

マルチスケール塑性場の理論 (FTMP) に関する研究

構造機能材料学分野 (MM-3)
長谷部 忠司



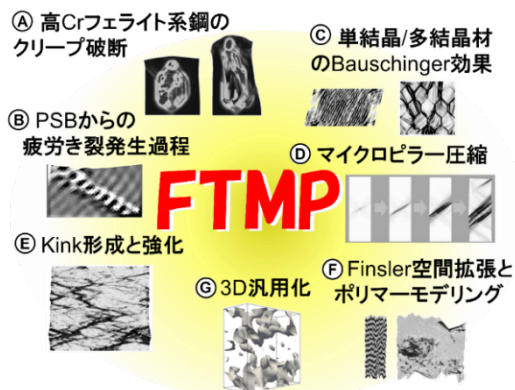
このたびは、拙著 *Field Theory of Multiscale Plasticity* (2024 年, Cambridge 出版) に対し「機械クラブ賞」という荣誉あるご評価を賜り、心より御礼申し上げます。

FTMP 場の理論 (以降, FTMP) は、一言で言えば、“**材料の賢さを認める理論**”と捉えることができます。金属材料は塑性変形領域に入ると、破壊を回避しながら 100%を超える大変形を許容したり、き裂近傍に転位組織を形成して破壊に繋がるエネルギーを積極的に散逸させたりと、実に巧妙で、“**賢さ**”すら感じさせる振る舞いを見せます。こうした現象は従来の理論では十分に表現・説明できず、その本質に迫るには新たな視点が必要でした。

FTMP は、変形に伴って材料内部に生じる**秩序形成**—とくに転位セルなどの転位下部組織—を理論的に捉える初めての枠組みです。その中核には、“**材料が感じる違和感**”として導入した**不適合度テンソル**があり、これに対処しようと系全体がひずみエネルギーの配分を調整することで秩序が形成される—という、極めてシンプルな原理に基づいています。この視点により、秩序形成のメカニズムを簡潔に記述し、数値的に再現する手段を得ることができます。**図 1**に示すように、これまで FTMP を多様な研究課題に適用することで、その有効性と汎用性を体系的に実証してきました。秩序形成を理論的・数値的に扱えるようになったことで、これまで再現や解析が困難とされてきた、変形から破壊に至る複雑な過程を含む諸問題に対しても、新たなアプローチの可能性が大きく拓かれることになりました。ここには例えば、機械工学における典型的な材料強度問題に分類される、実用複雑鋼の不均一回復に伴うクリープ破断過程の再現 (**(A)**) や、疲労き裂発生過程の再現 (**(B)**) も含まれます。現在は水素脆化問題への応用にも取り組んでおり、転位組織形成に伴って生成される原子空孔が、水素の存在下で拡散しにくくなることで凝集・ポイド化し、き裂へと進展する一連のプロセスを、FTMP によってモデル化し再現することを目指しています。

一方で FTMP は、連続体弾塑性力学、金属材料学、結晶塑性論、転位論、材料強度学、破壊力学、マイクロメカニクス、計算力学など、これまで分散・高度化してきた諸体系を統一的な視点でつなぐ理論体系でもあり、今後は AI 技術との融合による知識基盤の整備や、教育・研究・実務への展開を支える環境づくりにも本格的に着手する予定です。その一環として、本年 9 月には、学部・大学院向けの“教科書”として再編した書籍『**マルチスケール塑性場の理論(FTMP)入門・理論編**』(内田老鶴圃)の刊行を予定しています。

今後も理論のさらなる深化と社会実装に向けて、より一層努力を重ねてまいる所存です。引き続きご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。



課題	(A) クリープ破断	(B) 疲労破断	(C) Bauschinger 効果	(D) マイクロピラー圧縮/引張り試験	(E) キンク変形/強化	(F) 格子歪みモデリング	(G) 3D汎用化とセル形成
背景	高Crフェライト系鋼のクリープ破断	Cu添加鋼の疲労き裂発生	高強度鋼板のスプリングバック	転位の離散表現とサイズ効果	LPSO層によるMgの高強度化	熱処理下のキンク強化	FTMPの普及
なぜ	不均質回復による長期安定応力域での加速的強度劣化	すべり帯一き裂の遷移過程	転位下部組織の影響	離散転位の連続体表現	LPSO層によるMgの高強度化	熱処理下での強度上昇	セル内部の転位組織形成過程
何が難しいか	ラース・マルテンサイト相組織の表現	PSB Ladder組織の表現	しなやかな遷移軟化の自然な表現	Strain Burst / Stress Drop	くさび型キンクの形態再現	自由体積のモデル化	等軸セル組織の再現
解析例							
先題・誘算	予ひずみ分布からの冶金組織表現	予ひずみ分布からのすべり帯表現	転位下部組織再現 σ_{ss} vs σ_f	転位下部組織形成に伴う表面凹凸の再現	双晶モデリングでの成功	Finsler空間への拡張による弾塑性場のモデリング	2D各種転位下部組織形態の再現
今後の課題	3スケール解析	3スケール解析	3スケール解析	完全再現	HOP板説の実証	定量評価	完全再現

図 1 FTMP の適用例：変形誘起の“秩序形成”の再現が鍵となる。