



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

マンネスマン破壊 100年の謎を追って

Researching for 100-Year Mystery of Mannesmann Fracture

山根康嗣

Koji Yamane

日本製鉄(株) 技術開発本部
プロセス研究所 圧延研究部
主幹

1 はじめに

筆者は2009年に旧 住友金属工業(株)一現 日本製鉄(株)に入社後、油田掘削や熱交換器に使われる継目無金属管(シームレスパイプ)のプロセス開発に携わり、傾斜圧延機によって丸ビレットに孔を開ける「穿孔圧延プロセス」を主に担当した¹⁾。本稿では、2021年に執筆した私の博士学位論文を紹介したい。博士号取得に挑戦する研究者の一助になれば、幸いである。

2 マンネスマン破壊

傾斜圧延や転造に代表される回転塑性加工は、円形断面材料を回転させながら外径を徐々に減じるといった逐次繰り返し加工の特徴を有し、鋼材の大圧下が可能である。継目無金属管の穿孔・ネジ山の加工・棒鋼の絞り加工といった種々の特殊加工法として活用されている。実用例として、図1に2ロール式の傾斜圧延機の概略図を示す。ロール軸がパスラインに対して傾斜していることにより、丸ビレットは螺旋回転しながら外径が減じられ、ロールとプラグによる異周速圧延を繰り返して穿孔に至る。一般的な塑性加工法に比べて大圧下が可能の反面、材料回転にともなう引張応力やせん断応力が繰り返し作用するため、材料内部に割れが発生する場合がある。この現象は、傾斜圧延機の発明者であるドイツのMannesmann兄弟の名に因んで、マンネスマン破壊として知られている。マンネスマン破壊は、製品の強度ならびに安全性を損なわせ、かつ検出が困難であるため、内部割れの発生メカニズムと抑制方法は20世紀から論じられてきた^{2,3)}。しかし、内部割れの予測技術は未だに確立されておらず、これは複雑な応力履歴が延性破壊に及ぼす影響が体系的に整理されていないことに起因する。従来の延性破壊条件式は、引張応力がボイド(微小空孔)の成長に支配的であるという理論

に基づき、応力不変量から構成されるが^{4,5)}、せん断応力によるボイドの合体やき裂進展等を考慮していないので、内部割れを予測困難と考えられる。そこで、筆者は、方向を変えながら繰り返し作用するせん断応力がボイド発展に寄与するという新しい説を提案し、内部割れの現象解明に挑戦した⁶⁻⁸⁾。

3 博士号取得までの道のり

企業研究とは商品化を目指した実用性のある開発であり、得られたデータやノウハウは知財権利化するのが原則である。博士号取得には複数の査読付き論文が必要であるものの、企業にとって論文公開は二の次であることと、研究者自身が実用研究を学術的に意味のある論文に仕上げなければならない苦労がある。事業発展に影響を及ぼさないストーリーを作り、かつ学術的にも新しく、誰よりも先に公開すること

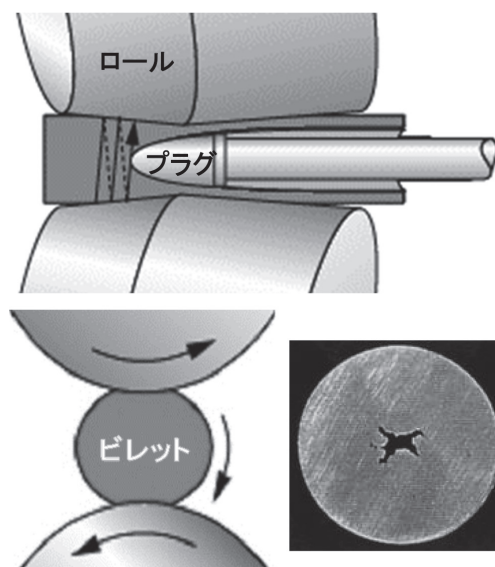


図1 2ロール式の傾斜圧延機の概略図とマンネスマン破壊

が求められる。筆者の場合、実験結果に違和感を持ったことが、論文執筆のきっかけであった。内部割れの再現実験にて、割れの形態が十字状もしくは円環状であることに気が付いた。先行文献では、内部割れは材料軸心部から発生すると提唱されていたが⁹⁾、その説が正しければ、割れの形態は「点」になるはずである。材料軸心部と圧延機のパスラインが一致した条件下では、真の材料軸心部は長手方向に延びるだけで、半径方向ならびに円周方向の応力はほとんど作用しないため、材料軸心部から疵が開口する説は間違っていると直感した。文献調査の結果、き裂進展後の巨視的な内部割れを観察しただけの研究が多く、内部割れの起点と成長のメカニズムに関する考察が不十分であり、議論の余地があるとわかった。

