

シミュレーション技術が支える建設機械の開発

田村 和久
Tamura Kazuhisa

星 暁生
Hoshi Akio

日立建機は、3D CADの導入を契機にALDを提唱し、開発での適用を推進している。ALD技術は、実験技術とシミュレーション技術を活用して現象を解明し、水平展開可能な事前予測技術を確立するものである。これらを全

製品に対応させるために実験解析評価センタを発足させ、製品品質と開発効率の向上と事前保証の実現に向けて推進している。

1. はじめに

現在、ALD (Analysis Lead Design：解析主導型設計) 技術は航空宇宙産業、自動車産業などに幅広く活用され、製品品質と開発効率の向上に大きな成果を出しており、製品開発のキーテクノロジーとなっている。ALD技術の実用化には解析だけに留まらず、現象が実車実験などによって解明されていること、さらに解析手法と結果の妥当性が必ずバリデーション実験によって保証されていることが重要であり、これらが実現できて水平展開可能な実用技術となる。つまり、解析と実験の融合が必須となる。

こうした背景により、日立建機株式会社は、他社を凌駕(りょうが)すべく、社内各部門のコアメンバーから成る

ユニークな組織として、より開発現場に近い解析と実験を融合した実験解析評価センタを2008年10月に新たに発足させた(図1参照)。以来、事前保証の実現による効率的な製品開発を推進するためのALD技術の一連の開発を、5ゲン主義(現場、現物、現実、原理、原則)に基づいて一貫通貫で行ってきた。

本稿では、開発段階でのニーズを迅速に取り込んできた強度・応力系および熱流体・騒音系に関するALD技術の製品開発への適用結果について述べる。

2. 解析環境の変化と技術開発

2008年前後にデジタル設計ツールが世界で急速に発展した。CAD(Computer-aided Design)/CAE(Computer-aided Engineering) システムがWindows^{※1)}上で稼働可能になることで、文書ソフトウェアとの連携が容易になり、ネットワーク、データベースが構築され、3D(Three-dimensional) CADからCAEまでを設計者が行いやすい環境が整った。さらに、コンピュータのOS(Operating System)が32ビットから64ビットとなると同時に計算機速度が飛躍的に向上したため、大規模CAEを短時間で計算し、結果処理もスムーズに確認することができるようになった。

以上の環境変化から、新しい3D CAD/CAEシステムNX^{※2)}が2009年より製品開発に導入された。2008年当時

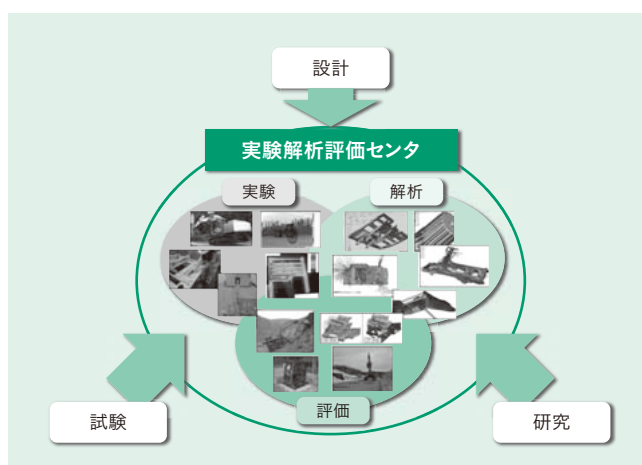


図1 実験解析評価センタの発足（2008年～）

製品知識と解析力を有する設計者と、実験評価技術を有する試験技術者、各分野の専門知識を有する研究員で構成された組織を設立した。

※1) Windowsは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標である。

※2) NXは、米国およびその他の国におけるSiemens Product Lifecycle Management Software Inc.またはその子会社の商標または登録商標である。

