



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

微視機構に基づく鉄鋼材料の 靱性予測モデル開発の試み

Challenge to Establish a Fracture Toughness
Prediction Model based on Micromechanics

柴沼一樹

Kazuki Shibamura

東京大学 大学院工学系研究科
システム創成学専攻
講師

1 はじめに

今回、「私の論文」として第77回俵論文賞を受賞させていただいた論文「フェライト鋼劈開破壊靱性予測モデルの構築¹⁾」に関して論文では記述されなかった著者のエピソードや思いを述べる機会をいただきました。本誌面を拝借して改めて論文賞選考委員の方々に深甚なる謝意を表します。

本論文は、続報である「劈開破壊靱性予測モデルによる破壊靱性試験の再現解析²⁾」との2連報として鉄と鋼Vol.99, No.1 (2013) に掲載にされたものである。両者を合わせると2段書きで20頁にも及び、必ずしも良いことではないが、鉄と鋼やISIJ Internationalあるいは他の材料工学分野の論文集に掲載されている論文と比較するとかなりボリュームのある論文となっている。稚拙な文章で大変恐縮ではあるが、本稿では「微視機構に基づく鉄鋼材料の靱性予測モデル開発の試み」と題し、該当論文の概要、研究を振り返って、その後の展開、の順に述べさせていただきたいと思う。

2 論文の概要

鋼の劈開破壊は、降伏や加工硬化現象とは異なり最弱支配型の現象であることが知られ、本質的にばらつきを伴う。従来、フェライト鋼の靱性は結晶粒の微細化により向上するだけでなく、セメンタイトなどの脆い第2相の寸法によっても靱性が変化することは鉄鋼材料開発の基礎として広く知られ

ている^{3,4)}。しかしながら、その理由は明確ではなく、微視組織と劈開破壊靱性の関係を解明すると共に、靱性をそのばらつきを含めて定量的に精度よく推定することは実用上重要な課題である。該当論文は、最も単純な微視組織を有する鋼のひとつであるフェライト・セメンタイト鋼を対象として、そのマイクロ組織情報のみを用いて靱性を定量的に予測するためのモデルを提案したものである。

該当論文で提案するモデルでは、既往の知見⁵⁾を踏まえて、フェライト・セメンタイト鋼の劈開破壊発生のマイクロプロセスをFig.1に示すように、(I) セメンタイト割れによるき裂の核生成、(II) セメンタイト割れのフェライト・マトリック

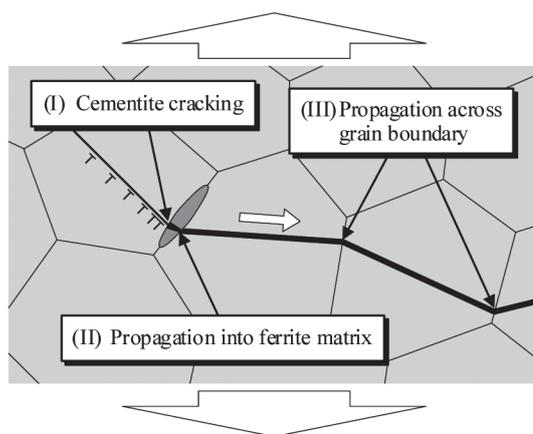


Fig.1 Cleavage fracture initiation process of ferrite-cementite steel^{1,2)}

* [今回の対象論文]

柴沼一樹、栗飯原周二、松原基行、白幡浩幸、半田恒久：「フェライト鋼へき開破壊靱性予測モデルの構築」鉄と鋼 Vol.99 (2013), No.1, pp.40~pp.49 (第77回俵論文賞)

