

車両運動解析手法の開発

Development of Kinematical Analysis Method for Vehicle

小池 正浩
Masahiro Koike
下田 三四郎
Sanshirou Shimoda
渋谷 俊英
Toshihide Shibuya
三輪 博史
Hirofumi Miwa

鉱山などの土木工事で使用されるダンプトラックは走行中に様々な動的負荷を受ける。ダンプトラックの主要なフレームの強度は、実機負荷計測から求めた動的な負荷を静的な荷重に置き換え静的応力解析を実施し予測してきた。

しかし、開発機種が新規構造を採用した場合は主要フレームにとってクリティカルとなる条件を開発段階で精度よく決めることは難しい。最近開発されたアーティキュレートダンプトラックでは走行時におけるフレームに発生する応力を設計段階で精度良く予測する必要がある。そこで、運動解析ソフトウェアADAMSと有限要素法ソフトウェアNASTRANを利用してフレームの弾性特性を運動解析モデルに取り込み、車両走行時のフレーム応力を計算する手法を開発し、アーティキュレートダンプトラックのリアフレームに適用した。その結果、この手法により走行時のフレーム応力を計算できることを確認した。

Dump trucks used for civil engineering work and mine, etc. receive various dynamic loads during travel. The strength of main frames of dump truck has been predicted based on static stress analysis where dynamic loads obtained by measurement with actual machines are replaced with static loads.

However, when a developed model employs a new structure, it is difficult to precisely determine the conditions that are critical for main frames on development stage. For the articulated dump truck that was developed recently, it was required to precisely predict, on design stage, the stresses that act on the frames during travel. Therefore, we introduced elastic characteristic of main frame into kinematical analysis models by using kinematical analysis software ADAMS and finite element method software NASTRAN and developed the method to calculate frame stress that occurs during travel, which was applied to the rear frame of the articulated dump truck. As a result, it was confirmed that frame stress during travel can be calculated correctly with this method.

Key Words: CAE, Kinematical Analysis, ADAMS, NASTRAN, Articulated Dump Truck, HM

1. はじめに

鉱山などの大規模土木工事に利用されている大型ダンプトラックは走行中に路面から様々な負荷を受ける。通常、路面から受ける負荷は、タイヤ、サスペンションを経由してフレームなどの車体へと伝達される。また、土砂などを積み込んだボディなどの慣性力も作用する。従来のダンプトラックの設計では、FEM解析ソフトウェアNASTRANを用いた静的応力解析などにより、設計段階の品質確認を実施している。静的応力解析における荷重・境界条件は既存機種の実機負荷計測データを元に決めている。しかし、既存機種と異なる新構造を取り入れた開発機種の場合はフレームにとってクリティカルな条件を特定することが難し

い。この課題の解決のため、従来から運動解析ソフトウェアADAMSを利用した車両走行解析から動的負荷を求めることに取り組んでいる。車両走行解析はフレーム、ボディ、タイヤ、サスペンションなどを剛体としたモデルで行うことが多いが、フレームにかかる負荷を精度よく求めるためフレームを弾性体とした解析にも取り組んでいる¹⁾。今回有限要素法ソフトウェアNASTRANと運動解析ソフトウェアADAMSの機能を用いて、走行時のフレーム応力を比較的手軽に計算できる手法を開発した。そして開発機種のアーティキュレートダンプトラックのリアフレームへ適用し、実測との比較検証を行ない手法の有効性を確認した。

2. 従来手法と問題点

2.1 境界条件設定の問題

設計段階におけるフレーム応力計算における荷重・拘束条件は、既存機種の実車負荷・応力測定データから決定する方法と剛体モデルによる車両運動解析から決定する方法がある。

前者の方法の場合、開発機種と既存機種におけるフレームの高応力発生条件は必ずしも一致しない。特に開発機種が新規構造の場合には既存機種の負荷データから推定しにくい。後者の方法の場合、フレームに加わる荷重は計算できるが、フレーム各部の応力に対してどのような条件がクリティカルであるか特定できない。

