

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03939

研究課題名（和文）並列演算による大規模な非線形系の振動解析法の開発

研究課題名（英文）Development of large-sized nonlinear vibration analysis, based on parallel computing

研究代表者

川口 正隆（KAWAGUCHI, Masataka）

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：90876799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：自動車等の量産製品では開発期間短縮やコスト削減の為に、実規模の大規模振動解析が多用されており、解析時間の大幅な増加を抑制する為に、自動多段部分構造モード合成ソフト（AMLS）が汎用構造解析コードNASTRANに対して提供されている。しかし、線形構造物に限定され、ガタ等の非線形要素を含む複雑な構造系への展開ができない問題がある。

本研究では多段モード合成による非線形な振動解析方法を提案すると共に、小規模サンプルの実験により解析精度を実証した。更に、上記のAMLSを線形構造系に適用し、非線形要素で結合した解析プロセスを試作し、解析時間の大幅短縮を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車等の量産製品では開発期間短縮やコスト削減の為に、試作機を用いた性能や耐久性の検証実験を削減する必要があるが、実現するには従来技術的な困難性から回避されてきた非線形要素を含む振動解析法と解析環境の整備が必要である。

非線形な振動解析が一般的になれば、従来は実験経験的に定められてきた設計基準等の現象解明が進み、製品性能や耐久性向上に必要な設計改善が設計段階で可能になる。

本研究では、第一段階として市販の多段モード合成ソフト（AMLS）を利用した効率的（解析自由度、解析時間）な非線形振動解析を試行し、解析時間の大幅短縮を実証した。これにより、製品適用への環境整備を実施した。

研究成果の概要（英文）：Large-scale vibration analysis using product-scale finite element models is often used as an alternative to experiments for improving the efficiency of mechanical product development, however the use of large-scaled nonlinear models using direct methods require enormous analysis time. As a solution to this problem, Automated Multi-Level Substructuring (AMLS) has been provided for general-purpose structural analysis codes. But multi-level substructuring method is limited to linear structures and cannot be applied to complex structural systems which include nonlinear elements. Solving large-scale nonlinear equations is not realistic. Therefore, it is not widely applied and many problems remain in product development. In this study, we applied multi-level substructuring to a structural sample with more than 1,000,000 degrees of freedom and performed nonlinear transient response analysis, and found that the analysis time was significantly reduced without degrading analytical accuracy.

研究分野：振動工学，振動解析

キーワード：多段部分構造モード合成 並列演算 モード解析 非線形振動解析 ガタ構造物 解析効率化 解析自由度

1. 研究開始当初の背景

自動車等の量産製品では開発期間短縮やコスト削減の為に、実規模の大規模振動解析が多用されており、解析時間の大幅な増加を抑制する為に、自動多段部分構造モード合成ソフト(AMLS)が汎用構造解析コード NASTRAN に対して提供されている。しかし、線形構造物に限定され、ガタ等の非線形要素を含む複雑な構造系への展開ができない問題がある。

一方、大規模解析では、実機特有のガタや粘弾性体等の非線形要素を含んだ過渡振動解析のニーズも強いが、膨大な解析時間を要し現実的でないため、製品開発では普及していないため、設計段階で十分な技術検討ができず、試作機を使った検証実験に頼るしかなかった。

2. 研究の目的

大規模解析な非線形要素を含んだ振動解析を製品開発で実現する為に、上記の多段部分構造モード合成ソフト(AMLS)を解析モデルの複数の線形構造物に適用し、その間を非線形要素で結合する解析プロセスを NASTRAN 上で実現できれば、大幅な解析時間の短縮が可能になる。それにより、試作機による実験を最小限に絞ることができる技術検討が設計段階で可能になるので、製品の設計品質が向上すると共に、開発期間短縮とコスト低減を実現できる。

本研究では、技術的な可能性を実証する為の解析理論及び精度検討を確認すると共に、比較的大規模な解析サンプルを対象に解析プロセスを開発し、解析時間の短縮を果たすことを目的とした。

3. 研究の方法

各種の非線形要素の中で、建設機械や産業機械等の構造物の接合によく用いられるラッチやヒンジ等のコネクタに存在するガタを有する板金構造物(ドア、カバー、サポート)を対象に、

- ・ 構造物を多数の部分構造に分割、拘束モード法により解析自由度の削減
- ・ 各部分構造を境界の外点で結合することにより、全体構造への組上げ
- ・ 構造物のガタ部に不感帯を有する非線形の接触ばねの設定
- ・ 数値演算コード MATLAB/SIMULINK を用いた非線形な過渡応答解析の実行

