

博士論文

回転成形解析用 FEM モデルの微小角軸対称構造化による
成形性検討の効率・高速化研究

A Study on Efficient and Fast Analysis for Rotary Forming
with Minute-Angle Axisymmetric FEM model

横浜国立大学大学院
工学府 システム統合工学専攻

有吉 智彦
Tomohiko Ariyoshi

2015 年 12 月

第1章 緒言	1
第2章 回転成形におけるブランク変形と解析の基本手法	23
2.1 回転成形（転造，ボスフォーミング，回転スプリッティング）におけるブランク変形	24
2.2 回転成形解析モデルの微小角軸対称構造化に対する基本手法	24
2.2.1 転造，ボスフォーミング，回転スプリッティングに共通な変形現象とモデル化方策	24
2.2.2 角速度場設定の具体的方法	25
第3章 転造解析用微小角軸対称構造モデルの開発	27
3.1 緒論	28
3.2 転造における変形現象把握のための基礎実験	28
3.3 転造解析用モデルのモデル化参照実験	31
3.4 ロール接触によるブランク変形	32
3.5 計算モデル構築の考え方	32
3.5.1 計算モデルの微小角軸対称構造モデル化の考え方	32
3.5.2 ロール押込み変形に伴うブランクの径方向反力	33
3.5.3 径方向せん断力の計算モデルへの導入	34
3.5.4 周方向せん断力の計算モデルへの導入	36
3.6 計算モデル作成	38
3.6.1 微小角軸対称構造モデルの構成と形状	38
3.6.2 ロールモデル駆動とブランク角速度場の設定	39
3.6.3 実験モデルによる検討	40
3.7 計算結果と実験結果の突合せ	40
3.8. 考察	44
3.8.1 実験モデルからの知見	44
3.8.2 計算モデルからの知見	47
3.9. 結論	51
第4章 ボスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデルの開発	52
4.1 緒論	53
4.2 モデル化参照実験	53
4.3 ボスフォーミングにおけるブランク変形	53
4.4 微小角軸対称構造モデルの構築方法	54
4.4.1 接触領域上側のモデル化の考え方	54
4.4.2 接触領域上側のモデル化の具体的方法	54
4.4.3 接触領域下側のモデル化	55
4.4.4 周方向せん断力の計算モデルへの導入	56
4.5 計算モデル作成	56
4.5.1 計算モデルの構成と形状	56
4.5.2 ロールモデルの構成と駆動方法	57
4.5.3 角速度場領域および角速度場中心の設定	58

4.6 計算結果と実験結果の突合せ	58
4.7 考察	59
4.8 結論	61
第5章 回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデルの開発	62
5.1 緒論	63
5.2 モデル化参照実験	63
5.3 モデル化方策の検討	65
5.4 計算モデルの形状・駆動条件	66
5.5 計算結果	67
5.6 考察	69
5.7 結論	72
第6章 結言	73
参考文献	76
謝辞	78
付録	79

第 1 章

緒 言

第1章 緒言

塑性加工の一種である回転加工は、航空機・自動車等の機械部品での円形・円環形状部品の製造において、そのネットシェイピング性や表面性状の良好性また駆動エネルギーの少量性等からよく用いられており、今後もさらに幅広く活用されて行く生産技術手段であると考えられる(Fig. 1-1 参照)⁽¹⁾。ただし部品製作工程における回転加工の適用にあたっては、金属加工法としての変形現象の実態・メカニズムの把握があつて初めて効率良く低コストな適用が進められるため、これまでその変形現象の把握・解析が広く進められて来た。そしてそれらが大変形を伴う複雑な3次元弾塑性応答であることから、通常材料力学適用では十分でなく、これまで**スラブ法**、**すべり線場法**、**エネルギー法**、**上界法・下界法**等も用いられた。

しかし、近年のコンピュータおよび解析ソフトウェア技術の飛躍的進歩から、この分野においても有限要素法(FEM)を用いた検討ツールである、いわゆる CAE(Computer Aided Engineering)解析コードが相次ぎ開発された。同時に、前処理／後処理ソフトを含めソフトウェアの使用性の向上もあり、現在では工学系技術を目指すだけでもが身近に使用し得るものとなって来た。無論 CAE 技術も万能ではなく、解析コード自体が内包する限界を始めとし、基本前提や設定条件の数値化また解の収束性判定等で誤った判断をした際は、実態と異なる結果を得てしまう危険性が存在することにも注意を要する。ただ日本のものづくりの絶えざるグローバル化、あるいは新興国家群の急速な技術進展等を考えた場合、やはりこのような懸念を了解・把握しながらも、新進・新鋭の技術をうまく使いこなし、製品の信頼性を保持しながら、ものづくりにおける開発検討の簡潔化や開発リードタイムの削減等の方策を積極的に考案し、推進して行く必要があると言えよう。

以上のような考え方から、本博士課程研究では、ものづくりにおいて重要な生産技術のひとつである回転成形の現象解析技術の向上および解析効率の向上に資することを考え、回転成形解析に対する工夫され有効性の高い CAE 解析手法を提案し、製品開発のレベル向上に寄与したいと考えた。具体的には本来は3次元解析を行うべき検討対象に対し、実用精度を保持した上で次元を下げた形の解析モデル<微小角軸対称構造モデル>を開発し、製品設計・生産準備に向けた CAE 解析適用の簡潔化・効果増大を実現することを狙う。

検討対象として回転成形のうち①ねじ**転造**、②ボス**フォーミング**、③回転**スプリッティング**の3形態を選び、まず解析モデルの構成を高速計算が可能なく微小角軸対称構造>と定めた上で、モデルに特殊な拘束あるいは負荷を加えることにより実用的で高効率なモデルを構築することとする。Table 1-1 は Fig. 1-1 の回転加工の分類をブランクの形態と負荷方向によりまとめ直したものであるが、上記3形態の回転成形はこの表の①に属する<転造系>とも呼ぶことができる。逆に言えば、同等の基盤技法(角速度場法、後述)を用いているため、類似性の高いこれら3形態への適用が可能となったということもできる。なおモデルの効率性の指標として計算時間を考え、通常の3次元解析モデルの場合の1/1000以下の計算時間とすることを目標とする。

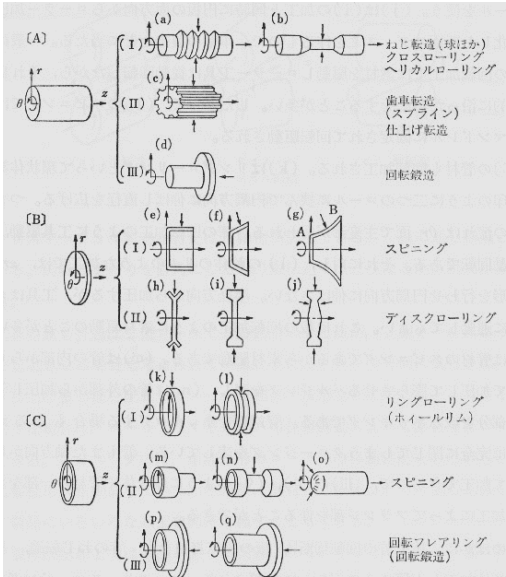


Fig. 1-1 回転加工の分類(φ-ル自由度; r, θ, z)⁽¹⁾

Table 1-1 今回検討対象成形(転造系)の回転成形分類の中での位置付け

ブランク形態_負荷方向	駆動関係		加工名
	駆動品／駆動中心	従動品／ブランク負荷面	
①丸棒・円板_径押し	ブランク／中心軸	ロール／外周	転造系(ねじ転造, ボスフォーミング, 回転スプリッティング)
②厚肉円板_径・軸押し	ブランク／中心軸	ロール／外周・軸直交面	ディスクローリング
③円板_径・軸押し	ブランク／中心軸	ロール／ブランク一般面	スピーニング
④丸棒・厚肉円板_軸押し	ブランク／中心軸	ロール／軸直交面	回転すえ込み
⑤リング体_径・軸押し	ロール／不定	ブランク／内外周・軸直交面	リングローリング

これまで回転成形の基盤をなす金属接触変形の理論解析・実験検討あるいは変形・荷重等を検討した実験検証や数値解析・CAE 解析が研究論文として多く発表され、一部を本研究の参考資料としているので、研究との関連性を考えながらそれらの内容・経緯を調べた結果につき、体系的を考えながら以下に記述する。

最初に考え方であるが、本研究はモデル化検討対象として、前述したように転造系とも言える回転成形(ねじ転造、ボスフォーミング、回転スプリッティング)を選択しているが、これらの加工時の負荷・変形内容の共通性はく回転体ブランクの周辺面がブランクと平行軸を持つローラーから径方向内向きに押されることによって塑性変形を起こしたブランク材料が径方向や軸方向に流動する変形であるといえる。もちろんブランク材料は一方向回転、塑性接触、度重なる逐次変形といった変形属性から軸回り変形(周方向変形=捩れ)も生じるが、これは前2者と比べ量的に少ないため本研究では微量量として無視することとする。

回転成形において本研究に最も関連の深い分野としては Fig. 1-1 の分類に沿えば、丸棒材・円板材の回転成形すなわち転造・ディスクローリングであり、本研究では厚肉材料の材料流れを追跡する解析検討が主体ではあるものの、まずは工法として歴史が深く、その変形現象についても多くの知見が得られているスピニングについて紹介することとし、続いて、ロールの主たる変形自由度は本研究と異なるが接触変形問題で厚肉材料の材料流れの問題が含まれる分野である回転鍛造(すえ込み鍛造等)について紹介し、最後に今回の研究に最も関連が深い、転造・ボスフォーミング(丸棒(円板)状ブランク×丸棒(円板)状ロールの周辺面・軸直交面接触変形)を含む転造系成形に関する研究につき、基礎的な接触理論も含めて紹介して行くこととする。

まず最初に、スピニング加工についての研究論文について時系列的に紹介する。1960 年代に国内でスピニング加工に対する実験解析・検討が多く見られるようになった。1963 年に葉山らはスピニング加工の一種である回転しごき加工について変形の特徴を明らかにする実験調査を行った。ブランクにはアルミニウムの押出し棒と鍛造品を用意し、単一ロールと支えロールにより変形を起こさせ、表面形状の変化・加工力等を求めた。累積される各方向のせん断変形が大きいことや加工時の三分力の現れ方等について、多くの基本的な知見が示された (Fig. 1-2~Fig. 1-4)⁽²⁾。この Fig. 1-4 にはしごきスピニング加工での周方向変形分布の貴重な実験結果が示されており、ブランクの軸回り捩り変形の量が最終的にもそう大きくない状況が示されている。

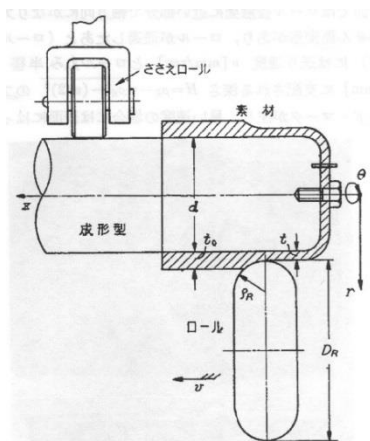


Fig. 1-2 回転しごきスピニング事例⁽²⁾

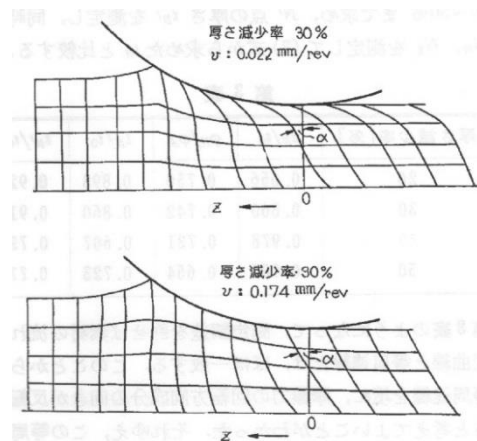


Fig. 1-3 しごきスピニング断面変形⁽²⁾

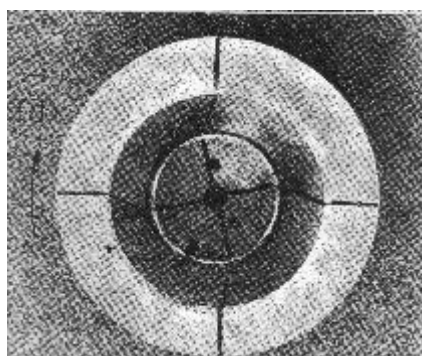


Fig. 1-4 しごきスピニング周方向変形⁽²⁾

〔 ロールは矢印のように
時計回りに相対回転 〕

また葉山らは1970年にはしごきスピニングにおいて加工力や表面品質に影響のある潤滑剤につき調査・理論検討を行い、製品の表面性状に応じた潤滑剤と加工条件の選定に対する指針を得た(Fig. 1-5～Fig. 1-7)⁽³⁾。

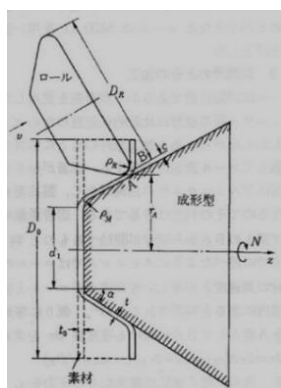


Fig. 1-5 しごきスピニング⁽³⁾

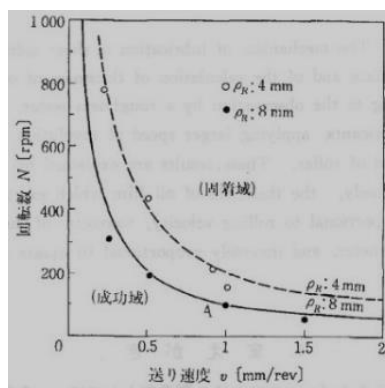


Fig. 1-6 固着限界を示す N - v 曲線⁽³⁾

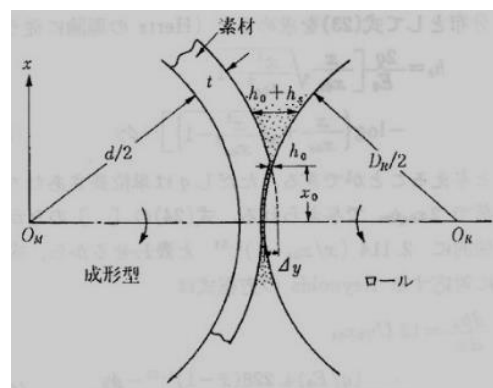


Fig. 1-7 回転成形における潤滑機構⁽³⁾

さらに葉山は1978年にスピニング加工の潜在的効用と今後の活用を考え全国のスピニング関係業者へのアンケート調査を実施した。適用範囲の広さ、適用時の問題点等もわかる貴重な資料であり、今後の期待として自動機械化(NC化)の拡大等を挙げた(Table 1-2, Table 1-3, Fig. 1-8)⁽⁴⁾。

Table 1-2 製品の種類⁽⁴⁾

製品の種類	件数	比率[%]
機械部品	78	37.1
照明器具	36	17.1
家庭用品(什器)	31	14.8
圧力容器	26	12.4
通信機(含音響)	13	6.2
理化学器械	6	2.9
計器部品	4	1.9
楽器	3	1.4
その他(インテリア、雑貨)	13	6.2
合計	210	100.0

Table 1-3 形状の分類⁽⁴⁾

形状の種類	件数	比率[%]
円すい形状 ⁽¹⁾	73	34.3
プロフィール	58	27.2
底付き円筒 ⁽²⁾	56	26.3
管形状	25	11.7
その他 ⁽³⁾	1	0.5
合計	213	100.0

- (1) 優勝カップ形状を含む。
 (2) 鍍板を含む。
 (3) 特種加工のブリー。

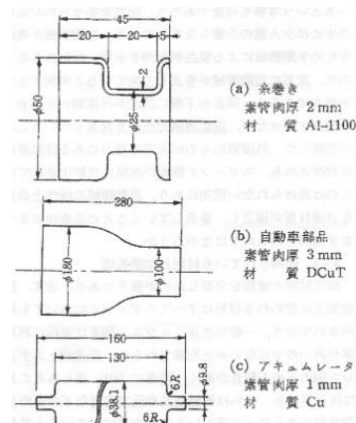


Fig. 1-8 管状素材を使ったスピニング例⁽⁴⁾

同じく葉山は1980年に議論を深め、スピニング加工適用の現状から、独特な加工方法に由来する特長・短所を示し、この加工方法が多種中少量生産向きであることを示した。また材料が高強度(高変形抵抗)、低延性であっても加工条件の適正な設定によって加工限界を制御できる等の原理から、自動機械(NC機)の隆盛化を含め、さらにスピニング加工法が広く使用される可能性を示した(Fig. 1-9, Fig. 1-10, Table 1-4)⁽⁵⁾。

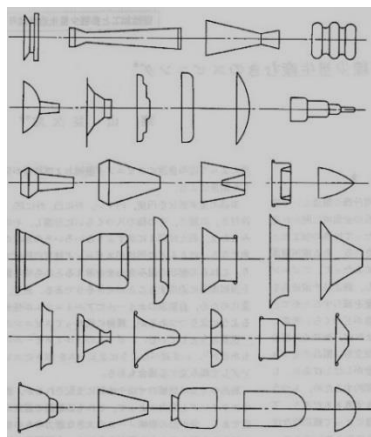


Fig. 1-9 スピニング製品の形状例⁽⁵⁾

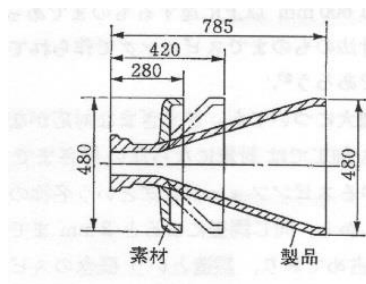


Fig. 1-10 タービン軸のしごきスピニング⁽⁵⁾

Table 1-4 1 か月あたりの生産個数⁽⁵⁾

生産個数[個]	件数	比率[%]
10	4	3.7
50	14	13.1
100	6	5.6
300	24	22.4
500	17	15.9
1000	11	10.3
3000	16	15.0
10000	10	9.3
10000以上	5	4.7
合計	107	100.0

一方この時期はスピニング加工用機械の発展が著しく 1983 年には斉藤は数値制御スピニング加工機の現状を示し高精度化技術や制御技術(ロールパス自動プログラミング等)の内容と状況について述べた。適切な機械選択, 生産計画立案・制御方式設定で数値制御スピニング加工の利点を引き出せるとした(Fig. 1-11, Fig. 1-12)⁽⁶⁾。

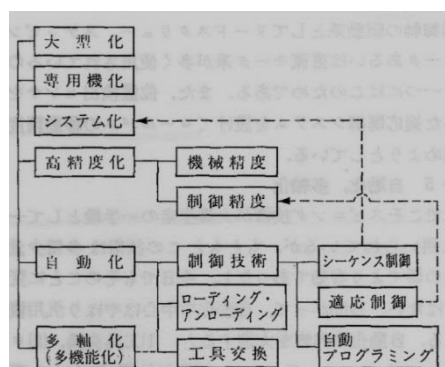


Fig. 1-11 スピニング加工機の発展項目⁽⁶⁾

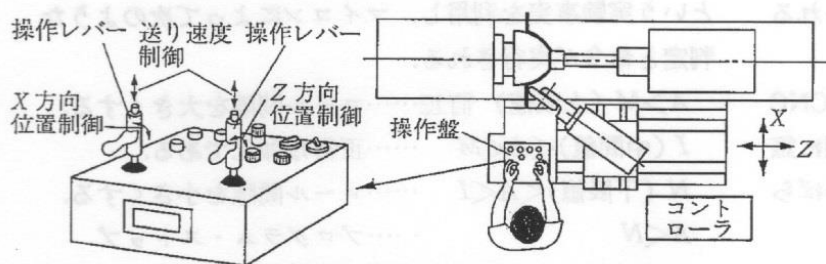


Fig. 1-12 copying system 方式スピニング加工機⁽⁶⁾

さらにスピニング加工の高精度化の動きがあり, 1988 年に馬場は回転加工におけるスピニングの位置付け・分類を示し, 手法の普及状況・高精度化の動きを説明した上で高精度化の事例としてディスクホイール等を挙げ, 今後の課題として重変形加工等の技術開発やハードとしての高度 NC 化等の重要性を挙げた(Table 1-5, Fig. 1-13, Fig. 1-14)⁽⁷⁾。

Table 1-5 スピニングの適用分野⁽⁷⁾

	用途区分	主な加工製品
①	家庭用器物・厨房用品	ケトル・鍋・炊飯器・魔法瓶・フライパン・ポット・皿・シエーカー・ボール・おひつ
②	電気器具・照明器具・音響製品	冷蔵庫用アキュムレータ・掃除器・ランプシェード・ストーブ外筒・脱水かご・スピーカ
③	自動車・オートバイ部品	ブレーキシュカパー・ソフトバイクリム・Vプーリ・フロントフェンダ・フェンダミラー・オートバイマフラー・プロペラシャフト・アルミホイール・スチールホイール
④	産業用機器・部品	コンクリートミキサ・コンプレッサボディ・送風機・攪拌機・遠心分離機・ボイラ鏡板・コンクリートパイルコーン・スライディングノズル・ベアリングリテーナ・ガスポンペ
⑤	その他	航空機部品・酪農容器・ハイウェイミラー・複写機ローラ・椅子ベース・フランジ・プッシュ・リヤウインド用ステー・ボール・ケーブルジョイント・金属バット

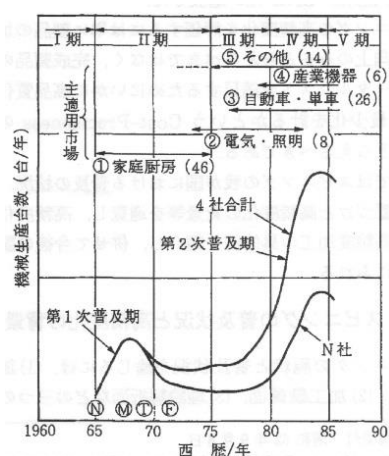


Fig. 1-13 スピニング機械の生産推移と適用市場⁽⁷⁾

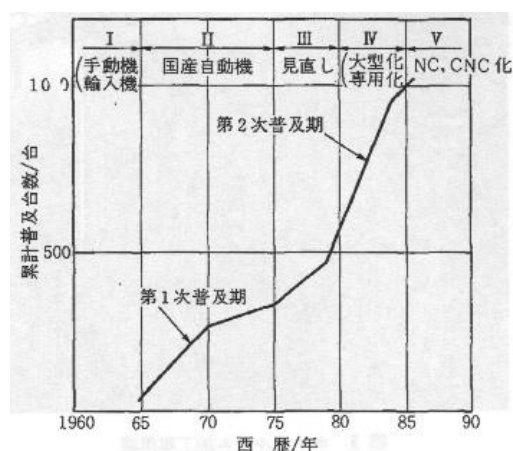


Fig. 1-14 スピニング設備の普及推移⁽⁷⁾

一方スピニングの管材加工応用であるが 1989 年に真鍋は管材の端末成形法としてプレス加工, 回転加工を取り上げているが, 条件によっては回転加工はプレス成形よりも加工限界が高くできるとした(Table 1-6)⁽⁸⁾。

Table 1-6 円錐状口絞りで生じる座屈(しわ)および不良変形の様式⁽⁸⁾

発生箇所	成 形 部				円 筒 部	
モード	①	②	③	④	⑤	⑥
形 態						
成形条件	$\phi < \text{約} 20^\circ$	$\text{約} 30^\circ < \phi$	$\text{約} 30^\circ < \phi$	$\text{約} 60^\circ < \phi$ 外側拘束, 潤滑良	自由口絞り (拘束工具なし)	外側拘束口絞り
材 料	硬質材 (n 値: 小) t_0/D_0 : 小 注)	硬質材 (n 値: 小) t_0/D_0 : 小	—	—	軟質材 (n 値: 大)	軟質材 (n 値: 大)

(注) t_0/D_0 が大でも高加工度になると発生。

同じ 1989 年に、川井はスピニング加工の歴史的経緯から始め、主な加工法である絞りスピニング、しごきスピニング、回転しごき加工、フランジング等について特長・加工限界等につき詳述し、また材料別の成形難度についても比較した上、多種少量生産の有効な手段としての特徴も併せ記した(Fig. 1-15, Fig. 1-16)⁽⁹⁾。



Fig. 1-15 スピニングを描いた中世ヨーロッパの木版画⁽⁹⁾

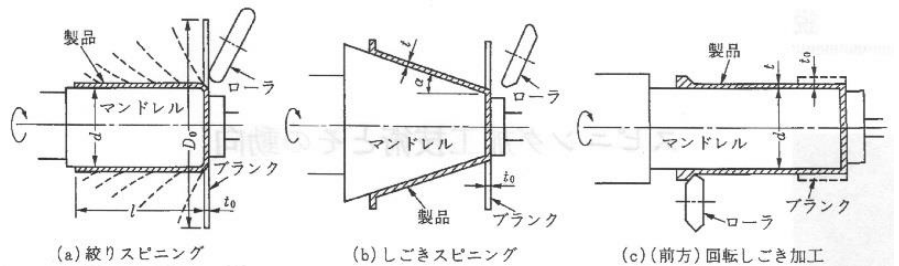


Fig. 1-16 スピニングの基本的加工法⁽⁹⁾

この頃スピニング加工事例の発表が多彩となり同じ 1989 年に北澤は円管末端に対する回転成形法として工具形状・運動や円管末端の変形機構の相違によりスピニング成形、偏心回転成形、マルチ・ローラ成形、全面接触型回転成形(チューブスピニング)、揺動回転成形、パンタグラフ型回転成形等と称されるものがあるとし各成形法の得失を論じ中でも揺動回転成形の生産手段としての好制御性に注目した(Fig. 1-17, Fig. 1-18)⁽¹⁰⁾。

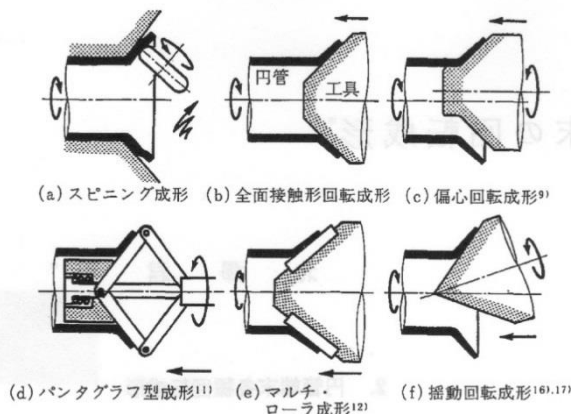


Fig. 1-17 円管末端回転口広げ成形法の事例⁽¹⁰⁾

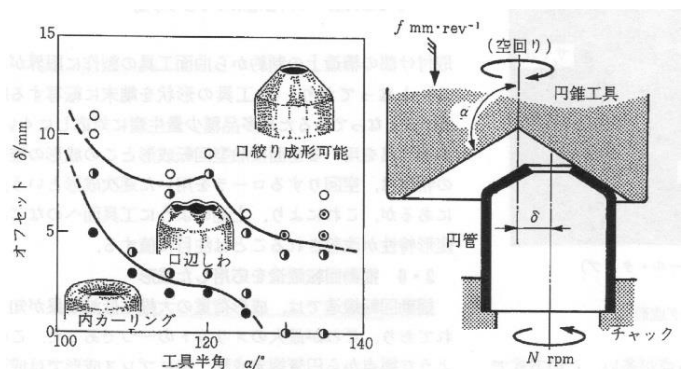


Fig. 1-18 偏心回転口絞り成形における変形モードの変化に対するオフセット(δ)の影響⁽¹⁰⁾

1993 年には知識工学的手法の有効利用の論文が発表された．川井はスピニング加工へのこれによるインテリジェント化の手法をまとめた．スピニング機械，制御技術(CNC 方式，PNC 方式等)も重要だがスピニング技術そのもののインテリジェント化が最重要とし，事例として絞りスピニングのローラーパスプログラミングを具体的に論じ加工事例やトラブル対策技術のデータベース等も必要であるとした(Fig. 1-19, Fig. 1-20)⁽¹¹⁾．

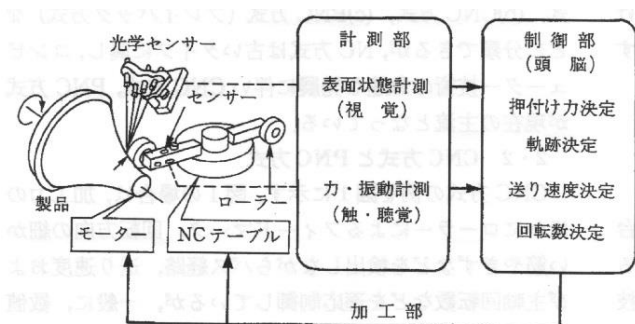


Fig. 1-19 加工力と表面状態を基準とする適応制御⁽¹¹⁾

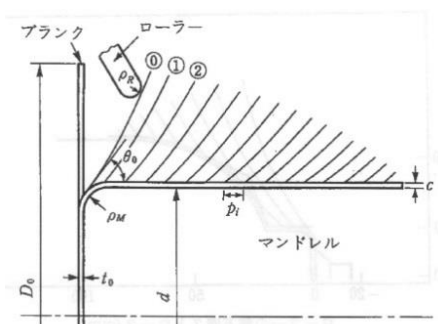


Fig. 1-20 円筒状製品の多サイクル絞りスピニング⁽¹¹⁾

これと前後して，スピニング加工の制御技術の進展も著しくなった．1994 年に川井は前年の論考に続き，インクリメンタルフォーミング(逐次変形加工)中で多くの割合を占めるスピニングの分野において，そのインテリジェント化(知識データベースの構築等)，フレキシブル化(ダイレスしごきスピニング，2 個のローラーによるしごきスピニング等)について今後の技術的な可能性について大きな期待を寄せた(Fig. 1-21, Fig. 1-22)⁽¹²⁾．

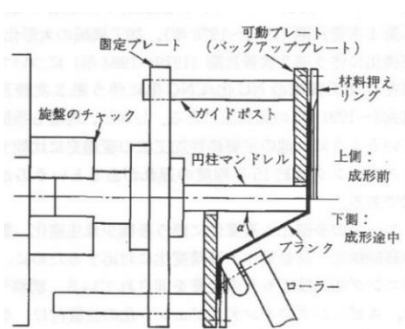


Fig. 1-21 ダイレスしごきスピニングの工具構造の概略⁽¹²⁾

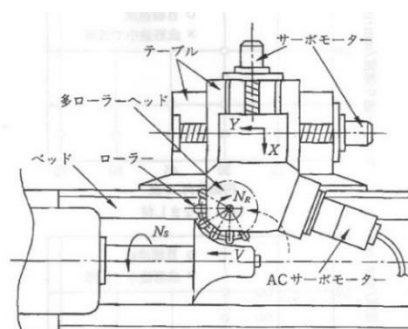


Fig. 1-22 多ローラーヘッドによる回転絞り加工⁽¹²⁾

スピニングの管材適用であるが，1997 年に蔡らは工業製品の多品種少量生産の要請に対応して，管材の断面を任意に変えられる CNC スピニング加工機を開発し，アルミニウム円管に対して所定の変断面形状の加工実験を行った．適切な逐次加工を行った結果，比較的小さい荷重で加工を進められ，ローラーピッチに対する加工力，縮管率，表面粗さ等に対する知見を得た(Fig. 1-23, Fig. 1-24)⁽¹³⁾．

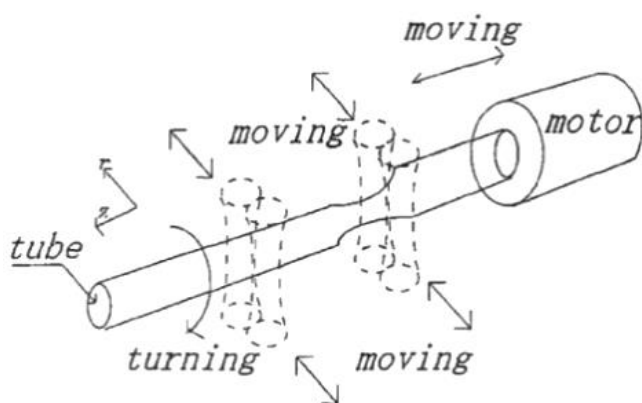


Fig. 1-23 スピニング管の可動軸断面法⁽¹³⁾

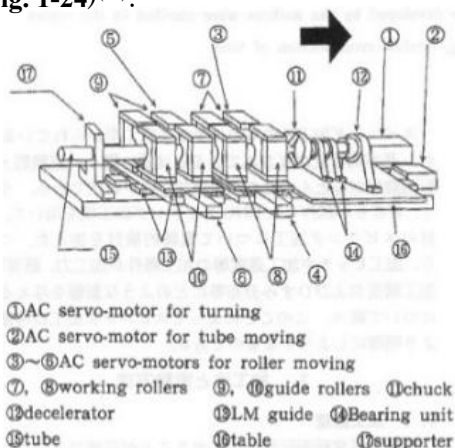


Fig. 1-24 スピニング加工機の構成⁽¹³⁾

さらに技術開発が続き、1997年に島らはスピニング加工において、マンドレルを用いずに1対のローラーを用いるフレキシブルスピニング加工法によりアルミニウム円板のしごきスピニング加工の実験を行い、内外ローラーの適正な駆動により狙った形の円錐台形状の製品が得られることを示した(Fig. 1-25, Fig. 1-26)⁽¹⁴⁾。

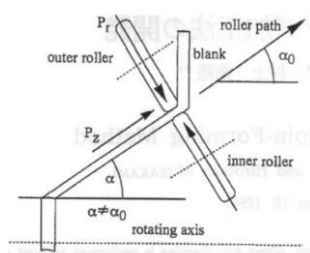


Fig. 1-25 フレキシブルスピニング加工の原理⁽¹⁴⁾

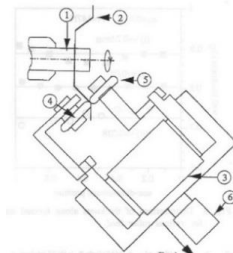


Fig. 1-26 空気ハットを持つローラーシステムの図解⁽¹⁴⁾

- ①軸、②ブランク、③空気ハット、
④アウターローラー、⑤インナーローラー
⑥ステッピングモーター

スピニング加工法は適用範囲増大も活発化し、1998年には前田らは塑性加工のネットシェイプ化技術の向上策のひとつとして、板材の絞り加工や鍛造に技術開発の期待が注がれているとし、オートマチックトランスミッションの円筒状歯形部品の板金化を例に取り現状技術を説明した。個別技術として、グローブ転造、スピニング、カム歯形成形、絞り歯形成形等があり、また増肉歯形成形技術としては座屈現象を利用したもの、リングギヤと一体化させる方式等があるとした(Table 1-7, Fig. 1-27, Fig. 1-28)⁽¹⁵⁾。

Table 1-7 各種板金歯形成形工法⁽¹⁵⁾

項目	(a) Grob 転造	(b) スピニング	(c) カム歯形成形	(d) 絞り歯形成形
1. 工法概要	ローラー マンドレル 製品	歯形 製品 ローラー (3ヶ所) マンドレル	パンチ 製品 カム刃	ダイ 製品 パンチ
2. 特徴	<ul style="list-style-type: none"> 工具がシンプル 深絞り形状部品の成形が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 工具がシンプル 外形が円筒で内歯部品の一体化が可能 	<ul style="list-style-type: none"> プレスによる高生産性 歯形前素材の板厚管理要 カム刃の精度管理、金型の高剛性化要 	<ul style="list-style-type: none"> プレスによる高生産性 型かじり対策要 歯形前素材の潤滑処理 歯形成形の多工程化等

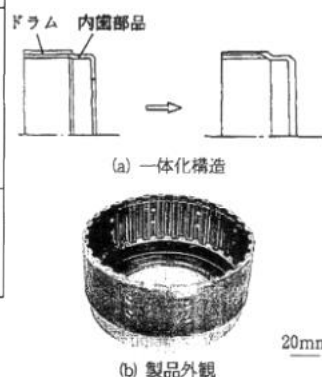
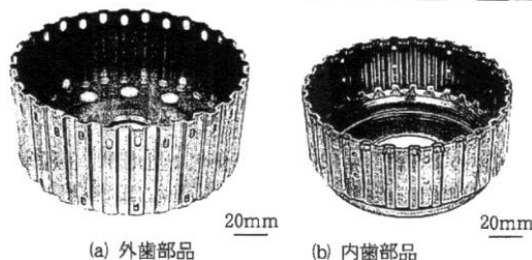


Fig. 1-28 スピニング成形部品⁽¹⁵⁾ ↑



←Fig. 1-27 グローブ(Grob)転造成形部品⁽¹⁵⁾

2000年代に入り、スピニングと他の回転加工を混合して行う複合加工が隆盛し始めた。2000年に好井らはトラック・バス用大型ホイールディスクの軽量化・コスト低減から揺動鍛造等によるホイールディスク成形検討を行い、限界傾斜角度や中間工程での好ましい形状等を検討し実車搭載に漕ぎ着けた(Fig. 1-29, Fig. 1-30)⁽¹⁶⁾。

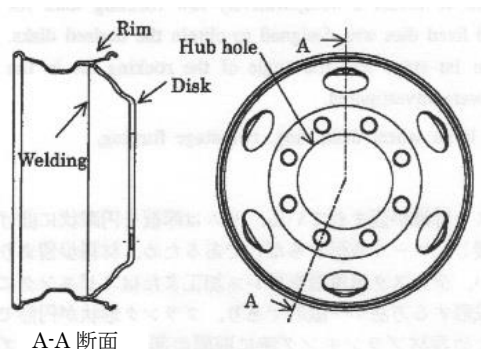


Fig. 1-29 トラック・バス用鉄鋼ホイール⁽¹⁶⁾

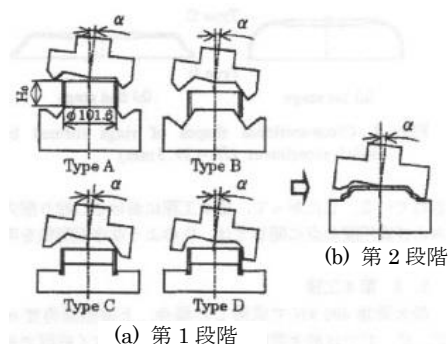


Fig. 1-30 モデル実験用ロックングダイ⁽¹⁶⁾

この検討は翌年も発表され、2001年に海老原らはトラック・バス用大型ホイールディスクの成形性検討のため、軸対称要素モデルによる剛塑性有限要素法によるシミュレーション検討を行い、しわ・破断の起こらない適正強度・軽量なホイールディスクの工程設計検討を実施し、また量産品生産での限界特性を導入する形で生産性の良い部品開発を行えることを示した(Fig. 1-31, Fig. 1-32)⁽¹⁷⁾。

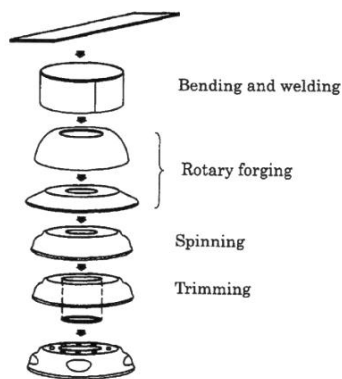


Fig. 1-31 バス・トラック用中央孔付きホイールディスクの生産工程⁽¹⁷⁾

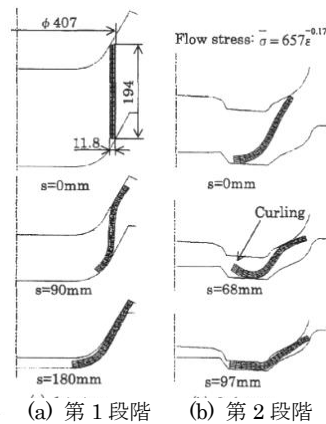


Fig. 1-32 軸対称 FEM 計算での要素メッシュの歪み⁽¹⁷⁾

2001年にはスピニングに新しい工法が現れた。一般的なスピニング加工では、マンドレルを設定し、それにブランク面を押し付けていくが、島らはローラーとマンドレルで挟む代わりにローラー2個でブランクを挟む方式をフレキシブルスピニングとして、この方式での精度良いスピニング加工を行うための、内側のローラーの最適な駆動方法につき検討した(Fig. 1-32, Fig. 1-33)⁽¹⁸⁾。

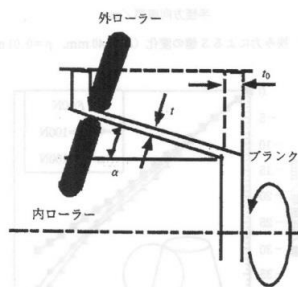


Fig. 1-32 フレキシブルスピニングの原理⁽¹⁸⁾

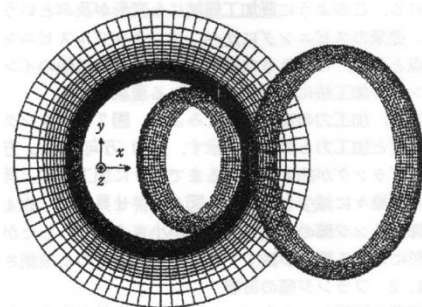


Fig. 1-33 有限要素モデル⁽¹⁸⁾

さらに新たな形として加工方案の複合化も始まった。2002年に西山はスピニング加工技術にはハブ成形、スピニング成形、ロール成形、フロー成形が含まれこれらを組合せネットシェープ化、部品複合化、納期短縮、効率的製造工程が可能としてプーリー、外歯付き・内歯付き部品の加工例を紹介した(Fig. 1-33, Fig. 1-34)⁽¹⁹⁾。

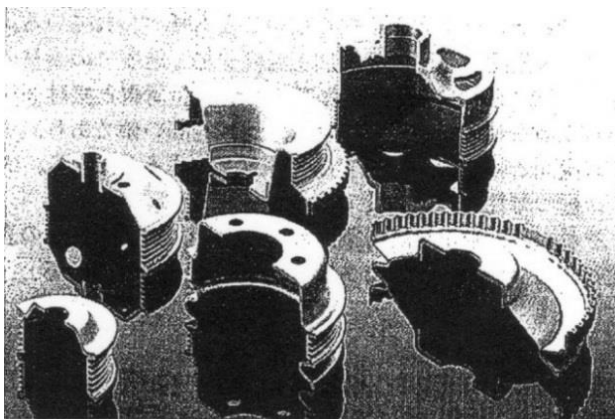


Fig. 1-33 スピニング加工を適用した部品例⁽¹⁹⁾

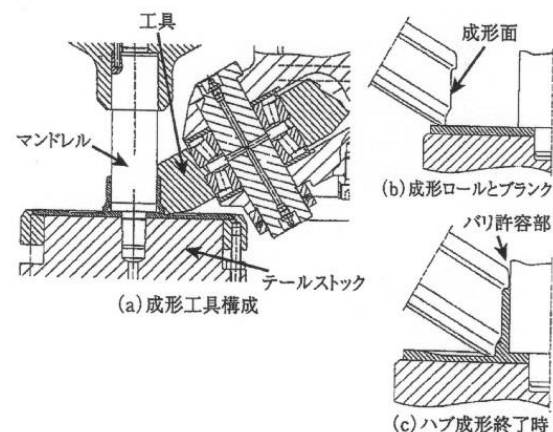


Fig. 1-34 ハブ成形の工具と成形工程⁽¹⁹⁾

スピニング加工に対する FEM(Finite Element Method)適用も多く見られるようになった。2006 年に木原らはステンレス円管の端部絞りにおける変形解析を実験とシミュレーション(RADIOSS 使用)で行った。ローラーは円管軸回りの螺旋駆動と軸方向往復駆動をさせた。ローラーの送りピッチが過大となると円管端部のしわが出やすくなる等の知見を得た(Fig. 1-34, Fig. 1-35)⁽²⁰⁾。

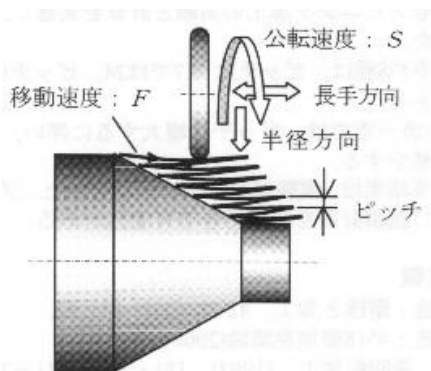


Fig. 1-34 成形方法の模式図⁽²⁰⁾

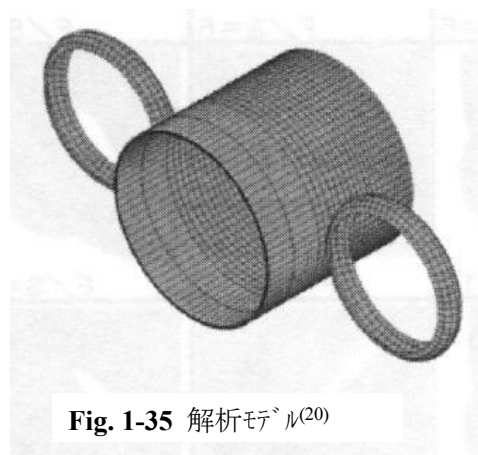


Fig. 1-35 解析モデル⁽²⁰⁾

さらに新規分野として、鋳物製品に対するスピニング加工適用も一般的となった。2008 年に石黒らはアルミニウム合金鋳造ホイールに対して熱間しごきスピニングを適用し、鋳物の欠陥除去、表面成形性・機械的特性の向上を実現した。この加工に対して有限要素法解析コード LS-DYNA による 3 次元変形解析も実施し、鋳巣削減に対する相当塑性ひずみの影響等について計算検討も行った(Fig. 1-35～Fig. 1-37)⁽²¹⁾。

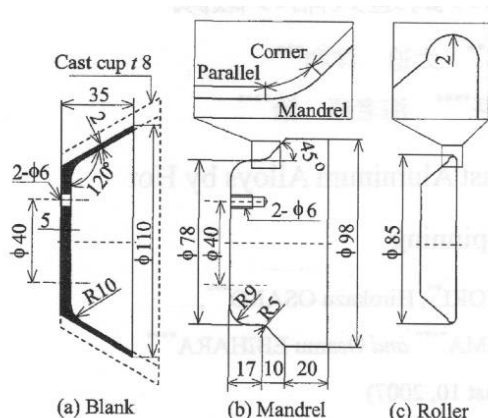


Fig. 1-35 ホットアスピニングでのマンドレル、ローラー、blankの寸法⁽²¹⁾

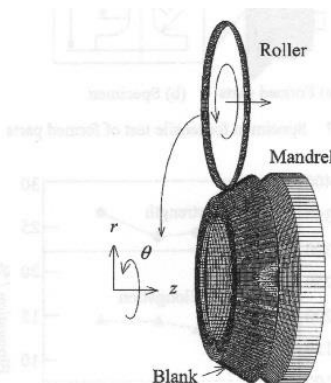


Fig. 1-36 3次元 FEM 解析用アスピニングモデル⁽²¹⁾

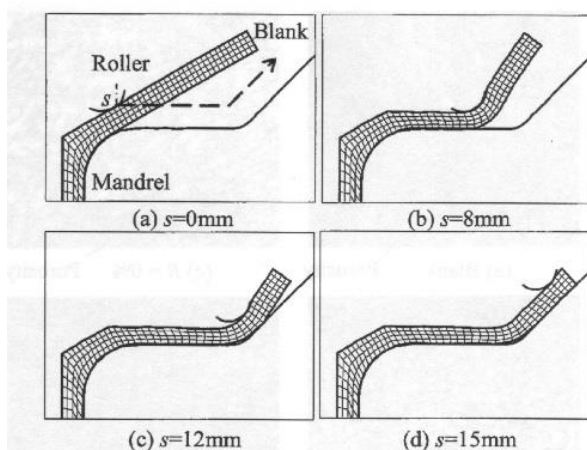


Fig. 1-37 R=20%でのアスピニングにおける軸を含む断面でのメッシュ要素変形⁽²¹⁾

次に回転鍛造(すえ込み鍛造)の研究論文につき時系列的に紹介する。スピニングより少し遅れるが 1973 年に久保らは逐次加圧方式の新しい鍛造機(回転鍛造機)の有用性検討のため回転鍛造機を試作し、複数種類の円柱状ブランクのすえ込み加工実験を行い接触面積の解析・加工条件の影響度調査等を行った。本実験から加工荷重とブランク形状(高さ/直径比)が変形に大きく影響すること等の知見を得た(Fig. 1-38～Fig. 1-40)⁽²²⁾。