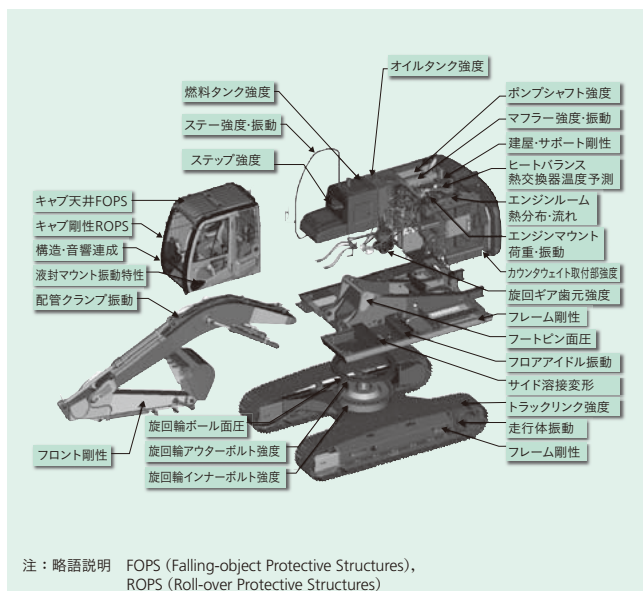


図2 シミュレーション技術開発ロードマップ

2008年当時の解析精度の課題としてリスト化した項目を示す。優先順位をつけて解析精度を向上させた。

の開発において解析精度に課題がある部位についてまとめ、中小型ショベルの開発効率と開発品質の向上を目標に、実験とシミュレーションの比較検証を繰り返すことで数値解析による事前評価精度を上げる活動を行ってきた(図2参照)。

当時は世の中のCAD/CAEの技術が一変している時期でもあり、精度向上のために新しい技術を積極的に取り入れ、製品開発の中で計算基準を作成してきた。

3. シミュレーションによる事前評価

設計段階における事前評価では、主にFEM (Finite Element Method : 有限要素法) による線形静解析が行われてきた。近年、構造体の強度解析においては単体部品による強度解析からアセンブリ解析となり、大規模で詳細なモデルで検討するようになってきている(図3参照)。さらに、線形静解析だけでなく、弾塑性解析や機構構造連成解析・流体構造連成解析などマルチフィジクスな手法で詳細に現象解明ができるようになってきている。また、計算機性能の向上によってこれらの計算が短時間でできるようになり、最適化手法や感度解析などと組み合わせて繰り返し計算することで、短期間で信頼性のある形状が設計できる環境になっている。アセンブリ解析が進むと同時に、接合部の評価として接触を含む非線形解析も急速に取り入れられた。接触非線形解析では接触部の圧力やすべり量を表現できる新しい手法も解析ソルバーに実装されており、面圧・摩耗評価に利用している。また、鋳造シミュレーション、熱弾塑性解析による溶接ひずみ・残留応力の予測技術など、生産技術には欠かせない計算手法が急速に発展した時期でもあった。振動系の解析においては、構造物の固有値解析の精度向上に始まり、車体振動に対する過渡応答解析、さらに解析結果の応力履歴によって疲労寿命を予測することが可能になっている。振動応答問題としては、運転席における音響解析や乗り心地評価の計算も進んでいる。熱流体解析においては、熱交換器の簡易モデルによる熱交換器前



注：略語説明 MR (Mixed Reality), FEM (Finite Element Method)

図3 シミュレーション技術開発

近年のシミュレーション技術の高度化により常に新しい技術を取り入れ、解析精度および設計効率を向上させてきた。

の風量からエンジンルーム3D CADのフルモデルをそのまま使用した大規模な熱流体解析により、詳細な流速分布や温度分布の予測までできるようになり、ヒートバランスの検討精度も向上している。

