

4105 LS-DYNA による流体構造連成解析への取り組み

Trial for Fluid/Structure interaction analysis using LS-DYNA

宮地 岳彦 (株式会社 日本総研ソリューションズ)

Takahiko Miyachi

(JRI Solutions, Limited, Harumi Center Building 2-5-24 Harumi, Chuo-ku, Tokyo 104-0053)

miyachi.takahiko@jri-sol.co.jp)

Key Words: Fluid/Structure interaction, LS-DYNA, CAE

論文要旨

LS-DYNA では流体部分に ALE 手法を用いることにより強連成の流体構造連成解析を実現している。CFD コードに比べ複雑な流体现象を再現するにはいたらないが、ガス流入による自動車エアバッグの展開など、複雑な構造部分の挙動の解析などに多くの実績がある。また、強連成であるため、並列計算のスケーラビリティも高い。本講ではそれらの実例とともに解説する。

1. 有限要素法を用いた流体構造連成解析のメリット

1-1 流体構造連成解析適用の背景

計算力学において、流体解析、構造解析の2大分野は、学術的な研究のみならず日々の実製品開発に関わる産業界においてももはやその重要性は疑うところがなく、これらなくしては高品質/低コスト/短納期の製品開発は実現できないといっても過言ではない。流体解析は空力、廃熱、燃焼など、構造解析は強度、剛性、振動、衝撃などの各分野で用いられている。

それら両方を用いる解析、流体構造連成解析は、開発現場からのニーズは非常に高い、すなわちその両方を考慮しなければ表現できない現象が非常に多く、そして現象の解明が難しい、試作品のコストがかかる、などの CAE 適用のメリットが大きい分野である。この分野での CAE 適用は古くから指摘されていたにも関わらず、今のところ決定的な手法は確立できていない。

1-2 有限要素法を用いた流体構造連成解析

流体構造連成解析で用いる手法は、汎用流体コードと汎用構造コードを、必要な物理量をやり取りするライブラリ(MPCCI⁽¹⁾)などを用いて時間ステップごとに計算を進めていく弱連成方法が一般的である。

それに対し、流体部分に ALE 手法を用いれば、ペナルティカップリングなど比較的簡素な連成手法を適用することができ、モデル化の容易さ、並列化スケーラビリティの向上が見込まれる。さらに強連成手法であることから、変形状態が時間により著しく変わる(流体側から見れば境界条件の変動が激しい)問題、たとえば、ガスの流入によりエアバッグを展開させる解析などなどにそのメリットが発揮できる。

2. LS-DYNA による流体構造連成解析

2-1 ALE を用いた流体部分の表現

汎用有限要素構造解析コードである LS-DYNA には、流体的な挙動を表現するための要素タイプ ALE が実装されている。ALE 要素タイプは Fig.1 のように一度構造解析を行った後、節点を移動させ、変位、速度、加速度、応力などの物理量をマッピングする。これにより、流体的な挙動を表現することができる。このサイクルの概念図を Fig.2 に示す。

