

近年、自動車や建設機械などの輸送機については、容易な操作性や、より安全な動きが要求されている。また、ロボットの中には高速高精度の運動が要求されるものが増えている。しかも、これらの設計・開発を短期間で行う必要があり、設計段階でダイナミクスの問題を事前に予測し、即、設計にフィードバックすることが重要になってきている。その手段として、シミュレーション技術に対する期待がコンピュータ能力のアップとともにますます高まっている。最近では、多くの物体から構成されるシステムの運動を扱うマルチボディダイナミクスの研究が盛んに行われ、設計段階でのダイナミクス問題の解決に寄与している。

当社では、マルチボディダイナミクス（以下、MBDと呼ぶ）に関する数値解析手法の研究・開発に長年携わっており、今まで多くのMBDの解析を行っている。以下では、まず、当社のMBDの取組みを説明し、次に、MBDの一分野である機構解析についての事例を紹介する。

エンジニアリングメカニクス事業部
応用技術部
振動音響技術室
廣岡 栄子

F-1 機構—油圧—制御系のMBD

ロボットや建設機械の機構部分は、弾性変形をしながら、大きく空間を移動する。さらに、ロボットの場合にはモータ、制御系との連成、建設機械の場合は、油圧系、制御系との連成を考慮する必要がある。当社では、有限要素法をベースとした、非線形動的解析コードSINDYS^{*1) ~ *6)}の開発に1980年代から携わり、ロボットや建設機械の動的シミュレーションに適用している。SINDYSでは、大変位と弾性変形を考慮できる3次元の非線形はり要素を有限要素法で定式化すると同時に、アクチュエータであるモータやシリンダ、制御系についても有限要素法と同様の要素分割という概念を導入して機構—油圧—電気（あるいはモータ）—制御系の動的解析を行っている。

状態変数を χ として、機構系では変位、油圧系では体積流量の積分値、制御系では電圧や電流などを表せば、系全体の運動方程式は次式のように記述される。

$$[M]\ddot{\chi} + [C]\dot{\chi} + [K]\chi = F - F_N$$

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 F は外力、 F_N は非線形部分によって生じる補正外力である。機械の運動や構造物の振動応答を求めるのに時刻歴応答解析法がよく用いられる。その方法は、陽解法と陰解法に分類される。陽解法

は時間刻みが粗いと解が発散するため、絶対値の大きな固有値を持つ硬い系には適用が難しい。陰解法は安定性に優れ、無条件安定の解法は刻みを大きくとっても発散しないという特徴を持つ。SINDYSでは陰解法Newmark- β ($\beta=1/4$)を用いている。さらに、逆止弁などの強い非線形性のある系に対しても高精度・安定な時間積分法としてFI法^{*7)}を開発し、実問題に適用している。

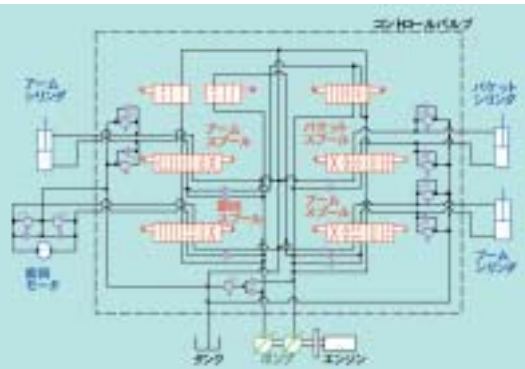
以下に、SINDYSを用いた事例（油圧ショベルの実掘削時におけるエネルギー消費の動的シミュレーション）を紹介する。

第1図に解析モデルを示す。アタッチメント部分は大変位はり要素を用い、各シリンダは大変位シリンダ要素を用いてモデル化する。油圧系では、配管およびリリーフ弁やチェック弁などの油圧系要素を用いて油圧回路を表現する。また、旋回部分は油圧モータを介して油圧系と機構系を連成させている。第2図に実掘削時の機構系の挙動を示す。第3図に、実掘削時の消費動力の実測結果と解析結果の比較を示す。両者はよく一致していることがわかる。このように、機構—油圧—モータ—制御系のMBD解析を実施することにより、ヒートバランスや省エネルギー量を定量的に評価できることがわかった。