スへの伝播による劈開の形成、(III) 劈開き裂のフェライト結晶粒界突破、という3段階で仮定した。(I) の破壊条件に関しては実験に基づく定式化を行った。具体的には、セメントタイト割れに与える影響因子を実験的に定量化するために、粒径やセメントタイト寸法を系統的に変化させた7種類の供試鋼を製作し、切欠付き試験片を加工および途中除荷引張試験を実施した。さらに、作用ひずみ・応力に対するセメントタイト粒の割れ個数の計測することで、任意の鋼に対して統一的に適用可能なセメントタイト割れ率の定式化を行った。次に、(II) の破壊条件として、Petchの提案した破壊応力を仮定した⁶⁾。これはセメントタイト割れがフェライト粒に伝播する際の堆積転位とき裂によるエネルギー解放率を破面形成エネルギーと比較することで定式化されたものである。最後に、(III) の破壊条件として、有効表面エネルギーに関する温度依存性⁷⁾を考慮した上で、円形き裂に対するGriffithの条件を仮定した。

上記の劈開破壊発生のマイクロプロセスを用いて実際の材料の劈開破壊を定量的に予測するためには、対象とする微視組織因子および局所作用応力・ひずみの情報が必要である。そこで、まずFig.2に示すように破壊発生起点となりうる領域をアクティブゾーンとして定義し、それを有限個の体積要素に離散化した。各体積要素には球を仮定したフェライト結晶粒および扁球を仮定したセメントタイト粒を、それぞれの寸法分布に従ってモンテカルロ法により充填し、また作用する応力テンソル・相当塑性ひずみの推移は有限要素解析によって与えた。各体積要素で定義された微視組織分布と応力・ひずみの推移を用いて3段階の劈開破壊の発生プロセスを段階的に評価し、それらの破壊条件が連続的に満足された場合に巨視的な脆性破壊が生じるとした。

Fig.3に示すような切欠付3点曲げ試験片を用いた破壊靱性試験に本モデル適用した結果、Fig.4に示すように様々な結晶粒径やセメントタイト寸法の鋼種に対する破壊靱性値の温度依存性を定量的に推定可能であることが示された。

3 研究を振り返って

ここでは著者の簡単な経歴とともに、本研究へとつながった経緯を述べさせていただきたいと思う。

著者は2002年に京都大学に入学して土木工学を専攻し、宇都宮智昭先生(現・九州大学教授)のもと2010年に博士の学位を取得した。土木工学分野では、当然のことだが単純に寸法という意味で対象とする問題のスケールが大きいの。このため、「現象をいかに俯瞰的な視点で単純化するか」といったことが重要視される。可能な限りの「単純化」は科学全般においてごく自然な考え方であるが、土木工学分野では「俯瞰的な視点」への意識の高さが顕著であるように思う。

学位取得後は、現在の所属である東京大学大学院システム創成学専攻にて、栗飯原周二先生のもとで助教として採用していただいた。この時期にはそれまでの土木工学分野を一時的に離れ、鉄鋼材料の破壊の微視的機構に関する研究に取り組むこととなった。学生時代に取り組んでいた研究の多くは、有限要素法の理論に関する研究⁸⁾など、そのほとんどが演繹的(数学的)なものであったため、著者ははじめて取り組んだ帰納的(物理的)な研究の手法や考え方とのギャップに少なからず戸惑いがあり、実際、半年ほどは論文の執筆も滞ってしまった。しかし、栗飯原先生の親身なご指導や、中

