

二重露光法 DEM_cor4.f90 ver. 4.0 (BL14B1 にて回折型を利用した応力測定)

新潟大学・鈴木賢治

2024 年 11 月 21 日

データ処理をする以前に、GNU パッケージ gfortran, gnuplot および画像処理システム imageJ (Fiji) がインストールしておくこと。使用するプログラム (.f90), マクロ (.imj), 実行ファイル (.bat) はフォルダー (programme) に入っている。

1 データの仕分け

測定した連番データ (img.i.txt) を以下のフォルダーに測定位置と方位ごとに配置する。

CdTe 検出器データ群 img.i.txt は、make_image.f90 でテキストファイル群 x.i.txt に変換して、各フォルダーにセットして解析に用いる。Fiji のマクロ make_stack.imj を使い測定画像のスタック像を作成して確認できる。

2 ビームセンター

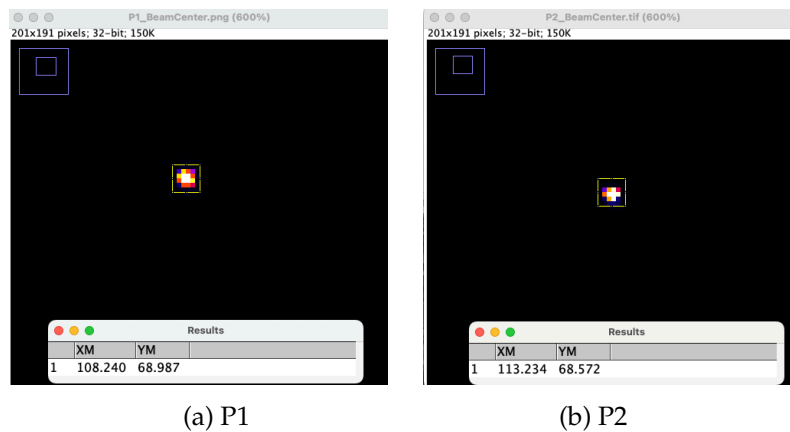


図 1: ビームセンター

P1, P2 のビームセンターの位置は、Fiji の Analyze の Measure の center of mass の機能を利用して求めた。その結果は、図 1 に示すように P1 = (108.240, 68.987), P2 = (113.234, 68.572) である。水平方向 x が 5 pixel (1mm) 移動し、垂直方向 y はほぼ同じであった。BL14B1 の回折計のロングアームは剛性が高く、測定の精度が高い。

2.1 積分領域の設定 (area3.f90)

DEM の解析に先立ち、実験室の幾何学とおおよび各パラメータを決定して、同一積分領域になるようにする必要がある。そのため、area3.f90 を使い、P1 と P2 の画像データを利用して解析条件を整える。

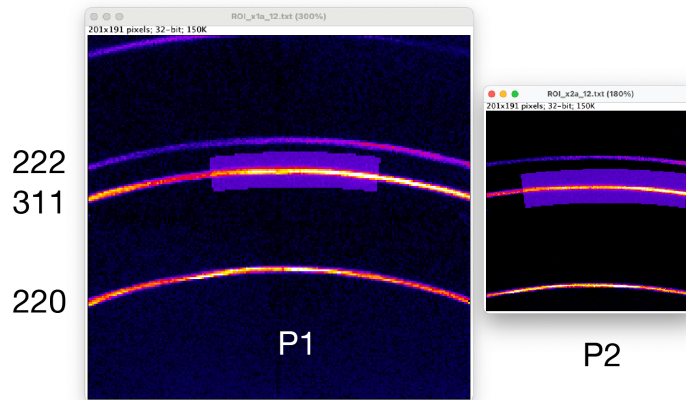


図 2: 積分領域 (P1 と P2 の積分領域を比較・確認できるように大きさを変更).

area3.f90 で作成された P1 および P2 の積分領域の設定を図 2 に示す. ほぼ積分領域が一致するパラメータ (SUS316 突合せ溶接配管の例) を以下に示す.

