

蒸気タービン車室の三次元構造解析システム の開発と設計への適用

Development and Application of 3-Dimensional
Analysis System for Steam Turbine Casing

技 術 本 部 大 谷 幸 広^{*1} 渡 辺 吉 典^{*2}
高 砂 製 作 所 田 代 光^{*3} 中 野 隆^{*4}

蒸気タービン高中圧車室の高信頼性化を目的にした最適設計を行うためには、車室の温度・応力分布等の設計情報を三次元的に把握・評価し、設計図面に十分反映させる必要がある。今日 FEM 解析は、車室の実形状について、温度・応力分布を評価する有効な手段となっている。本研究では、三次元 FEM 解析において多くの労力と時間を必要とする、ソリッドメッシュ生成と解析条件設定の効率化を図った三次元構造解析システムを開発した。本システムにより、従来基本設計では困難だった三次元 FEM モデルによる構造解析及び最適設計が簡便かつ高速に実施できるようになり、構造最適化検討に伴う種々の設計計算にも十分対応可能となった。

To carry out the optimum design of the steam turbine casing, sufficient understanding of design information is important. In order to reduce effort of making FEM models of the high and intermediate pressure casing, a pre-processing system for 3-dimensional FEM analysis has been developed. Using this system, designers are easily and rapidly able to execute the structural analysis. Therefore this system is applicable to optimum design with frequent modification of configuration.

1. ま え が き

蒸気タービン高中圧車室の設計に当っては、起動時や運転中の負荷変動等を考慮して車室のコンパクト化を図るとともに、車室内部の高温・高圧蒸気を外部へ漏らさないことが必須条件である。このため、熱応力の軽減やボルト締付力の低下防止を目的とした冷却構造（遮熱板やフランジ・ボルト冷却構造等）が適用され、車室は構造と熱の両面から三次元的に複雑化の傾向にある。したがって、車室の変形を極力防止した信頼性の高い車室を設計するために、ボルト・フランジ部を含む車室全体の温度、応力（変形、面圧）分布等を三次元的に把握し、基本設計に反映させる必要がある。

一方、車室の実形状に対するこれらの設計情報を得るうえで、三次元 FEM 解析は欠くことのできない設計ツールとなっている。しかし、解析に使用される三次元ソリッドメッシュの生成と解析条件の設定には多大な労力と時間が必要とされるため、開発設計で繰返される車室形状・寸法の頻繁な変更には対応しづらいという欠点がある。

本報では、蒸気タービン高中圧車室に対する最適設計の充実に目的に開発した、三次元 FEM 解析を簡便かつ高速に実施する構造解析システムについて紹介する。

2. システム概要

今回開発した三次元構造解析システム（伝熱/応力一貫解析システム）は、蒸気タービン（図 1 参照）の高中圧車室の FEM 解析に必要な三次元ソリッドメッシュの生成及び解析条件（熱的条件、荷重条件、拘束条件及び材料特性）の設定を自動化したプリ処理システムである。すなわち、本システムは図 2 に示す車室代表寸法と運転条件データに基づき、FEM ソルバのインプットフォームに対応した ① 伝熱解析モデル、② 応力解析モデル、の 2 つの解

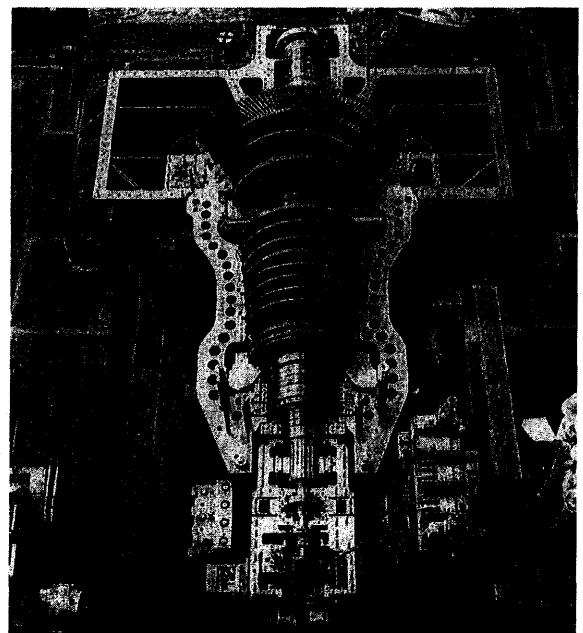


図 1 蒸気タービン車室（上半部開放）
Steam turbine casing

析モデルを自動作成するものである。なお解析モデルは、車室がロータ回転軸に左右対称であることを考慮し、1/2 対称モデルとしている。またボルトタイプとしては、植込みボルトと両ナットボルトの 2 種類のモデル化が可能である。

