

高アスペクト比金属レーザー加工部の X線観測システムの開発

発表者 西川 和貴(1610487) 指導教員 米田 仁紀 教授

1. はじめに

適度な密度と温度でプラズマ状態と凝縮状態のそれぞれの領域が重なると新しい物理状態になる。この状態は高エネルギー密度状態 WDM (Warm Dense Matter) と呼ばれ、一般に WDM は通常の固体に対して温度が数千から数万 K に及ぶ領域であり、今のところこの状態を記述する物理的理論は確立されていない。[1]本研究では、WDM の詳細な物理を明らかにするために大型放射光施設 spring-8 にて加工部の X 線非弾性散乱を計測することで高エネルギー密度状態にある電子の状態について直接観測する計画がある。この場合、レーザー加工点は、次々と金属が熔融、加工されているにも関わらず、空間の 1 点にとどまっている必要があり、そのためのレーザー加工装置を用意する必要がある。本研究では、この装置の開発を行う。

2. 原理

測定方法の概略図を図 1 に示す。

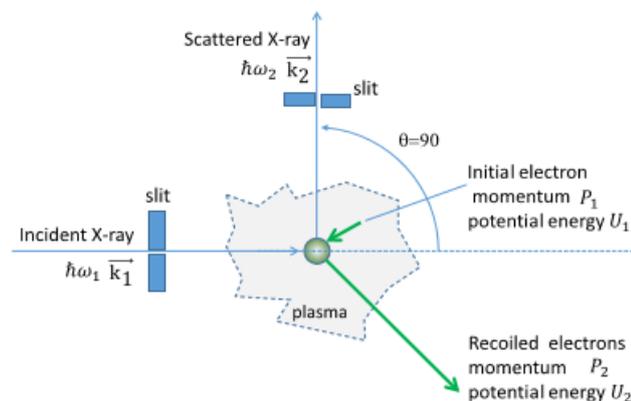


図 1 コンプトン散乱測定 of 概略図

この測定は高エネルギー光子のコンプトン散乱に基づいており、電子と光子の関係は運動量とエネルギー保存則を用いて表すことができる。

$$\hbar\omega_1 + \frac{P_1^2}{2m} + U_1 = \hbar\omega_2 + \frac{P_2^2}{2m} + U_2 \dots \dots \dots (1)$$

$$\hbar\mathbf{k}_1 + P_1 = \hbar\mathbf{k}_2 + P_2 \dots \dots \dots (2)$$

$$\hbar\omega_2 - \hbar\omega_1 + \frac{\hbar^2|\mathbf{K}|^2}{2m} = -\frac{\hbar\mathbf{k}\cdot P_1}{2m} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 m は電子質量、 ω_i 、 P_i 、 U_i 、 k_i は光子エネルギー、電子運動量、電子ポテンシャルエネルギー、光子運動量である。散乱前のパラメータには $i=1$ 、散乱後のパラメータには $i=2$ を用いている。 \mathbf{K} ベクトルは入射光子運動量と散乱光子運動量の差 ($\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$) とした。今回の実験では厚さ数 mm のステンレステープを使用するため、100KeV を超えるハードX線を使用する必要がある。また、このような高エネルギーX線は電子がどのような状態だとしても同じ応答が得られるメリッ

高アスペクト比金属レーザー加工部の X線観測システムの開発

発表者 西川 和貴(1610487) 指導教員 米田 仁紀 教授

トがある。レーザーによって高温高密度状態が生成されるプロセスに加熱されて膨張した後、一部がイオン化した状態がある。このような状態の時には電子はあらゆる状態をとっている。通常、固体金属内部には自由電子と原子に束縛された価電子がある。自由電子の最大速度は

$$v_F = \left(\frac{\hbar}{m}\right) \left(\frac{3\pi^2 N}{V}\right)^{1/3} \dots \dots \dots (4)$$

球形のフェルミ面を想定すると、式(3)の P_1 はステンレス鋼などの非結晶金属の場合、運動量空間で対称な分布を持つ。また、WDM領域ではイオン化から生じる自由電子は非縮退であると予想されるので、マクスウェルボルツマン分布を近似に使用することができる。速度分布は

$$f(v)dv_x dv_y dv_z = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left\{-\frac{m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}{2kT}\right\} dv_x dv_y dv_z \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $dv_x dv_y dv_z$ は各方向の速度差、 $k T$ 温度である。WDM領域では元のフェルミ分布の一部の電子がこのマクスウェルボルツマン分布に変化すると予測できる。この変化の割合はサハの電離公式により推定することができる。金属のフェルミ分布の電子と自由電子のコンプトン散乱のスペクトルは速度分布に対する式(3)の積分によって計算することができる。図2から、温度を0.5eVとして計算すると、2つのスペクトル概形が明らかに異なっていることが分かる。横軸はコンプトン散乱時のエネルギーである。一般に散乱エネルギーは非弾性散乱により入射X線エネルギーより数十 eV 低くなる。また、金属内部の電子はすべて同条件で散乱するため、結合している原子ごとに同じピークを形成する。よって、残差グラフのスペクトルは広くなるため、より良いデータをとるためにはコンプトン散乱された電子を幾重にも積算しなければならない。[2]

