

浸炭材表面層の残留応力分布測定技術の開発（再計測）

Development of Residual Stress Measurement Technology for Carburized Surface Layer

井川 憲¹⁾ 石原 一宏¹⁾ 林 眞琴²⁾ 菖蒲 敬久³⁾ 諸岡 聡³⁾ 徐 平光³⁾
Ken IKAWA Kazuhiro ISHIHARA Makoto HAYASHI Takahisa SHOBU Satoshi MOROOKA Xu Pingguang

¹⁾川崎重工業株式会社 ²⁾Hayashi Consulting ³⁾日本原子力研究開発機構

大型タンカーや LNG 船、コンテナ船では、環境負荷低減の面から燃料消費量の削減や 1 回当たりの運搬積載量を増やすための積載スペースの改良が望まれている。この要求を達成するには、船に装備されている減速装置の性能向上や小型軽量化が必要である。その最も効果的な方法として、減速装置内部に構成される浸炭歯車の耐摩耗性及び疲労強度の向上が挙げられる。

浸炭歯車は、浸炭処理により最表面層に高い圧縮残留応力を付与し、耐摩耗性及び疲労強度を向上させる。使用環境に応じて浸炭条件を最適化することで、歯車の小型化が期待されるが、そのためには浸炭された歯車表面層の残留応力分布を精度よく把握する必要がある。1mm 以上の有効硬化層深さを持つ浸炭層内部の残留応力を非破壊で測定できる手段は中性子回折法だけであるが、中性子回折法では残留応力評価において無ひずみ状態での格子面間隔が必要となる。しかしながら、浸炭歯車の場合は表面近傍には圧縮の残留応力が、内部には引張の残留応力が生じるため、無ひずみ状態の格子面間隔を得ることが難しい。加えて、表面近傍から内部にかけて濃度分布を持つ炭素の影響で、浸炭歯車の格子面間隔は変化する。以上のような背景から、浸炭歯車を対象とした残留応力計測では無ひずみ状態での格子面間隔の測定が極めて困難である。本実験ではこのような様々な格子面間隔を有する材料に対する残留応力測定技術の開発を目指す。

キーワード: 残留応力, 表面層応力, 浸炭熱処理材

1. 目的

本実験における目的は、浸炭熱処理材料のように表面層に組織勾配や炭素濃度分布を有するために無ひずみ状態の格子面間隔の測定が困難な材料に対して、簡易的に無ひずみ状態の格子面間隔を測定できる方法を提案し、その妥当性を検証することである。

1) 無ひずみ状態の格子面間隔の測定方法の確立

表面層において組織勾配あるいは炭素含有量に分布を有する浸炭熱処理材料に対し、棒状試料を用いて簡易的に無ひずみ状態の格子面間隔を測定可能な方法を確立する。

2) 歯車試験体の応力計測を通じた妥当性検証

浸炭熱処理を施した歯車試験体(図 3)を対象として、上記方法から得られた格子面間隔を用いて歯車内部の残留応力計測を行い、妥当性を検証する。

2. 方法

1) 無ひずみ状態の格子面間隔の測定方法

有効硬化層深さ約 5mm の低合金鋼製の歯形試験体(浸炭焼入れ焼き戻し処理品)を作製した。材料が浸炭処理、あるいは、窒化処理されている場合、無ひずみ状態の格子面間隔は含まれる炭素量や窒素量の影響を受ける。具体的には、含まれる炭素量や窒素量に比例して格子面間隔が広がる。本来であれば測定深さごとに放電加工により薄膜試料を採取し、放電加工時に発生する表面の異常層を機械的研磨で除去した上で、無ひずみ状態の格子面間隔を測定する必要があり、非常に膨大な作業時間と工数を要する。本実験では実験コストの高い薄膜試料ではなく、歯型試験体から図 1 に示す棒状試験体を採取することを考えた。この方法であれば、歯丈方向及び歯幅方向の応力が解放されるため、1 本の棒状試験体からあらゆる測定深さの無ひずみ状態の格子面間隔を一度に計測できる。結果として、測定コストや作業時間の大幅な低減が期待される。2021 年度の第 1 報では、棒状試験体の断面積とひずみの解放状態の関係性にフォーカスするため種々の断面積を持った棒状試験体(2mm x 2mm, 3mm x 3mm, 5mm x 5mm)を用いて無ひずみ状態の格子面間隔を測定したが、測定時間の都合もあり十分な精度を持った無ひずみ状態の格子面間隔を得ることができなかった(図 2)。具体的には、試験片の断面積の減少に伴って無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 が収束する傾向が認められなかった。断面積に合わせたゲージ体積を設定(2mm x 2mm の試験片に対して、ゲージ体積 2mm)していた。しかしながら、ゲージ体積が小さい場合は測定時間が不足し、十分な測定精度が得られなかった反省点がある。今回は

