

連続式ガス浸炭炉による浸炭の研究 (第4報)*
円形状試験片形状の変化と残留応力について

筒井蛙声** 古元隆生**

Asei Tsutsui and Takao Furumoto: Study on Continuous Gas Carburizing Furnace (4th Report). Effects of Specimen Size on the Residual Stress of Circular Test Piece. Immediately following our 2nd report, the effects of specimen size on the circular test piece under a set treat condition (effective depth of carburizing 0.5 mm, quenched from 845° in oil) was observed by using SCM 21. In other words, the thermal, the transformation and the elasticity effects etc. on the residual stress caused by variation in the length of the circular test piece and the outer and inner diameter of disk- and annular shaped test pieces were observed. The results of this observation revealed that the maximum stress value of a solid and hollow cylinder decreased with the decrease of the length of the said cylinder. Also, the maximum stress value of disk- and annular shaped test pieces increased

** 東洋工業株式会社

* 1957年10月本会戸畑大会に発表

with increase of its outer diameter and the said value increased where the diameter of the test piece with a constant ratio(0.5) of the inner to the outer diameter increased. Further, the findings revealed the tendency of the maximum stress value to decrease when only the inner diameter increased.

(Received April 30, 1958)

I. 緒 言

第 2 報で SCM 21, 45φ×150 mm 試験片を連続式ガス浸炭炉で種々なる熱処理を施した際発生する残留応力について固形浸炭と比較した⁽¹⁾。これに引続き、熱処理条件の一定(有効深さ 0.5 mm 浸炭焼入れ)なる場合において、実用部品形状に近い円形状試験片形状の残留応力におよぼす影響を考察した。

試験片形状が変わると熱応力、変態応力などその重畳時期その他いろいろな意味で条件が異なると考えられ、応力分布応力値は変化する。

中空円筒長が短かくなると自由端における縁面(Stirnfläche)中空円筒においては縁面、輪のための固定端問題が、縁面には熱処理のあるいは力学的諸問題すなわち、熱的影響、変態の影響、弾性的影響などによって残留応力の発生は変化する。

試験片表面に浸炭焼入れした場合についてこれらの影響が長さとともにいかに変化するかを中実、中空円筒について、続いて円板、環状試験片における外径変化、 $\frac{\text{内径}}{\text{外径}}$ 比変化した場合について考察した結果を報告する。

II. 試験片および実験方法

連続式ガス浸炭炉処理頻度の高い SCM 21 の材料を使用した。その化学成分は Table 1 に示すごとく、あらかじめ素材の内部ひずみを除去する目的で試験片形状に荒加工後、880°(2 hr)で完全焼なましした。しかる後、所定の寸法に研削仕上げし、Table 2 に示す方法で有効深さ 0.5 mm の表面浸炭焼入れを行った。

Table 1

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.16	0.22	0.71	0.020	0.016	0.150	1.05

Table 2 Heat treatment.

Carbon (%)	Time schedule (min)	Carburizing temp.		Quenching temp. III °C	Oil temp. (°C)	Dew Pt. (°F)	Enrichment (m ³ /hr)
		I °C	II °C				
0.86	20	880	880	845	55	14	0.16

円板、環状試験片は平面ひずみと平面応力問題の中間に相当する形状であるから、この試験片の残留応力を正確に解析することは困難である。したがって、長さを異にする中実、中空円筒においては第 2 報⁽¹⁾に述べる Sacks のせん孔法である外削りと内削りの組み合わせ法を採用した。円板環状試験片ではこの複雑な方法にかえて 1 次元法で簡単に解析した。もちろん、これらの 1 次元法で計算した応

力は 3 次元的応力によって発生する真の応力よりも精度は低い。比較的簡単に求められるからかかる方法によつた。

著者は Sachs⁽²⁾、服部⁽³⁾、西原、遠藤⁽⁴⁾、岡林、砂原⁽⁵⁾ 氏の述べる 1 次元外削り法に同様な考え方から導ける内削り法を組合わせて内部リング面の応力を求めた。

すなわち、内径 a 、外径 b なる円環体において内径 r に内部から圧力が作用して外壁に起る円周方向ひずみが θ である時、このような問題の解はよく知られているよう⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾に

$$\sigma_r \text{ 内} = \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \theta \tag{1}$$