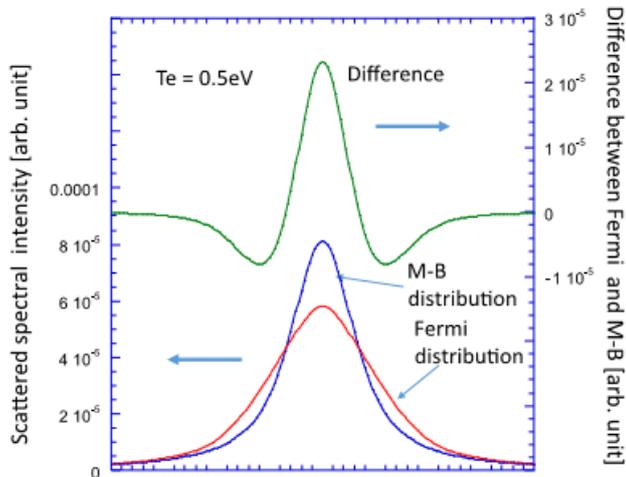


図2 計算されたフェルミ分布とマクスウェルボルツマン分布スペクトルと残差グラフ

高アスペクト比金属レーザー加工部の X線観測システムの開発

発表者 西川 和貴(1610487) 指導教員 米田 仁紀 教授

3. X線非弾性散乱の計測システムの開発

X線観測非弾性散乱の計測システムの概略図を図1に示す。実験ではQスイッチYAGレーザーを利用することでターゲット上に高エネルギー密度状態の生成を行い、生成した高エネルギー密度状態に対してX線プローブの照射を行うことでコンプトン散乱の計測を行う予定である。また、ステンレステープの振動を計測するために、バックライトでステンレステープの影を画面上で記録して高さを計測する系を構築した。