十分な測定時間を得るために、測定する棒状試験体の形状は 1 種類とした。2021 年度の測定結果より、断面積が $2 \times 2 \text{mm}^2$ の場合は測定の際のゲージ体積が小さくなり測定精度の担保が難しくなることが分かったため、断面積が $3 \times 3 \text{mm}^2$ となる長さ 15mm の棒状試験体を用いて無ひずみ状態の格子面間隔の計測を行った。

計測には JRR-3 の Resa-1 を用いた。計測時の入射ビームサイズは $2 \text{mm} \times 15 \text{mm}$ として、検出器側のラジアルコリメータは計測個所の表面深さに応じて変更した。具体的には表面から 1, 2, 3, 4, 5mm の範囲は 2mm のラジアルコリメータを、表面から 5, 7, 9mm の範囲は 3mm のラジアルコリメータを、表面から 9, 11, 13, 15mm の範囲は 5mm のラジアルコリメータを使用した。波長 1.68182453 \AA の中性子を用いて、211 面を測定したので、回折角度は約 $2\theta = 91.87 \text{deg}$ である。

2) 妥当性検証

妥当性検証のためのモデル歯車については、熱処理ままの歯車試験体(未研削歯車試験体)と熱処理完了後に歯部の表層を $50 \mu\text{m}$ 研削した歯車試験体(研削歯車試験体)の2つを用意した。それぞれどちらも JRR-3 の Resa-1 で計測を行った。計測時のゲージ体積は $5 \times 5 \times 15 \text{mm}$ 、検出器側のラジアルコリメータは 2mm、波長 1.68182453 \AA の中性子を用いて、211 面を測定したので、回折角度は約 $2\theta = 91.87 \text{deg}$ である。なおひずみ測定は図 3 に示す ε_z (歯面法線方向) 及び ε_x (歯面内方向) の2方向について測定し、棒状試料から得られた格子面間隔を用いてそれぞれの方向の応力を算出した。

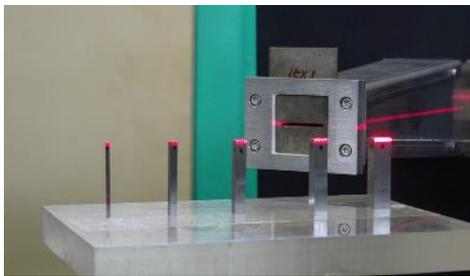


図 1 棒状試料計測の設置状況

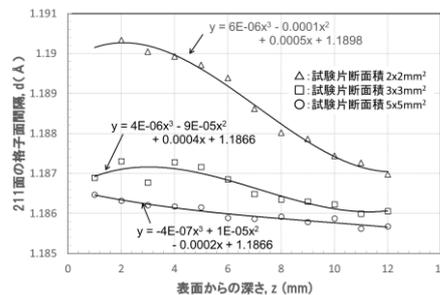
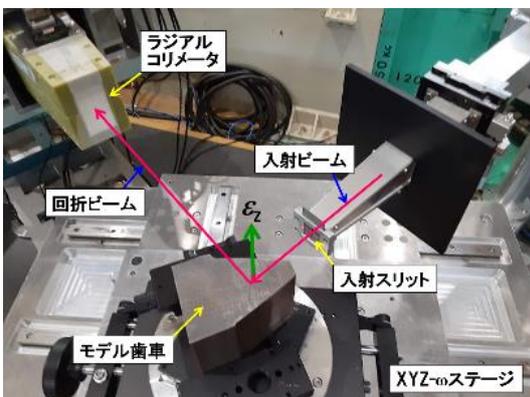
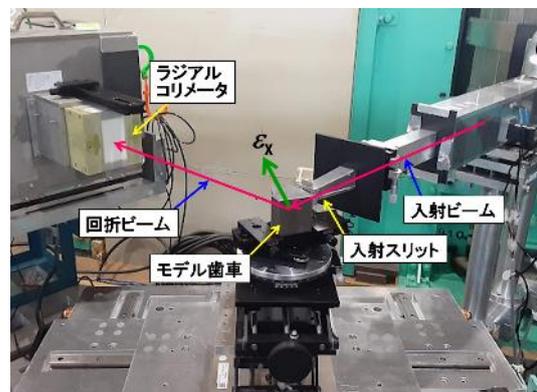


図 2 2021 年度における無ひずみ状態の格子面間隔計測結果



(a) ε_z 計測時の設置状況



(b) ε_x 計測時の設置状況

図 3 歯車試験体計測の設置状況

3. 結果及び考察

1) 無ひずみ状態の格子面間隔の測定方法

棒状試料から得られた深さ毎の格子面間隔(211 面、深さ毎に 2mm, 3mm, 5mm 角で測定した結果をつなぎ合わせた)を図 4 に示す。表面からの深さ 7mm 以降の格子面間隔が純鉄の格子面間隔である 1.1702 \AA を下回っており、計測精度や波長に疑義が残る。一方で、無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 は表面近傍で最大となり、内部に向かって格子面間隔が減少していく様相が認められる。浸炭材の場合、表層近傍で侵入型元素である炭素濃度が最大となるため、無ひずみ状態の格子面間隔も最大となる。その後内部に向かって炭素濃度が減少し、無ひずみ状態の格子面間隔も小さくなる¹⁾。絶対値については上述の通り、計測精度に疑義が残るが、定性的なトレンドは取得できたと推察できる。

