



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

性能規定型の複相組織鋼のヘテロ構造特性の 制御指導原理構築に向けて

Development of Guideline for Controlling Hetero-structural
Properties of Multi-phase Steel to Meet Structural Performance

大畑 充
Mitsuru Ohata

大阪大学 大学院工学研究科
マテリアル生産科学専攻
教授

1 はじめに

田中将己先生（九州大学准教授）より、2016年1月号の「ふえらむ」から新企画として「私の論文」の掲載をスタートするとの一報をいただいた。これは、鉄と鋼、ISIJ Internationalに掲載された論文に対して、本文中に書き切れなかったことや、行間を埋めるような解説、裏話等を紹介する企画とのことで、企画の面白さに感銘を受け、二つ返事で引き受けることとした。

本稿では、平成26年度の俵論文賞をいただいた拙著「組織不均質を考慮した三次元延性損傷シミュレーション法—複相組織材料の延性予測—¹⁾」について、この研究の着想と論文を執筆するに至った背景、さらには今後の展開に対する想いを紹介させていただきたいと思う。

2 本論文の概要

フェライトを母相として、第二相にパーライトやベイナイト、マルテンサイトなどを有する二相組織鋼が構造用鋼板や自動車用鋼板として広く利用されているが、さらなる強度・延性バランスや加工性などの総合的な機械的特性の向上を目指した二相組織鋼の開発が望まれている。このような二相組織鋼の強度や延性は、各構成相そのものの強度や延性だけでなくその不均質性、さらに第二相の形状、含有体積率や分布状態など、組織形態（Morphology）の影響を大きく受けるこ

とは広く理解されているところであるが、これらの微視的組織特性が有機的にどのように関連することで二相組織鋼の高強度・高延性が発現されるか、そのメカニズムは必ずしも解明されていない。当該論文は、このような課題を解決するために、二相組織を構成する各相の機械的特性と二相組織形態の情報から、二相組織鋼の強度・延性破壊限界を予測することをねらったアプローチに着想し、数値損傷モデルを用いた数値シミュレーション手法を提案しているものである。なお、ここでの「延性」とは単なる丸棒引張り試験で得られる破断伸びでは無いことを初めに申し上げておく。

3 研究の着想—本場にに必要な特性は

強度や延性などのマルチ特性バランスに優れた複相材料の制御指導原理を導く研究に着手するにあたり、実構造部材や製品の実働荷重下において求められる耐破壊性能に目を向けた。

建築鉄骨や橋梁などの骨組み構造に過大荷重が作用する場合や、発電や化学プラントの配管や压力容器、ガス輸送管（ラインパイプ）など内圧が付与される構造の破壊安全性を確保する上で、応力・ひずみ集中部からの延性き裂の発生・進展を伴う

① 安定延性破壊の防止

② 延性き裂成長後のへき開型脆性破壊への遷移防止

③ 不安定延性破壊の防止

が重要な課題であり、そのためにも微小空洞合体型の延性き

* [今回の対象論文]

大畑 充, 庄司博人, 南 二三吉:「組織不均質を考慮した三次元延性損傷シミュレーション法—複相組織材料の延性予測—」, 鉄と鋼, Vol.99 (2013), No.9, p.573-581 (第77回俵論文賞)

裂発生・進展抵抗が要求される。一般に、このような抵抗は、破壊力学に基づいたJ積分やCTODなどと進展き裂長さの関係である延性き裂発生・進展抵抗曲線 (J-R curve、CTOD-R curve) として表され、構造部材が不安定延性破壊を開始する限界荷重や限界き裂長さが評価される。しかし、ここで材料開発の観点に立ったとき、部材のき裂の発生と進展という特性を向上させるために、いったいどのような材料特性を制御すべきかということに対する明確な解が無いことに気づく。また、R-curveは部材の形状・寸法や欠陥寸法、また負荷様式によって大きく変化し、かつその影響度が材料によって異なる傾向にあるため²⁻⁸⁾、実構造部材の性能を合理的に評価するためには実験室レベルの標準破壊靱性試験で得られるR-curveを構造部材性能評価にいかにかかすかが課題となっている。このように、実構造に要求される実働荷重下での「構造性能」が、そもそものような「材料特性」に支配されるのか、イノベーティブな構造設計や材料設計手法を構築するには、まず、これらに関連付ける研究が必要との着想に至った。

