

# 自動車用鋼板のスポット溶接部破断予測技術

## Advanced Technologies for Spot Weld Fracture Prediction in Automotive Steel Sheets

相藤 孝博\*  
Takahiro AITO

丹羽 俊之  
Toshiyuki NIWA

吉田 博司  
Hiroshi YOSHIDA

野村 成彦  
Naruhiko NOMURA

### 抄 録

自動車車体の衝突試験においてスポット溶接部破断及び材料破断が発生した場合、変形モードが変化することによって狙いのエネルギー吸収が得られない可能性がある。そのためFEM解析を用いてスポット溶接部破断を予測し、事前に対策を打つことが求められている。新日鉄住金(株)において汎用の衝突解析ソルバーと連成してスポット溶接部の破断予測を行えるソフトウェアを開発した。本ソフトウェアの特徴は、スポット溶接部が荷重を受け持つ幅を考慮した破断予測にある。更に、予測精度を向上させるために開発した新機能について紹介した。

### Abstract

In the crash test of automobile bodies, when the spot weld fracture and the material fracture occur, there is a possibility that the intended energy absorption can not be obtained due to the change of the deformation mode. Therefore, it is required to predict fracture of the spot weld using FEM analysis and take countermeasures in advance. We developed the software that enables us to predict fracture of the spot welded part in conjunction with a general-purpose crash analysis solver. The feature of this software is the prediction of fracture considering the width at which spot weld is subject to load. In addition, we introduced new functions developed to improve prediction accuracy.

## 1. 緒 言

自動車車体の衝突試験においてスポット溶接部破断及び材料破断が発生した場合、変形モードが変化することによって狙いのエネルギー吸収が得られない可能性がある。また近年では、超高強度鋼板の適用が進み、従来に比べスポット溶接部の設計の難しさが増してきている。そのため、FEM解析を用いてこれら破断を予測し、事前に対策を打つことが求められている。しかし、スポット溶接部は鋼種、板厚、溶接条件、部材形状、負荷モード等によって破断限界が変化するため、考慮すべき因子が多く予測モデルの構築が困難であった。

自動車車体の衝突解析の分野においては汎用ソルバーであるLS-DYNA<sup>®</sup>が広く用いられている。LS-DYNA<sup>®</sup>においてスポット溶接部をビーム要素でモデル化した場合、スポット溶接部への負荷はせん断力、軸力として出力される。スポット溶接部の継手強度の指標としては、引張せん断強度(TSS)と十字引張強度(CTS)が用いられることが多く、

TSSは主にせん断方向の、CTSは軸方向の強度を表していると考えられる。

これまで新日鉄住金(株)においてTSS、CTS試験によって、材料、スポット溶接条件、試験片幅を変化させた実験を行い、スポット溶接部に作用するせん断力、軸力、それらによる合力を評価することで、材料やスポット溶接条件が同じであっても試験片幅が変化すると破断強度が変化することを見出した。この実験結果から応力集中の考えに基づき、図1に示す応力集中係数と、ナゲット径と試験片幅の比の関係を整理することで、鋼種、板厚、スポット溶接条件、試験片幅、負荷モード(TSS、CTS)に関わらず、単一の曲線で破断を予測できるモデルが開発された<sup>2,4)</sup>。更に、この予測モデルをLS-DYNA<sup>®</sup>のサブルーチンプログラムとして実装したNSafe<sup>®</sup>-SPOT(スポット溶接部破断予測ソフトウェア)が開発されている。

NSafe<sup>®</sup>-SPOTはフルピークルモデルでの使用を前提に開発されており、部材には比較的粗いシェル要素を、スポット溶接部にはビーム要素(オプション機能により実際はソ

\* 鉄鋼研究所 利用技術研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

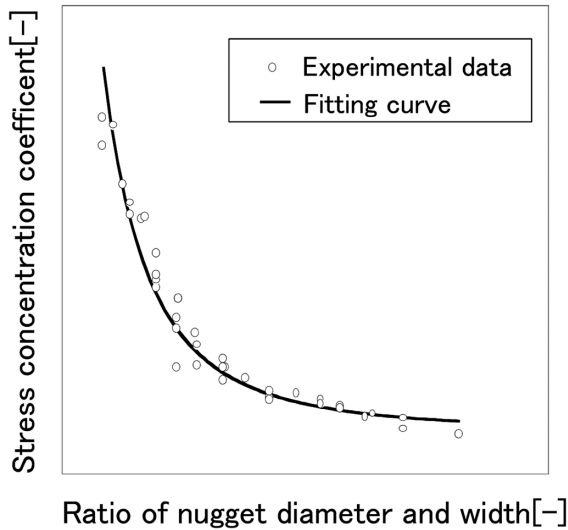


図1 応力集中係数とナゲット径と試験片幅の比の関係<sup>2,3)</sup>  
Relationship between stress concentration coefficient and ratio of nugget diameter and width<sup>2,3)</sup>