2.2 計算手順の問題

従来の弾性体を取り入れた解析の手順を図1に示す。この図からわかるように利用するソフトウェアが多く、その手順・作業が煩雑である。

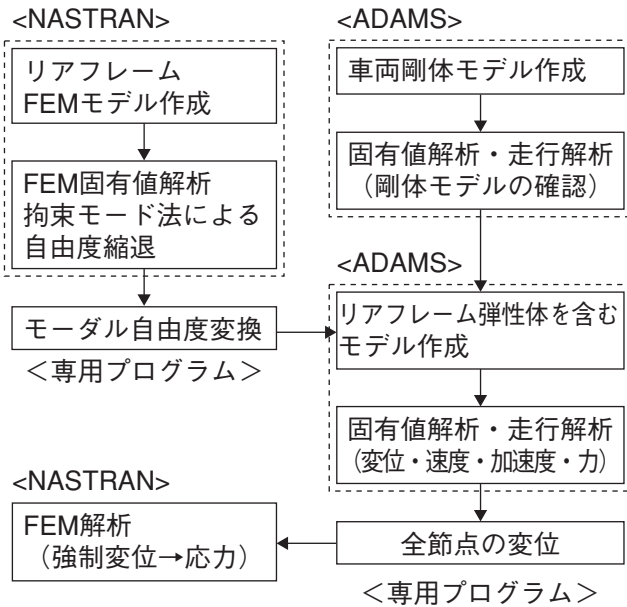


図1 従来の解析手順

3. 本件の手法

図2に今回開発した手法の手順を示す。NASTRANとADAMSのみで一連の処理を簡潔な手順で実施できる。

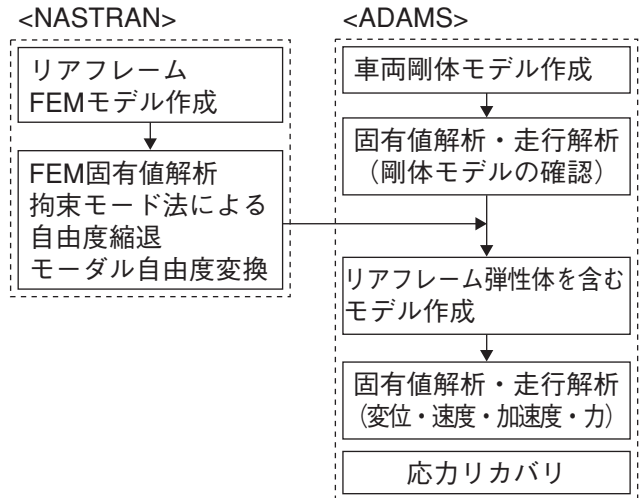


図2 今回の解析手順

3.1 FEM固有値解析

ADAMSに取り組むことができるFEMモデルの弾性特性はモーダル自由度であらわされた特性のみである。そこでNASTRANの拘束モード法による固有値解析を実施し、FEMモデルの自由度(物理自由度)をモーダル自由度に縮約する。拘束モード法ではFEMモデルの境界領域と内部領域に区分し、境界内部の物理自由度を境界領域のモーダル自由度に置き換える。具体的にはADAMS剛体モデルの結合点をNASTRANスーパーエレメント解析の外点とし、モーダル自由度(一般化自由度)の数、あるいは周波数範囲を指定して固有値解析を実施する。これによりFEMモデルの膨大な物理自由度は外点の物理自由度とモーダル自由度に縮約される。

3.2 モーダル自由度変換

物理自由度とモーダル自由度が混在する自由度にもう一度固有値解析を実施し、全自由度をモーダル自由度に変換する。NASTRANの最新バージョンでは3.1および3.2項の処理をNASTRANの中で同時に実施できる。

3.3 弾性特性を含む車両走行解析

ADAMSの剛体モデルにモーダル自由度であらわされたフレームの弾性特性を取り込み、走行条件や計算条件を設定し走行解析を実施する。この計算の中では、フレームはモードごとの時系列モーダル変位、モーダル速度、モーダル加速度およびモーダル応力が計算される。それを下記の式に基づき時系列の物理データに変換する。

$$U = \sum_{i=1}^M \Phi_i q_i \quad (\text{式1})$$

U : 変位(時系列)
M : 取り込むモード数
Φ : モーダル変位
q : モーダル座標

$$s = \sum_{i=1}^M \Phi_{\sigma i} q_i \quad (\text{式2})$$

σ : 応力(時系列)
M : 取り込むモード数
Φσ : モーダル応力
q : モーダル座標

4. 実車への適用事例
(アーティキュレートダンプトラックへの適用)