である。ここに E はヤング係数 (2100 kg/mm²)

軸に対称な変形において試験片内部のつりあい条件は

$$\frac{d\sigma_r}{\sigma_r - \sigma_t} + \frac{dr}{r} = 0 \tag{2}$$

よつて、

$$\sigma_t \text{ 内} = \frac{E}{2} \left\{ \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) r \frac{d\theta}{dr} - \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \theta \right\} \tag{3}$$

次に内径 a_1 まで削つて外削り法を適用する。内周ひずみを θ' とすると

$$\sigma_r \text{ 外} = \frac{E}{2} \left(\frac{a_1^2}{r^2} - 1 \right) \theta' \tag{4}$$

であるから(2)式より

$$\sigma_t \text{ 外} = \frac{E}{2} \left\{ \left(\frac{a_1^2}{r^2} - 1 \right) r \frac{d\theta'}{dr} - \left(\frac{a_1^2}{r^2} + 1 \right) \theta' \right\} \tag{5}$$

となる。しかるに 1 個の試験片において内削り法と外削り法を組合わせる時は、外削り法を適用する部分にはすでに内削り法で削られた部分に相当する応力が除去されている。その除去量は半径方向で

$$\begin{aligned} \sigma'_r &= - \int_{r=a}^{a_1} d\sigma'_r = - \int_{r=a}^{a_1} \left\{ - \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \right\} d\theta \\ &= \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \theta_{r=a_1} \end{aligned} \tag{6}$$

接線方向において

$$\begin{aligned} \sigma'_t &= - \int_{r=a}^{a_1} d\sigma'_t = - \\ &= - \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \theta_{r=a_1} \end{aligned} \tag{7}$$

(2) G. Sachs u. Kent, R. Von Horn: 加工冶金学(上巻) p. 150.

(3) 服部, 林: 本誌, 19(1955), 283.

(4) 西原, 遠藤: 日本機械学会論文集.

(5) 岡林, 砂原: 本誌, 17(1953), 322.

(6) Timoshenko: *Theory of Elasticity*, (1951), 55.

(7) 応力測定技術研究会編: 応力測定法, p. 360.

(1) 1958 年本誌投稿中

となるから結局外削り応力として

$$\sigma'_{r \text{ 外}} = \frac{E}{2} \left(\frac{a_1^2}{r^2} - 1 \right) \theta' + \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \theta \quad (8)$$

$$\sigma'_i = \frac{E}{2} \left\{ \left(\frac{a_1^2}{r^2} - 1 \right) r \frac{d\theta'}{dr} - \left(\frac{a_1^2}{r^2} + 1 \right) \theta' \right\} - \frac{E}{2} \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \theta \quad (9)$$

となる。すなわち (1), (3) 式で内削りの (8), (9) 式で外削りの応力が決定しうる。

ひずみの測定法はすでに第 2 報に報告したとおりで試験片長中央のひずみを共和無線製ストレンメータ (10⁻⁶) にて測定した。詳細は 2 報を参照されたい。

III. 実験結果

1. 冷却面が残留応力におよぼす影響

残留応力は冷却法に大きく左右されることから、内部に冷却面を有する中空円筒は中実円筒とその分布模様は異なる

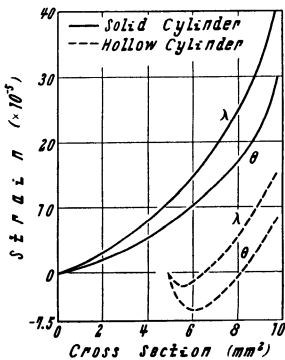


Fig. 1 Comparison of strain obtained by machining from the inner surface in solid cylinder and hollow cylinder.

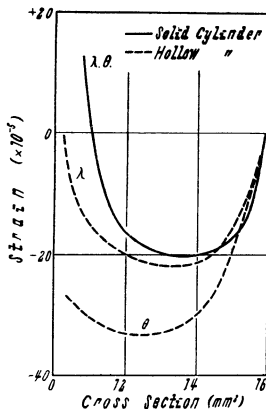


Fig. 2 Comparison of strain obtained by machining from the inner surface in solid cylinder and hollow cylinder.

