慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察動画中の変形金属における転位移動の定量化
Sub Title	
Author	笠, 智咲子(Kasa, Chisako) 佐々木, 翔唯(Endō, Katsuhiro) 遠藤, 克浩(Muramatsu, Mayu) 村松, 眞由
Publisher	慶應義塾大学AI・高度プログラミングコンソーシアム
Publication year	2023
Jtitle	AICカンファレンス予稿集 (2023.) ,p.19- 21
JaLC DOI	
Abstract	本研究では，透過電子顕微（TEM）観察動画中の転位の移動を定量的に測定する方法を提案する．元のTEM動画は，視野の移動や不要な線の存在から転位の定量分析が困難である．これらの問題を解決するため，オプティカルフローと背景差分を採用する．これらを用いることで，動画中で転位移動の激しさを自動的かつ定量的に測定する方法を開発する．例として引張変形を加えたFe-22Mn-0.6C鋼の転位の移動を定量化し，転位の間欠運動と応力ひずみ線図の関係性を定量的に評価する．
Notes	会議名 : AICカンファレンス2023 開催地 : 慶應義塾大学日吉キャンパス 日時 : 2023年3月4日 第1章研究論文 論文-3
Genre	Conference Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO11003001-20230304-0019

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

透過型電子顕微鏡（TEM）観察動画中の変形金属における転位移動の定量化

笠智咲子 [1]，佐々木翔唯 [2]，遠藤克浩 [2]，村松眞由 [3]
[1] 慶應義塾大学理工学部学門 C
[2] 慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻
[3] 慶應義塾大学理工学部機械工学科

Abstract:
本研究では，透過電子顕微（TEM）観察動画中の転位の移動を定量的に測定する方法を提案する．元の TEM 動画は，視野の移動や不要な線の存在から転位の定量分析が困難である．これらの問題を解決するため，オプティカルフローと背景差分を採用する．これらを用いることで，動画中で転位移動の激しさを自動的かつ定量的に測定する方法を開発する．例として引張変形を加えた Fe-22Mn-0.6C 鋼の転位の移動を定量化し，転位の間欠運動と応力ひずみ線図の関係性を定量的に評価する．
Keywords: Transmission Electron Microscope, Dislocation, Optical Flow, Weighted Temporal Mean

1. 研究背景・目的

材料の力学的性質は，その構造や組織に強く依存する．結晶材料の場合，構造や組織は結晶中に含まれる様々な欠陥の存在状態によって変化する．その中でも 1 次元的な線欠陥の代表である転位とその速度について研究することは，材料の強さや破壊挙動，成形性について調べる上で重要である [1].

転位の挙動を解析するために，金属に変形を与え，透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope; TEM) を用いて Figure 1 に示すような転位の移動の動画を撮影する手法が確立されている [2, 3]．しかしながら，元の実験動画の状態では定量解析に適さず，動画の各フレームを画像処理をした後に人の手で転位の検出を行うため，定量的な転位挙動の評価は困難であった．

そこで本研究では，TEM を用いて撮影された動画中の転位の移動の激しさを定量的に解析するために，複数の動画像処理技術を用いたツールを開発することを目的とする．

2. 方法

本研究の動画内の移動の激しさを定量化的に解析するツールの構成を Figure 2 に示す．

2.1 オプティカルフロー

実験による TEM 動画では，視野が移動するため，転位の移動速度を正確に測定することができない．そこで，視野の移動に合わせてフレーム画像の一部をトリミングすることで，

Fig. 1 TEM を用いて撮影された転位 [3]．円弧状の線が転位を示している．0 フレームでは視野内右にいる転位が，90 フレームでは視野内中央に移動している．

