

連成解析シミュレーションによる制御設計

Control System Design with Coupled Analysis Simulation

袖子田 志 保	技術開発本部総合開発センター制御システム開発部
鈴木 俊太郎	技術開発本部総合開発センター制御システム開発部 主査
安住 一郎	技術開発本部総合開発センターシステムエンジニアリング部 主査
笠 俊 司	技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 部長
齋 藤 俊 明	技術開発本部基盤技術研究所解析技術部

従来の装置開発では構造設計と制御システム設計が別々に行われていた。このため、振動をはじめとした相互作用による装置の特徴を事前に把握することが難しく、実機調整の長期化の要因となっていた。そこで今回、弾性部品をもつ精度の高いモデルを使用し、機構解析と制御システムのシミュレーションを同時に行う連成解析を試みた。連成解析によって、事前に装置の特徴を把握し、設計に対する改善検討および反映が可能となった。本稿では、連成解析の効果とスタッククレーンへの適用事例を紹介する。

Ordinary mechanical system development has been carried out separately for structural design and control system design. Under this approach, it had been difficult to predict the interaction characteristics of machinery, which result from vibration, etc. This had been the main factor that had required a long period of time to adjust machinery conditions at the installation site. To improve this situation we tried to estimate the precise behavior of the design system in which the structural elasticity is considered in the control system design. In this paper, we report the advantage of this coupled analysis where the structural design and the control system design spiral can be progressed on the desktop. An example of this analysis method applied to a stacker crane system is introduced.

1. 緒 言

近年、コストの低減が強く求められるなか、物流分野や製造分野をはじめとして全体最適の観点から見た設計の効率化を図る試みが多く行われている。製造分野において最近特に注目されているのがコンピュータ技術 (Computer Aided Engineering : CAE) による連成解析シミュレーションである。

従来、製造分野では装置開発における構造・機構設計と制御設計は別々に行われていた。このため、制御指令と機械の挙動、強度上や構造上の制約などについて相互の影響を考慮した装置全体の特徴を事前に把握することが難しく、試作回数の増加や実機調整の長期化などによってコストや工期が予定以上に掛かることがあり、装置開発作業の効率化が課題となっていた。

一方、当社でも物流システムをはじめとしたさまざまな分野に対して、設計パラメタの最適化や設計作業の効率化を図る技術の応用開発に取り組んできた。今回、装置開発において、より高品質の製品の提供と調整期間の短縮化を図るため、構造設計の基盤となる機構解析モデルと制御シ

ステムモデルを共有した解析シミュレーション技術 (以下、連成解析と呼ぶ) を構築し、構造設計および制御システム設計の連携を試みた。

本稿では、まず今回実施した連成解析を紹介し、次に制御設計に注目した連成解析の適用事例とその効果について報告する。

2. 連 成 解 析

一般に連成解析とは、複数の異なる領域の事象が相互に関連をもつような場合に、これらの相互作用を考慮した解析を行うことを指す。

今回構築した連成解析技術は装置設計作業への適用を目的としており、① 形状および強度を決定する構造設計 ② 機能を付加する機構設計 ③ 製品を動かすための制御設計、といった複数の設計が行われる装置設計において、これらの相互作用を考慮した解析が可能となる手法である。具体的にはこれまで各設計で対象をモデル化し、それぞれの設計の範囲内で現れる挙動のみを対象として解析を行っていたのに対し、今回は各モデルを統合し装置全体として現れる複合的な挙動 (負荷履歴や応力履歴、疲労被害な

ど)を扱うことにした。

これは、近年シミュレーションをはじめとした CAE 技術の進歩から、構成要素の相互作用に起因する問題を直接扱うことができるようになり、連成解析の実現が可能となったことによる。

3. 制御設計手法の概要

3.1 概要

従来の装置開発では、コンセプトに従った初期形状と基本運転条件（最大加速度、最大速度など）の情報を基に、構造解析/設計と制御解析/設計をそれぞれ独立に実施し、実機の製作に入る工程が一般的であった。第 1 図 - (a) に従来の装置開発工程を示す。