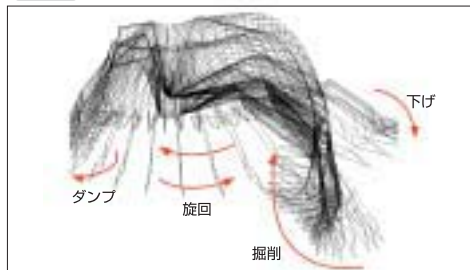
第1-1図 解析モデル（機構系）



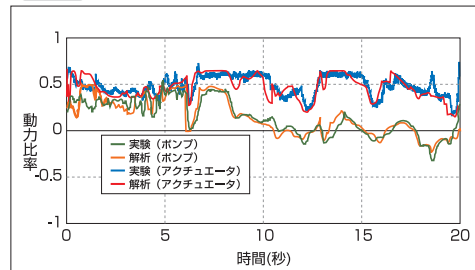
第1-2図 解析モデル（油圧系）



第2図 解析結果（機構系の挙動）



第3図 解析結果と実験結果の比較



参考文献

- *1) 井上喜雄ほか：
R&D神戸製鋼技報、
Vol. 31(1981) No.1, 32
- *2) 藤川猛ほか：
R&D神戸製鋼技報、
Vol. 34(1984) No.3, 109
- *3) 頭井洋ほか：
日本機械学会論文集、
Vol.52, No.483, C(1986),
2814
- *4) 今西悦二郎ほか：
日本機械学会論文集、
Vol.53, No.492, C(1987),
1711
- *5) 廣岡栄子ほか：
D&D講演論文集、
No.940-26(1994), 113
- *6) 今西悦二郎ほか：
R&D神戸製鋼技報、
Vol. 51(2001) No.3, 150
- *7) 藤川猛ほか：
日本機械学会論文集、
Vol.67, No.656, C(2001),
929

F-2 機構解析の適用事例 *8)

MBDには剛体MBDと柔軟MBDと呼ばれる二つの分野がある。剛体MBDでは剛体と考えられる部品が連結したシステムの運動を解析するのに対し、柔軟MBDでは剛体と弾性体からなるシステムの運動を解析する。剛体運動と弾性変形の連成方法として、弾性体部分を他の有限要素法の解析コードで計算した結果を、モード合成法を用いて表現する方法が従来主流であったが、MBDに非線形有限要素法

を融合させる方法が最近、注目されている。後者の方法では、有限要素法のすべての節点に自由度を持たせたままで弾性体を扱うことが可能である。したがって、弾性体どうしや弾性体対剛体の接触が定義でき、より現実に近い状況をシミュレートすることができる。汎用機構解析コードRecurDynでは、後者の手法を用いており、以下では、RecurDynを用いて実施した当社での機構解析の事例を紹介する。

参考文献

*8)
 廣岡栄子：
 RecurDyn User's
 Conference2006資料

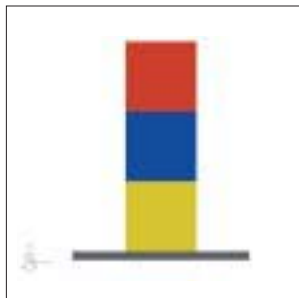
剛体MBDの事例（機器のロッキング応答解析）

日本は世界有数の地震国であり、建物や機器の耐震設計にはじゅうぶんな検討が必要である。機器が積重なっている状態で阪神大震災クラスの地震が発生したときに、機器が転倒するかどうか、さらに、転倒しないためにはどのようなガイドの形状にすればよいかを、検討した事例を紹介する。第4図に機器を3段に積上げた解析モデルを示す。各機器の間には摩擦を定義する。第5図に、阪神大震災の波形（第6図）を横方向に与えた時の解析結果（12.5秒後）を示す。1番上（3段目）の機器が今にも転倒しそうな状況になることがわかる。そこで、対策として第7図に示すように、各機器間の水平方向を拘束するガイドを取付け、地震応答解析を実施する。第8図は12.5秒後のガイドが

