

制御盤の放熱・耐震設計検証技術

吉沢二郎*
外池恵大*
沖西佳雄**

Thermal and Earthquake Resistant Design and Verification Technologies for Control Console

Jiro Yoshizawa, Keita Tonoike, Yoshio Okinishi

要旨

箱型筐体(きょうたい)に制御機器を納めた制御盤は、信頼性を確保する上で、放熱設計や耐震設計の重要性が高い。例えばインターネットインフラを支える光通信装置(光通信の制御盤)は、通信処理量の増加に伴い発熱が増大しており、高い放熱性能が求められている。また、巨大地震の多発によって従来以上に耐震性能の重要性が高まっている。これらの性能確保のためには、設計自由度の高い開発上流で詳細に設計検討する必要がある。

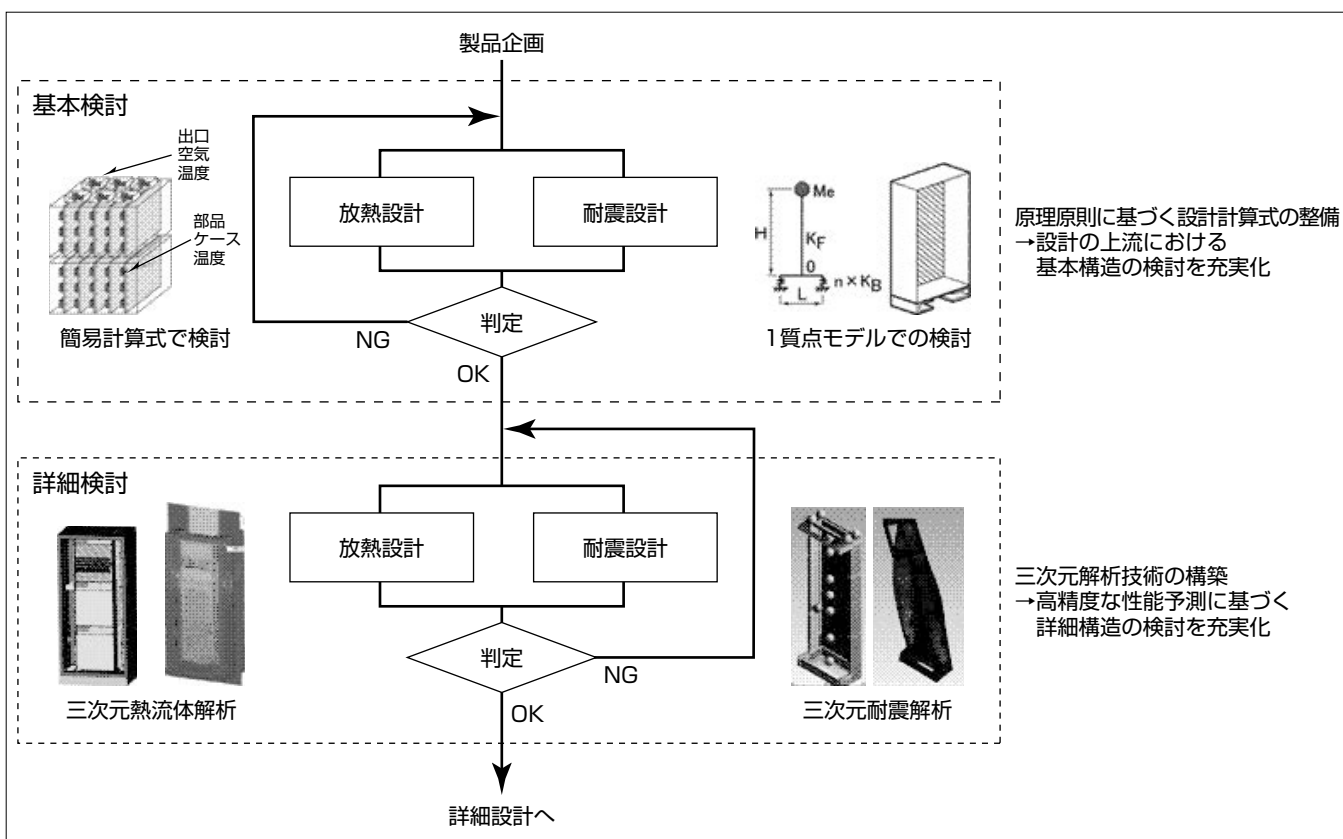
一方で制御盤の放熱設計検証や耐震設計検証は計算機の高速化に伴い三次元データを活用した三次元解析の導入が進んでいる。しかし、無秩序に三次元解析を行うと非効率な作業となり、性能確保の効率的な設計検討を阻害する。