を実施した。併せて、上記の構造系を対象に供試体を作製し、小型水平振動台を用いて、ガタが有る場合と無い場合の振動実験を実施し、振動応答を計測することにより、解析精度について、定量評価を行った。

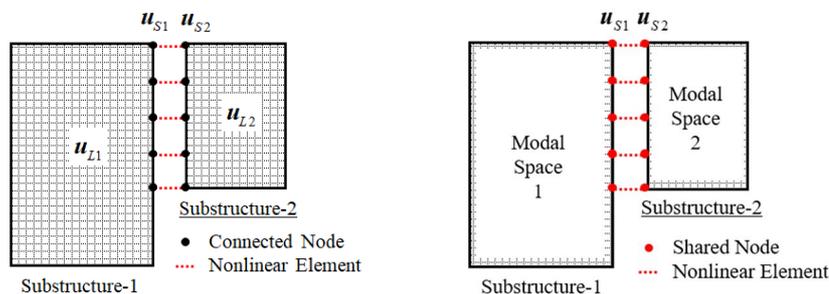
また、製品適用を推進する為に、NASTRAN 上で稼働する AMLS を用いた非線形振動解析プロセス(AMLS-NL)を作成し、板金構造物(約 1500 節点、約 23000 節点)、トラック後部サンプル構造(約 35 万節点)に適用し、従来法(SOL129)と解析精度と解析時間について調査した。

4. 研究成果

(1) ガタを有する小規模な板金構造物への適用及び解析精度

図 1 に本研究で提案する解析方法の概要を示す。現在、非線形の過渡振動解析を実行する為には、同図(a)のように構造物を詳細な有限要素モデルでモデル化すると共に、構造物を非線形要素(例えば、ガタ)で結合する必要がある。通常、構造物は詳細なメッシュでモデル化されて、解析自由度が非常に大きい為、運動方程式を逐次積分法で解くには膨大な解析時間を要する。しかし、同図(b)のように線形の構造構造を多数の部分構造に分割して、並列計算機で固有値解析し、段階的にモード合成することにより、解析自由度を大幅に削減することが可能になる(90%以上削減)。

第一段階として、図 2 に示す小型の板金構造物に適用し、解析理論を実証すると共に、実際に供試体を作製し、図 3 のように水平振動台を用いて、振動実験を実施した。板金構造物はサポートを対象に、図 4 のように部分構造を組み上げて、元の構造とほぼ同等の解析モデルを合成した。



(a) 従来法(SOL129)