以上のように解析技術はここ数年で飛躍的に向上しているが、ALDを実現する設計プロセスでは、設計者による3Dモデルの詳細作成および情報のインプットにかかる作業工数がどうしても増えるというデメリットがある。一般的にモデリングと言われる作業であるが、設計プロセスにおける設計業務とモデリング作業にトレードオフが生じてはならない。モデル規模が大きくなるにしたがって、モデリング作業および結果処理の自動化ツールも同時に開発し、非設計項目であるモデリング作業時間を短縮できるよう努めている。

3.1 線形静解析による強度評価

信頼性評価試験の中に各種構造物の応力測定試験がある。応力集中部の応力値をひずみゲージによって計測し、基準値内にあるか確認することが主である。当試験において基準値を超える値が計測された場合は、再度設計に戻って対策案の検討・確認試験を行うため、多大な時間と労力がかかる。開発期間を短縮するためには、当試験をいかに少ない対策部位とするか、また少ない対策回数でクリアするかが重要になる。

これら応力試験に対する設計段階における事前評価としては、FEMによる線形静解析が主である。日立建機においては1997年に3D CADが導入されてから、主溶接構造物とキャブ、タンク、建屋サポート、エンジンカバー、各種ブラケットなどは3D設計と同時にFEMによる事前評価が行われるようになってきている。また、近年では大規模モデルによるFEMが計算できる環境になり、境界条件の精度向上を目的として複数の部品を組み合わせたアッセンブリ解析が行われるようになってきた。線形静解析による応力解析の代表的な事例として、油圧ショベルのフロント構

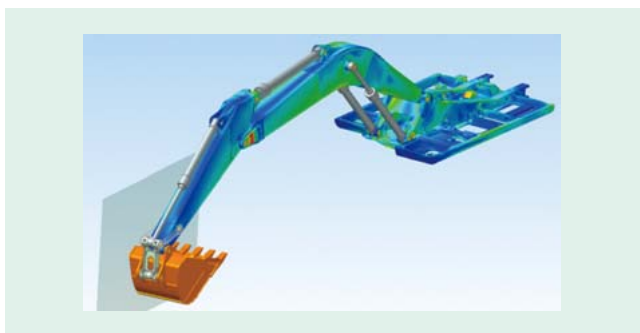


図4 | フロント構造物と旋回フレームの応力解析

フロント構造物と旋回フレームはピンを介して接触接合させることで、結合部付近の荷重伝達を詳細に表現することができる。

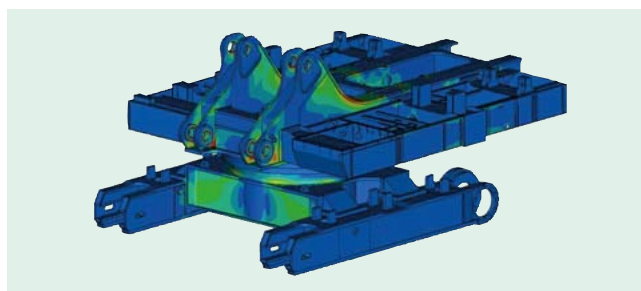


図5 | 旋回フレームと走行フレームの応力解析

旋回フレームと走行フレームはベアリングを介して接触接合させることで、掘削荷重の走行体フレームへの荷重伝達を詳細に表現することができる。

造物とフレームの応力解析を図4、図5に示す。

3.2 弾塑性解析による強度評価

ここでは塑性変形を伴う評価試験に対する事前評価手法について述べる。

主にキャブの安全規格ROPS (Roll-over Protective Structures: 転倒時保護構造) に対する事前検討である。機械運転室に対して側方荷重、前方荷重、垂直荷重を順に加えた場合、最終的にDLV (Deflection-limiting Volume: たわみ限界領域) に侵入しないことが条件である。キャブの各ピラーなどはプレス構造のため、変更になった場合の修正時間とコストのリスクは他部位に比べて高く、精度のよい事前評価が必要である。

