

流体解析と構造解析の連成システム

—ハイブリッド街灯への適用—

Integrated CFD and Structural Analysis Applied to Hybrid Streetlight Development

小 尾 幹 男 機械事業本部事業開発部 部長代理
松 田 治 機械事業本部事業開発部
金 子 淳 情報システム部技術グループ
福 山 敏 史 株式会社アイ・エイチ・アイシステムズ ソフト開発事業部

回転機械のなかで最も重要な構成部品であるインペラの CAE は、遠心力に起因する応力解析と固有値に起因する振動解析、さらに形状最適化を図ってきた。特に、複雑な形状をもつ回転機械の設計開発では、流体解析による各部温度や圧力を基にした構造解析が重要であり、ターボチャージャなどに適用してきた。今回、機械の設計開発における CAD/CAE のインテグレーションシステムを構築するとともに、流体解析と構造解析の連成システムを構築した。ハイブリッド街灯に適用した例を紹介するとともに、今後の CAE のあり方について考察する。

Computer Aided Engineering (CAE) for turbomachinery has focused on analyses of stress due to the centrifugal force and vibration arisen from natural frequency, optimizing the shape of the impeller, which is the most important component for turbomachinery. Structural analysis using distributions of pressure, temperature, and load obtained from the CFD study is very important to develop turbomachinery with complex shapes. The techniques have been applied to turbocharger development. IHI has developed an integrated system of Computer Aided Design (CAD) and CAE to design and development of machinery together with an integrated system of CFD and structural analysis. These systems were applied to development of a streetlight combined with a windmill and solar panel. The method for the integration of several types of analysis software is described.

1. 緒 言

今まで、車両過給機、船用過給機、スクリュウ圧縮機、遠心圧縮機を中心に、構成部品の構造解析を実施してきた。回転機械のなかで最も重要な構成部品であるインペラの CAE (Computer Aided Engineering) では、遠心力に起因する応力解析と固有値に起因する振動解析、さらに形状最適化を図ってきた^{(1),(2),(3)}。特に、複雑な形状をもつ回転機械の設計開発では、流体解析による各部温度や圧力を基にした構造解析が重要であり、ターボチャージャなどに適用してきた^{(4),(5),(6),(7)}。

本稿では、機械の設計開発における CAD/CAE のインテグレーションシステムを構築し、ハイブリッド街灯 (グッドデザイン賞を受賞) に適用した例を紹介するとともに、今後の CAE のあり方について考察する。

2. CAE/CAD実績

第 1 図に当社機械事業本部における CAE/CAD の実績を示す。CAE の導入経緯は、構造解析用に MSC.Nastran を 1979 年 3 月に、プリポストプロセッサとして MSC.Patran

を 1996 年 9 月に導入した。また、構造解析用として CAEDS を 1991 年 12 月に導入し、その後 I-DEAS に移行して、三次元 CAD およびプリポストプロセッサとしても使用している。

流体解析用ソフトとしては、STAR-CD を 1997 年 1 月に、ICEM-CFD を 1995 年 12 月に導入しており、これらは現行のシステムとして活用している^{(8),(9)}。三次元 CAD に関しては、1983 年 7 月の CALMA に始まり CAEDS を経て、現在は I-DEAS, Unigraphics, CATIA, Autodesk Mechanical Desktop, ICAD/SX を主に使用している。顧客のシステムに合わせざるを得ないこと、データの用途に応じて機種を変えることもあるため、機種間のデータ変換が避けられない状況にある^{(10),(11)}。

1997 年 12 月に CATIA V4 を導入し、現在も使用している。CATIA V4 で作成した三次元モデルは、当時から構造解析に用いている。CATIA V5 および GPS は 2001 年 12 月に導入した。導入の目的は先行導入して試用し、本格的な実務での活用に備えることにある。二次元 CAD は、1989 年 4 月に MICRO CADAM (DOS 版) を導入し、