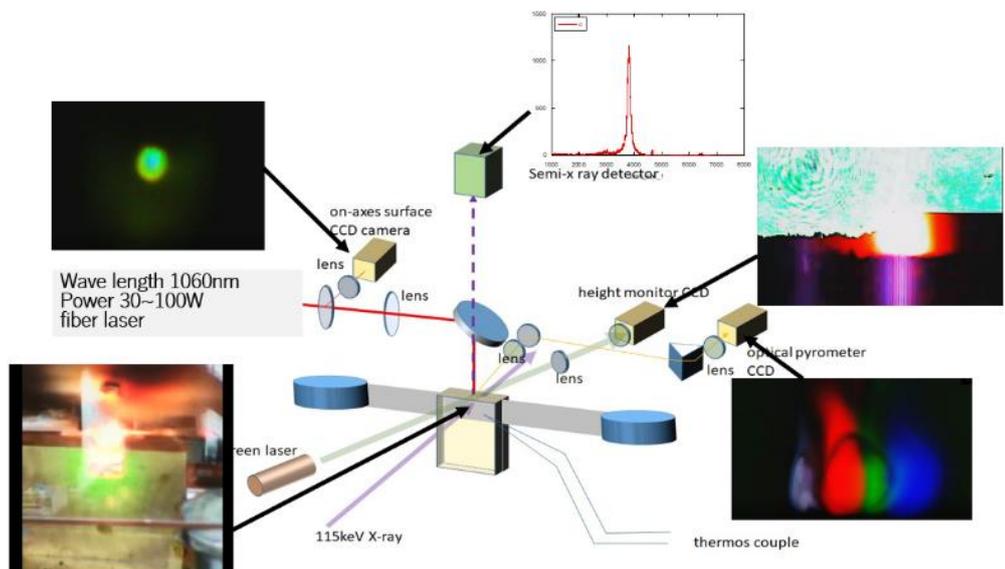


図3 X線観測非弾性散乱の計測システムの概略図

4. 結果と考察

ステンレステープの振動を5回計測した結果、以下のグラフのようになった。

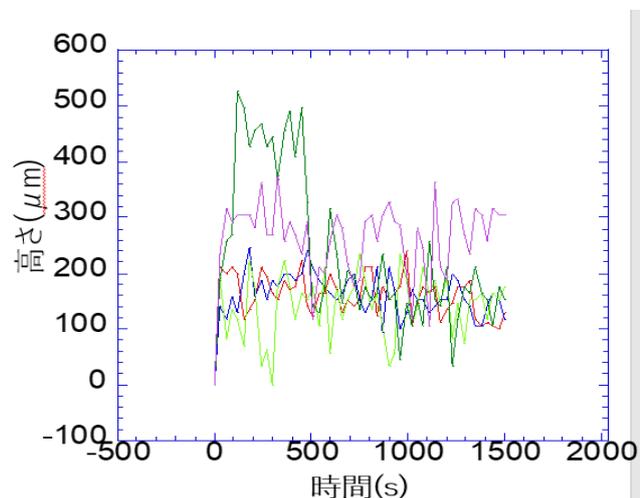


図4 ステンレステープの振動の評価

高アスペクト比金属レーザー加工部の X線観測システムの開発

発表者 西川 和貴(1610487) 指導教員 米田 仁紀 教授

いずれもレーザーを照射して加工されたときにテープが上がっていることが分かる。これはステンレスが加工される際に熱膨張が起きて、上の空間に逃げようとしているからと考えることができる。一方で、立ち上がり以降の振動は平均をみると上下 $50\ \mu\text{m}$ という精度であった。次に、加工前と加工中のコンプトン散乱の積算データを規格化した結果を示す。

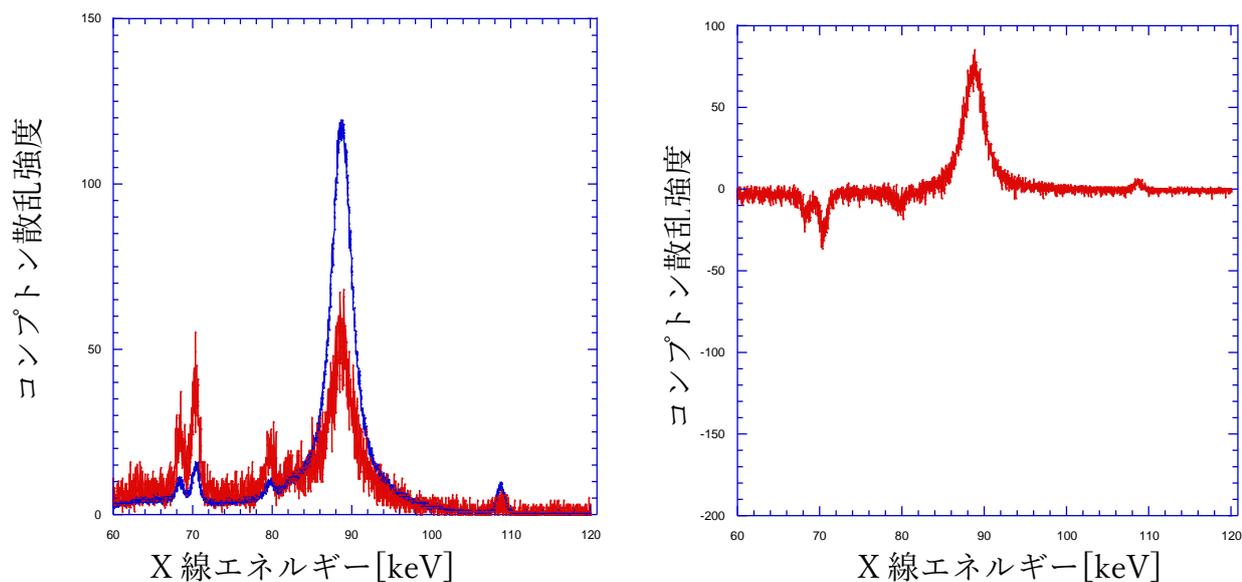


図5 加工前(青線)と加工中(赤線)の散乱強度比較 図6 加工前と加工中の残差

加工中はスペクトルが広がりを持っていることを示している。これはレーザー加工によって変化した電子によって異なるスペクトルを出しているからであると考えられる。

5. まとめと今後の展望

研究では高出力で加工されている金属を数十 μ 以下のオーダーで一定の位置で保つことが目的であった。そのために治具の改良を繰り返して $50\ \mu\text{m}$ のオーダーで安定させることができた。しかし、加工をしていくうちにガラスのダメージが進行していて長時間同じ条件で測定することが難しいことが分かった。さらに、今回使用したテープの長さは 50m なのでテープを回転させる速度によって計測時間が制限されてしまうという問題点が浮き上がった。より高い出力で加工するにはテープのスピードを上げなければならず、十分なコンプトン散乱の積算データが得られない可能性があった。しかし、今回得られたデータを整理し、定量的な考察を深めていきたい。

参考文献

- [1] Nikita Medvedev & Beata Ziaja Multistep transition of diamond to warm dense matter state revealed by femtosecond X-ray diffraction <https://www.nature.com/articles/s41598-018-23632-8.pdf>
- [2] Compton Scattering Measurement to Detect Momentum Distribution of Electrons in Warm Dense Matter Hitoki YONEDA and Shigeaki NISHIO https://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/12/0/12_1301046/_pdf/-char/ja