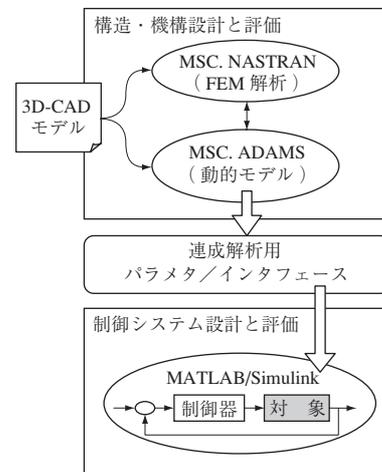
そこで、装置開発の効率化を図る試みとして、駆動系をもつ機器に対する構造設計、機構設計、制御設計を連携させることを目標とし、3D-CAD データを基に構造 - 機構 - 制御の相互作用を設計時に考慮できる連成解析技術を構築した。連成解析を用いた開発工程と従来の開発工程の異なる点として最初に挙げられるのが、設計の基となる情報である。従来では初期形状を基に構造解析と制御解析それぞれが独自の解析モデルを作成していたのに対し、連成解析技術では 3D-CAD モデルを基に構造解析と機構解析を行い、これによって得られた構造振動特性を基に機構 - 制御連成解析を行う。

また、従来では基本運転条件を基に構造解析を行っていたのに対し、連成解析技術では機構 - 制御連成解析結果（加速度履歴）を構造解析へ用いることができる。こ

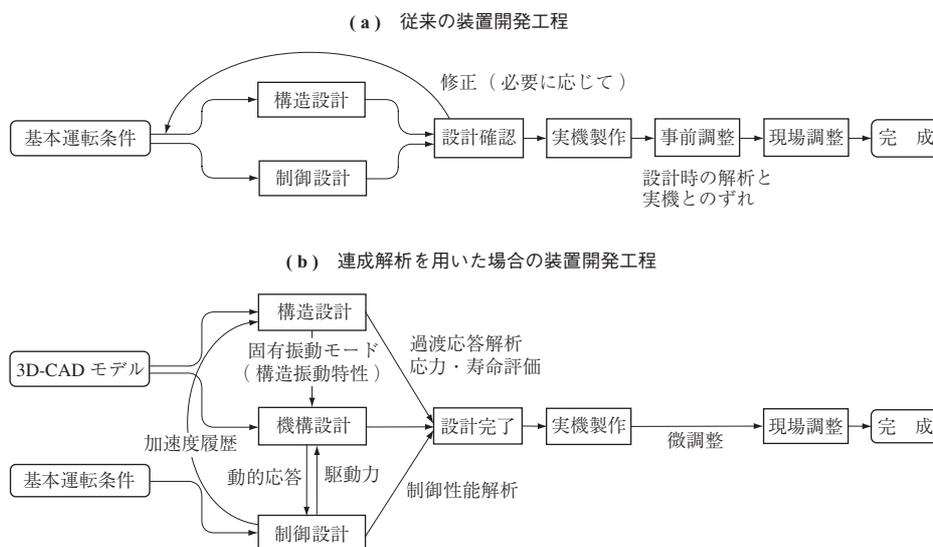
れらの関係によって構造、機構および制御の相互作用を同時に考慮し設計できるようになり、実機における調整期間の短縮化や後戻り工程作業の低減化が期待できる。第 1 図 - (b) に連成解析を用いた場合の装置開発工程を示す。

3.2 連成解析の構成

以下に、連成解析技術の構成と各部実施概要を紹介する。連成解析技術では 3D-CAD で作成した設計モデルに基づき、構造 - 機構 - 制御を同時並行して設計する。第 2 図に連成解析構成を示す。構造解析部分には MSC. NASTRAN（MSC. Software 社：アメリカ）、機構を含めた動解析部分には MSC. ADAMS（MSC. Software 社）、制御システムの設計と解析部分には MATLAB/Simulink（MathWorks 社：アメリカ）を用いた。