このため、三次元データを有効に活用しながら効率的に設計する設計プロセスの再整備が必要になってきている。

本稿では、光通信装置の放熱性能及び耐震性能を効率的に検討する設計検証技術と設計プロセスを実現する設計環境について述べる。

まず、原理原則に基づく設計計算式を集約した設計ツールを整備して、基本構造の幅広い検討を可能とした。次に、実際の詳細構造の現象を予測する三次元解析技術を構築し、高精度な性能予測に基づく詳細構造の検討を可能とした。

設計計算式を用いて基本検討をした上で、三次元解析技術を用いた詳細検討をする設計プロセスの設計環境を整備することで、放熱性能と耐震性能の効率的な設計を実現した。



光通信装置の放熱・耐震設計プロセス

光通信装置を対象に、放熱設計と耐震設計の設計検証技術を開発した。設計計算式を用いて基本検討をした上で、三次元解析技術を用いた詳細検討を行う設計プロセスの設計ルールと設計環境を整備することによって、高い放熱性能と耐震性能の効率的な設計を実現した。

1. ま え が き

箱型筐体に制御用の電気、電子機器を納めた制御盤は、電力システム・情報通信システム・ビル管理システム等を構成する装置として様々な形で利用されている。安定してシステムを稼働させるために、制御盤には高い信頼性が必要とされ、信頼性を確保する上で、制御盤の放熱設計や耐震設計の重要度が高い。

例えば情報通信用の光信号を制御する光通信装置(光通信用の制御盤)は、情報ネットワークインフラを支えるために高い信頼性が要求される。インターネットを中心に情報ネットワークは世界的規模の社会インフラとなって拡大・進化を続けている⁽¹⁾。通信処理量が増加傾向にある光通信装置は、装置の発熱が増大しており、高い放熱性能が求められている。また、巨大地震の多発によって従来以上に耐震性能の重要性が高まっている。これらの性能を確保するためには、設計自由度の高い開発上流段階で詳細に設計検討する必要がある⁽²⁾。

一方で制御盤の放熱設計や耐震設計検証は計算機の高速化に伴い三次元データを活用した三次元解析の導入が進んでいる。しかし、無秩序に三次元解析を行うと非効率な作業となり、性能確保の効率的な設計検討を阻害する。このため、三次元データを有効に活用しながら効率的に設計する設計プロセスの再整備が必要になってきている。

本稿では、光通信装置の放熱性能及び耐震性能を効率的に検討する設計検証技術と設計プロセスについて述べる。

2. 放熱・耐震設計プロセスの構築

光通信装置(図1)の放熱設計・耐震設計には、概略性能予測をする設計計算式が従来用いられてきた。原理原則に基づき物理法則から構築された設計計算式は、設計工学の進歩とともに進化し、仮定条件によって異なる多様な計算式が存在する。例えば、放熱設計における仮定条件は、吸排気口の圧力損失を考慮するか否か、放射による放熱を考慮するか否か、冷却用ファンの特性を考慮するか否か等がある。どの計

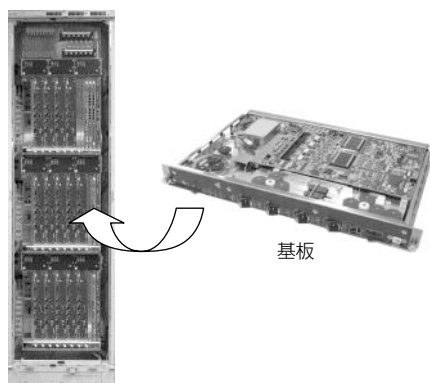


図1. 光通信装置

算式を用いるかは、設計者の裁量に任されていたため、経験によって設計完成度は大きく異なっていた。また、どちらの計算式でも仮定条件による大きな予測誤差が含まれる。このため、計算式によって設計した試作品の実測結果に基づき再度検討する時間を確保し、製品設計を完了してきた。