リッド要素化されて計算)を用いた、比較的簡便なモデル化手法であっても精度良く破断予測ができる。また、数千打点に及ぶスポット溶接部に対して膨大な入力ファイルを作成する必要があるが、これを補助するためのPreソフトウェア(NSafe®-SPOT Pre)も合わせて開発した。

このNSafe®-SPOT Preを用いることで、スポット溶接部毎に異なる、鋼種、板厚、ナゲット径、部材形状の情報を反映させた破断クライテリアを作成することができる。ここで言う部材形状の情報とは、各スポット溶接部が荷重を受け持つ幅(以降、有効幅と呼ぶ)であり、具体的には、荷重方向に垂直な方向のスポット溶接間隔もしくはフランジ幅を意味する(継手試験においては試験片幅を意味する)。他の破断予測手法と比較した場合のNSafe®-SPOTの特徴は、この有効幅を破断クライテリア構成式に組み込んでいることであり、これによって、実部品の接合面の形状に応じた破断予測が可能となる。

従来のNSafe®-SPOT Preでは、スポット溶接間隔もしくはフランジ幅のいずれか事前に指定した値しか読み取ることができない。部材形状が単純な場合は、予測される荷重方向から読み取るべき有効幅が、スポット間隔なのかフランジ幅なのかを決定することができるが、複数の部品で構成される部材や、荷重方向が変形途中で変化するような解析を行う場合は、一概に有効幅をスポット間隔かフランジ幅のいずれかに決定することができず、破断予測精度が低下する原因の一つとなっていた。

そこで、スポット溶接部に加わる荷重の方向を逐次計算する機能を追加すると共に、スポット間隔とフランジ幅とを2軸とする楕円をスポット溶接面に作成し、荷重と垂直方向の楕円の直径を有効幅と定義することで、スポット溶接部への負荷状態に応じて有効幅を逐次可変させる機能(動的有効幅機能)を開発した。

## 2. 動的有効幅機能及び精度検証方法

NSafe®-SPOTは先述した予測モデル<sup>2,3)</sup>を用いて破断クライテリアを作成し、スポット溶接部に加わるせん断力と軸力との比較で破断危険度を評価しているが、このクライテリアを作成するために必要な有効幅の値を、荷重方向に応じて動的に取得するためのプログラムの概要を以下説明する。また、この新機能を用いて実部材の衝突試験において発生したスポット溶接からの破断予測を試みたので、その解析方法について説明する。

### 2.1 動的有効幅計算プログラムの概要

動的有効幅機能の概念図を図2に示す。NSafe®-SPOT Preの機能を用いてまず部材を構成するシェル要素の情報を読み取る。隣接するシェル要素間の法線方向ベクトルの角度差から同一平面を識別し、同一平面上にあるスポット溶接部をグループ分けする。次に、同一グループに属するスポット溶接部の中から、最近接のスポット溶接を判別し、最近接スポット溶接部との距離をスポット溶接間隔として取得すると共に、その方向をスポット溶接列ベクトルとして取得する。また、スポット溶接列ベクトルと垂直な方向の平面部幅をフランジ幅として取得する。このように取得したスポット溶接間隔、フランジ幅、スポット溶接列ベクトルを入力ファイルに書き込む。

次にLS-DYNA®による衝突解析において、NSafe®-SPOTは入力ファイルの情報及びビーム要素で設定されたスポット溶接部がソリッド要素に変換される際に設定されるローカル座標の情報を基に、フランジ面にスポット溶接間隔とフランジ幅を2軸に持つ楕円を作成する。