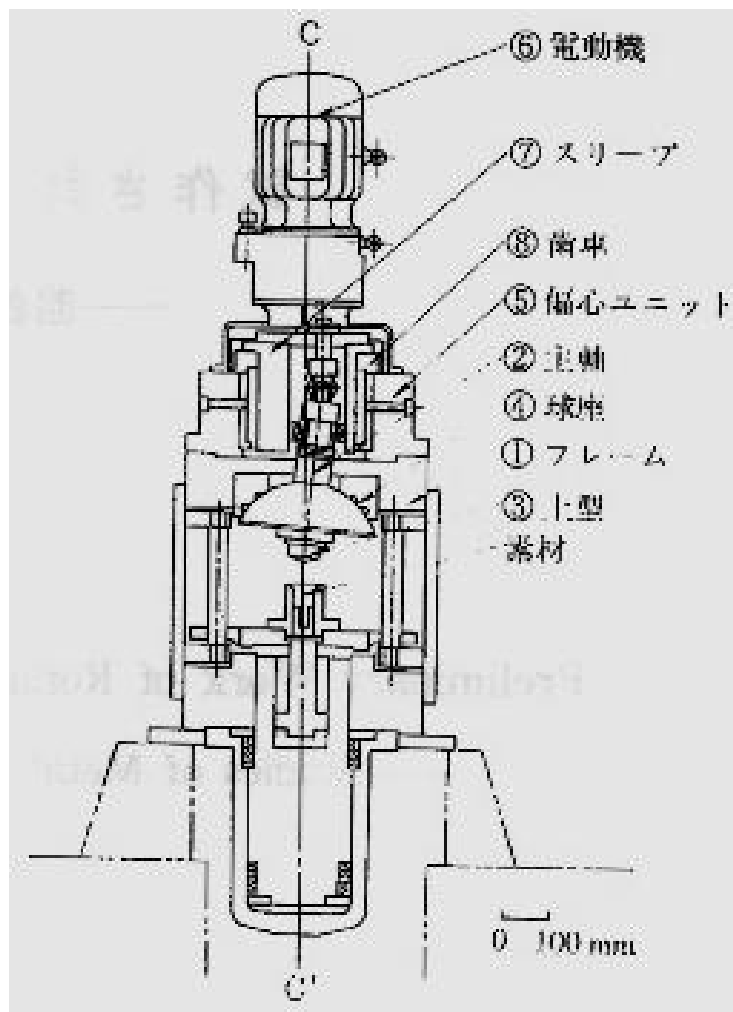


Fig. 1-38 回転鍛造機の駆動部断面⁽²²⁾

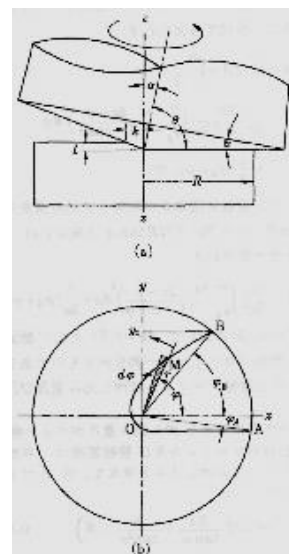


Fig. 1-39 円すい形上型と素材との接触状態の幾何学的関係及び接触投影面積⁽²²⁾

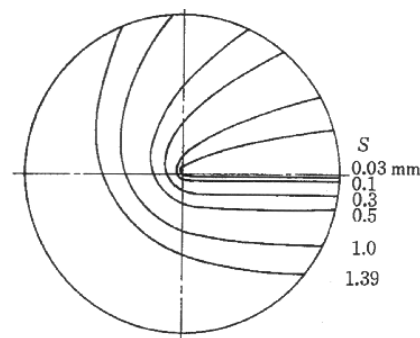


Fig. 1-40 1回転当たりのすえ込み量と接触面積の関係⁽²²⁾

1974 年には葉山は回転鍛造の分野の研究で長い丸棒材の径方向圧縮に対して工具寸法・材料特性・圧下率等が与えられた場合に対する荷重と接触幅を求めた⁽²³⁾。この頃から回転成形の分野で国内で多くの論考がなされるようになった。検討が深まり 1976 年には久保らは回転鍛造(揺動鍛造)の加工特性を調べるため試作した回転鍛造機ですえ込み・ヘッディング加工を行いブランクのすえ込み割れ・座屈・ねじれ等について調べた。座屈や割れについては従来法の全面圧縮と同等だが、ねじれが目立ったとした(Fig. 1-41～Fig. 1-43)⁽²⁴⁾。

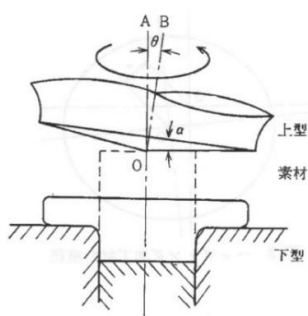


Fig. 1-41 回転鍛造原理図⁽²⁴⁾

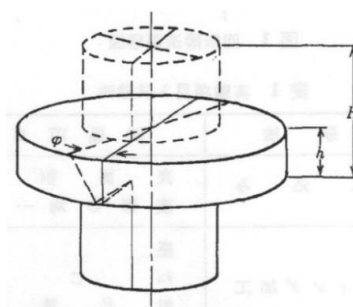


Fig. 1-42 ヘッディング加工材のねじれ⁽²⁴⁾

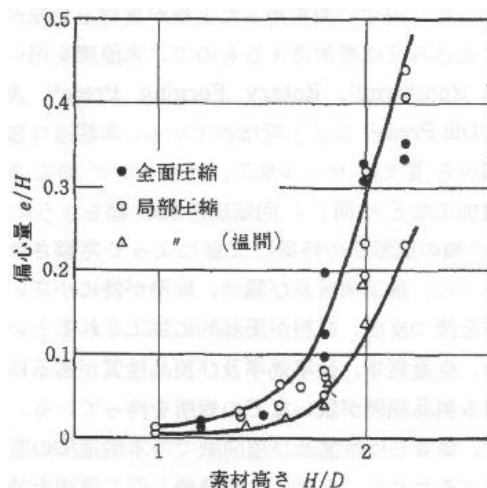


Fig. 1-43 ヘッディング加工における座屈限界⁽²⁴⁾
($P=60\text{ton}$, $\phi 25$, $\varepsilon_z=1$)

1983 年に中村らは回転鍛造ですえ込みや型鍛造を行う場合、荷重が小さい場合は変形が上部へ集中する(マッシュルーム変形)を起こすが、これにつき実験解析で検討したところ、すえ込み速度の増加、加工硬化指数の大きい材料の選定等がマッシュルーム変形の抑制に効果的であることがわかった(Fig. 1-44~Fig. 1-46)⁽²⁵⁾。

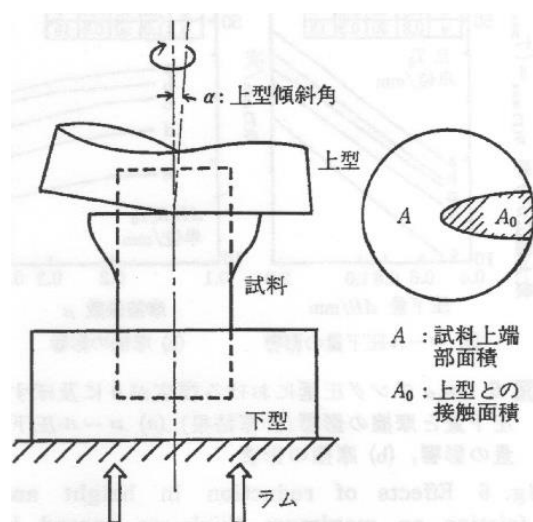


Fig. 1-44 回転鍛造の概念図⁽²⁵⁾

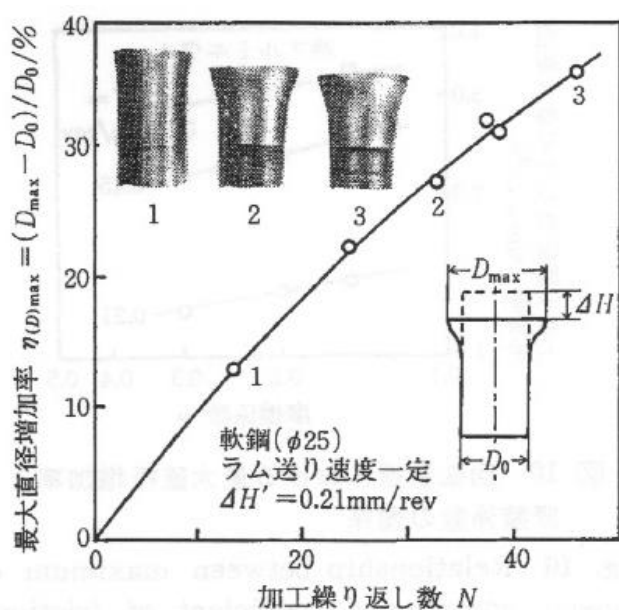


Fig. 1-45 加工の進行に伴うマッシュルーム変形の進展⁽²⁵⁾

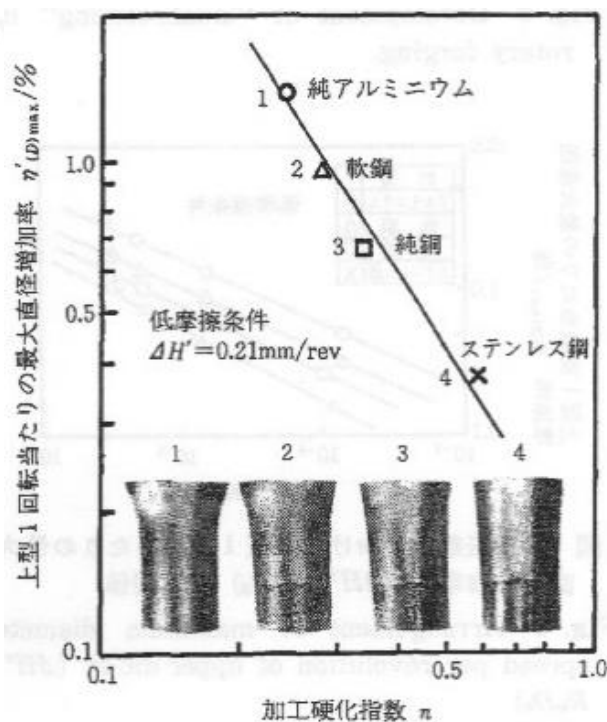
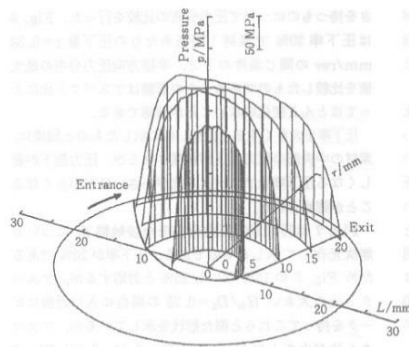
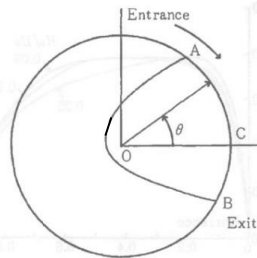


Fig. 1-46 回転鍛造における最大直径
増加率と加工硬化指数の関係⁽²⁵⁾

国内の回転鍛造解析において新規で強力な実験計測法が導入された。1988年に蘇らは回転鍛造において、測圧ピンを用いて種々の加工条件に対する工具と素材の接触形状および3次元圧力分布などを明らかにし、半径方向の圧力分布は圧力ピーク値が半径中央付近に現れ内側の圧力は低下する傾向等の知見を示した(Fig. 1-47)⁽²⁶⁾。翌年蘇らは引き続いて円柱および円板の回転すえ込み鍛造における圧力分布、ひずみ分布の3次元数値解析を行い、種々の加工条件における実験結果をうまく説明した。また接触面上の材料の径方向流れ、周方向流れの状況等の説明も行った(Fig. 1-48)⁽²⁷⁾。



(a) 50%圧下での上ロール測圧ピンによる3次元圧力分布



(b) 接触領域図

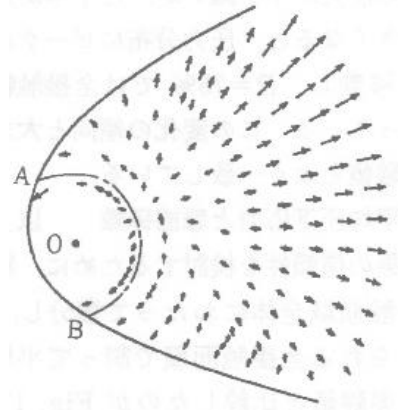
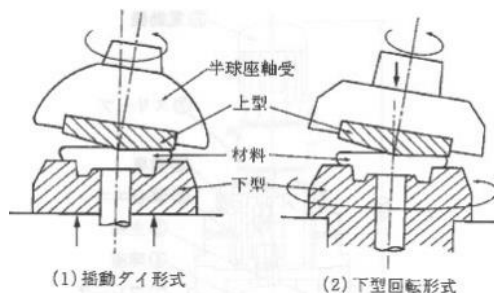
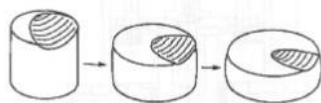


Fig. 1-48 算出されたメタルフロー分布⁽²⁷⁾

総括的な論評を含むが、1989年に平井らは回転鍛造の原理案と特長を述べ、その加工原理および加工特性を示した上で、現状での使用機械や部品適用状況について概観した(Fig. 1-49, Fig. 1-50)⁽²⁸⁾。



(a) 上型の転動機構



(b) 上型との接触状態の推移

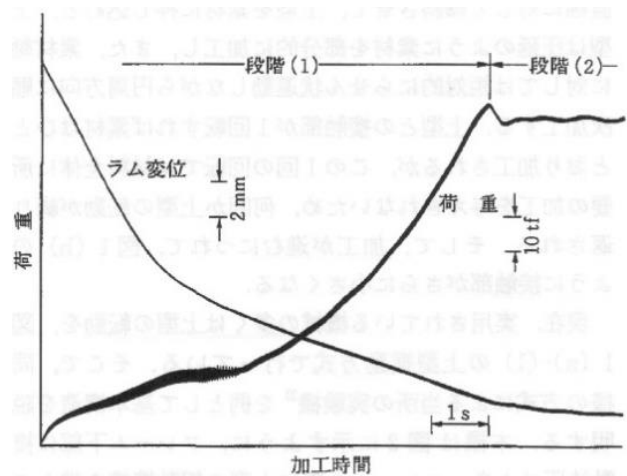


Fig. 1-49 上型の転動機構および局部加工の推移⁽²⁸⁾ Fig. 1-50 回転鍛造における荷重およびラム変位線図⁽²⁸⁾
(設定荷重: $90tf$, $\angle h = 1.4\text{mm/rev}$, $\alpha = 2^\circ$)

これも総括的検討となるが、1990年に葉山は回転加工の3種類(転造、スピニング、回転鍛造)について、2次元あるいは3次元でモデル化を行った数値解析を行い(スラブ法、すべり線場法)、数値解析から変形プロセスに必要な多くの情報が得られることを示した(Fig. 1-51)⁽²⁹⁾。また葉山らは同じ1990年に多くの形状の管材の端面に対して、円柱の回転鍛造と同じ方法で回転フランジ加工を施し、通常の鍛造よりはるかに大きいフランジが製作できることを示した。そして測圧ピン法等によりこの時の接触面の荷重を測定し、ブランク形状に対する加工荷重の推定式をも示した(Fig. 1-52)⁽³⁰⁾。

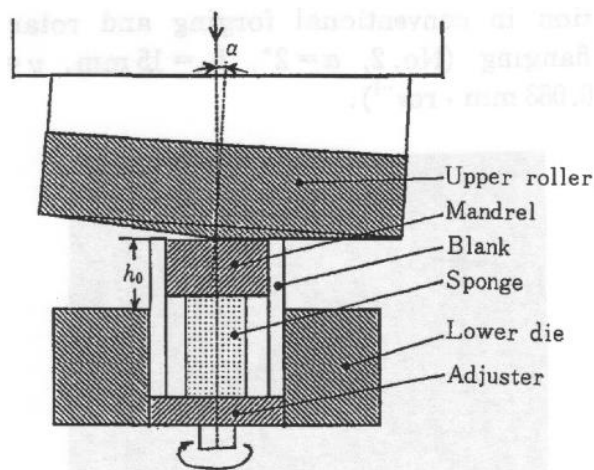


Fig. 1-51 円筒ブランクの回転フランジング⁽²⁹⁾

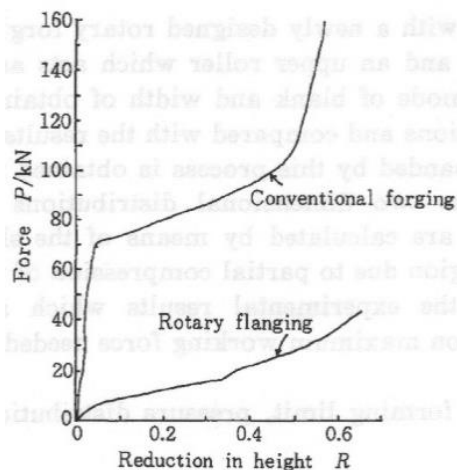


Fig. 1-52 一般鍛造と回転フランジングの加工荷重比較⁽³⁰⁾

再び測圧ピンを用いた実験検討であるが、1991年に蘇らはリングの回転鍛造における接触圧力等を測圧ピン法で測定した上、スラブ法によって圧力分布等を3次元的に数値解析し、リングの内径減少率変化等の実験結果に対する説明を行った⁽³¹⁾。少し変わった分野で、鉄道車両での回転鍛造で、1996年に岡方らは回転鍛造技術を取り込んだ鉄道車輪用回転鍛造機の新規導入により、優れた車輪板部成形(Rotary Dishing Process)が行えるようになり、耐熱疲労特性の良い車輪リム部成形を行えるようになったとした(Fig. 1-53, Fig. 1-54)⁽³²⁾。

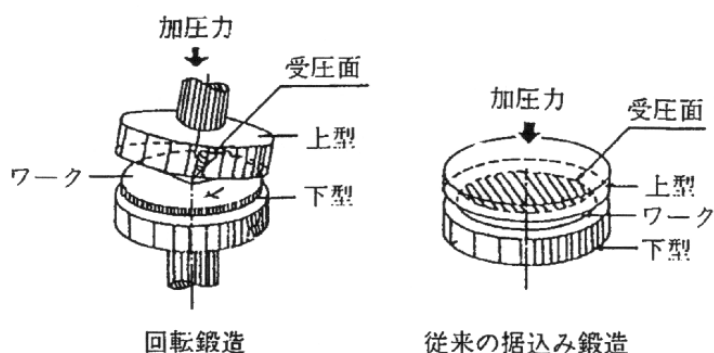


Fig. 1-53 回転鍛造の原理⁽³²⁾

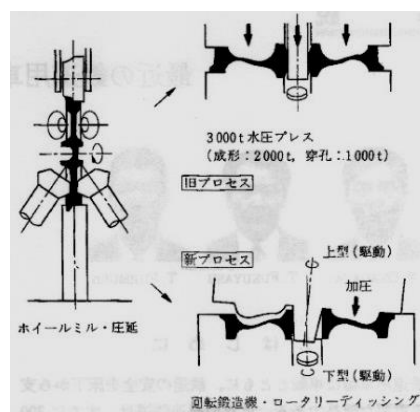
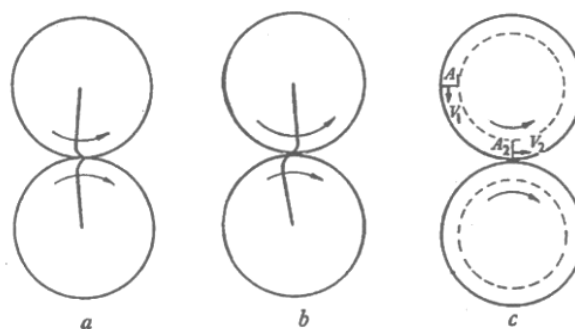


Fig. 1-54 車輪製造の新旧熱間プロセス⁽³²⁾

最後に、今回の研究に最も関連の深い分野である転造系回転成形に対して主に論じた研究論文について、この成形法の基本的な金属接触問題の分野の論文も含めて、国内・国外の研究論文を時系列的に紹介する。

回転成形問題の根底には金属材料の接触現象があり、これについて1881年にH. R. Hertzにより、弾性体の接触現象に対する理論解析が発表された。Hertzは球体や円柱の摩擦のない微小弾性変位接触について基盤的な理論説明を行った⁽³³⁾。また1956年にA. W. Crookが接触問題に関する論文を発表した。この論文は本来的には潤滑のある場合の回転接触での電気抵抗の変動の調査を行ったものであるが、その基本として円柱接触面の周方向変形を含めた変形の理論検討も行った(Fig. 1-55)⁽³⁴⁾。Fig. 1-55は接触面のマクロな変形状況を示した図である。



- a. 回転時の半径方向の直線だったラインのゆがみ
- b. 回転時にすべりがある場合の半径方向の直線だったラインのゆがみ
- c. 接触回転時の、接触部内外での材料の通過率

Fig. 1-55 表面層の移動⁽³⁴⁾

また 1960 年には G. M. Hamilton が円板同士の接触問題において、接触部の前方への材料の盛り上り (forward movement) 等に対する論考を行った。回転速度一定下では盛り上りは潤滑の有無に影響されず回転数変化に対してリニアに増大するが、接触圧が増大すると指数関数的に増大する等の知見を示した (Fig. 1-56, Fig. 1-57)⁽³⁵⁾。

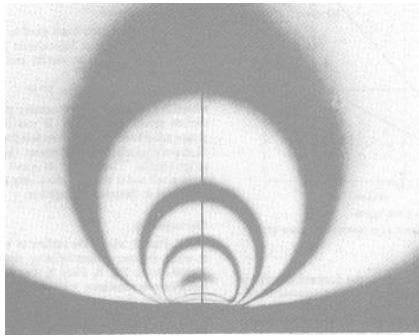


Fig. 1-56 法線方向負荷での光弾性での応力分布 (アルミニウム上のガラス)⁽³⁵⁾

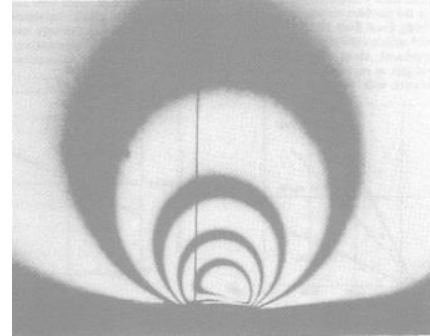
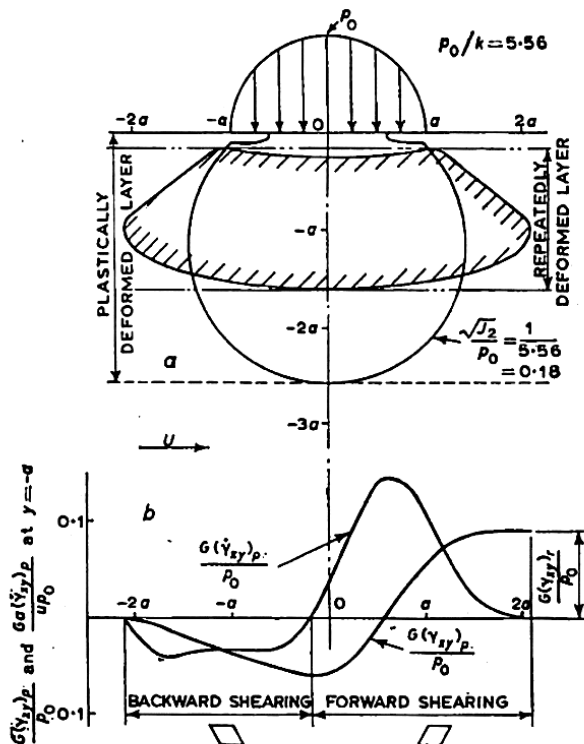


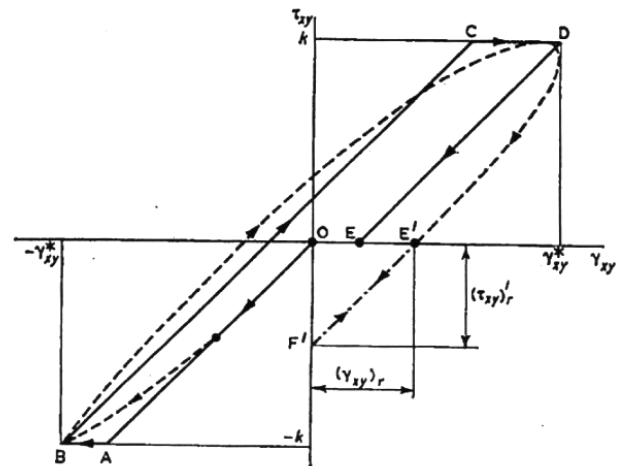
Fig. 1-57 法線方向負荷での光弾性での応力分布 (アルミニウム上のガラス (右へ回転))⁽³⁵⁾

この Hamilton の論文をもとに、1962 年には J. E. Merwin, K. L. Johnson が条件付きの解析によって接触部前方の盛り上りについて論考し、せん断成分により前方に塑性流れ (plastic flow) が発生したのち、3~4 周回後に安定的な蓄積状態となること等を示した (Fig. 1-58, Fig. 1-59)⁽³⁶⁾。



- 静的圧縮での塑性発生領域。これは荷重が最初に通過した場合よりも薄い領域であることに注意すべきである。
- 塑性せん断ひずみ $(\gamma_{xy})_p$ の定常サイクル。せん断ひずみは符号を変えるが後方シフトが前方シフトを上回るため、残留せん断ひずみ $(\gamma_{xy})_r$ が周回毎に蓄積する。

Fig. 1-58 静負荷での塑性領域と一定サイクルの負荷によるせん断ひずみの分布⁽³⁶⁾

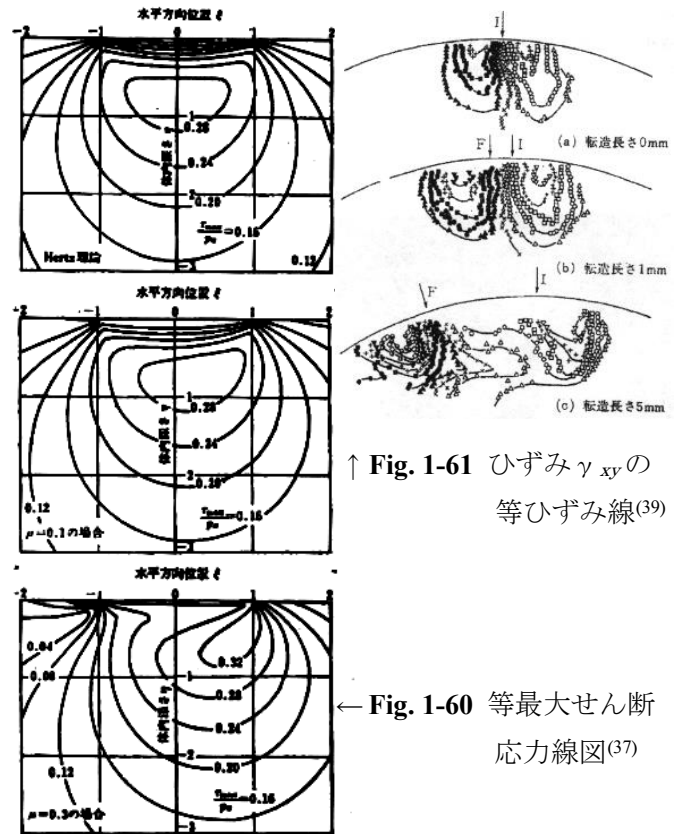


要素は永久ひずみ OE を受ける。比較のために $P_0=5.56k$, $y=-a$ なる計算から得られる $\tau_{xy}-\gamma_{xy}$ サイクルを破線で同スケールで示す。

Fig. 1-59 降伏強度 k の素材が $\pm \gamma_{xy}$ なる反復ひずみを受ける簡単なせん断サイクル OABCDE の状況⁽³⁶⁾

1977年に川井は2本の円柱材の接触問題を2次元弾性論において接触域の摩擦係数を一定と仮定することにより Hilbelt 問題に帰着させ解析結果が Hertz 理論での解と対応すること等を示した(Fig. 1-60)⁽³⁷⁾. また川井は翌年 1978 年に2本の円柱材の接触問題を2次元弾性論において 接触域の摩擦係数を一定と仮定し, 材料を弾完全塑性体として荷重移動がない場合および荷重が移動する場合における弾塑性応力場, 残留応力場の分布を求めた. そしてこの時, 摩擦の影響は塑性変形の深さは規定するが残留応力場の応力値にはほとんど影響しないこと等を示した⁽³⁸⁾. また川井らは同年, 短円柱の転造実験を実施し, マルチプリケーションモアレ法を用いて接触部近傍のひずみ分布を測定し, 同時に連続分布転移論により残留応力場の解析を行った(Fig. 1-61)⁽³⁹⁾. この頃から, 回転成形解析の対象も転造解析の普遍的適用, ボスフォーミング解析等と多彩さを加えて来た. 1993年に川井らは模擬ねじ転造実験でねじプロファイル形成度の違いの疲労強度に対する影響を調べた⁽⁴⁰⁾.

円柱接触の問題で, 川井はさらにさきほどの論文の2年後の1980年に, 固着域を考慮した2次元転がり接触問題における応力場の解析のために新たに複素応力関数を用いた転がり接触問題での境界条件の定式化を行い, 全域固着の場合およびすべり域を含む場合の応力場の解析を行った⁽⁴¹⁾. 外周接触に加えブランク軸直交面の成形も含む回転成形にディスクローリングがあるが, この事例で1984年に大森らは大型の円盤状素形材を自由鍛造から成形自由度の高いロール成形へ変更する検討を実施した(Fig. 1-62)⁽⁴²⁾.



↑ Fig. 1-61 ひずみ γ_{xy} の等ひずみ線⁽³⁹⁾

← Fig. 1-60 等最大せん断応力線図⁽³⁷⁾

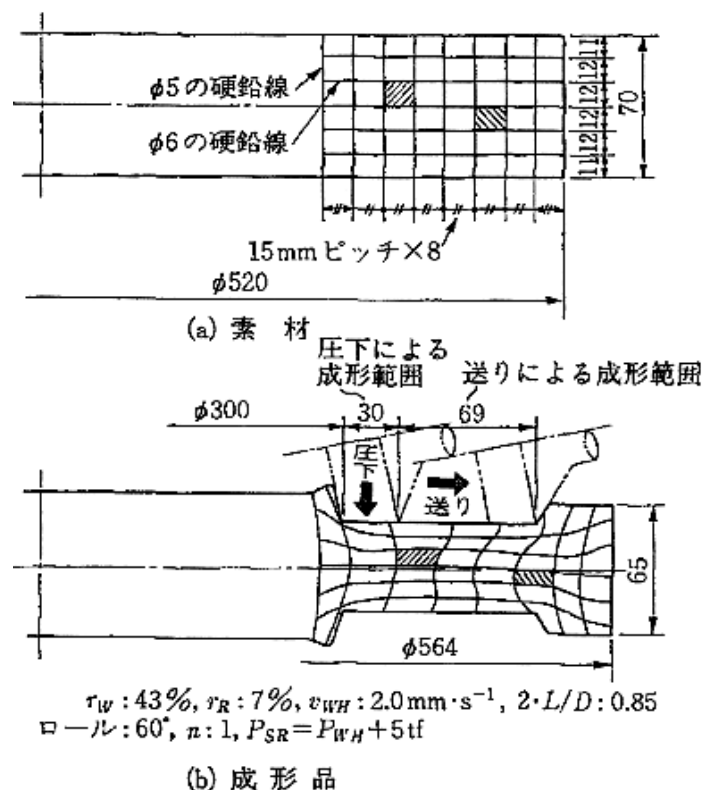


Fig. 1-62 ディスク成形品の径方向への材料移動⁽⁴²⁾

このころ外周回転接触研究の分野において、網羅性のある著作が発表されるようになった。1985年に K. L. Johnson が点接触、線接触からヘルツ接触・非ヘルツ接触、弾塑性体接触、せん断力を伴う接触、弾性体のロール接触、弾塑性体のロール接触、衝撃接触、熱弾性接触等と広大な範囲にわたる接触問題に対する理論的論考を行い、豊富な図版も用いて、わかりやすい論考を行った(Fig. 1-63, Fig. 1-64)⁽⁴³⁾。

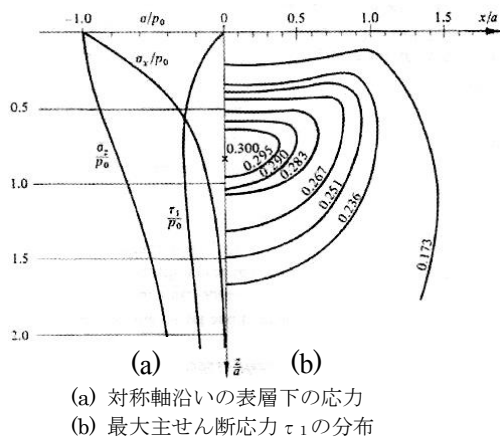


Fig. 1-63 円柱同士の接触⁽⁴³⁾

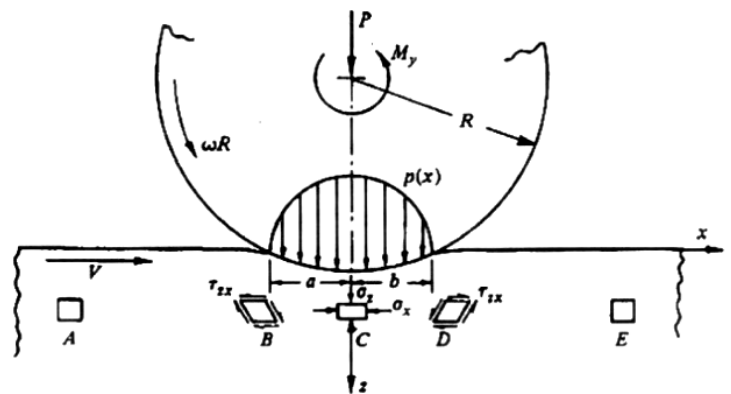


Fig. 1-64 回転接触での変形．素材要素は反復サイクルのせん断と圧縮(A-B-C-D-E)を受ける⁽⁴³⁾

解説的な内容になるが、1990年に葉山はリングローリングの3次元数値解析シミュレーションを実施し、圧下力やトルク等において実験と良い対応を得られることを示した(Fig. 1-65)⁽⁴⁴⁾。同じ1990年、服部は転造ねじのプロフィル形成度が疲労強度に及ぼす影響について実験解析を行った⁽⁴⁵⁾。また、同じ1990年に、鉄道レールにおける関連性の深い接触解析になるが、J. J. Kalkerは鉄道の車輪・レール接触からの事例を多く用いた形で3次元ロール弾性体間の接触問題に対する理論解析を行った⁽⁴⁶⁾。

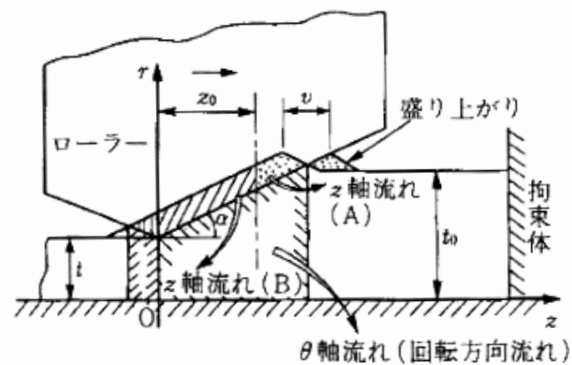


Fig. 1-65 後方回転しごき加工の三次元流れの解析図⁽⁴⁴⁾

20世紀末には回転成形全般の総括検討も行われ1999年に塚本は回転加工を分類しその中でも複雑性の高いクロスローリング、ヘリカルローリング、ディスクリングローリングにつき現行技術をまとめた(Fig. 1-66)⁽⁴⁷⁾。

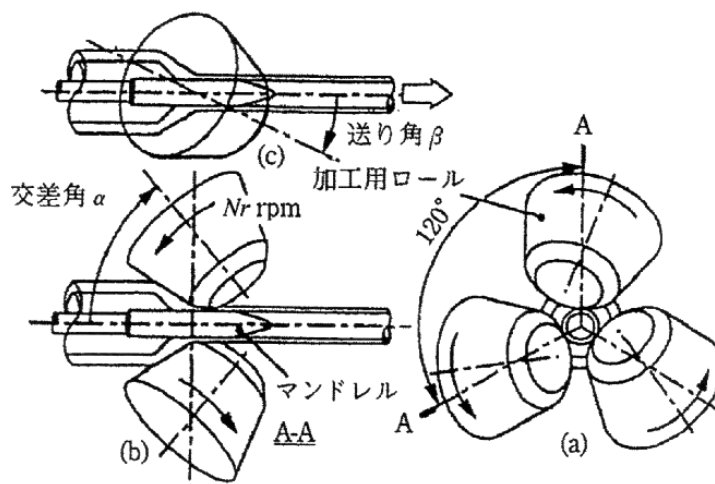


Fig. 1-66 製管用ヘリカルローリング⁽⁴⁷⁾

21 世紀初頭には各種回転成形で複合加工が一般的になり，2001 年に中野は今後板金成形と冷間鍛造等，塑性加工の複合化技術が重要であるとし，これを FCF 工法(Flow Control Forming of Sheet Metal)と呼び現在の状況と今後の展望を示した．工法のポイントは板金工法に鍛造の特徴である塑性流動を組み合わせた方式であり工程の効率化・コストダウンと併せ高精度なネットシェープ化が可能となるとした(Fig. 1-67, Fig. 1-68)⁽⁴⁸⁾．



Fig. 1-67 FCF 工法による代表的な製品例⁽⁴⁸⁾

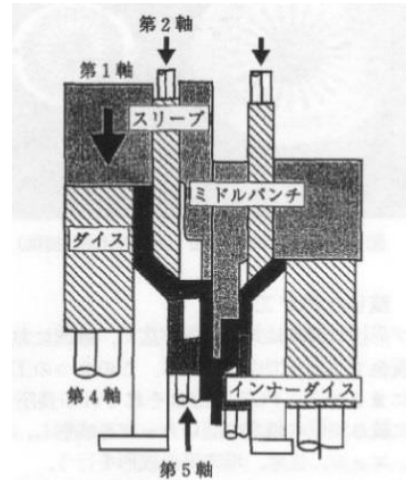


Fig. 1-68 複動作動による圧縮絞り⁽⁴⁸⁾

一方プレス加工や鍛造をベースとした形の回転成形の複合加工も増大して来た．2002 年に済木は鍛造を含む素形材産業は物づくりのベースとなる産業であり，今後も高精度，ネットシェイプ性等のほかエネルギー利用効率，材料利用効率，リサイクル性・リユース性等での改善努力が必要であるとし，回転成形における流動制御鍛造等の新規技術や鋳造・プレス成形等と組合せた複合加工も重要であるとした．またシミュレーション，CAE 解析の高度化による特徴ある製品の開発・期間短縮も期待されるとした(Fig. 1-69, Fig. 1-70)⁽⁴⁹⁾．

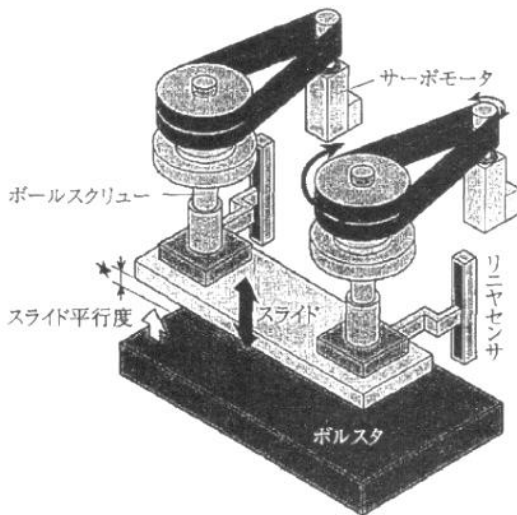


Fig. 1-69 スライド平行度 $\pm 10\mu\text{m}$ 以内を実現するデジタルプレスの概念図⁽⁴⁹⁾

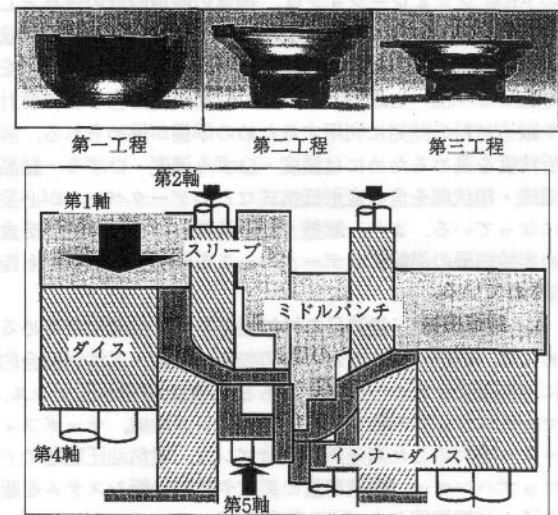


Fig. 1-70 厚板を素材に複動工具移動制御による板厚増加を伴う鍛造第二工程型組み⁽⁴⁹⁾

回転成形一般の技術的拡がりに応じて総括的な議論も幅広くなされるようになった．2002 年に川井は回転成形に関連する多くの著作物を総括する形で，加工原理・変形機構にもとづいて回転成形加工法を分類した上で，回転成形の特徴や今後の有効な適用方法等に対して広汎な内容に関する論評を加えた(Fig. 1-71)⁽⁵⁰⁾．

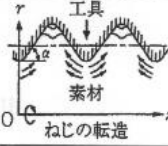

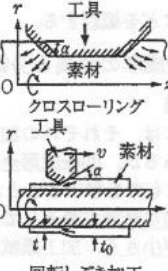

成形角 α	接触形態 流れ傾向 圧迫	$L/B < 1$	$L/B > 1$
		軸流れ (rz 面の変形)	円周流れ (θr 面の変形)
大	半径流れ	 ねじの転造	 歯車の転造
小	流れ傾向と同じ	 クロスローリング 回転しごき加工	 リングローリング

Fig. 1-71 回転成形における材料流れ⁽⁵⁰⁾

回転成形全般に対して有限要素法(FEM)を用いた解析も多く見られるようになった。転造系回転成形分野では、2002年に森らはホイールリムのロール成形のモデル解析において、断面応答に円周方向せん断変形を導入した形の剛塑性有限要素法モデルを構築し、これによる加工シミュレーション検討を行い、変形状の対応性を見た上でホイールリム素環の最適板厚分布を求める等の検討を行った(Fig. 1-72, Fig. 1-73)⁽⁵¹⁾。

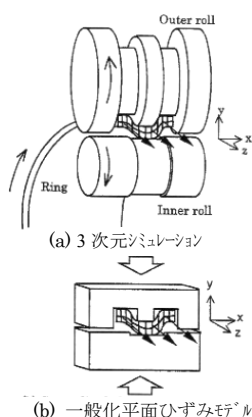


Fig. 1-72 リムの溝付ロールでのロール成形の簡易3次元モデル⁽⁵¹⁾

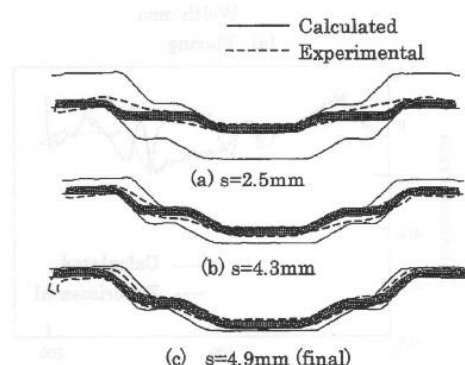


Fig. 1-73 モデル成形での計算と実験から得られた断面形状の比較⁽⁵¹⁾

回転成形技術の幅広さへの期待も膨らんで来た。2002年に団野は各種回転加工の適用範囲の広がりや特長・特殊性(素材材料流れの制御)を示し、期待される役割を説明した。また新しい回転成形法であるフローフォーミングの意義や複合加工技術化、回転成形CAE技術への期待等についても述べた⁽⁵²⁾。また回転成形に属する新しい工法も現れ、2002年・2007年に川井らはボスフォーミングにおける材料流れの基礎的な解明のための実験を行い、ロール送り速度の選定により材料流れを制御できる等の結論を得た(Fig. 1-74, Fig. 1-75)⁽⁵³⁾。

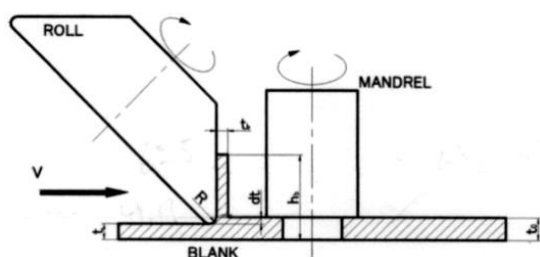


Fig. 1-74 ハブ成形の諸元⁽⁵³⁾

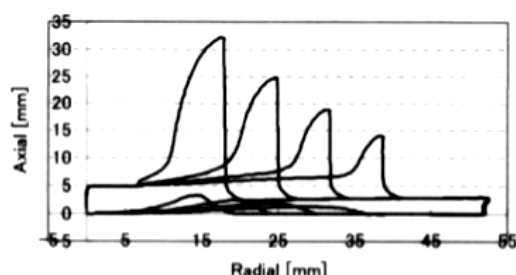


Fig. 1-75 ロールのストロークとともに成長する底底部の引き⁽⁵³⁾

この時期から前記も含め FEM 手法を適用した回転成形解析が増えてきた。2003 年に片山らは回転鍛造に対して 3 次元剛塑性 FEM 解析を適用し、接触領域内の材料移動等について知見を得た(Fig. 1-76)⁽⁵⁴⁾。また 2004 年に森らはしごきスピニング問題の解析に対し剛塑性有限要素法による近似的な 3 次元シミュレーションモデルを導入し材料の余肉盛りや反りの再現を提示した(Fig. 1-77)⁽⁵⁵⁾。

