

白色マイクロビーム X 線回折を活用した
パーライト鋼中のセメンタイト変形・破壊挙動の解明
Understanding for Deformation and Fracture Behaviors of Cementite in
Pearlitic Steel using X-ray Diffraction with White Microbeam

中田 伸生^a, 手島 俊彦^b
Nobuo Nakada^a, Toshihiko Teshima^b

^a国立大学法人東京工業大学, ^b新日鐵住金(株)
^aTokyo Institute Technology, ^bNIPPON STEEL & SUMITOMO METAL Corp.

パーライト鋼特有の不均一変形によって誘発するセメンタイトの破壊挙動を理解するため、白色マイクロビーム X 線を用いて単一コロニー中におけるフェライト、セメンタイト両相の弾・塑性変形挙動を調査した。応力が負荷されていない状態でさえ、フェライト相は大きくひずんでおり、コロニー内部に大きな内部応力が存在することが証明された。ただし、薄片化した引張試験片が早期に破断したため、応力が負荷された状態での応力状態を調査することは出来なかった。

キーワード： パーライト鋼、セメンタイト、白色マイクロビーム、弾・塑性変形

背景と研究目的：

高炭素のパーライト鋼を伸線加工によって強化した高張力鋼線は、量産鋼種の中で最も強度が高い鉄鋼材料であり、ばね、PC 鋼線、橋梁用鋼線、ワイヤロープ、タイヤ補強用スチールコードなど様々な部材に使用されている。世界最長の吊り橋である明石海峡大橋の建設は、この高張力鋼線の強度レベルが大きく改善されたことよって実現されたことは有名な話であり、大型構造物の高層化・軽量化の観点から、高張力鋼線の更なる高強度化が社会的ニーズとなっている。パーライト鋼は他の鋼種に比べて加工硬化能が大きいため、伸線加工など塑性加工を用いた高強度化が比較的容易である。しかしながら、デラミネーションと呼ばれる縦割れ現象など、塑性加工に伴う延性低下が高張力鋼線の更なる高強度化の大きな障害となっている。そもそも、フェライトとセメンタイトのラメラ組織から成るパーライト鋼の破壊機構は複雑であり、その詳細は未だに不明な点が多い。引張変形に伴うフェライトとセメンタイトの弾・塑性変形挙動を動的に調査した J-PARC の中性子回折実験では、パーライト鋼のマクロな降伏がフェライト母相の降伏によってもたらされており、加工硬化段階ではフェライト/セメンタイト間で大きな応力分配が生じることが報告されている[1]。つまり、降伏後、加工硬化から破壊に至るまで、硬質なセメンタイトには非常に大きな応力が集中しており、破壊の起点になっていると考えられている(図 1)。鉄と炭素の化合物であるセメンタイトは一般的に脆性であると考えられているが、ラメラ構造を有するパーライト組織においては、セメンタイトがフェライト母相と強調して塑性変形する可能性も示唆されている。そのため、セメンタイトの破壊に律速された高張力鋼線の更なる高強度化の難局を打開するためには、まず、①冷間加工によるセメンタイトの破壊が延性的、または脆性的であるかを明らかにし、ついで、脆性破壊が生じる場合には、②その破壊応力を実験的に測定することが極めて重要といえる。これにより、セメンタイトが延性破壊するのであれば、多軸応力状態を考慮したセメンタイトの形状や分散状態制御、脆性破壊が生じるのであれば、セメンタイトへの応力集中を軽減するための最適なフェライト/セメンタイト分率の設計、応力集中を適度に緩和するためのひずみ抜き焼鈍の条件出し、さらに微量合金元素添加によるセメンタイトの破壊応力向上など、様々な対策を講じることが可能となる。ただし、この調査を実施するとき、セメンタイトのラメラ配向に対して細心の注意を払わなければならない。異なる相がラメラ状に積層した複合材料の機械的特性が、そのラメラ配向に強く支配されることは、複合材料において周知の事実である。たとえば、ラメラ配向が引張方向に対して垂直なとき、軟質な相に変形が集中するのに対して(応力一定モデル)、平行なときでは両相が均一に変形し、硬質な相に最も効率よく応力が集中する(ひずみ一定モデル)。実際、パーライト組織中では、セメンタイトが一方向に配向した