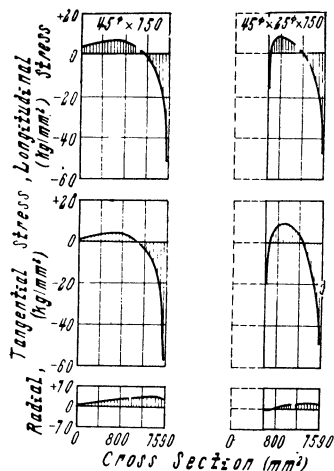


Fig. 3 Comparison of residual stress in solid cylinder and hollow cylinder.

る。45φ×150 mm 試験片に 25φ の孔をあけた中空円筒に内外周有効深さ 0.5 mm の浸炭し、油焼入れした結果を同形の中実円筒と比較した。

Fig. 1 に内削りの、Fig. 2 に外削りのひずみ変化過程を示す。Fig. 3 にその応力分布を示す。中実円筒においては熱応力型に変態応力型を重畳したとき分布を示すに対し、内周に冷却面を有する中

空円筒は内周に圧縮の残留応力を (特にことわりがない限

り接線方向を示す)、中間部に引張応力を示す熱応力型の分布に残留していた。これらの応力発生機構は内外冷却面を有する当然の結果で先人の研究報告から容易に類推し得られる。表面浸炭し油焼入れしている関係上 Fuchs⁽⁸⁾ が解析している分布にくらべ浸炭部は急勾配に圧縮値は増加している。

2. 中実, 中空円筒長さの残留応力におよぼす影響

試験片の縁面が応力の発生に影響する点についてすでに Bühler⁽⁹⁾ らの報告がある。その結果直径の 2~2.5 倍以上の長さを有すれば平面ひずみ状態であると述べている。著者は実用上の問題から比較的短い試験片についてしかも浸炭した場合について縁面の弾性的、熱的、変態的、時間的等の諸影響を考察した。

(イ) 熱処理後の切断による残留応力の変化

45φ×150 mm の中実円筒を Fig. 4 のごとく 50 mm, 20 (中央), 20 (縁部) に放電切断した。50, 20 (縁部) 試

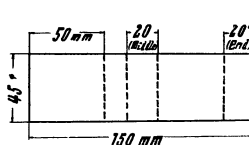


Fig. 4 Cutting position of solid cylinder after heat treatment.

験片には熱処理前の縁面がそのまま残っている。切断しない長さ 150 mm 試験片と比較した結果を Fig. 5 に示す。

軸方向、接線方向において内部に引張応力を外周部に圧縮応力を残留しているが試験片

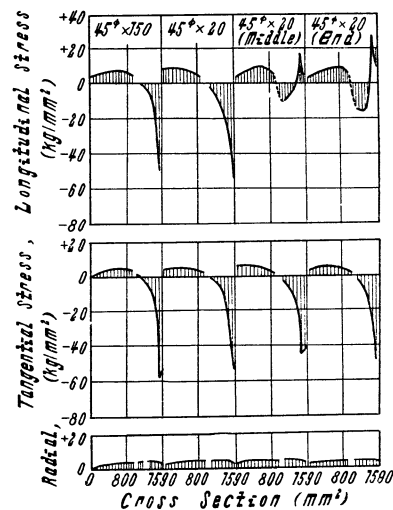


Fig. 5 Effect of cutting on residual stress in solid cylinder.

巾 20 mm $\frac{L}{D} = 0.44$ の軸方向に異状分布を示した。

(ロ) 中実円筒 (円板を含む) 長さの残留応力におよぼす影響 (縁面浸炭除去)

45φ 直径の中実円筒長さ 150, 80, 50, 20 mm の試験片に前記の熱処理を施した場合の結果を Fig. 6 に示す。

(8) S. Fuchs : Mitteilungen Forschungs-Institute, **3** (1933), 199/234; H. Buchholty u. H. Bühler: Arch. Eisenhütt., **7**(1933/34), 315/17.

(9) H. Bühler: Arch. Eisenhütt., **23**(1952), 1229.