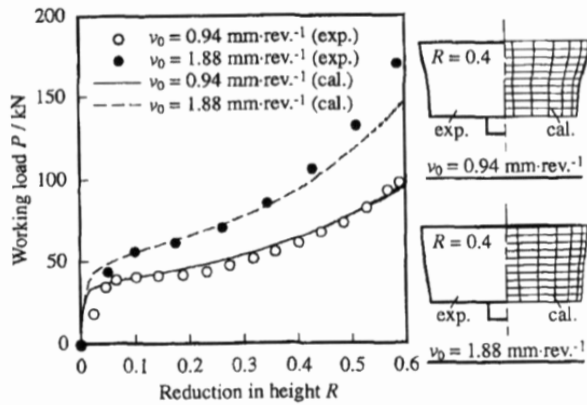


Fig. 1-76 加工荷重・変形状での計算結果と実験結果との比較⁽⁵⁴⁾

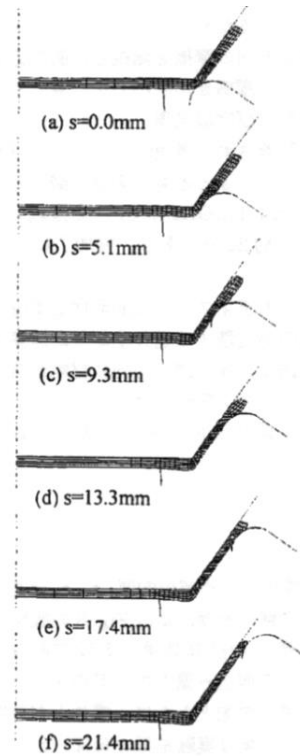


Fig. 1-77 計算での断面形状のメッシュ要素変形⁽⁵⁵⁾

ブランク断面の連なりが直線となる線形スプリッティング加工についても解析が始まり、2006 年には P. Groche らは薄板材のリニアフローズプリッティングに関し実験と MSC/SuperForm での FEM 計算を実施し手法の実現性を確認した(Fig. 1-78)⁽⁵⁶⁾。翌 2007 年の C. Muller らの論文もこれに続く内容である(Fig. 1-79)⁽⁵⁷⁾。

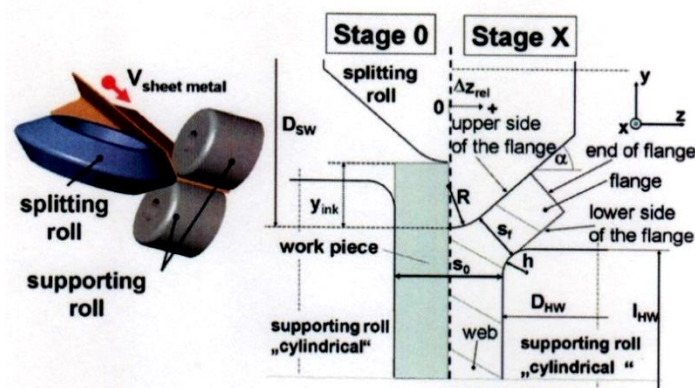


Fig. 1-78 プロセス原理(左)とリニアフローズプリッティングの幾何学的特徴⁽⁵⁶⁾

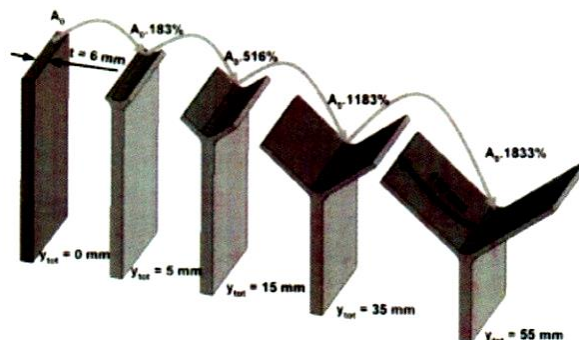


Fig. 1-79 リニアフローズプリッティングによる表面増大⁽⁵⁷⁾

自動車部品に対する各種回転加工あるいは他種の塑性加工との複合加工事例も目立って増えて来た。2007年に峯はクラッチハブの歯形成形法においてグローブ転造を採用し、複数のローラによる逐次加工によって歯車精度を保ちつつ生産性を向上させた事例を示した(**Fig. 1-80, Fig. 1-81**)⁽⁵⁸⁾。

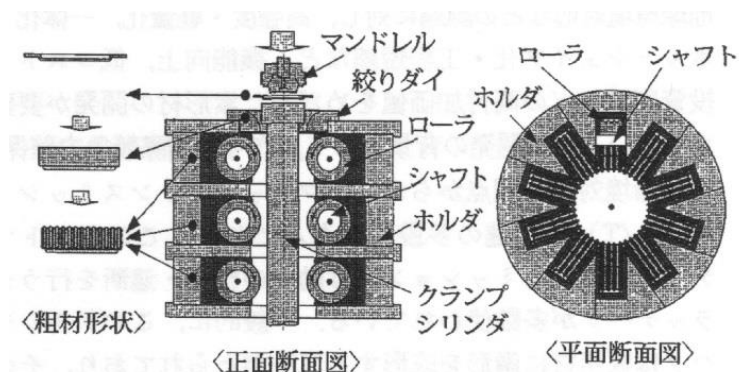


Fig. 1-80 成形法による歯形の特徴⁽⁵⁸⁾

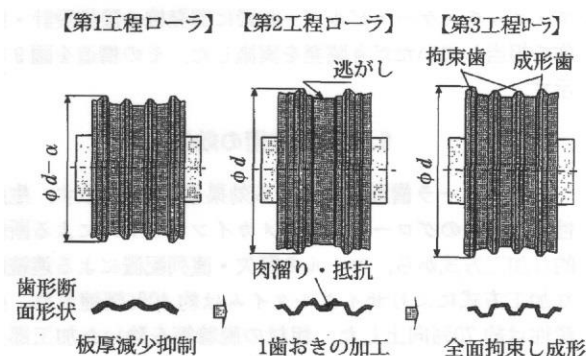


Fig. 1-81 歯形精度への影響⁽⁵⁸⁾

各種回転成形製品に対する疲労強度についての論考も現れ、2007年にKimらは棒材に対して転造実験とFEM解析を実施し、軸方向残留圧縮応力や加工硬化が疲労強度を増大させるなどの知見を得た(**Fig. 1-82**)⁽⁵⁹⁾。各種の回転成形でのブランク材料流れに注目した論文もあり、2007年に金はV形・W形工具押し込み、環状溝転造、回転スプリッティング、ボスフォーミングにおけるブランク材の成形時材料流れについて実験および解析検討による論考を行った⁽⁶⁰⁾。

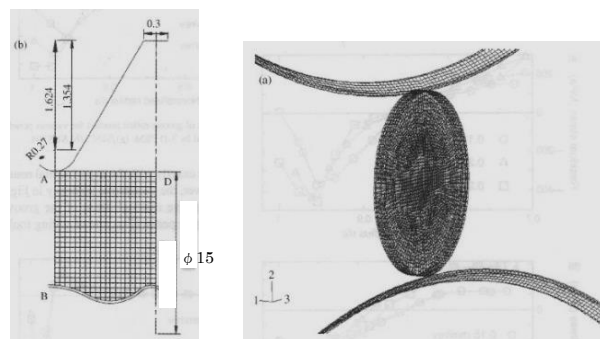


Fig. 1-82 2次元(左)および3次元(右)モデル⁽⁵⁹⁾

この頃から各種回転成形に対する深い現象把握がなされるようになって来た。2008年には、川井らは回転成形の種類分け、材料流れのメカニズム説明を総括的に行うとともに、ボスフォーミング(ハブ成形)の実験と結果解析を行い、ボスフォーミングでの壁厚・高さの制御は材料送り速度(feed rate)等で可能などの知見を得た⁽⁶¹⁾。また各種回転成形解析も多彩さが増し、2009年に川井は、また2014年に川井らは回転スプリッティングの実験解析を実施しロール反力、ブランク外縁の裂開部形状と実験条件の関連性を調べた(**Fig. 1-83**)⁽⁶²⁾⁽⁶³⁾。前後するが転造系回転成形解析において、周方向角度を限定した計算効率の高い解析方法の提案も行われるようになった。2003年、2012年、2014年、2015年に有吉らは軸端かしめ止め、転造成形、ボスフォーミングに対して、計算検討の高速化を実現するために周方向角度を限定した、あるいは一層幅の微小角ソリッド要素構成の軸対称構造によるFEM解析モデルの提案を行った(**Fig. 1-84**)^{(64)~(67)}。

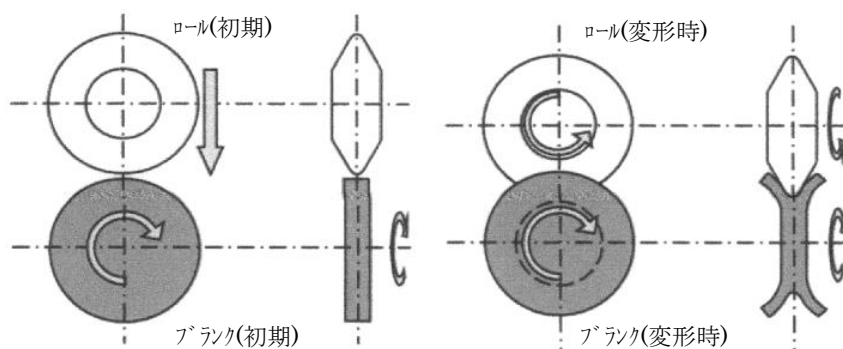


Fig. 1-83 円板状ブランクの回転スプリッティング⁽⁶²⁾

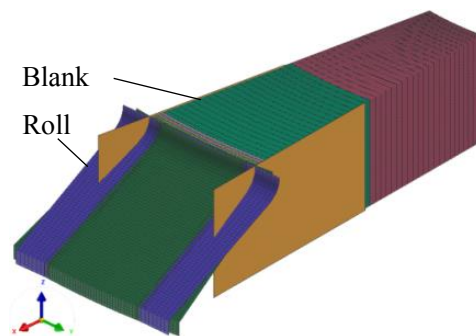


Fig. 1-84 小角度モデルの事例⁽⁶⁵⁾

以上、回転成形におけるスピニング・回転鍛造・転造系回転成形についてこれまでの研究論文を概観したが、回転体の接触問題の解析ではその始まりは19世紀末まで遡るものの、スピニング・回転鍛造等の論文は目立つものとしては1960年代～1970年代に端を発しており、これらの技法は現代の工業製品の加工方案としては、相対的にはまだ歴史が浅いものと思われる。また、基本的な接触問題の背景では鉄道車輪・レールの現象解析や改良のために推進がなされ、年代が進んでからは自動車部品開発・生産のために関連する各種技術が多く動員されているように見受けられる。

一方、技術運用の面からは、これらの技術も1970～1980年代に入ってから、加工方法の複合化あるいは生産機械設備のインテリジェント化(知能化)が進んでおり、従来の＜多種少量生産＞のイメージのあった本技術が現今では＜多種中・少量生産＞的かつ中核的な技術へと力強く変貌して来ているように感じられる。

今後においても、多くの特長を有する回転成形に対する解析・開発技術においては、上記技法を含み各固有技術の深化および並行して技術の複合化・知識技術化も開発・改良され、ますます拡がりを深めて行くことが予見される。また本研究分野におけるコンピュータ援用解析技術(FEMモデル解析、CAE検討等)についてもこれらの動きに呼応して、ますます発展して行くものと考えられる。

第 2 章

回転成形におけるブランク変形と解析の基本手法

第2章 回転成形におけるブランク変形と解析の基本手法

2.1 回転成形（転造，ボスフォーミング，回転スプリッティング）におけるブランク変形

上記回転成形の特徴の概略を述べる．まず転造は代表的には **Fig. 2-1** に示すような丸棒状ブランクにねじ等の形状を設定した回転するロールを押し当て，丸棒表面にねじ等の形状を転写する塑性加工である^(45,60)．

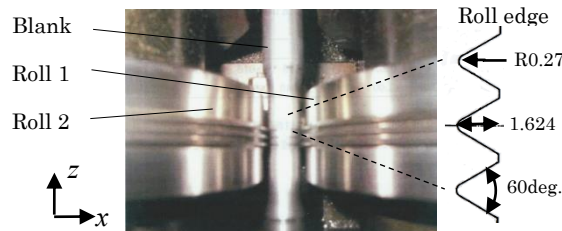


Fig. 2-1 ねじ転造の事例^(45,60)

次にボスフォーミングは **Fig. 2-2** のように，厚肉円板の表面材料を従動回転するロールにより，材料をブランク中心側へ集め，ボス形状を形成させるものである^{(53),(60)}．この加工法は転造よりも塑性加工長さが多大であり，ブランク材料の破断・破損の危険性を回避しながらロールの形状や駆動条件を設定する必要がある．

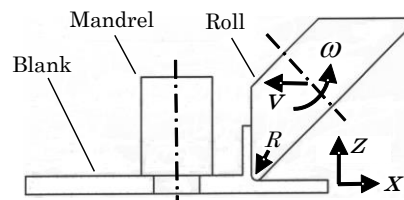


Fig. 2-2 ボスフォーミングの事例^{(53),(60)}

最後に回転スプリッティングであるが，**Fig. 2-3** に示すように，円板端部に比較的小角度で先端の微小 R を設定し尖った従動回転するロールを押し付けることにより，端部を裂開させていく塑性加工法である^{(62),(63)}．ロールの先端部分に当たるブランク部分は板厚方向の引張力が大きく加わるため，加工条件を吟味しなければこの部分で早期に材料破断を発生する恐れがあり，難度の高い加工法であると考えられる．

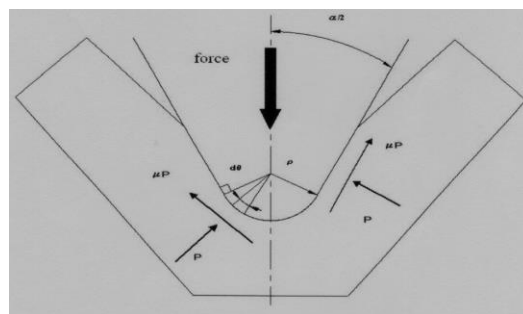


Fig. 2-3 回転スプリッティングの原理^{(62),(63)}

2.2 回転成形解析モデルの微小角軸対称構造化に対する基本手法

2.2.1 転造，ボスフォーミング，回転スプリッティングに共通な変形現象とモデル化方策

まず，この3種の回転成形に共通な変形過程の現象に対する基本的なモデル化方策について述べる．**Fig. 2-4** のように，被加工材(ブランク)が強制回転を受ける形の回転成形では，代表的な荷重は両者の接触部位に発生するブランク径方向の圧縮力である．この場合，通常は加工材(ロール)とブランクの周方向接触幅は小さく，また接触部位の周方向の隣接部分は，直接的にはロールから径方向に圧縮される力を受けない．このとき，

接触部位を見込む角度を持つ周方向に狭い角度範囲のブランク部分をブランクの解析モデルと考えれば、上記ブランクの狭小角度のモデル化部位(接触部位)に対して、その隣接部位は Fig. 2-4 に示すように設定モデルの側面を両側から径方向外側へ引上げる向きの力 f_i を内力として発生しているものと考えられる。

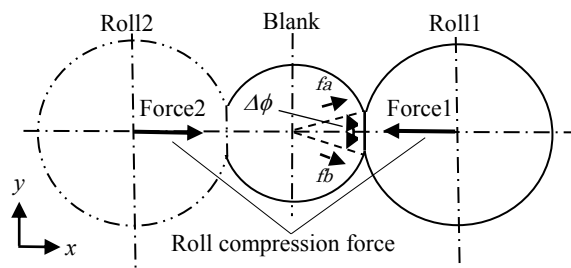
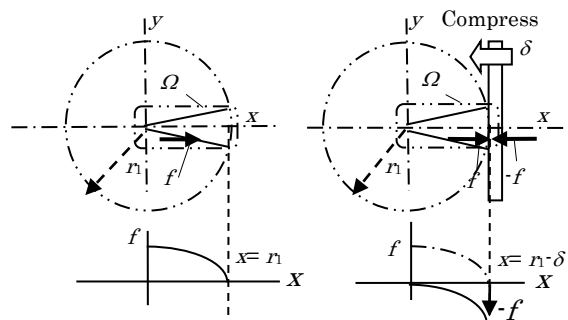


Fig. 2-4 接触領域と近傍におけるブランク半径方向の力

上記接触部位の両側面に加わるブランク径方向の力 f_i は、転造・ボスフォーミング・回転スプリッティングのように従動回転するロールによって接触回転するブランクをブランク径内側へ押し込んで行く形式の回転成形法では、3者間で共通性が高いと考えられるため、本研究では3者共通に、この力を回転体形状のブランクにその中心軸を回転中心とする「角速度場」を設定することによって発生する遠心力の分布により近似的に表現することとした。Fig. 2-5 にブランクへの上記角速度場設定の状況を転造の場合を事例として概念的に示す。同図(b) がロールで圧縮された場合に発生する径方向圧縮力の分布形状を示したものである。



(a) 遠心力の分布 (b) 拘束のある場合の遠心力の分布

Fig. 2-5 角速度場導入によるブランク上の遠心力の分布

2.2.2 角速度場設定の具体的方法

前項の考え方に基づいたモデル化方法について以下に述べる。Fig.2-6 に上述の回転成形3者の解析モデルに対するブランクへの角速度場設定方法を示すが、この図において x, y 軸の原点はブランクの形状中心と角速度場設定での回転中心を示す。角速度場設定により、この回転中心を起点とし、ブランク径中心から外側の向きにブランクを構成する各点に遠心力が加わり、ロールと接する部位にはこれらが集積された大きな力が加わることとなる。この措置により、ロールのブランクに対する負荷は、単にブランクモデルの断面形状をロールによって径方向に圧縮を加える場合と異なり、実現現象でのロール接触部位近傍での応力分布状況に近似した応力集中度の高い状況を表現することが可能となる。

ただし、本方法の適用において実用性を確保するためには、角速度場を設定する際の関連パラメータ(角速度場中心の位置決定、角速度場の強さ、ブランクへの角速度場設定対象範囲等)を、実現現象を吟味・理解した上で妥当な範囲や数値に定める必要がある。さらには、後述するが上記角速度場の設定以外にも、周方向に働く力、ブランク軸方向に加わる力、付加的に設定すべき力について回転成形の種類によって妥当な量を考え設定することも同時に必要である。以下、3種類の回転成形のそれぞれに対して、上記の考え方に基づいたFEM解析モデルの構築経過を示す。

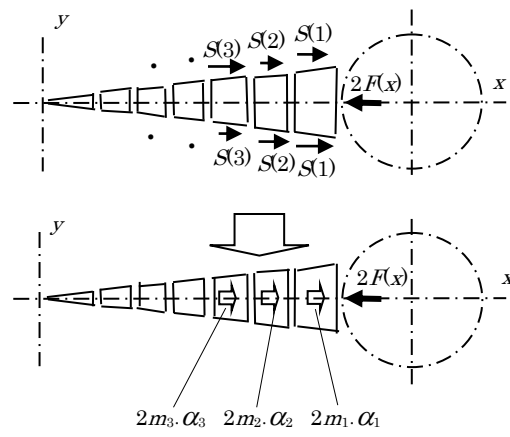


Fig. 2-6 角速度場導入によるブランクモデル側面に対する拘束力の分布

第 3 章 転造解析用微小角軸対称構造モデルの開発

3.1 緒論

転造解析用のモデルはブランクの大きな塑性変形を詳細に表現する必要があるため、通常全周の詳細メッシュモデルを用いるが、計算時間・解析期間を多く要する。このため効率化から形状を周方向で絞った狭い角度の形状とした計算モデルが使用される場合があるが、実用精度確保のためにはブランクおよびロールの仕様を含み得ることは基本とし、転造に特徴的なブランクのロール接触部近傍における変形の集中を十分に再現できる必要がある。このため、モデルへの負荷にブランク回転中心を中心軸とした「角速度場」およびブランク周方向変形に対する「せん断変形場」等を導入することにより、上記要件をほぼクリアし、モデル作成および計算の時間を大幅に削減した、転造の初期変形検討に有効と考えられる微小角軸対称構造の解析モデルを開発した⁽⁶⁶⁾。以下現象把握のための基礎実験検討を含み、この解析モデルの開発経過を述べる。

3.2 転造における変形現象把握のための基礎実験

転造変形におけるブランクの基本的な変形状況を観察するため、剛性の大きい円柱形状ロールによる、部分円柱形状の鉄鋼材料(S45C, $\sigma_y=331.6\text{MPa}$)のブランクの回転圧縮実験を行った。ロール直径は117mm、ブランクの直径および軸方向長さはともに36mmである。Fig. 3-1, Fig. 3-2 に試験片形状と実験状況、Table 3-1 に実験条件、Fig. 3-3～Fig. 3-5 にブランク変形とロール反力、Table 3-2 に実験結果の代表値を示す。

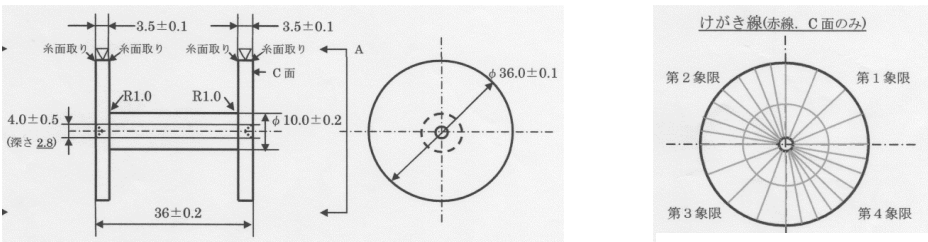


Fig. 3-1 試験片形状と表面へのケガキ（ケガキは表面変形の計測用）

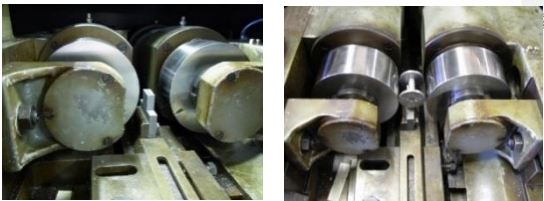


Fig. 3-2 転造基礎実験の実施状況（左；左右ロールと試験片置台，右；転造実験直前状況）

Table 3-1 転造基礎実験の実験条件（試験片番号1の変形量は1mm 狙いが0.65mm 止まりとなった）

試験片番号	ロール回転速度(rpm)	負荷速度(mm/s)	変形量(mm)
1	23.8	0.022	0.6
2			3.0
3			1.0
4		0.044	3.0
5			1.0
6			3.0



Fig. 3-3 実験結果～試験片の変形状況（左図；試験前，右図；試験後）

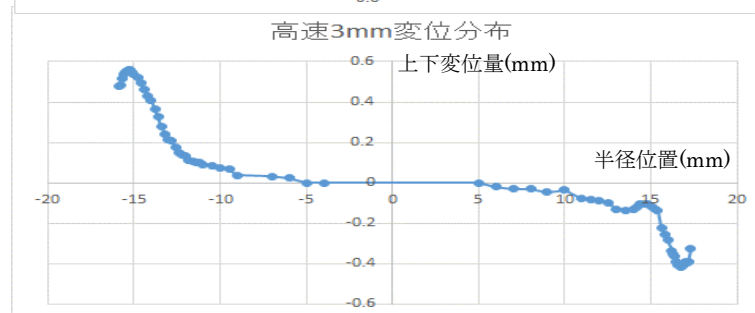
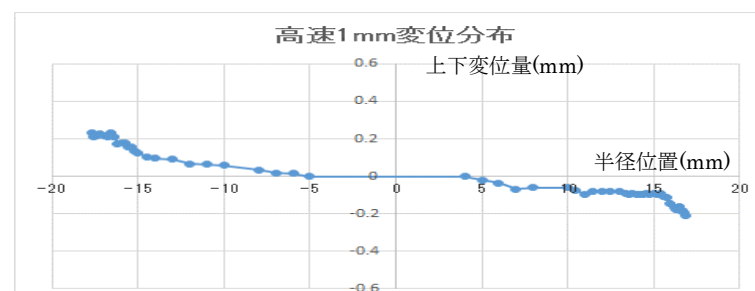
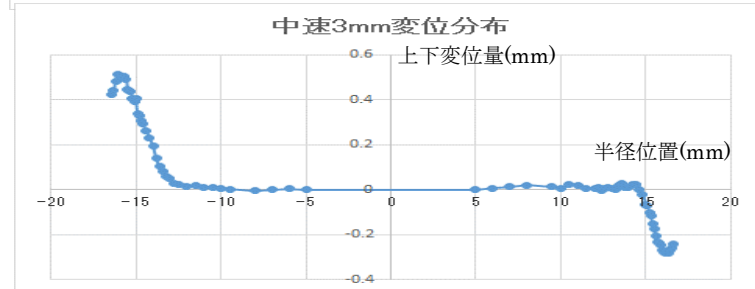
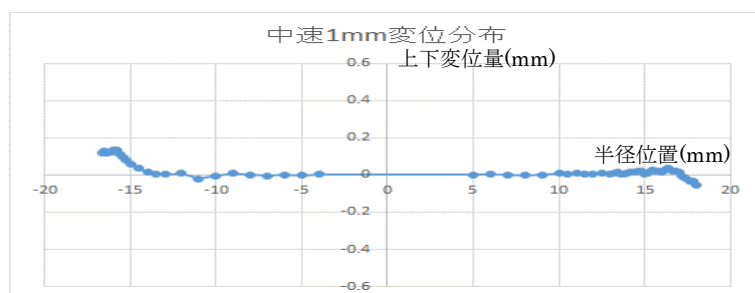
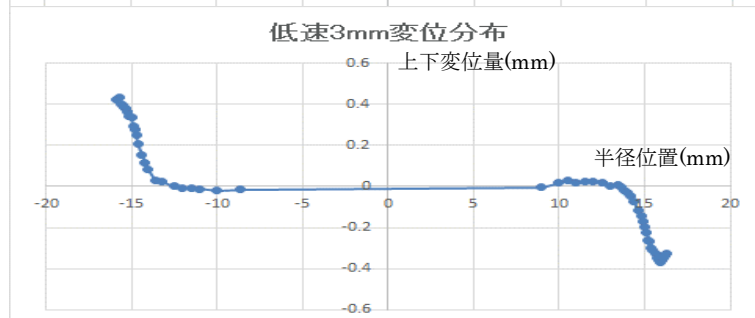
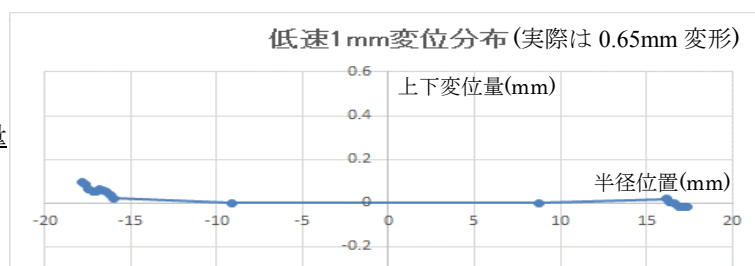
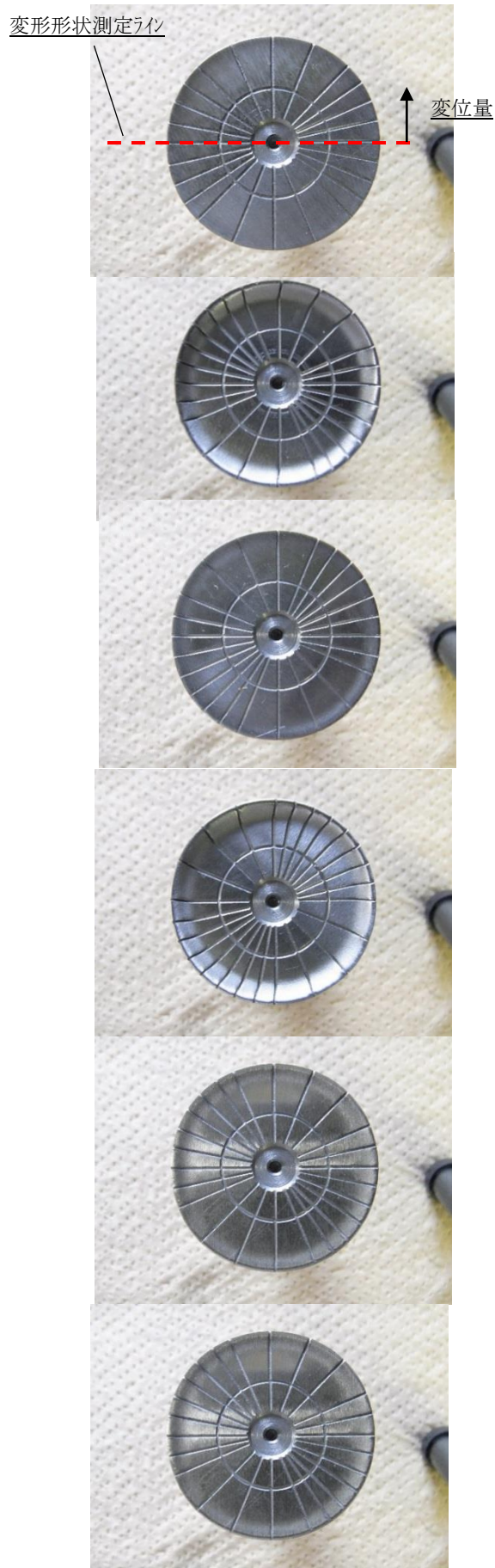
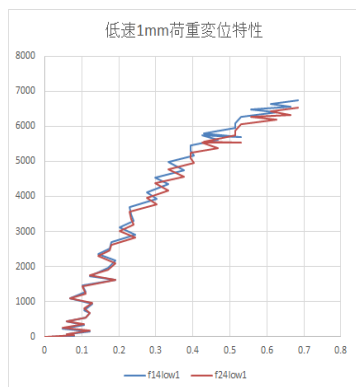
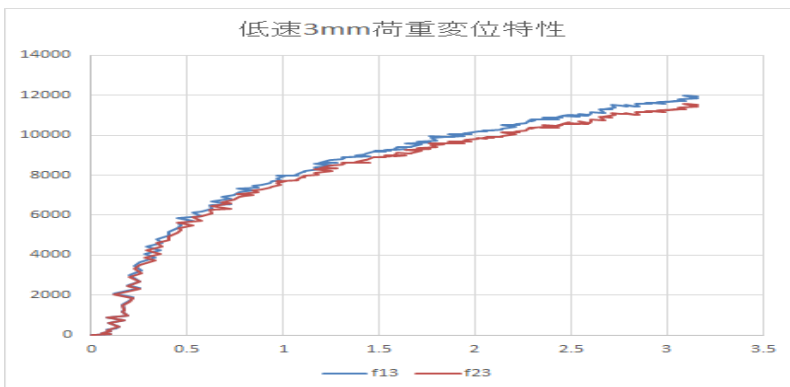


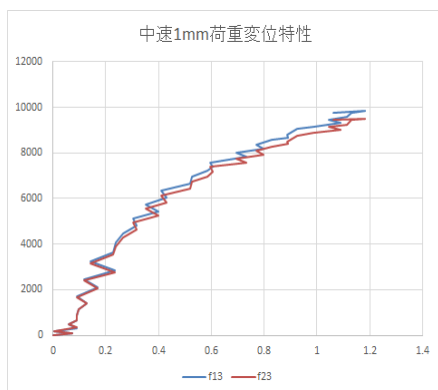
Fig. 3-4 実験結果～試験片の上面視永久変形量



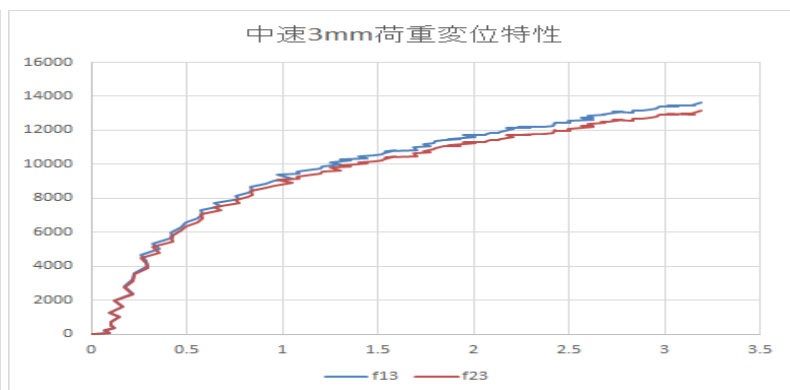
a. 低速／0.65mm(目標は1mm)



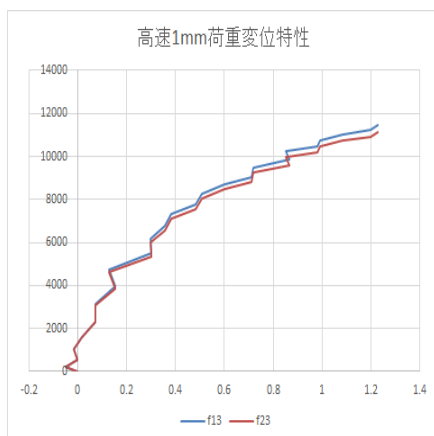
b. 低速／3mm



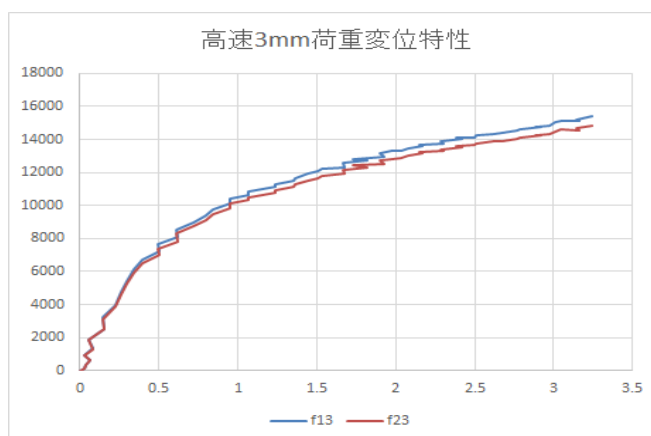
c. 中速／1mm



d. 中速／3mm



e. 高速／1mm



f. 高速／3mm

Fig. 3-5 実験結果～ロールの径方向反力(横軸；ロール変位(mm)，縦軸；反力(N))

Table 3-2 実験結果代表値

試験片番号	試験条件		変形量(mm)			板厚(増大率)	最大荷重(N)
	圧縮速度(mm/s)	所定圧縮量(mm)	実圧縮量	直径減少量 ΔD	周方向変形量 Δh		
1	0.022(低速)	1.0	0.7	▲0.83	0.02～0.10	3.6(1.03)	8700
2		3.0	3.2	▲3.91	0.33～0.42	6.8(1.94)	11400
3	0.044(中速)	1.0	1.1	▲1.40	0.05～0.13	4.5(1.29)	10000
4		3.0	3.2	▲3.00	0.24～0.51	6.7(1.91)	13200
5	0.088(高速)	1.0	1.2	▲1.38	0.21～0.23	4.5(1.29)	10400
6		3.0	3.2	▲2.79	0.33～0.56	6.5(1.86)	15000

上記基礎実験の結果から、以下のことがわかった。

a. 変形モード、変形量について

- (1) ブランク外縁の基本変形は、ロールによる径方向圧縮変形に付随し、フランジ部ロール進行と逆向きへ変形する(あたかもロールで蹴り出されるような形となった(Table 3-2 の $\angle D$, $\angle h$ 参照)。このときの両者の変形量の比率は 1: 0.1 程度であり、圧縮主体でわずかにせん断変形が見られるとの状況であった。
- (2) ブランク外縁部は同時に、フランジ厚が厚くなる変形も示した(Table 3-2 の板厚(増大率)参照)。板厚増大は約 3~90% 程度であり、径方向 1mm, 3mm の変形でも後者ではフランジ厚は倍近い増大率となった。
- (3) 上記(1)の「ロールで蹴り出されるような形の変形」のおよぶ深さは、ロール押込み速度が遅い場合には浅い(径方向外側にとどまる)が、ロール押込み速度が速い場合は深くなる(径方向内側深くにおよぶ)。

b. 変形荷重について

- (1) ロール反力は、どの場合も変形量の $1/N$ 乗に近いパターンで増大する。勾配が徐々に減少するのはブランクのフランジ厚が、変形初期には徐々に塑性変形で拡がり始め、その後これにつながる形で材料が幅方向に容易に増大して行くためと考えられる。
- (2) この時、特性カーブの立上がり時点(0~約 0.2mm)で勾配が線形あるいはわずかに下凸となる領域が見られるが、これはロール接触の際に過渡状態が現れたためと推定される(これについては 7 節に述べる)。

3.3 転造解析用モデルのモデル化参照実験

上記の基礎実験の知見をもとに、以下のように転造解析用モデルの開発検討を実施した。本検討は転造の一種であるねじ転造の模擬加工事例^{(45),(60)}をモデル化検討対象とした。Fig. 3-6 にその対象実験の状況を示す。

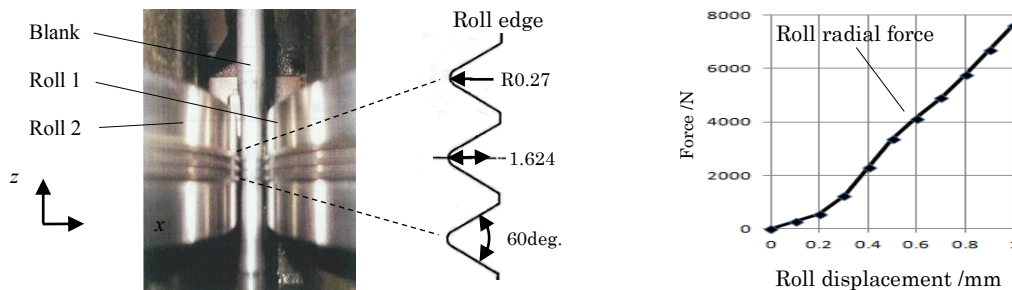


Fig. 3-6 ねじ転造実験とロール半径方向反力^{(45),(60)}

ねじ山形状を模した 3 条の平行な突起を持つ 2 本のロール(直径約 140 mm)による、ブランク丸棒(直径約 12 mm)への環状溝の転造である。強制回転される両側のロールのうち、左側のロールは回転中心の位置は固定であって、右側のロールの方が、中心軸が左右に動き得るブランクの中心へ一定速度で近づくことにより、ブランク外周にロール突起の形状が転写される。この時、ブランク中心軸は左側にわずかに移動するものの、軸対称性から回転ではロールとの接触による従動回転を起こすのみであり、ブランクは両側から同形状のロールにより対称的な負荷によって変形していると考えて良い。図中右側に本実験でのロールの径方向変位に対するロール反力の推移を示す。反力はロール負荷系に直列に挿入したロードセルによって計測した。また本事例の加工条件の概略を Table 3-3 に示す。今回のモデル化は、ブランクの初期および変形時の形状の軸方向の対称性から、ロールの中央 1 条分の突起に対するブランク変形を対象とした。ねじのピッチは考慮していないが、大きな悪影響はないものとする。

Table 3-3 実験条件^{(45),(60)}

Roll rotational speed	20.4 rpm	Material	S35C ($\sigma_y = 305 \text{ MPa}$)
Roll penetration rate	0.26 mm/rev	Lubrication	None
Groove depth	1.624 mm	Temperature	Room temperature

3.4 ロール接触によるブランク変形

今回のような転造実験におけるロール直下部でのブランク負荷の状況を、模式的に **Fig. 3-7** に記す。

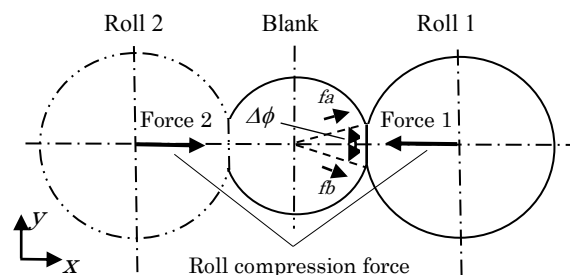


Fig. 3-7 両側のロールによるブランクの変形

図は非回転の両側の円柱形ロールによる円柱形ブランクの初期接触変形状況を、ブランク軸の直交面での断面図で模式的に示したものである。図中 $\Delta\phi$ はロールとブランクの接触部の周方向幅をブランク中心から見た角度を示す。ブランクのこの部分には主に径方向圧縮力が加わるが、加工時にはロールとの転がり接触による周方向のせん断力等も発生することによって接触面の内側や周辺へせん断塑性変形が伝達される。これにより、ブランク変形は軸対称性から外れるものとなり、この力のモデル導入も重要である。

3.5 計算モデル構築の考え方

3.5.1 計算モデルの微小角軸対称構造化の考え方

これまでに **Fig. 3-7** の $\Delta\phi$ に近傍を加えた領域を採り、押えロールと称した計算上の仮想工具を用いてブランク周方向のせん断力による変形を一方向化するモデル化方法を紹介した(**Fig. 3-8**)⁽⁶⁵⁾。本方式は周方向せん断変形の蓄積まで計算することができ、現象再現上の有利性はあるものの仮想の工具を導入する関係から変形計算精度上の不安があった。

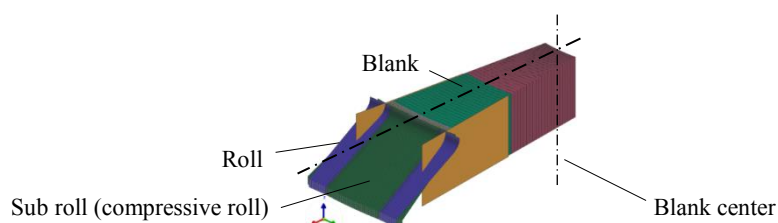


Fig. 3-8 小角度モデルの事例⁽⁶⁵⁾

今回はモデルをこのような小角度モデルよりさらに計算負担の少ない限界的な狭小幅(周方向角度1度以下でソリッド要素1要素幅)の微小角軸対称構造とした上、さらに精度向上の対策も施す。**Fig. 3-9**に今回の実験形状(**Fig. 3-6**)からのモデル化領域を示す。同図の右図は3条の突起の中央部分のみに対応するロールとブランクの断面部分を示すが、微小角軸対称構造モデルはこの断面形状をブランク周方向にソリッド要素1要素分だけの幅を持たせた形のものである(ただし後述の「実験モデル」では周方向全周のモデル化を採用した)。

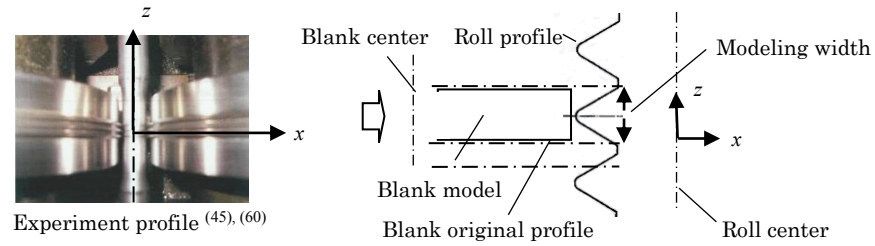


Fig. 3-9 ねじ転造に対するモデル化方法

想定しているモデルのブランク軸直交断面での概念構造を Fig. 3-10 に示す。ロール中心に立ち、ブランク中心方向を見る立場である。まずブランクは $\Delta\gamma$ なるブランク軸周り角度を持つ周方向ソリッド要素 1 層のみの構造とする。この時軸回りは非回転とし両側面は面拘束する。またロールは剛体シェル要素とする。ただしこの構造はこのままでは通常の軸対称モデルに過ぎず、ロール直下のみの接触部の凹み発生に伴うブランク径方向のせん断力や、ロール転動によるブランク表面の周方向せん断力の影響を表現できていない。

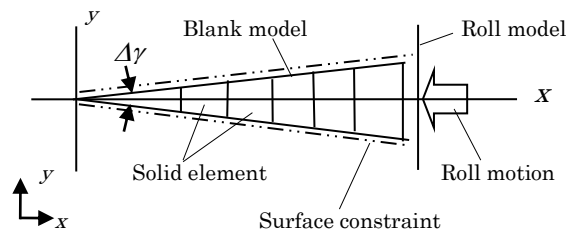


Fig. 3-10 微小角軸対称構造モデルの概念

これらの派生せん断力を導入するため、下記について方式やレベルを検討した上でモデル化を進める。

- (1) ロール中心固定の座標系から見た場合、ブランク接触部の凹み部分には隣接するブランク領域から径外向きのせん断力が加わるが、モデルが 1 層幅ソリッド要素構成であることを利用し、モデルに角速度場を付与することにより、このせん断力を構成要素の体積力(慣性力)の形でモデルに取りこむこととする。
- (2) 一方、ブランク接触面にはロールの転動により周方向のせん断力が発生するが、これについてはロールの押しこみ角度に所定の傾き角(偏角)を付与する形でモデル化することとする。

以下、上記課題への対応検討経過と具体的なモデル化の方法について記す。なお、モデルの計算には衝突解析用ソフト PAM-CRASH を用いた(論文末尾に PAM-CRASH による各計算モデルのデータを示す)。

3.5.2 ロール押しこみ変形に伴うブランクの径方向反力

実験にもどり、回転加工中のブランクの軸直交断面部分を、Fig. 3-11 に示す $\Delta\theta$ の角度を持つ単位厚さのスライス形状の集合体と見て、ひとつのスライス形状の力のつり合いに着目する。同図において、スライス形状 Slice 1 のブランク表面点 P_1 はブランクの回転に応じて径方向変位 δ をもってロール下に引きこまれ、時間 t 後に Slice 2 の P_2 点へ移動する。これをロール中心に中心を置く固定座標から見た場合、ロール直下のスライス形状 Slice 2 はスライス形状 Slice 1 との隣接面から、径方向への凹みを阻まれる形で、側面に図中の径方向外向きせん断力 $S(x)$ が加わると考えられる。この時、Slice 2 の逆の側面にも逆向きのせん断力 $S'(x)$ が加わるが、これはブランクの弾性回復によるもので $S(x)$ よりかなり小さいと考えられる。さらに Slice 2 にはブランク表面でのロール転動に伴い、径外側の面に図示のせん断力 $S(\theta)$ も加わると考えられる。

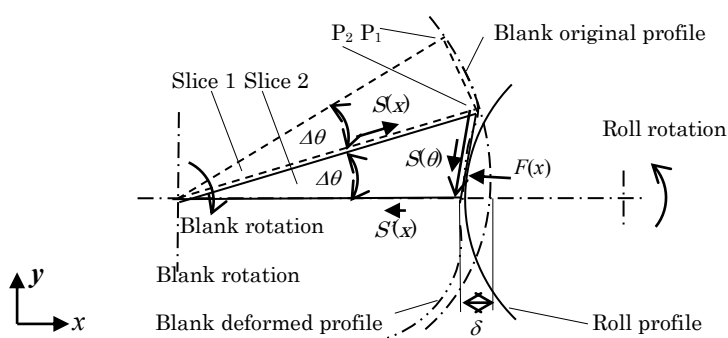


Fig. 3-11 ブランク変形部分に加わる荷重

結局，上記スライス形状をロール中心固定座標から見た場合，ブランクのこの領域の径方向の力は下記による動的なつり合い状態にあるものと考えられる．

- (a)ブランクのほぼ径方向に作用するロール圧縮力 $F(x)$
- (b)スライス形状の入口側の側面に加わる径方向せん断力 $S(x)$
- (c)スライス形状の出口側の側面に加わる径方向せん断力 $S'(x)$

以下これらの力の動的なつり合いと定式化について述べる．

3.5.3 径方向せん断力の計算モデルへの導入

考えやすさのため，Fig. 3-11 のスライス形状 Slice 2 が xz 面の鏡面对称の位置にもあるものとし $F(x)$ を 2 倍にしてこの合計領域の径方向の力の釣合を考えることとする．鏡面对称化によって $S'(x)$ は内力化され， $F(x)$ と $S(x)$ の関係の検討を行いやすくなる． $S(\theta)$ の取り扱いについては後述する．

Fig. 3-12 に，Fig. 3-11 に実線形状で示したスライス形状領域に加わる上の考え方での力の釣合を示す．左右対称の 2 ロール方式のためブランクの中心点是不動と考えて良く，不動点とする．図中の破線は本形状の計算モデルのソリッド要素への分割線のイメージを表す．まず，外力の径方向の釣合は式(1)で示される．

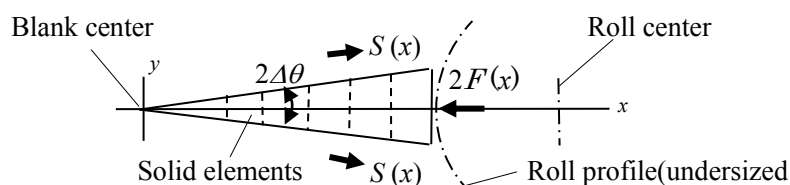


Fig. 3-12 ブランクモデル化部分に加わる外力のつり合い

$$2F(x) = 2S(x) \quad (\Delta\theta \text{ が小さい場合成立}) \quad (1)$$

ここで $S(x)$ を体積力としてモデルに取りこむことを考える．このため外力 $S(x)$ をモデルの各要素に割り振ることが必要であり，**Fig. 3-13** の左図にこの振り分けを示す．要素番号はブランクの径方向外側から内側へ $1, 2, \dots, n$ と設定した．

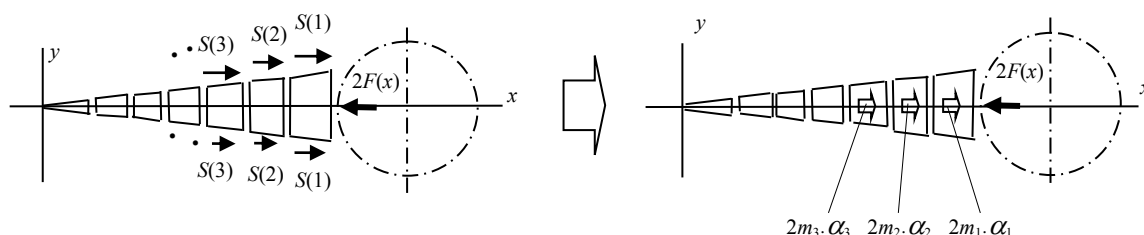


Fig. 3-13 せん断力の要素体積力への変換

まず外力 $S(x)$ を個々要素側面に対応した $S(i)$ に振り分け、その後それらを後述するブランク中心を中心とした角速度場の関数を $\alpha(x)$ として要素内部慣性力 $\alpha(x) \cdot m_i$ (m_i : 要素質量) に変換する (Fig. 3-13 右図)。式(2)は本モデルが 1 層幅のソリッド要素構成であることを利用し 1 要素の両側節点に加わる力を慣性力の形に変換し要素中心に移動させただけであり、 $\alpha(x)$ の分布を選ぶことで成立する関係である。

$$S(x) = \sum_1^n S(i), \quad \sum_1^n 2S(i) = \sum_1^n 2\alpha(x) \cdot m_i \quad (2)$$

また $\alpha(x)$ を各要素位置での値とし、それらを α_i とおけば式(2)は式(3)となり、結局外力 $S(x)$ がモデルの内力に変換されることとなる。

$$2S(x) = \sum_1^n 2S(i) = \sum_1^n 2\alpha_i \cdot m_i \quad (3)$$

ここで $\alpha(x)$ の近似関数形として、外側を面拘束された上記スライス形状へブランク中心からの角速度場 Ω を付与して得られる力の関数を考える。この概念を Fig. 3-14 に示す。

Fig. 3-14 中の下側の図に、付与された角速度場に応答してスライス形状中に発生する径方向体積力の分布を概念的に示す。左側に拘束のない場合の分布を、右側に体積力を支える形で外端表面を剛体板で微小量 δ だけ押しこんだ際の分布を示す。後者の体積力分布は図のように圧縮側に平行にずれるため、角速度場の大きさを選べば右図の実線に示されるような、狙いとしている分布形状を得ることができる。

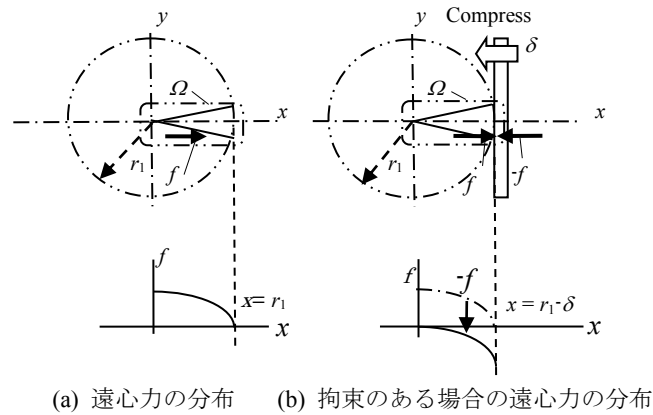


Fig. 3-14 角速度場 (Ω) の導入

この場合の体積力すなわち遠心力 $f(x)$ の分布形は、 r_1 をブランク半径、 m_d をブランク材の質量密度、 $a(x)$ をブランク材スライス形状の断面積とすれば式(4)によって示される。

$$f(x) = \int_0^x m_d \cdot a(x) \cdot x \cdot \Omega^2 dx \quad (4)$$

本積分を実行することにより、単位厚さのスライス形状に対する体積力分布の表現として式(5)を得る。

$$f(x) = \frac{1}{3} m_d \cdot 2\Delta\theta \cdot x^3 \cdot \Omega^2 \quad (5)$$

ここで $f(x)$ のスライス形状最外側での値 $f(r_1)$ を考える。この面では塑性変形が進行していることから、上記剛体板はスライス形状の接触面全面に降伏力を発生させていると考え、軸方向単位板厚のスライス形状に対して式(6)を得る。

$$f(r_1) = r_1 \cdot 2\Delta\theta \cdot t \cdot \sigma_y = r_1 \cdot 2\Delta\theta \cdot \sigma_y \quad (t=1) \quad (6)$$

式(5), (6)を連立させ、角速度場 Ω の値として式(7)を得る.

$$\Omega = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{3\sigma_y}{m_d}} \quad (7)$$

式(7)に実験条件および材料条件から得るデータを代入することにより、 Ω の具体的な数値を得ることができる. 以上からモデルに加わるせん断力 $S(x)$ をモデル要素の体積力で近似的に置き換え得ることが分かった.

