

## 浸炭窒化焼入れ歯車の内部残留応力解析

### Inside Residual Stress Analysis of Carbonitriding Quenching Gear.

向井 竜二<sup>1)</sup>

巨 東英<sup>1)</sup>

鈴木 裕士<sup>2)</sup>

Ryuji MUKAI

Dong-Yung JU

Hiroshi SUZUKI

<sup>1)</sup> 埼玉工業大学先端科学研究所

<sup>2)</sup> 原子力機構

本研究は中性子回折法を用いて、浸炭・窒化焼入れ処理された平歯車から切り出したクーポン材から組織に依存する無ひずみ格子間隔  $d_0$  の測定した。さらに、中性子回折による浸炭・窒化焼入れの平歯車内部における残留応力の測定を行った。

キーワード：平歯車，内部残留応力，中性子回折，浸炭窒化焼入れ

(1行あける)

#### 1. 研究目的

浸炭窒化焼き入れは、浸炭焼入れが炭素だけ拡散させ硬化させるのに対して、炭素と窒素を拡散させる方法で、快削鋼，低炭素鋼，SPCC材等の表面硬化による耐摩耗性，疲労強度の改善に用いられている熱処理方法である。浸炭焼入れと比較して処理温度も低く，寸法変化，歪が一般的に少なく，歯車，シャフト，カム，ピンなど精密部品に多く採用されている<sup>1)</sup>。浸炭や窒化処理を伴った熱処理を行った材料の内部残留応力がどのように分布しているか把握することは部品の製造コストの削減や，耐久性，安全性など，非常に重要な意味を持つ。しかし，熱処理過程と材料の形状が複雑になるほど，どのような内部残留応力が生じるのか，ほとんど把握されていない。

本研究では，浸炭窒化焼入れを行った SCM420 を材料とした平歯車を用い，中性子回折法によって，3次元残留応力解析を行う。平歯車の形状を Table.1 と Fig.1 に示す。測定を行う格子面は(211)面とした。熱処理を施した材料は，表面付近と内部では焼入れ具合が異なる<sup>2)</sup>。そのため浸炭窒化焼入れ平歯車から表面付近と内部の一部をクーポン材として切り出し，それぞれを中性子回折法によって無ひずみ格子間隔  $d_0$  の測定を行う。そして得られた  $d_0$  から，組織分布を考慮した浸炭窒化焼入れ平歯車の内部残留応力を算出する。

Table.1 Spur gear outline

Module	2
Teeth number	15
Pressure corner	20°
Pitch circle diameter	30mm
Basic circle diameter	28.1908mm
Edge circle diameter	34mm
Bottom circle diameter	25mm
Material	SCM420

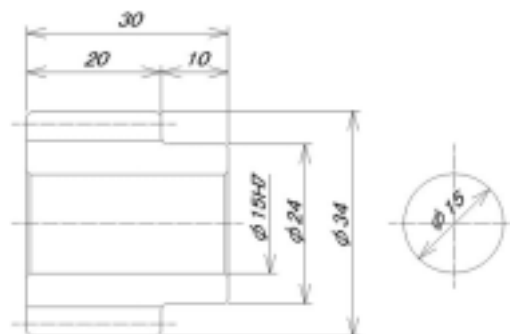


Fig.1 Spur gear shape.

#### 2. 測定方法

##### 2.1 熱処理条件

浸炭窒化焼入れ平歯車の焼入れ過程を Fig.2 に示す。まず 40 分間で 930 まで加熱を行い，そこから炭素濃度 1.0% で 150 分浸炭をし，その後 80 分拡散をする。浸炭と拡散と同時にアンモニア 0.7l/min の雰囲気化で窒化を行い，その後 30 分間 830 まで降温する。そのまま 20 分間温度を保持し，60 の焼入れ油に入れ焼入れを開始する。この熱処理過程では浸炭窒化層は 0.5 ~ 1mm 程度となる<sup>3)</sup>。