(b) 提案法

図 1 多段モード合成による非線形振動解析のイメージ

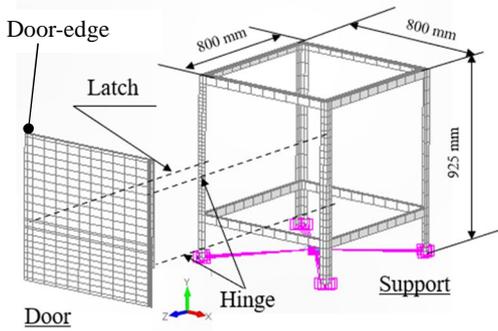


図2 板金構造物の解析モデル図

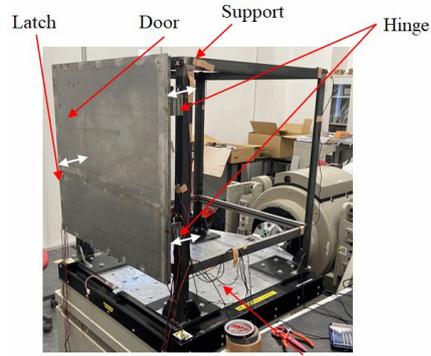


図3 板金構造物の振動実験状況

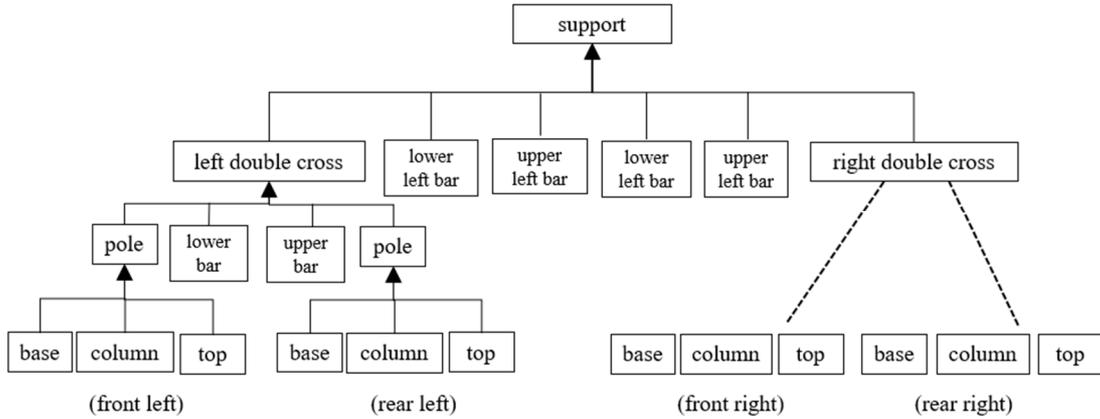
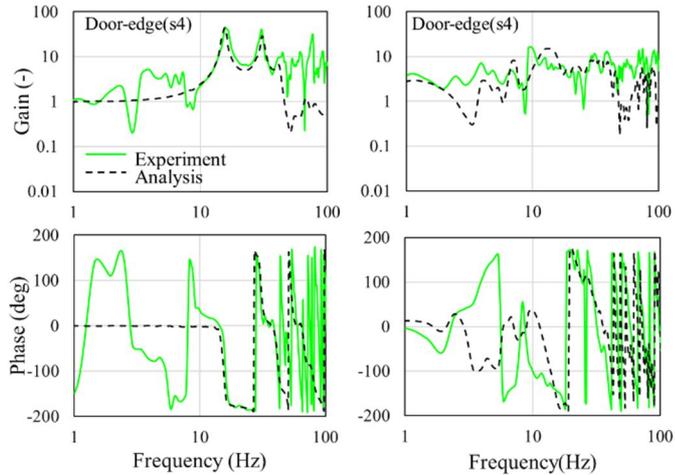


図4 サポートの部分構造ツリー

図2のドア端の面外方向の加速度スペクトルを図5に示す。同図(a)のようにガタが無いと、解析は20Hz以上の主要な周波数応答を近似できている。一方、同図(b)のようにガタ(±0.5mm)があると、主要な振動応答は消失し、大きな減衰が付加されているが、解析は実測を大概近似できていることが判る。

なお、元の解析モデルの解析自由度は約8500であったが、モード合成により約1400に低減できたので、約84%の低減を実現した。



(a) ガタ無し

(b) ガタ有り

図5 加速度スペクトルに対するガタの影響

(2) ガタを有する中規模な板金構造物への適用

図6にサポートと4枚のドアからなる中規模な板金構造物の解析モデルを示す。剛な振動台上に幅1600mm、奥行1600mm、高さ925mmの軟鋼のサポートの下面を剛結し、ドアをラッチと上下のヒンジを介して設置した。サポートは9本のpoleと横及び縦方向に各12本のbarで構成されるが、多くの部分構造に分割し、段階的にモード合成を行って作成した。そして、サポートとドアの間には小規模モデルと同様に、ラッチやヒンジでサポートとドアを結合し、振動台を加振することにより、振動解析を実施した。

なお、モード合成は各部分構造の質量及び剛性行列をNASTRANから取り出して、MATLAB上で多段モード合成を適用した。この処理には部分構造の名称、外点及び内点の節点番号等の情報から、図4のような部分構造ツリーの合成手順を入力することにより合成できるプログラムを作成して実施した。

図7には、ラッチと上側のヒンジでの相対変位、ドア端部の変位を示すが、MATLABによる解析はNASTRANで得られたガタ部での往復運動に伴う接触現象等を良く近似できており、定性的に現象を解析できていると思われる。また、元の解析自由度は約90,000であったが、モード合成により約5,800に削減されたので、約94%の削減を実現した。

