

# 実機実験とシミュレーション結果の合わせ込みにおける SQC 活用

## ～パターンとバイアスに着目した 2 段階合わせ込み～

(株)デンソー生産技術開発部  
吉野 睦  
名古屋工業大学おもひ領域  
仁科 健

### 1. はじめに

近年、有限要素法解析(以下、FEM 解析)のソフトの機能が向上し、応力・歪だけでなく熱分布や流体など多くの問題が解けるようになってきた。その結果、技術開発あるいは設計パラメータの検討にシミュレーションが活用され、開発の期間短縮やコストダウンに貢献している。例えば、実験では大変高額になる金型関連の実験などでも、実物を製作せずシミュレーションで検討することが可能となっている。

併せて、設計環境の CAD (Computer Aided Design) 化も急速に進行し、さらに CAD と CAE (Computer Aided Engineering) や CAM (Computer Aided Machining) とのリンクも進んでいる。CAD と上記の FEM 解析を主とする CAE がリンクすることによって、CAD 上で設計すると同時に FEM 解析の入力となる製・部品のメッシュモデルが自動生成され即座に解析が実施される。言い替えれば、強度不足や共振などの問題点を CAD 画面上で即時チェックすることが可能となっている。

しかし、これら CAE の適用に問題が無いわけではない。一般に FEM 解析では解析時間の節約のため 3D モデルを使わず 2D モデルで代用したり、構造の一部を取り出してモデル化し、その端部を何らかの境界条件で代用したりする。そのため、実機実験に対して乖離が生じる。設計現場における即時解析を実現するためには、基礎研究段階において、あらかじめ実機が与える結果と FEM 解析が与える結果をある程度一致させておかなければならない。CAE を業務とする技術者達の間では、このプロセスはこれまでも粛々で行われてきたが、精度や工数が技術者の経験や技量に依存するため、効率的でかつ再現性のある手順の確立が望まれてきた。

本稿では、このような実機実験の結果とシミュレーションの結果を一致させるプロセスを”合わせ込み”と呼び、その効率的な手順について検討する。提案する手順については JUSE-STATWORKS Ver. 4 (以下、STATWORKS) を用いて実行したものを紹介する。

### 2. FEM 解析ソフトを用いた構造解析手順

後の議論をたやすくするために、図 - 1 に FEM 解析ソフトを用いた構造解析のステップを紹介する。

まず、最初にジオメトリ作成を行う。これは幾何学的構造を入力するステップであり、解析対象の形状をここで定義する。多くの場合、形状データは 3D - CAD からインポート可能だが、3D 解析には多大な解析時間を要することから、最初に述べたように 2D モデルで代用するケースもある。2D モデルを使用する場合は若干の形状のデフォルメが必要になる。2D モデルへの変換は単に断面形状を用いる場合や軸対象モデルを用いる場合などがあり、技術者の経験により選択されている。

マテリアル作成およびプロパティ定義とは、計算上のルールを決めておく部分である。構成部材ごとに材質や要素の種類を定義するために、ヤング率、ポアソン比、密度、降伏点などの材料物性および要素タイプを入力する。降伏点に温度依存性がある場合や加工硬化する場合は、構成式と呼ばれる式でその特性を定義しておく必要がある。

形状パラメータを制御因子として検討する時は、材料物性にかかわるパラメータは標示因子となるが、

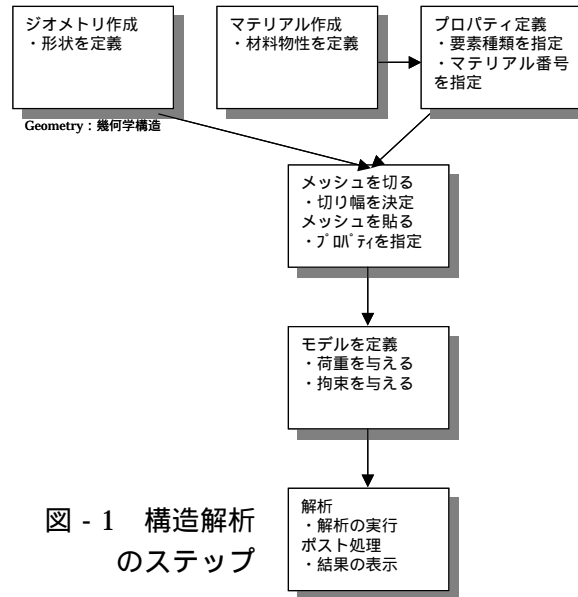


図 - 1 構造解析のステップ

後述する”合わせ込み”ではフィッティングパラメータとして用いられることが多い。

次に通称メッシュを貼るという操作を行い、構造全体を要素分割する。要素分割の善し悪しは精度に大きな影響が出るが、分割数に係わるルールは無く、解析時間の制約等を勘案して技術者の経験により分割数が決められている。