- $tth=8.23$, $th=8.21$. $t2h$ は 2θ アームの角度, th は材料の $2\theta_0$. (deg)
- $l=400.0$, $l_0=500$, $a=0.2$ (mm, mm, mm/pixel)
- $x01=108.240$, $y01=68.987$, $x02=113.234$, $y02=68.572$ これはビームセンターのピクセル値
- $dth = 0.20/\text{float}(n1)$ 積分する 2θ 範囲を 0.20 deg
- $dphi = 7.0/\text{float}(n2)$ 積分する φ の範囲を ± 7.0 deg

3 二重露光法による解析 (DEM_cor4.f90)

1. **DEM_cor4.f90**¹ に area3.f90 で決定したパラメーターを設定する.
2. P1 および P2 に対応する targetP1 および targetP2 のフォルダーを作成して, それぞれに対応する x.i.txt をセットする. 連番が P1, P2 で一致していること.
3. DEM_cor4.f90 と同じフォルダに cc_fit.bat (実行型) を用意する.
4. 以上の準備をして, DEM_cor4 を実行して, 二重露光法による解析を行う.
最初 1~4 点まで処理して, P1 と P2 の積分領域の様子を確認するとよい. それで, プログラムのパラメータ入力にミスに気がつく.
5. DEM_cor4 を実行すると相互相関のデータ群 c.i.txt², 相互相関のグラフ群 ccc.i.png が作成される.
また, targetP1 および targetP2 のフォルダーの下に, それぞれ波形 w1.i.txt, w2.i.txt, 積分領域画像 x1.i.txt, x2.i.txt が作られる.
6. それぞれ x1, x2 のフォルダーを作成して, 積分領域画像 x1.i.txt, x2.i.txt を移動する.
7. Fiji のマクロ make_stack.ijm の x1.i.txt, x2.i の「スタック作成」で動画を作成して DEM 処理の確認をすること.
8. ccc フォルダーを作成して, 相互相関のグラフ群 ccc.i.png を移動する. Fiji のマクロ make_stack.ijm の「ccc.i.png のスタック作成」で動画を作成して, 相互相関処理の様子を確認する.
9. DEM_cor4.f90 による解析結果は, **DEM_results.txt** に保存されている. これをエクセルで読んで, ひずみなどを求める.

以上の手続きを, 各試験片, 各領域, ひずみ測定方向で処理を行う.

参考として, 各ステップにおいて使用するプログラム, データファイルの処理の流れを示す.

¹今回, **DEM_cor4.f90** のプログラムに回折角度を入れる変数 $t2h$ を新たに加えて, プログラムの先頭で回折角度 $t2h$ を代入すると全て処理するように修正した. 以前の **DEM_cor4.f90** では回折角度をプログラムの複数箇所に数値入力するために, 書き換え忘れ

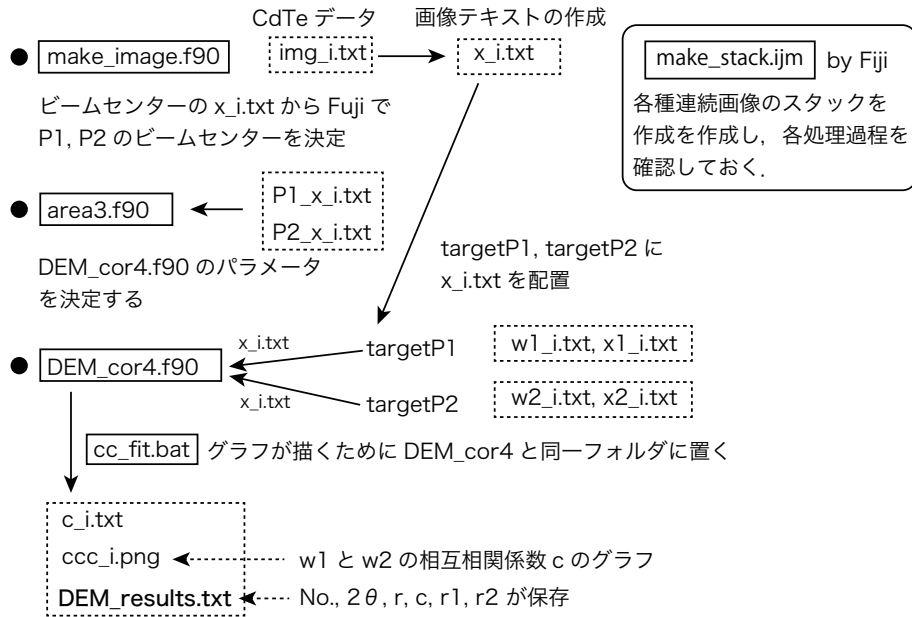


図 3: 二重露光法のプログラムと処理の流れ.