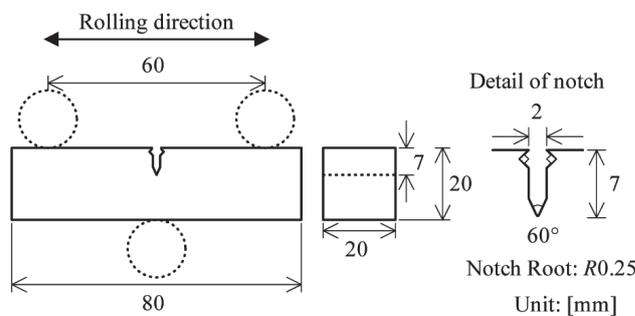


Fig.3 Notched three-point bend specimen^{1,2)}

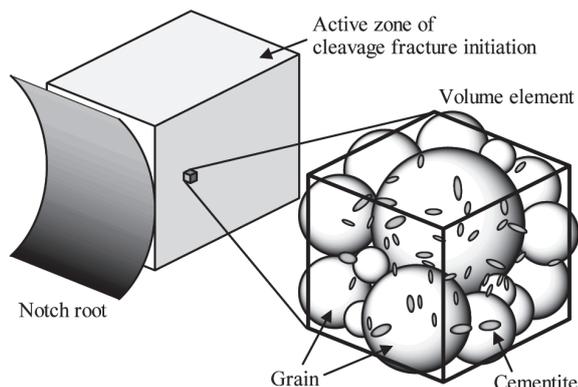


Fig.2 Active zone and volume element^{1,2)}

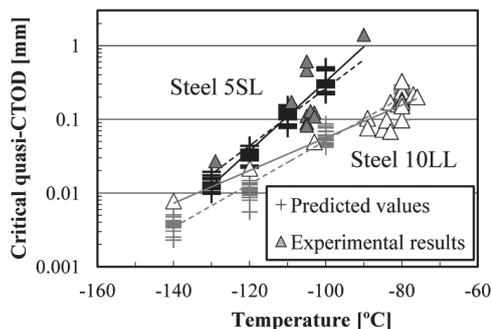


Fig.4 Comparison between experimental and prediction results of fracture toughness tests^{1,2)}

居寛明氏 (現・IHI) や川田樹氏をはじめとした研究室メンバーとの高密度なディスカッションの日々のおかげで、観察や計測を通じて現象を理解し、得られた知見や仮説を基にモデルを組み上げるといった、おそらく材料工学分野のセオリーといえるような研究の一連の手順と共に、「物理モデルとは何たるか」という本質的な理解の基礎ができた。該当論文で対象とした「微視機構に基づく鉄鋼材料の靱性予測モデル開発」に関する研究に取り組みを始めたのはこのような時期であった。その後、2013年に講師となり、研究室を持つ立場となった現在、この助教時代の経験は教育者・研究者としての基礎を築くにあたり非常に大きかった。

研究を実施していた当時はそこまで意識的ではなかったが、該当論文と従来の材料工学分野における他の研究との最も大きな違いは、現象に対して俯瞰的な視点を有していることにあると思う。それを実現するためのアプローチが「モデルの統合化」である。

上記にも述べたように、従来、材料工学分野の研究では一般に、計測や観察から現象を突き詰め、その支配因子を特定し、モデル化するという手順で研究を進めることが多いように思う。当然、著者が対象とした破壊の微視的機構もこの例にもれず、多くの実験・計測の報告やモデル化の提案が存在する。例えば、先にも挙げた著名なPetchのモデル⁶⁾は、フェライト鋼の劈開破壊の発生における硬質な第二相の影響を転位論に基づき合理的に定式化したものである。しかしながら、このような従来研究による「微視的機構のモデル化」と、破壊力学パラメータやシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーなどで一般的に記述される「材料の靱性」は必ずしも1対1で直接的に関連づけることは容易ではない。例えば、材料の限界CTODを上記のPetchのモデルのみで定量的に推定することは困難である。この原因は、両者に2~3桁以上のスケール・ギャップが存在し、またモデルが記述する現象が巨視的な一連の材料挙動の一部のみに限定されているためであると考えられる。

このような両者の乖離を埋める手段として有効と考えたのが、先に述べたマルチスケールの「モデル統合化」である。本研究では、フェライト・セメンタイト鋼の劈開破壊に関する $10^7 \sim 10^4 \text{m}$ スケールの3段階の微視的な機構を記述する複数のモデル (定式化) と $10^3 \sim 10^1 \text{m}$ スケールの巨視的な有限要素解析を、アクティブゾーンや体積要素を用いた微視組織の空間分布のモデル化によって連成・統合することを試みたものである。このような従来の材料工学分野ではあまり見られなかった、ひとつの現象に対する俯瞰的な視点による新たなモデル化の取り組みが、従来不可能であった「微視組織」情報に基づく「破壊靱性値」の定量的な予測理論の確立へ向けた足がかりとなりうるのではないかと期待している。