種類	ソフト名	使 用 ソフト	西 暦				
			1985	1990	1995	2000	2005
CAE	MSC. Nastran	○	'79/3				
	CAEDS			'91/12	'96/12		
	I-DEAS				'96/12		
	MSC. Patran	○			'96/9		
	OPTISHAPE				'98/5		
	STAR-CD	○			'97/1		
	ICEM-CFD	○			'95/12		
	CADfix					'01/10	
	NAVISTRUCT					'02/3	
CAD	CALMA		'83/7	'90/7			
	Unigraphics				'96/12		
	CATIA	○			'97/12 (V4 版)	'01/12 (V5 版)	
	ICAD/SX					'02/7	
	MICRO CADAM (2D)			'89/4 (DOS 版)	'93/4 (OS/2 版)	'97/10 (NT 版)	
	AutoCAD	○			'98/12		
	Autodesk Mechanical Desktop				'98/8		
PDM	Metaphase					'99/9	

(注) 使用ソフトは新しい流体・構造解析の連成解析で使用するものを示す。

第 1 図 CAE/CADの実績
Fig. 1 CAE/CAD achievements

1993 年の OS/2 版の導入を経て、1997 年 10 月に導入した NT 版が現在も稼働している。また、1998 年 12 年から AutoCAD も使用している。

3. 従来の流体・構造連成解析システム

第 2 図に流体解析から圧力分布を求め、その分布荷重を使用して応力解析を行う従来の手法を示す。この手法における問題点について以下に述べる。

(1) 三次元モデル作成

三次元設計モデルと三次元解析モデルは、それぞれ異なるソフトを使用しているためデータ変換を必要とし、変換に多くの時間を要した。また、変換されたデータの品質が悪いためモデルの修正作業にも多くの時

間を必要とした。そのため、CAD データ修正ツール CADfix を使用していた。

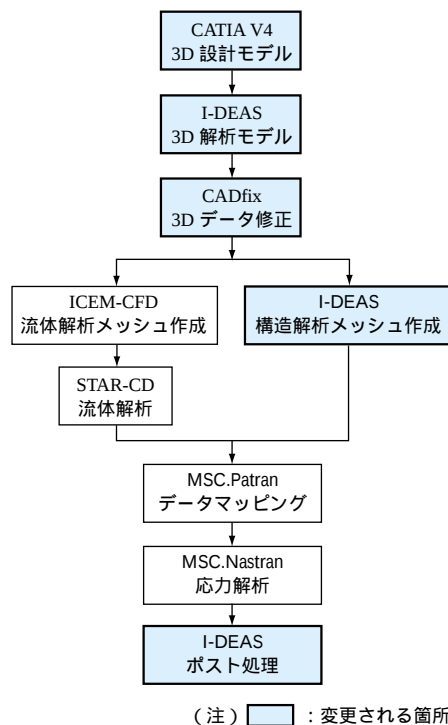
(2) メッシュ作成

流体解析用のメッシュ作成は三次元設計モデルを使用できないため、三次元解析モデルを介して作成する必要があり、メッシュに不具合があれば三次元設計モデルを修正する必要があった。

また、構造解析用のメッシュ作成についても、同様に、三次元解析モデルを介して作成する必要があり、メッシュに不具合があれば三次元設計モデルを修正する必要があった。

(3) ポスト処理

流体解析と構造解析ではメッシュが異なるうえ、節



第 2 図 従来の流体・構造解析連成フロー

Fig. 2 Conventional process for integrated fluid and structural analysis

点数も異なるためデータマッピングをする。すなわち、流体解析から求めた圧力分布を構造解析用メッシュにマッピングし、応力解析を実施する。解析結果は表示などのポスト処理をするため、ポスト処理ソフトにデータを転送する必要があり、操作が煩雑であった。

4. 新しい流体・構造連成解析システム

新しい解析システムのテーマは、流体解析と構造解析の連成を、CAD システムを中心に実行することと時間短縮にある。同時に、メッシュ生成、計算結果の受渡しを CAD システムに内蔵させることで、解析の専門的知識がない設計者でも使えるツールを目指した。