一般に三次元 FEM 解析を行う場合、解析モデルの作成（FEM ソリッドメッシュ生成と解析条件設定）に多大な労力と時間を必要とする。このため、一般の設計者が容易に車室形状の三次元解析を行うことは難しく、また経験のある設計者であっても頻繁な形状・寸法の変更には対応が困難である。また従来、幅（ふく）射

*1 高砂研究所構造研究室 工博

*3 タービン技術部タービン設計課主務

*2 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主査 工博

*4 タービン技術部タービン設計課

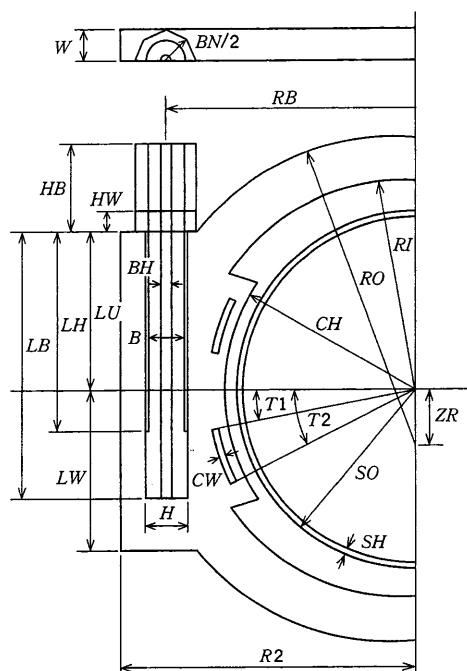


図2 車室代表寸法 車室代表寸法(約30点)を形状データファイルに入力する。
Characteristic dimension of turbine casing

を考慮した三次元的な温度・熱流束分布を計算するために、伝熱解析専用の解析コード/モデルを使用し、応力解析では別の解析コード/モデルを使用する場合が多かった。このため、伝熱解析と応力解析で異なる解析コード/モデルを使用することによる作業の煩雑化・長期化を伴っていた。加えて、伝熱解析結果(温度分布)を応力解析モデルに再現するために、結果を等価熱伝達率や熱流束の形に換算して(見掛け上、輻射伝熱条件が省略できる)応力解析モデルに入力するという手順になり、等価熱伝達率や熱流束の導出と応力解析モデルへのこれらの入力において、計算誤差の発生が避けられなかった。

そこで本システムの開発に際しては、これらの課題を解決すること、すなわち解析モデルの作成を省力化し、複雑な車室三次元構造の伝熱/応力解析を簡便かつ高速に実施できるように、以下の機能の装備と自動化を行った。

- (1) 三次元 FEM ソリッドメッシュの生成。
- (2) 熱的・機械的解析条件の設定(熱伝達率の自動計算を含む)。
- (3) FEM ソルバ用インプットフォーマットへの変換。

さらに解析モデルを統一し、計算誤差の発生を最小限に抑えるように、伝熱解析と応力解析が同一 FEM メッシュで実施可能な FEM ソルバ(はん用構造解析 FEM コード ABAQUS⁽¹⁾)を使用した。

3. システム処理フロー及びルーチン構成

本システムの処理フローを図3に示す。本システムを使用するに当たり、以下の4種類のデータファイルを準備する。

① 車室基本形状データ(ボルト1ピッチ単位)