モデル定義では、印加荷重や拘束条件を定義する。拘束とは解析対象の一部を固定したり自由に滑らせたりする箇所を定義することだが、摩擦があるような時は現物との対応が非常に難しくなる。

以上はプリプロセッサと呼ばれるソフトを用いて行う準備作業である。この後、FEM 解析ソフトによって応力分布や歪分布を計算し、ポストプロセッサと呼ばれる処理ソフトによって階調的に色分けされたコンタ図として出力する。

シミュレーション業務では、このようなステップを回しながら、設計値や工程条件の最適化を行う。最適化の効率化のために 1995 年頃から積極的に SQC 手法が取り込まれている。この問題については既に他学会でレビューされているので<sup>[1][2][3]</sup>、本報では割愛する。

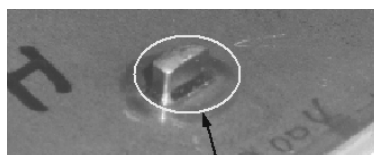
次にシミュレーションの精度の問題であるが、第一に内部演算に依存する精度の問題がある。シミュレーションは要素間の相互作用に矛盾がなくなるように最尤解を解いていく作業である。したがって相互作用そのものに関する物理モデルの仮定が間違っている場合、誤った結果を与えるのは明白である。これが FEM 解析ソフトの精度問題である。FEM 解析ソフトの精度の検証に関しては V&V (Verification and Validation) という学問領域が確立しており Patrick J. Roache の著書<sup>[4]</sup>などがある。

第二に、シミュレーションを業務に適用する際の精度の問題がある。準備段階のジオメトリ作成やプロパティ定義におけるモデルの仮定が CAE 技術者の技量や経験に依存するため、再現性がないという問題である。これについては未だ十分な検討がなされていない。一般的な構造解析であってもシミュレーションを実施する上での自由度が大きく、それが手順化されていないために人による差が存在する。それが実機との整合性(以下、精度)に少なからず影響している。

そこで、後者の精度を左右する合わせ込み問題について検討する。

### 3. CAE 業務の事例とその問題点

CAE 業務は、シミュレーション結果が既存の実機実験の結果をズレなく再現することを前提にしている。そのためシミュレーションモデルの”合わせ込み”が必要になる。合わせ込みとは、いくつかの実験点における実測結果とシミュレーション結果を一致させることを指す。ここでは、冷間鍛造の形状解析の事例を用いて説明する。



ピン出し成形加工

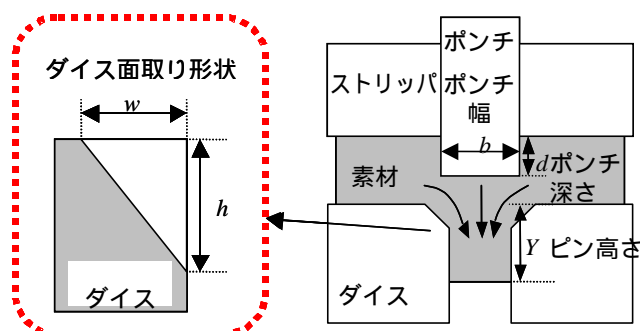


図 - 2 ピン出し成形加工とその解析モデル

これは JSQC”シミュレーションと SQC”拡大研究会 WG1 の T 委員からの紹介によるもので、図 - 2 に示すような冷間鍛造により部品に所定高さのピンを立てるための金型形状を最適化する業務の事例である。最適化に先立ち、従来の結果を用いて合わせ込みを実施した。この時、ピン幅等の形状の変更は新たな金型製作が必要であることから実験およびシミュレーションは従来金型のみで行った。両者の比較において図 - 3 のように実験とシミュレーションとに乖離が生じた。