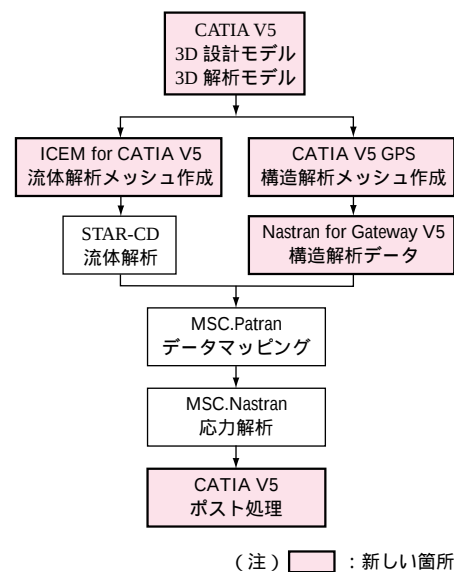
第 3 図に示すハイブリッド街灯の開発時点で新しい流体・構造解析連成フローを適用し、検証した。ハイブリッド街灯の発想は、当社の既存製品である風力発電装置が基になっており、風車と太陽電池で発電し、蓄電池に充電して照明を点灯させる。基本は風車と街灯を合体させたものである。電線工事が不要なので、例えば砂漠でも使用が可能である。新しい流体・構造解析連成フローを第 4 図に示すとともに第 1 図に使用ソフトを示す。

第 5 図に示す形状モデルを使用して、流体解析と応力解析を実施した。大まかには、三次元 CAD システムでモデリングを行い、CAE の結果に基づいてモデルに修正を加え



第 3 図 ハイブリッド街灯

Fig. 3 Streetlight combined with windmill and solar panel



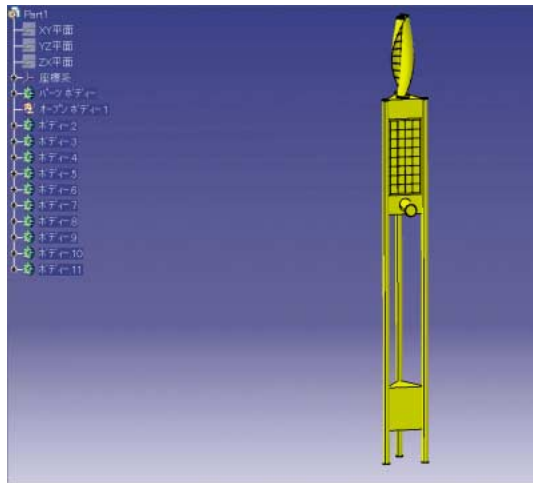
第 4 図 新しい流体・構造解析連成フロー

Fig. 4 New process for integrated fluid and structural analysis

て設計を完成させる流れになっている。なお、各処理をつなぐインタフェースツールは使用しないで、CAD システムに内蔵させ、処理の自動化を図った。以下に解析手順を示す。

(1) 三次元モデル作成

三次元設計モデルと解析モデルは同一の CAD ソフトを使用し、データ変換やモデルの修正作業をなくした。



第 5 図 ハイブリッド街灯の形状モデル

Fig. 5 Model of streetlight combined with windmill and solar panel

(2) メッシュ作成

流体解析用のメッシュ作成は，CAD ソフトからダイレクトにできるため，データ変換が不要となる．また，メッシュに不具合があれば，CAD ソフト上で解析モデルの修正が可能である．そのメッシュデータを流体解析ソフトに渡して計算させる．また，構造解析用のメッシュ作成についても，同様に，CAD ソフトからダイレクトに作成でき，メッシュに不具合があれば CAD ソフト上で解析モデルの修正が可能である．

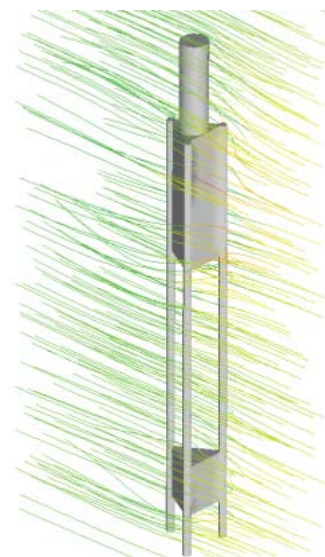
(3) ポスト処理

流体解析から求めた圧力分布を構造解析用メッシュにマッピングし，CAD ソフト上で応力解析を実施する．その応力解析結果のデータは，CAD ソフト上で解析結果表示などのポスト処理をする．新しいシステムは CAD を中心に構築している．第 6 図に流体解析における流線と流速分布を示し，第 7 図に流体解析から求められた風荷重を面圧分布で示す．本分布を基に構造解析を実施する．第 8 図は風荷重を基に解析した応力計算結果（最大主応力）を示す．

