



## 私の論文

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

# 靱性研究の高度化に向けた破壊起点の自動観察手法の開発\*

Development of Automated Observation Method of Fracture Initiation Point for Advanced Toughness Research

滑川哲也

Tetsuya Namegawa

日本製鉄(株)  
技術開発本部  
主任研究員

### 1 はじめに

この度、「私の論文」として2023年俵論文賞を受賞させていただいた論文「リバーパターンとテアリッジに基づく脆性破壊起点の自動探索手法の開発<sup>1)</sup>」について論文では記述されなかった著者のエピソードや研究のきっかけを述べる機会をいただいた。この場をお借りして共著者ならびに関係各位に深く御礼申し上げます。稚拙な文章で大変恐縮ではあるが、本稿では本論文の概要、研究を振り返って、今後の展開、の順に述べさせていただきます。

### 2 論文の概要

近年では厚板に限らず、薄板などでも顕著なハイテン化が進み、へき開破壊を抑制する研究の重要性が高まっている。へき開破壊の発生のしやすさは破壊起点となる結晶粒のサイズや脆化相のサイズ及び種類等に強く依存するため<sup>2-4)</sup>、SEMによる破壊起点の調査が必要である。従来の破壊起点調査では、観察者が手動で破壊経路の痕跡であるリバーパターン(河川状模様)を破面の低倍観察から辿っていき、高倍で破壊起点を特定する。代表的な靱性評価手法であるシャルピー試験の破壊起点調査の対象となる本数は、吸収エネルギーを得たフルカーブのうち脆性破壊したサンプルに限ったとしても、試験温度と試験本数を考えれば鋼種あたり10本程度となり、観察時間にすると2時間は超えてしまう。そのた

め、時間削減のために遷移温度付近で低値が出たサンプルのみ観察することもあるが、統計的な評価によって靱性支配因子を正しく評価することは困難である。この課題に加え、熟練度による結果のばらつきも課題であった。該当論文は、破壊起点調査の効率化と標準化、及び統計的評価の実現による靱性の本質的な研究を可能とすることを目的に、起点の自動探索手法を提案したものである。

へき開破面では起点を中心にしてリバーパターンが放射状に広がり、これを解析することで破壊起点を特定できる。まず、直線を検知する手法であるHough変換を用いて破壊起点の探索が可能か検討した。破面単位が単一または少数である高倍写真はリバーパターンが一点から放射状に広がる単純なものが多く、そのパターンをHough変換することで亀裂伝播の開始地点を特定できる。しかしながら、低倍写真には複数の破面単位が含まれるため、それらパターンが次々とツリー状につながることで曲線的なパターンとなってしまう、破壊起点を精度よく決定できなかった<sup>5)</sup>。

次に、リバーパターンの由来から類推されるように、河川を本流と支流からなるネットワーク状のシステムとみなした氾濫解析がある<sup>6)</sup>。テアリッジ・リバーパターンからなるネットワークを構築して流量が最大となる地点を破壊起点として決定したいが、テアリッジ・リバーパターンは基本的に不連続であり、流れの方向も不定であるため、本手法を用いた起点の特定は困難であった。

まず、Hough変換を適用できない問題を解決するため、リ

\* [今回の対象論文]

滑川哲也, 星野 学, 藤岡政昭, 白幡浩幸: 「リバーパターンとテアリッジに基づく脆性破壊起点の自動探索手法の開発」, 鉄と鋼, Vol.107 (2021), No.11, pp.934-943 (2023年俵論文賞表彰)

バーパターンが直線群とみなせる破面単位に分割して、破面単位毎にHough変換をして各々の破壊起点を決定し、そこから全体の破壊起点を決定する手法を考案した。破面単位毎のHough変換は概ねうまくいったのだが、一部の破面単位における破壊起点の誤解析によって全体の破壊起点の特定精度が顕著に低下してしまうことがわかった。その原因は各々の破壊起点がどの破面単位につながるのかを明確に紐づけていたため、一部の誤解析が紐づく下流すべてに影響してしまったからである。

