

階層的性能評価による合理的材料・構造設計に向けて



研究室紹介

大 畑 充*

Hierarchical Fracture Assessment Method for Material
and Structural Design

Key Words : Fracture, Simulation, Material design, Structural design

1. はじめに

社会インフラやエネルギー機器を構成する部材の性能および信頼性の向上によって、より安全で安心な持続性社会を実現することが可能になるため、それを実現する高性能材料の開発と、それを加工、接合するプロセス技術、さらに部材寿命管理などを含めた利用技術の開発の推進が望まれよう。我が国の素材産業の比較優位を最大限に活かした製造業の持続的発展のためにも、革新的な構造材料の開発と同時に、それを活かす合理的な溶接・接合設計、なら

びに構造設計と高性能化を図った総合的な高付加価値を生み出す新たなものづくりシステムの構築が必要と考えられる。このように、安全・安心社会の実現と、ものづくり技術の革新を両立させるためには、構造要求性能を保証する材料設計、接合・加工設計ならびに構造設計の指導原理を適切に導くための新たな性能評価技術の構築がその実現の鍵を握るものとする。そのため、著者らは、材料特性、部材（接合部）特性といった構造性能に影響を及ぼす異なる階層の特性を合理的にリンクさせることに着目し、

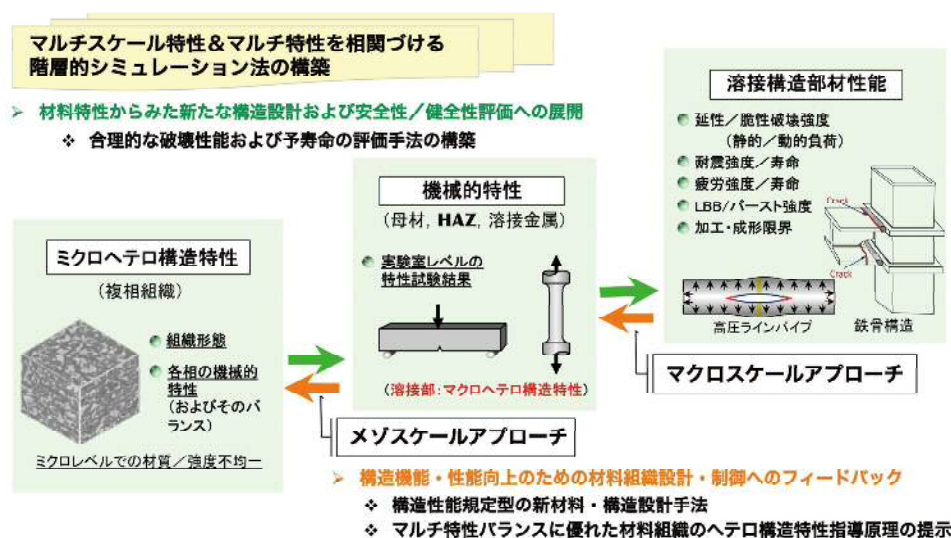


図1 階層的構造性能評価・材料設計のアプローチ



* Mitsuru OHATA

1970年10月生

大阪大学大学院 工学研究科 生産加工

工学専攻 博士後期課程修了 (1997年)

現在、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 工学博士

損傷・破壊力学

TEL: 06-6879-7545

FAX: 06-6879-7545

E-mail: ohata@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

これまで損傷・破壊のメカニズム解明による原理・原則に基づいた新しい数値モデリング（“ローカルアプローチ”と称する）の開発を通じて、数値シミュレーションをベースとした“階層的性能評価法”の構築を目指した研究に取り組んできた。図1は、そのアプローチを示すもので、材料を構成する下部組織特性と素材ならびに溶接部の強度や破壊特性を関連付けるためのメソスケールアプローチと、それ

らのマクロな機械的特性と溶接構造部材の耐破壊性能を関連付けるマクロスケールアプローチからなり、材料と構造のインタラクティブな設計の実現を図るものである。

本稿では、このような構想に基づいて提案してきた階層的アプローチの一部を紹介する。

2. 研究トピックス

2.1 階層的アプローチがもたらす構造性能規定型の材料設計指導原理 —延性破壊¹⁾—

鋼材および溶接部（特に溶接熱影響部）組織の複合化による微視的な力学的不均質を積極的に利用することで、構造の延性破壊抵抗を向上させるための組織制御の指導原理構築に向けた研究を行ってきた。これは、単なる引張試験で得られる材料の強度・延性のマルチ特性バランスではなく、構造部材／製品としての高強度・高延性破壊抵抗（高延性破壊性能）を発現するための材料の微視的ヘテロ構造特性の指導原理を導くことを目標としたものである。

著者らは、構造部材／製品の延性破壊性能（延性き裂の発生及び進展支配型）に支配的な材料の機械的特性を実験的に見だし、その機械的特性の情報のみから材料特性を同定可能なマクロ数理延性損傷モデルを提案してきた。これにより、最終的な構造