図3は最近開発されたアーティキュレートダンプトラックである。本解析では、固有振動数が比較的低くその弾性特性が無視できない主要構造物のうち、リアフレームを対象として実機検証を実施した。



図3 アーティキュレートダンプトラック

4.1 計算モデル

(1) リアフレームの弾性体モデル

NASTRAN 固有値解析モデルを図4に示す。

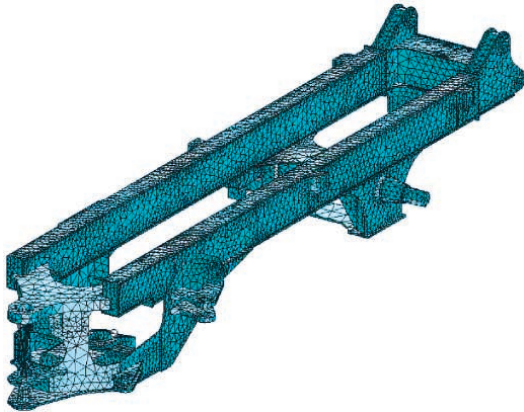


図4 リアフレームNASTRANモデル

フロントフレームとの取り付けヒンジやサスペンション取り付け部などADAMS剛体モデルの結合点となる20数か所を外点とし、拘束モード法により固有値解析を実施した。FEMモデルにおける自由度は約134000、縮退後の自由度は、物理自由度とモーダル自由度を合わせて164自由度である。更にADAMSに取り込むために物理自由度を含む全自由度をモーダル自由度に変換した。

その代表的なモードを図5、図6に示す。



図5 固有モード1



図6 固有モード2

(2) ADAMS 弾性体モデル

図7にADAMS弾性体モデルを示す。リアフレームを弾性体、それ以外のフロントフレーム、ボディ、タイヤ、サスペンション、イコライザバーなど38部品を剛体としている。剛体間をジョイントやバネで結合した。タイヤモデルは突起乗り越え走行条件では等価平面法を利用した2次元タイヤモデル、急旋回走行条件ではFIALAの3次元タイヤモデルを使った。

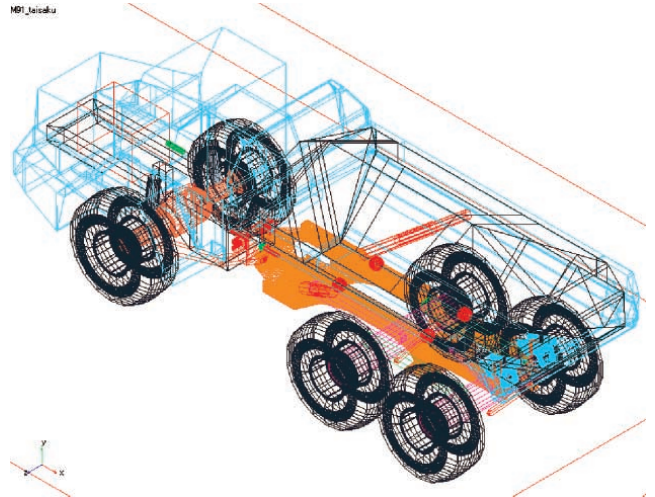


図7 ADAMSモデル

4.2 解析条件

実機の走行試験条件の中の3種の走行モードについて計算を実施した。なお、路面は固い土路面であり車両は積荷条件である。

(1) 両輪突起乗り越え走行

定常速度(約5.6km/h)で左右タイヤが同時に突起を乗り越える。(図8)

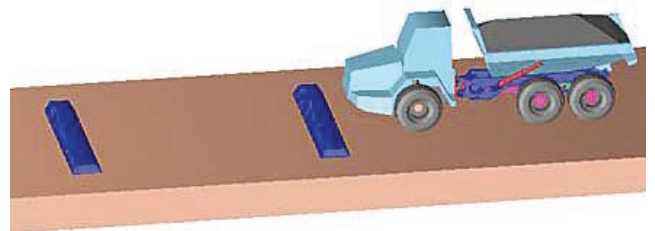


図8 両輪乗り越え条件

(2) 千鳥突起乗り越え走行

定常速度(約5.6km/h)で左右タイヤが交互に突起を乗り越える。(図9)