なお、式(7)に今回の実験のデータを代入し、 $m_d \cdot \Omega^2$ の値を求めてみると式(8)となる.

$$\Omega = 5.63 \times 10^4, \quad m_d \cdot \Omega^2 = m_d \cdot 31.65 \times 10^8 = m_d \times 10^8 \cdot (\Omega^2 \cdot 10^{-8}) = m_d \times 10^8 \cdot (\Omega \cdot 10^{-4})^2 \quad (8)$$

従って、式(5)を満たすために $m_d \cdot \Omega^2$ として、 m_d の代わりに $m_d \times 10^8$ を代入し同時に Ω を 10^4 で割ったものを代入しても、角速度場の作用としては等価となることがわかる. 実際の計算モデルではこの操作を行った. この操作は要素質量密度の増大に相当するため、計算速度が大幅に高速化する利点がある. その一方で、あらゆる要素変形において変形速度に対応した慣性力の増大を伴うことになるが、本計算モデルは微小角軸対称構造としているためブランク周囲とロール表面との間での高い摺動速度が存在しない等、実験で存在するほどの大きい変位速度を生じることがないため、この操作による慣性力増大の悪影響は少ないものとする.

3.5.4 周方向せん断力の計算モデルへの導入

前述のように周方向せん断力もブランクの回転摺動変形に対して影響が大きい. まず基本的な考え方として、**Fig. 3-15**に記すように微小角軸対称構造モデルとした場合にはブランク周方向の材料逃げが全くないため、これを補填する適切な方策が必要である.

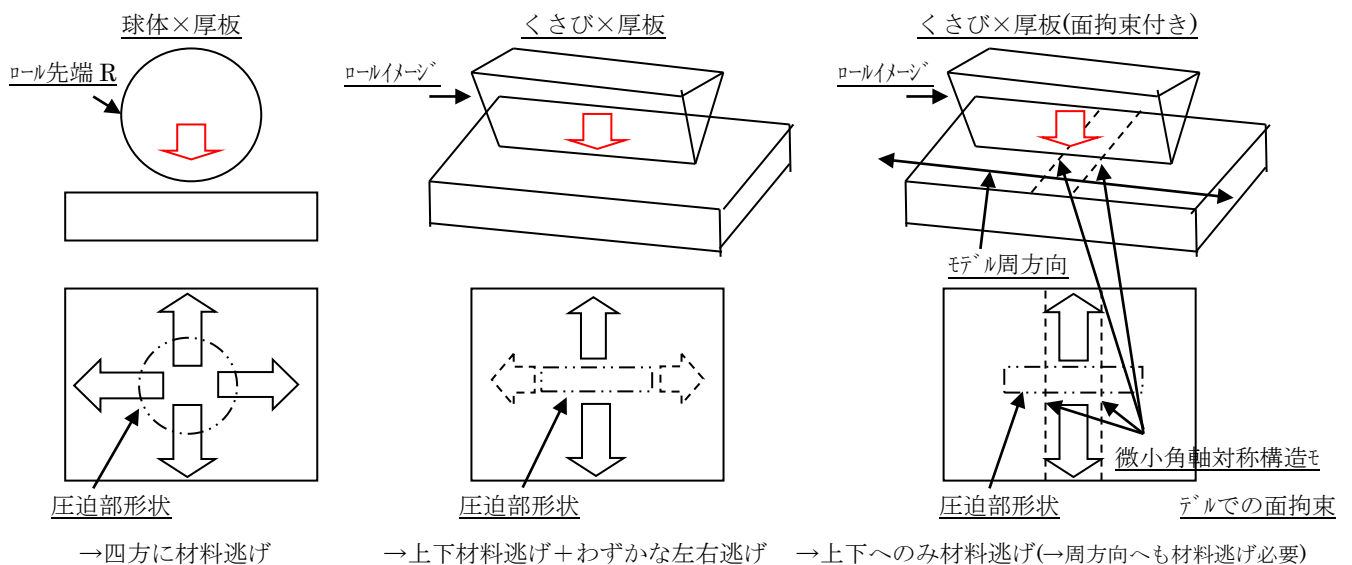


Fig. 3-15 2次元モデルの場合の原理的なブランク変形拘束

Fig. 3-16に、参照論文⁽⁴³⁾における円柱同士の回転摺動接触時でのブランク表面変形と、後述する「実験モデル(360°全周モデル, 6.3節)」による計算結果からのブランク表面の変形とを併記する. ロール中心の進む側においてブランク表面が褶曲変形しているようすが見られ、接触領域に周方向の大きなせん断力が加わり、目に見えるレベルでのせん断変形を起こしていることがわかる.

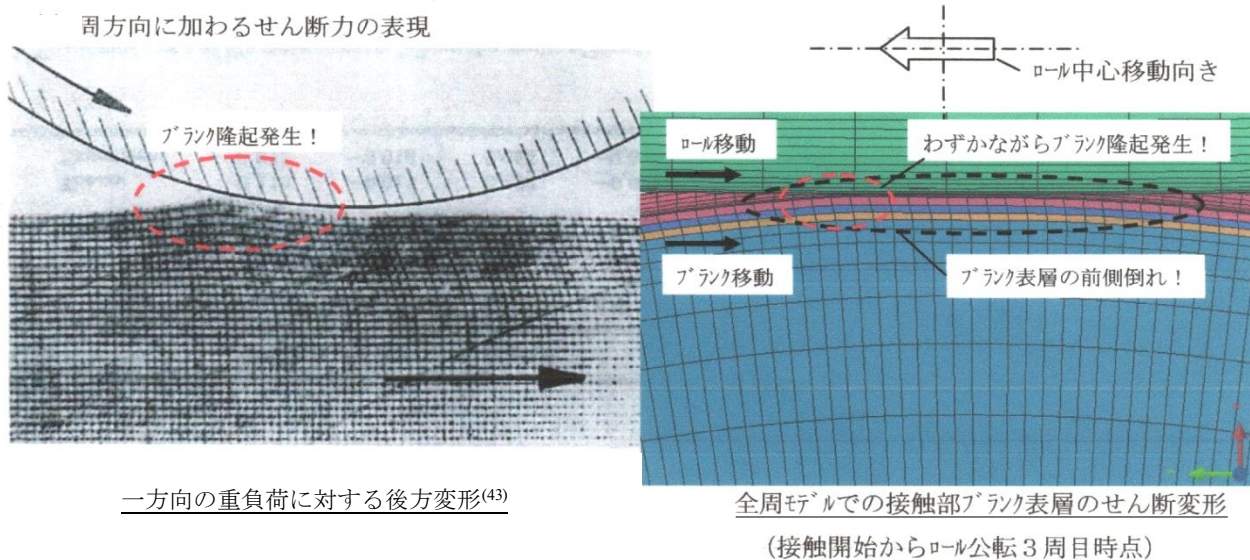


Fig. 3-16 ロールによる回転摺動に対するブランク表面の褶曲変形(右側；実験モデルでの計算結果)

さらに **Fig. 3-17** に円柱接触における塑性変形領域と上記実験モデルでの変形状況の対応性および同モデルでの接触部近傍の回転面内せん断応力との対応を示すが、変形と応力分布状況との関連性が理解できる。

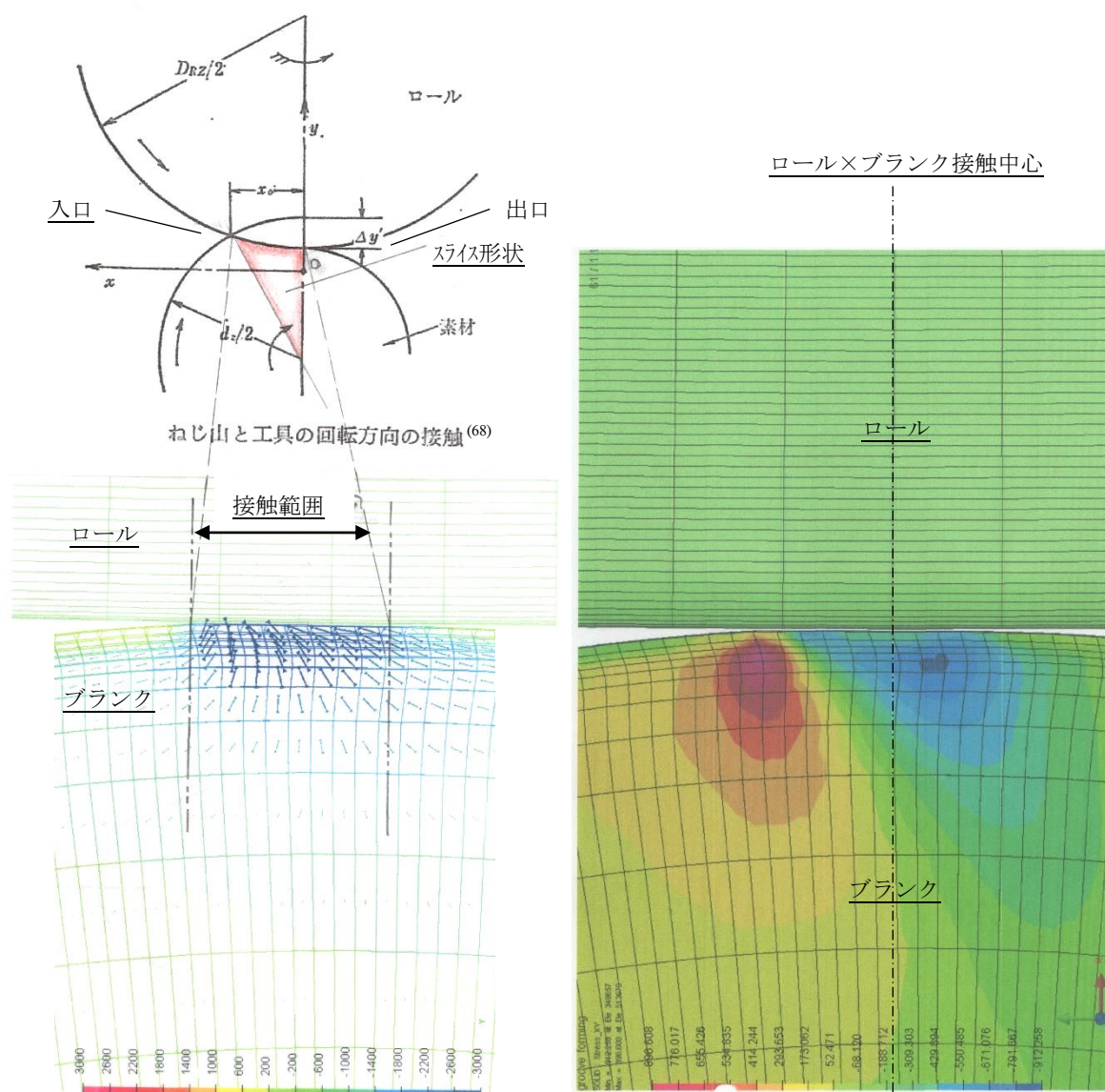


Fig. 3-17 摺動回転時の接触部塑性変形と近傍での計算でのせん断応力分布

以下、上記の知見にもとづき、計算モデルへ上記せん断力、せん断変形を取りこむ方策について説明する。

実験ではロールはブランクの周りを公転しているため、**Fig. 3-18** に示すようにロールは接触面に対して $0 \sim \Delta\theta$ の区間にわたり接触面への転動にともない発生する周方向のせん断力(**Fig. 3-11** の $S(\theta)$)を持続的に加えており、この $S(\theta)$ のブランク変形への寄与を反映するため、非回転の本モデルのブランクに対する等価的な入力方法が必要である。一方、本モデルは前述した通り狭小幅のモデルを用いることから、 $0 \sim \Delta\theta$ の区間内で最も $S(\theta)$ が大きくなると考えられる $\Delta\theta$ 位置(図中太1点鎖線位置)での入力値のモデル化を考える。

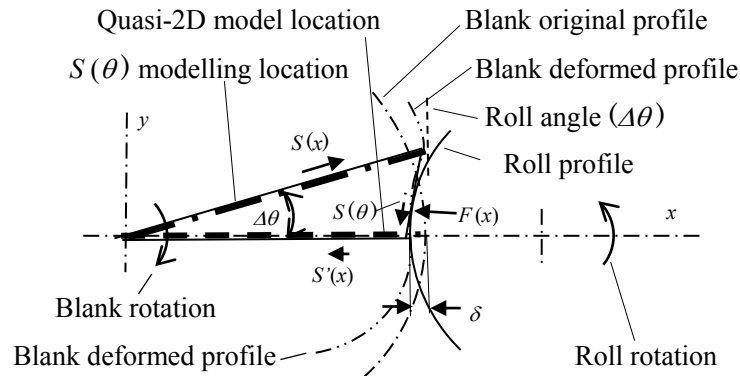


Fig. 3-18 ブランクの周方向せん断力のモデル化

すなわち、ブランクモデルの位置は変形進行を代表させるため図中太破線の位置(xz 面上)とするが、 $S(x)$ や $S(\theta)$ の等価的な入力では、それらの効果において支配的要因となると考えられる $\Delta\theta$ での値を狙い導入する。この考えから、今回のモデルでは **Fig. 3-18** の右側の細破線(Roll angle)のようにロールを上記角度($\Delta\theta$)だけ常時傾けてブランクに当てることとした。これにより、実験時にロール通過ごとに $\Delta\theta$ の位置で最大限に加わる周方向せん断力によるブランク変形寄与を定常的な形でブランクモデルへ等価的に取り入れることが可能となる。ロールにこの「偏角」($\Delta\theta$)を設定する具体的な考え方と方策について **Fig. 3-19** に示す。

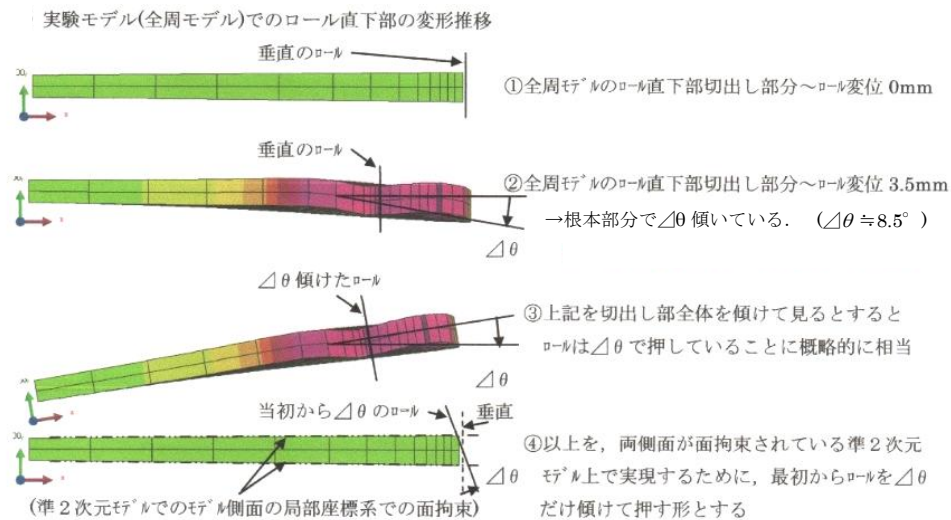


Fig. 3-19 ロールへの偏角設定の考え方と設定方法

3.6 計算モデル作成

以下に今回開発した転造解析用微小角軸対称構造の計算モデルの作成手順と作成結果について記す。

3.6.1 微小角軸対称構造モデルの構成と形状

Fig. 3-20 に上記モデル化方法によって作成した微小角軸対称構造モデルの形状を示す。ブランク軸(z 軸)方

向は実験品形状に沿ってモデル作成した．ブランクの軸中心近傍は変形が微小とみなして，ブランクの径方向の外側 1/2 部分の領域のみのモデルとし，中央側節点は全自由度を拘束した．この場合 Ω は，式(7)に示された r_1 を $0.5 r_1$ と読み換えて算定すれば良い．

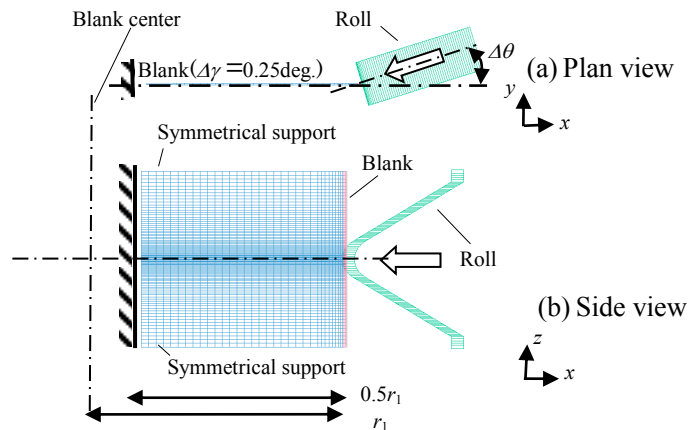


Fig. 3-20 解析モデルの概略図

モデルの要素開き角度はモデル最小要素サイズ幅に対応させたため，理論的に算定される $\Delta\theta$ よりもかなり薄い $\Delta\gamma = 0.25^\circ$ と設定した．また，モデル側面節点は z 軸回り $\pm 0.125^\circ$ の軸を含む局部座標系から設定した平面によって面拘束した．ブランクのソリッド要素には一般的に用いられる六面体要素を用いた．

3.6.2 ロールモデルの駆動とブランク角速度場の設定

ロールはブランクとの接触部分のみを，直径比が 10 倍以上あることから Fig. 3-10 のように平面剛板でモデル化し，ブランク軸方向は実験品形状に沿ったものとした．ロールの駆動方法は Fig. 3-19 に示したように初期に $\Delta\theta$ だけ傾けた形で配置し，その後もロールの向きを保ち一定速度で進行させる形とした．この方式により周方向の所要せん断力をブランク接触面に与え続けることが可能となる． $\Delta\theta$ の値は，Table 3-3 に示したロール押しこみ速度すなわち周回ごとの 1 ロール押しこみ量である $\delta = 0.065 \text{ mm}$ (Roll penetration rate 0.26 mm/rev の 1/4) と Fig. 3-14 でのブランクとの配置から式(9)が成立し，これから $\Delta\theta = 8.55$ (度)を得ることができる．

$$r_1 \cdot \cos(\Delta\theta/2) + 0.065 = r_1 \quad (9)$$

Fig. 3-21 に，時系列でのロール駆動量と式(7)で算定したブランクモデルに加える角速度場の大きさを示す．本計算では計算時間削減から，実際より速く，ロールを 0.6 秒で最大変位(約 0.8mm)に到達させた．

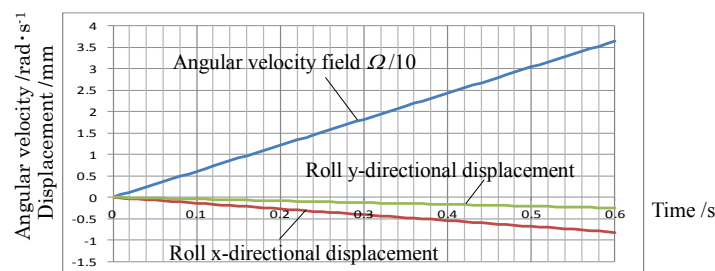


Fig. 3-21 ブランクの角速度場とロール変位

角速度場の大きさ Ω は本モデルにおいては約 36 rad/s が所定値であるが，ロール・ブランク間における接触長が 0 から開始することを考えて，転造完了時点で所定値となるように設定した．ロール駆動については，Fig. 3-20 に示したように，初期傾角 $\Delta\theta$ を保ったままブランクを圧縮させるため y 方向の変位成分も導入した．またロールの x 方向成分も y 方向成分も実験の定常回転条件を考え，線形に増大させた．なお，ロールとブランク間の接触に対する摩擦係数は，曲面同士の接触であることから通常より大きめの 0.2 とした．

3.6.3 実験モデルによる検討

今回のモデル化検討では、実験の条件をほぼそのまま反映する形でモデル作成した実験モデル(Experimental model, 全周のモデル構造で約 42 万節点モデル) と称するモデルでの計算も実施してその結果も参照した。Fig. 3-22 にこの実験モデルの形状を示す。Fig. 3-9 に図解したが、ブランクのモデルは実験でのロールの 3 条の突起の中央一つ分に対応する領域の全周(360°)分を取り、かつブランクの軸方向の対称性から軸方向下側のみの 1/2 モデルとし、モデル上下面は対称性から面拘束した。ただし Fig. 3-22 の右側の図は分かりやすさのため 1/1 モデルの表示とした。ロール駆動条件も実験と対応させたが、モデル要素に加わる慣性力の悪影響を避け、ブランクは非回転とし、ロールを相対的に自転・公転させた。この実験モデルでは、計算時間削減からブランクモデルは径方向外側の 1/4 の範囲に限ったモデルとし、中心側の節点は全自由度拘束とした。

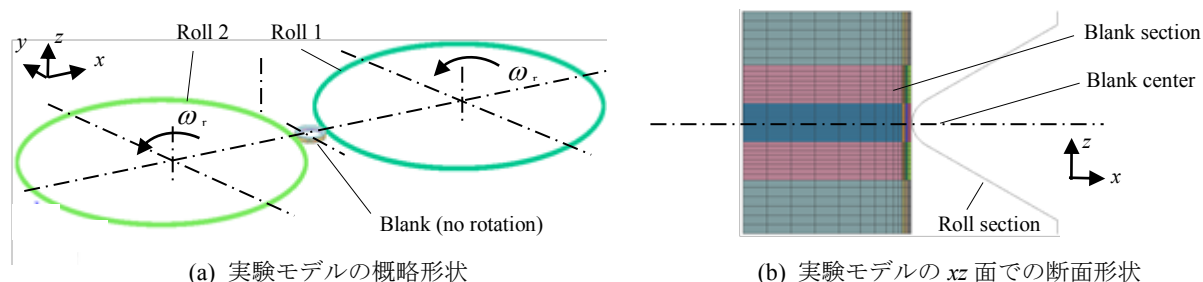


Fig. 3-22 実験モデル (1/1 モデル表示)

3.7 計算結果と実験結果の突合せ

実験結果との突合せに先立ち、Fig. 3-23 に反力の確実な立ち上がりから原点補正した荷重特性を示す。ここで特徴的な点として接触開始からロール径方向変位約 0.5mm までの範囲で荷重の下凸傾向が見られた。

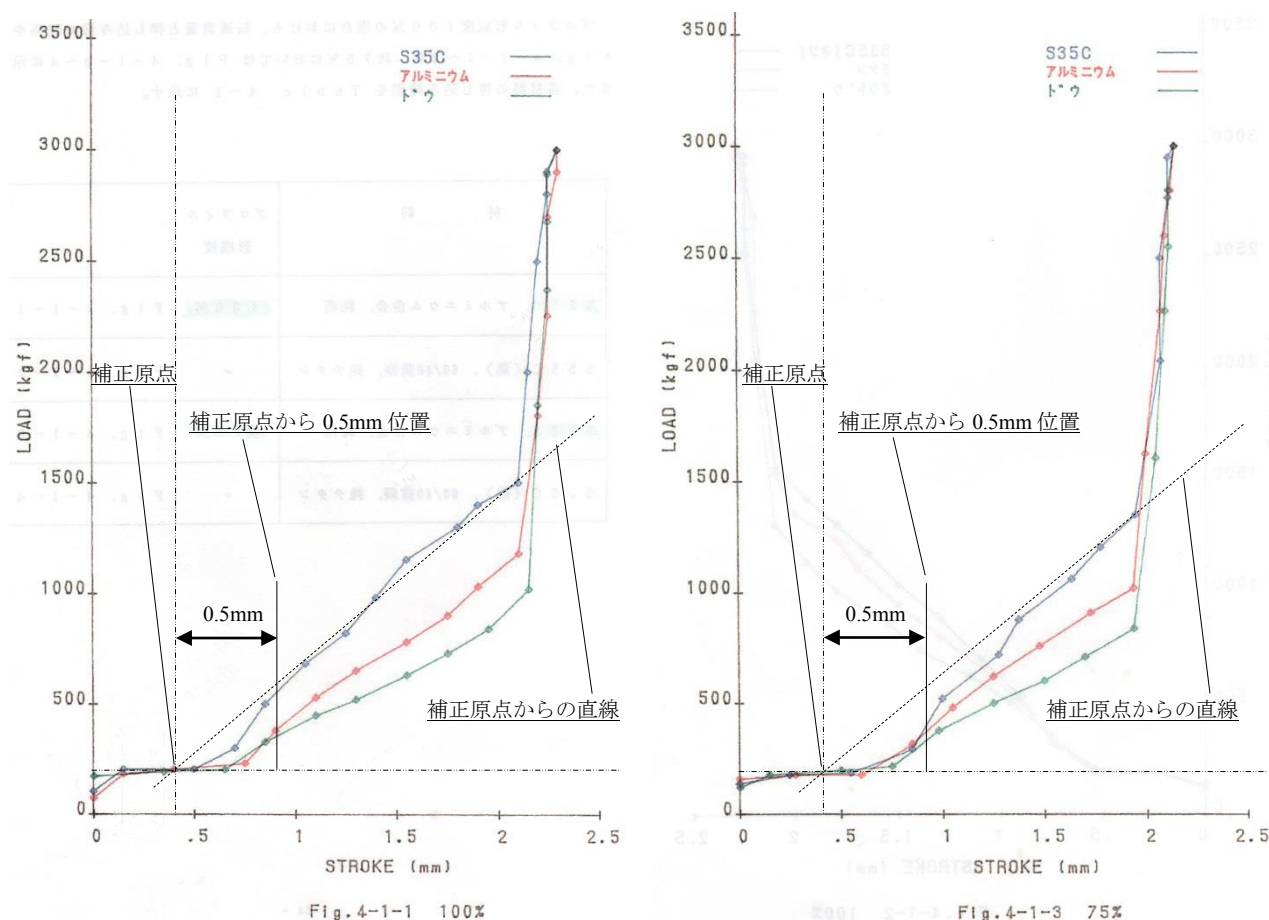


Fig. 3-23 参照した実験^{(45),(60)}でのロール径方向反力特性の原点補正(左右図はプロフィール形成度の相違)

この傾向はブランク材料3種(鉄, アルミニウム, 銅)間でも, プロファイル形成度(75%, 100%)間でもほぼ同等であり, この加工上の何らかのメカニズムの結果と判断される. 計算上の検討を実施した結果, 上述したロール変位 0~約 0.5 mm 区間で現れる実験特性における下凸傾向(Fig. 3-6, Fig. 3-23) は, **Fig. 3-24** の実際の計算結果(実験モデル)から得られた接触面積推移から推定されるようにロール先端の曲率による初期の<部分接触状態>によるものと考えるに至った. このことからロール変位がこの状態を脱すると思われる概略的にはロール先端曲率直径の値(0.54mm)になるまではブランクとの接触が漸増するものと推定し本計算モデル(微小角軸対称構造モデル)では **Fig. 3-25** に示すような「接触面積係数」を設定する形で接触反力の補正を行った.

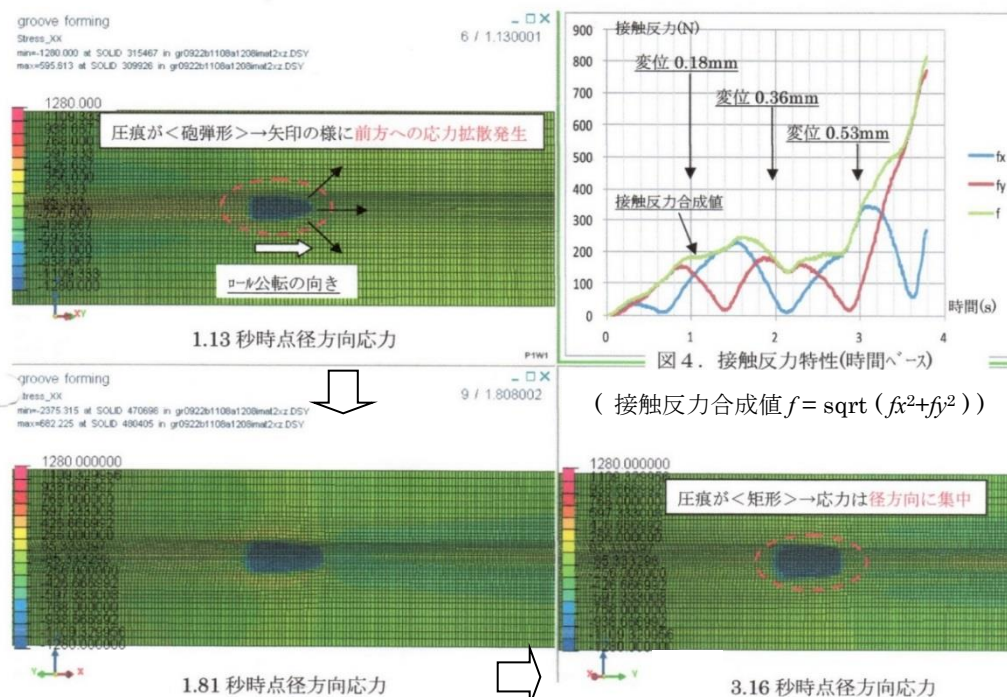
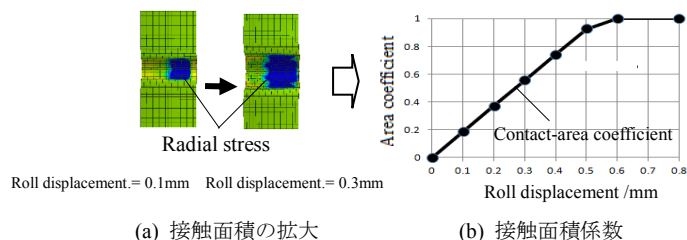


Fig. 3-24 実験モデルから計算された変形初期の部分接触状況と接触径方向反力



(a) 接触面積の拡大

(b) 接触面積係数

Fig. 3-25 ロールの接触面積係数

以上の手順で作成した微小角軸対称モデルでの計算結果を実験結果と比較した. まず **Fig. 3-26** にロール反力の推移を, 実験値は Test, 実験モデルは E-model, 本計算モデルは A-model と表示して比較を行った.

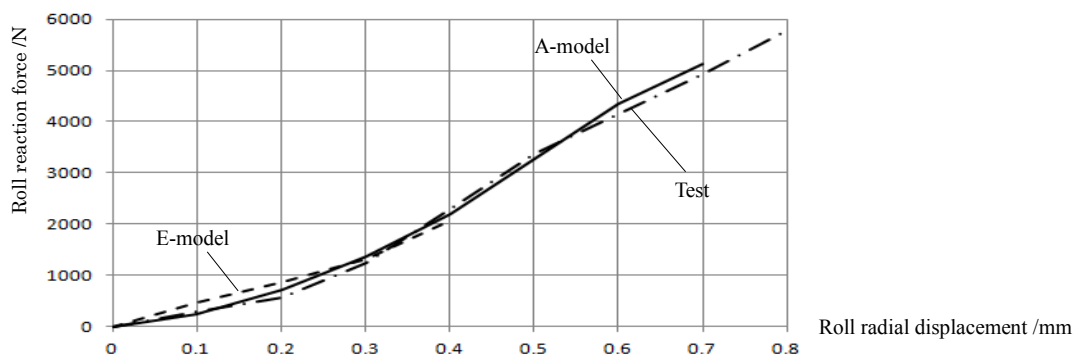


Fig. 3-26 ロール反力の実験^{(45), (60)}・計算比較

結論的には Fig. 3-26 のように 2 種の計算モデルの計算結果は実験の結果との良好な対応が得られた。ただし本計算モデルにおいては、ロール変位全般でモデル開き角 $\Delta\gamma$ に対する実験の接触部開き角 $\Delta\theta$ の比率を乗じる必要があり、式(10)によって得られる倍率 λ での換算を施した。

$$\lambda = 2\Delta\theta/\Delta\gamma (=17.1\text{deg.}/0.25\text{deg.}), \lambda = 68.4 \quad (10)$$

Fig. 3-27 に本計算モデル(A-model)の応力・ひずみ出力を実験モデル(E-model)と比較し Fig. 3-28 に比較した結果を示す(Fig. 3-27 の右下位置に示す領域の大きさを比較)。ただし、実験モデルがロール変位約 0.4mm 時点で要素異常変形を示したため、この比較は両者の比較をロール変位 0.3mm までの範囲にとどめた。

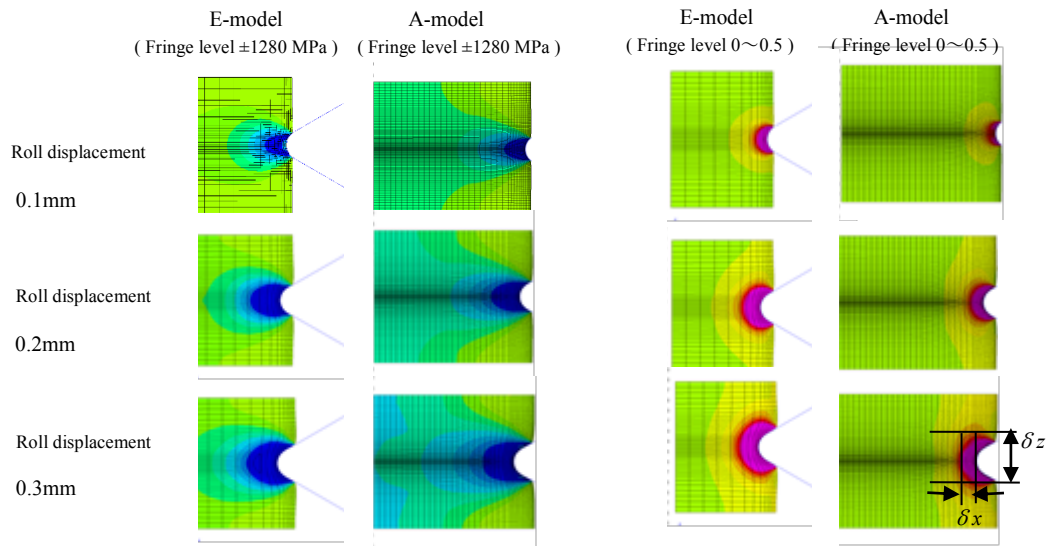


Fig. 3-27 実験モデルと計算モデルにおける半径方向応力および相当塑性ひずみの分布比較

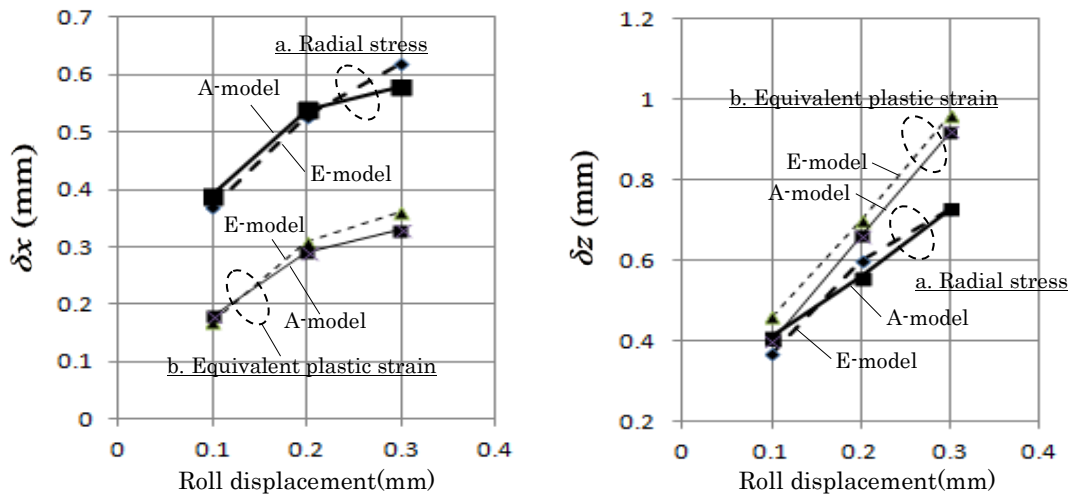


Fig. 3-28 実験モデルと計算モデルにおける半径方向応力および相当塑性ひずみの分布範囲比較

Fig. 3-29 に実験モデルと計算モデルの径方向応力(s_x), 相当塑性ひずみ(ep)について、同図上側に示すブランク上の 2 点ずつで採った両者の時系列値で比較した結果を示す。下側のグラフの用語については、 $\sim 3d/2d$ は実験モデル/ 計算モデルを、 $\sim 1/2$ は Point 1/Point 2 を示す。

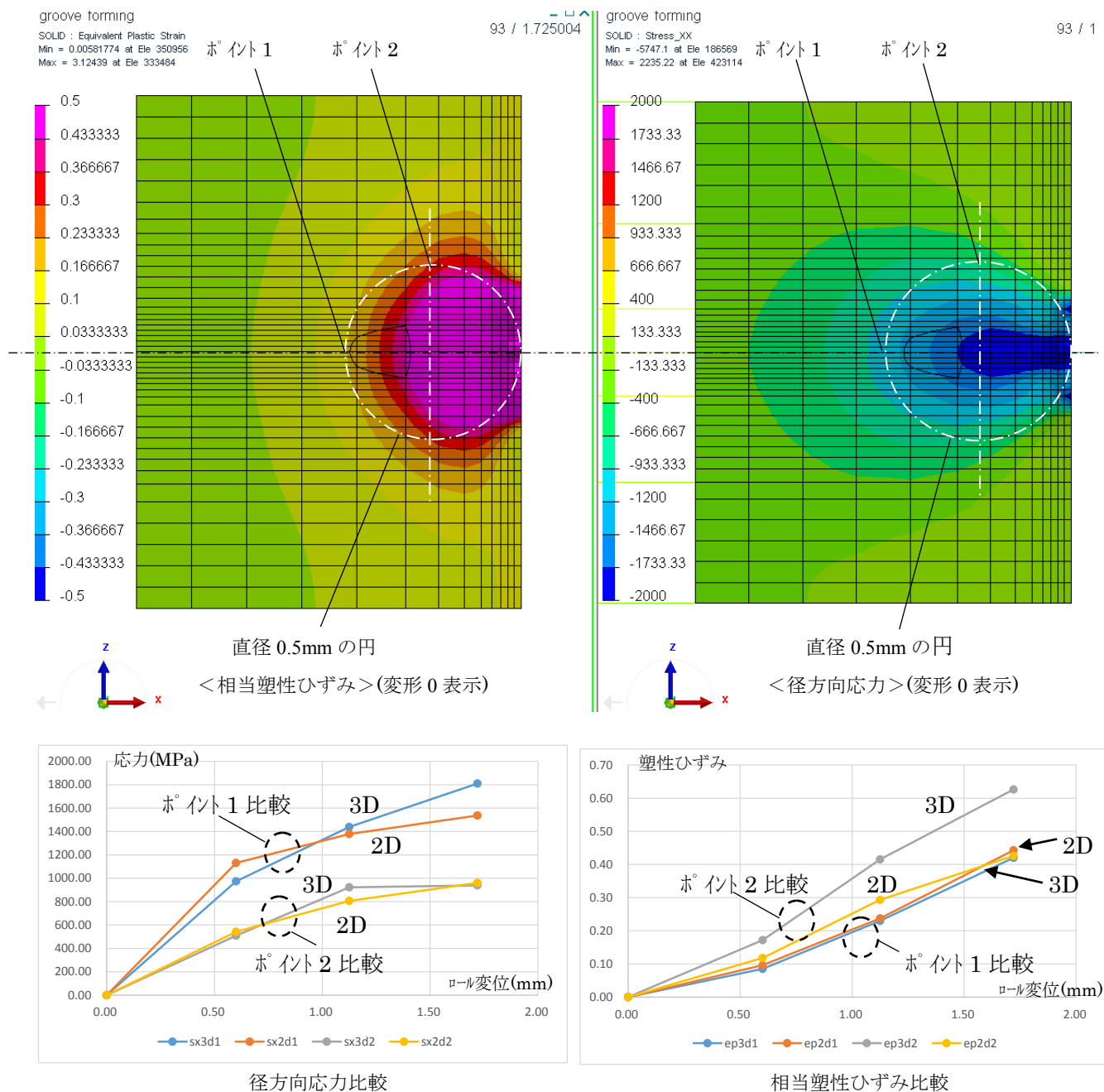


Fig. 3-29 計算結果からの接触部位径応力と相当塑性ひずみの抽出(3D ; 実験モデル, 2D ; 準2次元モデル)

Fig. 3-28 からは、両モデル(全体モデルと計算モデル(微小角軸対称構造モデル))の径方向応力および相当塑性ひずみの分布範囲の大きさはおおむね 10~20% 誤差内におさまっていることが分かる。また Fig. 3-29 の結果比較からは、まず両モデルの径方向応力の比較では、ほぼ 10~20 % 誤差内での対応を示していることがわかる。ただし相当塑性ひずみの比較では Point 1 では対応は良いが Point 2 では大変形時に相違が広がった。

なお、計算モデル(微小角軸対称構造モデル)での計算時間は、モデルの簡潔さが奏効して上記の 0.3mm までの計算において、実験モデルの約 1/2000 以下の計算時間となり、大幅な時間短縮効果が示された。

3.8 考察

3.8.1 実験モデルからの知見

まず実験モデルでの結果と参照実験結果との突合せ結果から転造における接触面での変形につき考察する。**Fig.3-30** に **Fig.3-22** で示した実験モデルの中央断面形状のロール変形 0mm 時点と 0.3mm 時点の形状を示す。

