

積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第1報）

片山 聡*

A Study on Simulation Methods for Plastic Forming of Laminated Sheets (Part1)

KATAYAMA Satoshi*

抄 録

積層材料の塑性加工シミュレーション手法を確立するため、Ansys LS-DYNA における積層材料モデルの構築手法および必要とされるシミュレーション設定について調査した。その結果、板厚方向のせん断ひずみ分布に対する補正処理がシミュレーション結果に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、その影響度は構成材料の剛性に差があるほど大きくなることを確認した。

1. 緒 言

CAE (Computer Aided Engineering) はコンピュータ上で仮想実験を行い、製品性能や加工方法の妥当性を検証する設計支援ツールである。当所ではこれまでに金属材料のプレス加工を中心に CAE を用いた研究や技術支援を行ってきたが、近年ではクラッド鋼板や CFRP (炭素繊維強化プラスチック) など、積層材料の塑性加工に関する相談が増加している。そこで本研究では、これらの技術相談への対応力強化と当所における新たな技術シーズの確立を目的に、積層材料の塑性加工シミュレーション手法に関する調査を実施した。本報告書では調査結果のうち、ANSYS, Inc. 製構造解析ソフトウェア Ansys LS-DYNA (以下、LS-DYNA) における積層材料モデルの構築方法とシミュレーション設定値が結果に及ぼす影響について報告する。

2. 積層材料モデルの構築方法

2.1 モデル化手法の種類

積層材料のモデル化は、シェル要素やソリッド要素を用いて各層を個別にモデル化して結合する方法と積層シェル要素を用いて板厚方向の積分点に層特性を定義する方法に大別される。各層を個別にモデル化する方法では、接着層の

挙動を考慮した層間剥離も再現可能であり、高精度なシミュレーションが期待できるが²⁾、その一方で結合処理の安定性のほか、要素数の増大やクーラン条件の低下に伴うシミュレーション効率の悪化が懸念事項となる³⁾。積層シェル要素によるモデル化は、数値入力だけで積層状態を定義・編集できるため利便性に優れるが、層間のずれが大きい場合にはシミュレーション精度が低下する恐れがある⁴⁾。LS-DYNA ではどちらの方法にも対応しているが、他の CAE ソフトウェア、例えば ESI 社製プレス成形シミュレーションソフトウェア PAM-STAMP においても積層シェル要素 (Blank Material Type: Multiplies) が適用可能となっていることから、本研究では積層シェル要素を用いたモデル化を対象に調査を進めた。

2.2 積層情報の定義方法

LS-DYNA で積層シェル要素を作成するには、*INTEGRATION_SHELL, *PART_COMPOSITE, *ELEMENT_SHELL_COMPOSITE のいずれかを用いて、薄肉シェル要素もしくは厚肉シェル要素に積層情報を追加する必要がある。必要とされる情報は、各層の厚さ、材料特性およびシェル要素主軸方向に対する層主軸の方向 (角度) である。なお、積層方向はシェル要素の法線方

* 技術統括センター

向によって決定されるため、部品内で法線方向を一致させておくことが推奨される。

*INTEGRATION_SHELL はシェル要素の任意断面に積分点情報を追加するキーワード (LS-DYNA の設定入力コマンド) である。積分則は *SECTION_SHELL に準拠しており、その汎用性は高いものの、キーワード内に積分点以外の情報を持っておらず、板厚や材料特性は他のキーワードを用いて定義する必要がある。そのため、モデル構築作業は他のキーワードよりも煩雑となる⁵⁾。*PART_COMPOSITE は、部品単位で積層情報を定義するキーワードである。キーワード内で厚さや材料特性が定義可能であり、積層板など、積層構成が様な材料を一括でモデル化するのに適している。そのため、塑性加工シミュレーションに向けた積層材料のモデル化には最も適していると考えられる。一方、デフォルトの積分則は台形則であり、特に積層数 (積分点数) が少ない場合にはシミュレーション精度が低下する可能性がある⁶⁾。その対策としては、オプション設定の IRPL を有効にし、シンプソン則を適用するといった方法が考えられる⁷⁾。*ELEMENT_SHELL_COMPOSITE は、要素単位で積層情報を定義するキーワードである。積層構成が異なる要素であっても同一部品として扱えるため、接合部のみに補強層が追加された製品など、実製品の強度シミュレーションに適している。厚さや材料特性の定義方法は *PART_COMPOSITE と同様である。各要素に対する定義は、LS-DYNA 専用プリポスト処理ソフトウェア LS-PrePost や複合材料プリポスト処理ソフトウェア Ansys Composite PrepPost を使用することで比較的容易に行うことができる⁵⁾。