材料定義としては降伏応力とその後の塑性線図を入力する必要がある。使用材料に関してはテストピースによる引っ張り試験を実施し、FEMの材料データベースを作成した。また、材料の破断の表現に関しては、要素単位で上限のひずみ量になった際には要素の剛性をなくす手法を用いている。この手法によって破断の可能性がある部位に関しては漏れなく抽出し、破断しないように補強を行う。また、塑性変形が進むにつれてのパネル間やピラーの自己接触が表現できるようにすべての部位に接触を設定している。

側方押しによるROPS解析結果を図6に示す。ひずみが集中し、限界を超えた部位には破断が生じることが表現で

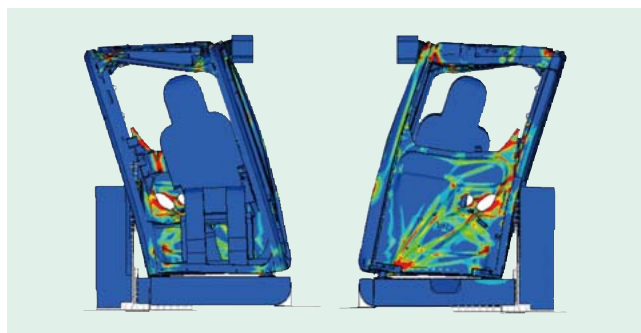


図6 | ROPS (側方) の弾塑性解析

弾塑性変形と破断を表現した準静的な非線形解析により、転倒時の運転室の安全設計を行っている。

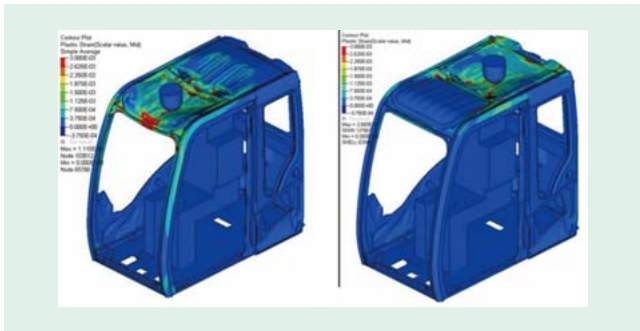


図7 | FOPS試験の弾塑性解析

弾塑性変形と破断を表現した動的陽解法により、落下物に対する運転室の安全設計を行っている。

きている。

また、塑性変形を伴う評価試験ではFOPS (Falling-object Protective Structures：落下物保護構造) に対する事前検討がある。FOPS試験においては、落下物の規定吸収エネルギーになる初速度を与えた鉄球を衝突直前の位置に設置し、これを初期条件とした動的陽解法による天井に当たる直前から衝突後の挙動解析により、天井の変形量を計算DLVとの干渉について事前評価している(図7参照)。

3.3 過渡応答解析による振動強度および疲労強度評価

建設機械は、稼働現場において掘削・積み込み・走行などを繰り返す中で過酷な振動・衝撃を受ける。近年では排出ガス規制に対応して後処理装置を搭載するためのサポート設置やエンジンカバーの大型化などにより、車体振動に対する強度設計の難易度が増している。これらを精度よく事前評価するためには、時間によって変化する入力振動に対して振動応答を計算する必要がある。動的な解析手法としては過渡応答解析と周波数応答解析があるが、これらを精度よく計算するためにはモデルが持つ固有振動数と固有モード、モード減衰比が実物を表現できている必要がある。これに関しては、後述する実験フェーズによる実験モダル解析によって計算モデルの精度を上げてきた。旋回体建屋カバーの強度評価モデルを図8に示す。

旋回体の実測加速度波形を入力条件とした過渡応答解析を行い、各部位に加わる振動加速度と応力履歴を計算する。実測加速度波形は、実車耐久試験パターン85秒間のフレーム振動加速度を入力している。さらにこの応力履歴から応力値の頻度分析を行い、疲労ダメージから寿命予測もできるようになっている。信頼性のばらつきを考慮に入れ、耐久時間内で破損する可能性がある部位について可視化(図9参照)・リスト化し、各部位において耐久試験前に破損の可能性がなくなるまでシミュレーション上で対策を行うことにしている。また、この手法に関しては過渡応答解析から寿命予測までを自動化しており、短時間で結果

