インド工科大学ボンベイ校（インド）　研修報告書
過時効マルエージング鋼の衝撃試験と微視組織観察による変形機構の解明

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　M241736 氏名　松本陸真

1. はじめに

先進鉄鋼材料の一つである過時効マルエージング鋼は，析出強化型マルテンサイト鋼であり，ロケット，モーターのケーシングや着陸装置など，航空宇宙分野において重要な用途に使用されている．派遣先である，インド工科大学ボンベイ校における以前の研究では，平面滑りは変形の主要なメカニズムであり，非常に低い塑性ひずみでひずみの局所化が発生することが示されている．また，低ひずみ速度と高応力三軸性において，変態誘起塑性(TRIP)がマルエージング鋼の靭性を向上させることを初めて報告した．TRIP を応力状態，ひずみ速度，温度の関数として定量化することは，本鋼の利点を実際に応用するための自然な流れである．

報告者は，材料の広範囲のひずみ速度における力学試験を専門とし，落錘衝撃試験や分割式 Hopkinson 棒(SHPB)試験，Taylor 衝撃試験など，高ひずみ変形時に生じる未解明現象について広範な研究を行っている．一方，派遣先では SEM や APT，TEM を用いた微細構造観察などの補完的な専門知識を提供している．ひずみ速度の変化に着目した衝撃負荷後の微細構造の変化は多くの報告がされており，微細構造メカニズムにおける TRIP の定量化の観点から，本鋼の実用性を高めることにつながり，また報告者の研究テーマへの知見を微視的構造観察手法などの補完的専門知識の観点からより深める事ができると考えられる．

2. 研修/共同研究課題の決定

ひずみ速度の変化に着目した衝撃負荷後の微細構造の変化の観察は派遣先が研究する過時効マルエージング鋼の実用性を高める上で必要不可欠あることから，昨年度に派遣先から提供いただいた試料を用いて，本校において，異なるひずみ速度の衝撃負荷試験を実施することを決定した．また，本鋼の衝撃試験に携わらせて頂けることから，報告者の研究に対する微細構造観察手法などの補完的専門知識を深める観点から共同研究課題を決定した．

そこで本プログラムでは，派遣前に本校の装置を用いて，0.1～10^2/s 程度のひずみ速度における落錘試験及び 10^2～10^4 /s 程度のひずみ速度における SHPB 試験を用いて，当該鋼の高速力学試験を実施する．派遣先においては SEM 及び APT を使用した衝撃負荷後の表面構造観察及び APT による 3D 元素分布観察を実施し，塑性ひずみ適応の微細メカニズムを確立するための微細構造観察を実施する．本プログラムを通し，派遣先の微視的構造観察の専門知識を取得することを目的とする．

3. 研修/共同研究スケジュール

派遣前　衝撃試験スケジュール

5 月：SEM，APT など微視構造観察手法に関する基礎知識の取得
6 月：落錘衝撃試験の実施，SHPB 試験の実施

派遣中　微細構造観察　スケジュール

9 月 6，7 日　広島を出発，インド工科大学に到着
9 月 8 日～11 日　SEM を用いた表面構造観察
9 月 12 日　中間報告
9 月 15 日～　APT による 3D 元素分析を実施予定であったが，派遣先設備の利用の都合から実施

が困難であり，別設備の利用も模索したが実施は困難であった．
9 月 23 日　最終報告会

4．研修先/共同研究派遣先の概要

名称	：	インド工科大学ボンベイ校
設立	：	1958
所在地	：	インド　ムンバイ　ポワイ地区
敷地面積	：	545 acres
学部	：	15 学部
世界大学 Ranking 2025	：	118 th

派遣先研究室

担当教員	：	Prof.　Prita Pant
他教員	：	Prof.　Guru　Rajan
		Prof.　Jaya　Balila
学部	：	冶金工学および材料科学
研究室	：	計算材料工学　グループ
学生	：	25 名～30 名

5．研修/共同研究の内容

5.1　広島大学材料力学研究室における衝撃試験

5.1.1　落錘衝撃試験

図 1 に落錘衝撃試験機の写真を示す．複数枚の鋼板を上部支持鋼板上に固定し，タップとして用い，自由落下させることで，試験片を圧縮変形させる．本研究では，タップの高さを試験片表面から 75 ㎜に設定し，自由落下の式から衝撃速度 1231㎜/s を算出した．アンビルから試験片に作用する外力は，試験機下部に設置した検力ブロックに軸対称に貼付した 2 軸ロゼットゲージを用いて測定する．