一方、延性破壊分野の研究を網羅的に調べると、2000年以降、引張応力だけでなく、せん断応力が延性破壊に寄与する現象も研究されており¹⁰⁾、延性破壊条件は応力状態に依存することが提案されていた^{11,12)}。そして、ポーランド¹³⁾・スイス¹⁴⁾・イタリア¹⁵⁾・ドイツの研究者が、応力状態を考慮した内部割れ予測技術に関して、精力的に研究していることも判明した。論文公開が2番手になれば、論文の価値は激減するため、筆者は彼らに直接会って、研究進捗を聞くことにした。幸運にも訪問を快く受け入れていただき、彼らの研究も道半ばであること、そもそも誰一人として内部割れの起点からき裂進展に至る経緯を捉えていないことを知り得た。彼らの研究が完成されつつあれば、論文執筆は諦めようと覚悟して

いたが、安堵したことを覚えている。余談になるが、欧州での交流・文化・料理・ワインは素晴らしく、筆者自身でスケジュールを調整し、欧州を自由に旅した日々に天国を見た。出張時にお世話になった方々には、この場を借りて御礼を申し上げる。帰国後の研究進捗は早く、日常業務の合間に論文用の追加実験を行い、データを積み上げた後、バルセロナの国際学会COMPLASで座長を務められていた電気通信大学 久保木孝 教授の研究室に入学し、論文を執筆し始めた。

4 内部割れ発生予測モデルの提案

筆者らは、種々の実験・マイクロ観察・数値解析から、引張応力とせん断応力の相乗効果により内部割れが発生する仮説を立てた。ひずみにより母材と介在物の界面が剥離することでボイドが生成し、続いて引張応力によりボイドが成長し、せん断応力によりボイド同士が合体する。材料の回転にともない、応力の方向が反転することで、介在物の配列や形状に関係なく、ボイドがより広範囲で発展し、巨視的な割れに至る。そこで、せん断応力の方向が繰り返し変動すると、応力三軸度が低い条件下でもボイドが発展するという現象論的考察に基づき、新しい延性破壊条件式を提案した。本稿では、式の詳細は割愛させていただくが、興味を持った読者は参考文献を読んでいただきたい。図2に3ロール式と2ロール式の熱間傾斜圧延における内部割れ発生初期のマクロ写真と、