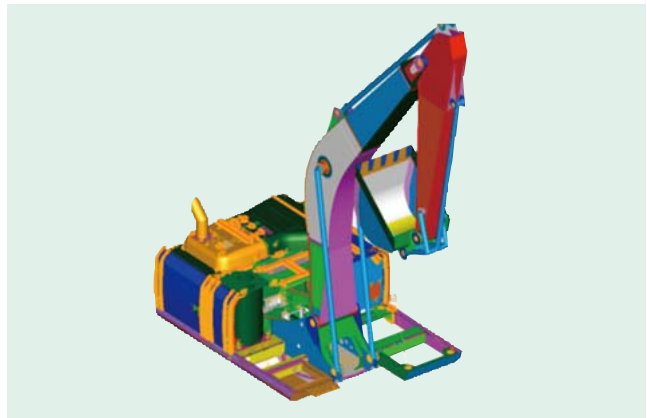


図8 | 建屋カバーの過渡応答・疲労解析モデル

車体振動を入力条件とした過渡応答解析によってカバー各部位の応力履歴を算出し、疲労ダメージ換算から寿命を予測している。



図9 | 建屋カバー疲労解析結果(破損予測部位)

疲労解析によって耐久時間内に破損が予測された部位と実際の耐久試験における破損部位の一致を確認した。

処理までできるようになっている。さらに、疲労ダメージを目標値とした最適化手法と連成させ、板厚・形状の検討期間の短縮にも努めている。

3.4 機構・構造連成解析による動的応力解析

複数の部品で構成される機構運動に対し、各部品に発生する応力予測を行う機構・構造連成解析について述べる。

この手法は、まだ計測したことがない動作や、新規部品の機構運動による応力評価などに利用されてきた。油圧ショベルの掘削作業時に車体構造物にかかる応力の解析事例を図10に示す。フロント構造物、旋回・走行フレーム