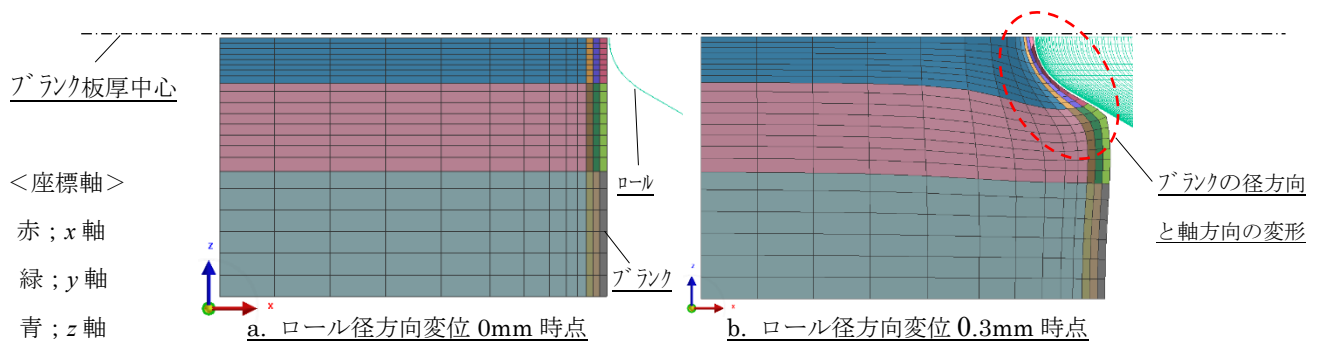


Fig.3-30 実験モデルの中央断面での変形形状

図中丸印のように、ロールの圧縮力を受けたブランクが径内側向き・板厚外向きに变形している様子がわかる。ところが塑性変形は非圧縮なため径外向き以外の变形はこの断面面外方向への变形を伴うはずであり、この図はこの断面へその投影形状が現れているだけである。この断面外変形の状況を把握するため、**Fig.3-31** に、この断面のソリッド要素 1 要素幅の部分抽出し、面外変形の状況を調べた。径方向および板厚方向に 1 ～ 2 周期程のよじれ変形が発生していることがわかる。図右側に断面の上側 1 層のみ(板厚中央面沿い)のソリッド要素列の变形を示すが、転動するロール面に拘束されてロール進行方向へ引き摺られる初期の期間(ロール変位 0mm ～ 0.1mm)、ロールとブランクの接触圧中心が外側へずれるために逆側へ動かされる期間(ロール変位 0.2mm 以降)が発生する状況が示されていると考えられる。従ってロールの接触圧が高い程ブランク接触面の横向き(周方向)の動きが大きくなり、断面としての座屈状の变形の可能性があることに注意すべきであろう。

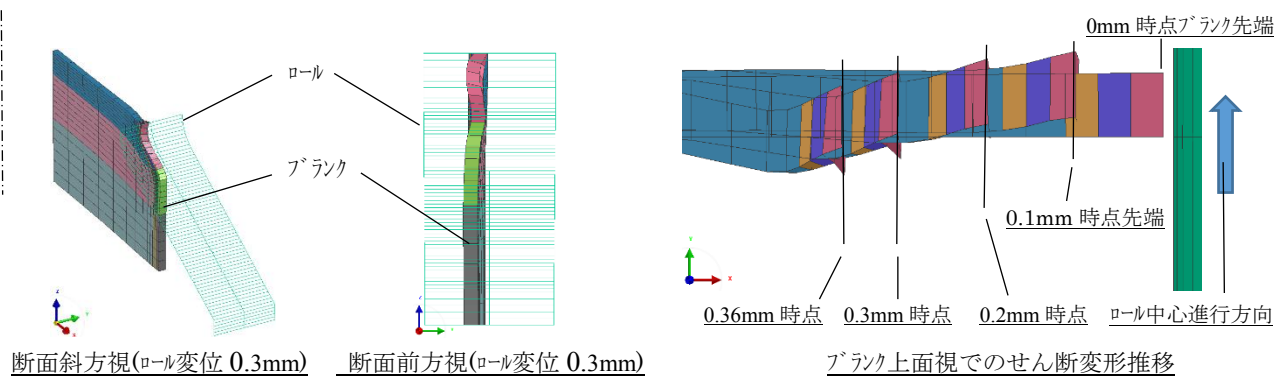


Fig.3-31 実験モデルでの中央断面部分の断面外変形(周方向せん断変形)

また、詳細状況になるが実験モデルで、**Fig.3-32** に変形開始直後でのロールとブランクの接触面でのせん断応力の断面視での状況を分布図とベクトル図で示し、**Fig.3-33** に同じく実験モデルでの、接触部分の断面内要素上に発生するブランクの立ち上がり変形(0.1mm ～ 0.3mm 時点)でのせん断応力の推移状況を示した。

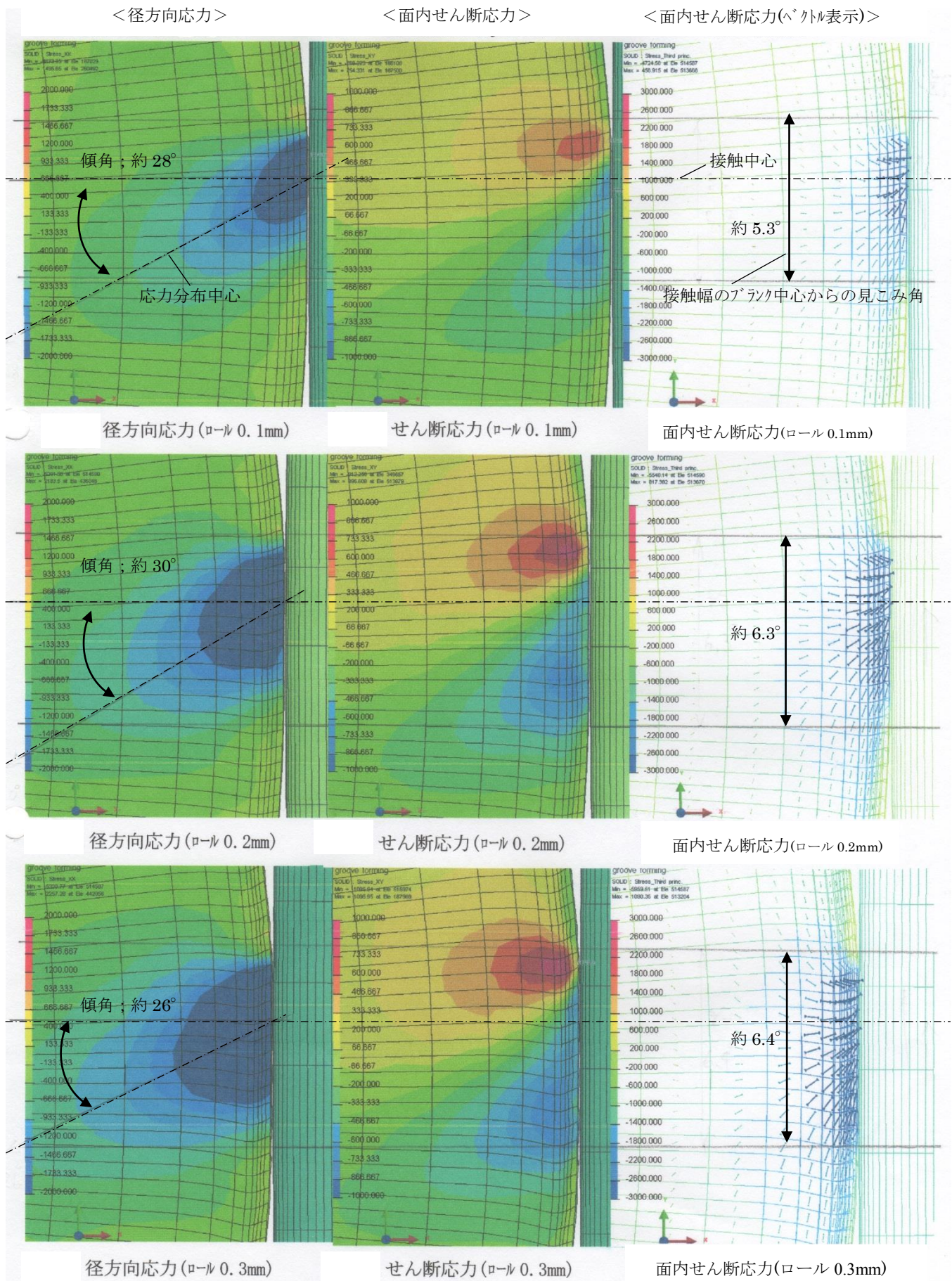
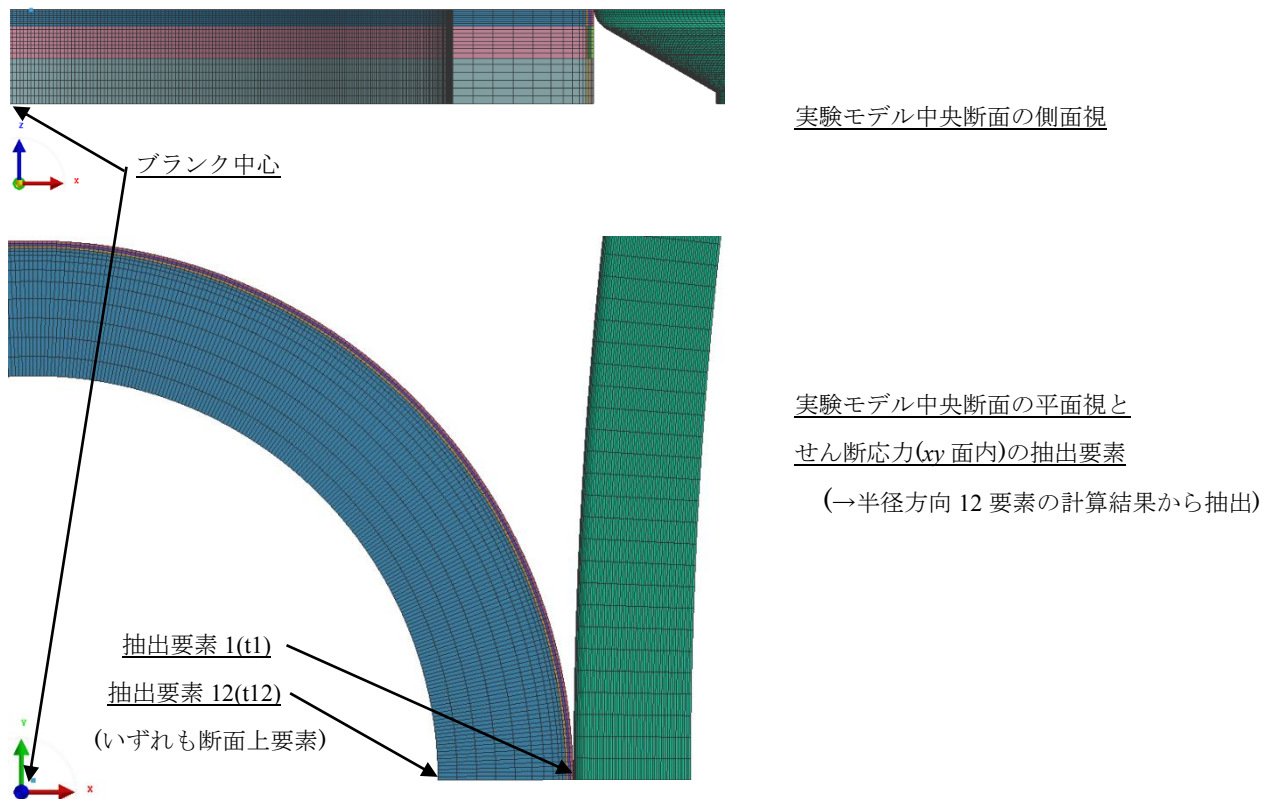
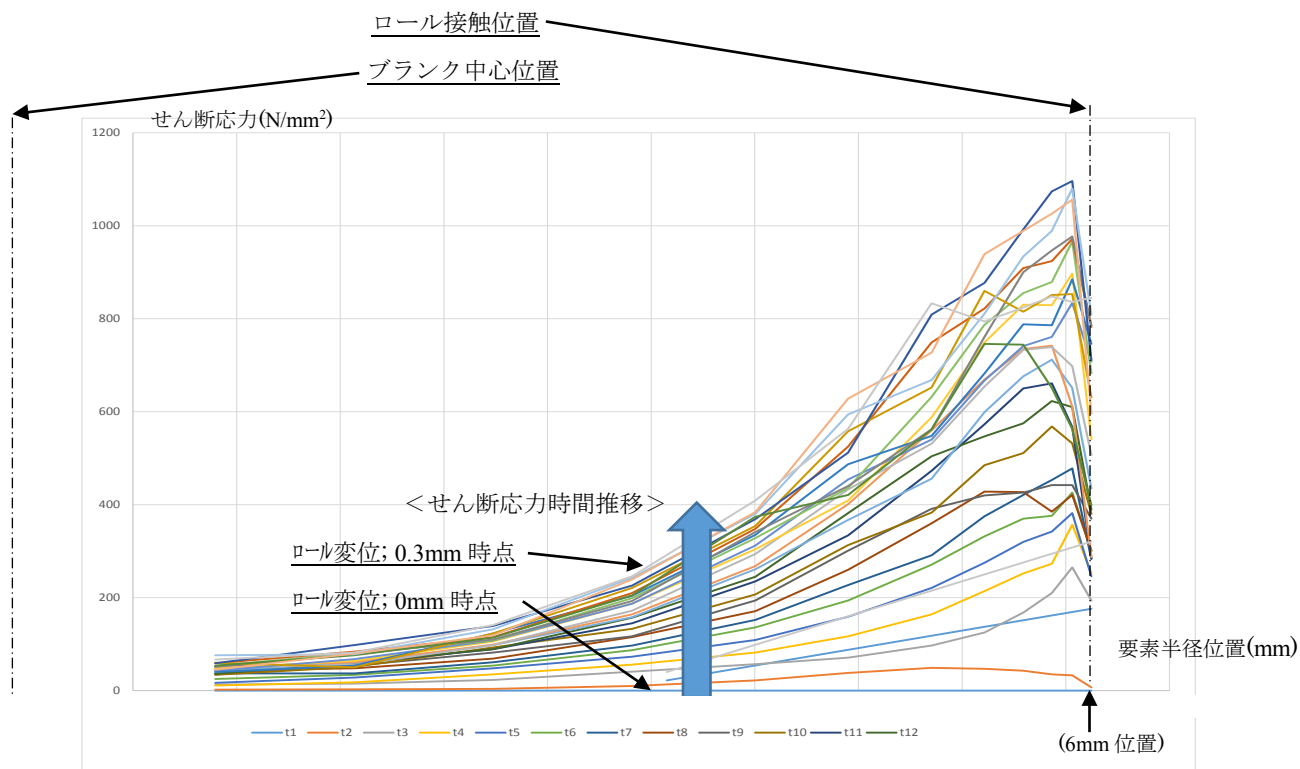


Fig.3- 32 全体モデルでの変形立ち上がり時点の接触部分の径方向応力と断面内せん断応力



a. 実験モデルでのせん断応力抽出位置（ブランク中央断面位置要素）



b. 上記要素からのせん断応力の推移

Fig.3- 33 全体モデルでの接触部分に発生するせん断応力の推移

ロール接触によるブランク接触面上で、発生応力の中心がこの実験条件では進行向きに約 30° 傾いている状況や接触面内せん断応力分布の時間的変化が高次関数の形で増大する等の知見が得られた。

3.8.2 計算モデルからの知見

つぎに、計算モデル(今回開発の微小角軸対称モデル)での工具底付き変位までの計算結果から得られた、ねじ転造解析での変形・応力・ひずみに対する知見について述べる。ただし、この計算モデルではロール変位約 0.7mm 時点で発生した要素異常変形を抑えるために下記①～④の対策を講じた(Fig.3- 34 に図解)。

- ①エッジ同士の接触を回避するため、ロール中央 R 部のみメッシュ分割を詳細化
- ②ブランク板厚中心節点の上下方向のふらつき変位抑止のため、節点の上下(z)方向変位を拘束
- ③要素異常変形(negative volume)抑止のため、ブランク表層要素を強度増大(剛性・降伏応力を 2 倍化)
- ④摩擦係数を分布化(ロール・ブランク間の摩擦係数をロール外側については 0.2→0.4 に増大)

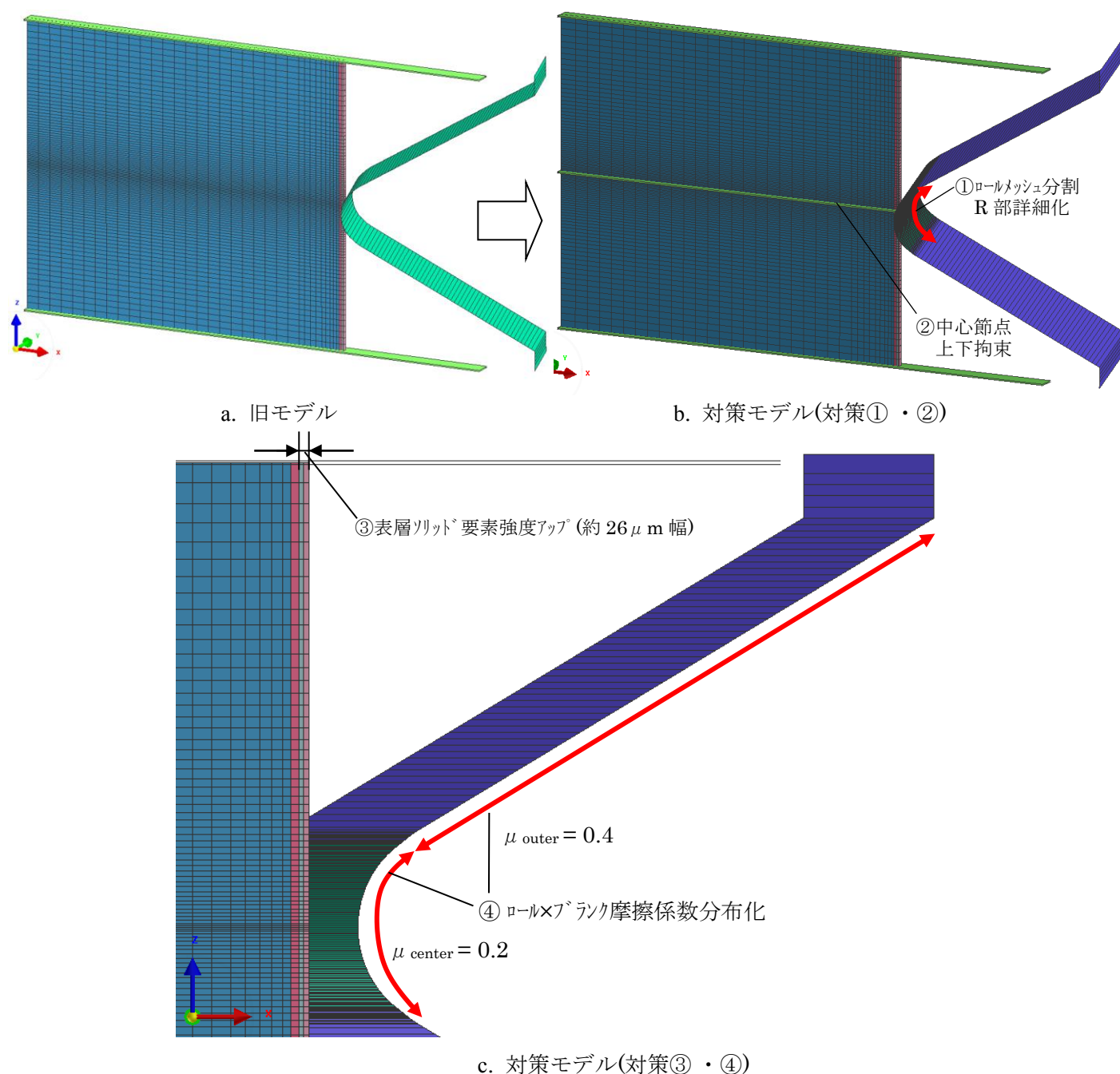


Fig.3- 34 計算不安定に対する計算モデル(微小角軸対称モデル)修正内容

上記③の場合、表層はブランク全体に対する体積比が少なく、この措置は最終結果に対し大きな悪影響はおよぼさないと考える。④については、R 部よりも平坦部の方が摩擦が掛かりにくいいため本対策を施した。

Fig.3- 35 に、ロール変位約 0.9mm までの径方向応力・軸方向応力・相当塑性ひずみの分布について示す。なお、各出力特性の最大値が大きくなったため各図の出力値表示範囲を前節の場合よりもやや増大させた、

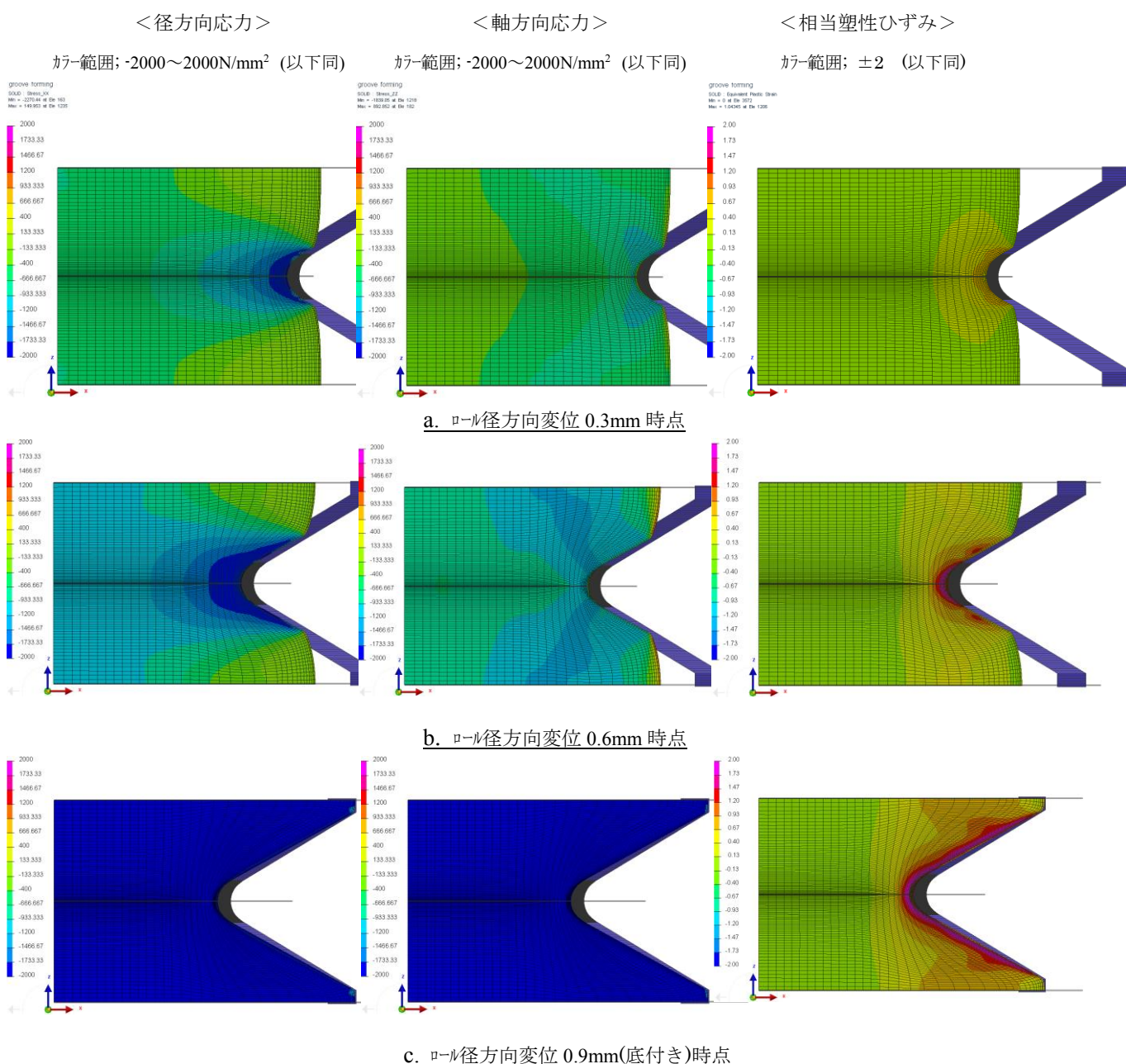


Fig.3-35 微小角軸対称モデルでの工具底付き(ロール変位 0.9mm)までの各種特性値の計算結果

この図から、径方向応力は径内側へ伸び、軸方向応力はロール面とほぼ 45° の方向に分布が拡がり、相当塑性ひずみはブランク外周部に集中する傾向が見られる。底付き時点では、径・軸方向応力は断面全体に高いレベルで拡がり切り、相当塑性ひずみはロール面近傍部に全面的に張り付くような状況を示している。

つぎに **Fig.3-36** に、ロール押し込み反力(ロール・ブランク間の接触・摩擦によって発生する力のうちのロール径方向成分)について示す。またこの反力の実験値(**Fig. 3-23**)との比較を **Fig.3-37** に示す。 **Fig.3-37** の場合計算出力は **Fig.3-26** の場合と同じくモデル幅・ロール条数・ロール変位比率に対して換算を行い、実験と対応させた値で表示している。ただし、ここでは荷重特性のマクロな比較が目的であるため、荷重立ち上がり初期の中間接触段階での荷重削減は実施していない(本章 3.7 参照)。

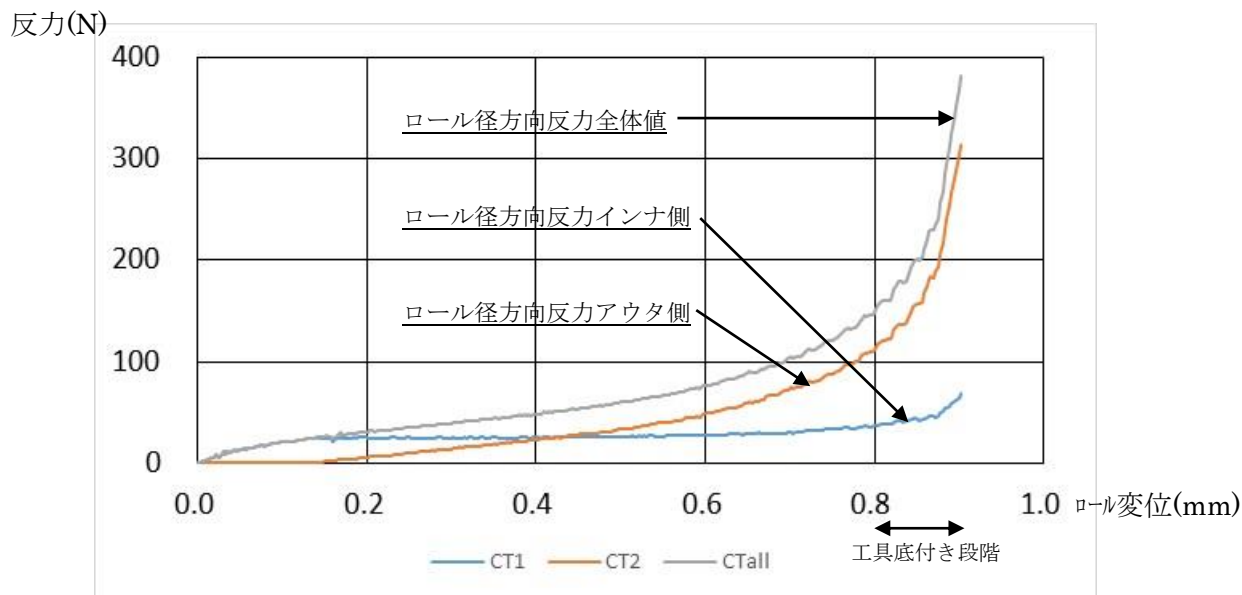


Fig.3-36 微小角軸対称モデルでのロール径方向反力(計算からの直接出力)

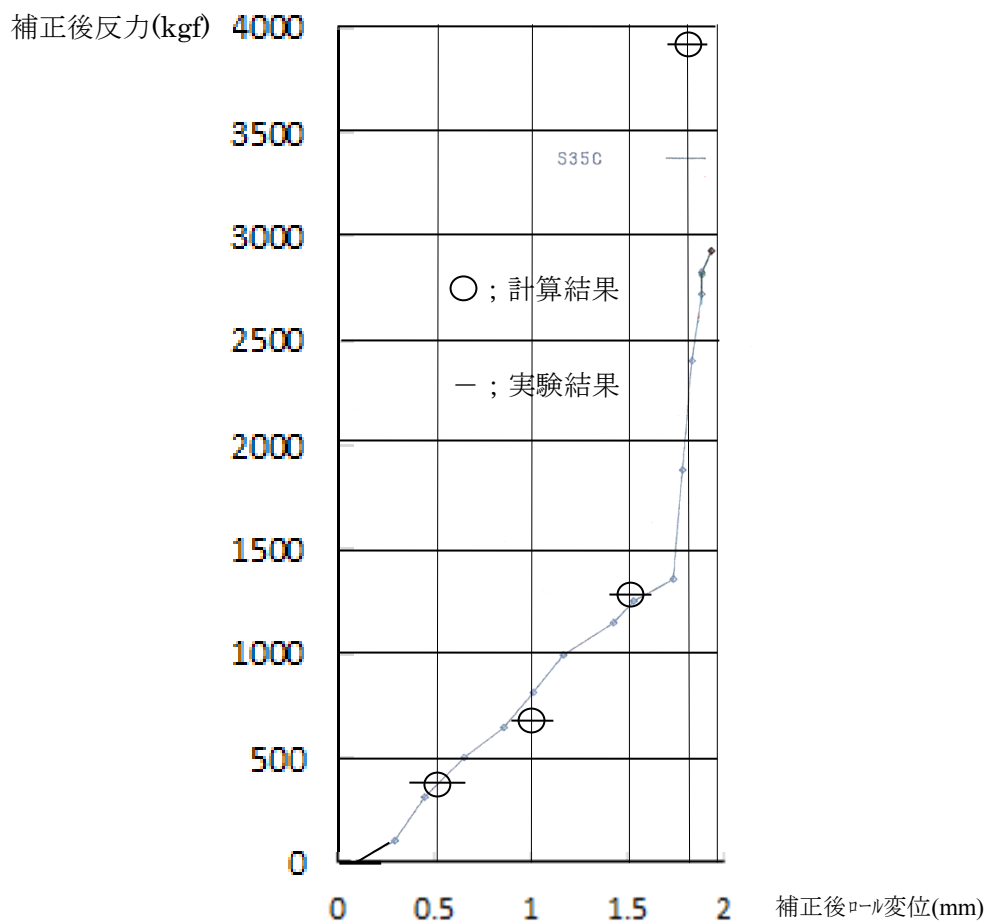


Fig.3-37 ロール径方向反力計算値の実験結果^{(45),(60)}(Fig. 3-23)との比較

Fig.3-36 から、ロール先端部はその半径程変位した後はほぼ等レベルの荷重が底付き段階まで持続することがわかる。これは先端部がブランクにめり込んだ後はロールのアウト側部分の接触による変位拘束が強まるため、反力が横這いになるものと考えられる。Fig.3-37 からは、ロール接触開始から工具底付き(補正後ロール変位 1.75mm 前後)段階まで、マクロな形では本計算結果は実験結果と良く対応していることがわかる。計算では Fig.3-35 のようにロール変位 0.9mm 時点(実験の 1.8mm 時点に対応)で径方向応力・軸方向応力がモデル断面全体で真っ青(大きな負応力)となっており、この底付き状態と対応した状況が示されている。

さらに、この計算結果からの、ロールによりブランクが表面から押し込まれる際の軸を含む断面上での各節点の速度の分布状況について Fig.3- 38 に示す。

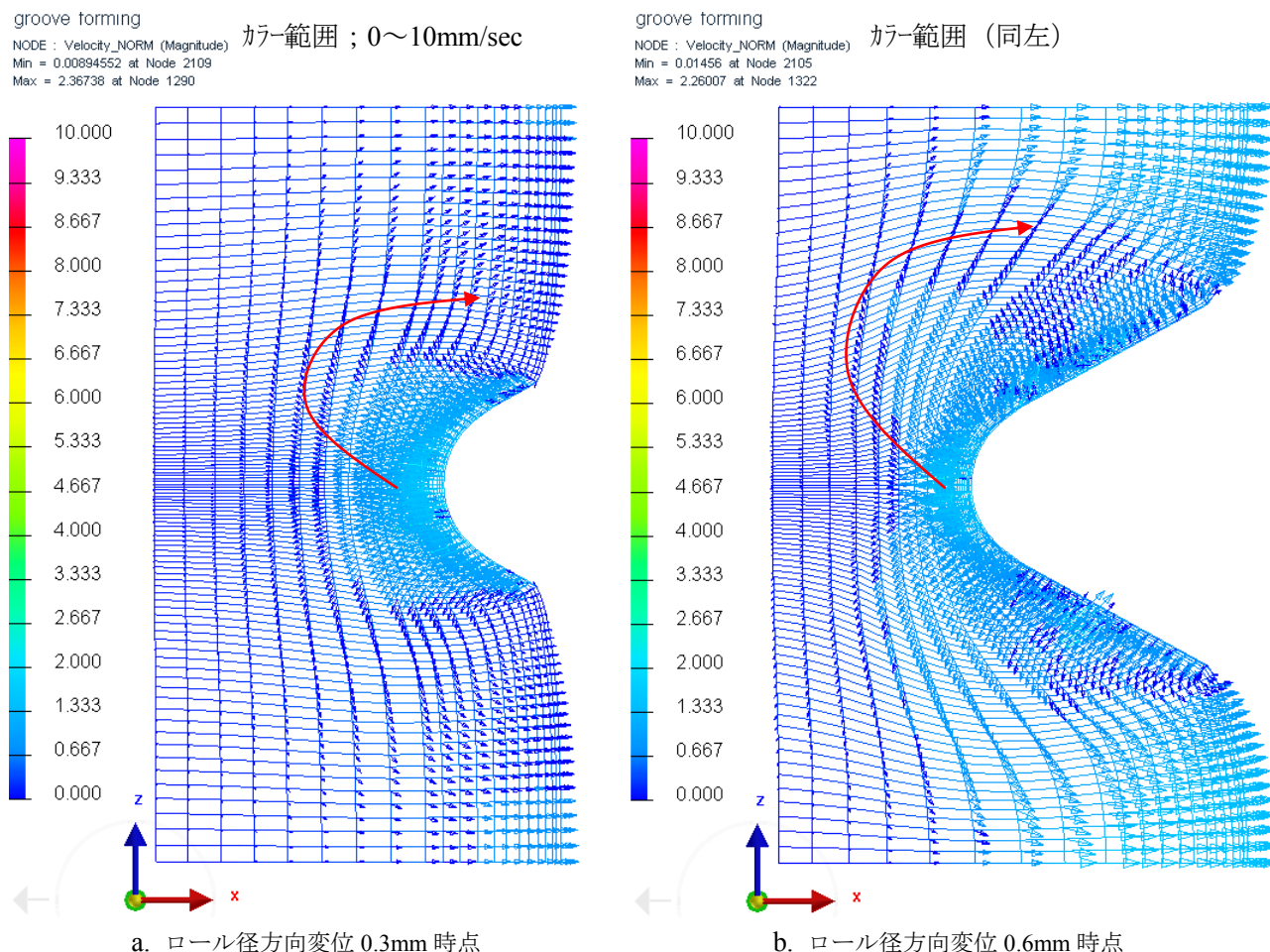


Fig.3- 38 ロール変位進行に対するブランク断面内での節点速度分布(ベクトル表示)の推移

本図から、ロール接触部の材料が板厚中央部分から巻き上げられる形で上下端領域(ねじ山部分)へ移動させられているようすが見られる。また、これが比較的表層に近い部分で発生、推移する状況も知られる。

最後に、転造完了(ロール変位 0.9mm の底付き)時点での、計算モデルを上下コピー(×2)、回転コピー(×120(30° 部分))して実物のイメージに近い形として表示したものを Fig.3- 39 に示す。

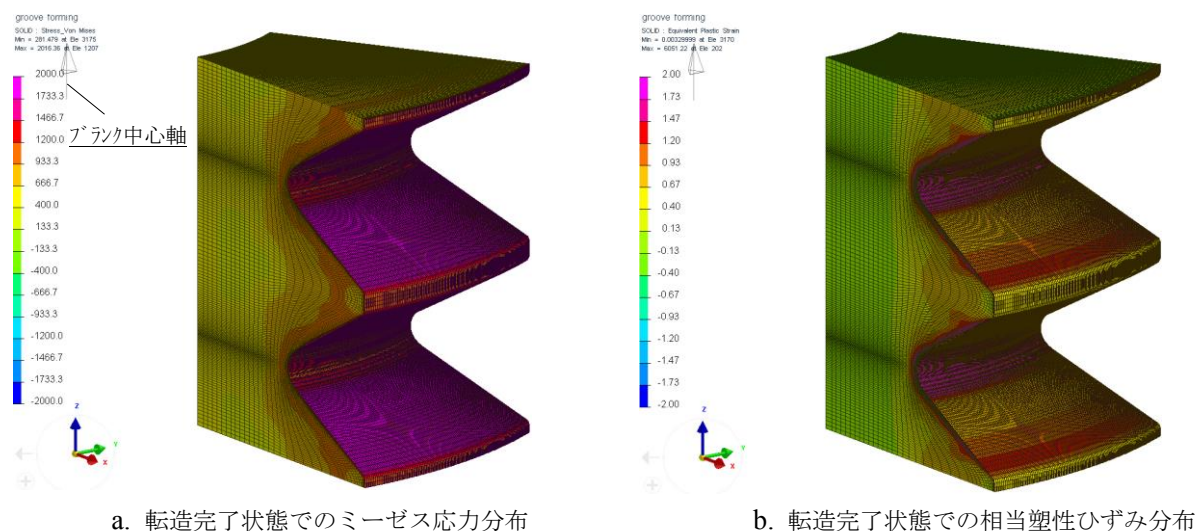


Fig.3- 39 転造完了状態の計算結果の上下・回転コピー表示

この図により、丸棒から狙いとしたねじ山(ピッチは設定せず)が破綻なく形成される状況が理解される。左側の図のミーゼス応力の分布図からは、ブランクのロールとの接触面上のほぼすべての領域で最大レベルのミーゼス応力が発生しており、接触面で全面的な降伏が発生しているようすがわかる。

なお、この<転造解析用微小角軸対称構造モデル>の開発の経緯については、すでに大略については研究論文として公開済みであるが⁽⁶⁶⁾、公開論文においては計算モデルの不安定性もあったため、ロール径方向変位 0.3mm までの応答について実験検証をした結果について述べており、それ以降ロール径方向変位 0.9mm までのモデル改善検討については本論文での記述が初めてのものである。

3.9 結論

- (1)負荷に角速度場とせん断変形場を導入した周方向 1 層幅ソリッド要素構成の転造解析モデルを開発した。
- (2)この解析モデルの計算結果をロール反力で実験結果と比較した結果、良好な精度での対応が得られた。
- (3)計算結果の考察から、転造においてはロール接触圧が高いほどブランクの断面外(周方向)変形が大きくなるとの知見が得られたが、これは本章 2 節のモデル化参照用基礎実験での考察結果とも対応する。
- (4)工具底付き時点(ロール径方向変位約 0.9mm 時点)までのモデル計算結果からは、実験結果での工具底付きまでのロール反力特性との概略的な対応が得られ、また、底付き状態におけるブランクの径方向応力・軸方向応力・相当塑性ひずみの分布状況に対する知見も得られた。
- (5)この解析モデルは、ほぼ設計条件・実験条件のみから簡潔な手順で計算モデルを構築でき、計算時間も大幅に減少できたため(底付きまでの計算でも全周モデルのほぼ 1/1000 以下)、転造部品の開発初期段階の変形検討に有効な手法と考える。

第 4 章

ボスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデルの開発

第4章 ボスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデルの開発

4.1 緒論

前章において、周方向ソリッド要素 1 層幅構成のモデルで、ブランク負荷に軸回り角速度場を導入することにより効率的な転造解析用微小角軸対称構造の解析モデルを開発した経過を述べた。今回は、その手法を拡張適用し、転造と比べてロールのブランク径方向加工距離の長いボスフォーミングにも適合する方式とした、ボスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデルの開発を行った⁽⁶⁷⁾ので、その経過についてまとめる。

4.2 モデル化参照実験

今回は、円錐台形状のロール($\phi 125\text{mm}$)を用いたブランク円板($\phi 130\text{mm}$)へのボスフォーミング加工事例⁽⁶¹⁾をモデル化検討対象とする。実施された実験の概略を **Fig. 4-1** に示すが、強制回転されるブランクの中心に向けて回転軸を 45 度倒したロールを一定速度で近づけ、ブランク材料を中心側に集める加工の実験である。このときロールはブランクとの接触によって従動回転を起こすのみである。ブランク材料はアルミニウム (A1050)、ロール材料は工具鋼である。今回の事例の加工条件概略を **Table 4-1** に示す。

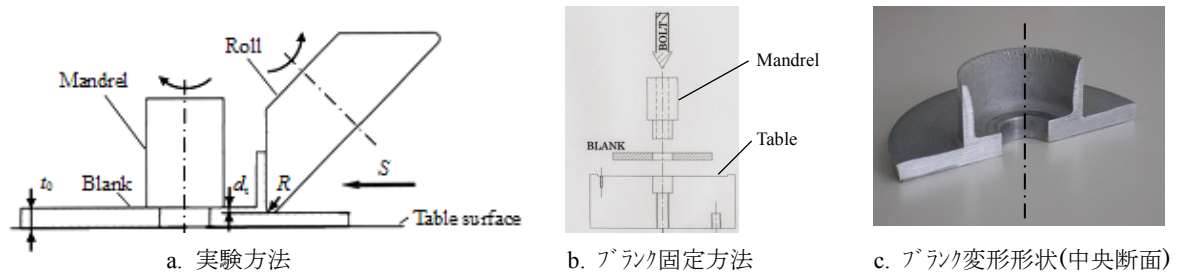


Fig. 4-1 ボスフォーミング実験とブランクの変形⁽⁶¹⁾

Table 4-1 実験条件⁽⁶¹⁾

Round-off radius of roll R [mm]	3
Indentation depth of roll d_t [mm]	2.25
Blank rotational speed ω_b [rpm]	187.5
Feed rate of roll v [mm/rev]	0.2
Blank thickness t_0 [mm]	5
Stroke of roll S [mm]	35

4.3 ボスフォーミングにおけるブランク変形

Fig. 4-2 に対象としたボスフォーミング実験でのロール直下部のブランク負荷の状況を示す。円錐台形状ロールによるブランクの初期接触状況を、ブランク回転軸直交面の平面図で模式的に示す。図中の $\Delta\theta$ はロールとブランクとの接触部の周方向幅をブランク中心から見こんだ角度を示す。

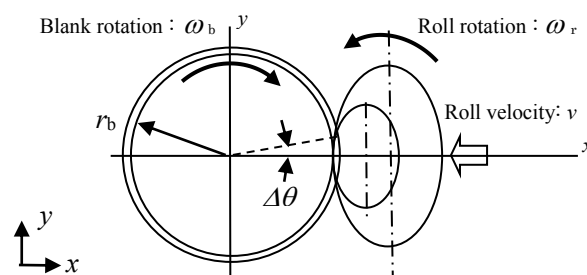


Fig. 4-2 ロール接触によるブランクの変形

周方向ソリッド要素 1 層化によるモデルの微小角軸対称構造化を図るに際し、分かりやすさのためまず現象を巨視的に捉え、このボスフォーミングでの変形領域を **Fig. 4-3** のようにブランク面がボス縦壁を形成する上部(U-zone)と、ほぼ水平な面を形成する下部(L-zone)に分けて考えることとする。

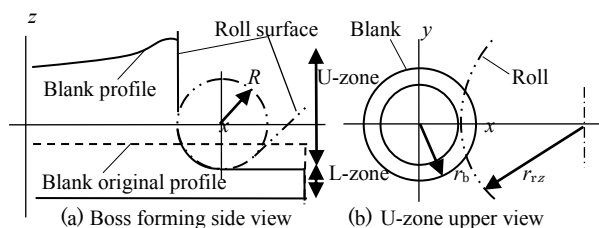


Fig. 4-3 接触領域の分類

すなわち、上部は同図右に示す半径 r_{rz} の縦置き円柱状ロールによる転造に類似した圧縮、下部は同転造でのロール非接触部位扱いとする。この考え方で両領域をモデル化する。

4.4 微小角軸対称構造モデルの構築方法

4.4.1 接触領域上側のモデル化の考え方

まず **Fig. 4-3** の上側(U-zone)の変形に対するモデル化を行う。この部分は円板形状のブランクが平行軸の円柱ロールにより転造される状態に類似すると考えられる。すなわちブランクの $\Delta\theta$ (**Fig. 4-2** 参照)部分には主に径方向圧縮力が加わるが、同時にロールと非接触の隣接部に存在するブランク領域から、この部分を径外側へ引き戻すようなせん断力も加わると考える。この条件でブランクのロール接触面で内部への塑性変形が進行して行くものとする。この部位のモデル化方法は前章 3.5.1～3.5.3 と同等なため、説明を省略する。

4.4.2 接触領域上側のモデル化の具体的方法

次に前項の考え方の、今回のボスフォーミングモデルへの具体的な適用方法について述べる。ボスフォーミングは一般的な転造等よりもロールの径方向移動量が大きく、前項の考え方を拡張した形で適用を図ることが必要である。

Fig. 4-4, **Fig. 4-5** に角速度場設定方式の拡張適用の方法を示す。この方式は基本的には **Fig. 4-4** のように角速度場の中心をブランク中心に置いてブランク材料各部に遠心力を発生させ、それによって径方向の慣性力の重畳を起こさせることにより、最終的にブランク縁部のロール面への接触部位における径方向接触力を集中化・増大させようとするものである。しかし、前章の式(5)からわかるように、この接触力は角速度場の大きさ Ω の決定後は、ブランク径方向に x^3 の関数で分布することとなり(**Fig. 4-4** 一点鎖線)、ブランク径方向長さの大きいボスフォーミングの場合には、推定される実際の場合のロール近傍への強い荷重集中(図中破線)に及ばないものと考えられ、分布カーブの適切な改良が必要となる。

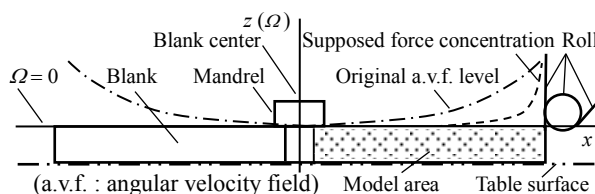


Fig. 4-4 ブランク上の元の遠心力分布

このことから、今回のモデルではまず **Fig. 4-5** (a)のように角速度場中心をロール面に近づけ、荷重集中度のレベルアップを図った。ただし、こうしても同図(b)のようにロールが径方向に d_0 だけ進行した場合には、 Ω

のパターンは固定されているため、結果的にそのレベルは Ω_0 だけ降下してしまう．これに対する措置として、本モデルでは設定した角速度場中心 (a.v.f. center = angular velocity field center) を、ロールと同方向へ動かす(左側の d_0) 方策を採った．この方策により、ロール表面位置のブランク材料では常に σ_y レベルの塑性変形が保持されることを実現できる．

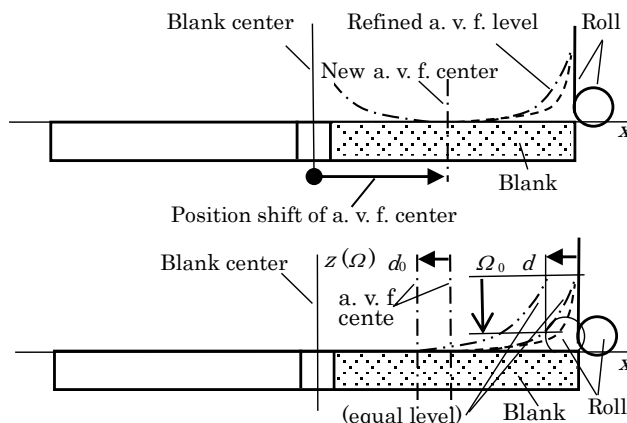


Fig. 4-5 角速度場法の適用

4.4.3 接触領域下側のモデル化

次に Fig. 4-3 の下側(L-zone)のモデル化方法につき述べる．この領域はブランクがロール径方向強制変位によりせん断変形を生じる際、ブランクの軸方向下側周方向にあって、上記変形領域に対して常に径外側へ引き戻すような抵抗力を発生するため(Fig. 4-6 の Force)，前項と同様角速度場を付与しこの抵抗力を表現する．