ある場合の解析結果であり、第5図に示したガイドなしの結果とは異なることがわかる。第9図に、ガイドの有無による3段目の機器と地面の横方向相対変位を示す。ガイドがない場合は8秒あたりから反対方向に戻らなくなり、12.5秒あたりで転倒し始めることがわかる。一方、ガイドがある場合には、横方向の相対変位がプラス・マイナスを繰り返し、最後には0になることから、転倒しないことがわかる。したがって、このガイドは転倒に対して有効であるといえる。

今回の事例は、機器を剛体としてモデル化した。クレーンなどアタッチメントが長く、弾性変形する構造物の転倒を検討するときには、柔軟MBDとして解析の方がより現実に近いと思われる。

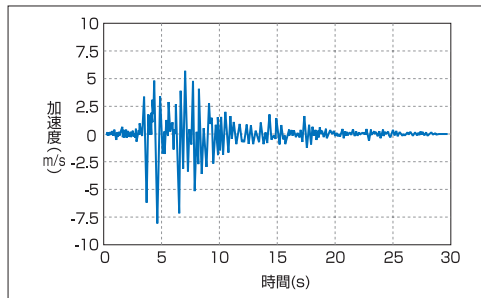
第4図 解析モデル



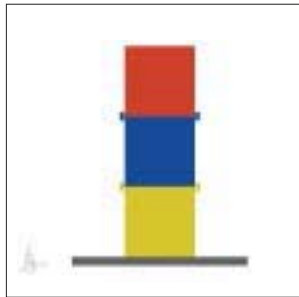
第5図 解析結果（12.5秒後）



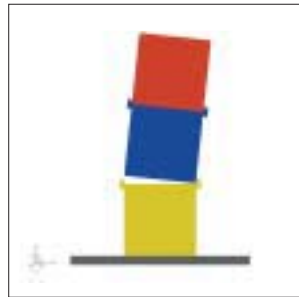
第6図 阪神大震災の地震波形



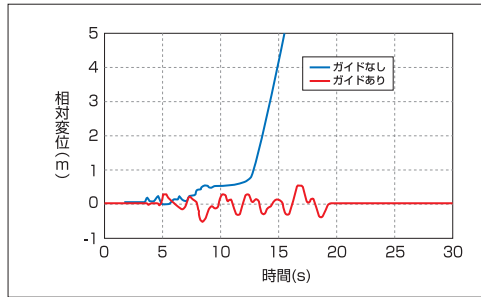
第7図 ガイド付き解析モデル



第8図 解析結果（12.5秒後）



第9図 3段目の機器と地面の横方向相対変位



モード合成法を用いた柔軟MBDの事例（油圧ショベルのラフロード走行解析）

油圧ショベルの新機種開発時には、ラフロードと呼ばれる悪路での走行試験を実施し、車体フレームや搭載部品の強度・耐久性を評価している。ラフロード試験を模擬した走行シミュレーションを事前にコンピュータ上で実施することにより、

開発期間の短縮が図れる。第10-1図に示すように主要構造物であるキャブ、上部旋回体を有限要素法にモデル化し、汎用コードNASTRANを用いて固有値解析を実施し、固有振動数および固有モードなどのモード情報を機構解析コードRecurDynに渡す。

RecurDynでは、下部構造物（第10-2図）を、専用ツールを用いてモデル化し、上部構造物のモード情報と連結させることによって、ショベルのモデルが完成する（第11図）。第12図はラフロード走行

中の上部構造物に発生する応力の時刻歴波形を示す。このように、コンピュータ上で、ラフロード路面上を走行させることにより、上部構造物にかかる加速度や応力を時々刻々求めることができる。