第 2 図 連成解析構成
Fig. 2 Overview of the coupled analysis



第 1 図 従来と連成解析を用いた場合の開発工程の比較
Fig. 1 Comparison of system development process between the coupled analysis type and the conventional type

(1) 構造解析部

制御対象の FEM モデルを用い固有値解析を実施し、弾性体部品として機構解析と連成可能となるように解析結果を変換する。

(2) 機構解析部

実物に付加される機構を追加した構造解析モデルを用い、構造解析と制御解析を連成する。

(3) 制御解析部

制御システムモデルに組み込んだ機構解析の応答用ブロックを介し、制御手法を検討する。

3.3 特 徴

(1) 解析精度

構造解析では、機構 - 制御の連成解析結果から得られる加速度履歴情報を用いるため、過渡応答解析が可能となり、発生する物理現象の解析を精度良く求めることができる。また、機構部分の非線形の動作を伝達関数として線形化することなく制御解析を行うことができるため、より精度良く実機の挙動を模擬することが可能となる。

(2) 寿命評価

実機を動作させた場合と同様の加速度履歴情報を用いるため、構造の応力と頻度が計算できるようになり、正確な寿命評価が可能となる。

4. 適用事例紹介

4.1 対 象

連成解析技術を用いた設計の対象として、スタッククレーンを選定した。第 3 図に連成解析対象モデルを示す。スタッククレーンは出庫要求された対象物を自動倉庫から取り出し、運搬、出庫する動作を繰り返す装置である。

比較的大型かつ柔軟構造物であるスタッククレーンは加速/減速に伴い振動が発生する。この振動の大きさは、構造上の振動特性と走行速度パターン（速度の時間履歴）に関係することから、スタッククレーンの設計開発時に留意すべき特徴として、振動特性・強度を決定する構造・機構設計と走行速度パターンを決定する制御設計とが密接に結びつくという点が挙げられる。

一般的にスタッククレーンには以下(1)から(3)に挙げる項目が仕様として求められるが、上述した振動特性がこれらの仕様に大きく関連をもつ。

(1) 入出庫時間が短いこと（高速性）。

(2) 繰り返し動作に強いこと（耐久性）。

(a) スタッククレーン



スタッククレーン

(b) スタッククレーンの 3D-CAD モデル



第 3 図 連成解析対象モデル

Fig. 3 Estimation model of the coupled analysis

(3) 導入・運用コストを抑える（経済性）。

たとえば、停止時の残留振動が大きければ振動が減衰するのを待つ必要があり、入出庫に時間が掛かることになるため、項目(1)への対処方法の検討が必要となる。また、振動の大きさによってはクレーン本体の一部に大きな応力が発生し、疲労による不具合を発生させる可能性もあることから、項目(2)の対処が必要である。しかし、高速走行と振動の低減を両立させるために強度を高めると設備が大規模化してコストが掛かるため、項目(3)が問題となる。このため、全体最適化を図ることによってコストを抑える必要がある。

4.2 スタッククレーンにおける連成解析の利点

4.1 節で示した問題を背景とし、スタッククレーンの設計に連成解析を適用する利点をまとめる。

(1) 設計の妥当性評価

従来、構造解析では厳密な過渡応答や疲労寿命評価ができなかったため、仕様検討において余裕を大きめにとる傾向があった。しかし、制御解析から得られる履歴情報を用いることで過渡応答解析が可能となるため、より適切な設計が可能となる。

(2) 問題点抽出と対象検討

スタッククレーンの場合、連成解析から得られる現象の一つが振動である。振動を抑える方法を、制御で抑制する方法と振動の起こりにくい構造にすることの両面から同時に検討することが可能となる。

(3) 調整期間の短縮化

制御設計においては、設計に用いたモデルどおりに動くことが前提であり、実機とモデルとの乖離が大きいほど現地調整に時間が掛かる。しかし、連成解析では精度の高い機構解析モデルによる設計が可能となるため、調整期間の短縮化が期待できる。