4 その後の展開

該当論文で対象とした「フェライト・セメンタイト鋼の微視機構に基づく靱性予測モデル開発」に関する研究は、論文の掲載後にモデルを構成する要素技術の修正⁹⁾を行うことでモデルの全体の高精度化を実現した^{10,11)}。また、該当論文ではフェライト・セメンタイト鋼に適用が限定されていたものを、一部の要素技術 (定式化) を置き換えることで、より実用的なフェライト・パーライト鋼^{12,13)} やベイナイト鋼^{14,15)} への適用性拡大も試みている。これらの例のように、モデルを構成する一部の要素技術としてのモデルの修正や置換を容易に実行可能であることも「モデル統合化」によるモデル開発の特徴である。

さらに、最近では、劈開破壊の発生以外の現象に対しても、モデル統合化に基づく性能予測モデルの開発の試みをはじめたところである。例えばFig.5は微視的組織因子と脆性亀裂停止性能 (アレスト靱性) の関係解明に向けたモデル統合化の一例である^{16,17)}。脆性亀裂伝播は極めて非線形性が高く、ときに1,000m/s以上の速度で高速に亀裂が伝播する計測も困難な現象である^{18,19)}。本研究ではAihara and Tanakaによって提案された結晶粒スケールの劈開亀裂伝播モデル²⁰⁾を脆性亀裂伝播・停止現象に関する微視的機構の素過程モデルとして採用し、有限要素解析を援用した巨視的な亀裂伝播モデルに統合化した枠組みを提案している。一方、Fig.6は疲労損傷における構造物の寿命予測に向けたモデル統合化の一例である²¹⁾。本研究では、Tanaka et al.によって提案された亀裂と結晶粒界の相互作用理論²²⁾を素過程モデルとして採用し、疲労損傷が材料表面より生じることを利用して、3次元の複雑な亀裂成長挙動を表面部と内部に区別した2段階の2次元問題として記述し、それに適合するような微視的組織の空間分布モデルを構築した。本研究は、これらの (1) 亀裂と結晶粒界の相互作用理論、(2) 微視組織の空間分布モデル、およ