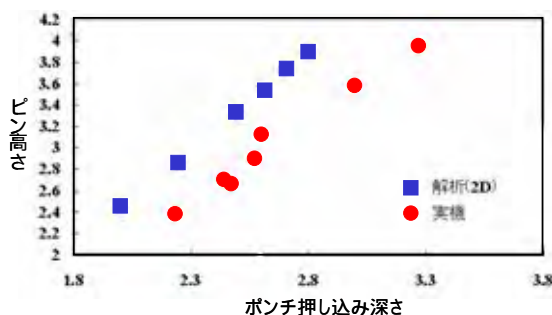


図 - 3 実験とシミュレーションの乖離

この事例では、金型形状は制御因子であるので合わせ込みには使用しないが、ポンチ押し込み深さは金型形状変更時の一般性を保証するために合わせ込みの際の信号因子として使用された。

技術者は試行錯誤の末、材料のすべりに関する拘束条件が影響することをつかみ、それを変更することでシミュレーションの結果を実機に一致させた。

この事例では、次の項目に関する手順が不明である為に技術者のノウハウに依存し、非効率になっていることが明らかになった。

- 合わせ込みのためのパラメータが多すぎて、どれが有効を知るには手間がかかる。
- 合わせ込みを行ったが、条件を変えたときの合わせ込みの再現性が不安である。
- どの程度まで合わせ込みを行えばよいかを判断する基準がない。

以上述べてきたように、合わせ込みの技術とは言い替えれば未知のフィッティング・パラメータの探索とその効率的な調整であると言える。したがって SQC の問題に落とし込むことが可能であると考えられる。例えば、上記の問題点 合わせ込みのためのパラメータが多いことへの対応については、実験計画法の活用による効率化が期待できる。これらを前述した冷間鍛造の事例で検討する。

## 4. 合わせ込み手順の提案

### 4.1 前提

本事例は所定形状のピンを得るために、加工条件(ポンチ押し込み深さ $d$ 、ポンチ幅 $b$ )とダイスの面取り形状( $w$ ,  $h$ )を最適化する問題である(図 - 2 参照)。最適化に先立ち、実機実験の結果に対する合わせ込みを行う。この時、ダイスの面取り形状の変更には新たな金型製作が必要であることから実機実験は従来金型のみを用いる。したがって、制御因子( $b$ ,  $w$ ,  $h$ )は一定の水準に保たれたままである。合わせ込みのために変化させることのできるパラメータは、ポンチ押し込み深さ $d$ と材料物性値などである。

### 4.2 考慮すべき課題

合わせ込みに使用できるパラメータは拘束条件や材料物性であり、実に多様である。まず、第一に、これらのうちどれを調整したらよいのかという疑問が生じる。これが課題である。

合わせ込みの次のステップである最適化では、ポンチ押し込み深さ以外の制御因子( $b$ ,  $w$ ,  $h$ )の水準も変化させることになる。このとき、ポンチ押し込み深さの水準のみを変化させた実機実験の結果をもとに計算した合わせ込み結果に再現性があるのかといった疑問が生じる。これが課題である。

課題は、実験誤差を伴う実機実験の結果に対する過度なフィッティングの問題である。実機実験結果への過度なフィッティングはシミュレーション実験の再現性を損なう可能性がある。

### 4.3 取上げる因子と計測特性

準備として実験因子の種類を説明する。

信号因子:冷間鍛造工程の最適化実験の制御因子は前述したようにダイスの面取り形状( $w$ ,  $h$ )とポンチ幅 $b$ 、ポンチ押し込み深さ $d$ である。合わせ込みのための実機実験において、この中から取り上げる因子を“信号因子”と呼ぶこととする。信号因子は通常、実機実験の実施のしやすさを考慮して選択される。本事例ではポンチ押し込み深さ $d$ を選択した。計測特性はピン高さ $Y$ である。

合わせ込み因子:コンピュータ実験の応答と実機実験の結果を合わせ込むための候補となるシミュレーションモデルのパラメータを“合わせ込み因子”とよぶこととする。本事例では、材料物性値である。