Fig1.　落錘衝撃試験機

5.1.2　落錘衝撃試験結果

図 2 に落錘衝撃試験より得た公称応力-公称ひずみ曲線を示す．環境ノイズの大きさから，図には移動平均及びローパスフィルタを用いた曲線を示す．曲線より，弾性変形領域と考えられる直線領域の最大圧縮応力は-1200MPa，最大ひずみは-0.04 を測定した．

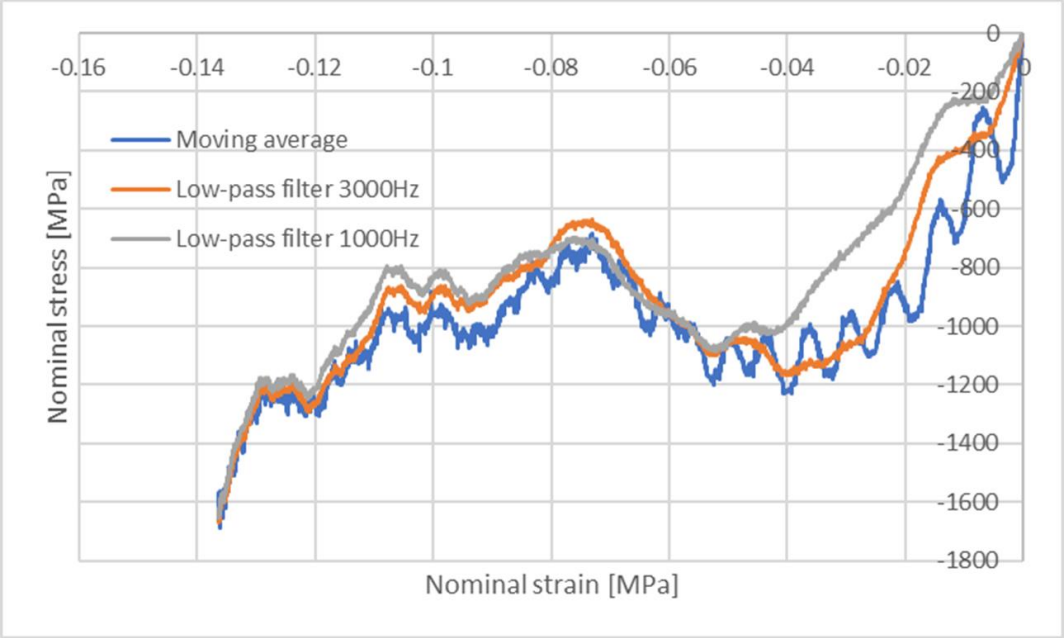


Fig.2　落錘衝撃試験　応力-ひずみ曲線

5.1.3　分割式 Hopkinson 棒法（SHPB）試験

図 3 に SHPB 試験機の概要を示す．SHPB 試験機は，主に打撃棒，入力棒，出力棒及びモーメンタムトラップを用いる．打撃棒を空気圧により加速し，打撃棒が入力棒を打撃することで，入力棒及び出力棒に挟むように設置した試験片を高速圧縮変形させる．入力棒に軸対称に 2 枚貼付した 2 軸ロゼッタゲージを用いて入力波及び反射波を，出力棒に同様に貼付したゲージを用いて透過波を測定する．打撃速度は 2 対のファイバセンサを用いて測定し，4000㎜/s の打撃速度を算出した．

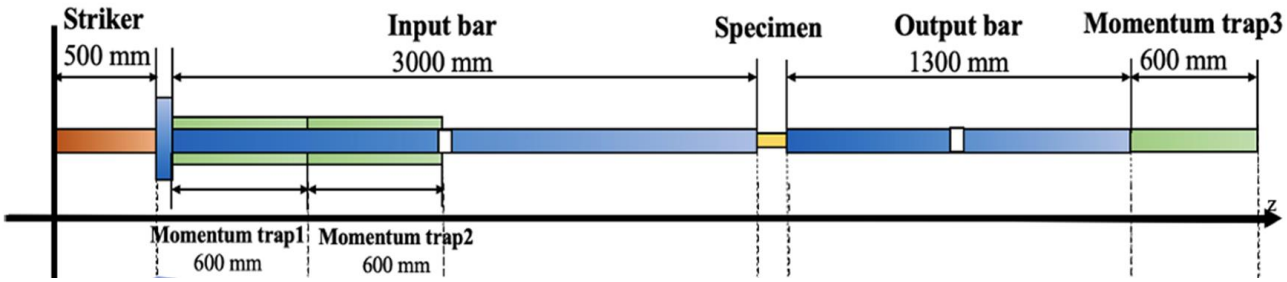


Fig.3　SHPB 試験機概要図

5.1.4　SHPB 試験結果

図 4 に SHPB 試験より得た公称応力-公称ひずみ曲線を示す．最大負荷応力は 2330MPa，ひずみは 0.438 を測定した．また，弾性変形領域と考えられる最大応力は 980MPa，ひずみは 0.037 を測定した．