この結果を受け、紐づけが不要であってテアリッジ・リバーパターンは不連続で流れの方向が不定であっても破壊起点を解析できる手法として、テアリッジ・リバーパターンを境界壁とみなした流水計算を考案した。概要は上下方向と左右方向の流水計算をして流量が最大となる地点を算出するというものであり、流れはテアリッジ・リバーパターンを通り抜けて沿っていくという制約で拡散計算を平衡状態となるまで行った。計算の結果、流れは破壊起点に概ね収束していくのだが、テアリッジ・リバーパターンの隙間から流れが漏れ出てしまい、完全には破壊起点に収束しないものとなった。

これらの結果から、破壊起点の探索手法は破面単位同士の局所的な紐づけもせず、流れの慣性も維持する手法であるべきことが明瞭となった。それを実現する手法として、リバーパターン近くに電磁場のように離れた位置にも作用するポテンシャルを考えることで、曲線的で不連続かつ伝播方向不明であるリバーパターン情報を有効活用して、起点にたどり着く経路を解析する手法を考案できた。

具体的には、撮影したSEM像 (Fig.1 (a)) から周囲よりも明るい、または暗い領域をテアリッジ・リバーパターンとして抽出し、テアリッジ・リバーパターンを直線近似した (Fig.1 (b))。ここで、テアリッジ・リバーパターンの前方及び後方においても直線方向に沿う力が働くポテンシャル場となるよう、直線の長さを倍にして取り扱った。この扱いによって実際にテアリッジ・リバーパターンが存在する周囲においてもそれらに沿う経路を解析できる。線分の方角については、第一象限から第三象限にわたるものを白色で表示し、第二象限から第四象限にわたるものを黒色で表示した。白色と黒色のポテンシャルが局所的に隣接していると、局所的なキャンセルアウトによって大局的には破壊起点に向かって収束しようとする経路を再現できないことがあるため、GaussianFilterを適用してポテンシャル場を平滑化した (Fig.1 (c))。ノッチを上端に設けた場合、亀裂は局所的には破壊起点から放射状に伝播していくが、マクロ的には上から下に向かって伝播していく。この効果を取り入れるため、Fig.1 (d) に示すノッチ方向に遡るための上方向のポテンシャルも算出した。

テアリッジ・リバーパターンは伝播方向不明であるが、破

壊起点は湧き出し点とみなせることから、画像の4辺のいずれからみても破壊起点に向かってテアリッジ・リバーパターンは収束していくことになる。そこで、画像の4辺からポテンシャル場に従う経路を導出し (Fig.1 (f), (g))、4方向の流路を重ね合わせて経路が最も集中した点を起点として特定した (Fig.1 (e))。なお、経路の計算は画像のピクセルに対応したセルラーオートマトンの方法による (Fig.2)。例えば、下辺から上辺に向かう緑色の経路では、Fig.2中においてin1,6は上段に進む際、いずれもポテンシャルに当たらないためout1,3まで直進する。一方、in2~5は上段に進む際、白色のポテンシャルに沿う経路を辿ってout2の一つに収束する。破壊起点の特定手法は以上である。脆性破壊はフラクタル構造を有するため<sup>7)</sup>、低倍から高倍まで上記解析を繰り返し行う