一方、市場へのタイムリーな製品投入に向けた短期開発のためには、試作段階の設計手戻りを抑制する必要がある。設計段階の詳細性能予測が重要となる。このため近年では、詳細性能予測が可能なCAE(Computer Aided Engineering)による三次元解析が活用されてきている。しかし三次元解析は、計算モデルの検討に時間がかかり、さらには、計算実行に時間がかかるために多くの設計案の検討は困難である。このために、設計期間内に検討しきれずに、試作段階の設計手戻りが発生するケースが散見されていた。

そこで、設計検討の効率化を図り短期開発を実現するために、設計プロセスの見直しを実施した。まず、設計計算式を棚卸しし、仮定条件を極力排除した上で多くの検討が可能な計算式を選定した。さらに、実測結果との比較によって設計計算式の予測精度を確認し、検討可能な範囲を明確化した。この計算式を用いた設計ツールを整備することで、設計者の経験によらず基本構造の幅広い検討を可能とした。次に、詳細性能予測に必要な精度を製品コストに影響を与えず過剰設計とならないように見定めた上で、同精度で予測が可能かつ短時間で計算可能な三次元解析の計算モデルと設計時の判定基準を構築した。これらをルール化することで、高精度な性能予測に基づく詳細構造の検討を可能とした。3章で放熱設計、4章で耐震設計について構築した内容を述べる。

設計計算式を用いて基本検討をした上で、三次元解析技術を用いた詳細検討をする設計プロセス(図2)を実現する

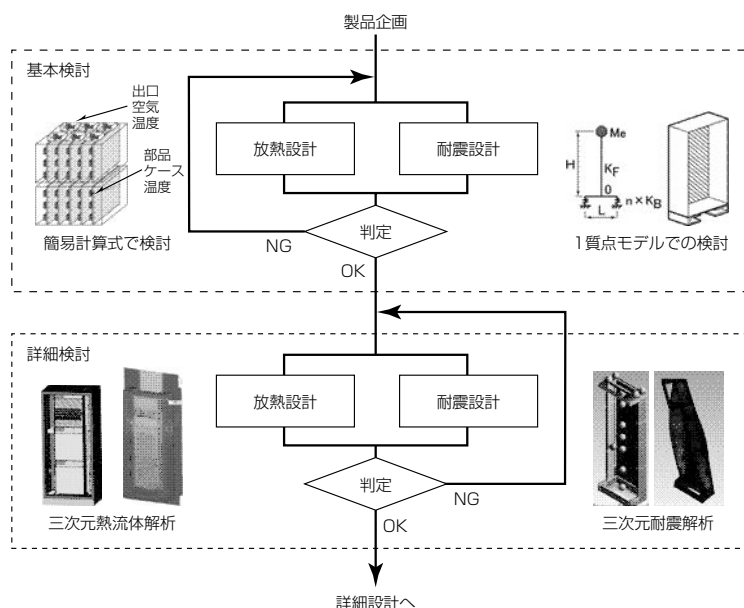


図2. 放熱・耐震設計プロセス

設計環境を整備することで、放熱性能と耐震性能の効率的な設計を実現した。

放熱設計では、従来は設計段階で4週間かけて2, 3パターンの検討しかできず、試作段階で2か月程度かけて詳細検討を実施していた。今回の設計環境を製品開発に活用したところ、3週間で約40パターンの検討を実施した上で設計を完了し、試作段階で設計手戻りなく開発を完了した。40パターンの検討は、従来試作段階で実施していた製品の仕様違いやファン故障時などの想定や放熱部品コスト低減に向けた検討などである。

また、耐震設計では、従来は設計段階で2週間かけて検討し、試作段階の耐震試験で問題が発生した場合は、2か月程度の設計手戻りが発生していた。今回の設計環境を製品開発に活用したところ、1週間で設計を完了し、試作段階で設計手戻りなく開発を完了した。

次に、今回整備した放熱設計検証技術と耐震設計検証技術について述べる。

3. 放熱設計検証技術

光通信装置は、実装された数十枚の基板から合計4,000W前後の発熱があり、10個以上の強制空冷ファンを搭載して冷却している。複数あるファンの1つが故障しても装置は停止することなく稼働しつづける必要があるため、ファンを交換するまでの間も冷却性能を確保しなければならない。基板に実装される高発熱のLSI(Large Scale Integration)