図2に示す車室代表寸法、車室パターンフラグ(遮熱板、フランジ冷却孔、仕切板かん合部の有無及び強制熱伝達率の計算式番号等)。

② 車室連結指示データ

ボルト1ピッチ車室の連結順序。

③ 運転条件データ(ボルト1ピッチ単位)。

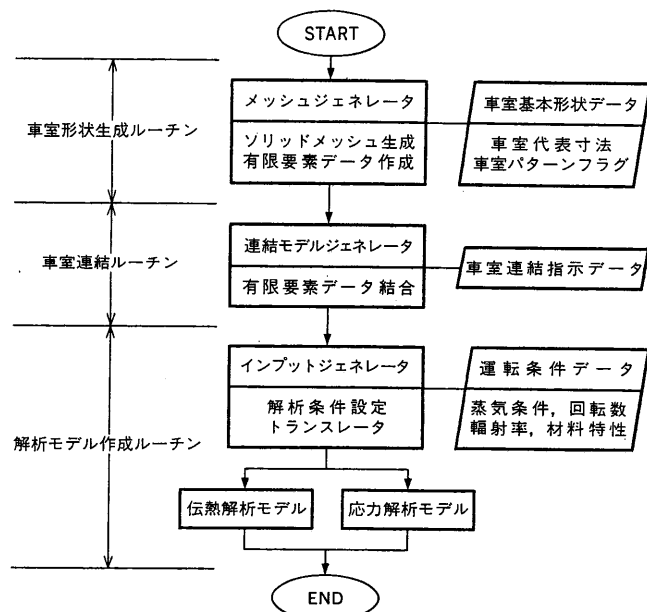


図3 処理フロー システム構成と解析モデル作成の流れを示す。
System configuration and flow diagram

材料特性、蒸気条件(温度、圧力、流量)、外表面条件(温度、圧力)、ロータ回転数、後述の熱的解析条件直接入力値等。

④ ユーザサブルーチン

ABAQUSのユーザサブルーチン(FILM)に対応したサブプログラム(非定常解析での熱伝達率・雰囲気温度の時間補間用)。

以下、本システムを構成する各ルーチンを説明する。

(1) 車室形状生成ルーチン(ボルト1ピッチ単位)

車室形状生成ルーチンでは、車室基本形状データ①に基づいて、ボルト1ピッチの有限要素データを作成する。ボルト複数ピッチを連結した解析モデルを作成する場合には、連結する車室ごとに本ルーチンによって有限要素データを作成する。

(2) 車室連結ルーチン

車室連結ルーチンでは、(1)ルーチンで生成されたボルト1ピッチ単位の有限要素データそれぞれを、車室連結指示データ②の順序に従って連結する。なお、連結される車室の内外径やフランジ寸法が異なる場合は、相対する要素節点の座標値が互いの中間座標値に自動修正され、結合される。

(3) 伝熱解析モデル作成ルーチン

伝熱解析モデル作成ルーチンでは、冷却構造(遮熱板及びフランジ冷却孔)を備えたタービン車室の三次元温度分布を精度良く計算するために、

●熱伝導

車室、フランジ、ボルト、ナット及びワッシャのメタル部とボルト穴の空気層

●対流熱伝達

車室、冷却孔及び遮熱板の表面と仕切板かん合部(強制対流)、車室、ナット、ワッシャの表面及びボルト穴回り(ボルト軸、ボルト穴表面)(自然対流)

●輻射伝熱

車室、冷却孔及び遮熱板の表面(ガス輻射)、遮熱板、冷却孔の表面及びボルト穴回り(固体輻射)