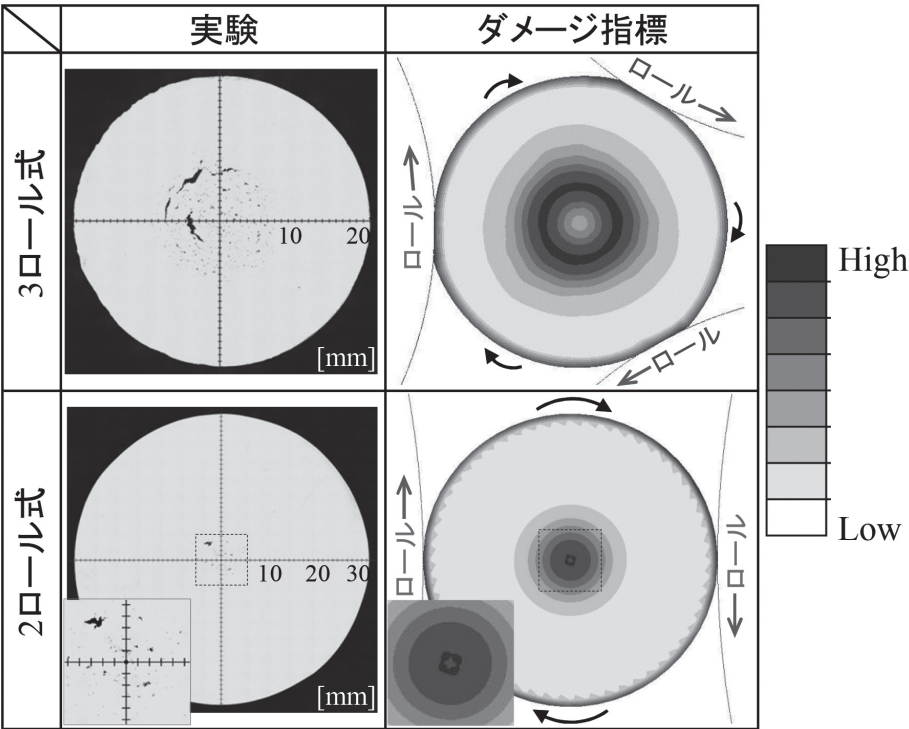


図2 内部割れ発生初期のマクロ写真とダメージ指標の分布⁷⁾

提案式から算出したダメージ指標の分布を示す。図2の左側図の数字は材料軸心部からの距離を表す。軸心部から数 mm 程度離れた位置で割れが発生するのは、軸心部の周辺が引張応力とせん断応力が重畳する応力場となるためである。軸心部にはせん断応力がほとんど作用せず、外面側は圧縮応力場であるため、双方のダメージ指標は低い。このような不均一な応力場で材料が回転する結果、ダメージ指標が高い領域は円環状となる。提案式は、ロール配置数や圧延条件に関係なく、内部割れの初期発生を一義的に予測可能であることを実証できた。しかし、提案式は円筒座標系で表現されており、適用先が回転塑性加工に限定される課題も残る。今後、あらゆる塑性加工法における延性破壊を予測可能なモデルへ発展させる所存であり、引き続きご指導ご鞭撻を賜りたい。

5 おわりに

学術論文のストーリー作りには、皆が右を見るときに、左も見るといった複眼的な思考を持つことが有効と考える。論文執筆活動を通じて、論理的思考力が向上すれば、続報の書き方も見えてくるであろう。また、日常業務に追われて論文を書く時間がとれない悩みもあると思う。時間不足に対する答えは、四六時中、常に考えておくことしかない。パソコンの電源を入れる前に論文のイメージを描いておけば、短時間で執筆できる。筆者は、趣味のロードバイクや釣りの最中に、良いアイデアが生まれることが多い。本格的な趣味は、脳を活性化させるのかもしれない。趣味云々はさておき、斜陽産業と囁かれる鉄鋼業にも、開発シーズは数多く埋まっており、掘り起こせば、企業研究者の博士号取得につながる。若手の皆様は、博士号取得に是非とも挑戦していただきたいという言葉を書き記す。

参考文献

- 1) K.Yamane, K.Shimoda and A.Yamane : International Conference on Computational Plasticity, XIV (2017), 114.
- 2) R.Siebel : Stahl Eisen., 47 (1927), 1685.
- 3) T.Z.Blazynski and C.Jubb : J. Inst. Met., 97 (1969), 363.
- 4) M.G.Cockcroft and D.J.Latham: J. Inst. Met., 96 (1968), 33.
- 5) M.Oyane : JSME, 15 (1972), 1507.
- 6) 山根康嗣, 下田一宗, 黒田浩一 : 塑性と加工, 60 (2019), 249.
- 7) 山根康嗣, 下田一宗, 黒田浩一, 梶川翔平, 久保木孝 : 塑性と加工, 62 (2021), 1.
- 8) K.Yamane, K.Shimoda, K.Kuroda, S.Kajikawa and T.Kuboki : J. Mater. Process. Technol., 291 (2021), 116989.
- 9) E.Erman : J. Appl. Metalwork., 4 (1987), 331.
- 10) 吉村英徳, 堀田博也, 上森武, 中哲夫, 三原豊 : 軽金属, 65 (2015), 190.
- 11) T.Wierzbicki, Y.Bao, Y.W.Lee and Y.Bai : Int. J. Mech. Sci., 47 (2005), 719.
- 12) Y.Lou, H.Huh, S.Lim and K.Pack : Int. J. Solids Struct., 49 (2012), 3605.
- 13) Z.Pater, J.Tomczak and T.Bulzak : Int. J. Mech. Sci., 167 (2020), 105274.
- 14) T.Komischke, P.Hora, G.Domani, M.Plamondon and R.Kaufmann : Procedia Manuf., 15 (2018), 176.
- 15) M.F.Novella, A.Ghiotti, S.Bruschi and P.F.Bariani : J. Mater. Process. Technol., 222 (2015), 259.