などのデバイスを冷却するために、強制空冷ファンやヒートシンク、ヒートパイプ等の冷却部品を適切に配置する放熱設計が必要となる。冷却対象のデバイスは100~200個にのぼる。

3.1 放熱構造の基本検討

放熱構造の基本検討段階では、まず、盤筐体サイズと総発熱量から、強制空冷ファンの必要有無、強制空冷ファンの種類と必要個数等を仮決定する。次に、仮決定した強制空冷ファンの風量から全てのデバイスの温度を計算する。デバイス温度によって、ヒートシンクやヒートパイプによる冷却を必要とするか否かを見極める。全体的に温度が高い場合は、強制空冷ファンの選定まで戻り、繰り返し計算をする必要がある。これらの基本検討は、幅広く検討する必要があるため、瞬時に計算検討が可能な設計計算式を用いるようにした。

設計計算式を集約した表計算シートを用いた放熱設計計算ツール(図3)を整備したことで、効率的な検討が可能になった。また、設計計算式によって計算される温度の誤差は、10℃程度あることを実測結果との比較によって明確にした。誤差を含めて設計許容温度以内になる場合は、以降の詳細検討を省略することが可能である。また、許容温度が誤差範囲内にあり注意が必要なデバイスだけスクリーニングして検討するようにすることで、詳細検討にかかる時間を削減した。

3.2 放熱構造の詳細検討

放熱構造の詳細検討段階では、装置内の冷却風の風速分

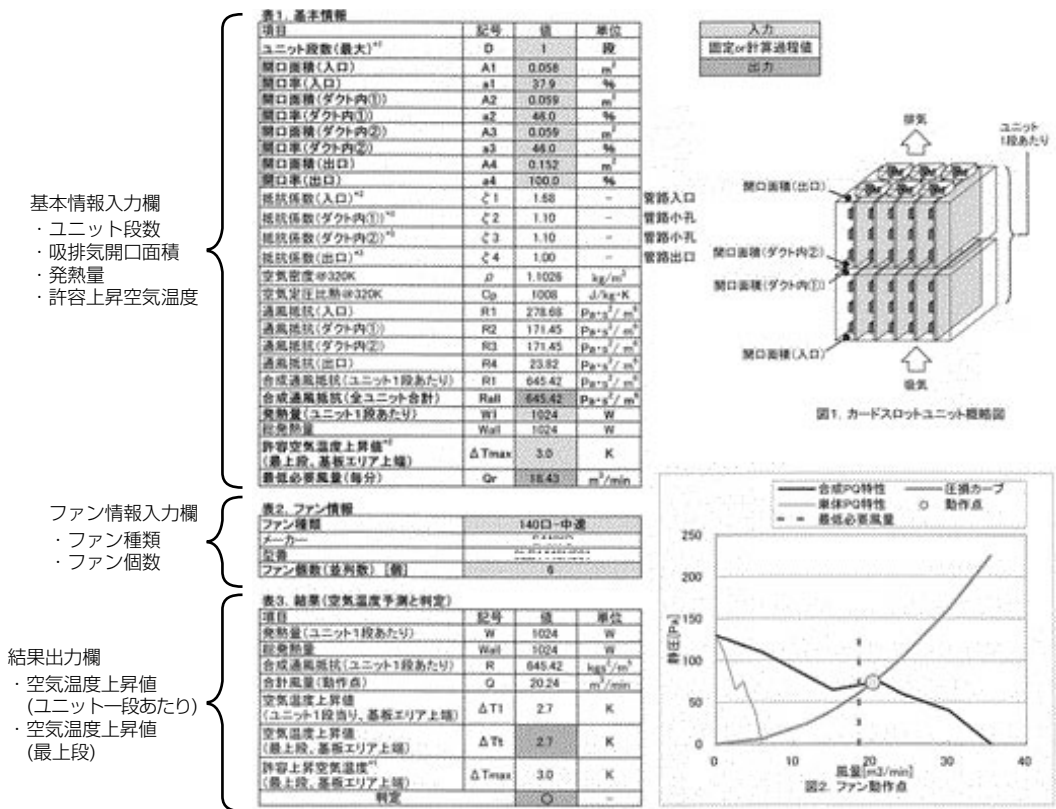


図3. 放熱設計計算ツール(基本検討)