●接触熱抵抗

ボルト・ナット・ワッシャの接触面、ボルト・ナットのねじ

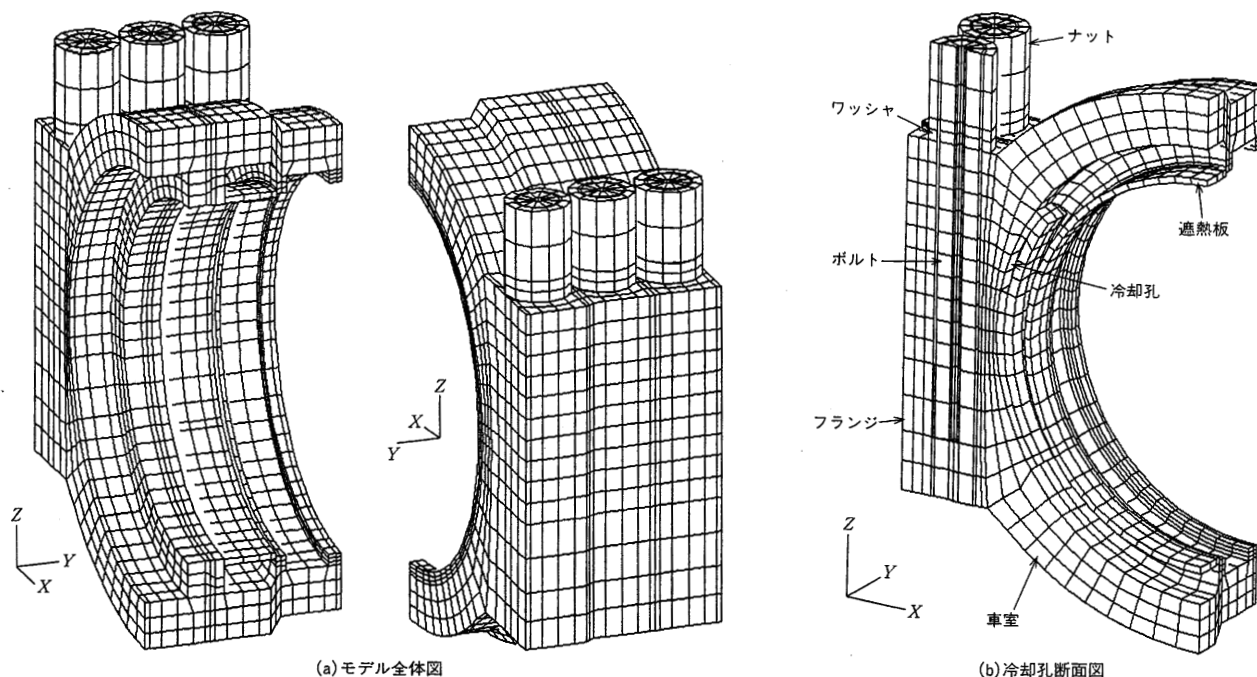


図4 解析モデル（3連結モデル） 主蒸気入口部の三次元ソリッドモデルを示す。
Analysis model of turbine casing

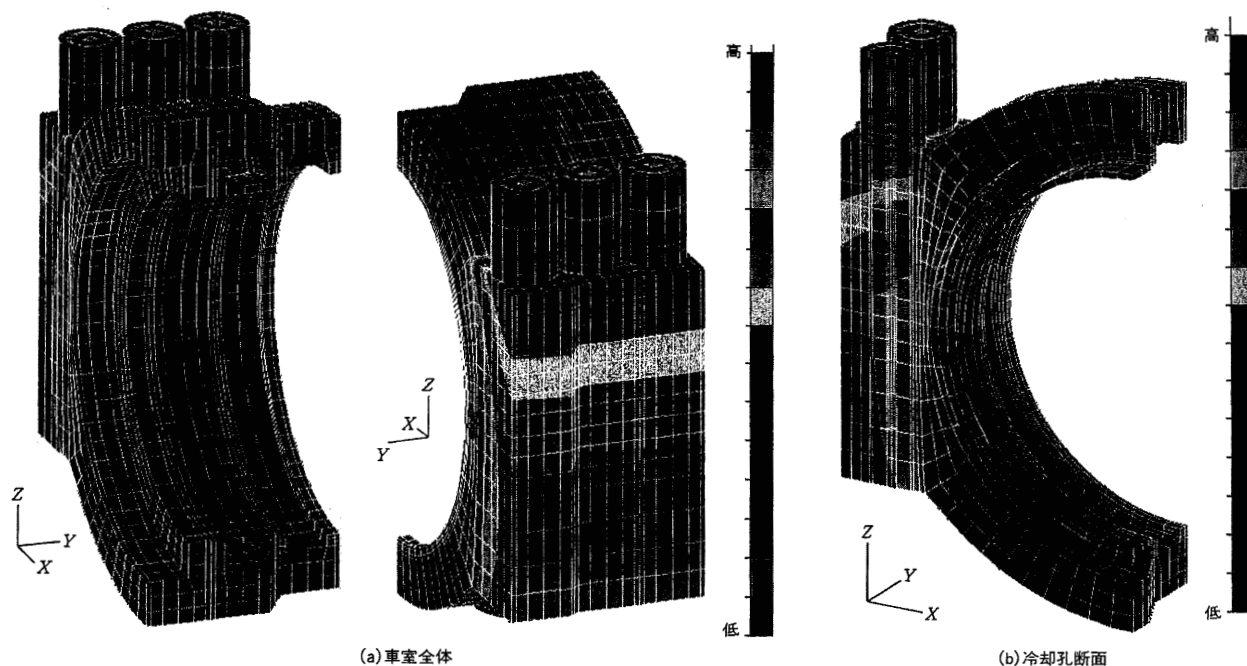


図5 定常温度分布 定常伝熱解析による車室メタル温度分布を示す。
Temperature distribution in steady state

部及びワッシャ座面（フランジとの接触面）の4種類の熱バスを三次元的に考慮した解析モデル（FEMメッシュ及び解析条件）を自動作成する。特に非定常時に重要となる遮熱板、冷却孔及びボルト穴回りでの輻射伝熱（固体輻射及びガス輻射）を、完全三次元モデルにおいて考慮している。ここで、1/2対称断面及び軸方向端面とボルト中心孔は断熱条件とした。なおこれらの熱バスをモデル化するため、三次元固体伝熱要素と三次元伝熱インタフェース要素を使用している。

また、伝熱解析で考慮される熱的解析条件（熱伝達率、輻射率及び雰囲気温度）に関し、本システムの現バージョンでは、直接入力値とサブルーチン計算値が以下の分類で使用され、解

析モデルに設定/出力される。

① 直接入力値

輻射率（ガス/固体輻射）、車室とフランジの外表面条件、接触熱抵抗及びボルト回り条件

② サブルーチン計算値

強制対流の熱伝達率⁽²⁾⁽³⁾

ここで直接入力値とは、①の各条件値を車室形状及び運転条件から手計算ベースで導出し、運転条件データファイルに直接入力するものであり、そのまま解析モデルへ設定/出力される。またサブルーチン計算値とは、②の条件値を車室基本形状データ及び運転条件データに基づき、システムに組込まれた熱伝達率

計算ルーチンによって内部で自動計算するものであり、計算結果が解析モデルへ設定/出力される。