コロニーと呼ばれる数十 μm 程度の下部組織が発達する。そして、著者らは金属組織の形態観察に特殊な画像解析技術を導入することで局所的な塑性ひずみを測定する技術を独自に開発し、パーライト組織の塑性変形挙動がコロニーを単位として不均一であり、引張軸と平行に配向したコロニーが最も塑性変形し難く、応力集中が発現し易いことを明らかにした[2]。以上のことを考慮すると、セメンタイトの弾・塑性変形挙動を正確に把握し、真の破壊応力を測定するためには、個々のコロニーにおけるセメンタイトの変形挙動を解析する必要がある。そこで、SPring-8/BL28B2 で開発された白色マイクロビーム X 線による局所ひずみ解析技術(EXDM 法)を用いて、パーライトコロニー中のフェライト、セメンタイトの弾・塑性変形挙動を調査した。

実験：

実験には汎用的な共析鋼(Fe-0.9mass%C 合金)を用い、この鋼を溶体化処理の後、所定の温度で等温保持することで全面がパーライト組織となる試料を準備した。パーライト鋼では、ラメラ配向が一定なコロニーと呼ばれる領域を単位として不均一変形が生じると考えられる。そのため、一つのコロニーの弾・塑性変形挙動を把握するためには、このコロニーが実験に用いる引張試験片を貫通していなければならない。そこで、本研究では厚さ $10 \mu\text{m}$ の極薄板引張試験片を特別に作製し、予め引張試験片の両面を走査型顕微鏡によって詳細に観察することで、試験片を貫通していると思われるコロニーを測定対象として選定した。作製した引張試験片を小型引張試験装置に設置した後、EXDM 法で用いる回折計の試料ステージ上に設置した。そして、負荷する応力を、無負荷状態(0 MPa)、降伏応力近傍前後(約 800 MPa、約 1000 MPa)、加工硬化中期段階(1100 MPa)、引張強度近傍(約 1150 MPa)と増加させ、各応力状態における透過ラウエパターンを 2 次元検出器によって測定し、各回折点の X 線エネルギーから格子面間隔を決定することで弾性ひずみを評価した。この際、付属の光学顕微鏡を用いて、マイクロビームを照射するコロニーを予め決定し、とくに引張軸に対してラメラが平行に配向したコロニーについて解析を実施した。

結果および考察：

まず、無負荷状態において、単一コロニーと考えられる領域から透過ラウエパターンを取得することに成功した。この回折パターンはフェライトとセメンタイトの両相から構成されており、両相のパターン分離が必須となる。今後、結晶データを基にした半自動パターン分離を行う予定であるが、今回は手動によりフェライト相の回折パターンのみを分離し、その格子面間隔を測定した。その結果、図 2 に示すように両相のラウエパターンは顕著にブロードニングしており、無負荷状態において既にパーライト組織中には高い内部応力が存在することが実験的に証明された。ついで、この内部応力が外部応力の増加に伴ってどのように変化するかを調査するために負荷応力を徐々に増加させたが、降伏応力に達する前に引張試験片の局部変形が開始してしまい、応力付加状態におけるラウエパターンを取得することが適わなかった。おそらく、厚み $10 \mu\text{m}$ という非常に薄い試験片に作製したため、試料表面のわずかな凹凸による応力集中が生じ、早期破断に至ったと推察される。

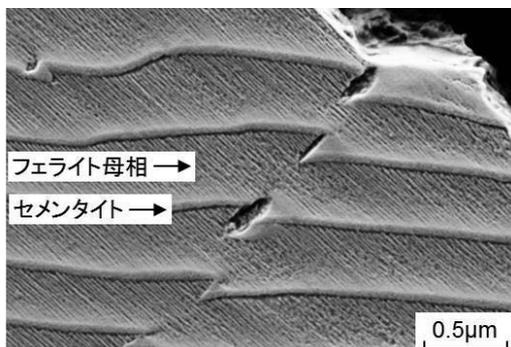


図 1. 引張変形中に破断したセメンタイトの走査型電子顕微鏡写真

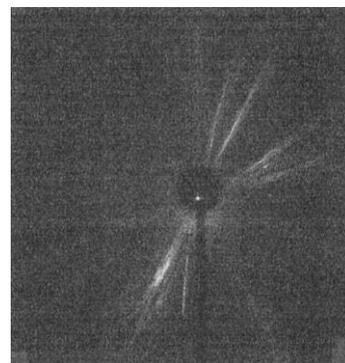


図 2. 無負荷状態で単一のコロニーから得られた透過ラウエパターン

参考文献：

- [1] Y. Tomota et al., *Mat. Sci. and Technology*, **19**, 1715 (2003).
- [2] N. Koga et al., *CAMP ISIJ*, **26**, 363 (2013).