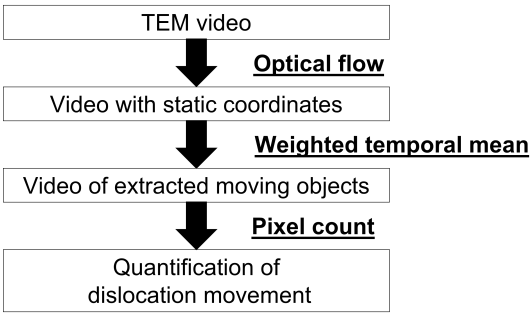

Fig. 2 移動の激しさを測定するツールの構成

静止座標系にした動画を作成する．本研究では，視野の移動ベクトルを算出するために，オプティカルフロー [4] を用いる．オプティカルフローとは，カメラと外界のとの相対的運動によって生じる画像上での見かけの動きのことであり，時刻 t の画像と微小時間後 $t+\delta t$ の画像との間での点対応に相当する．ある画像中の画素 $I(x,y,t)$ を考える．ここで，x, y は画像中における 2 次元座標，t は時間軸方向を表す次元である．画素 $I(x,y,t)$ が，時刻 Δt 後の画像中で $(\Delta x, \Delta y)$ 移動したとする．この 2 つの画素が同じ物体を見ているものとし，連続するフレーム間で物体の画像上の明るさが変わらないと仮定すると以下の関係が成り立つ．

$$I(x,y,t) = I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) \tag{1}$$

物体の動きが微小であると仮定して右辺を Taylor 展開すると，次式が得られる．

$$I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = I(x,y,t) + \frac{\partial I}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial I}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial I}{\partial t}\Delta t \tag{2}$$

式 (1) より，共通する項を取り除くと，

$$\frac{\partial I}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial I}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial I}{\partial t}\Delta t = 0 \tag{3}$$

となる．式 (3) の両辺を Δt で除すと，

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \tag{4}$$

を得る．ここで，

$$I_x = \frac{\partial I}{\partial x}; I_y = \frac{\partial I}{\partial y} \tag{5}$$

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}; v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{6}$$

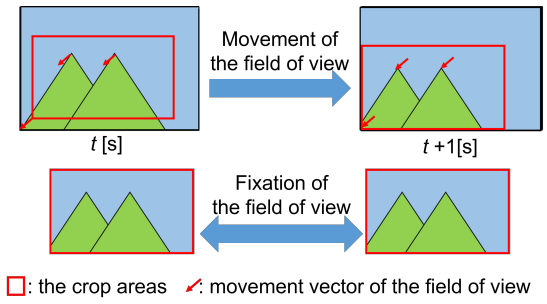

Fig. 3 オプティカルフローの原理

である．ここで，(u, v) は画素 (x, y) におけるオプティカルフローまたは速度ベクトルと呼ばれる．また，式 (4) はオプティカルフロー拘束式と呼ばれる．画素の勾配である f_x および f_y と時間軸方向の勾配 f_t は計算により導出できる．しかし，2 つの未知数 v および u に対し，拘束式は式 (4) の 1 つしかないため，一意的に決定することができない．本研究で用いたオープンソースライブラリ Open CV では，隣接する画素が同じような動きをすると仮定して v および u を決定する Lucas-Kanade 法 [5] を用いる．

2.2 重み付け平均

オプティカルフローにより視野を固定した動画について，重み付け平均 [6] を利用して移動が発生した領域を可視化する．視野が固定されている動画において，時間的に変化する映像フレームを重ね合わせて枚数で除すと，動画中の全フレームの平均画像になる．これを，動画の背景画像として扱う．動かない背景のピクセル値は，平均画像と一枚のフレームとで画素値の変化がないからである．反対に，移動物体はフレームの特定の位置に一瞬しか存在しないため，枚数で除されることで非常に小さなピクセル値となる．この処理を対象のフレーム全てを平均して行うとメモリ効率が良くないため，重み付け平均を用いる．重み付け平均の計算式を式 (7) に示す．

$$dst_t = (dst_{t-1} \times 0.99) + (src \times 0.01) \tag{7}$$

src は入力フレーム，dst_{t-1} はこのフレームが読み込まれる前までの重み付け平均，dst_t は更新後の重み付け平均である．入力フレームの重みを 0.01 に設定しているため，フレームに一瞬しか現れないような変化は小さな影響に抑えられる．逆に，あまり変化していない部分，つまり背景部分は，何度も積み重ねられることでより顕著に浮かび上がるようになる．作成された背景画像と現在のフレームとの差を求めると，移動物体が抽出される．動きのない領域は黒色，移動物体として検出された領域は白色で表示される．ここで，黒色の背景に対して白色が視認しづらいため，抽出された画像をネガポジ反転し，白色の地に対して抽出物体を黒色で表示する．