4 DEM における試験片板厚と波長エネルギーの取り扱い

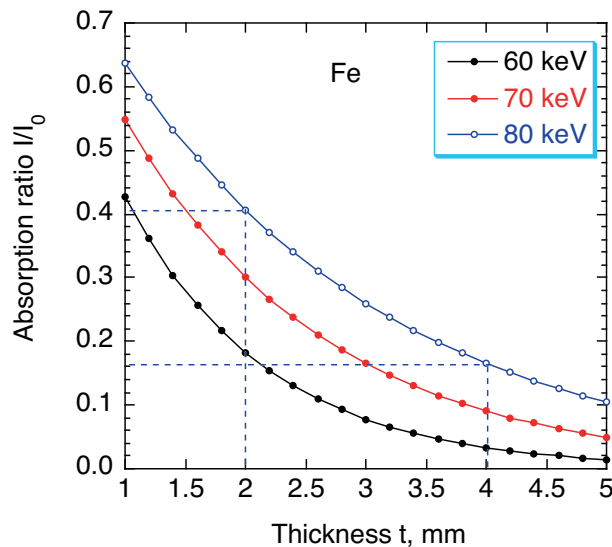


図 4: シンクロトロン放射光 X 線の減衰.

今回の実験では測定時間の効率化を考え、X 線侵入深さの深い 80 keV の X 線を利用した。X 線入射強度 I_0 、厚さ t を透過した X 線強度 $I(t)$ および線吸収係数 μ とすると、X 線の減衰比 I/I_0 は

$$\frac{I(t)}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (1)$$

で求められる。線吸収係数 μ は X 線エネルギーと材料に依存し、鉄 Fe を材料として 60, 70, 80 keV に対して、8.5, 6.0, 4.5 cm^{-1} の値を取る³。実際にシンクロトロン放射光 X 線の減衰を計算すると図 4 が得られる。

でトラブルが発生した。

²c.i.txt には、k,c(k), r1(k), w1(k), r2(k), w2(k) が列記されている。このデータのグラフが ccc.i.png になる。

³アメリカ国立標準技術研究所の以下のサイトから、X 線エネルギーに対する元素ごとの線吸収係数を得ることができる。
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>

例えば、5 mm の板厚であれば、減衰比が 70 keV で 0.049、80 keV で 0.101 なので、80 keV の X 線を利用すれば、70 keV の半分の時間で測定できる。つまり、80 keV を利用すれば、70 keV の 2 倍の面積を測定できる。CdTe 検出器の特性を考慮した上で、より高エネルギー X 線を利用して測定すべきである⁴。

表 1: 80 keV の X 線が $I_0 = 1000$ cps で入射したときの X 線強度 $I(t)$ 。

Thickness, mm	I/I_0	I , cps
$t = 2$	0.406	406
$t = 3$	0.259	259
$t = 4$	0.165	165
$t = 5$	0.105	105
$t = 6$	0.067	67

例えば、X 線エネルギー 80 keV を利用して、2 mm の板厚の試験片を 2 枚用意して測定するときと、4 mm の板厚の試験片を 1 枚で測定するときを表 1 を用いて比較してみる。板厚 2 mm の試験片では、各試験片につき 1 秒で計測して、合計 2 秒で 406 カウントずつ 2 画像を得られる。一方、4 mm の試験片では、1 枚の試験片に 2 秒かけて 370 カウントの画像 1 枚だけしか得られない。

同様に、板厚 3 mm の試験片 2 枚で各 1 秒で 259 カウント 2 画像が得られ、板厚 6 mm の試験片 1 枚に 4 秒かけても 268 カウント画像 1 枚しか得られない。3 mm 板厚試験片 2 枚で、板厚 6 mm の測定面積の 2 倍を測定するほうが効率的である。

板厚を 1 mm 以下にすると粗大粒や溶接部では、回折条件を満たす結晶が得られず、回折像の測定にロスを起こすケースが増える。また、試験片を薄くし過ぎて試験片の剛性を低下させ残留応力が解放されることも適切でない。今回は、1.7 mm の試験片の 820 測定点に対して十数か所程度の回折なしの画像があったが、これは補正によりカバーできたので許容範囲内である。

溶接材の残留応力マップを効果的に作成するためには、2 ～ 3 mm の板厚試験片で 2 枚を利用して少ない測定時間で広い面積を測定する方がより優れた測定法である。溶接試験片を 2 mm 程度に分割したときに、それぞれの試験片で残留応力が得られること、同様な残留応力マップになることを本実験から実証する必要がある。

⁴これまでの実験経験によると、X 線波長エネルギー 90 keV 以上では CdTe ピクセル検出器にスパイクノイズが発生するので、鉄鋼材については 80 keV の X 線が最も効率的である。