### 4.4 実験の手順

課題である合わせ込みの効率化には実験計画法の適用が不可欠である。この課題に対応する実験計画は次のとおりである。

- 1)シミュレーションモデルのパラメータから合わせ込み因子を選ぶ。ヤング率、ポアソン比、密度、降伏点などの材料物性や解析上の拘束条件の有無などから因子を選択する。
- 2)合わせ込み因子の水準数を決める。拘束条件の有無を合わせ込み因子とする場合、2水準となる。拘束条件には並進方向の拘束(並進拘束)と回転方向の拘束(回転拘束)がある。3次元モデルにおいて1つの拘束点について並進拘束と回転拘束全てを合わせ込み因子として取り上げると、計6因子となるので注意が必要である。材料物性を合わせ込み因子とする場合、実験水準数は通常3とする。物性の理論値を第2水準とし、水準幅は材料の本来の物性が大きく異ならない範囲とする。通常は理論値 $\pm 10\%$ 程度を水準幅とする。可能であれば実際の素材の材料特性がばらつく範囲内で水準設定を行うのが望ましい。(拘束条件と材料物性を同時に合わせ込みたい場合、合わせ込み因子間の交互作用の問題もあるがL18直交配列表などの混合系直交表を用いるのが適当であると思われる)
- 3)次に、実機実験で取り上げた信号因子を外側に割付ける。実機実験の際は水準変更が容易な因子( $G$ と表記する)を制御因子の中から選択した(事例ではポンチ押し込み深さ $d$ )。この信号の水準は最適条件に近いと想定される値( $G2$ )を中心に、正方向と負方向に3水準( $G1$ ,  $G2$ ,  $G3$ )を設定する。3水準とする理由はパターン乖離を調査したいからである。信号因子は複数であってもよいが、実

機実験の回数を考えるならば1つがよい。

- 4) 実機実験を行う。少なくとも2回の繰り返しを行うのが好ましい。これは実機実験のばらつきを知り判断の基準にしたいからである。取り上げなかった制御因子は実機実験が容易な水準に固定しておく。例えば最適条件に近いと想定される水準に固定しておく。
- 5) シミュレーションの結果から実機実験の結果を引く。この値がシミュレーションと実機の乖離を表す。この乖離には、平行移動的な乖離(以下、バイアス)と、増減傾向の変化を伴う乖離(以下、パターン)が含まれている。
- 6) シミュレーション技術者は、パターンの変化を嫌う傾向がある。これは、バイアスは補正上の問題であるが、パターン変化はモデルそのものの不適合を表すからである。従って、パターンの変化を伴う乖離を最小にするように合わせ込み因子を調整し、次にそれ以外の合わせ込み因子を使ってバイアスを最小にするように合わせ込み因子を調整する。

以上の実験計画をまとめると表-1 のようになる。合わせ込みのためのシミュレーション実験は、前述した合わせ込み因子を内側因子、信号因子を外側因子とした直積実験となっている。

表 - 1 合わせ込み実験の計画

	実機実験		
ボンチ押込み量	$x_1$	$x_2$	$x_3$
ピン高さ	$y_{0,1}$	$y_{0,2}$	$y_{0,3}$

	CAE解析結果		
ボンチ押込み量	$x_1$	$x_2$	$x_3$
L <sub>18</sub> 等の 混合系計画	$y_{1,1} - y_{0,1}$	$y_{1,2} - y_{0,2}$	$y_{1,3} - y_{0,3}$
	$y_{2,1} - y_{0,1}$	$y_{2,2} - y_{0,2}$	$y_{2,3} - y_{0,3}$
	$y_{3,1} - y_{0,1}$	$y_{3,2} - y_{0,2}$	$y_{3,3} - y_{0,3}$
	$y_{4,1} - y_{0,1}$	$y_{4,2} - y_{0,2}$	$y_{4,3} - y_{0,3}$
	$y_{5,1} - y_{0,1}$	$y_{5,2} - y_{0,2}$	$y_{5,3} - y_{0,3}$
	$y_{6,1} - y_{0,1}$	$y_{6,2} - y_{0,2}$	$y_{6,3} - y_{0,3}$
	$y_{n,1} - y_{0,1}$	$y_{n,2} - y_{0,2}$	$y_{n,3} - y_{0,3}$

## 5. 実際の事例による解析と結果の考察

### 5.1 ワイヤボンディングの共振問題

ここでは、超音波ワイヤボンディングにおけるワイヤの共振問題に関するシミュレーションの合わせ込みを紹介する。ワイヤボンディングとは素子電極と回路電極を結線する微細接合法であり、接合材料としてAlやAuの細線が用いられる。これらの線と電極間とは超音波摩擦圧接によって接合される。