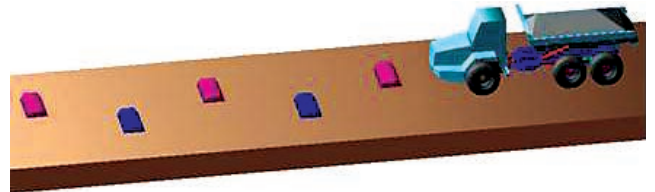


図9 千鳥乗り越え条件

(3) 急旋回走行

定常速度(約15km/h)で走行後、最大ステアリング速度で急旋回操作を行う。(図10)

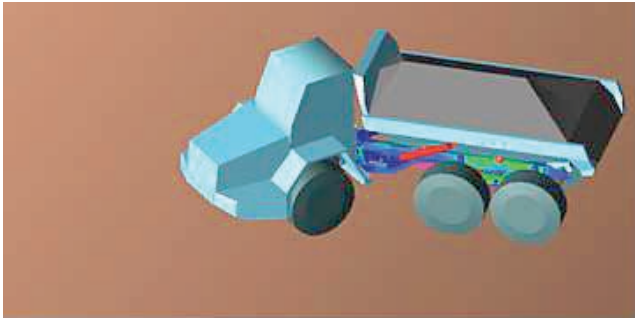


図10 急旋回条件

4.3 実測との比較検証点

比較的高い応力の発生が予測され、かつフレームの変形モードを把握できる左右フレームの前後部4点を評価点とした。(図11)

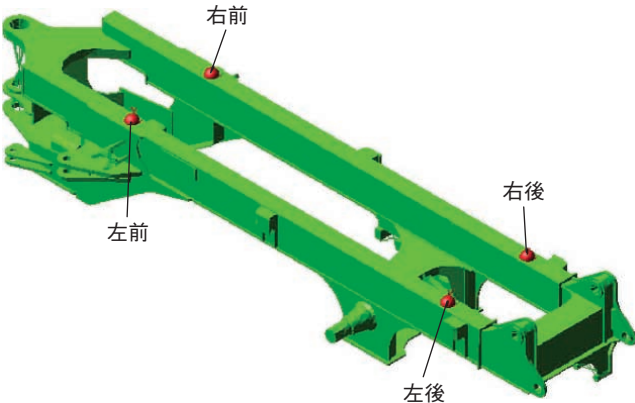


図11 応力評価点

4.4 実測結果との検証

(1) 両輪突起乗り越え走行

図12に右前評価点、図13に右後評価点の計算と実測との比較結果を示す。右前評価点については応力レベル、変動周期とも良く一致している。中輪が突起を乗り越え落下時に比較的高い応力が発生している。