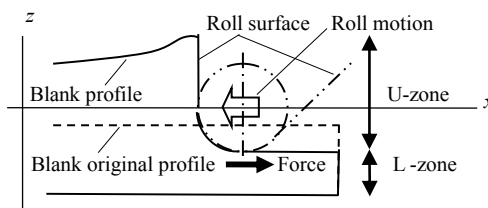


Fig. 4-6 L 領域におけるせん断力

ただし、この部分には上記とは別な、モデル化された部分のブランク材料を持ち上げる($z+$)向きの力も加わっている．すなわち、Fig. 4-7 の左側は L-zone を上から見た図であるが、今考えやすさからロールが無回転の場合を考えて、内側楕円部分をロール下端と L-zone との接触域と考えると、周辺の塗色部分はロール圧下にとりまう凹みに反発して、モデル化された部分のブランクを引き上げようとする力を現す．しかし今回のモデルでは、モデル化範囲を図示の狭い範囲(周方向 0.25 度)として両側面は面拘束のみであるためこの力は反映されていず、外部から導入する必要がある．今回はこの力を、この部分に上($z+$)向きの体積力を加速度場 (Acceleration field) を設定(右図)することにより発生させることとした．なお、右側の図中の a.v.f. U, a.v.f. L はすでに述べた U-zone 向け Angular velocity field, L-zone 向け Angular velocity field をそれぞれ意味する．

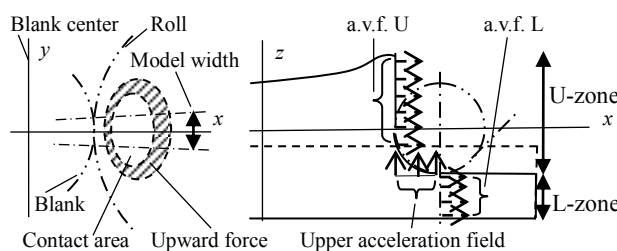


Fig. 4-7 接触部表面における上向き力の領域

4.4.4 周方向せん断力の計算モデルへの導入

実験においてロールは自転しながらブランクの表面材料を径内側へ押し込んでいるが、接触部をつぶさに見た場合 **Fig. 4-8** 左のようにブランク表面は常に接触面の $\Delta\theta$ (**Fig. 4-2** 参照)の代表的にはほぼ接触面の中間位置において、ロール転動に伴う周方向のせん断力をロールから持続的に加えられているが、このロールは頂部がブランク内側に傾けられているため、上記せん断力は xz 面上においた微小角軸対称モデルのブランク表面に対してはロール回転速度(ω_r)の上記角度の正弦相当の y 軸回り回転成分による径外向き接触力に変換され発生されるべきと考えられる。したがって本モデルでは **Fig. 4-8** 右側のように平板構成のロール平面の接触面速度 v_{rs} の値を下記の式(1), (2)の手順で求めてロールに与え、上記径外向き接触力を付与することとする。

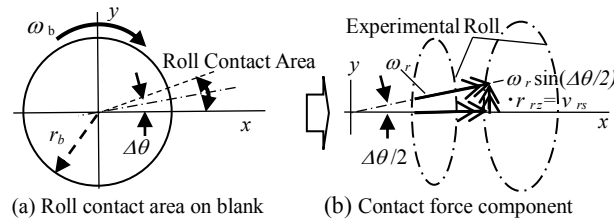


Fig. 4-8 ブランクの周方向せん断力のモデル化

Fig. 4-8 において ω_{ry} をモデルに加えるべき角速度とすると、 xz 面上に置くロールモデルの表面速度 v_{rs} は式(11),(12)で求められる。 v_{rs} の設定はロール垂直部分に対しても行う。

$$\omega_{ry} = \omega_r \cdot \sin(\Delta\theta/2) \quad (11)$$

$$v_{rs} = \omega_{ry} \cdot r_{rz} \quad (12)$$

これにより、傾角を持つロールの $\Delta\theta/2$ 位置での周方向せん断力に起因するブランクの径外向き接触力成分を、 xz 面上に存在するモデルへ等価的に取りこむことが可能となる。

4.5 計算モデル作成

4.5.1 計算モデルの構成と形状

以上の考えから作成したモデルの形状を **Fig. 4-9** に示す。ブランクは周方向 0.25 度厚さの 1 層構成のソリッド要素でロールは平板の剛体シェル要素群で作成した。ブランクの軸中心側節点は変位量が微小と考え全自由度を拘束した。またブランク側面節点は局部座標系により面内拘束した。

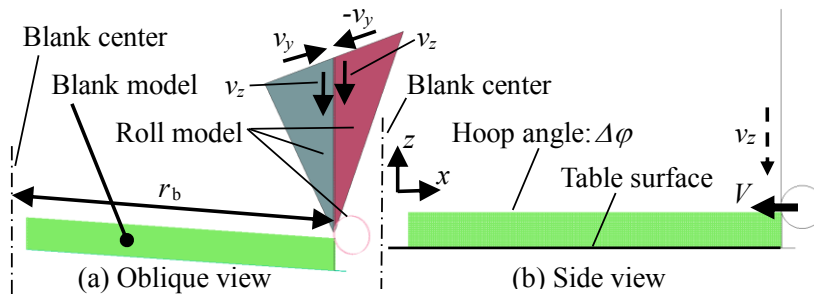


Fig. 4-9 計算モデルの構成

なおブランクモデル要素の周方向開き角度は最小要素サイズに対応させ、約 2.9 度と算定される $\Delta\theta$ (**Fig. 4-2** 参照)より薄幅の $\Delta\phi = 0.25$ 度と設定したが、本モデルが 1 要素幅のメッシュ構造であって、 $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ ともに狭小角度であるため、この置き換えによる計算誤差は少ないものとする。

ここで、ブランク外端部への拘束板の設定について述べる．**Fig. 4-10** に示すように、この部分はロールの下方圧により径外側へ延び出す傾向を示すため、実験の際と同様にブランク外側に隣接して拘束板を置いた．

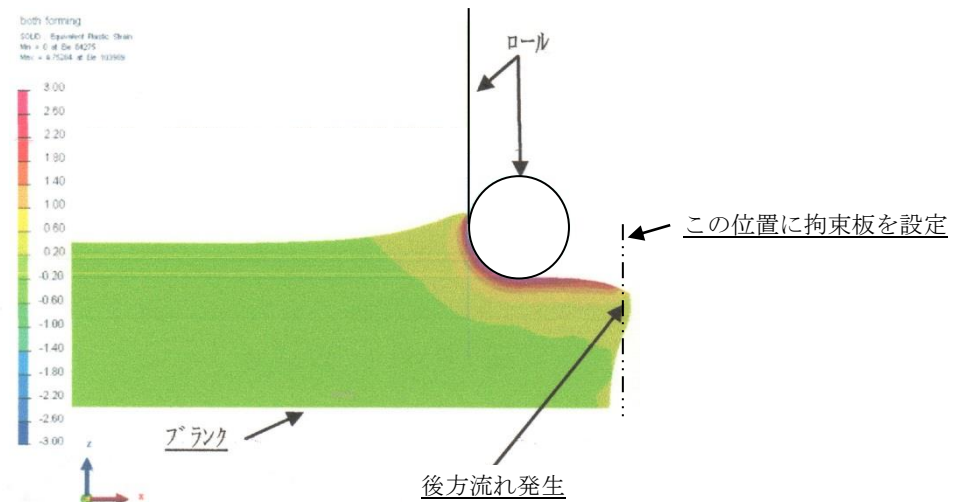


Fig. 4-10 ブランクへの下方圧力によるブランク外端部の延び出しと拘束板設定

4.5.2 ロールモデルの構成と駆動方法

ロールはモデルの幅が細いため、ブランクとの接触部分を剛体平板でモデル化し、中心断面形状は実験品形状に対応したものとした．ロールは **Fig. 4-9** に示したように垂直面を構成する 2 枚と回転面を構成する円環状の 1 枚 (多数の小剛板から構成) の計 3 枚構成とした．垂直面を構成するロールを 2 枚構成とした理由はブランクとの接触位置で下方(z 下向き)変位を合成して発生させるためである．駆動自由度は共通にブランク径方向 x を与え、垂直面ロールでは上下左右変位させるため y, z 方向を、回転面ロールでは y 軸回り回転させるため y 軸回り回転を各々許容自由度に加えた．

ロールの径方向押し込みは、実験では等速押し込みであるが、計算時間削減の観点から、本モデルでは悪影響の少ない範囲で短時間にかつ計算不安定を起こさないような形で押し込み変位を発生できるように配慮した．この結果、下記理由から時間についての 3 次関数を採用することとした．3 次関数を採用した場合、第 3 章の式(5)の $f(x)$ に倣った表現をして $f'(x)$ を定加加速度(Jerk)を持たせたロール負荷による発生体積力とした場合、式(13)のようにロール負荷によってロール径方向(x)に 3 次の体積力の重畳が現れる．これは角速度設定による体積力重畳(x^3)と同次の関数となるわけで、ブランクの安定的な変形を見こむことができると考える．

$$f'(x) = \int_0^x J \cdot m_d \cdot \alpha(x) dx \quad (J; \text{jerk}) = k \cdot x^3 \quad (k; \text{constant}) \quad (13)$$

数値的には、ロールを実験の約 1/50 の時間で最大変位まで到達させる(1 秒間でロール最大変位 35mm)、時間の 3 次の関数に設定した．**Fig. 4-11** にロール駆動(ロール表面の各方向速度)を時系列線図で示す．なお、ブランクとロール間の摩擦係数はメッシュ粗さもあるため、大きめの値の 0.3 に設定した．

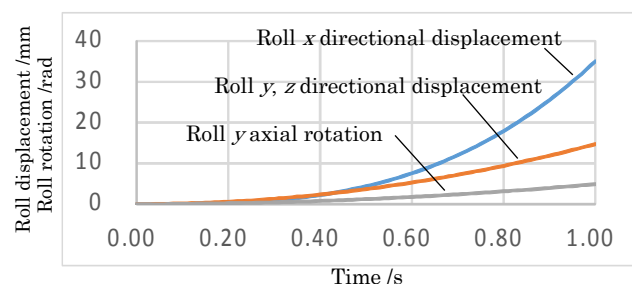


Fig. 4-11 ロールの時系列変位の設定

4.5.3 角速度場領域および角速度場中心の設定

ブランクに設定する角速度場の対象領域，角速度場中心位置・中心移動速度を **Fig. 4-12**, **Fig. 4-13** に示す．中心位置は U-zone, L-zone で共通化したが大きさは前者では材料降伏値に対応させ，後者では力の発生方法からせん断降伏値に対応させた．また同中心位置はロールの径方向進行による角速度場の大きさの減少の補償のため，ロールと同形の関数で強制変位させた(**Fig. 4-13 ctr.-dx**)．なおロール下領域には，ロールの径内側の面にブランク材料が集まることを利用し体積力で上向き力を導入し，レベルはロール下接触面で材料の降伏応力相当となるように設定した．**Fig. 4-13** の各グラフの変曲点はロールの半径分変位での特性切替えによる．

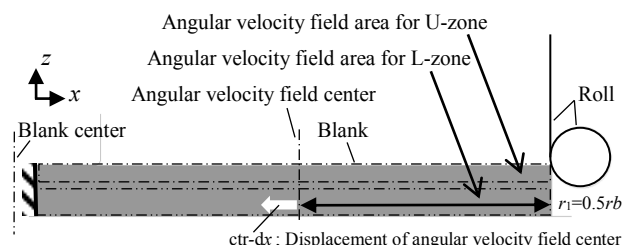


Fig. 4-12 計算モデルに対する角速度場と角速度中心位置の設定

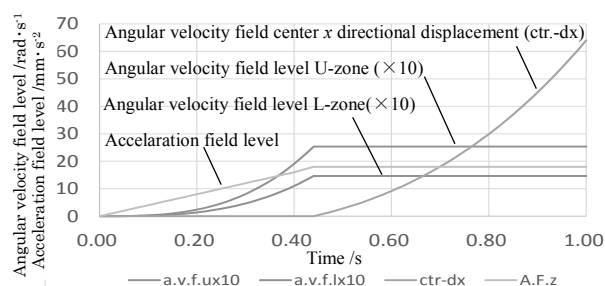


Fig. 4-13 計算モデルに対する角速度場のレベル設定

以上の手続きにより，今回の微小角軸対称構造モデルはほぼ実験条件と供試品の材料特性データのみから作成される．

4.6 計算結果と実験結果の突合せ

以下，今回開発したモデルによるボスフォーミング計算の結果と検証対象とした実験結果との比較結果を記す．まず **Fig. 4-14** に今回のモデルでの実験に対応した計算結果との変形推移を比較した．なお本図はロール径方向変位におけるブランク変形状を，ブランクの断面形状同士で比較したものである．また **Fig. 4-15**, **Fig. 4-16** は実験でのボス部・ひけの形成過程を数値化し(**Fig. 4-14** の h, b, c_1, c_2, d_c)，実験結果と計算結果を定量比較したものである．

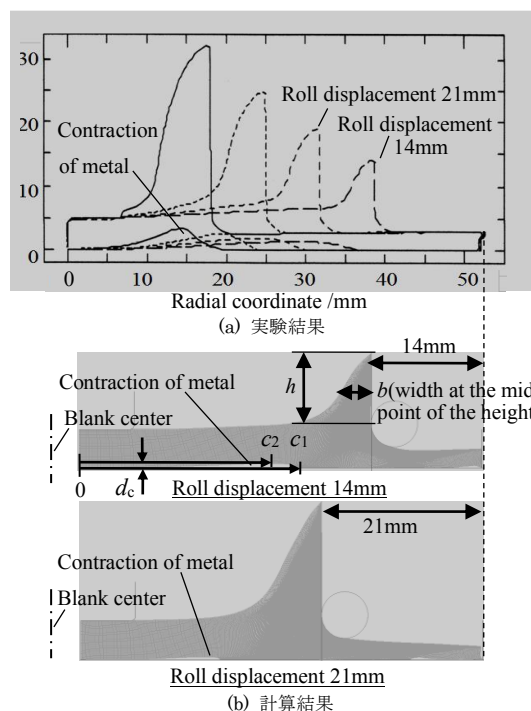


Fig. 4-14 実験結果⁽⁶¹⁾と計算結果の変形モード比較

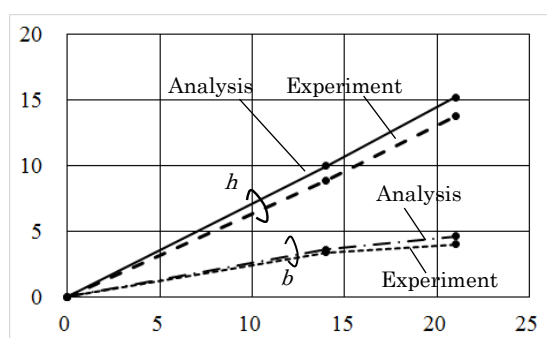


Fig. 4-15 実験結果⁽⁶¹⁾と計算結果の断面視でのblank変形量(Fig. 4-14 の h, b)の比較

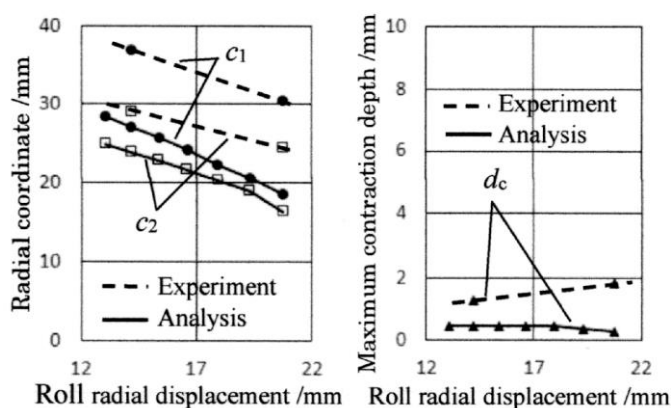


Fig. 4-16 実験結果⁽⁶¹⁾と計算結果の断面視での〈ひけ〉(Fig. 4-14 の c_1, c_2, d_c)の比較

Fig. 4-14, Fig. 4-15 に示した結果から、計算(Analysis)は実験(Experiment)における変形推移状況を良好に捉えていることがわかる。ボス形成部分の高さ h 、中央厚さ b の増大傾向についても定量的な対応が見られ、特に中央厚さ b についてはロール変位増大に対する頭打ち傾向についても対応が見られる。また Fig. 4-16 からは、ひけ量に関しても計算・実験で基本的対応が得られていることがわかる。ただし、ひけの径外側位置 c_1 については誤差が大きいが、blank下部の実質的剛性の低さによるものと推定される。

4.7 考察

Fig. 4-14 の実験結果および計算結果でブランク底面に引けが見られたため、計算結果からこの条件での引けの発生メカニズムにつき考察を試みた。まず Fig. 4-17～Fig. 4-19 に計算でのブランクの変形状況を示す。

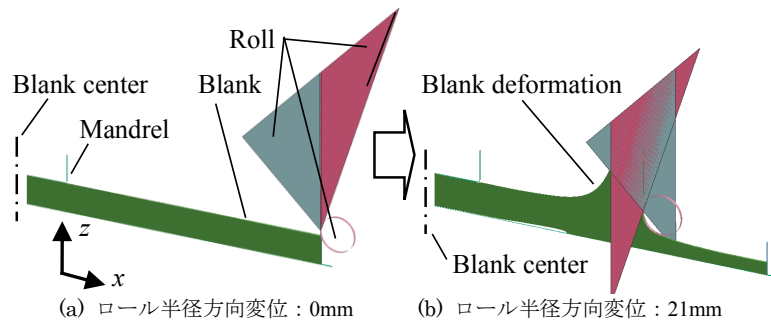


Fig. 4-17 計算モデルでの変形

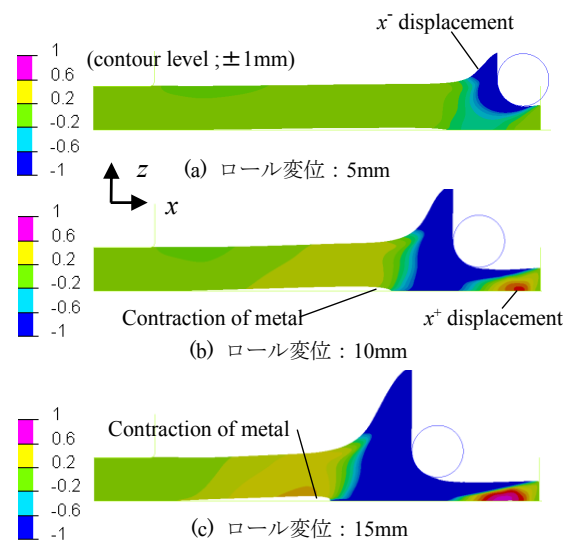


Fig. 4-18 計算モデルでの変形と半径方向変位分布

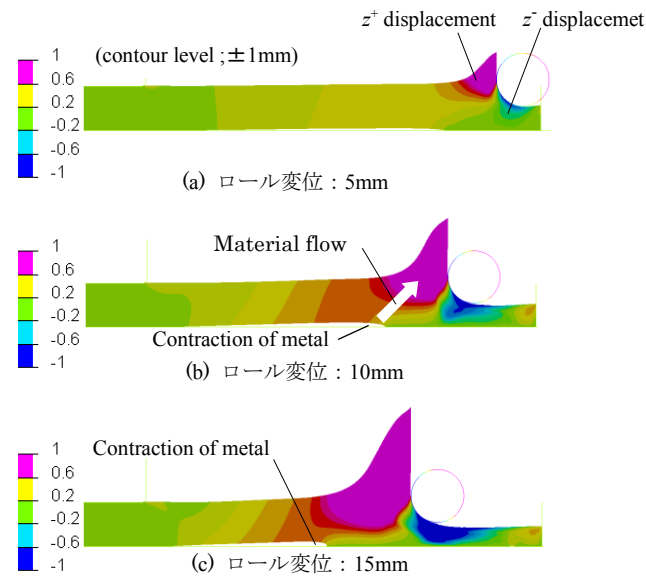


Fig. 4-19 計算モデルでの変形と軸方向変位分布

Fig. 4-18, Fig. 4-19 はそれぞれロール変位によるブランク変形に併せたブランク材料各部の前後(x), 上下(z)方向の変位の分布を示す(ともに塗色範囲で±1mm 変位)。これらの図から変形状況を調べると、まずブラン

ク材料の径方向流れと並行して、軸方向流れの範囲が板厚下側まで徐々に拡がり、これに引きずられて底面の材料も Fig. 4-19 に示した矢印のように上方に流れ、最終的に引けとなる状況が伺える。

なお、**Fig. 4-20** に板厚が大きくロール径の小さい($t=15, R=1$)別の実験ケース⁽⁶¹⁾についての検討計算を実施した例を示すが、ブランク材料の引け(Contraction)の兆候は捉えられたが、他の部分での板厚減少も大きくなり、精度が十分には得られなかった。この要因としては上下方向での加速度場設定での過不足等が考えられる。

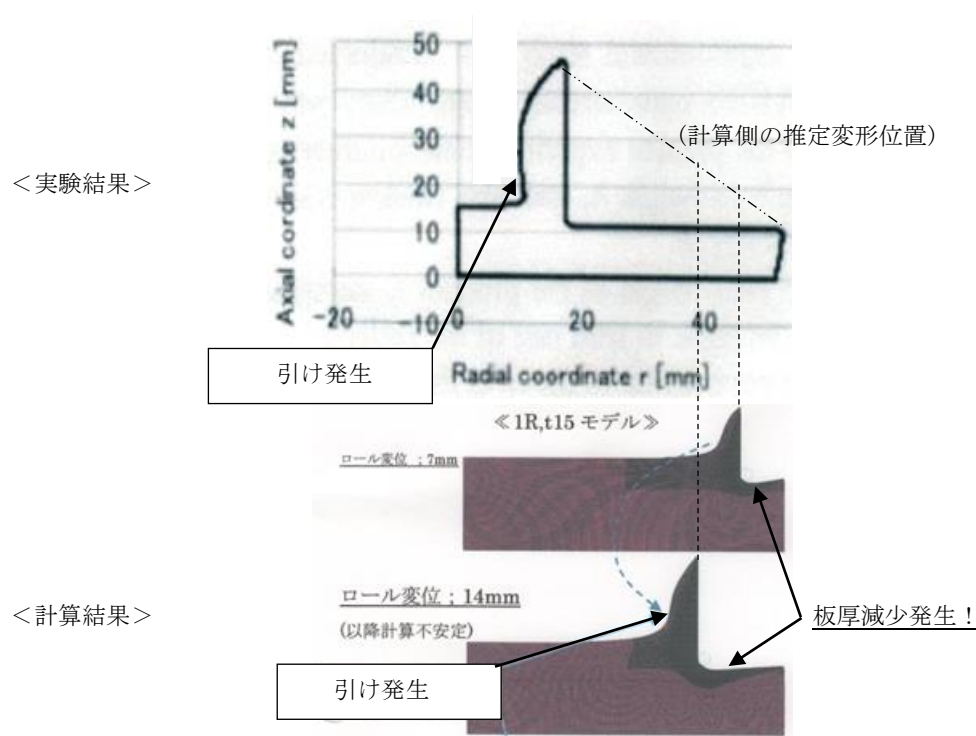


Fig. 4-20 別実験(板厚大, ロール先端 R 小)⁽⁶¹⁾に対するモデルでの変形計算結果

4.8 結論

- (1) 簡潔な形状である周方向 1 層のソリッド要素構成のブランクモデル(微小角軸対称構造モデル)を用い、負荷の一部に角速度場を導入した方式でのボスフォーミング計算モデルを開発した。
- (2) 計算モデルのブランク変形推移を実験結果と比較したところ、変形のモードや増大傾向で好対応を得た。
- (3) 計算結果の考察から、ブランク材料の底部に発生する引け形成のメカニズムについて簡単な考察を行い、ブランク材料の径方向流れと並行して軸方向流れの範囲が板厚下側まで徐々に拡がり、これに引きずられて底面の材料も上方に流れ、最終的に引けとなる状況がうかがえた。
- (4) この解析モデルはほぼ実験条件のみから簡潔な手順で計算モデルを構築でき、計算時間も大幅に少ないもの(全周モデルのほぼ 1/1000 以下)とできることから、ボスフォーミング製品の初期設計段階の変形検討に対し有効な手段と考える。

第 5 章

回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデルの開発

5.1 緒論

転造，ボスフォーミングに続いて回転スプリッティングに対する解析モデルの微小角軸対称構造モデル化について検討する．回転スプリッティングはプリー成形，1 ピースアルミホイールの予加工，T 形ブレーキシューの予加工等に用いられ，転造やボスフォーミングと同様にネットシェイピングをもたらず環境保護上にも優れた加工法である．本モデルの開発では，転造，ボスフォーミングの場合と基本的には同等の方式に基づいているが，特にはブランクのロールとの接触部位での狭い角度での接触によって発生する強いせん断力の効果の導入において，ブランクへの角速度場の増強等の方法で実際の入力状況の近似再現を試みた．以下，参照実験とともにモデル化手法につき記述する．

5.2 モデル化参照実験

Fig.5-1～Fig.5-2 に本モデル化で参照した実験の状況を示す^{(60),(62)}．ブランクを旋盤に取り付け，従動するロールで円板の側面を押して行き，板材を端部から裂開させて行く加工法である．**Table 5-1** に実験のパラメータを示す．また，本実験でのブランク変形状と代表的結果について **Fig. 5-3, Table 5-2** に示す．本検討では，この中から検討対象とした実験を選んだが，設定する計算モデルパラメータの妥当性の確認のし易さを考え，**Table 5-1** の下側に記載したケース 1，ケース 2 の計 2 ケースについてモデル化を行うこととした．

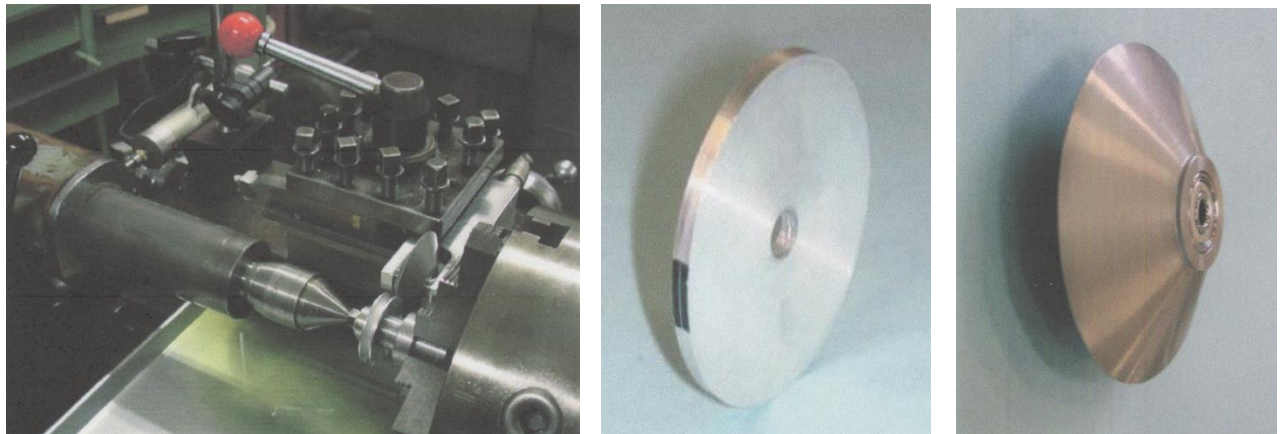


Fig.5-1 回転スプリッティング試験状況(左端)とブランク(中央)・ロール(右端)^{(60),(62)}

Material property of A1050-O					
Thickness: 5mm	Tensile strength [MPa]	Proof stress [MPa]	Strength coefficient [MPa]	n value	Total elongation [%]
Rolling direction	63.7	27.7	113	0.236	55.0
Perpendicular to rolling direction	63.1	27.1	114	0.248	57.6

Thickness: 10mm	Tensile strength [MPa]	Proof stress [MPa]	Strength coefficient [MPa]	n value	Total elongation [%]
Rolling direction	92.5	68.2	152	0.186	50.4
Perpendicular to rolling direction	85.4	66.8	135	0.162	46.1

Fig.5-2 回転スプリッティング試験片の材料特性^{(60),(62)}

Table 5-1 対象とした回転スプリッティングでの実験パラメータ水準(材料は A1050-O) (60),(62)

ブランク形状		ブランク駆動		ロール形状		ロール駆動	
ブランク直径(mm)	ブランク板厚(mm)	ブランク回転数(rpm)	ロール直径(mm)	ロール先端R(mm)	ロール先端角(度)	回転数(rpm)	押し速度
54	3	72	80	0.2	30	(ブランク従動)	0.05
	4				40		0.10
	5				50		0.20

(ケース 1 ; ブランク板厚=3mm でロール先端角=50 度, ケース 2 ; ブランク板厚=5mm でロール先端角=30 度)

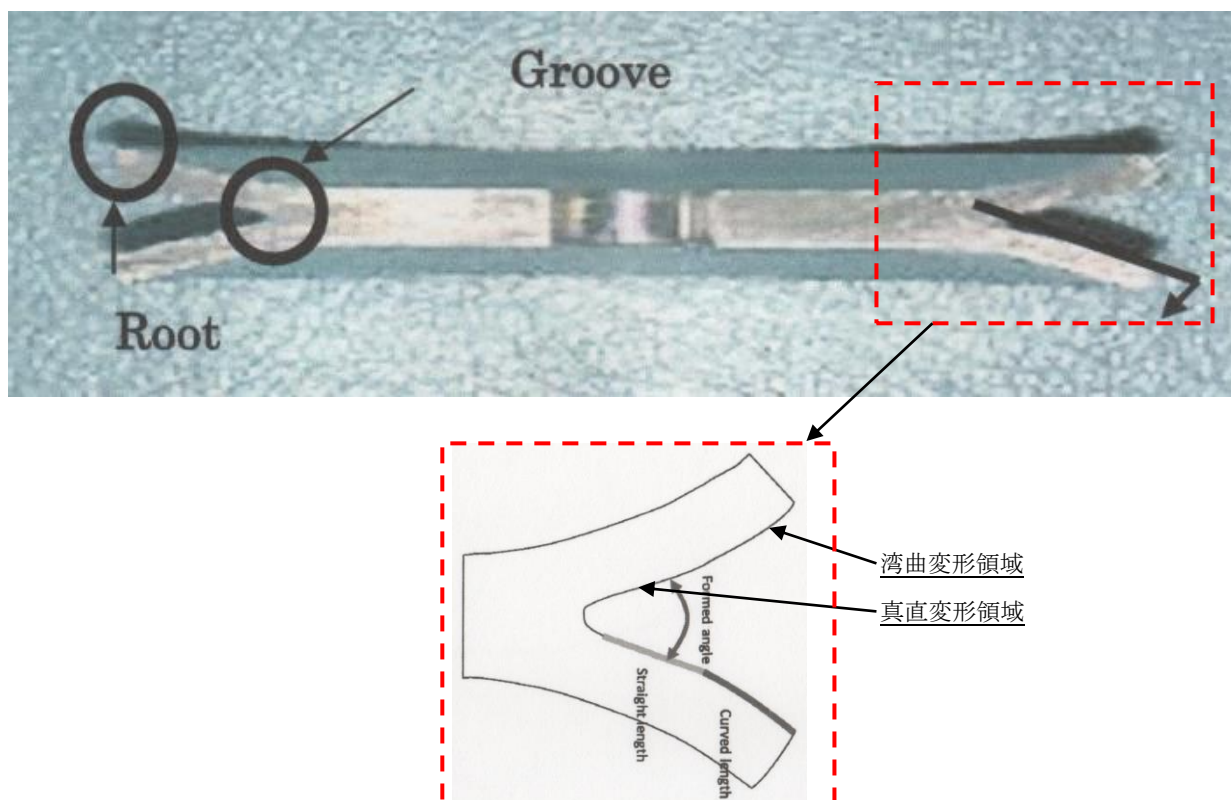


Fig.5-3 回転スプリッティング実験での変形形状(上図 ; 実験結果,下図 ; 裂開部変形モード)(60),(62)

Table 5-2 回転スプリッティング実験でのロール反力(最大値) (60),(62)

ブランク板厚(mm)	ロール先端角(度)	最大荷重(N)
3	30	90
	40	85
	50	120
5	30	130
	40	150
	50	195

以下, 上記参照実験でのブランク変形モードとロール反力を突合せ検証データとして, 回転スプリッティングに対する現象の理解内容と, 解析モデル(微小角軸対称構造モデル)の開発経過について述べる.

5.3 モデル化方策の検討

回転スプリッティング解析用の微小角軸対称構造モデルの開発に当たっては、基本的にはこれまでの転造、ボスフォーミングでの手法にならって進めるが、回転スプリッティングの特徴としてブランク端部に対する鋭い切りこみの変形による大きな周方向せん断力の独特な影響が推定されるため、このモデル化が大きな重要ポイントになるものと考える。Fig.5-4 に回転スプリッティングでのブランク変形の概念図を示すが、まず回転スプリッティングに対する裂開現象のメカニズム・影響内容の理解につき Fig.5-5, Fig.5-6 を用いて述べる。

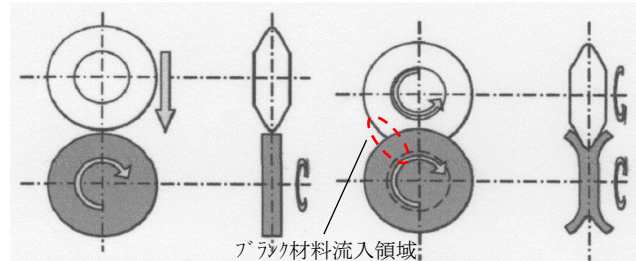


Fig. 5-4 回転スプリッティングにおけるブランク材料流入形態^{(60),(62)}

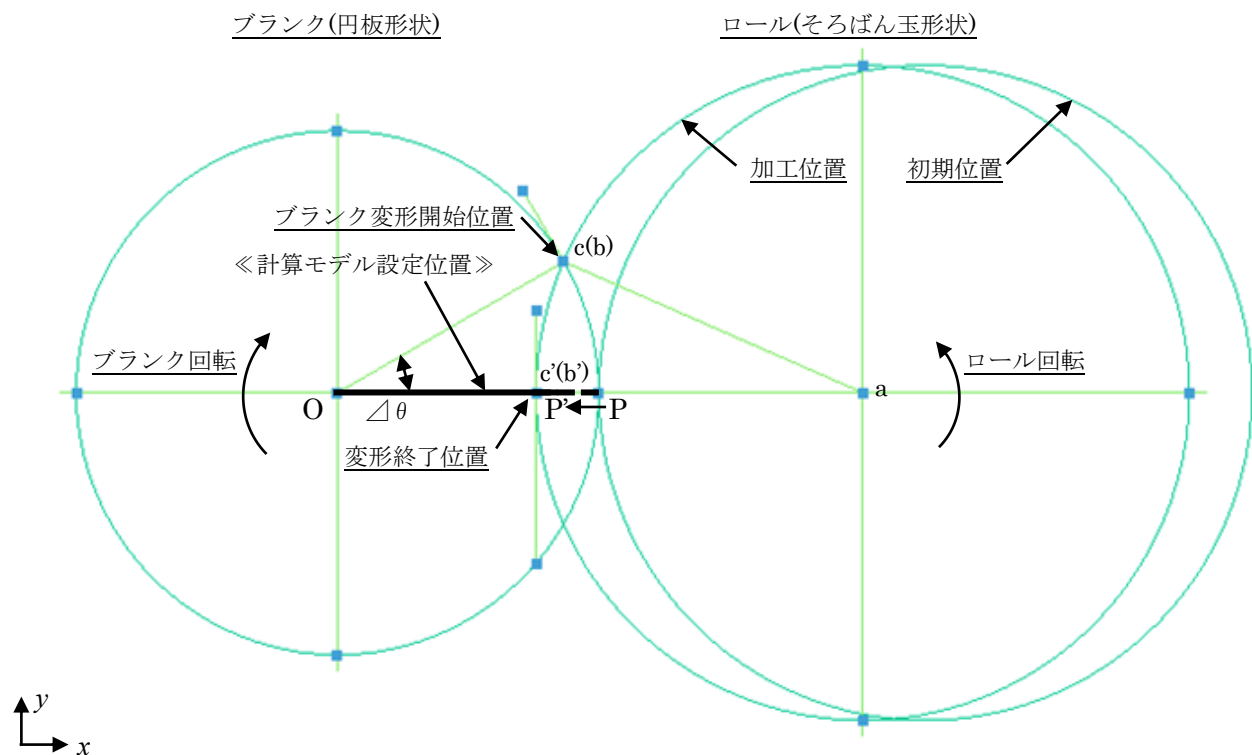


Fig. 5-5 回転スプリッティングにおける周方向のせん断力発生メカニズム～その 1

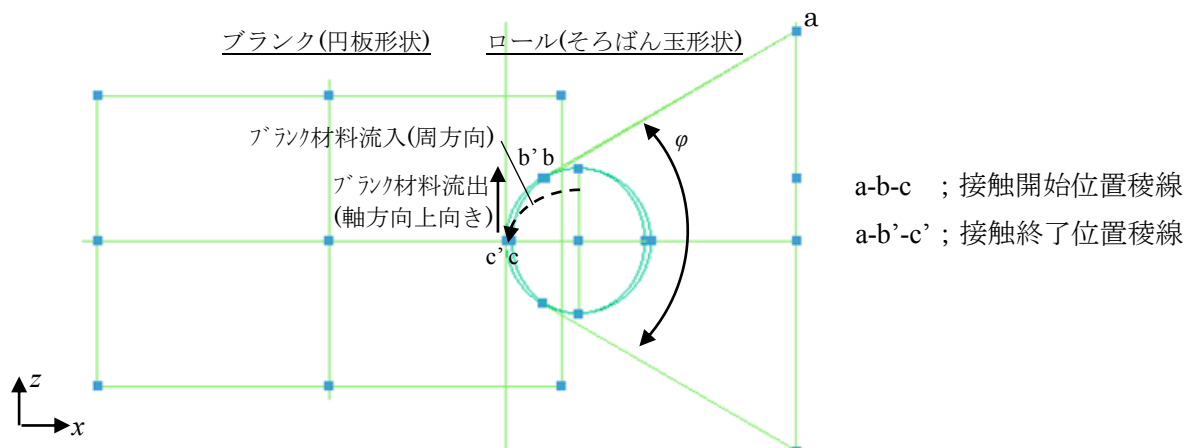


Fig. 5-6 回転スプリッティングにおける周方向のせん断力発生メカニズム～その 2

Fig. 5-5, Fig. 5-6 に示したようにロールは側面視での先端 R が小さく断面角度 ϕ が狭いため、ブランクがロールを挟む際の摩擦力が大きい。このためブランク材料は Fig. 5-6 の破線矢印のようにモデル化領域に導入され、ロール直下に至る直前に減圧の向きである軸方向上向きに流れを変える(実線矢印)ものと考えられる。上記の変形推移から、ブランク端が Fig. 5-5 の P→P' への変形のみ可能な本モデル化ではブランクへの特殊な措置による、上記の強いせん断力によって生じる材料の軸方向流れの強制設定が必要であると考えられる。

実際、**Fig. 5-7** に従来方法でのモデルでの計算結果を示すが、入力がこの面内で終始するためブランク裂開部はその固定に近い根本から激しい引張力を受け、裂開先端部が内向きとなる変形モードになってしまう。

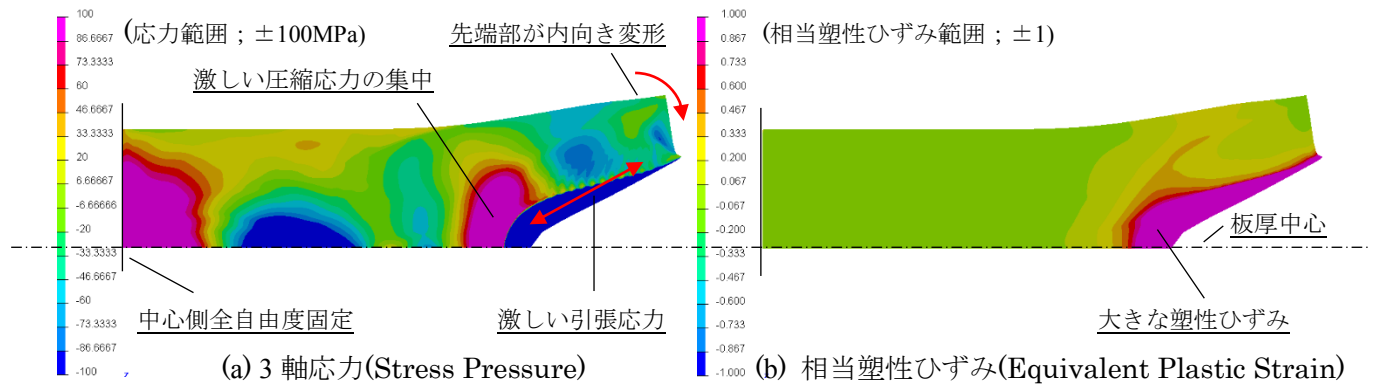


Fig. 5-7 従来方式によった場合のブランク変形と内部応力・ひずみ

このことから、本モデル化ではブランク材料の流れこみの効果を再現させる方策として、裂開変形の進行時に原理上材料の流れこみが無いことと円滑な軸方向の裂開の両立のため、ブランクを板厚の中央(モデルの上下対称中心線)部分で破断させることとする。このため中央断面沿いの 1 層のみのブランク要素を破断ひずみ設定により大変形時に抹消させる。破断ひずみ E_{pmax} の数値については、後述するが、アルミ材の静水圧下での破断ひずみ増大を考慮して設定する。以下、本方式でのモデル化方法について示す。

5.4 計算モデルの形状・駆動条件

Fig. 5-8~**Fig. 5-10** にモデルの詳細を示し、**Table 5-3** に計算モデルのパラメータと内容を示す。要素破断ひずみ E_{pmax} 設定は Fig. 5-8 に示すように、ブランク最下端(板厚中心沿い 1 層)のソリッド要素に設定した。

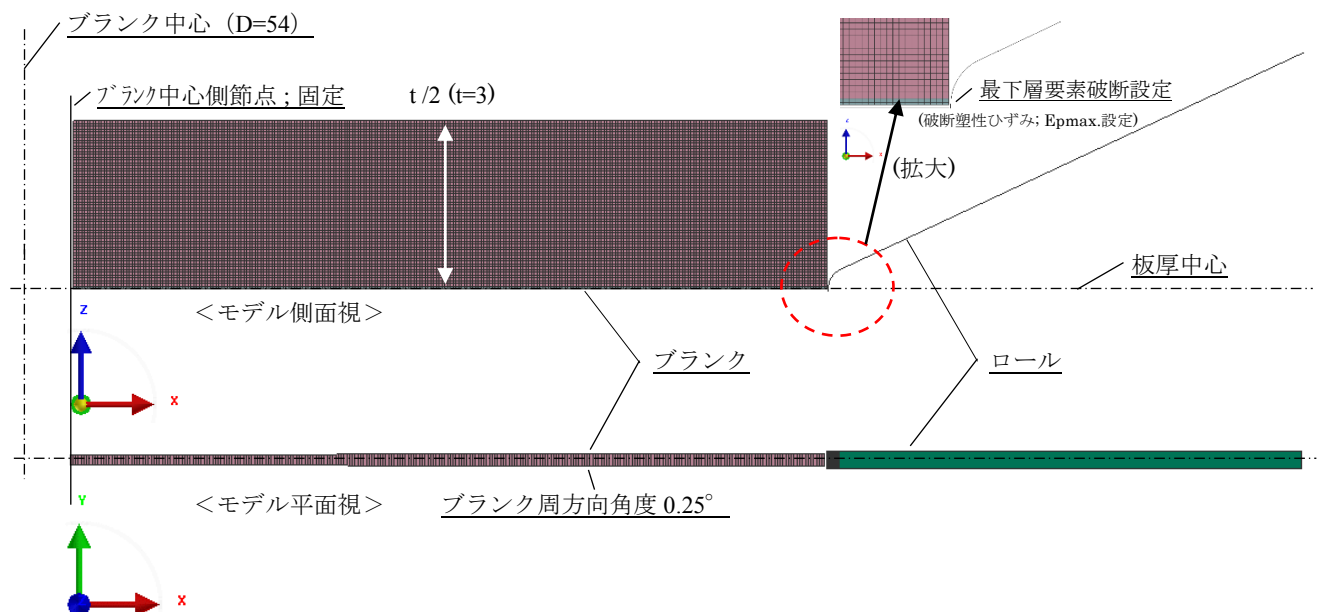


Fig. 5-8 ケース 1 解析用計算モデル

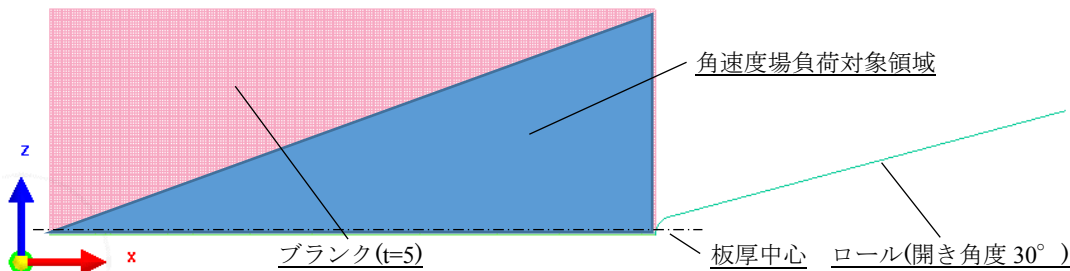
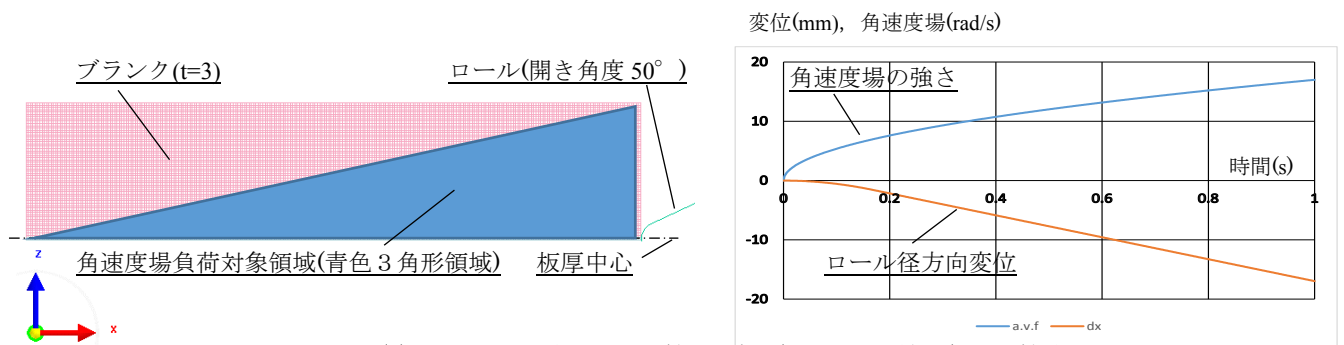


Table 5-3 モデルの計算用パラメータ

構成品	拘束	静負荷	駆動
ブランク	中心側固定	角速度場	(非回転)
	側面面拘束		
	下面対称拘束		
ロール	駆動自由度以外拘束	(なし)	x軸並進

モデル中央断面ソリッド要素への E_{pmax} の値は 1.5 と設定した. この考え方については考察で記述する.