ワイヤボンディングの懸念点の一つにワイヤループの共振に起因するワイヤ損傷がある。この現象はワイヤの一端を接合(以下、1st ボンディング)した後、ループを形成して次の接合(以下、2nd ボンディング)をするときに、2nd ボンディング時の超音波加振によってループが共振し1st ボンディングのネック部が折損するというものである。

この現象は特定のループ形状やボンディング周波数で発生すると考えられるが、ループ形状を決定

するスパン長やスパン高さは製品により変動し周波数は設備で異なるため、あらかじめ共振が生じるループ形状を調べておき、それを避けて製品設計する必要がある。これを実験で確認すると膨大な作業になるため、シミュレーションで調査することにした。シミュレーションの詳細は山崎ら<sup>[6]</sup>が報告している。

### 5.2 合わせ込み因子および信号因子の選定と水準の設定

共振問題の解析で制御因子となるのは、ループのスパン長、スパン高さ、振動数であるので、合わせ込み実験ではこれら以外から合わせ込み因子を選ぶ。本事例では、ループの要素長(メッシュサイズ)、縦弾性率、ポアソン比、質量密度を取り上げた。これらの各水準の値を表-2に示す。

また制御因子の中から信号因子を選ぶ。本事例では周波数を振った。しかし、FEM解析における周波数応答解析では周波数は0～に振れるので、ここでは、周波数120kHzに固定したときに実験の各番号の条件において3～5次の共振が現れるループ長を逆算し、これを標示因子として用い外側に割付けた。外側割付けは3水準とした。

表-2 合わせ込み因子とその水準

記号	因子名	第1水準	第2水準	第3水準
M	要素長	0.05	0.025	
E	縦弾性率	6770.561(=7522.845*0.9)	7522.845	8275.130(=7522.845)
P	ポアソン比	0.297(=0.33*0.9)	0.33	0.363(=0.33*1.1)
N	質量密度	2.682E-10(=2.823E-10*0.95)	2.823E-10	2.964E-10(=2.823E-10*1.05)

: 初期条件

### 5.3 実験の割付けと実験(シミュレーション)結果

実験計画はL18直交表を用い表-2の因子を内側1,3,6,7列に割り付けた。次にそれぞれの条件で周波数を変化させてシミュレーションを行い、周波数120kHzで3～5次共振が現れるスパン長を逆算した。その結果を表-3に示す。

表-3 シミュレーション結果(3～5次共振を生じるスパン長)

	M	E	P	N	振動モード					
					3次	4次	5次			
No.1	1	1	1	1	1	1	1	2.029	3.254	4.326
No.2	1	1	2	2	2	2	2	2.093	3.317	4.401
No.3	1	1	3	3	3	3	3	2.122	3.383	4.477
No.4	1	2	1	1	2	2	3	1.879	3.123	4.193
No.5	1	2	2	2	3	3	1	2.138	3.393	4.478
No.6	1	2	3	3	1	1	2	2.185	3.445	4.552
No.7	1	3	1	2	1	3	2	1.957	3.182	4.250
No.8	1	3	2	3	2	1	3	2.011	3.257	4.335
No.9	1	3	3	1	3	2	1	2.246	3.518	4.623
No.10	2	1	1	3	3	2	2	1.957	3.182	4.257
No.11	2	1	2	1	1	3	3	2.011	3.257	4.349
No.12	2	1	3	2	2	1	1	2.246	3.518	4.623
No.13	2	2	1	2	3	1	3	1.879	3.123	4.193
No.14	2	2	2	3	1	2	1	2.134	3.393	4.478
No.15	2	2	3	1	2	3	2	2.184	3.445	4.552
No.16	2	3	1	3	2	3	1	2.026	3.253	4.326
No.17	2	3	2	1	3	1	2	2.093	3.317	4.402
No.18	2	3	3	2	1	2	3	2.122	3.379	4.477

#### 5.4 合わせ込みの解析

実機実験の結果は表 - 4 の直交表の上欄のとおりである。実機実験の値を表 - 3 の各々の行・列から引いた。結果は表 - 4 に示すとおりである。これをパターンとバイアスに分離して解析した。仁科<sup>6)</sup>は主成分分析の適用を提案した。パターンの大小を表す指標として第 2 主成分得点を、バイアスの大小を表す指標として第 1 主成分を採用するというものである。(実機実験の値が引いてあるとは言え、線形制約を掛けたわけではないので、ムーア・ペンローズの一般化逆行列を持ち出すまでも無い)