更に、衝突解析中に逐次計算されたスポット溶接要素に加わるせん断力成分と軸力から合力を計算し、フランジ面に投影してスポット溶接列ベクトルとの角度差から合力の方向を求め、それに垂直な方向の楕円の直径を計算し、これを有効幅と定義する。そのため、逐次計算される合力の方向が変化すれば、それに依りて有効幅の値も変化する。

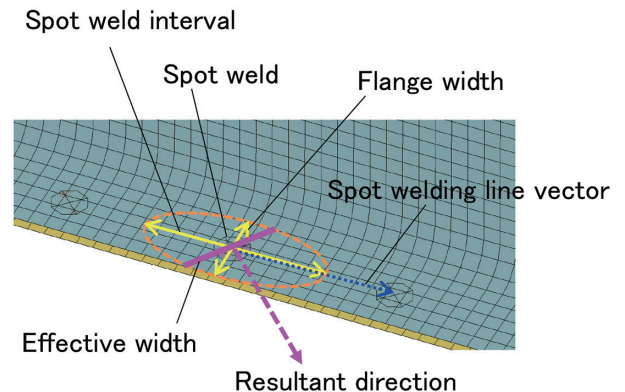


図2 動的有効幅概念図  
Example of dynamic effective width

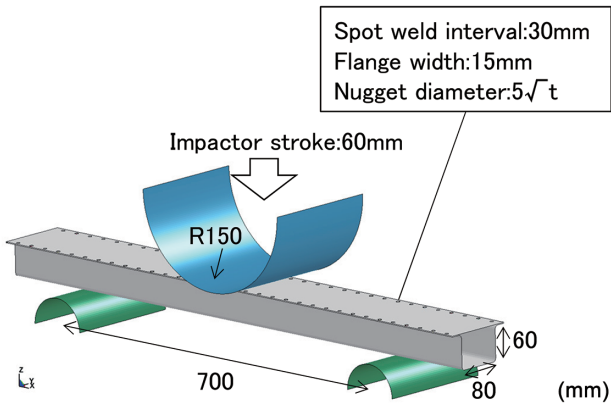


図3 ハット部材3点曲げ試験条件  
Three-point bending test condition of hat type member

## 2.2 破断予測モデルの精度検証方法

動的有効幅機能によるスポット溶接破断予測精度を検証するために、図3に示す1500MPa級ホットスタンプ材、板厚1.6mmのハット部材（ナゲット径 $5\sqrt{t}$ （ $t$ :板厚）、フランジ幅15mm、スポット溶接間隔30mm）を用いた3点曲げ試験を再現したFEMモデルを作成した。動的有効幅機能を使用した場合と、比較のため従来機能である有効幅をスポット溶接間隔に固定した場合、有効幅をフランジ幅に固定した場合の解析も行った。

## 3. 破断予測モデルの精度検証結果

3点曲げ試験後のサンプルの外観写真及びNSafe®-SPOTによる破断予測結果を図4に示す。動的有効幅機能により実験のスポット溶接破断位置を正確に予測することができた。一方、従来機能で有効幅をスポット溶接間隔に固定し