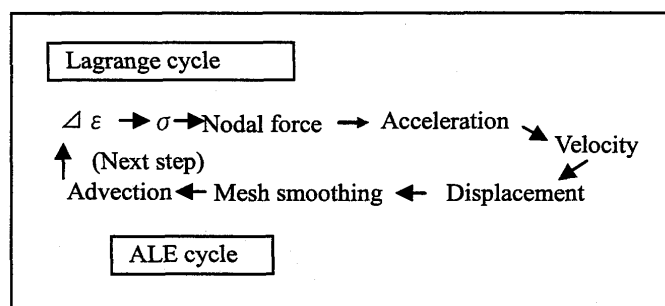


Fig.1 Calculation Step Process for ALE element

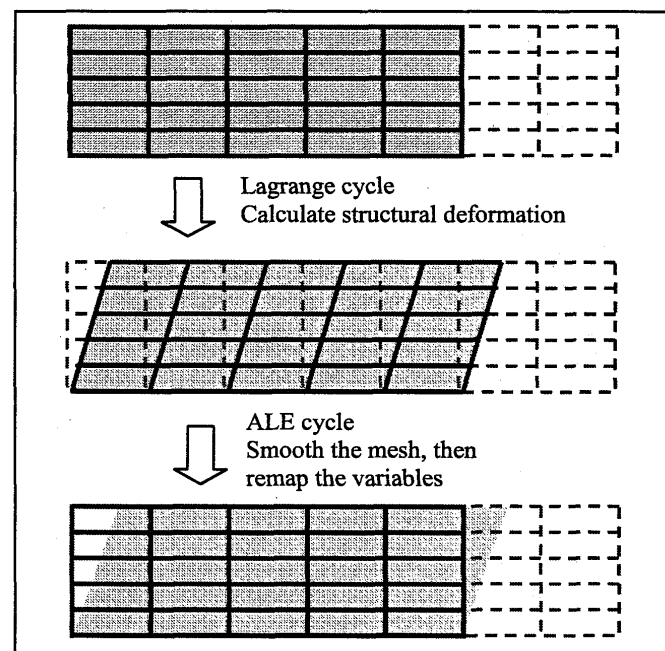


Fig.2 Conceptual Diagram of Calculation Process of ALE

2-2 連成手法

流体部分の表現と構造部分の連成にはいくつかの手法が提案されており、LS-DYNA でも数種類の手法が実装されている。ここではもっとも良く用いられるペナルティカップリングについて示すが、いずれにしても同一コード、同一ステップの中で連成計算を行うことができる。

点であるに大きなメリットがある。これにより物理量をコード間でやり取りすることなく、流体側、構造側の物理量が同時に更新され、弱連成手法に比べてより実現に近い表現ができる。

ペナルティカップリングでは連成計算において、構造部分の節点が流体部分の要素内に入り込んだとしたとき、その入り込んだ量に応じて法線方向に反力を与える、すなわち仮想的なバネを張る手法である。これにより運動量及びエネルギー保存則は、バネに蓄積されるエネルギーが非物理的なものであることを除けば満たされる。バネに蓄積されるエネルギーは本来仮想モデルであるので発生してはならないが、この入り込み量をなるべく小さなものとする、すなわち解析時間増分を小さくし、少しでも入り込んだらすぐに力が発生し、常に構造側のメッシュが流体の表面に近い位置に存在するようにすれば全体エネルギーに比べ小さな値にとどまる。LS-DYNA で用いられている陽解法では時間増分はクーラン条件の制約があり、非常に小さいものであり、その懸念は小さいが、解析進行中に連成によるエネルギーが十分小さいか留意する必要がある。

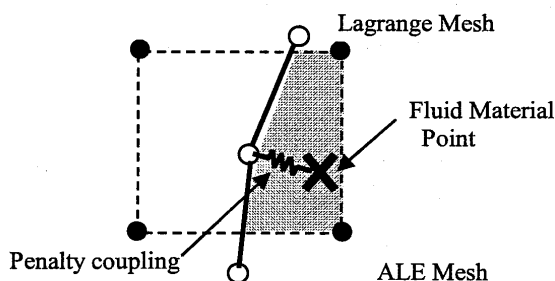


Fig.3 Conceptual Diagram of Penalty Coupling Calculation

3. LS-DYNA を用いた流体構造連成解析事例

3-1 エアバッグの展開解析

乗用車用のエアバッグの展開解析は LS-DYNA での流体構造連成解析の適用を本格化させた課題である。エアバッグの安全性については、FMVSS（米国連邦自動車安全基準）にてアウトオブポジションでの安全性が課せられている。これは本来、衝突時人体を保護する役割を果たすべきエアバッグが、乗員の配置が悪いと心臓破裂など加害要因になることがあるため、これを規制する法規である。