表 - 4 各実験番号毎の標示因子水準に対する乖離

	<i>M</i>	<i>E</i>	<i>P</i>	<i>N</i>	実機実験					
					1.950	3.094	4.560			
					3次	4次	5次			
No.1	1	1	1	1	1	1	1	-0.078	-0.159	0.234
No.2	1	1	2	2	2	2	2	-0.142	-0.222	0.159
No.3	1	1	3	3	3	3	3	-0.172	-0.289	0.083
No.4	1	2	1	1	2	2	3	0.071	-0.028	0.367
No.5	1	2	2	2	3	3	1	-0.187	-0.299	0.082
No.6	1	2	3	3	1	1	2	-0.234	-0.350	0.008
No.7	1	3	1	2	1	3	2	-0.006	-0.088	0.310
No.8	1	3	2	3	2	1	3	-0.061	-0.163	0.225
No.9	1	3	3	1	3	2	1	-0.296	-0.424	-0.063
No.10	2	1	1	3	3	2	2	-0.006	-0.088	0.303
No.11	2	1	2	1	1	3	3	-0.061	-0.163	0.211
No.12	2	1	3	2	2	1	1	-0.296	-0.424	-0.063
No.13	2	2	1	2	3	1	3	0.071	-0.028	0.367
No.14	2	2	2	3	1	2	1	-0.184	-0.299	0.082
No.15	2	2	3	1	2	3	2	-0.234	-0.351	0.008
No.16	2	3	1	3	2	3	1	-0.075	-0.159	0.234
No.17	2	3	2	1	3	1	2	-0.142	-0.222	0.158
No.18	2	3	3	2	1	2	3	-0.172	-0.284	0.083

分散 = 1.0      表示サンプル数: 18 / 18      出力基準値: 0.00

No	サンプル名	主成分1	主成分2	主成分3
1	サンプル1	0.515	-1.434	-0.394
2	サンプル2	-0.028	-1.715	0.948
3	サンプル3	-0.504	0.690	-0.314
4	サンプル4	1.615	1.445	-0.267
5	サンプル5	-0.569	-0.238	-1.635
6	サンプル6	-1.037	0.528	1.380
7	サンプル7	1.102	-0.722	-0.495
8	サンプル8	0.519	0.345	-0.755
9	サンプル9	-1.593	0.385	-0.577
10	サンプル10	1.081	-0.390	0.659
11	サンプル11	0.477	1.008	1.552
12	サンプル12	-1.593	0.385	-0.577
13	サンプル13	1.615	1.445	-0.267
14	サンプル14	-0.562	-0.011	-1.798
15	サンプル15	-1.039	0.544	1.150
16	サンプル16	0.522	-1.207	-0.557
17	サンプル17	-0.031	-1.668	1.113
18	サンプル18	-0.490	0.610	0.837

図 - 4 各実験番号の主成分得点

要因	平方和	自由度	分散	F0	検定	P値（上側）	寄与率
A	0.11392	1	0.11392	0.17855		0.682	-3.1
B	2.63513	2	1.31756	2.06496		0.178	8.0
C	0.04497	2	0.02248	0.03524		0.965	-7.2
D	7.82270	2	3.91135	6.13007	*	0.018	38.5
誤差 <sub>e</sub>	6.38060	10	0.63806				63.8
合計	16.99731	17					100.0

図 - 5 パターン(第2主成分得点)に関するANOVA

要因	平方和	自由度	分散	F0	検定	P値（上側）	寄与率
A	0.00009	1	0.00009	0.42733		0.528	-0.0
B	13.46295	2	6.73147	12361.12067	**	0.000	79.2
C	0.00013	2	0.00007	0.31809		0.735	-0.0
D	3.53442	2	1.76721	8495.75130	**	0.000	20.8
誤差 <sub>e</sub>	0.00208	10	0.00021				0.0
合計	16.99967	17					100.0

図 - 6 バイアス(第1主成分得点)に関するANOVA

これ以降は、JUSE-STATWORKS Ver.4(以下、STATWORKS)を用いて解析した。主成分分析を行い第1,第2主成分得点を求めた結果を図-4に示す。この値をSTATWORKSの実験計画法のルーチンに計測特性として入力し、内側の合わせ込み因子について分散分析表を作成した。パターンに関する分散分析表を図-5に、バイアスに関する分散分析表を図-6に示す。