布によるデバイス温度への影響を確認し、デバイスの配置やヒートシンク、ヒートパイプの詳細構造を決定する。筐体構造やデバイス配置によって、風速は複雑に分布する。このため、風速分布の影響を含めた放熱構造の検討は三次元熱流体解析によって行う。

詳細検討に必要な精度は±5℃と決定した上で、同精度を確保可能な計算モデルを検討した。その結果、LSIのはんだや内部構成を詳細にモデル化する必要があるとともに、盤筐体内部の冷却風の全体の流れを考慮しなければならないことが判明した。しかし、盤筐体全体の計算を実行する

ためには、計算時間が数十時間かかり、設計期間内の検討に活用できない。そこで、部分計算と全体計算を組み合わせた計算モデル(図4)を構築し、計算時間を1/10以下に短縮した。

計算モデルのルールを整備することで、容易に効率的な詳細検討が可能な環境を構築した。

4. 耐震設計検証技術

光通信装置は、質量200~300kg、製品の高さが1.8~2.3m程度ある自立筐体である。床に固定された状態で地震などの振動が加わった際に筐体の固有振動数と振動の周波数が一致して共振を起こし損傷しないように、筐体の固有振動数と強度を高くする必要がある。一方で、通信量増加に対応して設置台数を増加させるために、1台当たりの設置面積の削減が求められている。一般に同一質量、同一高さで設置面積を削減すると筐体の固有振動数が低下するため、耐震設計が重要となる。

4.1 耐震構造の基本検討

耐震構造の基本検討段階では、まず、盤筐体の基本構造と構造部品の板厚等を仮決定する。次に盤筐体サイズと質量から、盤筐体の固有振動数と構造部品の応力を計算し、設計許容値を満足するか判断する。これらの基本検討は、幅広く検討する必要があるため、瞬時に計算検討が可能な設計計算式を用いるようにした。

設計計算式を集約した表計算シートを用いて耐震設計計算ツール(図5)を整備したことで、効率的な検討が可能に

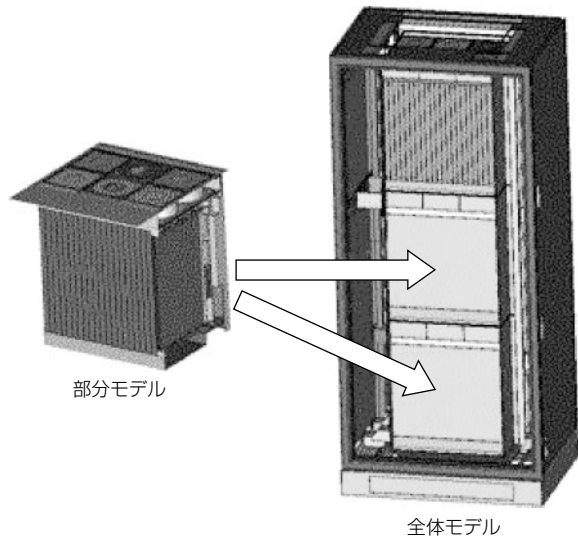


図4. 放熱設計計算モデル(詳細検討)

基本情報入力欄

- ・総質量
- ・筐体高さ

フレーム部情報入力欄

- ・フレーム材料の縦弾性係数
- ・パネル材料の縦弾性係数

基礎部情報入力欄

- ・本体材料の縦弾性係数
- ・架台材料の縦弾性係数

結果出力欄

- ・固有振動数
- ・頂部変位

表1. 基本情報				
項目	記号	値	単位	
総質量	W	330	kg	
筐体高さ	H	1700	mm	

表2. フレーム部情報				
項目	記号	前後加算	左右加算	単位
フレーム材料の縦弾性係数	E _m	200		GPa
パネル材料の縦弾性係数	E _p	71		GPa
フレームの断面2次モーメント(注1)	I _m	6.33E-03	1.01E-02	m ⁴
パネルの断面2次モーメント	I _p	3.24E-04	7.96E-04	m ⁴
架台部の弾力剛性	K _e	1.97E+05	7.89E+07	N/m
応力集中係数	β	1.50	1.50	
前後断面係数	Z ₁	4.28E+04	1.27E+05	mm ³
左右断面係数	Z ₂	4.28E+04	2.44E+04	mm ³