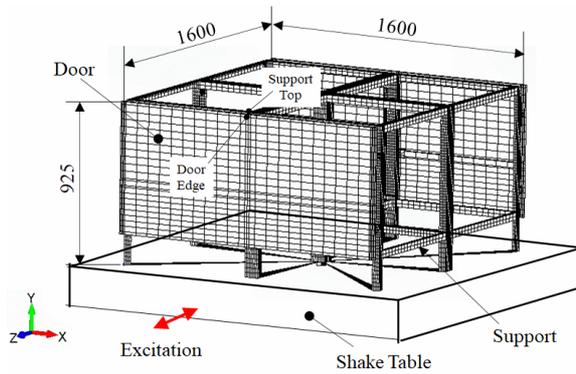
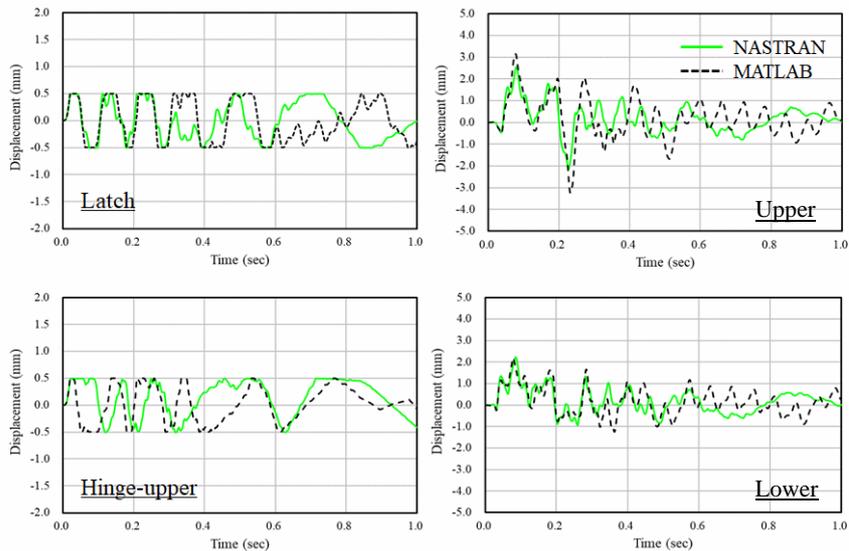


図6 中規模な板金構造物の解析モデル



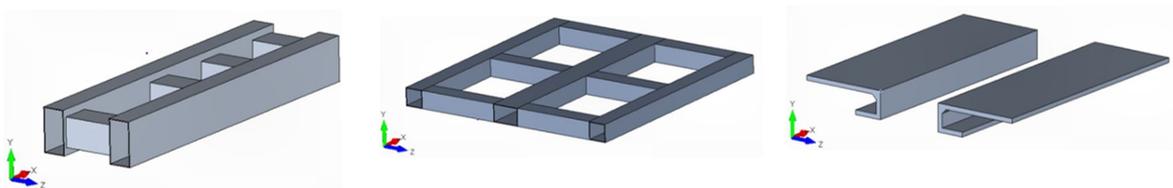
(a) ガタ部相対変位

(b) ドア端部変位

図7 板金構造物の主要部の解析結果

(3) ガタを有する大規模な板金構造物への適用

前節の解析モデルよりもさらに解析自由度が大きな解析モデルでの適用性を確認するために、トラック後部を模した大規模モデルを作成した。大規模モデルは図8に示す主フレーム、固定台、連結台で構成されており、固定台上にサポートと側面にドア4枚、上面及び前後面にカバーが設置されている。図9に示すように、主要寸法は高さ2,300 mm、幅2,400 mm、全長4,500 mmの約35万節点の解析モデルである。フレーム台、連結台、固定台およびフレーム構造体はそれぞれ剛結合し、図9のフレーム台前方A点でZ並進方向を除く並進方向および回転方向を拘束した。この大規模構造サンプルを解析するために、NASTRAN用の解析プロセス(AMLS-NL)を作成し、通常のNASTRAN(SOL129)での過渡応答解析とAMLS-NLによる過渡応答解析を実施した。