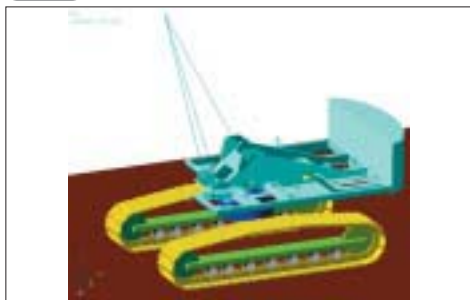
第10-1図 上部構造物の解析モデル (NASTRAN)



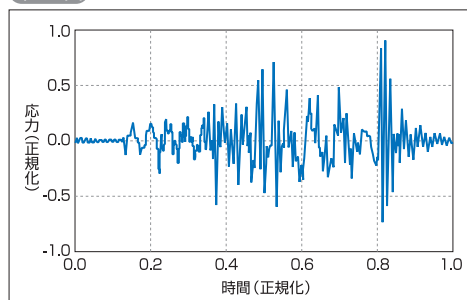
第10-2図 下部構造物の解析モデル (RecurDyn)



第11図 油圧ショベルの解析モデル



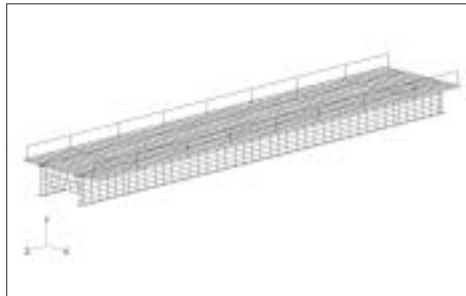
第12図 解析結果



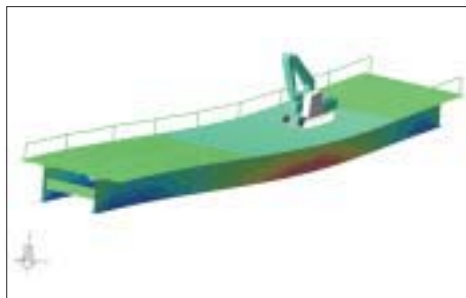
有限要素法を用いた柔軟MBDの事例 (大型車両走行時の主桁橋の挙動解析)

自動車などの走行体が橋を通過する際、主桁に発生する応力は時々刻々変化する。設計段階で、発生する応力を動的に求め、ダイナミクスの問題を事前に解決すれば開発期間の短縮が図れる。第13図に今回の解析に用いた主桁橋の有限要素法モデルを示す。この有限要素法モデルをRecurDyn上で読み込み、弾性体（主桁橋）と剛体（走行体）の接触を定義し、走行体を走らせることにより、時々刻々変化する橋の応力を求めることができる。第14図に、走行時の主桁橋軸方向の応力分布を示す。本事例は1台の走行体を扱ったが、走行体の台数、スピードや車線などをパラメータにして解析することにより、主桁橋の設計に活用することができる。

第13図 主桁橋の有限要素法モデル



第14図 主桁橋の応力分布



当社では、長年にわたり、MBDの解析手法の研究およびモデル化技術の蓄積を行ってきた。本論では、当社のMBD技術と適用事例について解説した。続いて、今までのモデル化技術を活かして、汎用の機構解析コードRecurDynを用いた事例について紹介した。機構解析では、弾性体どうしや弾性体対剛体の接触が定義でき、より現実に近い状況を模擬することができるようになってきている。今後は、マルチボディダイナミクスは制御系や流

体系などの他分野との連成解析（マルチフィジックス）へと発展していき、さらに実現に近い状況をシミュレートすることが可能になるとと思われる。

当社では、これらの解析技術動向およびお客様のニーズに対応できるように、今後とも解析技術向上をさらに図っていくと同時に、実現象を把握するために必須である実験技術の向上も図っていく予定である。