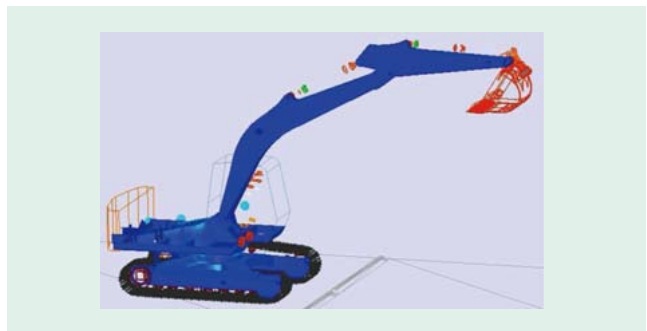


図10 | 掘削動作-機構構造連成解析

機構解析モデルに弾性体を組み込み掘削動作を動的に模擬することで、掘削時の各構造物の応力履歴を解析する。

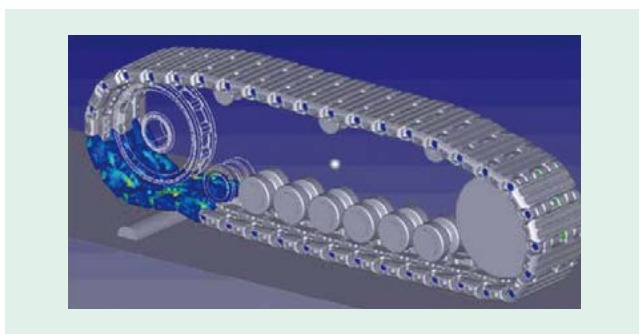


図11 履帯の突起乗り越え時の機構構造連成解析

履帯とローラー、スプロケット間に接触を定義し、時間とともに接触部位が変化する際の履帯の応力分布・応力変動を解析する。

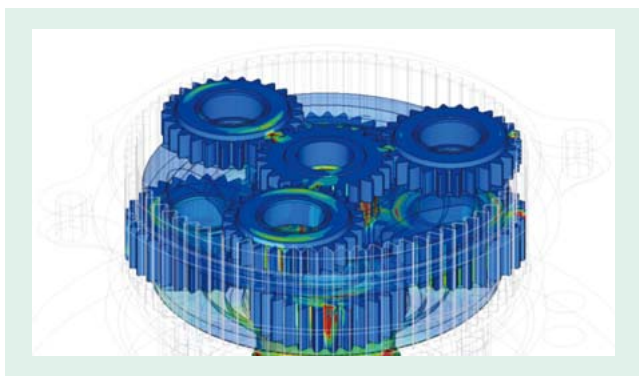


図12 遊星歯車の歯元応力および接触面圧解析

歯車の噛み合いによる歯元やシャフトの応力値を予測する。また、歯面の面圧分布を確認し、歯車のクラウニング寸法を設計する。

を弾性体とし、他走行体コンポーネントの剛体モデルと連結した機構・構造連成解析で動的な挙動に対する応力を予測している。

当モデルの弾性体の変形は、固有モードを重ね合わせることで全体の変形モードを表現するモード合成法を主流としてきた。しかし、この手法は局所的に接触する弾性体の局部変形を表現することは難しく、これを表現するためには全節点に自由度を持たせた直接積分法で解く必要がある。履帯の動的応力解析の事例を図11に示す。このように履帯はローラーやスプロケットおよび路面と接することにより、局部的に応力が発生する。さらに、シュを連結しているピンを介して隣接するシュに荷重が伝達されるためピンとボスの間にも接触を定義している。遊星ギア・シャフトを弾性体とした弾性体による機構解析を図12に示す。同様に時刻とともに変化する局所的な接触状態とそれによる歯元応力などを評価することができる。

3.5 熱流体解析による性能・信頼性評価

近年、油圧ショベルを代表とする建設機械の市場拡大に伴い、その使用用途や稼働環境は多岐にわたり、冷却性能面において厳しい環境下での使用が増加してきている。また、排出ガス規制対応による熱量増加に伴い、冷却性能の向上および最適化が必須となる。ラジエータなどの熱交換

器の設計については、構想設計段階で熱流体解析を利用したヒートバランス解析が行われている。ZX-5までの開発では、実験解析評価センタで開発した冷却解析ツールを用いて、想定される熱量の条件で、温度を満足する熱交換器コア寸法、冷却風量の組み合わせを熱流体解析で決定している。この場合は、エンジン室は簡略化した形状で、熱計算も熱交換器コアの放熱計算のみという制約があった。ZX-6の開発では、尿素SCR (Selective Catalytic Reduction) システムの採用により、エンジンルーム内を配索している尿素有水ホースの温度や機器センサー搭載に伴うエンジンルーム各部の雰囲気温度を事前に知る必要があった。そのため、以前から行っていた熱交換器の放熱計算に加え、エンジン・マフラ・油圧ポンプなどの発熱体に表面温度を、受熱側には熱伝導率をそれぞれ設定することで、エンジンルーム内の雰囲気温度をより正確に知ることができる熱害解析を行うようにした(図13、図14参照)。解析用の形状モデルとして、3D CADのフルモデルをそのまま使用できるため、開口部やフレーム、ブラケットなどの形状をそのまま詳細に再現することができる。ファン風量もファン