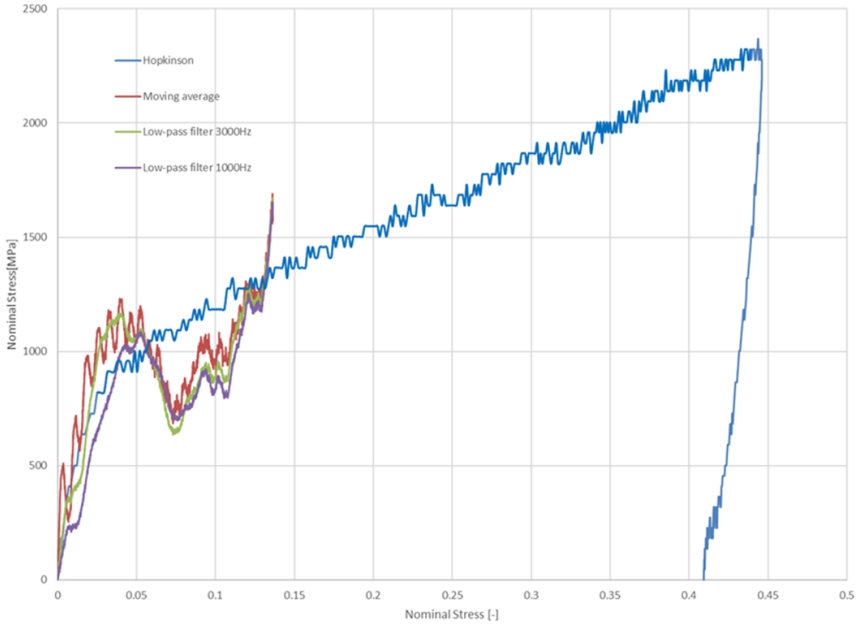


Fig.4　SHPB 試験　応力-ひずみ曲線

5.2　インド工科大学における微細構造観察

・SEM を用いた観察結果

派遣先において，図 5 に示す衝撃負荷後の試験片を図 6 に示す SEM を用いて衝撃負荷後の過時効マルエージング鋼の観察を行った．図 7 に準静的試験及び SHPB 試験後の EBSD の Phase map，KAM 及び IPF の結果を示す．今回の比較ではオーステナイトからマルテンサイトへのひずみ誘起変態量はほぼ同程度であった．加工硬化を強め，衝撃特性を向上させる TRIP 効果について，準静的条件ではわずかに大きなマルテン誘起変態が見られたが，応力-ひずみ曲線に明確な違いが見られなかった．本報告では，試料提供企業様との関係から応力-ひずみ曲線は不記載とする．しかしながら，オーステナイトのひずみに対する安定性は，オーステナイトの粒径，形態，及び組成(Mn 偏析)に依存することが知られており，これらの微細組織条件を変化させることでより詳細な検討が可能になると考えられる．本派遣では残念ながら，利用の都合から TEM 観察を行うことが困難であったため EBSD のみの結果となる．