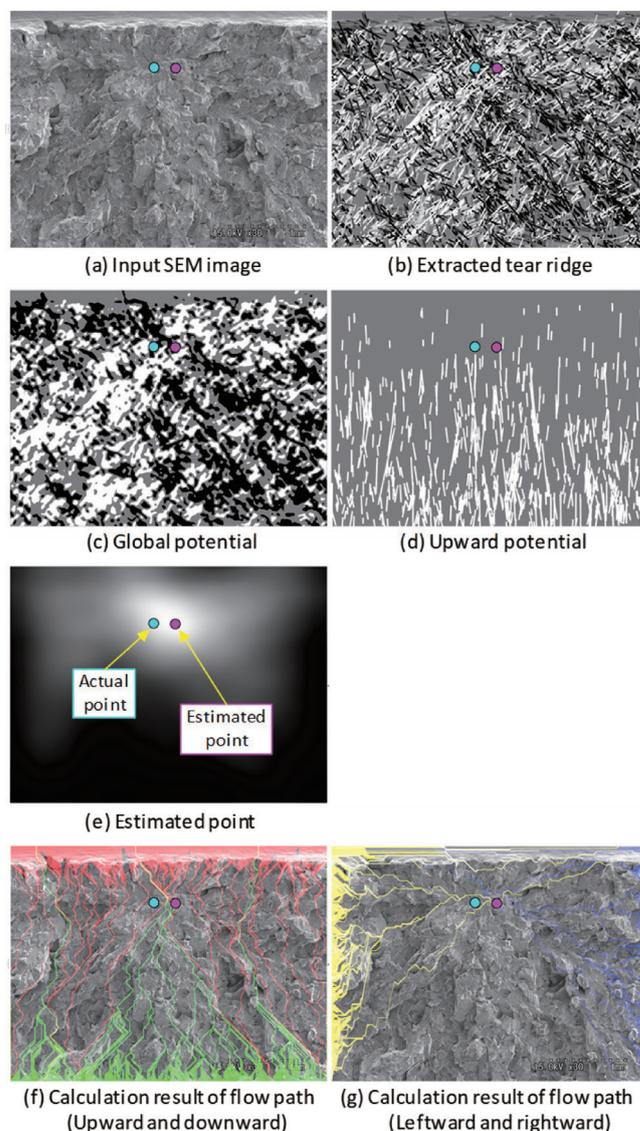


Fig.1 Abstract of determination method of fracture initiation point and calculation example. (Online version in color.) [Graphical Abstract]

ことで破壊起点を追い込んでいった。

厚板のシャルピー試験片206個の脆性破面を解析した結果、202個(98%)は短時間で起点特定まで絞り込み可能な解析精度を実現し、さらに171個(83%)は起点を有する結晶粒を特定する精度を実現した。解析時間は鋼種あたり10本として2分であり、自動測定には十分である。これにより、目的とした破壊起点調査の効率化と標準化、及び統計的評価による靱性の本質的な研究が実現可能となった。

### 3 研究を振り返って

本研究につながった著者の経歴を述べさせていただく。筆者は2013年に東京大学にて栗飯原周二先生のもと修士の学位を取得した。鉄鋼分野に足を踏み入れたのは、研究室選びの際に聴いた栗飯原先生の天然ガスパイプラインのバースト試験についての研究紹介に興味をもったからだ記憶している。試験はノルウェーの野外で行われており、大きな炎を上げた爆発実験であり大変印象に残っている。きっかけはスケールの大きさやインパクトであったが、それと同時にパイプラインの亀裂伝播挙動を数値解析によって再現したり、その計算には破壊力学という学問が基礎にあったりすることを理解すると、興味は少しずつ増していったように思う。破壊力学は材料が破壊するかどうかを議論する学問であるが、亀裂の存在によって応力集中、すなわち応力分布が生じたり、

結晶粒径や脆化相等のマイクロ組織に起因する局所的な靱性分布があったりと、力学と材料学の双方にまたがる面白さがあった。応力分布やマイクロ組織のばらつきに起因して破壊靱性値はばらつくため、数多くの実験が必要となる。

製鉄企業としては製品の靱性を保証する必要と同時に、低コストでの製造も望まれるのであるが、本質的にばらつきを有する靱性をいかに理解して評価するかが課題である。そのようなニーズから、筆者は入社して靱性予測モデルの開発に従事した。このモデルによってマイクロ組織分布から靱性ばらつきを評価することができる。元々、靱性予測モデルは研究室時代に柴沼一樹先生がフェライト鋼を対象にして開発されていた<sup>8,9)</sup>のを横目でみていたが、これを高強度鋼として実用的なマルテンサイト鋼に応用しようとした<sup>10)</sup>のである。モデル化にあたってはマイクロ組織に応じた破壊の素過程を理解するため、脆性破壊が生じた破壊起点を破面観察によって探索する。社の行動指針には原理原則、現場現物を大事にする、というものがあり、靱性のばらつきの理解や破壊の原因を理解する上でも破面観察は重要であり、靱性の研究にとって欠かせないものとして実施してきた。マルテンサイト鋼はマイクロ組織の微細さやブロックやパケットの構造に起因する形態の複雑さがあるか、破壊起点がみつからないことも多分にあり、提唱する破壊素過程が普遍的なものであるためにも多くの観察例が求められる。さらに、一つの破壊には対となる二つの破面が形成されるが、特定した破壊起点が反対の破面でも同じ位置であるかや、脆化相が破壊起点である際にそれが割れたのか剥離したのか判断するためにも両方の破面をみることから、正確な評価のためには観察数は増えざるを得ない。