(2023年1月19日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

香川大学 創造工学部 造形・メディアデザイン領域 准教授

吉村 英徳

2次元解析でも、板材などのまずは応力、ひずみの各3成分の材料構成式を解く平面問題に比べ、丸管が軸対称の各4変数で解かなければいけないように、管材の変形解析は閉断面という拘束条件があって面倒である。また、板材などに比べて、管材は生産量も少なく、中でも高級鋼管である継目無し鋼管は油井管などの極めて特殊性な用途のため、参考文献はかなり少ないのが現状である。本「躍動」に対するコメントを引き受けた私も、卒研テーマで1998年ごろ継目無し管の初期工程であるマンネスマン穿孔圧延の近似3次元有限要素解析を行い、内部割れについての検討をしていた。しかし、再結晶を伴う熱間加工であること、実験では割れが発生しにくいクレイモデル材料でしかできなかったこと、そもそも指導教授から「博士課程の期間中には無理だから止めなさい」と言われたことから、いつかは内部割れを解明したいと思いながら長年が経ってしまったのが現状である。ましてや企業での研究の事情もありながら、山根康嗣氏は同じような疑問を持ち、回転加工系の内部割れ予測の研究に取り組み、このような成果を出されたことに敬意を表したい。

塑性加工における延性材料の破壊ではボイドの発生から成長、破断という過程を経るが、山根氏が述べている

ように、穿孔圧延の内部割れについて、内面傷がそもそも発生しないようボイド発生の予測が試みられていても、その割れの形状の理由を示すものはほぼ見当たらない。すなわち、例えば2ロール傾斜圧延で、どの予測手法でも中央に割れが発生する報告がなされ、損傷発展式では成長についても多少報告されているものの、十字形状に割れる要因には触れられていない。山根氏は、割れ発生の要因としてせん断変形に注目して詳細に検討を重ねており、もちろん本成果は傾斜圧延分野に特化したものではなく、材料の延性破壊条件の分野に一石を投じる成果である。私自身も主せん断ひずみエネルギーによるくびれ発生限界予測式を提案しているが、先人に続くミクロ的、マクロ的、マルチスケールのそれぞれのアプローチで調査された結果は、最終的には同じ法則として統合されると信じている。その意味でも、山根氏の破壊予測へのアプローチは有意義な成果の一つと言える。

山根氏は、「円筒座標系の回転加工系に特化されており、あらゆる加工に適用できるように」と締めくくっておられる。熱間加工中での組織変化や複雑なひずみ経路を辿る加工の取り扱いなどまだまだ課題は多くあるが、更なる破壊予測分野の発展が楽しみである。

日鉄ステンレス(株) 技術部生産技術室 上席主幹

吉澤 明展

山根さんとお付き合いは、日本製鉄グループの委託研究をきっかけに2015年に始まりました。山根さんは旧住友金属工業の鋼管研究者であり、2012年の旧新日鐵との統合で研究を委託できる間柄になりました。山根さんと出会えた事は幸いでしたが、もっと早くお会いできなかったことは悔やまれます。

日鉄ステンレス棒線工場には遊星傾斜ロール圧延機が設置されています。この圧延機は設備構造、圧延現象ともに複雑であることから、設置後20年以上が経っていた当時まで、種々の現象の理解や検討は設置当時の技術検討を基にした定性的なものに留まっていました。この圧延機が棒線圧延で使われる事例は少なく、棒線の分野で議論されることは皆無でしたが、鋼管の分野では着実に技術進歩していた事を山根さんから知ることになりました。

現場実験を補完する数値計算は実用化されていますし、予備実験としての数値実験も当然の手順となりました。弊社が遊星傾斜ロール圧延機を前に手をこまねいているうちに、なんとこの複雑圧延についても、一般的に入手できるPCにて常識的な計算時間で数値実験が可能になったのです。山根さんへの委託により数

値計算で実機現象の理解が出来たり、条件を変更した場合に鋼材と圧延機に起きる変化が予測できるようになり、目の前の霧が晴れたような感覚を覚えました。

計算機実験を中心にした研究、議論が中心でしたが、私が強い印象を受けたのは、日本製鉄の研究所で圧延試験を行った時の事です。試験機は全自動ではないため、事前に決めた圧延条件を実現するためには実験実行者の繊細な気配りが必要ですが、山根さんは温度や時間が寸分違わず実現出来るように骨を惜みずに先陣を切って動いていました。サンプル数は限られており、1点1点のデータ精度が実験全体の成否を左右するので、精度を高める苦労が重要なのだと気付かされました。実機生産ラインは全自動の為、人の努力が精度を左右する要素はなく、それが染み付いた筆者には新鮮に感じられました。数値計算の普及により一見汗をかかずに実験や議論が出来る現代でも真実を見出す為にはこの姿勢が大切なのだと感心しました。

工場にも何度か足を運んで頂きましたが、山口の魚と酒についての山根さんの評価は高く、振る舞い甲斐がありました。再び新しい技術課題と一緒に取り組み、おいしい酒を酌み交わす日が来るのを楽しみにしております。