性能の向上に効果的な、開発すべき材料の「機械的特性」の指針を提示可能な数値シミュレーション手法を開発してきた（マクロスケールアプローチ）。さらに、このような「機械的特性（“切欠き延性”と“延性の応力多軸度依存特性”）」を、材料組織の不均質を活用して実現するための微視的不均質組織特性の制御指針を導くための手法を提案してきた。本メゾスケールアプローチの構成を図2に示す。これは、二相不均質組織を構成する各相の特性制御に着目し、「二相の三次元組織形態」、「二相の強度バランス」、「二相の延性バランス」の微視的特性（微視的ヘテロ構造特性）から、構造性能を支配する機械的特性を予測する手法を与えるものである。本手法は、大きく2つの要素技術から構成されており、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二相組織形態を再現する三次元不均質組織形態モデリング技術（図2中(1)）と、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ミクロ数理損傷モデリング技術（図2中(2)）からなる。これらの技術を融合することで、ボイドの形成とそれらの相互作用をも考慮して延性損傷挙動をシミュレートする手法を開発し、二相組織鋼材の微視的ヘテロ構造特性と機械的特性を定量的に関連付けられることを検証してきた。本手法を適用し

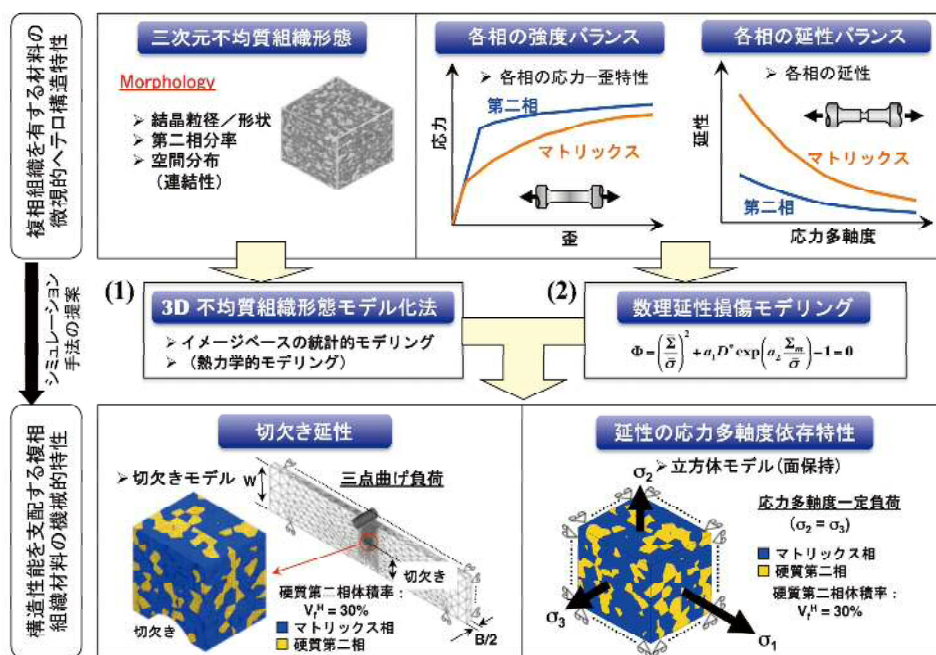


図2 微視的ヘテロ構造特性と機械的特性の関係を導くメゾスケールアプローチ

て、二相組織鋼材の機械的特性に及ぼす不均質組織形態の影響を解析した結果の一例を図3に示す。第二相の体積含有率が同じ材料でも、硬質第二相の分布形態をランダム分布（塊状分布）から層状分布に変化させることで、同じ強度を確保しながら高延性を発現させられることを導いた例である。本手法により、構造性能を見据えた要求機械的特性を発現させるための最適なヘテロ構造特性制御の指導原理を提言していく予定である。

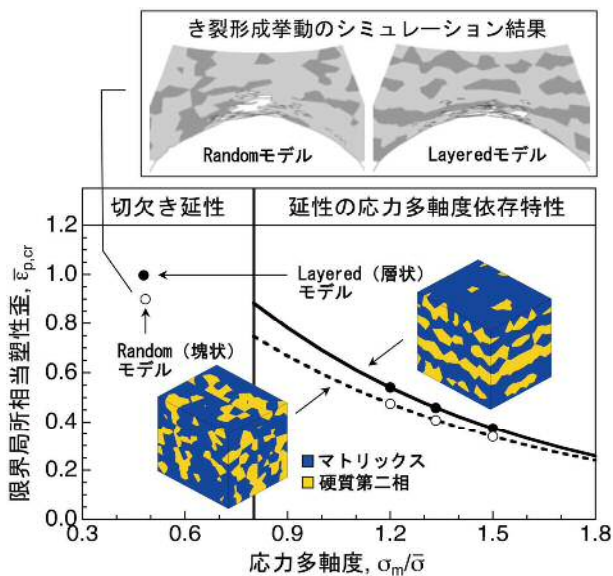


図3 強度が等しく延性に優れる微視的ヘテロ構造特性

2.2 構造性能規定型の材料組織設計指針を導く階層的アプローチ ―へき開破壊―

構造部材の耐脆性破壊性能を確保するための合理的な要求破壊靱性を決定するためのローカルアプローチを提案し、必要靱性と材料の加工硬化能との関係を導いてきた。著者らは、さらにその必要靱性値を得るための材料の微視組織特性の制御指導原理を導くことを目的とした新たなへき開破壊モデルの提案を行ってきた（メゾスケールアプローチ）。