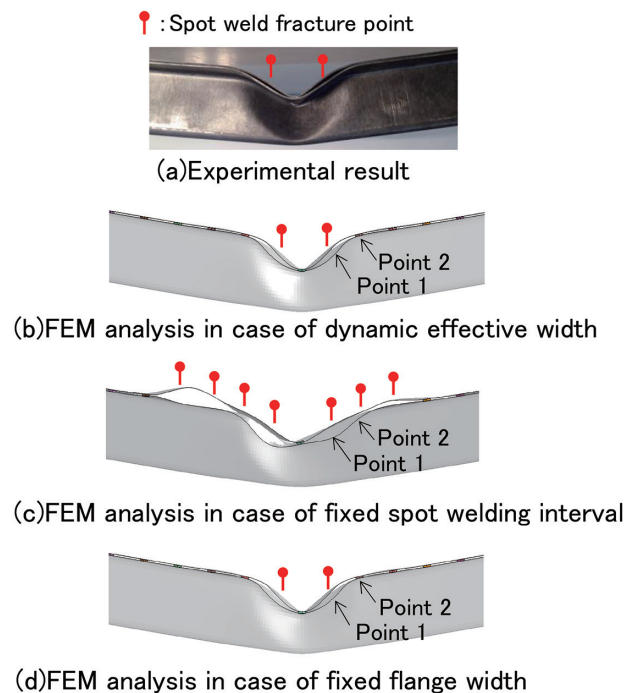


図4 ハット部材3点曲げ試験結果の比較  
Comparison of hat member three-point bending test results

た場合、実験よりも多めにスポット溶接破断を予測する結果になった。また有効幅をフランジ幅に固定した場合は、実験のスポット溶接破断位置を正確に予測することができた。

3点曲げ試験において、最初にスポット溶接破断が発生する打点1及びその隣の打点2の破断危険度を図5～7に示す。破断危険度が1に達した時点で破断と判定されスポット溶接要素が削除される。従来機能では、有効幅は固定値であるため、クライテリアは一定値であるが、動的有効幅機能では合力方向に応じて有効幅が変化するためクライテリアを変化させながら破断危険度を計算している。動的有効幅機能を用いた場合の破断予測結果を図5に示す。打点1において13mmストローク時にスポット溶接部への入力が増大し、破断危険度が急増するが破断には至らず、30mmストローク時に破断が発生した。この時、打点2は入力のピークを既に過ぎ除荷されていたため、それ以上破断が伝播することは無かった。

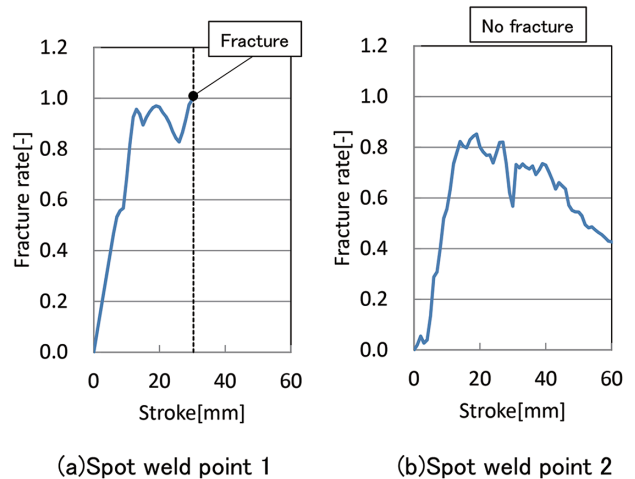


図5 動的有効幅機能による破断予測結果  
Fracture prediction results by FEM analysis in case of dynamic effective width

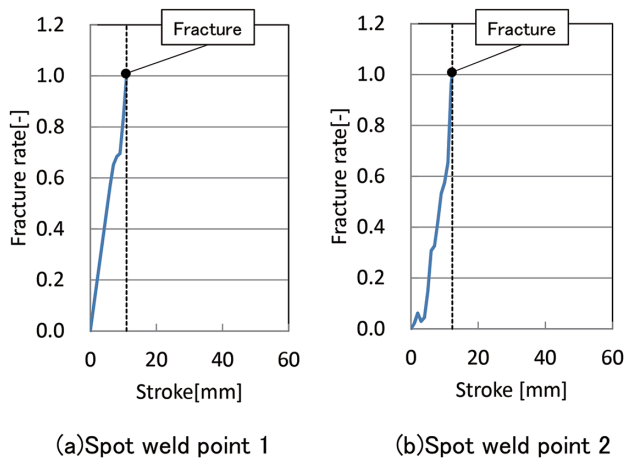


図6 有効幅をスポット溶接間隔に固定した破断予測結果  
Fracture prediction results by FEM analysis in case of fixed spot welding interval



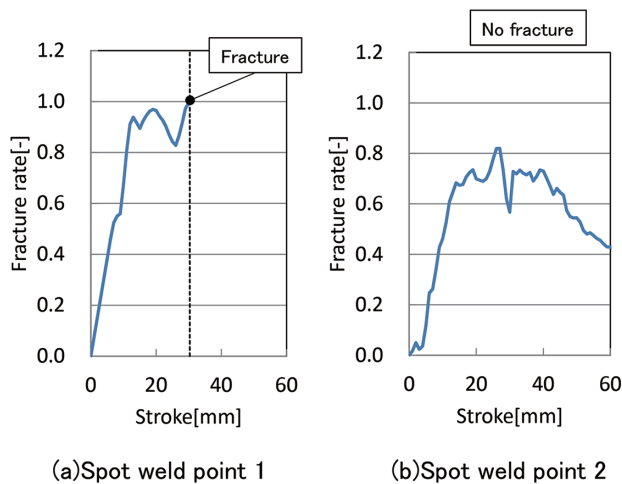


図7 有効幅をフランジ幅に固定した破断予測結果  
Fracture prediction results by FEM analysis in case of fixed flange width