そこで、構造部材の延性き裂の発生・進展特性を、材料の機械的特性の情報のみから定量的に予測できる数値損傷モデルと、それを用いたシミュレーション法の開発に取り組んできた。なぜ、数値シミュレーションが必要になるのかについては、著者の解説記事⁹⁾で詳細を参照いただければと思うが、延性き裂の進展が、き裂先端近傍にて刻々と変化する応力場で生じるひずみの履歴に依存した現象であるためである。シミュレーション手法構築に向けた研究成果の詳細は、著者らの論文¹⁰⁻¹²⁾に記載の通りであるが、切欠き材の曲げ試験で得られる「切欠き延性」と、円周切欠き付丸棒引張試験で得られ

る「延性の応力多軸度依存特性」が、それぞれ微視的プロセス・モードが異なるき裂の発生抵抗 (せん断すべり型) と進展抵抗 (等軸ディンプル形成型) を支配する機械的特性であることを見いだした (Fig.1)。さらに、材料損傷の微視的メカニズムに基づいて、モデルに含まれる材料パラメータをこれら2種類の「延性特性」から陽に決定することのできる延性損傷数値モデルを提案するに至り、シミュレーションによって材料が異なる場合のR-curveや、部材の形状・寸法、負荷モードが異なることによる塑性拘束効果やその材料依存性も精度良く予測できることを実証してきた¹¹⁻¹⁵⁾。つまり、確保すべき構造性能からみて、要求すべきマクロ材料特性 (実験室レベルの機械試験で得られる特性) を明確にできたわけである。

少し話は横道にそれるが、シミュレーションの構築に至る前に、上記の「延性の応力多軸度依存特性」が、あくまでも材料特性であって破断条件を与えるものでは無いことを端的に示す実験結果¹⁶⁾を紹介しておきたい (貴重な実験結果であるが、著者の不精によって論文公表せずまでであるが!)。Fig.2は、所定の引張りひずみを与えた試験片 (PL, PH) から、応力多軸度が異なる切欠丸棒試験片 (R1, R5) を採取して引張り負荷を与えたときの破断限界ひずみを、応力多軸度の履歴と共に示したものである。限界値は、破断まで引張り負荷を与え続けたときの限界曲線 (「延性の応力多軸度依存特性」を示す曲線) 上にはなく、明らかに限界ひずみが応力多軸度の履歴によって異なることを示している。つまり、「延性の応力多軸度依存特性」は、延性き裂の進展抵抗向上のために制御すべき支配特性ではあるが、き裂進展の定量予測には、刻々と変化する、かつ分布を持つ応力／ひずみの履歴をシミュレートすることが必要なのである。

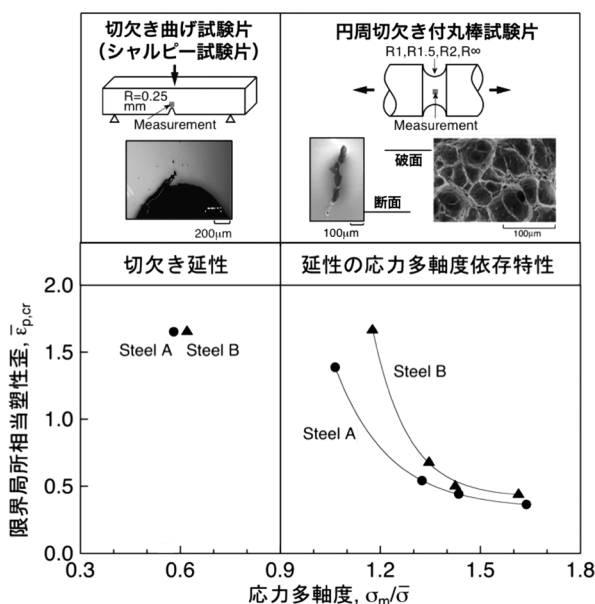


Fig.1 Laboratory test properties, two-type of ductile properties, to control ductile crack growth resistance of cracked components