ローカルアプローチに基づき、上部ベイナイトを対象に材料の微視組織特性からへき開破壊靱性の下限値とバラツキ特性を定量的に予測するへき開破壊モデルを提案した。本モデルでは、へき開破壊の起点となるき裂核の方位分布を特徴付ける組織単位が破壊を支配する組織因子の一つと捉え、これを代表体積 V_R として取入れた。また、この V_R 中の破壊に寄与するき裂核の最大寸法を考え、極値統計に基づく寸法分布にて材料組織を特徴づけることとした。き裂核寸法の極値分布を上限值 a_{lim} をもつ指数系 III 型最大値漸近分布で表し、破壊の最弱リンク機構を適用することで、新しい破壊パラメータ λ_w を提案するに至った（図4中式参照）。さらに、この λ_w で評価した破壊靱性の累積破壊確率が二母数ワイブル分布に従うことを導いた。すなわち、本モデルに基づく、上部ベイナイトの代表体積 V_R とき

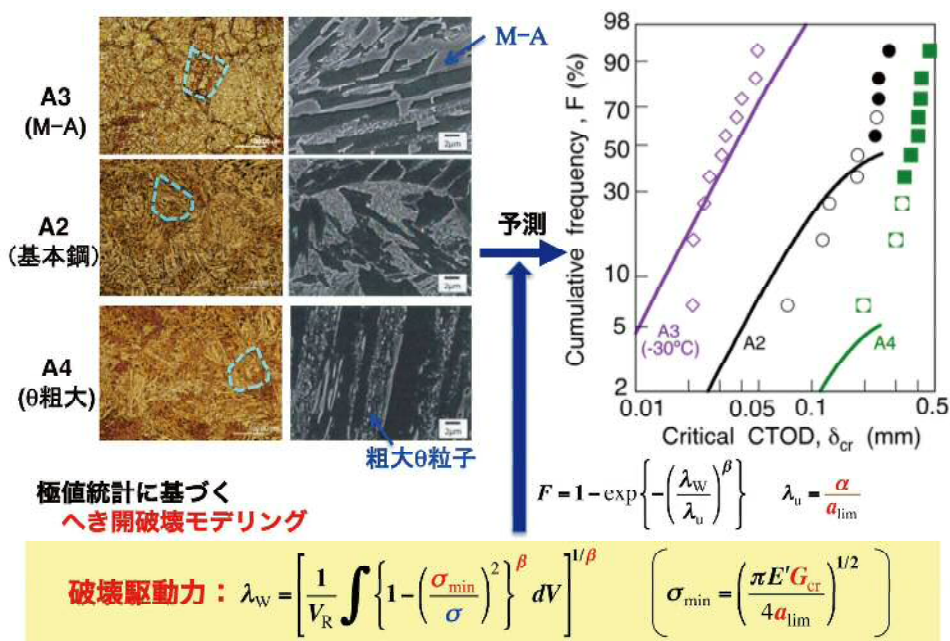


図4 材料の微視組織特性と破壊靱性の関係を導くローカルアプローチの提案

裂核寸法の極値分布，応力－歪曲線，及びフェライトマトリックスの限界エネルギー解放率（有効表面エネルギー）さえ取得すれば，破壊靱性試験片の三次元弾塑性FEM解析によるき裂先端近傍の応力分布を計算することで，下限値およびバラツキ特性を含めた破壊靱性を予測することが可能となる。図4は，化学組成が一定で熱処理を施すことで旧オーステナイト粒径や第二相の組織と寸法を意図的に変化させた上部ベイナイトを有する3種類の材料を対象として，破壊靱性試験結果を本モデルで予測した結果と比較したものである。提案手法により，微視組織によって異なる破壊靱性とそのバラツキ特性を精度良く予測できることが実証されている。

3. おわりに

本稿で紹介した階層的アプローチを，静的・動的荷重下での脆性不安定破壊，延性不安定破壊，極低サイクル疲労（地震負荷），低・高サイクル疲労，水素脆化やクリープ損傷といった環境強度など，構

造性能をつかさどる種々の最終損傷形態に拡張させ，ミクロからマクロに至る異なる階層の特性を橋渡しするための科学・学問を開拓し構築することを目指している。本手法を体系化させることで，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，材料靱性などの種々の機械的特性の相関関係（マルチ特性相関）の解明を図り，より合理的な構造性能規定型の材料スペック提示や材料組織制御の革新化を図る。さらに，マルチ損傷・破壊現象の統合的評価法を構築し，未踏領域である，材料・構造の破壊制御設計（亀裂進展経路制御による高性能化）や，異種金属材料の継手性能評価・設計などへの展開を推進する予定である。

参考文献

- 1) 大畑：最新シミュレーション技術による溶接力学の最前線—延性破壊，溶接学会誌，第83巻，第7号，pp.532-539 (2014)。