(4) 全体最適化

連成解析によって評価量として構造設計上での変位だけではなく、全体システムとしての応力および寿命も含めることができる。このため、例えば剛性が小さく揺れる量は大きい、残留振動や応力の発生が抑えられるような機構・制御設計も可能となるなど、設計の幅が広がり、さらなる軽量化やコストダウンの可能性がある。

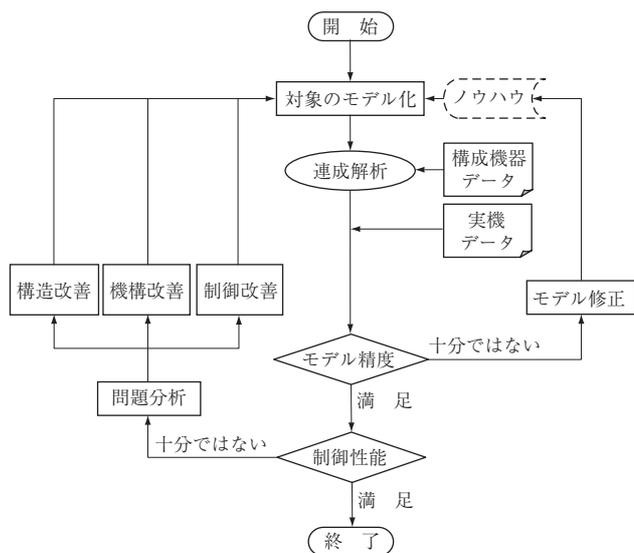
4.3 設計と評価の実施手順

連成解析によって可能となる技術と効果を確認することに焦点を絞り、制御による振動抑制方法の検討と寿命予測を実施した。

評価においては、実際のスタッカクレーンの運転データを入手し、ベンチマークとして用いた（以下、ベンチマークデータと呼ぶ）。第4図にスタッカクレーン開発工程のフローチャートを示し、実施手順を以下に示す。

(1) モデリング

ベンチマークの3D-CADデータおよび制御システム仕様を基に、構造、機構、制御システムにおけるモデリングを実施した。



第4図 スタッカクレーン開発工程のフローチャート
Fig. 4 Schematic diagram of stacker crane development

(2) モデル精度の確認

一般的にシミュレーション技術を用いる場合、シミュレーションモデルの信頼性が重要である。そこでまず、モデル精度の確認を行った。ベンチマークの入力情報を用い、作成したモデルでの連成解析を実施した。連成解析で得られたモデルの挙動とベンチマークデータの挙動を比較することで精度確認とした。

(3) 連成解析結果の活用

連成解析結果から、問題（ここでは振動）への対策を検討し、改善案を各設計へ反映して、再度連成解析を実施した。

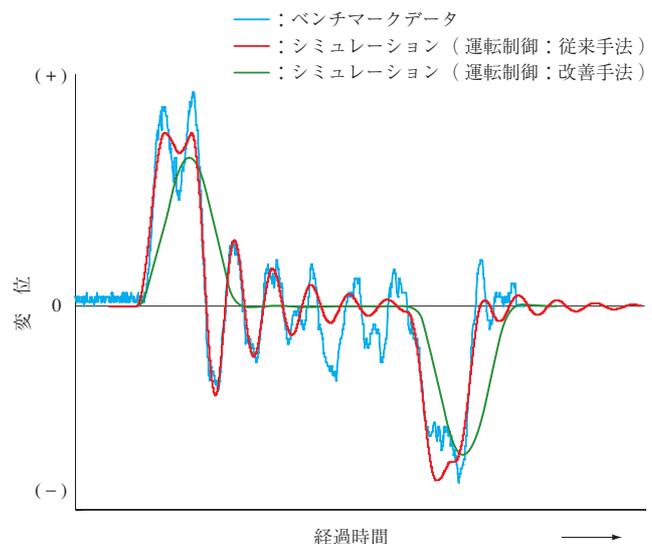
4.4 評価

4.4.1 振動抑制の検討と効果

スタッカクレーンの走行開始時に発生する振動の第1波と第2波（耐久性に関連する振動）、および停止時に発生する残留振動第1波（高速性に関連する振動）の大きさをベンチマークデータと連成解析による結果とで比較した。