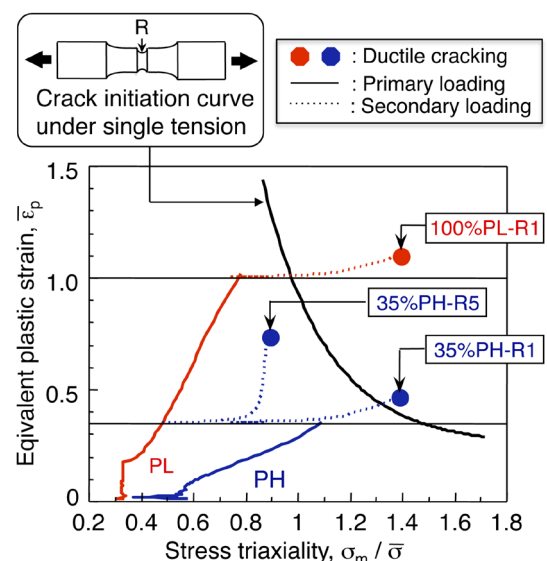


Fig.2 Loading history effect on resistance for ductile crack initiation in equi-axed dimple mode from specimen center.

4 構造性能規定型の不均質組織の制御指導原理構築に向けて

構造部材の延性き裂発生・進展型の破壊抵抗からみて、その特性確保や向上のために必要な制御すべき材料の機械的特性（小型材料特性試験で得られる特性）が明確にできたことで、材料の複相化を積極的に利用して進むべき材料開発の方向性を示すことができた。そこで、本論文の骨子となる研究に着手したわけである。つまり、材料の強度特性に加えて、「切欠き延性」と「延性の応力多軸度依存特性」に優れた材料を実現するために、複相組織材料の微視的特性を適切に制御する指針を提示することのできる手法の構築に着手した。

そこで、せん断すべり型と等軸ディンプル形成型といったモードが異なる延性き裂の発生挙動が、巨視的な力学的挙動の違いによってもたらされる微視的な損傷進展挙動の違いに大きく依存する現象ではないかと考えた。一般に延性き裂の発生は、微視的にはボイドの発生・成長挙動に依存するが、たとえマイクロボイドに成長したとしても、それらが連結しなければ微視き裂を形成することはない。つまり、延性き裂の発生は「場」で決まる現象であり、微視的な損傷の空間的な発現挙動によって、き裂発生モードが変化する可能性に着目した。複相材料は、メソスケールでは強度が異なる材料組織（軟質相と硬質相）が分布している不均質材料であることから、その形態（Morphology）は、延性き裂の発生モードを司る「場」を大きく支配することになる。ボイドの形成挙動だけを見ても、鋼材組織の微視的不均質の影響を強く受けることは、多くの実験により実証されているとおりである^{17,21)}。

このように、マクロな力学的挙動に起因して変化する、複相組織材料の不均質組織形態がもたらす「場」（応力／ひずみ

場、損傷場およびボイド形成場）を再現することで、モードが異なる延性き裂の発生挙動を予測できる可能性に着目した。そこで、Fig.3に示すように、組織不均質に起因する応力／ひずみの局在化挙動に影響を及ぼす組織形態を再現する三次元不均質組織形態モデルと、ミクロスケールのボイド（マイクロボイド）形成に至るまでの微視的な延性損傷進展を再現する数値損傷モデルを適用することで、各相の損傷進展挙動とそれらの相互作用による複相材の延性き裂の発生挙動および発生限界をシミュレートする手法の骨子を構築するに至った。本手法によって、モードが異なる延性き裂の形成挙動を統一的に評価することに加え、複相組織鋼を構成する各相の単相材としての特性のみから、複相組織鋼の強度や上記の2種類の延性特性を予測することをねらいとした。なお、ここでの数値損傷モデルも、各相の応力-ひずみ特性と延性の応力多軸度依存特性の情報のみから、パラメータを一義的に決定できるものである。また、組織不均質に起因する応力／ひずみの局在化挙動を解析するにあたり、不均質組織形態を三次元でモデル化することにこだわっている。それは、強度不均質がもたらす塑性拘束状態を再現するには三次元モデルが不可欠で、損傷進展に影響する応力多軸度に大きな影響を及ぼすからである（一般に二次元モデルにおいて、高い塑性拘束状態を再現しようと平面ひずみ状態を想定する場合があるが、強度不均質が存在する場合には、三次元モデルにおける軟質相の塑性拘束状態はそれ以上の高い拘束がもたらされるのである²²⁾）。