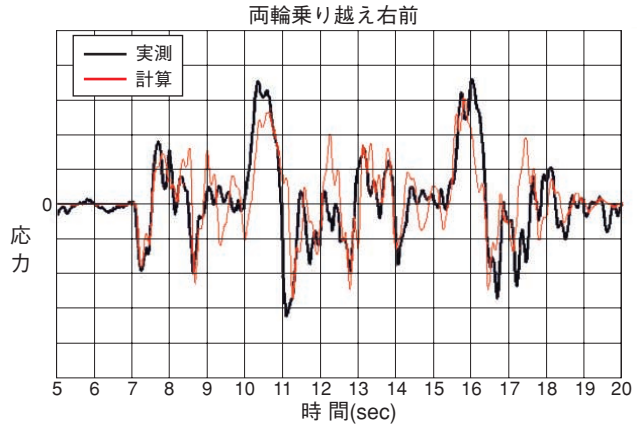


図12 両輪乗り越え右前評価点応力

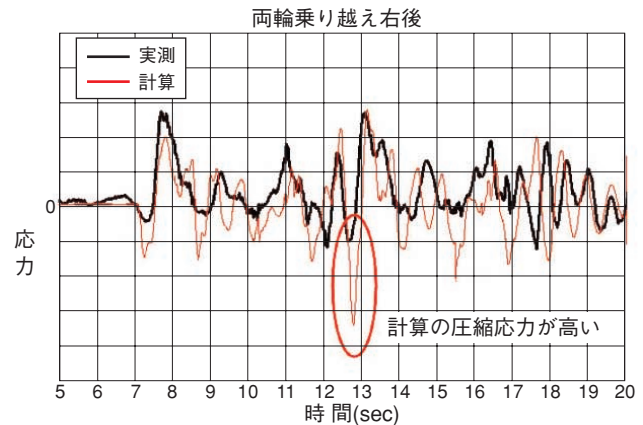


図13 両輪乗り越え右後評価点応力

また、右後評価点の場合、変動挙動はおおよそ一致しているが、13秒付近の圧縮側の計算応力が実測に比べて大きい。これは後輪落下後における車体沈み込みと同時に前輪タイヤが突起に乗り上げる時である。計算と実測との差の原因は、計算に用いている2次元タイヤモデルの場合タイヤの局所変形が実機に比べて小さく、その結果大きなタイヤ反力が生じているためと考えられる。

また、図14に中輪が突起を乗り越える時のフレームの変形と応力分布を示す。フレームが上下曲げモードで変形していることがわかる。

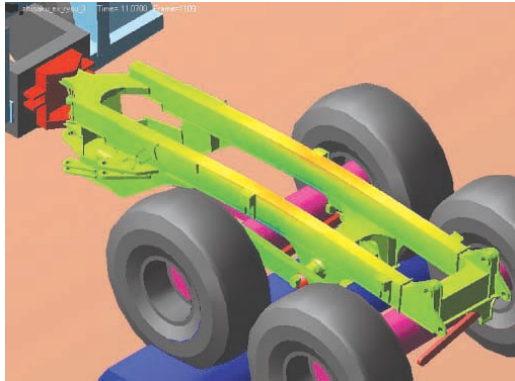


図14 両輪乗り越え変形図上の応力分布

図17に示す左中輪乗り上げ時のフレームの変形と応力分布を示す。フレームが(上下曲げ+ねじり)モードで変形していることがわかる。

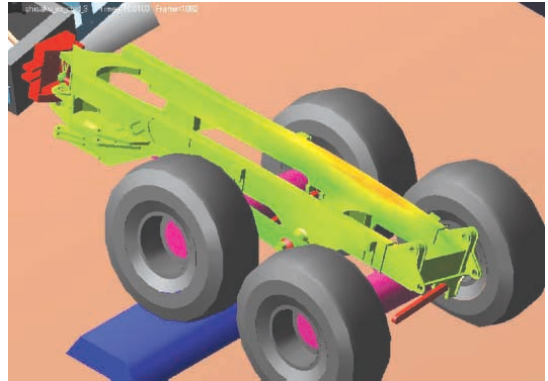


図17 千鳥乗り越え変形図上の応力分布

(2) 千鳥突起乗り越え走行

図15に右後評価点、図16に左後評価点の計算と実測の比較結果を示す。応力レベル、変動周期および左右フレームの位相差はおおよそ実測を再現している。しかし、右後評価点における15秒、21秒付近の圧縮側の計算応力が実測に比べて大きい。この状態は、左前輪および右中輪が落下し、右後輪の突起乗り上げ時である。また、左後評価点の場合は逆の乗り越え状態の時において実測と計算に差が出ている。その差は、両輪乗り越え時の場合と同様な理由によると考えられる。