この法規に対応するため、自動車メーカー各社は CAE による現象解明を試みた⁽²⁾。エアバッグの展開は従来は、ガス流入量に対してエアバッグ内に均一の圧力を与えて展開させる手法(Control Volume 法、CV 法)を用いて解析するのが一般的であったが、この手法は、特に加害性に影響を与える展開初期の挙動を十分表現することができないため、ガスを流体、エアバッグを構造として流体構造連成解析による現象の解明が実施された。エアバッグの基布のように変形しやすく、複雑な接触を十分再現する手法として広く用いられている。

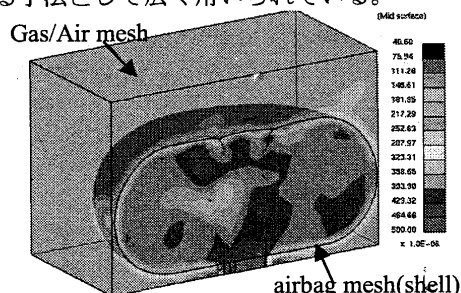


Fig.4 Gas Pressure in FSI Airbag deploying Analysis

3-2 タイヤのロードノイズ解析

タイヤが路面を走る上での騒音（ロードノイズ）対策はタイヤメーカー/自動車メーカー各社にとって大きな課題である。通常路面を走る騒音は構造物の振動で表現されるが、ロードノイズにはさらにタイヤの中の空気が共鳴する気柱共鳴という現象がある。この空気の振動数はタイヤの形状、及びその形状から決まる内圧で定まるため、タイヤの変形状態から正しく空気の状態を求める必要がある。ここでは空気を流体、タイヤを構造とした流体構造連成解析を行い、時間領域で解析を行ったあと、その応答をフーリエ変換により周波数領域に変換し、タイヤ内の空気の振動を考慮した場合とタイヤの内圧を単純に圧力条件で負荷した場合の二つのケースで、周波数応答がどのように変わるかを検証した。その結果、流体構造連成解析を取り込んだケースでは、気柱共鳴と考えられる周波数領域にピークが見られ、正しく現象を解析していることがわかった。

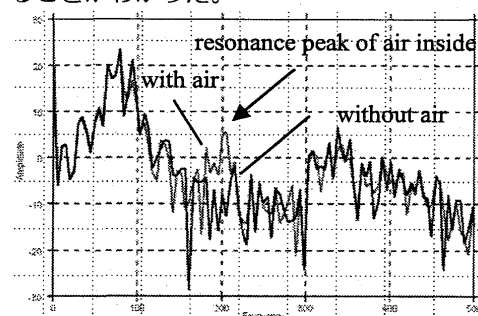


Fig.4 Frequency Response of Tire with and without Air Inside

3-3 機械加工解析

大変形をともなう現象を解析する際には通常の構造解析ではメッシュがつぶれてしまい、解析を進めることができない。これに対し、アダプティブメッシュ、メッシュフリー手法、粒子法などの手法が提案されているが、流体構造連成解析により、加工される材料を流体として表現することにより解析を行うこともできる。通常想起される流体構造連成解析の適用分野とは異なるが、新たな適用手法として事例を紹介する。

4. LS-DYNA による流体構造連成解析の課題

流体部分に ALE を用いることによって同一コードにて構造連成解析を実施することが非常に簡便にできる反面、課題も残されている。もっとも大きな課題は、流体部分を ALE で表現している結果、流体部分の精度が十分でない点である。たとえば汎用の CFD コードのように渦モデルなどが実装されておらず、それにより非常に細かな流体の挙動はとらえきれない。また質量保存も保証されておらず、メッシュの切り方などによっては流体の質量が徐々に減っていつてしまう（増えてしまう）といった問題が見られる。

現状は構造部分に注力した解析が中心で、流体を時々刻々変わる荷重境界条件ととらえ、構造部分の挙動、応力、速度などの評価が中心である。流体の詳細な挙動を評価する必要がある場合には十分ではないが、困難な領域の解析を実行できるという意味で非常に有用であり、新たな解析領域に適用できると期待できる。

参考文献

- [1] MPCCI web site, <http://www.mpcci.de/>
- [2] FEA information web site
http://www.feainfo.com/showcase/oop_dec_2004.pdf