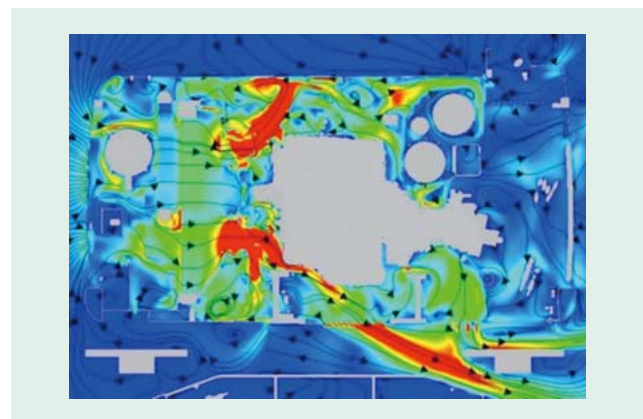


図13 エンジンルーム内の風速分布

冷却ファンによってエンジンルーム内に入る風量予測からエンジンルーム内の風速分布を予測する。

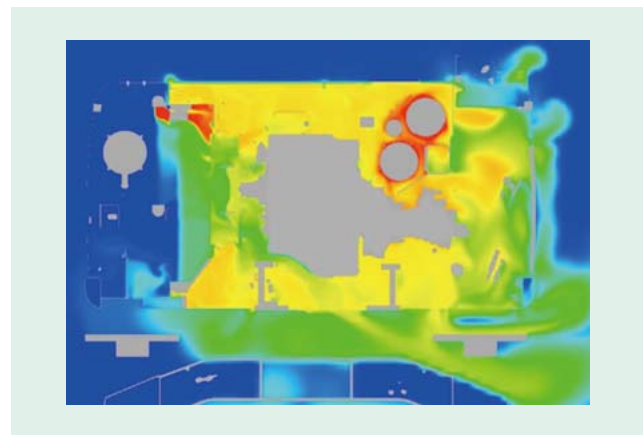


図14 エンジンルームの温度分布

風速計算に加えて発熱体の表面温度と熱伝導率の設定によりエンジンルーム内の雰囲気温度分布を解析し、効率的に温度を低下させるレイアウト検討を行う。

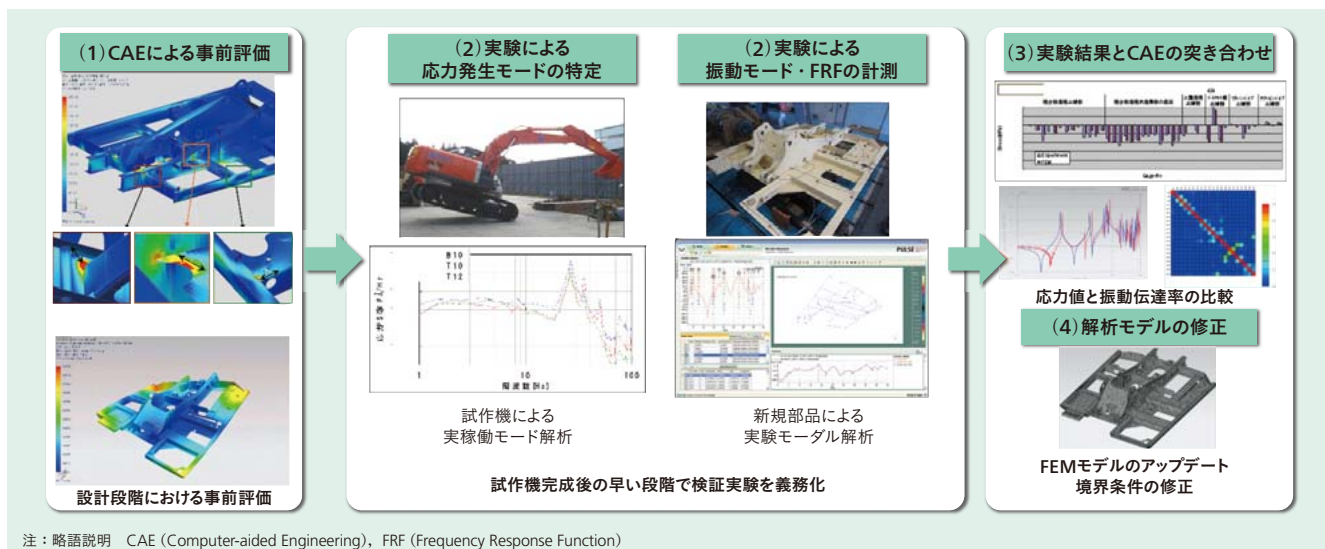


図15 | 製品開発における実験分析によるシミュレーション精度向上

設計段階におけるシミュレーションによる事前評価に対し、試作機完成後の早い段階で詳細な実験を行い、事前評価の精度を検証することを義務化した。同時に解析モデルを修正し、精度向上を常に行うこととしている。

の形状モデルを実際に回転させることで風量を与えているため、形状モデルと併せてエンジンルーム内の詳細な温度分布や風速分布の予測手法が確立できた。

4. 実験フェーズの義務化と解析精度の向上

ここでは、シミュレーション技術の向上につながる基本データ取得のための実験フェーズについて述べる。

前述したとおり、設計段階における事前評価は主に実験解析評価センタ内で行われているが、センタ内においても開発機種それぞれに対して担当者を作り、設計部門の各機種開発チームに合流し、設計の早い段階でシミュレーションが行える体制にしている。これにより、実験解析担当者も機種ごとにあるさまざまな課題を共有し、その課題に対して計画的に事前評価を行うことができるようになった。また、試作後の評価試験では事前に行った計算結果の応力集中部の主応力方向をひずみゲージで計測することを徹底している。ZX-6の開発からは、評価試験とは別に実験フェーズの計測期間を設け、試作機完成後の早い段階で応力、振動、変位、熱などを詳細に実験することを義務化した。これにより、高応力時の変形モード、振動数、振動伝達特性、温度分布などを把握し、事前評価における計算結果の精度確認および荷重条件・拘束条件の見直しを行う。