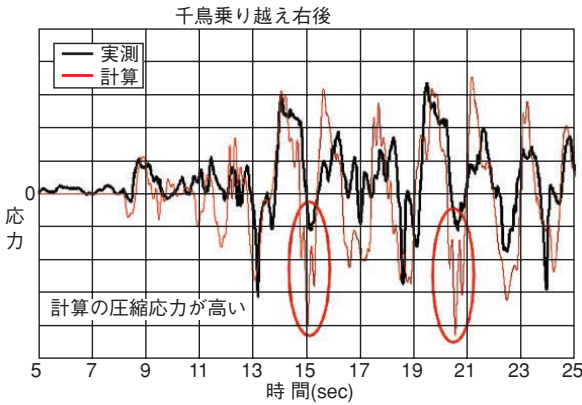


図15 千鳥乗り越え右後評価点応力

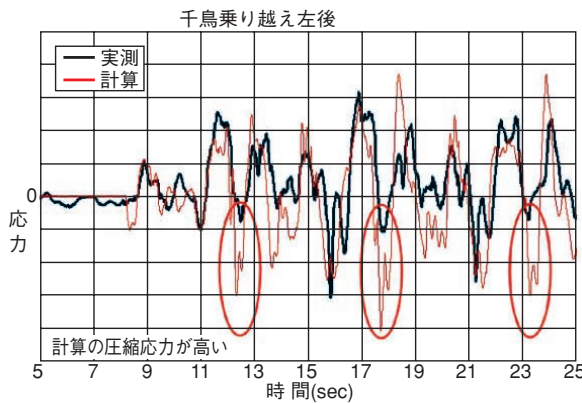


図16 千鳥乗り越え左後評価点応力

(3) 急旋回走行

図18に左後評価点の計算と実測との比較結果を示す。左右旋回時の応力レベルは実測結果とほぼ一致している。実測で現れている周回を周期とする波とその波に重畳している短周期の小さい波は路面の傾斜や凹凸により発生していると考えられる(計算路面は平坦路)。

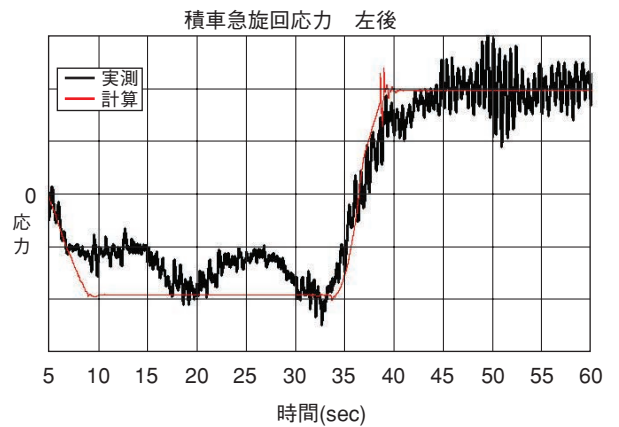


図18 急旋回左後評価点応力

図19は左旋回時のフレーム変形および応力分布を示す。右フレームが(左右曲げ+ねじり)モードで変形し、後部に比較的高い応力が発生している。

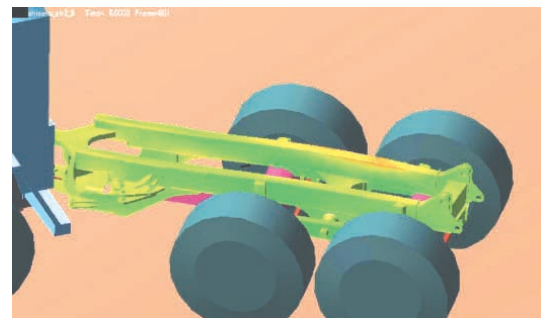


図19 急旋回変形図上の応力分布

5. おわりに

フレームの弾性特性を取り込んだ車両運動解析手法をアーティキュレートダンプトラックのリアフレームに適用し実測により検証した。その結果、本手法は車両走行時のフレームの動的応力の予測に利用できることが確認された。

今後更に実車実測応力との検証と手法の改良を進めるとともにダンプトラックを含め建機車両の走行時や実作業時の動的負荷・応力などの課題に適用していきたい。

参考文献

- 1) “ダンプトラックの動的応力解析手法の開発”，
KOMATSU TECHNICAL REPORT 1997 VOL.43
No.2
- 2) ADAMS/Flex 理論マニュアル
- 3) ADAMS/Durability 理論マニュアル

筆者紹介



Masahiro Koike

こいけ まさひろ

小池正浩

1981年、コマツ入社。
現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター
所属。



Sanshirou Shimoda

しもだ さんしろう

下田三四郎

1968年、コマツ入社。
現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター
所属。



Toshihide Shibuya

しばや としひで

渋谷俊英

1984年、コマツ入社。
現在、コマツ 開発本部 建機第二開発センター
所属。



Hirofumi Miwa

みわ ひろふみ

三輪博史

2002年、コマツ入社。
現在、コマツ 開発本部 建機第二開発センター
所属。

【筆者からひと言】

CAE技術のハードウェアおよびソフトウェア技術の進歩は目覚しく、従来不可能だった設計検討ができるようになってきている。

今後もCAE技術の進歩にアンテナを張り設計品質の向上に貢献していきたい。