連成解析においては、ベンチマークデータと同じ運転手法（以下、従来手法）で制御を行った場合と改善案を適用した運転手法（以下、改善手法）で制御を行った場合のシミュレーションを実施した。第5図にスタッカクレーン走行時の振動シミュレーションを示す。比較結果を第1表に示す。

ベンチマークデータと従来手法での運転制御による連成解析結果を比較したところ、振動の固有周期がほぼ一致す



第5図 スタッカクレーン走行時の振動シミュレーション
Fig. 5 Vibration simulation of stacker crane during travelling

第1表 連成解析による振動抑制検討の効果（相対比較）

Table 1 Improvement of vibration reduction with coupled analysis

動作状況と振動幅 比較項目	走行時		停止時
	第1波	第2波	第1波
ベンチマークデータ (運転制御：従来手法)	1	1	1
シミュレーション (運転制御：従来手法)	0.84	1.07	0.98
シミュレーション (運転制御：改善手法)	0.77	0.01	0.01

第2表 連成解析結果を用いた寿命予測（相対比較）

Table 2 Life span estimation with coupled analysis

シミュレーション条件 (運転制御手法)	寿命評価値
従来手法	1.44
改善手法	2.56

(注) 1. 値はベンチマークデータの寿命評価値を1とした場合の相対値を示す。
2. 値は大きいほど寿命が長いことを示す。

る結果が得られた。また、走行開始時の振動幅に16%の誤差があったが第2～5波は10%以下の誤差であり、全体的に良好な精度をもつことが確認できた。さらに、運転制御に対する正確な挙動を得ることができ、振動抑制に対する改善策の検討が可能となった。改善策の検討によって得られた新たな制御手法（改善手法）を適用することで、加速完了時と停止時の振動を抑制できることを連成解析によって確認した。

4.4.2 寿命予測

ベンチマークの予測寿命を算出した。算出には、繰返し荷重を受ける構造物の疲労損傷および寿命評価に広く用いられているレインフロー（雨だれ）法を採用した。レインフロー法は振動（応力）の時系列変化において、疲労損傷に影響する応力波形をカウントする方法であり、この結果を用いて、累積損傷度および予測寿命を算出している。算出結果を第2表に示す。

実際の制御ロジックと組み合わせることで実機と同じ運

転パターンを繰り返した場合の寿命評価が可能となった。ただし、走行開始時の振動幅の誤差の影響が大きく、連成解析で得られた寿命はベンチマークデータに比べて44%の誤差があった。精度の高い寿命予測のためには、さらなるモデルの精ち化が必要である。

また、制御手法の違いが寿命に与える影響を実機試験を行う前に評価することが可能となった。同じシミュレーションモデルで比較すると、制御手法を改善することで78%長寿命化が図れるという結果が得られた。

5. 結 言

スタッククレーンを対象とし連成解析による制御設計検討と実際のデータを用いた比較評価を行った。

- (1) 運転制御に対する正確な挙動を得ることで、振動抑制の対策案が検討可能となった。
- (2) 運転制御まで含めたシミュレーションを実施することで、精度の高い寿命予測が可能となった。
- (3) 構造 - 機構 - 制御の連成解析技術の土台ができた。

今回は制御に注目した改善検討を実施したが、次のステップとして構造および機構設計に対し連成解析結果を反映させ、連成解析上で全体最適のサイクルを回すことによってさらなる設計技術の向上を図る。また、実際のスタッククレーンのデータをベンチマークとして用いたが、今後、設計段階（実物がない段階）での連成解析技術の適用を図り、検討範囲の拡大を目指す。

参 考 文 献

- (1) 高田宏治，大榎一史，本間和正：制御系・機構系ソフトの連成解析による車両発進時の挙動解析手法の開発 計算工学講演会論文集 Vol. 7 2002年5月