2.3 シミュレーション設定

LS-DYNA で積層シェル要素を使用する場合、定義するキーワードは通常のシェル要素と同じであるが、一部の設定値は変更する必要がある。*CONTROL_SHELL では、積層シェル理論を適用するため、LAMSH 有効にしなければならない。

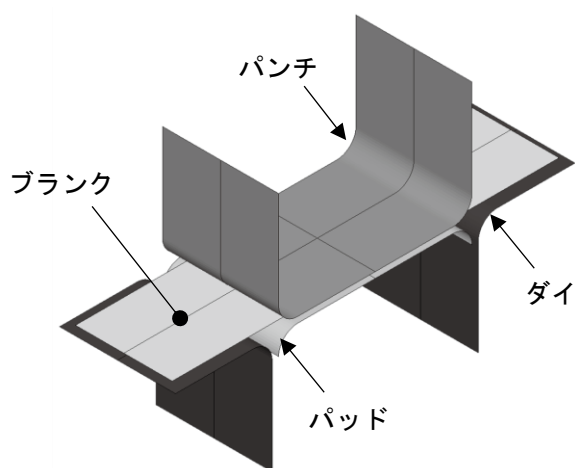
それに併せて、*PART_COMPOSITE もしくは *SECTION_SHELL のせん断補正係数 SHRF は 1 (通常は 5/6) へ変更する必要がある。これらは板厚方向のせん断ひずみの非一様性に対する補正処理となる⁸⁾。また、積層厚肉シェル要素では、板厚方向のせん断ひずみ分布 (を模擬するため、*PART_COMPOSITE_TSHELL および *SECTION_SHELL やに TSHEAR が設けられており、要素定式や積層数に応じて切り替えることが推奨されている。これは本来ソリッド要素定式に向けた機能であるが、LAMSH と組み合わせることで、シェル要素定式にも適用することが可能となる。

3. 曲げ加工シミュレーション

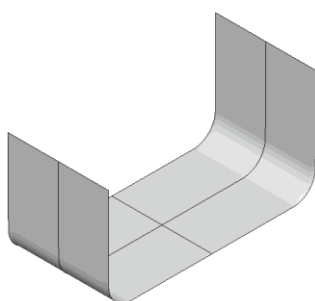
3.1 概要

前節で述べたシミュレーション設定の違いがシミュレーション結果にどのような影響を及ぼすか、クラッド鋼板を対象とした曲げ加工シミュレーションにより検証した。

曲げ加工シミュレーションのジグ構成と加工形状を図 1 に、ジグ寸法を図 2 に示す。ブランク (クラッド鋼板) は長さ 100mm、幅 25mm、板厚 1.5mm とした。積層数は全 3 層とし、上下層を鋼 (層厚さ: 0.3mm)、中間層をアルミニウム合金 (層厚さ: 0.9mm) に設定し、積層薄肉シェル要素は *PART_COMPOSITE を、積層厚肉シェル要素は *PART_COMPOSITE_TSHELL を用いてモデル化した。鋼およびアルミニウム合金の材料モデルは 2 直線近似等方弾塑性体 (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) とした。使用した材料特性値を表 1 に示す。要素形状は低次四辺形 (薄肉)、低次六面体 (厚肉) とし、要素代表寸法は 1mm とした。積層薄肉シェル要素の定式には Belytschko-Tsay (ELFORM=2) および完全積分 (ELFORM=16) を用いた。積層厚肉シェル要素の定式には薄肉シェル要素の代替となる面内 1 点積分 (ELFORM=1) および次数低減面内 2×2 点積分 (ELFORM=2)、ソリッド材料の仮想ひずみの低減積分 (ELFORM=5)、シェル材料の