(a) 主フレーム

(b) 固定台

(c) 連結台

図8 大規模な板金構造サンプルの主要部品

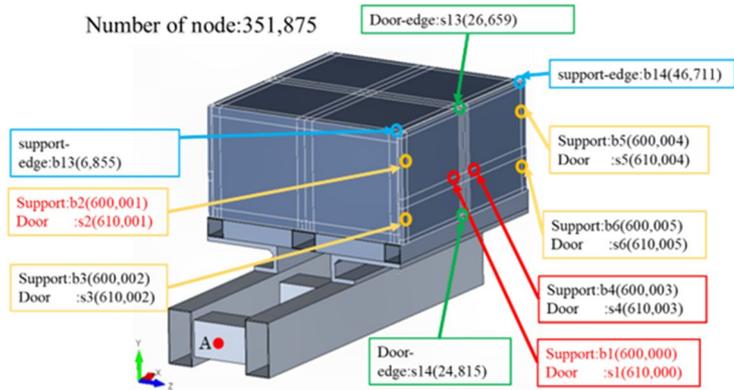
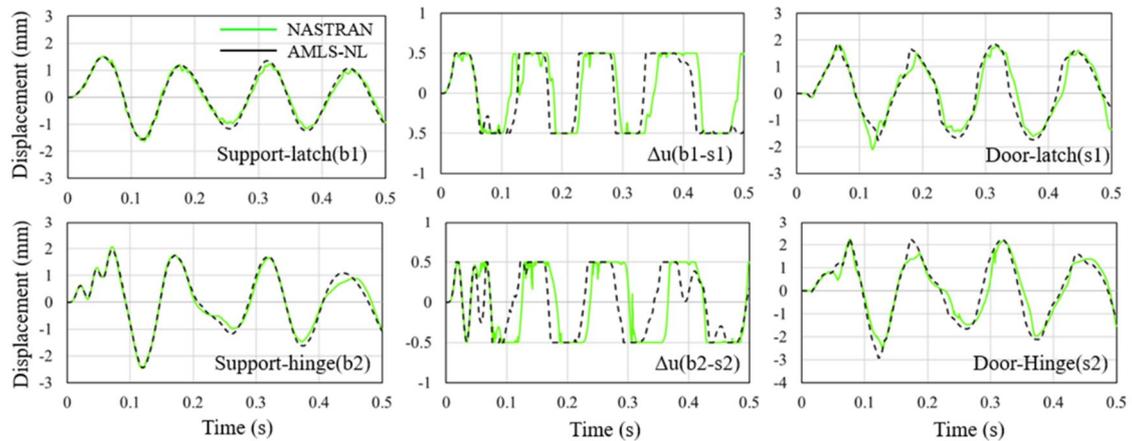


図9 大規模な板金構造物の解析モデル

図9に示すフレーム構造体内部のサポート（b1，b2）およびドア（s1，s2），観測点での変位の非線形過渡応答解析結果と相対変位（ u ）を図10に示す．緑線で示す結果が従来の解析法（SOL129）を用いた結果である．また黒線で示す結果がAMLS-NLを用いた結果である．いずれの箇所もAMLS-NLと直接法は良好な対応を示しており，妥当と考えられる．

また，同一の並列計算機を用いて実際に多段モード合成法を適用した結果，従来法では191,560 sを要したものが，解析プロセスでは47,472 sとなり，約75%の解析時間の削減が実現した．



(a) サポート変位

(b) ガタ部相対変位

(c) ドア変位

図10 多段モード合成による解析プロセスの大規模モデルへの適用結果

<引用文献>

- (1) 川口正隆，坂手洗希，田中和人，渡辺公貴，多段モード合成法によるガタ構造系の振動解析に関する基礎検討，D&D2021，日本機械学会，No.337，オンライン(2021)．
- (2) 川口正隆，岩波 徹，坂手洗希，上田至朗，Mladen CHARGIN，田中和人，渡辺公貴，ガタを有する大規模な非線形構造系の振動解析に関する基礎検討，D&D2023，日本機械学会，No.336，名古屋(2023)．
- (3) M. Kawaguchi, K. Sakate, J. Ueda, M. Chargin, K. Tanaka, K. Watanabe and T. Katayama, Study on nonlinear vibration analysis for large-scale structural model with gap, Annual Congress of International Institute of Acoustics and Vibration (ICSV29), Prague, Czech(2023)．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川口 正隆;坂手 洸希;谷ノ上 樹生;上田 至朗;Mladen CHARGIN;田中 和人;渡辺 公貴
2. 発表標題 多段モード合成法による大規模なガタ構造系の非線形振動解析
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口正隆, 岩波 徹, 坂手洸希, 田中和人, 渡辺公貴
2. 発表標題 ガタを有する大規模な非線形構造系の振動解析に関する基礎検討
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masataka Kawaguchi, Koki Sakate, Jiro Ueda, Mladen Chargin, Kazuto Tanaka, Kimitaka Watanabe, Tsutao Katayama
2. 発表標題 STUDY ON NONLINEAR VIBRATION ANALYSIS FOR LARGE-SCALE STRUCTURAL MODEL WITH GAP
3. 学会等名 The 29th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川口正隆, 三浦孝介, 中島健策, 田中和人, 渡辺公貴
2. 発表標題 ガタ系構造物を有する物流車両の非線形振動解析に関する基礎検討
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------