(4) 応力解析モデル作成ルーチン

応力解析モデル作成ルーチンでは、前述(3)の伝熱解析モデルを用いて計算される車室の三次元温度分布を、同一分割メッシュへ入力/再現し、タービン運転時における車室の三次元応力分布を計算するための解析モデルを自動作成する。なお応力解析モデルでは、三次元固体応力/変位要素を使用している。

解析モデルでは、以下の拘束条件を考慮している。

- 1/2 対称条件 (左右対称モデル)
 - 剛体変位拘束条件
 - ワッシャ座面タイイング [座面でのワッシャとフランジの高さ方向自由度 (変位) の共有]
 - ボルト植込み部タイイング [植込み部でのボルトとフランジの全方向自由度 (変位) の共有]
- また解析モデルでは、以下の荷重条件を考慮している。
- ボルト初期締付力
 - 圧力荷重
- 車室内表面圧力 (蒸気圧力)、車室外表面圧力
- 節点温度分布
- 伝熱解析結果による温度分布 (結果ファイルから入力)

4. 適用例 (火力タービン実機の計測結果との比較)

本システムの機能検証と解析精度の評価を行うため、火力タービン実機に対する逆解析 (試計算) を実施した。ここで解析対象としたタービンは、主蒸気入口部に冷却構造 (遮熱板及びフランジ冷却孔) を採用した単車室単流排気式蒸気タービンである。解析モデルには、主蒸気入口部のボルト 1 ピッチを中心に、前後段 1 ピッチずつの計 3 ピッチを対象とした 3 連結モデル (図 4 参照) を作成し、伝熱解析及び応力解析を実施した。

解析結果を、図 5 (定常温度分布) 及び図 6 (フランジ水平合せ面の圧力分布) に示す。また、車室メタル温度 (定常/非定常) の比較を表 1 に示す。表 1 に示す計算値と実測値の比較から、両者が良く対応していることが分かる。また、図 6 に示される高圧力発生位置と、タービン実機の定期検査で目視観察されたフランジ水平合せ面の当り状況とも良く対応していた。