試作評価での不具合発生時には、精度の高い計算条件でシミュレーションを再度行うことで、対策内容の完成度・精度の向上が図れる（図15参照）。過渡応答解析の精度向上のため、試作機の早い段階でハンマリングによる実験モーダル解析を行い、固有振動数と固有モードの精度確認と過渡応答解析に入力する減衰比を把握する。これにより、ZX-6開発においては対策期間および回数を大幅に削減す

ることができた。このように開発業務を行いながら必要に応じて新しい技術を導入し、解析精度を向上してきた。

5. おわりに

ここでは、日立建機におけるALD関連の概要を述べた。性能・品質・コストを並立した製品を市場に迅速に投入するには、今やシミュレーション活用は必須となっている。しかし、現実の開発はシミュレーションだけでは完結せず、必ず実験が伴い、補完し合って初めて活用できるものである。このような実験と解析が同居する組織は非常に珍しく、今後もこの長所を最大限に生かしてより多くの製品に適用していく所存である。

参考文献

- 1) 「設計者」から「設計業務」のためのCAEへ、機械設計, 53, 10, p. 34~37, 株式会社日刊工業新聞社 (2009.7)
- 2) 横山, 外:自動車設計を支える衝突安全シミュレーション技術, 自動車技術, 65, 1, p. 59~65 (2011)
- 3) 波頭, 外:振動・騒音設計を支えるシミュレーション技術, 自動車技術, 65, 1, p. 66~72 (2011)
- 4) 郡:自動車業界におけるシミュレーションの現状, 自動車技術, 67, 6, p. 47~55 (2013)
- 5) 内田:デジタル設計, 日本機械学会誌, 117, 1148, p. 56~57 (2014)

執筆者紹介



田村 和久
日立建機株式会社 研究本部 実験解析評価センタ 所属
現在、建設機械全般の開発事前評価に従事



星 暁生
日立建機株式会社 研究本部 実験解析評価センタ 所属
現在、建設機械全般の開発事前評価取りまとめ業務およびシミュレーション技術開発に従事
日本機械学会会員