(a) ブランクおよびジグ構成



(b) 加工形状 (薄肉シェル要素)

図 1 曲げ加工シミュレーションの概要

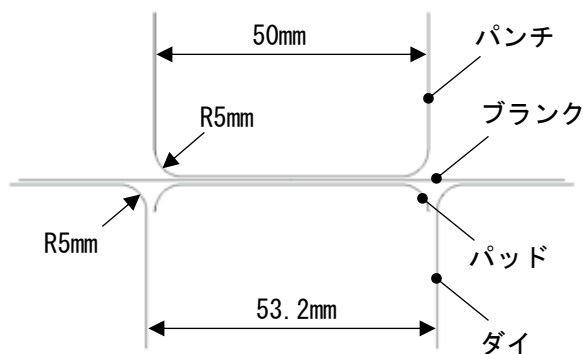


図 2 ジグ寸法

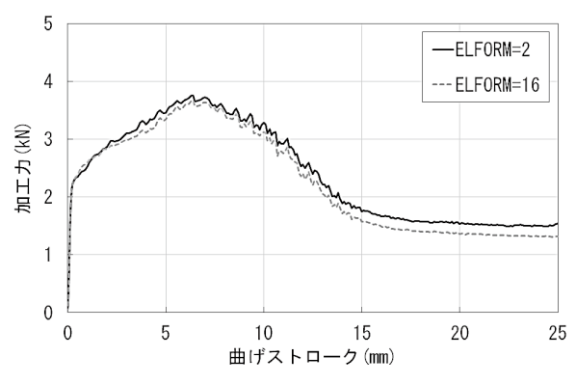
表 1 材料特性値

	鋼	アルミニウム 合金
密度(kg/m ³)	7850	2770
縦弾性係数(GPa)	200	71
ポアソン比	0.30	0.33
降伏応力(MPa)	250	50
接線係数(MPa)	1000	500

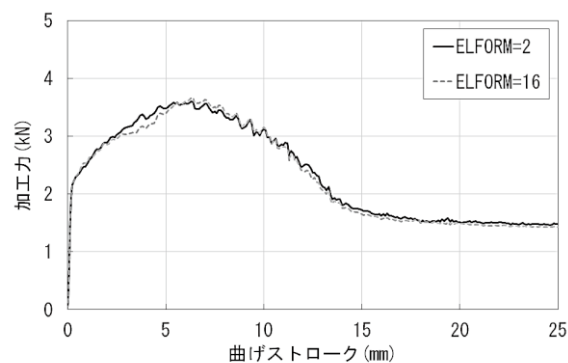
仮想ひずみの低減積分(ELFORM=6)を用いた。ジグは剛体として、代表寸法 1mm の低次四面体でモデル化した。また、ジグとブランクの摩擦係数は 0.2、最大曲げストロークは 25mm とした。シミュレーションでは LAMSHT, IRPL および TSHEAR の設定値を切り替えたが、SHRF は LAMSHT と連動する設定であるため、LAMSHT を有効とした条件では 1 に、無効とした条件では 5/6 に設定した。

3.2 積層薄肉シェル要素による検証結果

積層薄肉シェル要素を用いたクラッド鋼板の曲げ加工シミュレーション結果 (曲げストローク加工力曲線) を図 3 に示す。ELFORM=2 のほうがブランクの剛性を高く見積もっており、その傾向は IRPL を有効にした場合に強くなる