5. 新しい解析システムの検証結果

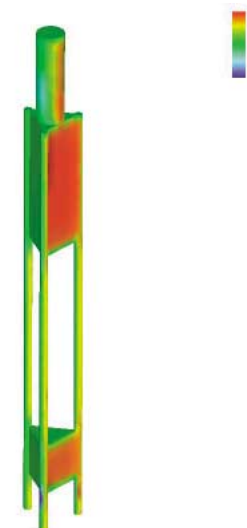
CAD を中心としたシステムでは，特に構造解析用のメッシュが適切に生成され，モデルやメッシュの修正作業が大幅に軽減された．従来の CAD/CAE システムでは，1 ～ 2 か月かけてもなかなか適切なメッシュを作成することができなかったが，新しい CAD システムでは数日でできる．

また，流体解析用のメッシュは，CAD システムからダイレクトに作成できるようになり，モデル修正も CAD 上で



第 6 図 流線と流速分布

Fig. 6 CFD around streetlight (streamline and velocity distribution)



第 7 図 風荷重分布

Fig. 7 Wind pressure against streetlight



第 8 図 応力計算結果

Fig. 8 Calculation results of principal stress

行えるため、このプロセスの作業効率がアップする。メッシュ作成ツールにモデルを渡すためのデータ変換ツールが不要になったことも大きな効率アップにつながる。メッシュの大きさなどを標準化することで、さらに大幅な時間短縮が実現できる。なお、荷重データのマッピングは、流体解析の計算結果である圧力分布を構造解析用のメッシュにマッピングしているが、この処理に約 7 時間掛かった。この高速化は今後の課題である。

6. 今後の課題

仕事のスパンが月単位から日単位になってきている。そのため、三次元モデルおよび CAE を主体とした設計開発プロセスに変えていく必要がある。今回のシステムも、この考えに基づいている。今後の課題として次のような項目が挙げられる。

6.1 データの蓄積と再利用の実現

そのためには、履歴管理された設計モデルのデータベースを構築する必要がある。特に、回転機械の場合、製品の形状が大幅に変わることはないので、設計モデルの再利用はかなりの効果が見込める。また、設計モデルは解析プロセスで利用されるので、設計モデルのデータベースとリンクした解析データベースの構築も重要である。

6.2 解析手法の標準化

(1) モデル作成の標準化

誰が作っても同じ品質のモデルができるようなモデル作成基準を整備し、業務手法の共有化を図る必要がある。

(2) メッシュ作成の標準化

メッシュにはいろいろな種類、サイズがあり、サイズが変わると解析結果が全く異なる。これを回避するため、メッシュサイズ、形状のガイドラインを作成する必要がある。また、最適なメッシュの種類、サイズなどを標準化することが重要である。

(3) 境界条件の標準化

過去の豊富な実績を基に、CAE システムで出た結果を評価し、境界条件を標準化していく必要がある。

6.3 解析結果の検証

(1) 基本型のバリエーションによる量産機種では、同種の実績を広く利用できるモデルパターンを確立することが大切である。

(2) 従来の解析で行われてきた、傾向評価・相対評価から実験に代わる絶対値評価に移行する必要がある。

従来は過去の計算結果や解析結果によって製品を評価していたが、今後は絶対量で評価する方向に変えていく必要がある。ノウハウがある程度あり、実験して評価するのではなく、絶対量で評価できる場合は、CAE による解析結果をよしとするように解析の手法を変えていく必要がある。それには今後のノウハウの積み上げが重要である。

6.4 三次元モデルおよび CAE の活用

最近では、三次元モデルを活用した PR やマーケティングを行う機会が増えており、顧客と「会話」をする道具としても利用される。三次元モデルは二次元図面よりも説得力がある。

例えば、三次元モデルを利用して作成した CG アニメーションをマーケティングに活用する。第 9 図に示すように、夜の歩道の脇にハイブリッド街灯が立っており、風車が回転して照明が歩道を照らし、歩行者が通り過ぎると地面に影ができてその方向が変化していく、というものである。CG であれば街灯の色を変える、昼間の状態で見るとなどの画像調整が簡単にできる。