まず、図-5はパターンの乖離を小さくする要因を検討した結果だが、合わせ込み因子の中では要因D(N:質量密度)が有意であり、これを変更すればよいことがわかる。要因効果図を見ると、D1のとき第2主成分得点が一番0に近いのでD1を採用する。

次に、図-6はバイアスを小さくする要因を検討した結果だが、要因B(E:縦弾性係数)が有意であり、これを変更すればよいことがわかる。要因効果図を見ると、B2のとき第1主成分得点が一番0に近いのでB2を採用する。ここで、要因Dも有意であり、D2のとき第1主成分得点が一番0に近くなるが、Dは既にパターンの最小化に用いたので動かしてはならない。また、有意な要因以外はなるべく初期条件を用いることとすべきである。

以上より、合わせ込み結果はA1B2C2D1となった。シミュレーションで検証したところ、ほぼ満足できる結果であった。

さらに細かい調整が求められる場合は、水準の選択ではなく、応答曲面を用いて詳細に合わせ込み因子の値を変更するという応用も考えられる。ただし、この場合はオーバーフィッティングに注意が必要である。今回は実機実験の誤差が測定できない状況であったが、誤差が分かっているならば、合わせ込みの程度は誤差の範囲内に入るかどうかというところに留めておき、非現実的な材料物性などを与えないように配慮すべきである。

## 6. まとめ

本報では、シミュレーションモデルの合わせ込みに関する問題を解決するために実験計画法を活用した合わせ込み方法を提案した。

合わせ込みに関する研究はこれまでほとんど公開されてこなかった。近藤<sup>[7]</sup>の研究がその第一歩である。本報は近藤の研究を下敷きにした。本報が今後のさらなる研究の活発化につながることを望まれる。

従来の合わせ込みは、技術者の経験や勘という曖昧なものによって行われていたため、下記(1)~(3)のような問題があった。また、合わせ込みに関するその他の問題として(4)もあった。



- (1)合わせ込み段階のシミュレーション実験の非効率
- (2)合わせ込み結果のばらつき
- (3)再現性の問題
- (4)シミュレーションや実機実験に問題があるにも関わらず、それに気付かず合わせ込もうとしてしまう

提案方法を実機事例に適用し、検証した結果、(1),(2),(4)について有効であることが確認できた。従って、提案方法を活用することにより次の効果が期待できると言える。

- ・シミュレーション実験の効率化
- ・合わせ込みにかかる時間や結果のばらつきの縮小
- ・シミュレーション自体の間違いや実機実験の不安定性の検出

なお、今回適用した事例では(3)についての有効性を確認することはできなかった。

また、今回の提案方法は、機械的に用いればすぐに合わせ込みが完了するというものではなく、これまで CAE 技術者が行っていた合わせ込み方法を手助けするためのツールと考えるべきである。現実の問題に対しては、事例のように柔軟に活用して初めて効果がある。

今後の課題としては、別の実機事例による(3)の検討、パターンの違いとバイアスに影響する因子が分離できないときの対処、多特性の場合の合わせ込みなどが挙げられる。

#### [参考文献]

- [1]日本機械学会編[1999]，“応答曲面法による非線形問題の最適設計入門”，講習会教材
- [2]日経デジタルエンジニアリング[2000]，“注目企業にみる IT 活用戦略 Part1 自動車 ”，No.2,70-85
- [3]溶接学会編[2004]，“特集 ”最適化の手法と適用 ” ”，溶接学会誌，Vol.73，No.3，5-27
- [4]Patrick J. Roache [1998]，“Verification and Validation in Computational Science and Engineering ”，Hermosa Publishers
- [5]山崎康櫻，増田道広，吉野睦[2005]，“ AI ワイヤボンディングにおけるループ共振の解析 ”，溶接学会 11th Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics ” (Mate2005) 講演予稿集，409-412
- [6]仁科健[2006]，private communication
- [7]近藤聡[2006]，名古屋工業大学経営工学科修士論文

掲載されている著作物の著作権については，制作した当事者に帰属します．

著作者の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず，本著作物の複製・転用・販売等を禁止します．

所属および役職等は，公開当時のものです．

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>