一方、図6に示すように従来機能である有効幅をスポット溶接間隔に固定した条件では、有効幅が30mmであり他の条件に比べクライテリアが低かったために、10mmストローク時に打点1の破断危険度がクライテリアに到達し、破断した。その時点で打点2の入力がピークに達する直前であったため、瞬時に破断が伝播する結果となった。また、図7に示す従来機能である有効幅をフランジ幅に固定した条件では、背板側の有効幅が60mmであるため、クライテリアが高く、打点1において13mmストローク時の入力ピークにおいて破断が発生せず、30mmストローク時に破断が発生したが、動的有効幅条件と同様、その時点で打点2は既に入力のピークを過ぎて除荷されていたため、それ以上破断が伝播することは無かった。

図8に動的有効幅条件のハット部材の平面視において打点1の破断が発生する30mmストローク時のスポット溶接部に加わる合力方向ベクトルを示す。合力方向は主に部材の長手方向であり、動的有効幅機能によって、これと垂直な方向の有効幅が自動で選択されていると共に、合力方向の変化に合わせて逐次有効幅を更新することで精度良く実験結果を予測できたと考えられる。一方、有効幅をフランジ幅に固定した条件では、打点1の合力方向がおおよそ部材の長手方向であり、結果として適切な有効幅に近い値が選択されていたため破断予測精度が高かったと考えられる。よって、仮に条件が変わり合力方向が変化した場合には、予測精度も低下していたと考えられる。

#### 4. 結 言

自動車フルビークルモデルでの衝突解析において、スポット溶接部からの破断を高精度に予測可能なソフトウェア(NSafe®-SPOT)を開発した。NSafe®-SPOTの最大の特長はスポット溶接部が荷重を受け持つ幅(有効幅)を考慮した破断予測にあるが、この有効幅をスポット溶接部に加

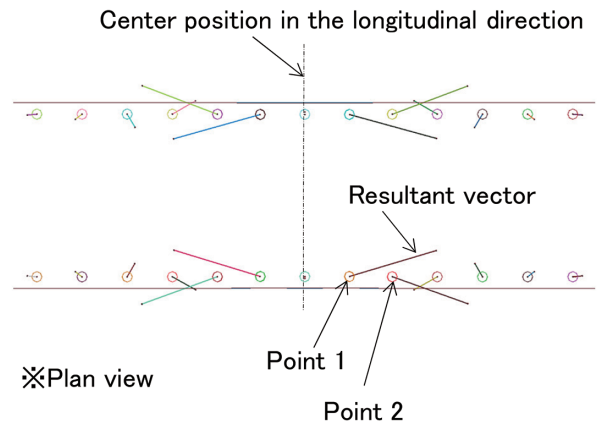


図8 ハット部材3点曲げ試験時の各スポット溶接部の合力ベクトルFEM解析結果(30mmストローク時)  
Resultant vector of each spot weld at the hat member three-point bending test by FEM analysis (30mm stroke)

わる荷重方向に応じて動的に計算するプログラムを新たに開発した。この新機能を織り込むことでハット部材の3点曲げ試験におけるスポット溶接部からの破断を、従来に比べ高精度に予測できることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 及川初彦 ほか:新日鉄技報. (385), 36(2006)
- 2) 吉田博司 ほか:自動車技術会学術講演前刷集. (8-04), 1(2004)
- 3) 吉田博司 ほか:自動車技術会学術講演前刷集. (49-05), 9(2005)
- 4) 上西朗弘 ほか:新日鉄技報. (393), 32(2012)



相藤孝博 Takahiro AITO  
鉄鋼研究所 利用技術研究部  
主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



丹羽俊之 Toshiyuki NIWA  
鉄鋼研究所 利用技術研究部  
首席主幹研究員



吉田博司 Hiroshi YOSHIDA  
名古屋製鉄所 品質管理部  
鋼材利用加工技術室長 博士(工学)



野村成彦 Naruhiko NOMURA  
鉄鋼研究所 利用技術研究部  
主幹研究員