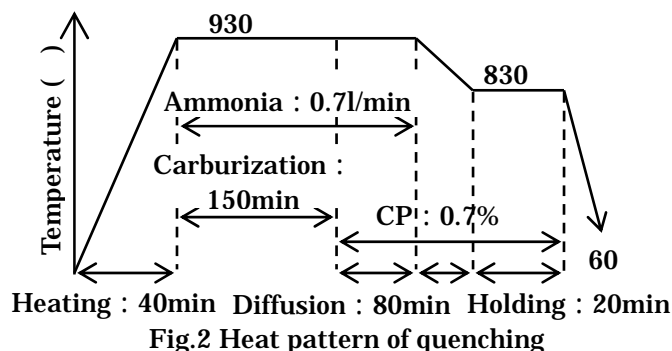


Fig.2 Heat pattern of quenching

2.2 無歪み格子間隔  $d_0$  の測定

中性子回折法による残留応力測定では、無ひずみ状態の格子間隔  $d_0$  を測定する必要がある。しかし、熱処理した材料は表面部と内部とでは金属組織の割合が異なるため、 $d_0$  は一様ではない。そこで、Fig.3 のように平歯車の(a)歯先部と(b)歯内部をワイヤーカットによって切り出し、それぞれクーポン材としたものを測定した。歯先部クーポン材は歯の先端 1mm カットしたものを 2 個まとめ、およそ  $2 \times 20\text{mm}$  の形とした。歯内部クーポン材は先端から 1~3mm の歯の内部を切り出し、それらを 2 個まとめ、 $2 \times 2 \times 20\text{mm}$  の大きさとした。これらのクーポン材を用い、 $d_0$  の測定を行った。ビームスリット幅は縦  $0.5\text{mm} \times$  横  $15\text{mm}$  とし、試験片中心部に中性子線が当たるようにした。測定格子面は(211)面とした。

測定で得られた回折プロファイルを図.4 に示す。このプロファイルより、歯内部よりも歯先のピークが低角側にシフトしており、さらに低く、ブロードになっている。これは、炭素や窒素を添加したことや、焼入れによってマルテンサイト相が生じたためと思われる。

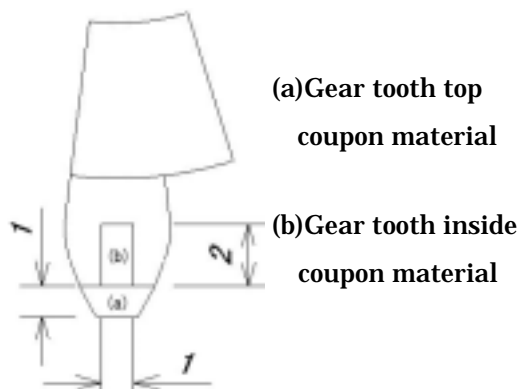


Fig.3 Measurement test piece non-distortion diffraction lattice space  $d_0$ .

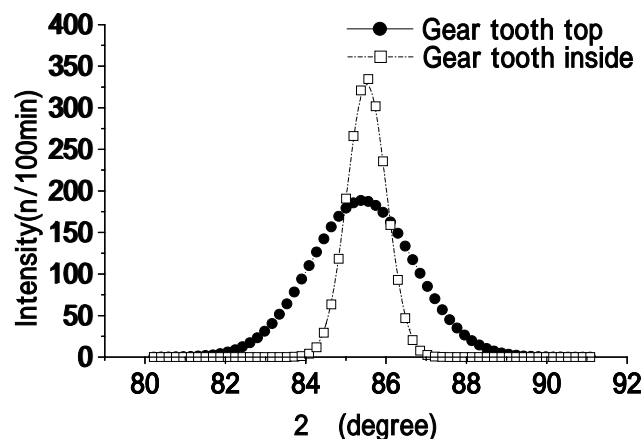


Fig.4 Diffraction profile of coupon material.

Table.2 に Fig.3 に示した平歯車の先端部と内部のクーポン材を測定することによって得られた  $\theta_0$  と  $d_0$  の測定結果を示す。結果より内部よりも先端部の方が、 $\theta_0$  が低角にシフトしており、 $d_0$  が広がっていることが分かる。また、Table.3 に本研究で使用したヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  を示す。浸炭窒化焼入れを施した材料を使った引っ張り試験ができなかったため、先端部には 0.8wt% 浸炭させ油焼入れ施した材料の  $E$  と  $\nu$  を、内部には熱処理を施していない材料の  $E$  と  $\nu$  を用いた。浸炭を行い、焼入れを行うと  $E$ 、 $\nu$  とともに小さくなる事が分かる。これらの結果より、外側、内側の両表面から 1.5mm 以下には先端部の  $d_0$ 、 $E$ 、 $\nu$  を、その他には内部の  $d_0$ 、 $E$ 、 $\nu$  を与えることとした。

Table2.  $\theta_0$  and  $d_0$  of the (211) plane.

Measurement conditions and result	Non-distortion diffraction angle $\theta_0$ (deg)	Non-distortion diffraction lattice spacing $d_0$
Gear tooth top	85.41809	1.174670
Gear tooth inside	85.51655	1.173578

Table3. Young's modular and Poisson's ratio of the (211) plane.