本研究の基盤となったプログラミングとの出会いについて触れる。筆者は卒論で落重試験における亀裂伝播のFEM解析<sup>11)</sup>を行っていた。FEMでの亀裂伝播解析は、最初はすべて拘束していた節点を、実験で測定した亀裂伝播速度を再現するように順次解放していく節点解放法といったアプローチである。そのとき、プログラミングによって解放する節点のリストを自動で作成すればよいと柴沼先生から助言をいただいたのであるが、卒論提出まで時間がないことやプログラミングは難しいと思ったのであろうか、筆者は結局FEMのユーザーインターフェース画面上にて逐一手動で節点を選択したのである。短期的な視点では合理的な選択だったのかもしれないが、とにかく大変であったし、手動ということは選択する節点を間違えるリスクもあったわけである。修士に入ってから長大亀裂のアレスト評価<sup>12,13)</sup>がテーマとなり、亀裂伝播プログラミングそのものを使うことになった。いよいよプログラミングからは逃げられなくなり勉強をしていったのだが、習得の過程においてプログラミングのできることの幅広さ、自由さを体感していった。発想力を基にして問題を解

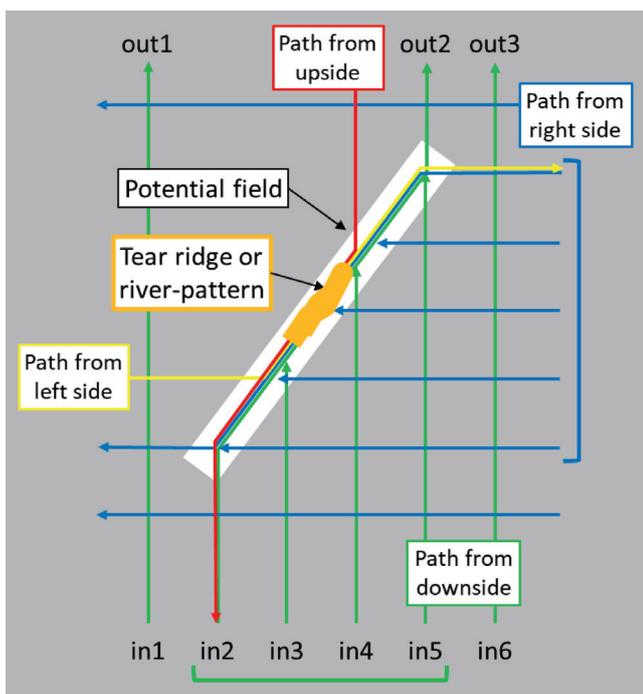


Fig.2 Calculation method of flow path derived from potential field formed by tear ridge and river-pattern.(Online version in color.)

くことが好きだったので高校までは夢中で数学に取り組んでいたが、大学になって数学は理論探求や高度な抽象化が増し、興味は薄れつつあった。自分で解ける問題が減っていると感じていたわけであるが、プログラミングを使えば、解析的に解けなくても、手計算で解けなくても、数値的に解ければよいわけで、そう認識すると身の回りには多くの解ける問題があることがわかった。さらに、プログラミングでは計算を効率的に行うために、結果には影響を及ぼさないように注意はした上で大胆な仮定を置く等の工夫の余地があり面白いものであった。自由に設計できるとはいえ、計算がきちんと動くために十分なプログラミング内容となっているかや、実現象を正しく再現できているかといった点の重要さも理解していった。