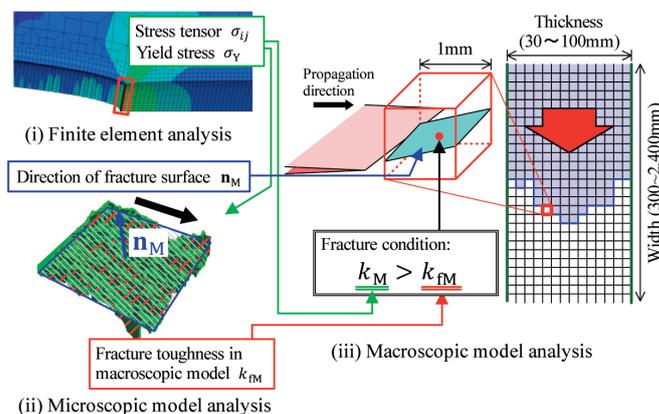


Fig.5 Modeling for brittle crack propagation and arrest behavior^{16,17)}

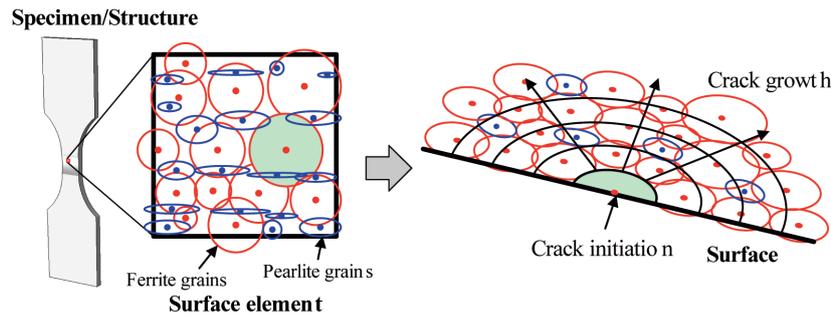


Fig.6 Modeling for small fatigue crack propagation²¹⁾

び、(3) 有限要素解析、を統合化することで、微視組織因子と構造物の疲労強度の関係性を説明しようとするものである。

先に紹介させていただいたように著者はもともと土木工学分野の出身であり、いわゆる純血の材料工学分野の研究者ではない。現在も材料工学分野のみを専門としている訳ではなく、橋梁や海洋構造物の経年劣化や維持管理を対象とした、より「巨視的な」研究にも従事している。このため、純粋な材料工学分野の研究者とは少し異なる視点から現象を俯瞰的に眺めることができるのかもしれない。材料工学分野、特に基盤構造材料として最も重要な鉄鋼材料の分野において、新たな価値観を継続的に生み出せる人材となれるよう精進していく所存である。

参考文献

- 1) 柴沼一樹, 栗飯原周二, 松原基行, 白幡浩幸, 半田恒久 : 鉄と鋼, 99 (2013), 40.
- 2) 柴沼一樹, 栗飯原周二, 松原基行, 白幡浩幸, 半田恒久 : 鉄と鋼, 99 (2013), 50.
- 3) W.C.Leslie 著, 幸田成康 監訳, 熊井浩, 野田龍彦 訳 : レスリー鉄鋼材料学, 丸善, (1985)
- 4) D.A.Curry and J.F.Knott : Met.Sci., 12 (1978), 511.
- 5) G.T.Hahn : Metall.Trans.A, 15 (1984) 947.
- 6) N.J.Petch : Acta Metall., 34 (1986), 1387.
- 7) J.I.San Martin and J.M.Rodriguez-Ibabe : Scr. Mater., 40 (1999), 459
- 8) K.Shibanuma, T.Utsunomiya and S.Aihara : International Journal for Numerical Methods in Engineering, 97 (2014), 551.
- 9) K.Shibanuma, S.Aihara and S.Ohtsuka : ISIJ Int., 54 (2014), 1719.
- 10) K.Shibanuma, S.Aihara and K.Suzuki : Engineering Fracture Mechanics, 151 (2016), 161.
- 11) K.Shibanuma, S.Aihara and K.Suzuki : Engineering Fracture Mechanics, 151 (2016), 181.
- 12) 平出隆志, 柴沼一樹, 栗飯原周二 : 鉄と鋼, 101 (2015), 384.
- 13) Y.Nemoto, K.Shibanuma, K.Suzuki, S.Aihara and T.Hiraide : International Journal of Offshore and Polar Engineering, 26 (2016), accepted.
- 14) I.Kawata, T.Hiraide, K.Shibanuma, T.Kawabata and S.Aihara : International Journal of Offshore and Polar Engineering, 26 (2016), accepted.
- 15) 川田樹, 平出隆志, 柴沼一樹, 川畑友弥, 栗飯原周二 : 鉄と鋼, 102 (2016), 320.
- 16) K.Shibanuma, Y.Yamamoto, F.Yanagimoto, K.Suzuki, S.Aihara and H.Shirahata : ISIJ Int., 56 (2016), 341.
- 17) Y.Yamamoto, K.Shibanuma, F.Yanagimoto, K.Suzuki, S.Aihara and H.Shirahata : ISIJ Int., 56 (2016), 350.
- 18) K.Shibanuma, F.Yanagimoto, T.Namegawa, K.Suzuki and S.Aihara : Engineering Fracture Mechanics, 162 (2016), 324.
- 19) K.Shibanuma, F.Yanagimoto, T.Namegawa, K.Suzuki and S.Aihara : Engineering Fracture Mechanics, 162 (2016), 341.
- 20) S.Aihara and Y.Tanaka : Acta Mater., 59 (2011), 4641.
- 21) K.Ueda, K.Shibanuma, M.Kinefuchi, Y.Nemoto, K.Suzuki, M.Enoki : Procedia Structural Integrity, 2 (2016), 2575.
- 22) K.Tanaka, Y.Akaniwa, Y.Nakai and R.P.Wei : Engineering Fracture Mechanics, 24 (1986), 803.

(2016年5月6日受付)