結果は、本論文に記載するとおりであり、このような経緯で構築した数値シミュレーション手法を用いることで、せん断すべり型と等軸ディンプル形成型に関わらず、複相組織鋼の延性き裂の形成挙動を統一的に評価できることを実証し

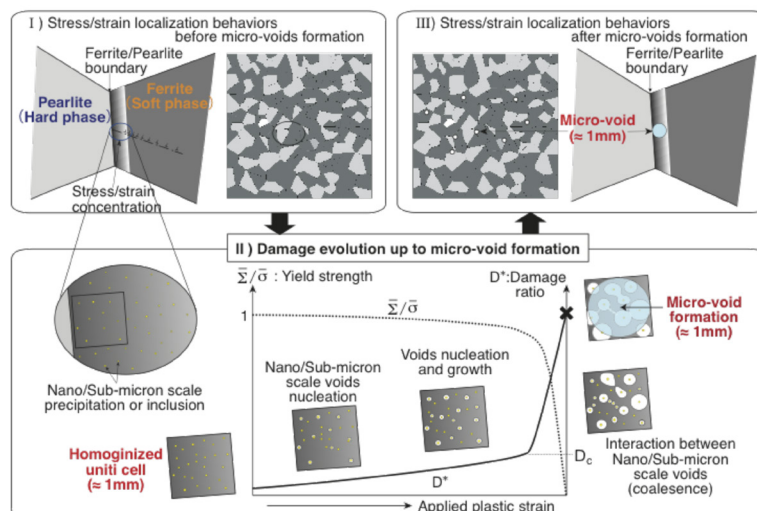


Fig.3 Proposed damage model for simulating micro-voids formation in dual-phase steel.

た。これにより、構造部材の延性き裂発生・進展抵抗向上のために材料に要求すべきマクロ材料特性として見いだした「切欠き延性」と「延性の応力多軸度依存特性」を、材料の複相化により向上させるための組織制御指導原理を導くことのできる手法構築の道筋ができた。その後の研究によってその手法を提案しており、続報²³⁾において公表した成果を参照いただければと思う。

5 おわりに

本論文は、構造性能(耐延性き裂発生・進展型破壊を取り上げた)を見据えた材料の機械的特性制御に視点を置き、その特性を複相組織を構成する下部組織特性の情報のみから予測するために提案した手法を紹介したものである。本成果により、目標としてきた、構造性能と複相組織鋼の微視組織特性との関係を導くシミュレーションベースの階層型性能評価法^{9,24,25)}の構築に大きく前進した。構造性能と機械的特性を関連付けるマクロスケールアプローチでは、延性き裂発生・進展支配型の構造破壊性能を保証するために、設計時に要求すべき材料スペックの合理的決定に貢献できるであろう。また、本アプローチは、従来から経験的にしか得られなかった、強度、延性、シャルピー特性(上部棚吸収エネルギー)、材料靱性(K_{IC} 、 J_{IC})などの種々の機械的特性の相関関係(延性破壊に関わる材料のマルチ特性相関)の解明にもつながり、より合理的な材料スペック提示に活かされることを期待している。また、それらの機械的特性と複相組織材料の下部組織特性(ヘテロ構造特性)の関係を導くメゾスケールアプローチでは、最終構造性能が担保される機械的特性を明確に見据えられたことで、材料組織の合理的設計・制御の指導原理が導かれ、より効果的かつ迅速な材料開発・制御に貢献できることを期待する。

