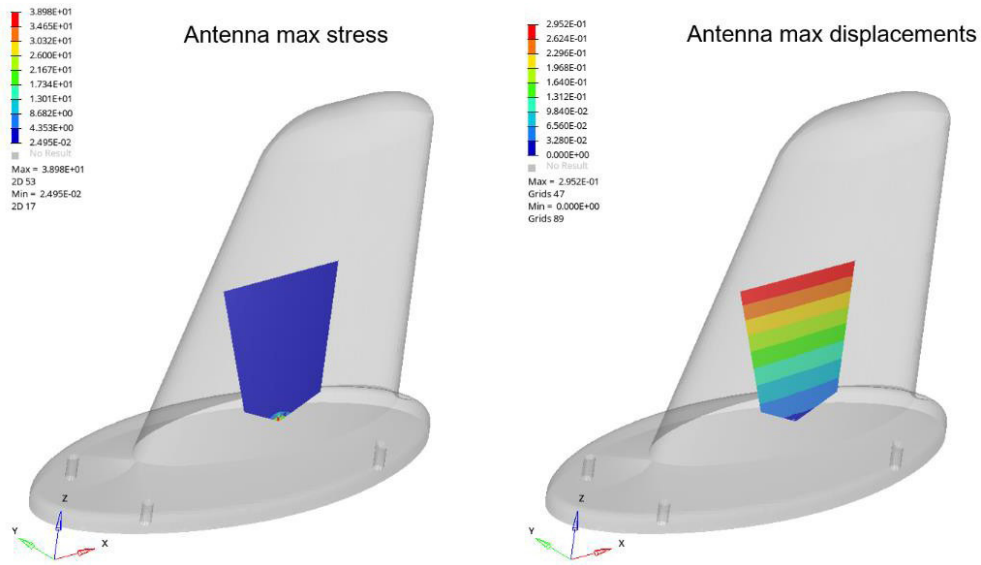


図 16 - ブレードアンテナの最大応力と相対変位

熱的な結果 : ボルトの数を多くすることで固定によって応力は減少しますが、材料の膨張を局所的に拘束することによって熱応力が増加するため、熱荷重は非常に重要であり、トレードオフが必要となります。その結果、熱的な材料特性、特に熱膨張係数が重要な役割を果たします。図 13 に示した4つのボルト構成すべてについて、熱シミュレーションの結果を図 17 に示します。

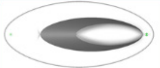
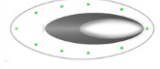
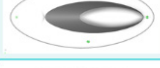

	Radome -54°C	Antenna -54°C	Radome 55°C	Antenna 55°C
	15.9	37.3	7.5	17.7
	49.7	54.3	23.6	202
	15.1	40.5	2.1	17.5
	14.3	38.2	6.8	18.1

図 17 - 図 13 に示す 4 つのボルト構成すべてについての熱シミュレーション結果

図 13 (d) の 4 ボルト構成の場合の熱的結果を図 18 に示します。

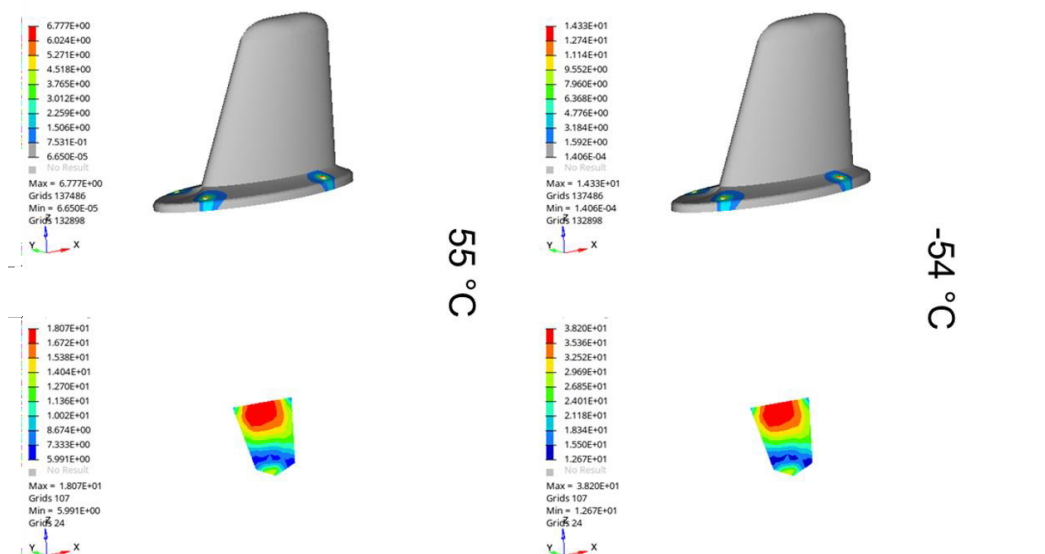


図 18- 図 13(d) に示す 4 ボルト構成の熱シミュレーション結果

図 13(d) に示す 4 ボルト構成の熱シミュレーション結果の概要を表 4 に示します。

表 4 - 図 13(d) に示す 4 ボルト構成の熱シミュレーション結果のまとめ

	最大許容値	-54 ° C	55° C
レドーム	15.0 MPa	14.3 MPa	6.8 MPa
アンテナ	202.0 MPa	38.2 MPa	18.1 MPa

解析計算により設計は基準を厳格に満たしていることがわかります。これは、ポリウレタンフォームで作られたレドームの熱材料特性に大きく依存しています。

結論

本論文では、アンテナの電磁性能だけでなく、振動、衝撃、温度などの環境仕様を満たすためのシミュレーション主導のアンテナ設計プロセスを実証しました。Altair Feko、HyperMesh、OptiStruct（すべて Altair HyperWorks Suite の一部）を使用して、あらゆるアンテナタイプに簡単に適応できるワークフロープロセスを示しました。レドーム付きアンテナの予備解析を簡単に行い、安全性の高い環境仕様に沿ったアンテナ構造を維持しつつ、ボルトの数を最小限に抑えた最適なソリューションを提案し、設計を改善することができました。

この作業は、設計プロセスの初期段階で行うことができ、設計の全段階で設計変更が行われた場合には、非常に迅速に更新することができるため、アンテナ製品の開発にかかる時間とコストを節約することができます。

参考文献

- [1] Altair Feko - <https://www.altairjp.co.jp/feko/>
- [2] MIL-STD-810 - <https://www.atec.army.mil/publications/Mil-Std-810G/Mil-Std-810G.pdf>
- [3] Dayton T. Brown - Environmental Testing Services - <https://www.dtb.com/testing-overview-environmental.php>
- [4] NTS - Environmental Testing Services - <https://www.nts.com/services/testing/>
- [5] Altair HyperWorks - <https://www.altairjp.co.jp/2020/>
- [6] Altair Material Data Center - <https://www.altairjp.co.jp/material-data-center/>
- [7] Altair HyperMesh - <https://www.altairjp.co.jp/hypermesh/>
- [8] Altair OptiStruct - <https://www.altairjp.co.jp/optistruct/>