表3. 基礎部情報				
項目	記号	前後	左右	単位
本体材料の縦弾性係数	E _m	200		GPa
架台材料の縦弾性係数	E _a	200		GPa
ボルトと端の長さ				
A 底面 前後	L _a	(1) 50.0	(2) 50.0	mm
A 底面 後部	L _a	(3) 50.0	(4) 50.0	mm
B 台上面 前後	L _b	(5) 45.0	(6) 40.0	mm
B 台上面 後部	L _b	(7) 45.0	(8) 40.0	mm
C 台下面 前後	L _c	(9) 35.0	(10) 40.0	mm
C 台下面 後部	L _c	(11) 40.0	(12) 40.0	mm
ボルト間隔	L	(13) 500.0	(14) 700.0	mm
板厚(座金含む)				
A 底面 前後	t _a	10.0		mm
A 底面 後部	t _a	10.0		mm
B 台上面 前後	t _b	4.5		mm
B 台上面 後部	t _b	4.5		mm
C 台下面 前後	t _c	4.5		mm
C 台下面 後部	t _c	4.5		mm
ロッキング機構での基礎部の剛性	K _e	5.3E+06	5.3E+06	N/m

表4. 加算情報				
項目	記号	前後加算	左右加算	単位
加算力	a	6.8	4.3	G

表5. 結果(固有値、頂部変位、応力の予測と判定)						
項目	記号	前後加算	左右加算	単位	判定	基準
固有振動数(Excel)	f _n	1.27	10.16	Hz	△	6
頂部変位	δ _{top}	31.9	10.9	mm	○	75
圧縮側基準応力	σ _{comp}	181	41	MPa	△	240
引張側基準応力	σ _{ten}	181	213	MPa	△	240
判定		△	△		△	

図2. 箱型構造概観

図3. 基礎部の変形モデル(表3中の番号と対応)

図5. 耐震設計計算ツール(基本検討)

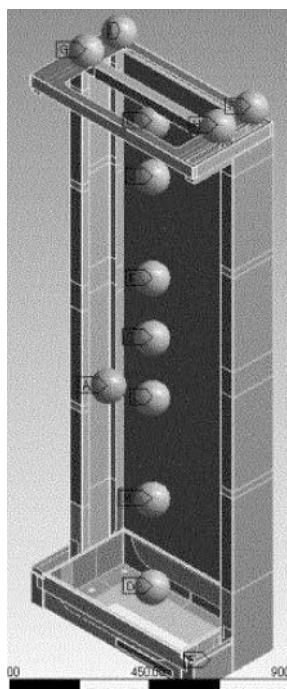


図6. 耐震設計計算モデル(詳細検討)

なった。また、設計計算式によって計算される固有値の誤差は、30%程度あることを実測との比較によって明確にした。誤差を含めて設計許容値以上になる場合は、以降の詳細検討を省略することが可能である。

4.2 耐震構造の詳細検討

耐震構造の詳細検討段階では、部品配置やボルト・リベット・溶接等の固定構造による影響を確認し、構造部品や補強部品の詳細形状を決定する。固定構造や部品配置によって、荷重は複雑に分布する。このため、荷重分布の影響を含めた耐震構造の検討は三次元耐震解析によって行う。

詳細検討に必要な固有振動数の精度は $\pm 10\%$ と決定した上で、同精度を確保可能な計算モデル(図6)を構築した。

計算モデルのルールを整備することで、容易に効率的な詳細検討が可能な環境を構築した。

5. む す び

光通信装置を対象に、設計計算式を用いて基本検討をした上で、三次元解析技術を用いた詳細検討を行う設計プロセスの設計環境を整備することで、放熱性能と耐震性能の効率的な設計を実現した事例について述べた。

今後、電力や公共施設向け制御盤にも展開していく予定である。

参 考 文 献

- (1) 西村隆司：進化するネットワーク技術特集に寄せて、三菱電機技報，**86**，No.6，313（2012）
- (2) 小林 孝，ほか：カーナビ開発におけるフロントローディング型実装設計，三菱電機技報，**80**，No.10，651～654（2006）