(a) IRPL 有効



(b) IRPL 無効

図 3 積層薄肉シェル要素に対する ELFORM の影響 (LAMSHT 有効)

ことがわかる。図 4 に ELFORM=16 における IRPL の影響を示す。ELFORM=16 では加工後半に IRPL 設定の影響が現れているが、これは積分則の違いによるスプリングバック挙動（ダイ

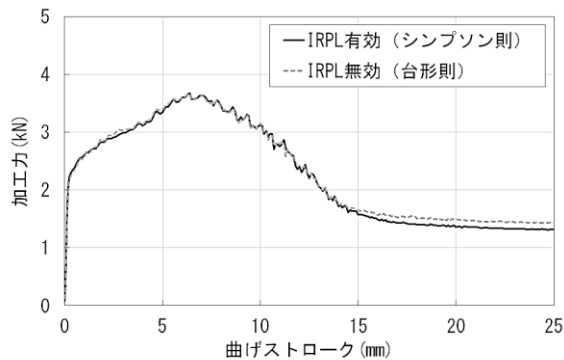
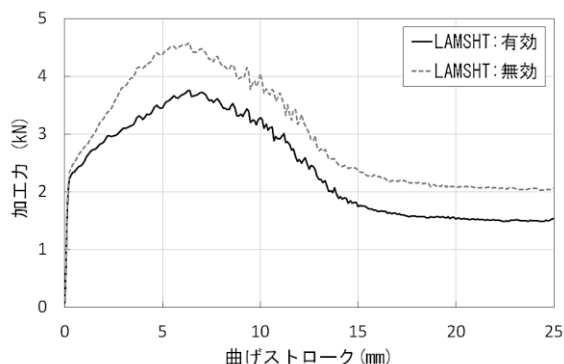
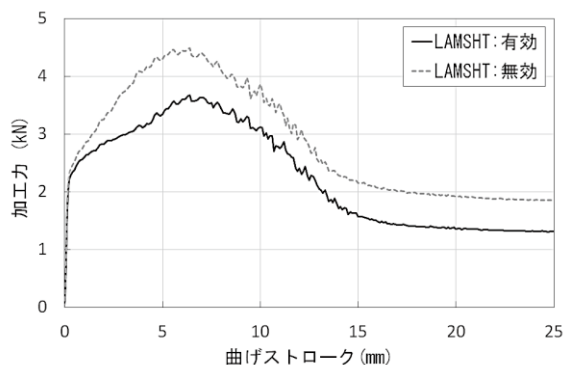


図 4 積層薄肉シェル要素に対する IRPL の影響 (ELFORM=16, LAMSHT 有効)



(a) ELFORM=2



(b) ELFORM=16

図 5 積層薄肉シェル要素に対する LAMSHT の影響 (IRPL 有効)

との接触力) の差によって生じたものと考えられる。図 5 に LAMSHT の影響を示す。要素定式によらず、LAMSHT を無効とした場合にはブランクの剛性を大きく見積もっていることがわかる。LAMSHT の影響は他のシミュレーション設定よりも大きく、積層材料のシミュレーションにおいては、板厚方向のせん断ひずみの再現が重要になると考えられる。

LAMSHT の影響の大きさを確認するため、中間層の材料をゴムを模した等方性弾性材料（縦弾性係数 0.1GPa, ポアソン比 0.46）に変更し、シミュレーションを実施した。結果を図 6 に示す。LAMSHT による加工力の変化はアルミニウム合金の場合よりも大きく、初期の傾きやピーク位置も変化していることがわかる。このことから、LAMSHT の影響は積層材料を構成する素材の剛性差が大きいほど、強く現れるものと考えられる。

3.3 積層薄肉シェル要素による検証結果

積層厚肉シェル要素を用いたシミュレーション結果を図 7 に示す。なお、シミュレーションにおける標準条件は、LAMSHT 有効, IPRL 無効, TSHEAR 一定型とした。図より、積層薄肉シェル要素とは異なり、要素定式によって結果が大きく異なっていることがわかる。これには平面応力仮定の適用有無のほか⁹⁾、積層数や要素アスペクト比、接触処理なども関係している