5.5 計算結果

本方式のモデルでの計算結果の代表値(変形モードと物性値)を Fig. 5-11~Fig. 5-13 に示す. 図中, 応力は 3 次元応力(Stress Pressure)で表示し, ひずみは相当塑性ひずみ(Equivalent Plastic Strain)で表示する. 各図から, 変形モードの対応性や応力集中・塑性変形がロール先端領域に集中しながら裂開変形が進行している状況が知られる. この時結果表示時点としては, 実験でのロール径方向変位最大値は約 6~8mm であるが, 本計算ではブランクの安定的加工状態が示されるロール径方向変位 4.0mm 時点を選んだ.

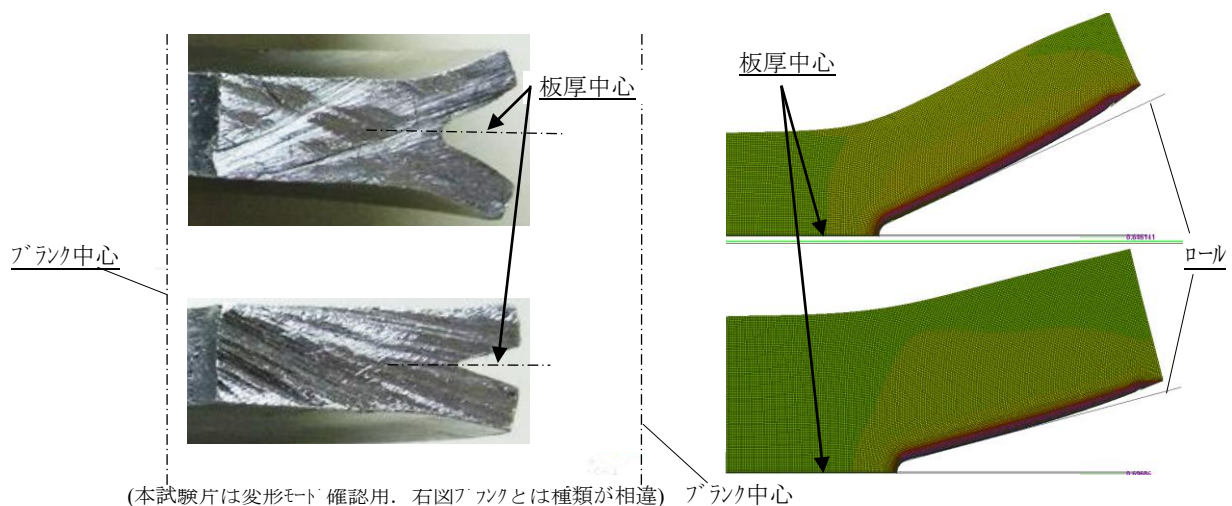


Fig. 5-11 ブランク裂開部変形モードの実験(左側) (60),(62) と計算との対応 (真直部と湾曲部の形成)

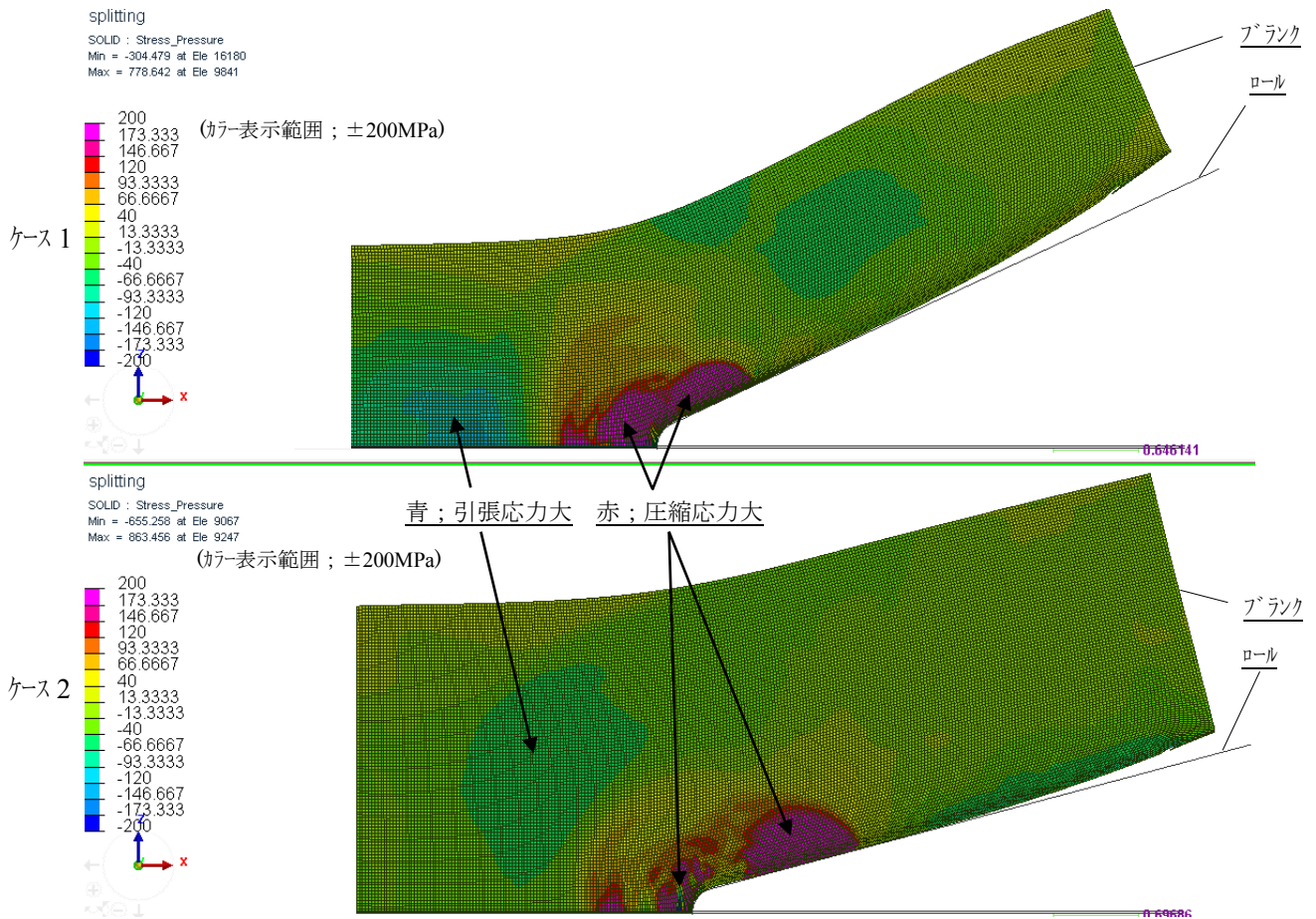


Fig. 5-12 ケース 1, ケース 2 モデルの 3 次元軸応力(Stress Pressure)～ロール径方向変位 4mm 時点

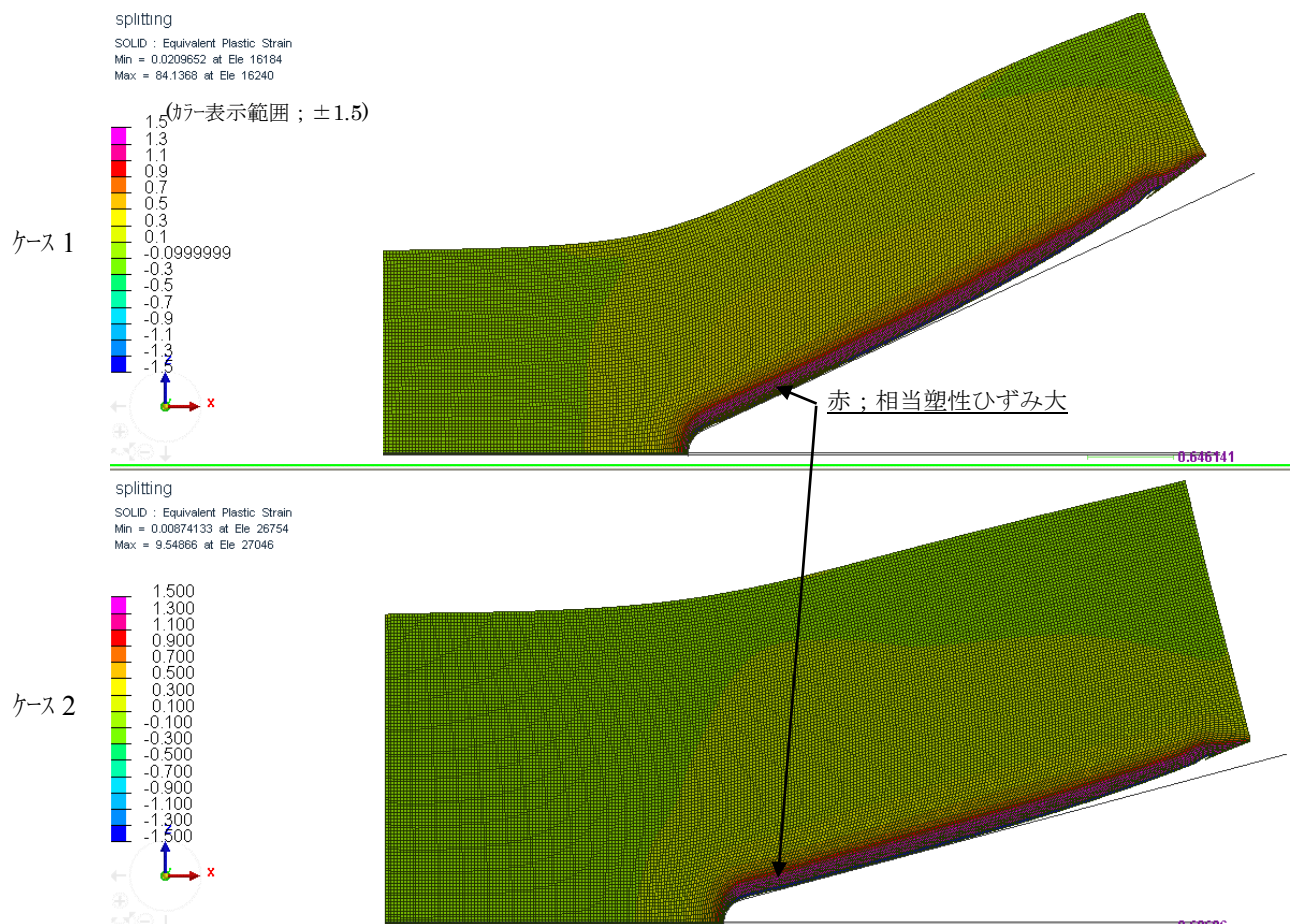


Fig. 5-13 ケース 1, ケース 2 モデルの相当塑性ひずみ(Equivalent Plastic Strain)～ロール径方向変位 4mm 時点

発生力(ロール径方向反力)の突合せ結果を **Fig. 5-14** に示す。計算結果の反力レベルはロール径方向変位約 1.5mm 以降ほぼ横ばい状態であり、実験結果と概略的に対応している。実験の反力の最大値(ロール径方向変位 6.5~7mm 時点で測定、計算モデル条件へ対応させて数値変換)を図右側に横線で示した。詳細に見た場合、計算結果ではケース 1 ($t=3\text{mm}$, ロール先端角 50°) とケース 2 ($t=5\text{mm}$, ロール先端角 30°) で、ロール変位約 0.5mm までは荷重レベルがほぼ同等レベルで推移しているが、これは板厚の大小とロール先端角の大小の効果がほぼ相殺されたためと考えられる。発生力全体についてもこの傾向(両者の相違小)が見られる。

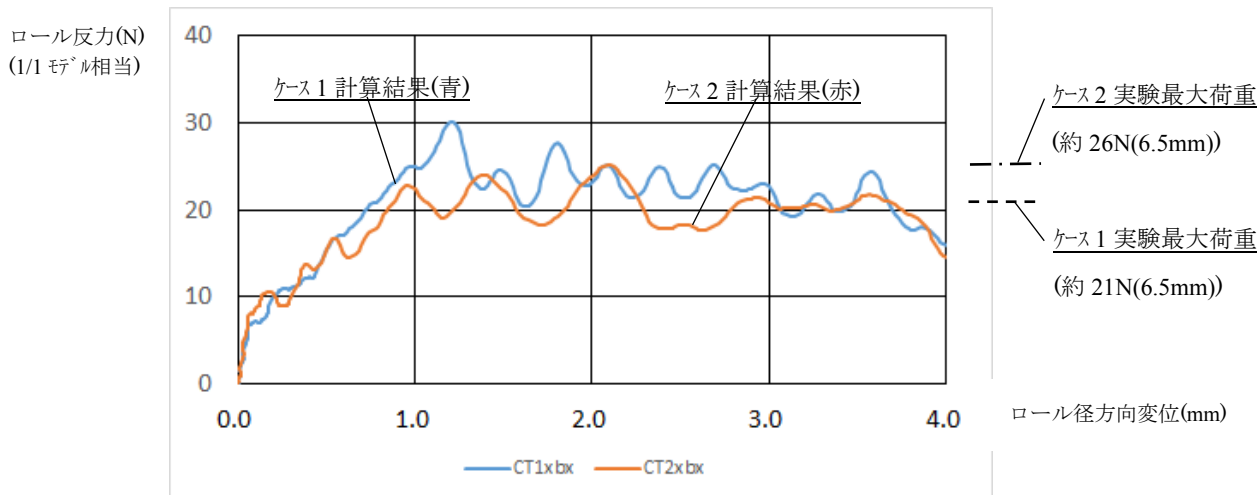


Fig. 5-14 ロール反力の計算結果と実験結果^{(60),(62)}との突合せ

5.6 考察

まず、モデル板厚中心沿いソリッド要素の破断塑性ひずみ E_{pmax} を 1.5 とした考え方について記す。**Fig. 5-15** は各種金属の破断ひずみ(ϵ_f)が高い静水圧環境下で、いかに増大するかについてグラフ化したものである。グラフからアルミニウムの場合の破断ひずみ増大について見てみると、大気圧下で 0.3~0.4 でも、0.3GPa ほどの静水圧下では、破断ひずみは 1.5 程度に増大しており $E_{pmax}=1.5$ は妥当性があると考えられる。実際に今回のモデルの計算結果で、ロール変位 4mm 時点で各軸応力は約 300MPa の値が発生している(**Fig. 5-16** 参照)。

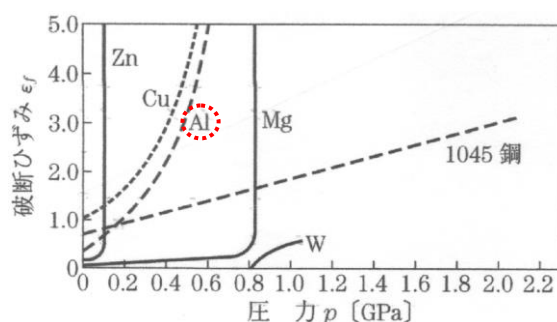


Fig. 5-15 破断ひずみの静水圧影響⁽⁶⁹⁾

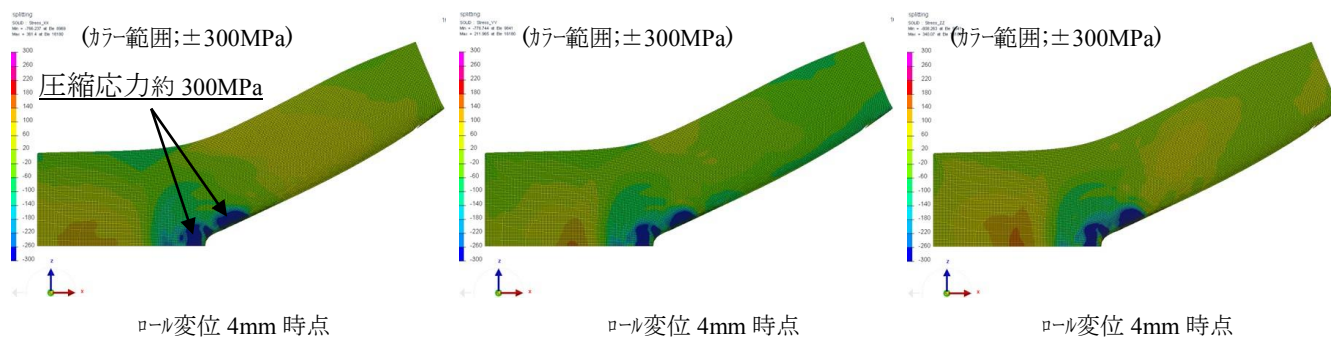


Fig. 5-16 ブランク裂開部根元の各軸応力 (左側; x 軸応力, 中央; y 軸応力, 右側; z 軸応力)

つぎにこのモデルをもとに、この回転スプリッティング変形で特徴的な変形となっている、ブランク裂開部分の真直部・湾曲部の形成メカニズムについて考察する。**Fig. 5-17**, **Fig. 5-18** に、それぞれロール径方向変位時のロール先端部分のブランク材料の x (径)方向速度 v_x とブランクの相当塑性ひずみを示す。

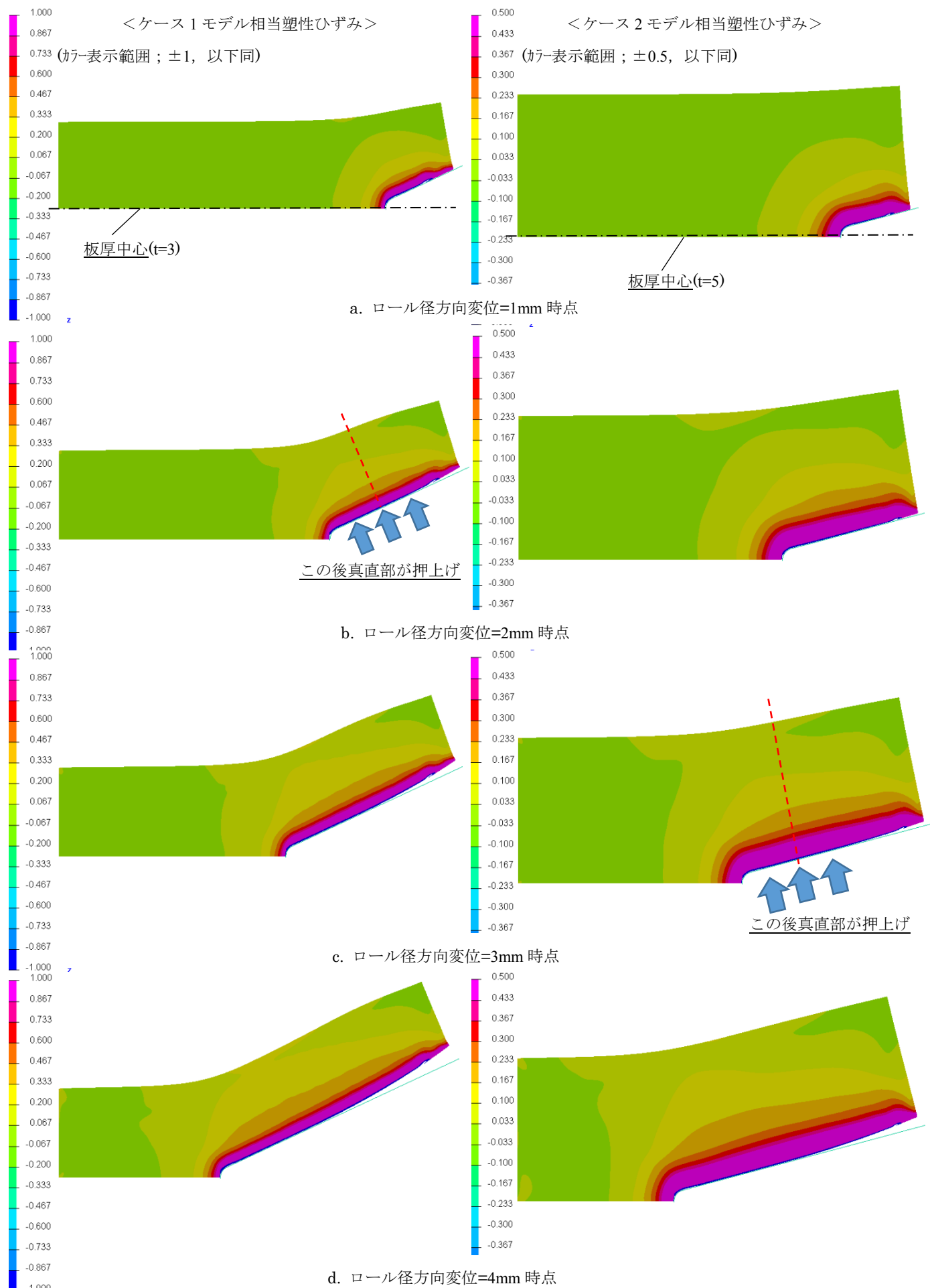


Fig. 5-18 ブランク裂開部の真直部と湾曲部の形成 (カーは相当塑性ひずみ)

まず、**Fig. 5-17** についてであるが、左上図に示すようにブランク材料はロール先端部で大きな v_x の値を示しており、この部位が図中の破線丸印、一点鎖線丸印のように移動しており、この部位とその前方部分の材料に局部的に大きな圧縮ひずみを連続的にもたらしめていることがわかる。そしてこの後方部(径外側部)には大きな圧縮の結果である大きなひずみが残されて行く。Fig. 5-17 の右側の図は、それぞれ左側の図のロール先端部近傍の拡大図であるが、これらの図からブランクとしては、ロール先端部近傍の負荷状況はずっと同様な圧縮状況の形で変形が進んでいくが、ブランクとしてはこれが同時に裂開の進展となることがわかる。

つぎに **Fig. 5-18** についてであるが、左半分にタイプ 1 モデルの計算結果を、右半分にタイプ 2 モデルの計算結果での相当塑性ひずみ分布を示す。両タイプの上記の圧縮速度の継続による相当塑性ひずみの生成状況が示されているが、上から 2 段目・3 段目に矢印で示すように、板厚を貫く塑性領域の拡大があった時点(ロール変位 2~3mm 時点)から、ブランク裂開部の先端(径外側)部分がロール面から離れるようすが知られる。このことから、ブランク裂開部の真直部分・湾曲部分形成のメカニズムとしては、ロール先端部に位置するブランク材料の高い塑性ひずみ領域がロール面沿いに広がって行き、塑性ひずみの板厚方向の分布が大きくなった時点で、板が裂開部根元で塑性的に折れるようになり、裂開部に大きな y 軸回り曲げモーメントによる曲げ変形が始まり、ブランク裂開面において、真直部に加えて湾曲部の生成が開始することが推定される。

5.7 結論

回転スプリッティング加工に対し、微小角軸対称構造モデルとして周方向幅が 0.25 度の狭小なソリッド要素 1 要素幅の簡潔な形のモデル構造を設定し(360 度全周モデルに対して 1/1440 の要素数)、この簡潔さを持つモデルでの変形評価性能成立のために、接触領域に対応させた負荷場の設定(角速度場)等を実施し、回転スプリッティング加工時の変形挙動解析向けに実用性を有する解析モデルの開発を行った。検討結果をまとめると以下となる。

- (1)回転スプリッティングにおけるブランク変形のメカニズム推定に基づき、角速度場による応力集中機能を持たせ、モデルの板厚中央部に適切な破断塑性ひずみを設定した計算モデルを開発した。ただし、この場合の破断塑性ひずみの設定においては静水圧下での破断ひずみ増大の効果を考慮した。
- (2)本モデルによる計算結果は、参照実験の結果と変形モードや発生荷重において概略的対応を示した。
- (3)計算時間については全周(360°)モデルと比べ、約 1500 倍以上の高速化が図れたものと推定する(本モデルでの実際の計算時間はワークステーションを用いて約 1~2 時間との実績であった)。
- (4)この微小角軸対称構造モデルの適用によって、回転スプリッティング加工の生産準備段階における工法検討において、定性的検討の効率向上が図れるものと考ええる。

第 6 章

結 言

冒頭にも記したように、回転形状機械部品に対する回転成形の活用はまだ多くの適用余地を持っており、そのネットシェイピング性や製品面品質の高さ等から、今後もさらに適用が拡大されるものと考えられる。この状況下で、回転成形という工法の効率化をもたらす使い易いツールが望まれているものと考え、「回転成形解析の効率化・高速化」という研究テーマを掲げた。

回転成形の代表的な事例として具体的に<転造>、<ボスフォーミング>、<回転スプリッティング>の3種類を選び、実験結果を参照しながら、これらに対する変形挙動解析のための使いやすい計算モデルを開発するため、近年実力向上の著しいCAE (Computer Aided Engineering) の技術手法を駆使する形で、上記回転成形に対して誰でもが活用できる形(断面に近いモデル形状採用や、手法としての新規性があり簡潔な手順で設定できる角速度場導入等)で利便性の高いFEMモデル計算手法を開発した。目標についても、実用的な精度を保ちながら(変形量、発生荷重の精度で $\pm 20\%$ 以内の誤差)、計算時間を全体モデル(360° 全周をメッシュ作成したモデル)に対してほぼ1/1000以下に納めることができ、目標をクリアした解析モデルを提示できた。なお、回転成形にはこの他にスピニング等もあるが、今回の開発手法はブランクとロールが同期して回転し、ブランクを変形させる加工法一般に対して応用が可能な手法であると考え。以下に、手法開発を通じて現れて来た今後のレベルアップのために考えられる課題について A. 現象把握に関するもの、B. モデリング方式に関するもの、C. 計算技術に関するもの、に分けて記す。

A. 現象把握に関する課題

- ①回転成形一般に、ロールがブランクに接触する点においては、高度の静水圧条件下で材料破壊が抑制されている状態で、ブランク材料(肉)の2次元～3次元的な流動がなされているものと考えられる。そして測定ピン法等から、成形ブランクの注目した断面内についての材料流れ(肉流れ)は視覚的・数量的に示され得るが、回転成形法の種類によっては3次元的な流動も多いと推定され、これに関してはいまだ視覚的・数量的把握が難しいのではないかと思われる。直感的な認識・判断を、客観的なメカニズム判断に置き換えるため、あるいはCNC機械等へプログラム化して受け渡す等のため、具体的な3次元の数値に置き換えること、すなわち<見える化>をさらに進めることが必要性である。
- ②さらに、ある条件下で現象が捉えられたとしても、回転成形下のブランク変形の状況は大変多くの実験条件(あるいは工程条件)にデリケートに影響されていると考えられ(温度、潤滑・摩擦係数、接触点での相互摺動速度、材料塑性特性領域のばらつき等々)、各条件群と個々の現象との対応関係を捉えることも同時に重要である。
- ③また、適切な実験による現象・メカニズム把握と巧妙で確実なFEMモデルによる再現計算・仮想メカニズム提示によるサイクルを回すといった連携活動で全体像を捉えることが早い道筋であろうと考える。

B. モデリング方式に関する課題

- ①回転成形における変形の複雑さや詳細さを考えた場合、特にブランクとロールの接する狭いエッジ部分の要素変形を妥当なものとするためFEMモデルの最小メッシュサイズは出来れば数 μm レベルに下げたい(本研究では $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度)。このため、モデルとして3次元モデル(360° 全周モデル)を採用した場合は、計算機の装備メモリーをオーバーしてしまう可能性が高く、もしメモリーはクリアしても計算時間が、ケースバイケースではあるが、数週間から数ヶ月程掛かることが想定される。これは一般企業での早期な開発期間を目指す立場から、また並行して多くの計算が実行される計算環境下では、許容され得るレベル

ではない。従って、効率的 FEM 解析を望むのであれば、やはり本研究のような断面形に近いモデル(ブランクであれば近似軸対称要素構造化)とする形を採らざるを得ないのではないかと考える。

- ②今後画期的に高速な計算機あるいは超高速計算が可能な解析コードが出現した場合には、3次元モデルが普通に使用される状況もあり得るが、より速く仕事を進めたいというニーズは尽きないとする。

C. 計算技術に関する課題

- ①本研究でのモデル変形は現状技術の FEM 要素の限界に近いものとする。特に要素変形時のアスペクト比の大きさ、要素のせん断塑性ひずみの大きさ等である。現状の FEM 解析コードが実際の金属におけるせん断負荷下での格子転位の自在性や多様性をメカニズム的に表現してはいないため、限界的な使用状況となっているものと考えられ、これについては解析ソフトウェアの機能向上に期待したい。
- ②回転成形において熱の問題はひとつの要検討項目であるとするが、現状では発熱はそう高くはないものとする。計算に熱影響は入れていない。ただし、より高速・複雑な変形を追うためには必要となってくるものとする。この熱の問題の他、計算誤差が生じる要因として、材料特性の高ひずみ域の応力設定、摩擦係数の設定(有限寸法の要素を用いるため屈曲等により実際と相違が発生する場合があります)、要素質量密度の過大な増大等が考えられる。このために少数の検証実験は必要と考えられる。
- ③本論文の計算モデルでは、基本モデルの開発という見地から材料は均一等方性のものを用いたが、部分的に材料特性の異なるもの(例えば表面焼き入れ材、浸炭処理材、初期ひずみ・応力付きの材料等)に対しても、材質ごとにブランクを部分に分割し、該当部分ごとに要素材料特性をそれぞれ設定する形で対応することが可能である。
- ④本研究では、狙っている最終状態での変形状態を考えて最初から必要な部位のメッシュを細かいものとしている。ただしさらなる計算時間削減のためには良質なアダプティブ法の使用も選択肢であろう。
- ⑤合理的な理由(ブランクへ角速度場を与える際に発生)をもって要素の質量密度を $10^6 \sim 10^7$ 倍ほどに大きくしている。これはロールのブランク径方向の速度は周方向と比すればそう大きくない、との判断のもとに実施しているが、これを採用できたこともモデルの計算時間削減に大きく役立っている。裏腹であるが、ロール径方向速度が高い事例を計算する場合には誤差が出て来る可能性もある。
- ⑥本研究のモデルは、3種類とも軸対称構造化したソリッド要素を用いたが、理由は周方向の変形に起因する特殊な負荷条件をソリッド要素の周方向2面に非対称的に加えるためであった。ただ、ボスフォーミングモデルと回転スプリッティングモデルの場合は、理由があつて上記特殊負荷を直接は加えていないため、軸対称シェル要素を用いてもモデル化は可能である。ただし強力な接触機能 (Edge to edge contact) 等が必要である。なお、今回用いた PAM-CRASH には現時点では軸対称シェル要素は用意されていない。

巻末に、モデル開発に用いた PAM-CRASH(仏 ESI 社製の構造物衝突解析ソフト)の制御文を記す。興味を持たれた方がおられれば、参照・試行して頂きたい。今回モデル化方法に意を尽くしたつもりであるが、まだ未熟な部分もあり得るので、さらなる改善を図って頂ければ幸である。

以上

参考文献

- (1) 日本塑性加工学会編, 「回転加工」—転造とスピニング—, コロナ社, 1998, 初版第2刷
- (2) 葉山益次郎, 室田忠雄: 回転しごき加工について, 塑性と加工, Vol. 4, No. 30 (1963), pp. 445-452
- (3) 葉山益次郎, 岡田篤幸: しごきスピニングの潤滑に関する研究, 塑性と加工, Vol. 11, No. 114 (1970), pp. 503-512
- (4) 葉山益次郎: 我が国におけるスピニング技術の現状, 塑性と加工, Vol. 19, No. 206 (1978), pp. 204-211
- (5) 葉山益次郎: 多種少量生産向きのスピニング, 塑性と加工, Vol. 21, No. 235 (1980), pp. 690-695
- (6) 斉藤正美: 欧米における数値制御スピニング機械の動向, 塑性と加工, Vol. 24, No. 272 (1983), pp. 894-900
- (7) 馬場惇: スピニングの高精度化の動向と展望, 塑性と加工, Vol. 29, No. 324 (1988), pp. 13-20
- (8) 真鍋健一: 管材の端末成形に関する研究動向, 塑性と加工, Vol. 30, No. 339 (1989), pp. 481-488
- (9) 川井謙一: スピニング加工技術とその動向, 塑性と加工, Vol.30, No. 345 (1989), pp. 1387-1394
- (10) 北澤君義: 円管端末の回転成形, 塑性と加工, Vol.30, No. 345 (1989), pp. 1395-1402
- (11) 川井謙一: スピニング加工技術のインテリジェント化, 塑性と加工, Vol.34, No. 387 (1993), pp. 391-397
- (12) 川井謙一: スピニングのインテリジェント化とフレキシブル化, 塑性と加工, Vol.35, No. 406 (1994), pp. 1286-1290
- (13) 蔡学軍, 村田眞, 上村健司: 試作 CNC スピニング加工機による管材の縮管加工, 塑性と加工, Vol.38, No. 434 (1997), pp. 249-254
- (14) 島進, 小寺秀俊, 村上浩隆: フレキシブルスピニング加工法の開発, 塑性と加工, Vol.38, No. 440 (1997), pp. 814-818
- (15) 前田昭宏, 荒木邦彦: 板金製歯形部品の成形技術, 塑性と加工, Vol.39, No. 445 (1998), pp. 106-110
- (16) 好井健司, 阿部正裕, 木村尚, 泉田耕司, 海老原治, 森謙一郎: 揺動鍛造を利用したトラック・バス用大型ホイールディスク成形プロセスの開発, 塑性と加工, Vol.41, No. 476 (2000), pp. 926-930
- (17) 海老原治, 森謙一郎, 好井健司, 高橋大, 阿部正裕: 揺動成形を用いたトラック・バス用大型ホイールディスクにおける成形条件の決定と円環肉厚分布の最適化, 塑性と加工, Vol.42, No. 483 (2001), pp. 348-352
- (18) 島進, 井上昭仁, 小寺秀俊: フレキシブルスピニング加工法, 塑性と加工, Vol.42, No. 489 (2001), pp. 1014-1019
- (19) 西山三郎: スピニング加工技術の課題と製品例, 塑性と加工, Vol.43, No. 502 (2002), pp. 1046-1050
- (20) 木原茂文, 水元宏明, 石田博昭, 飯尾良夫, 中田雄也: 円筒管スピニング成形時の加工条件の影響, 第57回塑性加工連合講演会 (2006)
- (21) 石黒農, 森謙一郎, 大迫洋和, 野中孝之, 杉山大吾, 海老原治: 熱間しごきスピニング加工によるアルミニウム合金鋳物の鋳造欠陥の低減, 塑性と加工, Vol.49, No. 573 (2008), pp. 990-994
- (22) 久保勝司, 平井幸男, 小木曾史郎, 伊藤正治: 試作された回転鍛造機の性能解析, 塑性と加工 Vol. 14, No. 151 (1973), pp. 648-655
- (23) 葉山益次郎, 酒匂雅隆: 丸棒の回転圧縮における接触幅と荷重の評価, 塑性と加工, Vol. 15, No. 157 (1974), pp. 141-146
- (24) 久保勝司, 平井幸男: 回転鍛造品の精度と欠陥, 塑性と加工, Vol. 17, No. 187 (1976), pp. 684-688
- (25) 中村守, 久保勝司, 平井幸男: 回転加工における不均一変形の研究, 塑性と加工 Vol. 24, No. 270 (1983), pp. 730-736
- (26) 蘇洪興, 川井謙一, 葉山益次郎: 回転鍛造の圧力分布, 塑性と加工, Vol. 29, No. 334 (1988), pp. 1119-1124

- (27) 葉山益次郎：回転加工の数値シミュレーション，塑性と加工，Vol. 31, No. 350 (1990), pp. 325-332
- (28) 平井幸男，久保勝司：回転鍛造法の適用事例と最近の動向，塑性と加工，Vol.30, No. 345 (1989), pp. 1361-1366
- (29) 葉山益次郎：転造・スピニング・回転鍛造の解析，塑性と加工，Vol. 31, No. 356 (1990), pp. 1087-1092
- (30) 葉山益次郎，蘇洪興，岩瀬孝邦：管材の回転フランジ加工，塑性と加工，Vol. 31, No. 357 (1990), pp. 1240-1246
- (31) 蘇洪興，川井謙一，葉山益次郎：リングの回転鍛造の変形機構，塑性と加工，Vol. 32, No. 361 (1991), pp. 207-213
- (32) 岡方義則，福安富彦，藤村隆志：最近の鉄道用車輪の製造技術，塑性と加工，Vol.37, No. 429 (1996), pp.1017-1022
- (33) H. R. HERTZ : SCHRIFTEN VERMISCHTEN INHALTS, 1895, JOHANN AMBROSIUS BARTH
- (34) A. W. Crook : SIMULATED GEAR-TOOTH CONTACTS : SOME EXPERIMENTS UPON THEIR LUBRICATION AND SUBSURFACE DEFORMATIONS, 1956, pp. 187-214
- (35) G. M. HAMILTON : PLASTIC FLOW IN ROLLERS LOADED ABOVE THE YIELD POINT, Proc Instn Mech ENGrS, Vol. 177, No. 25, 1963, pp. 667-675
- (36) J. E. Merwin and K. L. Johnson : AN ANALYSIS OF PLASTIC DEFORMATION IN ROLLING CONTACT, Proc Instn Mech ENGrS, Vol. 177, No. 25, 1963, pp. 676-690
- (37) 川井謙一：ころがり接触問題解析の一手法(第1報)，精密機械，43 巻，1 号 (1977), pp. 1427-1432
- (38) 川井謙一：ころがり接触問題解析の一手法(第2報)，精密機械，44 巻，8 号 (1978), pp. 965-972
- (39) 川井謙一：転造におけるひずみ分布と残留応力場へのアプローチ，塑性と加工，Vol. 19, No. 205 (1978), pp. 141-147
- (40) Ken-ichi Kawai, Kazuaki Hattori and Yasuhiko Inomata : EFFECTS OF PROFILED FORMING RATIO ON THE FATIGUE STRENGTH OF GROOVE-ROLLED PRODUCTS, Adv. Tech. of Plast. 1993, pp. 408-413
- (41) 川井謙一：転がり接触問題解析の一手法(第3報)，精密機械，46 巻，2 号 (1980), pp. 189-194
- (42) 大森舜二，谷本楯夫，日朝幸雄，福永純一，村上吉男：円盤状素形材のロール成形に関する実験，塑性と加工，Vol. 25, No. 279 (1984), pp. 309-316
- (43) K. L. JOHNSON : Contact mechanics, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1985
- (44) 蘇洪興，川井謙一，葉山益次郎：回転鍛造の変形機構の解析，塑性と加工，Vol. 30, No. 336 (1989), pp. 123-129
- (45) 服部和明：転造ねじのプロファイル形成度が疲労強度に及ぼす影響，横浜国立大学大学院，平成2年度修士論文 (1990)
- (46) J. J. KALKER : Three-Dimentional Elastic Bodies in Rolling Contact, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990
- (47) 塚本顛彦：回転鍛造機械の妙技，塑性と加工，Vol.40, No. 458 (1999), pp. 222-228
- (48) 中野隆志：板金成形と冷間鍛造の複合技術，塑性と加工，Vol.42, No. 484 (2001), pp. 388-392
- (49) 濟木弘行：21 世紀初頭における鍛造技術の動向，塑性と加工，Vol.43, No. 500 (2002), pp. 815-819
- (50) 川井謙一：回転成形技術の現状と将来，塑性と加工，Vol.43, No. 502 (2002), pp. 1024-1029
- (51) 森謙一郎，平松直人，海老原治：自動車用ホイールリムのロール成形の近似3次元有限要素シミュレーションと素環肉厚分布の決定，塑性と加工，Vol.43, No. 503 (2002), pp. 1188-1192
- (52) 団野敦：回転成形技術への期待，塑性と加工，Vol.43, No. 502 (2002), pp. 1023-1023

- (53) 川井謙一：ハブ成形における材料流れの研究, 天田金属加工機械技術振興財団平成 14 年度研究開発助成(AF-2002007)
- (54) 片山辰作, 河部徹, 和田知之：剛塑性 FEM による回転鍛造の変形特性解析, 塑性と加工, Vol.44, No. 513 (2003), pp. 1034-1038
- (55) 森謙一郎, 野中孝之：軸対称モデルを基礎としたしごきシミュレーションの近似 3 次元有限要素シミュレーション, 塑性と加工, Vol.45, No. 517 (2004), pp. 108-112
- (56) P. Groche, D. Vucic, M. Jockel : Basics of linear flow splitting, Journal of Mat. Proc. Tech. 183 (2007), pp. 249-255
- (57) C. Muller, T. Bohn, E. Bruder, T. Bruder, V. Landersheime, C. el Dsoki, P. Groche, D. Veleva : Severe plastic deformation by linear flow splitting, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2007, 38, No. 10, pp. 842-854
- (58) 峯功一：マルチローラ歯形成技術の開発, 塑性と加工, Vol.48, No. 563 (2007), pp. 1071-1074
- (59) W. Kim, K. Kawai, H. Koyama and D. Miyazaki : Fatigue strength and residual stress of groove-rolled products, Journal of Materials Processing Technology 194 (2007), pp. 46-51
- (60) 金雄：回転成形における材料流れに関する基礎的研究, 横浜国立大学大学院, 2007 年度博士学位論文
- (61) K.Kawai, H. Koyama, T. Kamei, S. Nakahashi, Y. Koizumi and N. Akioka : Metal Flow in Boss Forming, ICTP 2008 (The 9th Int. Conf. on Tech. of Plast.), pp. 1317-1328
- (62) 川井謙一：回転スプリッティングにおける材料流れの研究, Form Tech Review, Vol. 24, No. 1 (2015), pp. 12-17
- (63) Ken-ichi Kawai, Satoshi Chaki and Yoshihiro Takayama : Metal flow in rotary splitting of circular disk, Procedia Engineering, Vol. 81 (2014), pp. 328-333
- (64) 有吉智彦, 岡山尚史：軸端カシメ止め加工におけるシミュレーションモデル開発とカシメ性能向上方法の検討, 第 54 回塑性加工連合講演会 (2003), pp. 355-356
- (65) 有吉智彦, 川井謙一：環状溝転造成形に対する FEM 解析の効率的適用, 第 63 回塑性加工連合講演会 (2012), pp. 303-304
- (66) 有吉智彦, 川井謙一：転造解析用準 2 次元モデルの開発, 塑性と加工, Vol. 55, No. 645 (2014), pp. 939-943
- (67) 有吉智彦, 川井謙一：ボスフォーミング解析用準 2 次元モデルの開発, 塑性と加工, Vol. 56, No. 654 (2015), pp. 557-562
- (68) 葉山益次郎：「回転塑性加工学」, 近代編集社, 1981
- (69) 日本塑性加工学会編：「塑性加工便覧」, 2006

謝辞

本研究を行うにあたり, 終始適切なご指導・ご鞭撻, 様々な励ましを賜りました川井謙一教授に感謝し, 心より深く御礼申し上げます. また 2012 年度の横浜国立大学工学研究マネージメント学習プログラムにおいては実験実施等にあたり, 研究室の森下豊さんからいろいろご支援を頂いたことに感謝致します.

付録 (次頁以降)

各モデルの PAM-CRASH 制御文を記す(容量大からバルクデータは開始・最終 2 行づつのみの記載とした).

1. 転造解析用微小角軸対称構造モデル(発表論文⁽⁶⁶⁾では「微小角軸対称構造」→「準 2 次元」と表記)
2. 転造解析用微小角軸対称構造モデル参照用 3 次元モデル(「実験モデル」(360° 全周モデル))
3. ボスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデル(発表論文⁽⁶⁷⁾では「微小角軸対称構造」→「準 2 次元」と表記)
4. 回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデル～ケース 1
5. 回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデル～ケース 2

本文以上

1. ねじ転造解析用微小角軸対称構造モデル(底付きまで)

INPUTVERSION 2012

PAM-CRASH のバージョン 2012 使用

SOLVER CRASH

ANALYSIS EXPLICIT

陽解法適用

UNIT MM KG S KELVIN

単位 ; SI 単位

SIGNAL YES

SHELLCHECK YES

SOLIDCHECK YES

DCOMP LCB

TITLE / groove forming to 0.9mm

転造計算 2 次元モデル (0.9mm まで)

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

RUNEND/

TIME 0.740

0.74 秒までの計算実行

END_RUNEND

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

OCTRL /

THPOUTPUT INTERVAL 0.002

時系列データ取得間隔 ; 0.002 秒

DSYOUTPUT INTERVAL 0.010

画像データ取得間隔 ; 0.01 秒

PRINT NO

GLBTHP ALL

SHLTHP DFLT

NODPLOT DFLT

SOLPLOT ALL

SHLPLOT MXYZ EPMX EPMI NXYZ EPSI SIGM ESMA ESMI EPME ESME STRA DMG VAUX

MPPOUTPUT WRITE REMOVE

END_OCTRL

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

TCTRL /

PREFER 1.0000e-4

NODAL YES

SHELL_TIMESTEP SMALL BEND

END_TCTRL

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

ECTRL /

RATEFILTER 50

STRAINRATE YES

RATECURVE LOG

END_ECTRL

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

\$ BDFOR/RADIAL center-NODE

角速度場中心座標設定

NODE / 999900 2.925 0.0 0.0

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

\$ roll COG

ロール中心座標設定

NODE / 999901 5.86 0.0 0.0

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

RBODY / 1 3 999901

NAME roll

ロールの重心番号を 999901 と定義

0 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000

NOD 4471:4582 7121:7502

END

\$—5—10—5—20—5—30—5—40—5—50—5—60—5—70—5—80

BOUNC / 999901 001111

ロールの重心番号 999901 の拘束設定

NAME roll COG constraint

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BOUNC / 0 111111

各 WALL 節点の拘束設定

NAME jyoge & center wall NODEs full-constraint

NOD	1	2	3	4	8	7
NOD	6	5	4583	4586	4585	4584
NOD	4587	4590	4589	4588	7113	7114
NOD	7115	7116	7117	7118	7119	7120
END						

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BOUNC / 0 111111

ブランク中心側節点の拘束

NAME blank inner-center COG constraint

NOD	7503:7696
END	

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FRAME / 101 1 0

局部座標系 101 設定 (-0.25°)

NAME blank -0.125deg-edge local-y constraint

0.99999762	-0.002181659	0.0
0.0	1.0	0.0

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FRAME / 102 1 0

局部座標系 102 設定 (+0.25°)

NAME blank +0.125deg-edge local-y constraint

0.99999762	0.002181659	0.0
0.0	1.0	0.0

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BOUNC / 0 010000 101

局部座標系 101 による節点拘束

NAME blank y -0.125deg y constraint

NOD	9:1135	2267:2270	2279:2282
NOD	2291:2294	2303:2306	2315:2318

\$\$

NOD	4453	4454	4457	4458	4461	4462
NOD	4465	4466	4468	4470		
END						

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BOUNC / 0 010000 102

局部座標系 102 による節点拘束

NAME blank y +0.125deg y constraint

NOD	1136:2266	2275:2278	2287:2290
NOD	2299:2302	2311:2314	2323:2326

\$\$

NOD	4455	4456	4459	4460	4463	4464
NOD	4467	4469				
END						

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

PART / 1 SHELL 1

以下, 材料特性設定

NAME roll-cenetr

0.0
0.0001
0.01 1

END_PART

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

MATER /	1	100	2.697e-01	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0

NAME roll-center

210000.	0.3
---------	-----


```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      7  SHELL      7
NAME roll-outer
    0.0
    0.0001
    0.01    1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      7    100    2.697e-01    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0
NAME roll-outer
    210000.          0.3

```

```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      2  SHELL      2
NAME wall center, up, low
    0.0
    0.0001
    0.01    1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      2    100    2.697e-01    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0
NAME wall-up&low
    210000.          0.3

```

```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      4  SOLID      4
NAME blank-top1
    0.0
    0.0

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      4    1    2.697e-01    1    1    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0
NAME blank-top1 matx2, syx2
    161540. CURVE          0          0    0

```

350000.

2002	0	0	0	0	0	0	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 5 SOLID 5

NAME blank-top2

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER /	5	1	2.697e-01	1	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0

NAME blank-top2

161540. CURVE 0 0 0

350000.

2002	0	0	0	0	0	0	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 6 SOLID 6

NAME blank-top3

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER /	6	1	2.697e-01	1	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0

NAME blank-top3 matx2, syx2

80770. CURVE 0 0 0

175000.