2) 妥当性検証

妥当性検証のため、歯車試験体に対しても格子面間隔を計測し、残留応力分布を算出した(図 5)。なお残留応力の算出には、モデル歯車の深さデータごとに、上述の棒状試験体から得られた深さ毎の d_0 を用いて算出した。未研削歯車と研削歯車で応力反転位置はほぼ同じだが、表面近傍の応力値に変化があることがわかる。具体的には研削歯車の方が

圧縮の残留応力値が高くなっている。これは研削によって表層極近傍に圧縮の残留応力が付与されたと考えられる。妥当性のさらなる検証のために、本歯車試験体を対象に MIRS 法による残留応力計測を行った。結果は図 6 に示す通りで、応力反転位置や大まかな応力分布のトレンドは今回の中性子線による応力計測結果(図 5(a))と概ね一致する傾向が認められる。しかしながら、定量的な応力値にはやや乖離が認められた。これは上述の通り、棒状試験体から得られた無ひずみ状態の格子面間隔の計測精度によるものと考えられる。

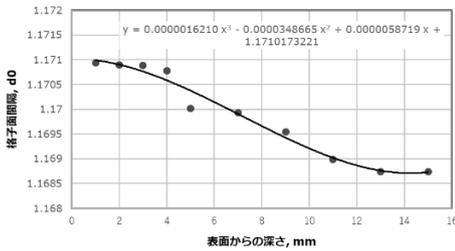
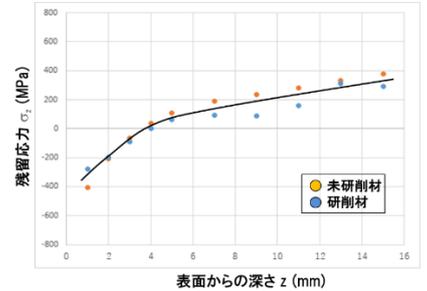
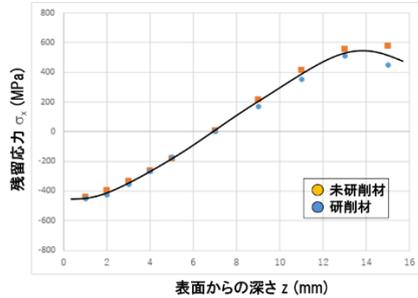


図 4 無ひずみ状態の格子面間隔計測結果



(a) 歯面面内方向

(b) 歯面法線方向

図 5 中性子線による応力分布計測結果

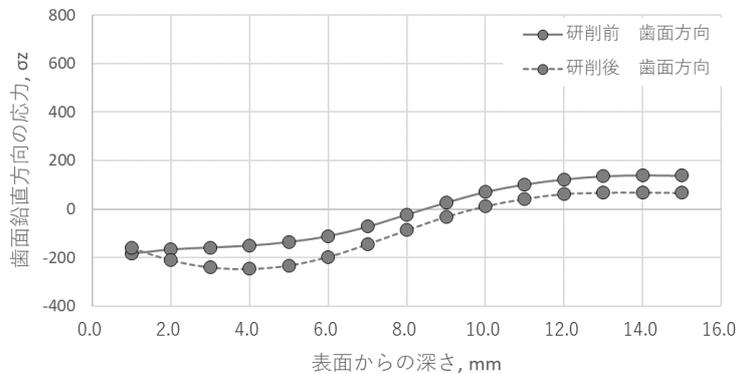


図 6 MIRS 法による応力分布計測結果(歯面面内方向)

4. まとめ

浸炭歯車を対象に、棒状試験体を活用した無ひずみ状態の格子面間隔の取得を通して、実験コストの低い残留応力分布計測手法の構築に取り組んだ。絶対値の測定に向けて精度面の課題は残るが、定性的なトレンドは十分に把握できることが分かった。今後の課題として下記が挙げられる。

- 棒状試験体の試験体サイズの最適化に向けた課題
 - 棒状試験体の断面積を小さくすることで、応力開放が進み、より無ひずみ状態に近づく。
 - 一方で、計測時のゲージ体積が小さくなるため計測精度が担保できなくなる。

5. 引用(参照)文献等

1).坂井田, 川内, 菖蒲, クロムモリブデン鋼の浸炭焼入れ後の硬化層の回折面間隔変化, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.60, No.7, pp.649-654, July 2011