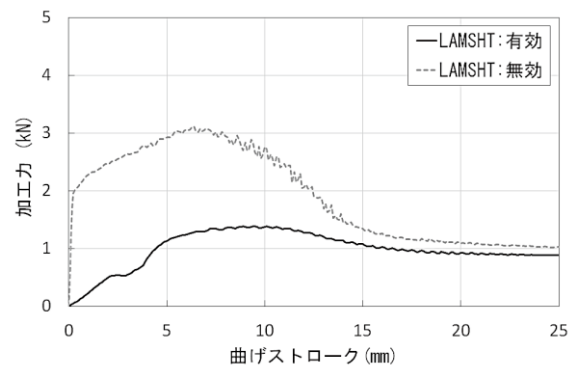


図 6 中間層をゴムとした場合のシミュレーション結果 (ELFORM=16, IRPL 有効)

と考えられ、その検証は今後の課題となる。本研究では、積層薄肉シェル要素と比較的近い結果を得られたELFORM=2について、各種シミュレーション設定の影響を確認した。

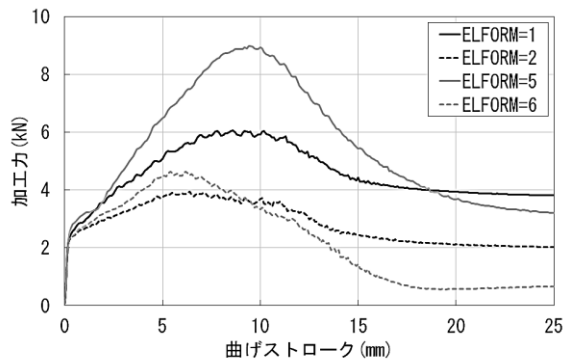


図7 積層薄肉シェル要素に対するELFORMの影響

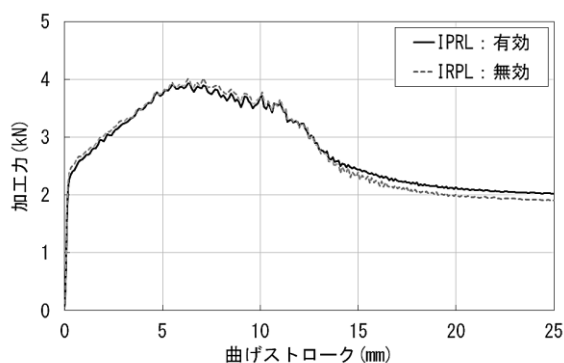


図8 積層薄肉シェル要素に対するIRPLの影響(ELFORM=2)

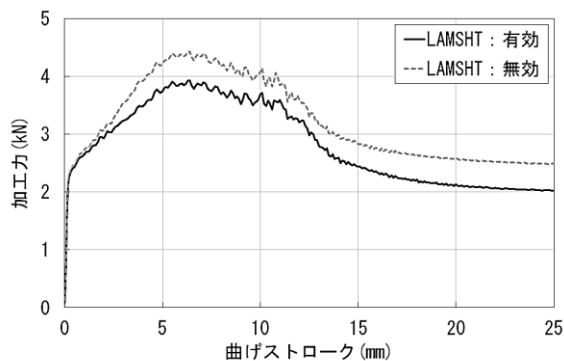


図9 積層薄肉シェル要素に対するLAMSHTの影響(ELFORM=2)

ELFORM=2におけるIRPLおよびLAMSHTの影響を図8, 9に示す。併せて、中間層をゴムに変更した場合のシミュレーション結果を図10に示す。これらの影響は積層薄肉シェル要素の場合と同様であり、LAMSHTの影響が最も強く現れた。TSHEARの影響を図11に示す。TSHEARの影響は大きく、せん断ひずみの分布状態によってLAMSHTと同等の差が生じていることがわかる。