本研究を実行しようと決意した背景には、脆性破壊の理解、自分自身の課題設定、時流に乗った課題、の3点がある。まず、脆性破壊についての理解が深まってきたことについて述べる。学生時代には大型アレスト試験の破面のようなmオーダーの亀裂伝播や栗飯原先生の亀裂伝播モデルをみてきたことから、シェブロンパターンが表面近傍に形成される<sup>14)</sup>ことを学んだ。入社後は靱性予測モデルの研究や東京大学の川畑先生が主査となった産発プロジェクト「鋼の脆性き裂伝播挙動機構理解深化とLNG貯槽次世代材料設計指針提案」<sup>15)</sup>への委員参加等を通じて、 $\mu\text{m}$ オーダーの現象として結晶粒レベルでの亀裂伝播時にテアリッジが形成されることへの理解を深めた。脆性破壊の破面はフラクタル構造をもつことを身をもって理解したため、破面観察による破壊起点同定で必要となる低倍から高倍までの追い込み過程に対し、この特徴を活かして基本のロジックは同じもので解析してよいことに思い至っている。自身の研究においても多くの破面を観察してきたことで、脆性破面の特徴や破壊起点の同定手法について見識を深めた。破壊起点の同定結果を説明する際、心でみえたと冗談まがいと言われるほどに、破壊起点の同定プロセスは複雑なように思うが、それは処理すべき情報や階層が多いためであって、確かなプロセスがあるからこそ明文化できずとも人間の頭は見た目で破壊起点を決定できる。この考えに基づき、頭の中のプロセスをプログラミングに起こそうと試みた。加えて、客観的に破壊起点を決定できるようになることも大きなメリットと考えた。

次に、解くべき問題を自分で設定できたことについて述べる。これまでの課題は先生や上司が考えて設定されたものであったが、本研究ははじめて自分でやると決めたものであった。ニーズの観点では破面観察の苦勞と靱性研究におけるその重要性を理解したからこそ、やるべき課題として自信をもって社にPRすることができた。自分が取り組むべきかという観点では、入社後もプログラミングに携わりその技術レ

ベルが一定のものに達したとの実感があったことに加え、上述したように破面の特徴を研究者として十分に理解していたため、両者の掛け合わせに専門性を見出せると考えた。

最後に、時流に乗った課題であったことについて述べる。自動化、効率化が次々と進む中、鉄鋼材料研究にも高度なインフォマティクスが適用されてきている。代表的なところではマイクロ組織の自動判別があり、フェライトやマルテンサイトといった2相組織を分類してくれる<sup>16)</sup>。材料研究においてマイクロ組織の画像データは材料の結晶粒径や形状等を表す基本的でありながら最重要の情報である。そのため、多くのマイクロ組織は自動解析の対象となり、精力的に研究がなされている。しかしながら、マイクロ組織と同様に有用な情報が埋まっていると期待される破面の画像データに関する自動解析の例は少なく、筆者らが名古屋大学の足立吉隆先生との共同研究で行った機械学習による破壊起点解析<sup>17)</sup>がある程度であった。この研究では既往の機械学習モデルのように分割された領域を対象として局所的に破壊起点である可能性が高いかどうかを判別され、一定の成果を得ている。一方で、上述したような亀裂伝播の機構から考えると、破壊起点は大局的な亀裂伝播の痕跡からたどり着くものであり、決して局所的には判断しえないものと思われる。このように、全体的な特徴から一点を決定するという課題に面白さを感じたとともに、足立先生との共研を通じて画像解析の可能性を身近に感じ取り、さらには自身の破面に対する知見を総動員できるのではないかと考えたわけである。