2001	0	0	0	0	0	0	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 3 SOLID 3

NAME blank

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER /	3	1	2.697e-01	1	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0

NAME blank

80770. CURVE 0 0 0

175000.

2001	0	0	0	0	0	0	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 2001 35 1. 1. 0.0 0.0 ブランク要素の材料特性

NAME SOLID material

0.00	305.00
0.01	380.57

\$\$

10.00	1680.00
20.00	2300.00

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 2002 35 1. 2. 0.0 0.0 ブランク要素の材料特性 (x2)

NAME SOLID material

0.00	305.00
0.01	380.57

\$\$

10.00	1680.00
20.00	2300.00

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BDFOR / RADIAL 0 0 1001 0 999900 角速度場の設定 (999900 中心)

NAME all ELEMENTs

ELE 253:3708

END

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 1001 62 1. 1. 0. 0. 0 0

NAME blank-element omega/sigma-y

0.000	0.000000
0.010	0.608167

\$\$

0.600	36.490000
0.740	45.030000

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

DIS3D / 999901 99011 99012 0 0 0 0 0 0 ロール変位 x, y の設定

NAME roll t-x, z

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 99011 3 1. 1. 0. 0. 0 0

NAME roll t-x

0.000	0.0000
0.600	-0.8152
1.200	-1.6304

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 99012 3 1. 1. 0. 0. 0 0

NAME roll t-y / for 8.55deg.

0.000	0.0000
0.600	-0.1226
1.200	-0.2452

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

NODE / 12. 901196626627810. 07027346379568-1. 2549249999996 各節点の座標

NODE / 22. 90119662662785-0. 0702734637955-1. 2549249999996

\$\$

NODE / 76952. 90124237642095-0. 0063295391188 1. 2497733333337

NODE / 76962. 90124237642095-0. 00632953911881. 19440583333369

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

SHELL / 240 1 7477 7478 7480 7479 各シェル要素定義

SHELL / 185 1 7367 7368 7370 7369

\$\$

SHELL / 251 7 7501 7502 7500 7499

SHELL / 252 7 7497 7498 7502 7501

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

SOLID / 1981 3 各ソリッド要素定義

3683 3686 3685 3684 3687 3690 3689 3688

SOLID / 3707 3

7100 7693 7694 7099 5839 7695 7696 5838

\$\$

SOLID / 1246 6

2201 2202 2200 2199 1074 1075 1073 1072

SOLID / 2364 6

4443 4455 4467 4439 4445 4457 4468 4441

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

CNTAC / 1 36 ロールセンタ×ブランク接触設定

NAME roll x blank-center

\$# T1SL T2SL ISENS Hcont IEDGE

0. 0. 0 0. 008 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRC TLSTIF

3. 3. 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0.2 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL

0 0 0

SEG 7122 4527 4471 7121

SEG 7124 7122 7121 7123

\$\$

SEG 2415 2417 2418 2416

SEG 2205 2206 1079 1078

END

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

CNTAC / 2 36 ロールアウト×ブランク接触設定

NAME roll x blank-outer

\$# T1SL T2SL ISENS Hcont IEDGE

0. 0. 0 0. 008 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRC TLSTIF

3. 3. 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0.4 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL

0 0 0

SEG 4529 4473 4472 4528

SEG 4530 4474 4473 4529

\$\$

SEG 2415 2417 2418 2416

SEG 2205 2206 1079 1078

```

END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      3      36                      センタ WALL × フランク接触設定
NAME blank-center-front x center-wall
$#   T1SL      T2SL      ISENS      Hcont                      IEDGE
      0.        0.        0      0.0049                      0
$#PCP  SLFACM      FSVNLIKFOR      PENKIN                      CTFRC      TLSTIF
      0.        0.      0      0.
$#   FRICT      IDFRIC      XDMP1                      ICOUFR
      0.        0      0.
$#RMVIERODILEAKIAC32      IOMITIFRED      DTHKPLK      ADJTOL
      0        0      0

      SEG      7113      7114      7115      7116
      SEG      7117      7118      7119      7120
$$
      SEG      1142      15      14      1141
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      4      36                      アッパ° WALL × フランク接触設定
NAME blank-upper x upper-wall
$#   T1SL      T2SL      ISENS      Hcont                      IEDGE
      0.        0.        0      0.0049                      0
$#PCP  SLFACM      FSVNLIKFOR      PENKIN                      CTFRC      TLSTIF
      0.        0.      0      0.
$#   FRICT      IDFRIC      XDMP1                      ICOUFR
      0.        0      0.
$#RMVIERODILEAKIAC32      IOMITIFRED      DTHKPLK      ADJTOL
      0        0      0

      SEG      4583      4586      4585      4584
      SEG      4587      4590      4589      4588
$$
      SEG      4459      4461      4462      4460
      SEG      4459      4469      4470      4461
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      5      36                      ロワ° WALL × フランク接触設定
NAME blank-lower x lower-wall
$#   T1SL      T2SL      ISENS      Hcont                      IEDGE
      0.        0.        0      0.0049                      0
$#PCP  SLFACM      FSVNLIKFOR      PENKIN                      CTFRC      TLSTIF
      0.        0.      0      0.
$#   FRICT      IDFRIC      XDMP1                      ICOUFR
      0.        0      0.
$#RMVIERODILEAKIAC32      IOMITIFRED      DTHKPLK      ADJTOL
      0        0      0

      SEG      8      7      6      5
      SEG      1      2      3      4
$$

```

SEG 2257 2258 1131 1130
SEG 2257 1130 1135 2262
END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ENDDATA

モデル-1の終了

2. ねじ転造解析用全周モデル

INPUTVERSION 2010

PAM-CRASH のバージョン 2010 使用

SOLVER CRASH

ANALYSIS EXPLICIT

陽解法適用

UNIT MM KG S KELVIN

単位 ; SI 単位

SIGNAL YES

SHELLCHECK YES

SOLIDCHECK YES

DCOMP LCB

TITLE / groove forming 3d

全周モデルによる転造計算

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

RUNEND/

TIME 4.950

0.74 秒までの計算実行

END_RUNEND

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

OCTRL /

THPOUTPUT INTERVAL 0.005

時系列データ取得間隔 ; 0.005 秒

DSYOUTPUT INTERVAL 0.01875

画像データ取得間隔 ; 0.01875 秒

PRINT NO

GLBTHP ALL

SHLTHP DFLT

NODPLOT DFLT

SOLPLOT ALL

SHLPLOT MXYZ EPMX EPMI NXYZ EPSI SIGM ESMA ESMI EPME ESME STRA DMG VAUX

MPPOUTPUT WRITE REMOVE

END_OCTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

TCTRL /

PREFER 1.0000e-4

NODAL YES

SHELL_TIMESTEP SMALL BEND

END_TCTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ECTRL /

RATEFILTER 50

STRAINRATE YES

RATECURVE LOG

END_ECTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

\$ oshi right COG

右ロール(当初 x+位置) 中心座標設定

NODE / 999901 77.6015 0.0 0.0

\$ oshi left COG

左ロール(当初 x-位置) 中心座標設定

NODE / 999902 -77.6015 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

RBODY / 1 3 999901 1001 2001

右ロールの重心番号を 999901 と定義

NAME oshi right

0 1.0 1.0 1.0 1.0

NOD 1:93600

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

BOUNC / 999901 001110

右ロール重心の拘束設定

NAME oshi right COG constraint

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

```

RBODY /      2      3 999902  2001  3001
NAME oshi left
    0      1.0      1.0      1.0      1.0
    NOD    93601:187200
    END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BOUNC /  999902  001110
NAME oshi left COG constraint
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BOUNC /      0  111111
NAME disk-center COG constraint
    NOD  187209  187210  187221  187227  187228  187239
    NOD  187240  187251  187252  187398  187399  187410
$$
    NOD  584298  584304  584310  584311  584322  584328
    NOD  584454  584460  584466  584472  584478  584484
    END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BOUNC /      0  001000
NAME disk top-surface constraint
    NOD  187254  187256  187258  187260  187262  187265
    NOD  187266  187281  187284  187300  187692  187693
$$
    NOD  584144  584146  584148  584150  584153  584154
    NOD  584169  584172  584188  584580  584581  584599
    END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BOUNC /      0  001000
NAME disk bottom-surface constraint
    NOD  187597:187601  188149:188153  188701:188705
    NOD  189253:189257  189805:189809  190357:190361
$$
    NOD  583967  584089  584090  584096  584500  584501
    NOD  584512  584513  584519  584641  584642  584648
    END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      1  SHELL      1
NAME oshi right
    0.0
    0.0001
    0.01  1
END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      1  100      8.03e-02  0  0  0  0
      0  0  0  0  0  0  0  0
NAME oshi right
    210000.      0.3
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

```

左ロールの重心番号を 999902 と定義

左ロール重心の拘束設定

ブラックの板厚中央節点の拘束設定

ブラック上面の節点の拘束設定

ブラック下面の節点の拘束設定

以下、材料特性設定

PART / 2 SHELL 2
NAME oshi left
0.0
0.0001
0.01 1

END_PART
\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 2 100 8.03e-02 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME oshi left
210000. 0.3

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 4 SOLID 4
NAME blank-top
0.0
0.0

END_PART
\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 4 1 32.12e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-top
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 7 SOLID 7
NAME blank-edge-top
0.0
0.0

END_PART
\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 7 1 32.12e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-top
323080. CURVE 0 0 0
700000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 8 SOLID 8
NAME blank-edge-top2
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 8 1 32.12e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-top2
323080. CURVE 0 0 0
700000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 9 SOLID 9
NAME blank-edge-top3
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 9 1 32.12e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-top3
161540. CURVE 0 0 0
350000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 5 SOLID 5
NAME blank-middle
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 5 1 16.06e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-middle
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 10 SOLID 10
NAME blank-edge-middle
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 10 1 16.06e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-middle
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 11 SOLID 11
NAME blank-edge-middle2
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 11 1 16.06e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-middle2
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 12 SOLID 12
NAME blank-edge-middle3
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 12 1 16.06e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-middle3
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 6 SOLID 6
NAME blank-low
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 6 1 8.03e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-low
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 13 SOLID 13
NAME blank-edge-low
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 13 1 8.03e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-low
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART / 14 SOLID 14
NAME blank-edge-low2
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER / 14 1 8.03e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0
NAME blank-edge-low2
80770. CURVE 0 0 0
175000.
2001 0 0 0 0 0 0 0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 15 SOLID 15
NAME blank-edge-low3
0.0
0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER / 15 1 8.03e-02 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0

NAME blank-edge-low3

80770. CURVE 0 0 0

175000.

2001 0 0 0 0 0 0 0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 2001 1001 1. 1. 0.0 0.0 プランク材料の降伏特性設定

NAME SOLID material

0.00 122.0000

0.01 242.3914

\$\$

9.99 4563.8632

10.00 4565.8042

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999901 99011 0 0 0 0 0 0 0 右ロールの x 方向変位を定義

NAME oshi-right x-d

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999901 0 99012 0 0 0 0 0 0 右ロールの y 方向変位を定義

NAME oshi-right y-d

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999902 99021 0 0 0 0 0 0 0 左ロールの x 方向変位を定義

NAME oshi-left x-d

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999902 0 99022 0 0 0 0 0 0 左ロールの y 方向変位を定義

NAME oshi-left y-d

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

RAN3D / 999901 0 0 99016 0 0 0 0 0 右ロールの z 軸回り回転を定義

NAME oshi-right t-drz

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

RAN3D / 999902 0 0 99016 0 0 0 0 0 左ロールの z 軸回り回転(同上)を定義

NAME oshi-left t-drz

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 99011 49501 1. 1. 0. 0. 0 0

NAME oshi-right x-d

0.0000 0.00000000

0.0001 -0.00069848

\$\$

4.9499 -0.87566863

4.9500 -0.87516902

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 99012 49501 1. 1. 0. 0. 0 0

NAME oshi-right y-d

```

0.0000      0.00000000
0.0001      0.32505614

$$

4.9499      -0.28418894
4.9500      0.03720177
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /    99021  49501      1.      1.      0.      0.      0      0
NAME oshi-left x-d
0.0000      0.00000000
0.0001      0.00069848

$$

4.9499      0.87566863
4.9500      0.87516902
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /    99022  49501      1.      1.      0.      0.      0      0
NAME oshi-left y-d
0.0000      0.00000000
0.0001      -0.32505614

$$

4.9499      0.28418894
4.9500      -0.03720177
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /    99016  49501      1.      1.      0.      0.      0      0
NAME oshi-right/left rotation
0.0000      0.00000000
0.0001      0.00463695

$$

4.9499      229.80482884
4.9500      229.80947719
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
NODE /      1          7.51  1.38777878E-17  1.253075579E-8      各節点の定義
NODE /      27.510667220582360.30581780732172  -1.25307486E-8
$$
NODE /    584647-7.4327529643037-0.0648643013268 -1.145833333333
NODE /    584648-7.4327529643037-0.0648643013268-1.2499999999997
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
SHELL /      1          1          1          2          4          3      各シェル要素の定義
SHELL /      2          1          3          4          6          5
$$
SHELL /    184319      2  187199  140465  140464  187197
SHELL /    184320      2  187100  140415  140465  187199
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
SOLID /    184323      4          187761  187762  187763  187764  187209  187210  187211  187212      各ソリッド要素の定義
SOLID /    184324      4          187764  187763  187765  187766  187212  187211  187213  187214
$$
SOLID /    516961      15          386478  386479  386331  386329  584646  584647  584499  584497
SOLID /    516962      15          386479  386480  386333  386331  584647  584648  584501  584499
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
CNTAC /      1          36          右ロールとブランクの接触定義
NAME roll-right x blank

```

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	Hcont	NUMBKT	THKEXT	IEDGE
	0.	0.	0	0.01	0	0.	0
\$#PCP	SLFACM	FSVNLIKFOR	PENKIN			CTFRC	TLSTIF
	0.	0.	0	0.			
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1		ICOUFR		
	0.3	0	0.				
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL		
	0	0	0				

SEG	93499	93599	46865	46815
SEG	3	4	6	5

\$\$

SEG	500182	500184	499632	499630
SEG	500184	500186	499634	499632
END				

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 2 36

左ロールとブランクの接触定義

NAME roll-left x blank

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	Hcont	NUMBKT	THKEXT	IEDGE
	0.	0.	0	0.01	0	0.	0
\$#PCP	SLFACM	FSVNLIKFOR	PENKIN			CTFRC	TLSTIF
	0.	0.	0	0.			
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1		ICOUFR		
	0.3	0	0.				
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL		
	0	0	0				

SEG	121291	121292	121294	121293
SEG	121059	121159	121290	121190

\$\$

SEG	500182	500184	499632	499630
SEG	500184	500186	499634	499632
END				

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ENDDATA

モデル 2 の終了

3. ポスフォーミング解析用微小角軸対称構造モデル

INPUTVERSION 2012

PAM-CRASH のバージョン 2012 使用

SOLVER CRASH

ANALYSIS EXPLICIT

陽解法適用

UNIT MM KG S KELVIN

単位 ; SI 単位

SIGNAL YES

SHELLCHECK YES

SOLIDCHECK YES

DCOMP LCB

TITLE / both forming

ポスフォーミング 計算モデル

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

RUNEND/

TIME 0.840

0.84 秒までの計算実行

END_RUNEND

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

OCTRL /

THPOUTPUT INTERVAL 0.001

時系列データ取得間隔 ; 0.001 秒

DSYOUTPUT INTERVAL 0.010

画像データ取得間隔 ; 0.01 秒

PRINT NO

GLBTHP ALL

SHLTHP DFLT

NODPLOT DFLT

SOLPLOT ALL

SHLPLOT MXYZ EPMX EPMI NXYZ EPSI SIGM ESMA ESMI EPME ESME STRA DMG VAUX

MPPOUTPUT WRITE REMOVE

END_OCTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

TCTRL /

PREFER 1.0000e-2

NODAL YES

SHELL_TIMESTEP SMALL BEND

END_TCTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ECTRL /

RATEFILTER 50

STRAINRATE YES

RATECURVE LOG

END_ECTRL

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

\$ BDFOR/RADIAL radius center point

角速度場中心座標設定

NODE / 999801 38.905 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

\$ roll vector NODEs

ロール方向ベクトル用座標設定

NODE / 999901 0.0 0.0 0.0

NODE / 999902 1.0 2.0 3.0

NODE / 999903 2.0 3.0 4.0

NODE / 999904 3.0 4.0 5.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

\$ roll1 COG

ロール 1 の重心番号を 999001 と定義

NODE / 999001 68.772 0.0 6.09045

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

\$ roll2 COG

ロール 2 の重心番号を 999002 と定義

NODE / 999002 68.772 0.0 6.09045

```

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
$ roll3 COG                                                                 ロール 3 の重心番号を 999003 と定義
NODE /   999003           67.8312           0.0           6.09106
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
$ uwabuta COG                                                                 上板の重心番号を 999004 と定義
NODE /   999004           67.8312           0.0           6.09106
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RBODY /      1              3 999001 999901 999902                      ロール 1 の重心番号を 999901 と定義
NAME roll1
      0  1.000  1.000  1.000  1.000
      NOD  53441  53442      2      1
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /  999001 000111                                                  ロールの重心の拘束設定
NAME roll1 COG constraint
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RBODY /      2              3 999002 999902 999903                      ロール 2 の重心番号を 999902 と定義
NAME roll2
      0  1.000  1.000  1.000  1.000
      NOD 999906 999909 999908 999907
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /  999002 000111                                                  ロール 2 の重心の拘束設定
NAME roll2 COG constraint
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RBODY /      3              3 999003 999903 999904                      ロール 3 の重心番号を 999903 と定義
NAME roll3
      0  1.000  1.000  1.000  1.000
      NOD  53151:53440
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /  999003 011101                                                  ロール 3 の重心の拘束設定
NAME roll3 COG constraint
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 111000                                                  フランク中心側節点の拘束設定
NAME blank center-edge constraint
      NOD  3679 3681:3729 30249 30251:30299
      NOD  3680 30250
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 111111                                                  拘束リングの拘束設定
NAME ring constraint
      NOD  53147  53148  53150  53149
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 111111                                                  フランク載せ台の拘束設定
NAME blank table constraint
      NOD      5      6      3      4
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 111111                                                  マンドレルの拘束設定
NAME mandrel constraint
      NOD  999913 999912 999911 999910
      NOD  999922 999923 999913 999910

```

```

      NOD    999918 999919 999923 999922
      NOD    999916 999917 999919 999918
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FRAME /      101      1      0
局部座標系 101 設定 (-0.25° )
NAME blank -0.125deg-edge local-y constraint
      0.99999762 -0.002181659      0.0
      0.0      1.0      0.0
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FRAME /      102      1      0
局部座標系 102 設定 (+0.25° )
NAME blank +0.125deg-edge local-y constraint
      0.99999762      0.002181659      0.0
      0.0      1.0      0.0
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 010000      101
局部座標系 101 による節点拘束
NAME blank y -0.125deg y constraint
      NOD      7:3678      3730:26576
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /      0 010000      102
局部座標系 102 による節点拘束
NAME blank y +0.125deg y constraint
      NOD      26577:30248      30300:53146
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
PART /      3 SHELL      3
以下，材料特性設定
NAME ring
      0.0
      0.0001
      0.1 1

END_PART
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
MATER /      3      100      2.697e-01      1      1      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0
NAME ring
      210000.      0.3

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
PART /      1 SHELL      1
NAME table,mandrel
      0.0
      0.0001
      0.1 1

END_PART
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
MATER /      1      100      2.697e-01      1      1      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0
NAME table,mandrel
      210000.      0.3

```



```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      5 SHELL      5
NAME roll1
    0.0
    0.0001
    0.1    1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      5    100    2.697e-01    1    1    0    0
        0      0      0      0      0      0      0      0
NAME roll1
    210000.          0.3

```

```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      7 SHELL      7
NAME roll2
    0.0
    0.0001
    0.1    1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      7    100    2.697e-01    1    1    0    0
        0      0      0      0      0      0      0      0
NAME roll2
    210000.          0.3

```

```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      4 SHELL      4
NAME roll3
    0.0
    0.0001
    0.1    1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      4    100    2.697e-01    1    1    0    0
        0      0      0      0      0      0      0      0
NAME roll3
    210000.          0.3

```

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 2 SOLID 2

NAME blank

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER / 2 1 2.697e-01 1 1 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0

NAME blank

216000. CURVE 0 0 0

756000.

2001 0 0 0 0 0 0 0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ACFLD / 1 0 0 0 0 5013 1.0 0 加速度場 1 設定

NAME blank -2.75mm z- 1/7 to edge -0.28mm

NOD 26303:26306 26313:26316 26323:26326

NOD 26333:26336 26343:26346 26353:26356

\$\$

NOD 53103:53106 53113:53116 53123:53126

NOD 53133:53136 53143:53146

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 5013 4 1. 1. 0.0 0.0

NAME center oshituke ACFLD z-

0.00 -50.0

0.20 -50.0

0.21 0.0

1.00 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ACFLD / 2 0 0 0 0 5023 1.0 0 加速度場 2 設定

NAME blank -2.75mm z- 2/7 to edge -0.95mm

NOD 26297:26576 52867:53146

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 5023 4 1. 1. 0.0 0.0

NAME center oshituke ACFLD z-

0.00 0.0

0.20 0.0

0.21 -50.0

1.00 -50.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ACFLD / 3 0 0 0 0 6013 1.0 0 加速度場 3 設定

NAME blank tBDFOR rendo / oshi shita local up-load / half-10

```

NOD    12093:12206    12232:12288    12314:12370
NOD    12396:12452    12478:12534    12560:12616
NOD    12642:12698    12724:12780    12806:12862
NOD    16225:17204    21223:22172    26068:26166
NOD    38663:38776    38802:38858    38884:38940
NOD    38966:39022    39048:39104    39130:39186
NOD    39212:39268    39294:39350    39376:39432
NOD    42795:43774    47793:48742    52638:52736
END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /      6013      7      1.      1.      0.0      0.0
NAME hatou upward force ACFLD z+
          0.00          0.0
          0.10          8.0
          0.20         16.0
          0.30         24.0
          0.40         32.0
          0.44         36.0
          1.00         36.0
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BDFOR / RADIAL      0      0    2013      0 999801      0 角速度場 1 の設定 (999801 中心)
NAME BDFOR/RADIAL full-length top 10-layer bokshi-nashi
ELE      334:343      384:393      434:443
ELE      484:493      534:543      584:593
$$
ELE      12044:12863    16144:17123    21044:21993
ELE      25794:25892    26293
END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /      2013      442      1. -0.9738      0.0      0.0
NAME BDFOR/RADIAL / t^3 base 0.44s/2.98mm
          0.000          0.000000
          0.001          0.000000
$$
          0.440         -2.981440
          1.000         -2.981440
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
BDFOR / RADIAL      0      0    2023      0 999801      0 角速度場 2 の設定
NAME BDFOR/RADIAL full-length bottom 25 layers
ELE      294:318      344:368      394:418
ELE      444:468      494:518      544:568
$$
ELE      12019:12043    14094:16143    18594:21043
ELE      23419:25793    26043:26292
END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
FUNCT /      2023      442      1. -0.4328      0.0      0.0
NAME BDFOR/RADIAL / t^3 base 0.44s/2.98mm
          0.000          0.000000
          0.001          0.000000
$$
          0.440         -2.981440
          1.000         -2.981440
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

```

```

DIS3D / 999801 98011 0 0 1. 1. 1. 0 角速度場中心の x 方向変位
NAME BDFOR 3/4 point x-motion
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FUNCT / 98011 562 1. 2. 0.0 0.0
NAME BDFOR rad-half point x-motion
0.000 0.000000
0.440 0.000000

$$
0.999 -31.913665
1.000 -32.018560

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
DIS3D / 999001 90011 90012 90013 1. 1. 1. 0 ロール 1 の x, y, z 方向変位
NAME roll1 COG xyz-motion
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
DIS3D / 999002 90011 90022 90013 1. 1. 1. 0 ロール 2 の x, y, z 方向変位
NAME roll2 COG xyz-motion
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
DIS3D / 999003 90011 0 0 1. 1. 1. 0 ロール 3 の x 方向変位
NAME roll3 COG x-motion
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FUNCT / 90011 1001 1. 1. 0.0 0.0
NAME roll123-COG t-x / t^3
0.000 0.000000
0.001 0.000000

$$
0.999 -34.895105
1.000 -35.000000

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FUNCT / 90012 101 1. 3. 0.0 0.0
NAME roll1-COG t-y
0.000 0.000000
0.010 0.000490

$$
0.990 4.797822
1.000 4.895237

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FUNCT / 90013 101 1. 3. 0.0 0.0
NAME roll12-COG t-z
0.000 0.000000
0.010 -0.000490

$$
0.990 -4.797822
1.000 -4.895237

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
FUNCT / 90022 101 1. 3. 0.0 0.0
NAME roll2-COG t-y
0.000 0.000000
0.010 -0.000490

$$
0.990 -4.797822
1.000 -4.895237

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RAN3D / 999003 0 90035 0 1. 1. 1. 0 0 ロール 3 の y 軸回り回転
NAME roll3 COG ry-rotation

```

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 90035 101 1. 0.33333 0.0 0.0

NAME roll3-COG ry-rotation

0.000 0.000000

0.010 -0.000490

\$\$

0.990 -4.797822

1.000 -4.895237

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 2001 38 1. 1. 0.0 0.0

NAME BLANK material / a1050 / 0605-renew

0.00 25.3369

0.01 39.0901

\$\$

90.00 338.7146

100.00 347.4617

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

NODE / 1 64.843 0.25 33.76393 各節点の座標

NODE / 2 64.843 -27.6328 33.76393

\$\$

NODE / 99992219.85004412162110.16289871706469 5.5004500000001

NODE / 99992319.8500441216211-0.1628987170645 5.5004500000001

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

SHELL / 26297 1 999918 999919 999923 999922 各シェル要素定義

SHELL / 26296 1 999922 999923 999913 999910

\$\$

SHELL / 147 4 53440 53154 53151 53439

SHELL / 148 5 53441 53442 2 1

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

SOLID / 294 2 各ソリッド要素定義

26577 26578 26579 26580 7 8 9 10

SOLID / 295 2

26578 26581 26582 26579 8 11 12 9

\$\$

SOLID / 26292 2

53135 53145 53146 53136 26565 26575 26576 26566

SOLID / 26293 2

26085 26084 52654 52655 26096 26096 52666 52666

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 1 36 ロール1×ブランク接触設定

NAME roll1 x blank

\$# T1SL T2SL ISENS HcontITPRT IEDGE

0. 0. 0 0.01 0 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRC TLSTIF

3.5 3.5 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0.05 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL

0 0 0 0

SEG 53441 53442 2 1

SEG 26677 26678 108 107

\$\$

SEG	52665	52666	26096	26095
SEG	52676	52665	26095	26106

\$\$

SEG	53146	53136	26566	26576
SEG	53147	53148	53150	53149

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 5 36

ブラック受け台×ブラック接触設定

NAME table x blank

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	HcontITPRT	IEDGE
	0.	0.	0	0.01 0	0
\$#PCP	SLFACM	FSVNLIKFOR	PENKIN	CTFRC	TLSTIF
	2.5	2.5 0	0.		
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR	
	0.05	0	0.		
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL
	0 0 0 0				

SEG	5	6	3	4
SEG	52572	52573	26003	26002

\$\$

SEG	30097	3527	3578	30148
SEG	30148	3578	3629	30199

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 6 10

ブラック×ブラック内部接触設定

NAME blank x blank / full-range

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	NACCBLANK	EDGLN	Hcmin
	0.	0.	0 0		0.20	0.
\$#	SLFACM	FSVNL				TLSTIF
	0.	0.				

ELE	294:1393	3894:26293
-----	----------	------------

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 7 36

マンドレル×ブラック接触設定

NAME mandrel x blank

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	HcontITPRT	IEDGE
	0.	0.	0	0.01 0	0
\$#PCP	SLFACM	FSVNLIKFOR	PENKIN	CTFRC	TLSTIF
	2.5	2.5 0	0.		
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR	
	0.00	0	0.		
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL
	0 0 0 0				

SEG	999913	999912	999911	999910
SEG	999916	999917	999919	999918

\$\$

SEG 38690 12120 12122 38692

SEG 38692 12122 12124 38694

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ENDDATA

モデル-3の終了

4. 回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデル(ケース 1)

```
INPUTVERSION 2012
SOLVER CRASH
ANALYSIS EXPLICIT
UNIT MM TON S KELVIN
SIGNAL YES
SHELLCHECK YES
SOLIDCHECK YES
DCOMP LCB
TITLE / splitting / case1
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
RUNEND/
TIME 0.360
END_RUNEND
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
OCTRL /
THPOUTPUT INTERVAL 0.001
DSYOUTPUT INTERVAL 0.020
PRINT NO
GLBTHP ALL
SHLTHP DFLT
NODPLOT DFLT
SOLPLOT ALL
SHLPLOT MXYZ EPMX EPMI NXYZ EPSI SIGM ESMA ESMI EPME ESME STRA DMG VAUX
MPPOUTPUT WRITE REMOVE
END_OCTRL
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
TCTRL /
PREFER 1.0000e-2
NODAL YES
SHELL_TIMESTEP SMALL BEND
END_TCTRL
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
ECTRL /
RATEFILTER 50
STRAINRATE YES
RATECURVE LOG
END_ECTRL
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
$ roll vector NODEs
NODE / 999901 0.0 0.0 0.0
NODE / 999902 1.0 2.0 3.0
NODE / 999903 2.0 3.0 4.0
NODE / 999904 3.0 4.0 5.0
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
$ roll COG
NODE / 999001 27.207 0.000 0.000
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
$ BDFOR/RADIAL ctr NODE / blank center
NODE / 999801 23.625 0.000 0.000
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
RBODY / 1 3 999001 999901 999902
NAME roll
```

PAM-CRASH のバージョン 2012 使用

陽解法適用

単位 ; SI 単位

スプリッティングモデル, ケース 1

0.36 秒までの計算実行

時系列データ取得間隔 ; 0.001 秒

画像データ取得間隔 ; 0.02 秒

ロール方向ベクトル設定用節点の設定

ロール中心座標設定

角速度場中心座標設定

ロールの重心番号を 999901 と定義

```

0 1.000 1.000 1.000 1.000
NOD 11:82 1 2
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC / 999001 011111 ロールの重心の拘束設定
NAME roll COG constraint
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC / 999801 011111 角速度場中心の拘束設定
NAME avf ctr constraint
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC / 0 111111 各フア節点の拘束設定
NAME flr-panel NODEs constraint
NOD 4 5 6 3 10 9
NOD 8 7
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC / 0 111111 側面 WALL 節点の拘束設定
NAME side-walls NODEs constraint
NOD 83 84 85 86 87 88
NOD 89 90 91 92 93 94
NOD 95 96 97 98
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC / 0 111000 ブランク中心側節点の拘束設定
NAME blank center-edge constraint
NOD 99 100 103 105 107 109
NOD 111 113 115 117 119 121
$$
NOD 22524 22526 22528 22530 22532 22534
NOD 22536 22538
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO / 6 0 0 ブランク先端節点の相互拘束設定
NAME NODCO / ->2 (x 座標, z 座標の共通化)
NOD 33159 16628
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO / 6 0 0
NAME NODCO / ->3
NOD 33158 16627
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO / 6 0 0
NAME NODCO / ->4
NOD 33157 16626
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO / 6 0 0
NAME NODCO / ->5
NOD 33156 16625
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO / 6 0 0
NAME NODCO / ->6

```

```

      NOD    33155    16624
      END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->7
      NOD    33154    16623
      END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->8
      NOD    33153    16622
      END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->9
      NOD    33152    16621
      END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->10
      NOD    33151    16620
      END
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

```

```

PART /      1 SHELL      1
NAME roll
      0.0
      0.0001
      0.1      1

```

以下，材料特性設定

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      1      100      2.697e-01      1      1      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0
NAME roll
      210000.      0.3

```

```

$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
PART /      2 SHELL      2
NAME rflr-panel
      0.0
      0.0001
      0.1      1

```

```

END_PART
$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80
MATER /      2      100      2.697e-01      1      1      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0
NAME flr-panel
      210000.      0.3

```

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 PART / 3 SHELL 3
 NAME side-walls
 0.0
 0.0001
 0.1 1

END_PART
 \$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 MATER / 3 100 2.697e-01 1 1 0 0
 0 0 0 0 0 0 0 0
 NAME side-walls
 210000. 0.3

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 PART / 5 SOLID 5
 NAME blank
 0.0
 0.0

END_PART
 \$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 MATER / 5 1 2.697e-01 1 1 0 0
 0 0 0 0 0 0 0 0
 NAME blank
 108000. CURVE 0 0 0
 378000.
 2001 0 0 0 0 0 0 0
 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 PART / 6 SOLID 6
 NAME blank
 0.0
 0.0

END_PART
 \$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
 MATER / 6 16 2.697e-01 1 1 0 0
 0 0 0 0 0 0 0 0
 NAME blank
 108000. CURVE 0 0 0
 378000.

2001	0	0	0	0	0	0	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5							

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

BDFOR / RADIAL 0 0 1013 0 999801 0 角速度場の設定 (999801 中心)

NAME BDFOR/RADIAL / dai-3kaku

ELE 4240:4242 4270:4272 4300:4302

ELE 4330:4332 4360:4362 4389:4392

\$\$

ELE 4092 4121 4122 4151 4152 4181

ELE 4182 4211 4212

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 1013 1001 1. 0.4 0.0 0.0

NAME tBDFOR/RADIAL / sqrt-t base

0.000 0.0000

0.001 0.5376

\$\$

0.999 16.9915

1.000 17.0000

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999001 90011 0 0 1. 1. 1. 0 ロールの x 方向変位の設定

NAME roll x-motion

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

DIS3D / 999801 90011 0 0 1. 1. 1. 0 角速度場中心の x 方向変位の設定

NAME avf ctr x-motion

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 90011 1001 1. 1. 0.0 0.0

NAME roll t-x / t^2 kairyo with ddx/0.005mmAMP

0.000 0.000000

0.001 0.000031

\$\$

0.999 -16.943375

1.000 -16.958340

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

FUNCT / 2001 928 1. 1. 0.0 0.0 ブランク材料降伏特性の設定

NAME BLANK material / a1050

0.00 25.3369

0.01 39.0901

\$\$

500.00 154.5600

1000.00 154.6200

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

NODE / 131.2661888990237-0.08029999999992.11041870355344 各節点の座標定義

NODE / 231.26618889902370.080099999999992.11041870355344

\$\$

NODE / 3315926.99993574478660.05890481639736 0.025

NODE / 3316026.99993574478660.058904816397361.7763568394E-15

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

SHELL / 1 1 1 2 80 79 各シェル要素の定義

SHELL / 38 1 11 81 82 12

\$\$

SHELL / 42 3 95 96 97 98


```

SHELL /      39      3      83      84      85      86
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
SOLID /      43      5
16630 16631 16632 16633      99      100      101      102
SOLID /      44      5
16631 16634 16635 16632      100      103      104      101
$$
SOLID /      5702      6
22536 22538 22539 22537      6005      6007      6008      6006
SOLID /      16242      6
33098 33099 33160 33159 16567 16568 16629 16628
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      1      36
NAME roll x blank / with center-ERODE
$#   T1SL      T2SL      ISENS      HcontITPRT      IEDGE
      0.      0.      0      0.007      0      0
$#PCP   SLFACM      FSVNLIKFOR      PENKIN      CTFRG      TLSTIF
      2.5      2.5      0      0.
$#   FRICT      IDFRIC      XDMP1      ICOUFR
      0.05      0      0.
$#RMVIERODILEAKIAC32      IOMITIFRED      DTHKPLK      ADJTOL
      0      1      0      0

      SEG      1      2      80      79
      SEG      13      11      12      14
$$
      SEG      33160      33159      16628      16629
      SEG      33099      33160      16629      16568
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      2      36
NAME flr-panels x blank-lowest
$#   T1SL      T2SL      ISENS      HcontITPRT      IEDGE
      0.      0.      0      0.01      0      0
$#PCP   SLFACM      FSVNLIKFOR      PENKIN      CTFRG      TLSTIF
      0.      0.      0      0.
$#   FRICT      IDFRIC      XDMP1      ICOUFR
      0.      0      0.
$#RMVIERODILEAKIAC32      IOMITIFRED      DTHKPLK      ADJTOL
      0      0      0      0

      SEG      10      9      8      7
      SEG      4      5      6      3
$$
      SEG      27227      27258      10727      10696
      SEG      27196      27227      10696      10665
      END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
CNTAC /      3      36
NAME sidewall-ym x blank
$#   T1SL      T2SL      ISENS      HcontITPRT      IEDGE
      0.      0.      0      0.01      0      0

```

各ソリット要素定義

ロール×フランク接触設定

フロア×フランク接触設定

側面 WALL×フランク接触設定

\$#PCP	SLFACM	FSVNLIFOR	PENKIN	CTFRC	TLSTIF
	0.	0.	0.		
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR	
	0.	0	0.		
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL
	0	0	0	0	

	SEG	87	88	89	90
	SEG	95	96	97	98
\$\$					
	SEG	11811	11813	11874	11872
	SEG	11812	11811	11872	11873
END					

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 4 36 側面 WALL×ブランク接触設定

NAME sidewall-yp x blank

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	HcontITPRT	IEDGE
	0.	0.	0	0.01 0	0
\$#PCP	SLFACM	FSVNLIFOR	PENKIN	CTFRC	TLSTIF
	0.	0.	0.		
\$#	FRICT	IDFRIC	XDMP1	ICOUFR	
	0.	0	0.		
\$#RMVIERODILEAKIAC32			IOMITIFRED	DTHKPLK	ADJTOL
	0	0	0	0	

	SEG	83	84	85	86
	SEG	91	92	93	94
\$\$					
	SEG	29501	29562	29564	29503
	SEG	29502	29563	29562	29501
END					

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 5 10 ブランク×ブランク内部接触設定

NAME blank x blank

\$#	T1SL	T2SL	ISENS	NACCBLANK	EDGLN	Hcmin
	0.	0.	0	0	0.3	0.
\$#	SLFACM	FSVNL				TLSTIF
	0.	0.				

	ELE	5122:5672	10794:16182
END			

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ENDDATA モデル-タ4の終了

5. 回転スプリッティング解析用微小角軸対称構造モデル(ケース 2)

```
INPUTVERSION 2012
SOLVER CRASH
ANALYSIS EXPLICIT
UNIT MM TON S KELVIN
SIGNAL YES
SHELLCHECK YES
SOLIDCHECK YES
DCOMP LCB
TITLE / splitting / case2
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RUNEND/
TIME 0.360
END_RUNEND
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
OCTRL /
THPOUTPUT INTERVAL 0.001
DSYOUTPUT INTERVAL 0.020
PRINT NO
GLBTHP ALL
SHLTHP DFLT
NODPLOT DFLT
SOLPLOT ALL
SHLPLOT MXYZ EPMX EPMI NXYZ EPSI SIGM ESMA ESMI EPME ESME STRA DMG VAUX
MPPOUTPUT WRITE REMOVE
END_OCTRL
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
TCTRL /
PREFER 1.0000e-2
NODAL YES
SHELL_TIMESTEP SMALL BEND
END_TCTRL
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
ECTRL /
RATEFILTER 50
STRAINRATE YES
RATECURVE LOG
END_ECTRL
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
$ roll vector NODEs
NODE / 999901 0.0 0.0 0.0
NODE / 999902 1.0 2.0 3.0
NODE / 999903 2.0 3.0 4.0
NODE / 999904 3.0 4.0 5.0
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
$ roll COG
NODE / 999001 27.207 0.000 0.000
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
$ BDFOR/RADIAL ctr NODE / blank center
NODE / 999801 23.625 0.000 0.000
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
RBODY / 1 3 999001 999901 999902
NAME roll
```

PAM-CRASH のバージョン 2012 使用

陽解法適用

単位 ; SI 単位

スプリッティングモデル, ケース 2

0.36 秒までの計算実行

時系列データ取得間隔 ; 0.001 秒

画像データ取得間隔 ; 0.02 秒

ロール方向ベクトル設定用節点の設定

ロール中心座標設定

角速度場中心座標設定

ロールの重心番号を 999901 と定義

```

0      1.000      1.000      1.000      1.000
NOD          9:80          97:108
END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /    999001  011111                                ロールの重心の拘束設定
NAME roll COG constraint

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /    999801  011111                                角速度場中心の拘束設定
NAME avf ctr constraint

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /              0  111111                            各707節点の拘束設定
NAME flr-panel NODEs constraint
      NOD          2          3          4          1          8          7
      NOD          6          5
END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /              0  111111                            側面 WALL 節点の拘束設定
NAME side-walls NODEs constraint
      NOD          81          82          83          84          85          86
      NOD          87          88          89          90          91          92
      NOD          93          94          95          96
END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
BOUNC /              0  111000                            ブランク中心側節点の拘束設定
NAME blank center-edge constraint
      NOD          109          110          113          115          117          119
      NOD          121          123          125          127          129          131
      NOD          41158          41160          41162          41164          41166          41168
      NOD          41170          41172          41174          41176
END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /          6          0          0                                ブランク先端節点の相互拘束設定
NAME NODCO / ->2                                (x 座標, z 座標の共通化)
      NOD          54849          27478
      END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /          6          0          0
NAME NODCO / ->3
      NOD          54848          27477
      END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /          6          0          0
NAME NODCO / ->4
      NOD          54847          27476
      END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /          6          0          0
NAME NODCO / ->5
      NOD          54846          27475
      END

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /          6          0          0
NAME NODCO / ->6
      NOD          54845          27474

```

```

END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->7
      NOD    54844    27473
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->8
      NOD    54843    27472
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->9
      NOD    27471    54842
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
NODCO /      6      0      0
NAME NODCO / ->10
      NOD    54841    27470
END
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

```

```

PART /      1 SHELL      1
NAME roll
      0.0
      0.0001
      0.1  1

```

以下，材料特性設定

```

END_PART
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
MATER /      1    100    5.394e-01    1    1    0    0
      0      0      0      0      0      0      0
NAME roll
      210000.      0.3

```

```

$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
PART /      2 SHELL      2
NAME rflr-panel
      0.0
      0.0001
      0.1  1

```

```

END_PART
$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80
MATER /      2    100    5.394e-01    1    1    0    0
      0      0      0      0      0      0      0
NAME flr-panel
      210000.      0.3

```

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 3 SHELL 3

NAME side-walls

0.0

0.0001

0.1 1

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER / 3 100 5.394e-01 1 1 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0

NAME side-walls

210000. 0.3

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 4 SOLID 4

NAME blank

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER / 4 1 5.394e-01 1 1 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0

NAME blank

108000. CURVE 0 0 0

378000.

2001 0 0 0 0 0 0 0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

PART / 6 SOLID 6

NAME blank

0.0

0.0

END_PART

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

MATER / 6 16 5.394e-01 1 1 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0

NAME blank

108000. CURVE 0 0 0

378000.

2001 0 0 0 0 0 0 0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
1.5

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

BDFOR / RADIAL 0 0 1013 0 999801 0 角速度場の設定 (999801 中心)

NAME BDFOR/RADIAL / dai-3-kaku

ELE 2805:2807 2835:2837 2864:2867
ELE 2894:2897 2924:2927 2953:2957
ELE 5977 18265 18296 18326 18327 18357
ELE 18358 18388 18389
END

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 1013 1001 1. 0.4 0.0 0.0 角速度場のレベル設定

NAME tBDFOR/RADIAL / sqrt(t) base

0.000 0.0000
0.001 0.5376
0.999 16.9915
1.000 17.0000

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

DIS3D / 999001 90011 0 0 1. 1. 1. 0 ロールの x 方向変位の設定

NAME roll x-motion

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

DIS3D / 999801 90011 0 0 1. 1. 1. 0 角速度場中心の x 方向変位の設定

NAME avf ctr x-motion

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 90011 1001 1. 1. 0.0 0.0 ロールの x 方向変位

NAME roll t-x

0.000 0.000000
0.001 0.000031

\$\$

0.999 -16.943375
1.000 -16.958340

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

FUNCT / 2001 928 1. 1. 0.0 0.0 プランク材料降伏特性の設定

NAME BLANK material / a1050

0.00 25.3369
0.01 39.0901

\$\$

500.00 154.5600
1000.00 154.6200

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

NODE / 126.99993574478660.05890481639736 -0.01 各節点の座標定義

NODE / 2 20.249951808590.04417861229802 -0.01

\$\$

NODE / 5484926.99993574478660.05890481639736 0.025

NODE / 5485026.99993574478660.058904816397361.7763568394E-15

\$--5--10--5--20--5--30--5--40--5--50--5--60--5--70--5--80

SOLID / 48 4 各ソリッド要素定義

27480 27481 27482 27483 109 110 111 112

SOLID / 49 4

27481 27484 27485 27482 110 113 114 111

\$\$

SOLID / 5707 6
33386 33388 33389 33387 6015 6017 6018 6016

SOLID / 27047 6

54748 54749 54850 54849 27377 27378 27479 27478

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

SHELL / 24 1 54 52 51 53 各シェル要素の定義

SHELL / 46 1 105 106 107 108

\$\$

SHELL / 40 3 89 90 91 92

SHELL / 41 3 93 94 95 96

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 1 36 ロール×ブランク接触設定

NAME roll x blank / with center-ERODE

\$# T1SL T2SL ISENS HcontITPRT IEDGE

0. 0. 0 0.007 0 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRG TLSTIF

2.5 2.5 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0.05 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL

0 1 0 0

SEG 11 9 10 12

SEG 15 11 12 16

\$\$

SEG 54850 54849 27478 27479

SEG 54749 54850 27479 27378

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 2 36 フロア×ブランク接触設定

NAME flr-panels x blank-lowest

\$# T1SL T2SL ISENS HcontITPRT IEDGE

0. 0. 0 0.01 0 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRG TLSTIF

0. 0. 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0. 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL

0 0 0 0

SEG 8 7 6 5

SEG 2 3 4 1

\$\$

SEG 54648 54749 27378 27277

SEG 54749 54850 27479 27378

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 3 36 側面 WALL×ブランク接触設定

NAME sidewall-ym x blank

\$# T1SL T2SL ISENS HcontITPRT IEDGE

0. 0. 0 0.01 0 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRG TLSTIF

0. 0. 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR

0. 0 0.
\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL
0 0 0 0

SEG 85 86 87 88
SEG 93 94 95 96

\$\$

SEG 27376 27377 27478 27477
SEG 27377 27378 27479 27478

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 4 36

側面 WALL×ブランク接触設定

NAME sidewall-yp x blank

\$# T1SL T2SL ISENS HcontITPRT IEDGE
0. 0. 0 0.01 0 0

\$#PCP SLFACM FSVNLIKFOR PENKIN CTFRG TLSTIF
0. 0. 0 0.

\$# FRICT IDFRIC XDMP1 ICOUFR
0. 0 0.

\$#RMVIERODILEAKIAC32 IOMITIFRED DTHKPLK ADJTOL
0 0 0 0

SEG 81 82 83 84
SEG 89 90 91 92

\$\$

SEG 54747 54848 54849 54748
SEG 54748 54849 54850 54749

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

CNTAC / 5 10

ブランク×ブランク内部接触設定

NAME blank x blank

\$# T1SL T2SL ISENS NACCBANK EDGLN Hcmin
0. 0. 0 0 0.3 0.

\$# SLFACM FSVNL TLSTIF
0. 0.

ELE 48:11387 13242:13267 13272:13297
ELE 13302:13327 13332:13357 13362:13387

\$\$

ELE 26662:26747 26762:26847 26862:26947
ELE 26962:27047

END

\$---5---10---5---20---5---30---5---40---5---50---5---60---5---70---5---80

ENDDATA

モデルデータ5の終了

モデルデータ以上

論文全文以上