以上のことから、積層厚肉シェル要素においては、積層シェル理論の適用有無のほか、板厚方向のせん断ひずみ分布のモデル化が重要であることがわかる。その影響度は要素定式のほか、積層数でも変化することが予想されることから、シミュレーション手法の確立に向け、今後これらの検証を進める必要があるといえる。

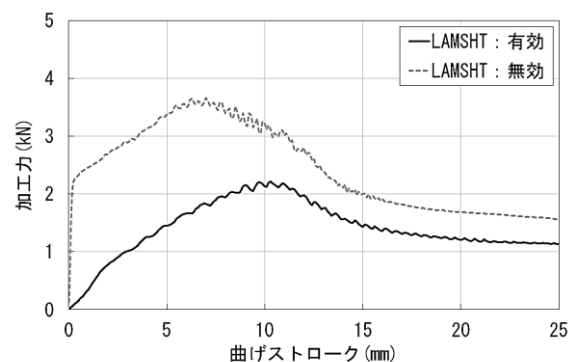


図10 中間層をゴムとした場合のシミュレーション結果(ELFORM=2)

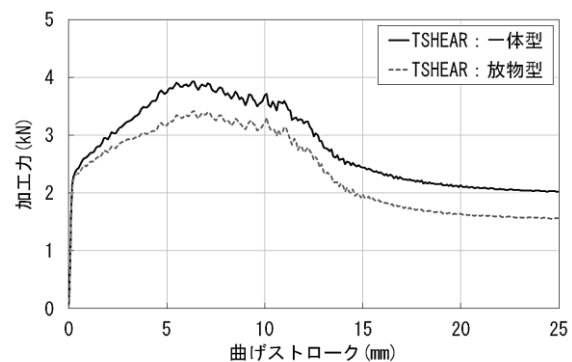


図11 積層薄肉シェル要素に対するTSHEARの影響(ELFORM=2)

4. 結 言

- (1) 積層シェル要素（薄肉，厚肉）においては，積層シェル理論 (LAMSH) の適用有無がシミュレーション結果に大きな影響を与える。また，その影響は積層材料を構成する材料の剛性差が大きいほど強く現れる。
- (2) 積層厚肉シェル要素においては，板厚方向のせん断ひずみの分布様式 (TSHEAR) もシミュレーション結果に影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 例えば，須貝裕之ほか，“テラードブランクの対向液圧によるプレス深絞り成形法の開発”，工業技術研究報告書，no.47 (2017)，pp.53-54.
- 2) 西正人ほか，“自動車衝突解析のための CFRP 積層部材の有限要素モデリングと損傷破壊解析”，日本複合材料学会誌，vol.46，no.6 (2020)，pp.256-264.
- 3) 青村茂ほか，“LS-DYNA の事例紹介 ～頭部有限要素モデルの衝撃解析～”，バイオメカニズム学会誌，vol.34，no.1 (2010)，pp.79-82.
- 4) 米大海ほか，“多層シェル連成問題のシミュレーション”，第 32 回計算力学講演会講演論文集，(2019).
- 5) Ulrich Stelzmann et al., “Ply-based composite modeling with the new *ELEMENT_SHELL_COMPOSITE keyword”, 8th European LS-DYNA Users Conference, (2011).
- 6) 中嶋徳正ほか，“積分方程式解法における高速・高精度な係数行列構築法の提案”，日本シミュレーション学会論文誌，vol.8，no.4 (2016)，pp.129-137.
- 7) 成澤哲也，“異方性平板・シェルの振動と制御”，釧路工業高等専門学校紀要，no.38 (2004)，pp.7-13.
- 8) 殿塚勲，“複素関数の積分に対する数値積分の試み”，広島工業大学紀要研究編，no.44 (2010)，pp.269-275.
- 9) 山本剛大，“板厚変化を考慮したシェル要素の弾塑性問題に対する性能評価”，日本機械学会第 29 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集，(2016).