最後に、ここで紹介した手法を構築する過程で、日本鉄鋼協会「鉄鋼材料の組織と延性破壊研究会²⁶⁾」(主査 高木節雄 九州大学教授)にメンバーとして参加する機会をいただき、メンバー各位から多方面からの貴重な助言と協力をいただいたことをこの場を拝借して改めて謝意を表する。本研究会での活動のように、材料、計測・解析、数値計算に精通する分野の知の集結によるシナジーを生み出しながら、材料・構造研究の活性化と革新化につながる研究展開を図っていければと思う。

参考文献

- 1) 大畑充, 庄司博人, 南二三吉: 鉄と鋼, 99 (2013), 573.
- 2) T.Kanazawa, S.Machida and J.Kudo: J.Soc.Nav.Archit. Jpn., 138 (1975), 471.
- 3) K.Sato, M.Toyoda and Y.Ito: J.Soc.Nav.Archit.Jpn., 141 (1977), 268.
- 4) M.Toyoda, Y.Ito and K.Sato: J.Soc.Nav.Archit.Jpn., 145 (1979), 212.
- 5) J.W.Hancock, W.G.Reuter and D.M.Parks: ASTM STP 1171, (1993), 21.
- 6) J.A.Joyce and R.E.Link: ASTM STP 1256, (1995), 142.
- 7) J.A.Joyce and R.E.Link: Eng.Fract.Mech., 57 (1997), 431.
- 8) G.Shen, W.R.Tyson, A.Glover and D.Horsley: Proc. of 4th Int.Conf.Pipeline Technol., Ostend, Belgium, (2004), 703.
- 9) 大畑充: 溶接学会誌, 83 (2014) 7, 532.
- 10) 大畑充, 深堀拓也, 南二三吉: 鉄と鋼, 94 (2008), 57.
- 11) 深堀拓也, 大畑充, 南二三吉, 萱森陽一, 井上健裕: 鉄と鋼, 94 (2008), 222.
- 12) 大畑充, 深堀拓也, 南二三吉: Int.J.Damage Mech., 19 (2010), 441.
- 13) 大畑充, 山口亮, 崎本隆洋, 伊木聡, 南二三吉: 圧力技術, 49 (2011) 4, 148.
- 14) 崎本隆洋, 伊木聡, 遠藤茂, 大畑充, 南二三吉: 圧力技術, 49 (2011) 4, 157.
- 15) S.Igi, M.Ohata, T.Sakimoto and K.Oi: Proc.6th Int. Pipeline Tech.Conf., 7-9 (2013), S17-04.
- 16) 金君炯, 大畑充, 豊田政男: 溶接学会講演概要集, (2001)
- 17) 溶接学会: アドホック研究会報告書, (2002) 1.
- 18) M.Ohata and M.Toyoda: Sci.Tech.Adv.Mater., 5 (2004), 241.
- 19) M.Ohata, A.Ui and F.Minami: Mat.Sci.Forum, 539 (2007), 2168.
- 20) M.Ohata and M.Toyoda: Mat.Sci.Forum, 512 (2007), 31.
- 21) M.Ohata, M.Suzuki, A.Ui and F.Minami: Eng.Fract. Mech., 77 (2010), 277.
- 22) たとえば, M.Ohata, F.Minami and M.Toyoda: Journal de Physique IV Colloque C6, 6 (1996), 269.
- 23) 庄司博人, 大畑充, 南二三吉: 鉄と鋼, 100 (2014), 668.
- 24) M.Ohata, H.Shoji and F.Minami: Proc.4th Int.Symp.on Steel Science (ISSS2014), (2014), 1.
- 25) H.Shoji, M.Ohata and F.Minami: Int.J.Fracture, 192 (2015), 167.
- 26) 日本鉄鋼協会: 「鉄鋼材料の組織と延性破壊」研究会報告書, (2014)

(2016年4月6日受付)