また、Web 環境を活用し、ブラウザ上で顧客が街灯の色や風車の種類を変更したり、さらには自分で用意した実写の背景に街灯のモデルを合成して、景観シミュレーションを行うこともできる。ノート PC でこのシステムを持参し、客先で受注と同時に仕様を決定するなど、効率的なマーケティング活動も期待できる。さらに、CAE についても、流速分布、圧力分布、応力分布、温度分布などを動的に表示することによって、設計開発を迅速にできる。



第 9 図 ハイブリッド街灯のCGアニメーション

Fig. 9 Animated image for hybrid streetlight and background

7. 結 言

流体解析は専門的で研究的な分野であり、構造解析と比較して設計にはまだ十分になじんでいない面がある。一方、構造解析は設計者レベルで十分実行可能なレベルに達している。

今回のシステム検証で、CAE と CAD の一体化の実現が可能になった。すなわち、操作レベル、ソリッドモデル、サーフェスモデルなどデータレベルで CAD システムに CAE を統合する環境が整い、今後は CAD システム上で CAE データがダイレクトに利用できることは特筆に値する。しかし、CAE の機能面では、まだ満足のものではないので、今後さらに CAD の使用者が CAE と CAD を統合して使えるようにすることが必要である。

将来的には CAD システムのナレッジウェアを活用し、設計仕様のテンプレート化やパラメトリック・デザインも実現する必要がある。そのためには、多くの課題を解決し、今後の CAE のさらなる発展に寄与すべく努力し、真の物づくりの変革に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 小尾幹男, 鈴木万里子, 松浦奈津子: 汎用標準回転機械における構造解析 — インペラの構造解析 — 石川島播磨技報 第 40 巻第 5 号 2000 年 9 月 pp.256 - 260
- (2) 小尾幹男, 島崎芳彰, 鈴木万里子, 野田雅裕: 回転機械の開発設計における構造解析と形状最適化 計算工学講演会論文集 Vol.6 2001 年 5 月 pp.324 - 328
- (3) 小尾幹男: 回転機械インペラの構造解析 計

算工学講演会論文集 Vol.7 2002 年 5 月 pp.295 - 298

- (4) 小尾幹男, 武井伸郎, 松浦奈津子: 過給機における熱流体解析と熱応力解析の連成 石川島播磨技報 第 39 巻第 3 号 1999 年 5 月 pp.167 - 171
- (5) 小尾幹男, 武井伸郎, 松浦奈津子: ターボ機械における熱流体解析と熱応力解析の連成 ターボ機械協会誌 第 27 巻第 12 号 1999 年 12 月 pp.35 - 42
- (6) 小尾幹男, 松浦奈津子: 回転機械の解析例 — 熱流体・熱応力連成解析 — 計算工学講演会論文集 Vol.5 2000 年 5 月 pp.505 - 508
- (7) 小尾幹男, 松浦奈津子, 武井伸郎: 過給機の熱流体・熱応力連成解析における事例 — 計算格子種類についての考察 — 日本ガスタービン学会誌 Vol.27 No.6 1999 年 11 月 pp.16 - 21
- (8) 小林 健, 高波 功, 小尾幹男, 武井伸郎: 三次元 CAD データ利用による流体数値シミュレーションの設計ツール化 石川島播磨技報 第 39 巻第 2 号 1999 年 3 月 pp.79 - 82
- (9) 小尾幹男: ターボ機械への 3 次元熱流体数値シミュレーション適用例の紹介 ターボ機械協会 第 24 回講習会 1999 年 5 月 pp.52 - 61
- (10) 小尾幹男, 大北明弘, 武井伸郎, 松浦奈津子: 過給機開発における三次元 CAD の適用 石川島播磨技報 第 38 巻第 5 号 1998 年 9 月 pp.324 - 328
- (11) 小尾幹男, 松浦奈津子: ターボ機械における 3 次元 CAD の開発設計への適用 ターボ機械協会誌 第 29 巻第 2 号 2001 年 2 月 pp.3 - 8