Physical property	Young's modular $E$ (GPa)	Poisson's ratio
Gear tooth top(Carbonizing 0.8wt% Oil quenching)	213.4	0.235
Gear tooth inside(Normal)	247.0	0.251

2.3 内部残留応力測定位置

平歯車の内部残留応力の測定箇所は Fig.5 に示す高さ 3mm の断面上で、内側表面から 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0mm の 18 点である。高さ 3mm とした理由は、中性子線の透過距離を短くするためである。ビームスリット幅は  $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  とした。

### 3. 研究成果

浸炭窒化油焼入れを施した平歯車の中性子回折法による(211)方向の残留応力測定結果を Fig.6 に示す。表面部では 3 軸方向とも圧縮応力が生じている。測定方向によって範囲は異なるが、内部では引張り応力が生じている。内側表面から 0~2mm までの圧縮応力は浸炭窒化処理を施したことにより、この層にマルテンサイト変態が生じ、変態膨張によって強い圧縮応力が生じたと思われる。2~4.5mm までは 3 軸方向ともに圧縮応力に比べれば小さな引張り応力が生じている。5mm 付近から周方向・軸方向が再び圧縮に転じている。この箇所は歯元に当たり、歯の内部では周方向、軸方向は全て圧縮残留応力が生じていることが分かる。このように形状の変化が残留応力に大きく影響していることが分かる。また 8mm 付近からは半径方向も圧縮に転じており、これは内側表面と同様、マルテンサイト変態による変態膨張によるものと思われる。これらの結果より、円柱などの単純形状<sup>2)</sup>と比較して、複雑な残留応力が生じていることが分かる。

### 4. 結論・考察

本研究では中性子回折法を用いて、平歯車の浸炭窒化油焼入れの内部残留応力の測定を行った。また、その予備測定として、マルテンサイト変態の体積分率や成分の異なる箇所の無ひずみ格子間隔  $d_0$  の測定を行った。これらの測定結果をシミュレーション解析結果と比較することにより、以下のことが分かった。

- (1) マルテンサイト変態の体積分率や材料成分が異なった焼入れ材の無ひずみ格子面間隔  $d_0$  を測定することにより、表面部と内部で  $d_0$  が異なることを明らかにした。
- (2) 平歯車の浸炭窒化油焼入れの内部残留応力は、表面圧縮、内部引張りであることを明らかにした。また歯の内部では、周方向、軸方向は全て圧縮応力となっていることを明らかにした。
- (3) 複雑形状である平歯車の浸炭窒化油焼入れ材料の内部残留応力を測定したことにより、熱処理だけでなく、形状が材料に及ぼす内部応力の影響を明らかにした。

以上のことから、中性子回折法を用いた、平歯車の浸炭窒化油焼入れの残留応力を明らかにした。今後は、より複雑な形状の機械部品の内部残留応力測定ニーズが高まることが容易に予測できる。機械部品は熱処理を施していることが多いため、内部組織分布の把握技術を向上させなければならないが、その方法の 1 つとしてシミュレーション解析の重要性が増してくると思われる。

今後はさらに測定精度を向上させるため、材料成分や組織の様々な割合でのヤング率やポアソン比などの材料データを測定・蓄積していく。

### 5. 引用(参照)文献等

- 1) 大和久重雄, 金属熱処理用語辞典, 日刊工業新聞社, P96(1985)
- 2) 向井竜二, 巨東英, 皆川宣明, 森井幸生, 盛合敦, 日本材料学会, Vol.53, No.9, pp.1030-1035, 2004, 中性子回折法と変態組織解析による焼入れ材の残留応力測定
- 3) R.MUKAI, T.MATSUMOTO, JU Dong-ying, T.SUZUKI, H.SAITO, Y.ITO, Modeling of numerical simulation and experimental verification for carburizing-nitriding quenching process, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume16 Special 1(Part B), s566-s571 (2006)

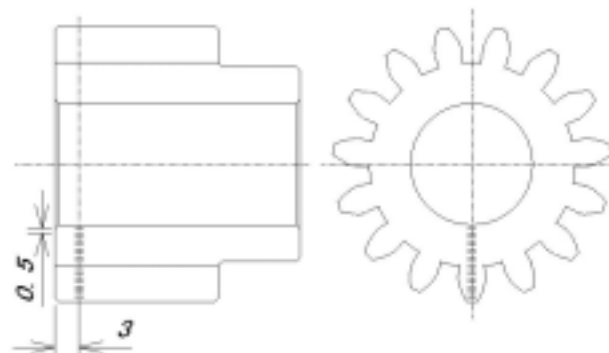


Fig.5 Residual stress measurement position.

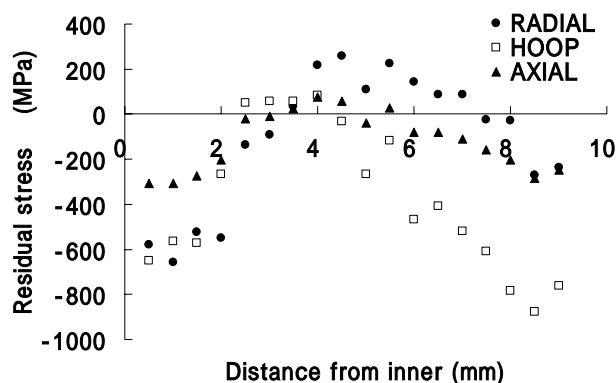


Fig.6 Residual stresses measurement result.