## 4 今後の展開

冒頭に述べたように、へき開破壊の発生のしやすさは起点の状態に強く依存する。例えば、代表的な破壊起点であるTiNでは、TiNサイズが $1\mu\text{m}$ であればへき開破壊は発生しない場合でも、TiNが $5\mu\text{m}$ になると破壊が発生するなど、わずかな起点の差がへき開破壊の発生条件を左右する。さらに、TiNサイズが $1\mu\text{m}$ であっても起点部の粒径が十分に大きければへき開破壊が発生してしまう。このように、へき開破壊の発生は本質的に確率的な要素を含むので、全ての破面の起点調査とそれによる靱性の統計的評価の研究が重要となる。

本論文で構築した破壊起点の自動探索手法を用いることで、脆性破壊したサンプルすべての破壊起点の調査が可能となる。その結果、起点部の脆化相の種類(TiN、酸化物、セメントイト等)とそのサイズ、さらに起点部の粒径といった各種データが積み上がる。それらを統計的に解析することによって、試験片レベルでの靱性値のばらつきではなく、純粋に成分や素地の靱性を代表する指標となる表面エネルギーが鋼種毎に評価されていくと考えられる。具体的には、同定し

た破壊起点の位置と別途実施するFEM計算の結果からへき開破壊応力を算出し、さらに、へき開破壊応力は主に表面エネルギーと破壊起点の観察結果から求められる脆化相のサイズと起点部の粒径に依存するため、表面エネルギーを算出できる<sup>18)</sup>。この算出を全脆性破壊の結果に対して回帰することで尤もらしい表面エネルギーが得られる。この表面エネルギーと靱性予測モデルを組み合わせることで、靱性予測の精度向上も期待され、破面調査という事後解析のみによらず、予測という事前解析が可能となる。本破壊起点の自動探索手法が靱性研究のさらなる前進及び深化への一助となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 滑川哲也, 星野学, 藤岡政昭, 白幡浩幸: 鉄と鋼, 107 (2021), 934.
- 2) N.J.Petch: Acta Metall., 34 (1986), 1387.
- 3) T.Lin, A.G.Evans and R.O.Ritchie: Metall. Trans. A, 18 (1987), 641.
- 4) R.O.Ritchie, J.F.Knott and J.R.Rice: J. Mech. Phys. Solids, 21 (1973), 395.
- 5) 村松美穂, 足立吉隆, Zhi-Lei Wang, 小川登志男, 石川恭平, 藤岡政昭: 材料とプロセス, 33 (2020), 320, CD-ROM.
- 6) 星畑國松: 水利科学, 57 (2013), 95.
- 7) 松岡三郎: 材料と環境, 40 (1991), 498.
- 8) K.Shibanuma, S.Aihara and K.Suzuki: Eng. Fract. Mech., 151 (2016), 161.
- 9) K.Shibanuma, S.Aihara and K.Suzuki: Eng. Fract. Mech., 151 (2016), 181.
- 10) T.Namegawa, M.Hoshino, M.Fujioka and M.Minagawa: ISIJ Int., 59 (2019), 1337.
- 11) T.Namegawa, S.Aihara, K.Shibanuma and S.Igi: J. Mech. Eng., Proc. ATEM'11, OS14F093.
- 12) K.Shibanuma, F.Yanagimoto, T.Namegawa, K.Suzuki and S.Aihara: Eng. Fract. Mech., 162 (2016), 324.
- 13) K.Shibanuma, F.Yanagimoto, T.Namegawa, K.Suzuki and S.Aihara: Eng. Fract. Mech., 162 (2016), 341.
- 14) S.Aihara, T.Namegawa, F.Yanagimoto and T.Kawabata: Q. J. Jpn. Weld. Soc., 38 (2020), 134.
- 15) 川畑友弥, 高嶋康人, 柴沼一樹, 大畑充: ふえらむ, 24 (2019), 720.
- 16) 足立吉隆, Zhi-Lei Wang, 小川登志男: ふえらむ, 25 (2020), 569.
- 17) M.Muramatsu, Z.Wang, T.Ogawa, Y.Adachi, T.Namegawa, K.Ishikawa, H.Shirahata and M.Fujioka: ISIJ Int., 62 (2022), 1952.
- 18) J.I.San Martin and J.M.Rodriguez-Ibabe: Scr. Mater., 40 (1999), 459.

(2023年3月1日受付)