(a) 落錘衝撃試験　　(b)　SHPB 衝撃試験

Fig. 5 衝撃負荷後試験片



Fig. 6　SEM 設備写真

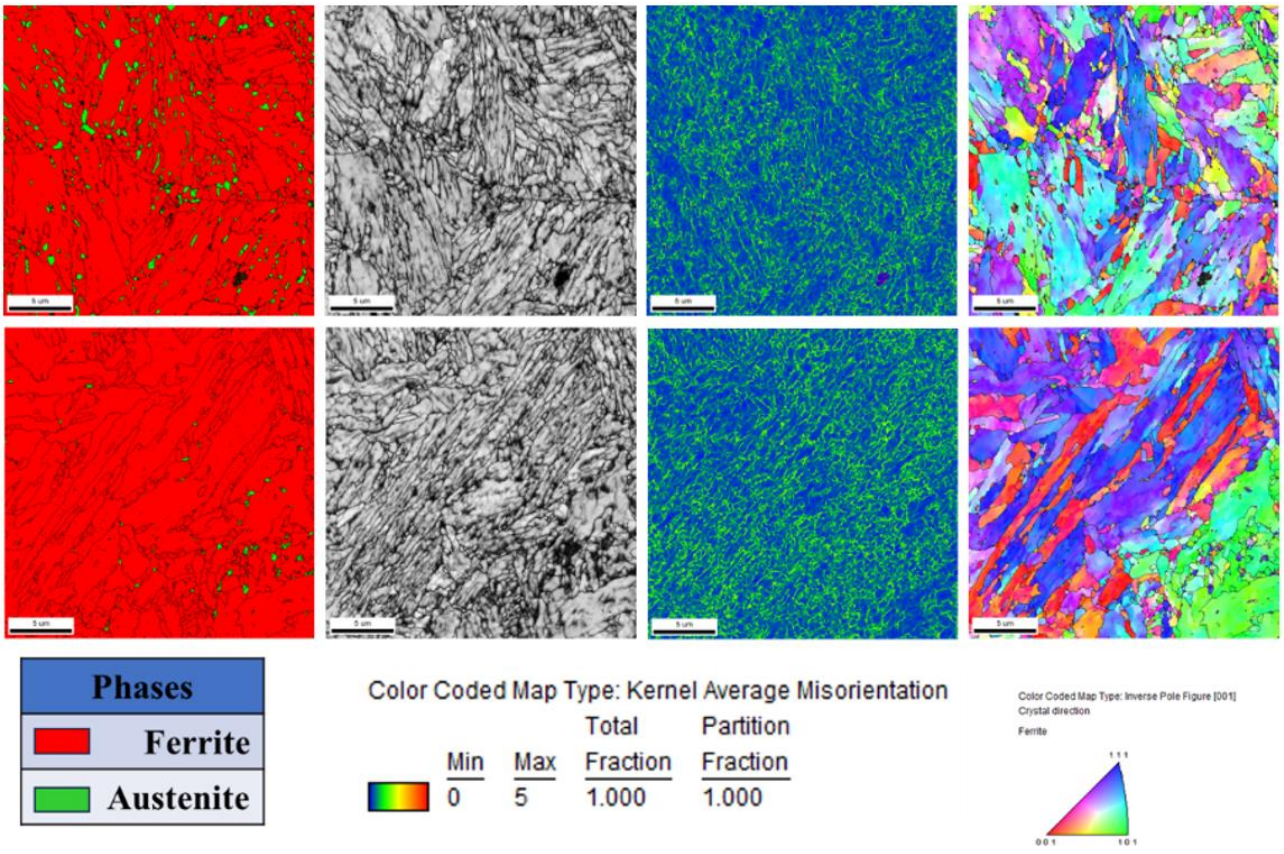


Fig.7　EBSD(左から Phase map, KAM, IPF)

6. まとめ

本プログラムは2週間と短い期間であり，設備の利用などのトラブルもあったことから想定したものよりも難しいものになった．日本における研究とは異なり，研究科全体で協力している点や，教授とのディスカッションがより緊密であるような点に違いを感じた．派遣先研究室においても学生の研究に対する自主性や知見の深さから良い刺激を得ることができたように考える．また，研究を進めるにあたり，英語のみのコミュニケーションに加え，初めての微細構造観察であったことから間違いのないように確実にやり取りを行うように心がけた．日本との環境の違いから研究のみに留まらず，日常生活においても，食事や買い物などでも文化の異なる国の貴重な体験を得ることができた．本プログラムにおいて得た微細構造観察手法の知識や異国での体験を今後の研究，さらに将来の糧として，より成長できるように心がけたい．

7. 謝辞

本プログラムにおいて，熱心な指導からプログラム参加に伴う多くの手続きまで，多くの協力を頂いたインド工科大学ボンベイ校の Prita Pant 教授に厚く感謝申し上げます．また，研究ご協力頂いた Guru　Rajan 教授，Jaya　Balila 教授をはじめ，装置使用や滞在生活のサポートをして頂いた Ratnakar 様，研究室の学生の皆様に厚く感謝申し上げます．

また，本プログラムへの参加機会を与えて下さいました岩本剛准教授に深く感謝申し上げます．

最後に，海外共同研究プログラムをサポートしてくださいました実行委員会の諸先生方及び工学学生支援室国際事業担当の皆様に心から感謝申し上げます．