2.3 ピクセル数のカウント

重み付け平均を利用して移動物体を黒色で表示した動画について，1 フレームごとの黒色のピクセル数をカウントすることで，各フレーム毎の転位の移動の激しさを定量化する．オプティカルフローによって視野を固定した動画を目視で確認したところ，全ての転位が画面の左上部分で発生している様子が見られた．そこで，転位の移動を示す黒色のピクセル数のみを正確に測定するために，340 × 340 の計 115,600 ピクセルの動画のうち，左上の 100 × 200 の計 20,000 ピクセルを切り取った動画を作成した．その動画において画素値 240 以下のピクセルを黒色のピクセルとしてカウントし，そのピクセル数を転位の移動の激しさとした．

3. 結果

100 × 200 の計 20,000 ピクセルの画像 1340 枚で構成される 20 fps の TEM 動画に提案手法を適用し，得られた結果を Figure 4 に示す．Figure 4 より，ピクセル数の増減が動画全体で発生していることを確認した．このピクセル数は画面内における転位の移動量の激しさを示す値である．9 s, 16 s, で移動量の激しさが急増した後に，35 s までは小さくなり，その後は間欠的な移動を繰り返すことを確認した．

4. 考察

動画を目視によって確認した結果から，Figure 4 の 9 s と 16 s における移動量の急増は，オプティカルフローで視野を適切に固定できなかったことによるものである考えられる．一方で，35 s 以降では，オプティカルフローによって視野が固定されていたにも関わらず，Figure 4 における移動の激しさは増加していた．これは，本手法が，転位の運動を捉えたことによるものである．Figure 4 から，転位の移動の激しさは時間が経つに従って増加することが分かった．また，Figure 4 の 35 s〜67 s では，移動の激しさは増減を繰り返していることを確認した．これは，活発な転位の移動は持続せず，間欠的な運動を繰り返すことを示している．

5. 結論

本研究では，TEM を用いて撮影された動画中の転位の移動の激しさを定量的に解析するために，複数の動画像処理技

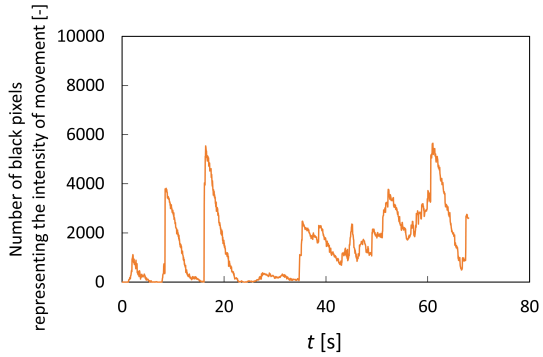

Fig. 4 提案手法を用いて測定された転位の移動の激しさの時間変化．9 s, 16 s, で移動量の激しさが急増した後に，35 s までは小さくなり，その後は間欠的な移動を繰り返すことを確認した．

術を用いたツールを開発した．また，開発したツールを実際の TEM 観察動画に適用し，転位が間欠的な運動をしていることを確認した．

参考文献

[1] 加藤雅治．入門転位論．裳華房, (1999).
[2] K. Sato, *et al.*, Development of a novel straining holder for transmission electron microscopy compatible with single tilt-axis electron tomography. *Microscopy*, **64**, 369–375 (2015).
[3] K. Sasaki, *et al.*, Nanoscale defect evaluation framework combining real-time transmission electron microscopy and integrated machine learning-particle filter estimation. *Scientific Reports* **12**, 10525 (2022).
[4] B.K.Horn, *et al.*, Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, **17**, 185-203 (1981).
[5] Lucas, *et al.*, An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Vancouver, British Columbia*, (1991).
[6] 永田雅人，豊沢聡，OpenCV4 for Python 画像映像情報処理と機械学習．株式会社 カットシステム，(2021).