5. む す び

蒸気タービン高中圧車室の開発・設計に際し、定常・非定常運転時の車室変形防止に対する信頼性向上を目的とした最適設計を加速・高度化するために、三次元構造解析システム (伝熱/応力一貫解析システム) の開発を行った。

本システムでは、三次元 FEM 解析モデル作成の効率化及びヒューマンエラーの防止を図るため、

- ① 三次元 FEM ソリッドメッシュの生成
- ② 解析条件の設定
- ③ ABAQUS インプットフォーマットへの変換

を自動化する機能を組込んだ。これらの機能により、解析モデルの作成時間が、従来手作業で行っていた場合の約 1/10 に短縮された。この結果、従来の基本設計ではその適用範囲に制約のあった三次元 FEM モデルによる構造解析が、簡便かつ高速に実施可能となり、さらに感度解析による構造最適化検討や種々の設計計算にも十分対応可能となった。

また、本システムの機能確認と解析精度評価を行うため、火力

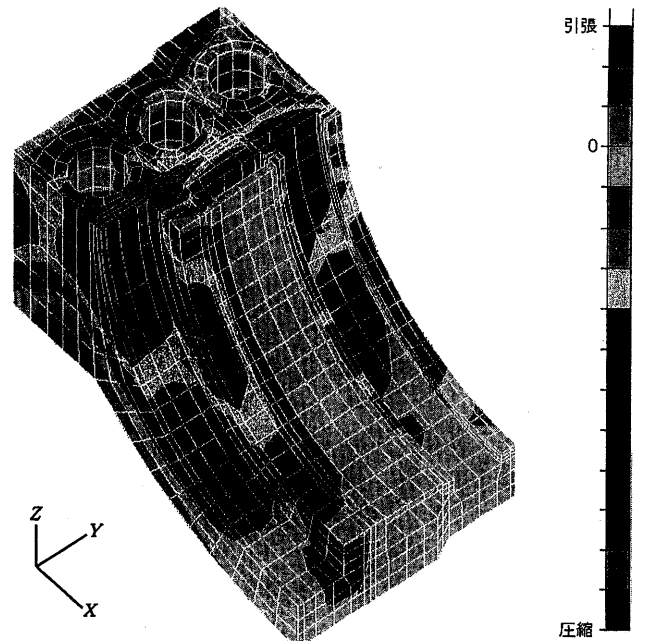


図 6 フランジ水平面圧力分布 (非定常応力) 非定常応力解析によるフランジ水平面の圧力分布を示す。
Surface pressure distribution in transient state

表 1 車室メタル温度比較
Comparison of casing temperature

参照位置	非定常 (min)			定常
	264	432	480	
車 室 頂 部	0.34	0.75	0.88	1.00
	0.35	0.74	0.88	1.00
フランジ上部	0.27	0.64	0.78	0.98
	0.28	0.64	0.80	1.00
フランジ中部	0.21	0.54	0.67	0.98
	0.21	0.54	0.69	1.00
フランジ下部	0.27	0.67	0.82	1.05
	0.32	0.75	0.90	1.00
ボルト 中心	0.16	0.47	0.63	1.01
	0.17	0.48	0.67	1.00

※上段：計算値 下段：実測値

※ (メタル温度 - 室温) / [メタル温度 (定常実測値) - 室温] で無次元化

タービン実機の高圧車室に対する試計算を実施した。これから、本システムを用いて自動作成した解析モデルによる伝熱・応力解析の結果と、車室メタル温度 (定常/非定常) の実測値及び定期検査時に目視観察されたフランジ水平面での当り状況が良く対応していることが確認された。

以上の結果から、本研究で開発した構造解析システムが、蒸気タービン高中圧車室の三次元最適設計の有効なツールとして適用可能と考えられる。

参 考 文 献

- (1) ABAQUS/Standard User's Manual, Volume I & II
- (2) Childs, P.R.N. et al., Heat Transfer to a Rotating Drum in an Annulus with a Stator Blade Row and Axial Through-flow, Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition (1992), ASME Paper 92-GT-249
- (3) 黒崎ほか, 二次元溝におけるはく離流の熱伝達, 第七回日本伝熱シンポジウム講演論文集 No. I-5-2 (1970-5) p.49