軸方向、接線方向ともに同型分布模様を示し、その表面最高圧縮応力は試験片長の減少とともに減少の傾向にある。45φ×20 mm 試験片軸方向においては前例同様異常を示し表面に引張応力が発生している。L/D = 1 程度では縁面の熱的、変態的効果はさ程現われな

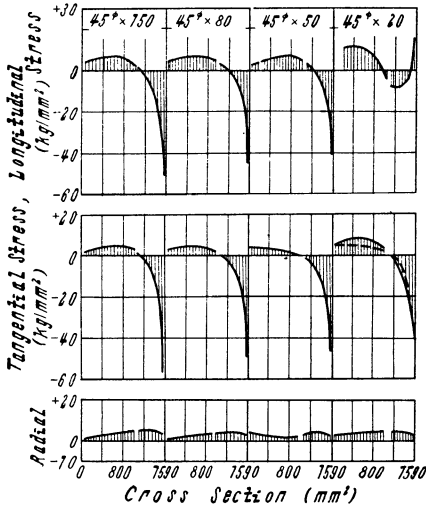


Fig. 6 Effect of length on residual stress in solid cylinder.

約 70% に減少している。縁面効果は一層助長されていた (点線は 1 次的に計算)。

(ハ) 中空円筒 (環状を含む) 長さの残留応力におよぼす影響 (縁面浸炭除去)

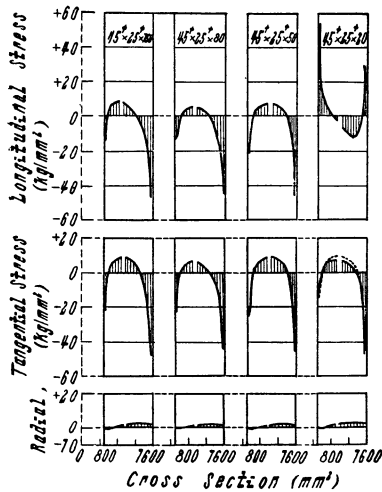


Fig. 7 Effect of length on residual stress in hollow cylinder.

45φ 直径の中空円筒長さ 150, 80, 50, 20 mm の試験片について同様解析した結果 Fig. 7 に示すごとく、中空円筒同様最高応力は減少の傾向にある。減少の程度は中空円筒よりも少く、L/D = 0.44 試験片で約 85% 程度である (点線は 1 次的に計算)。

(ニ) 長さの残留応力におよぼす影響 (全面浸炭)

円筒において直径に対する長さが比較的に長い時、縁面における浸炭効果は試験片中央の応力分布に大きな影響をもたらさないと考えられる。試験片長が短くなると縁面の浸炭が応力分布に一層効果的に影響をおよぼすと考えられる。

著者らは比較的に長さの短い 45φ×20, 45φ×10, 45φ×5 の 3 種の試験片について 1 次的に解析した結果を比較

した。これらの結果は Fig. 8 に示すごとく、L/D=0.22 程度では大差は認められないが L/D=0.11 すなわち、5 mm 巾試験片になると最高応力値は相当減少し 20 kg/mm² 程度となつた。円筒試験片熱処理後切断した際に除去されるいわゆる弾性的影響と所定寸法に加工後熱処理した時の熱的変態的影響などは大体等しく、L/D=0.44 程度の試験片では最高圧縮応力の減量は約 30% であつた。これに反

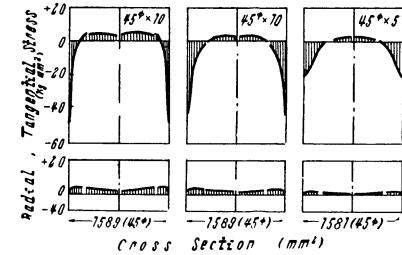


Fig. 8 Effect of length on residual stress. 全面浸炭した長さの短い場合にも減少の傾向は同じである。

3. 浸炭処理位置の残留応力におよぼす影響

45φ×20 mm の円板環状試験片表面に浸炭しない、有効深さ 0.5 mm の周面浸炭、全面浸炭の 3 処理を行つて焼入れた場合 1 次的に解析した結果は Fig. 9, Fig. 10 に示す

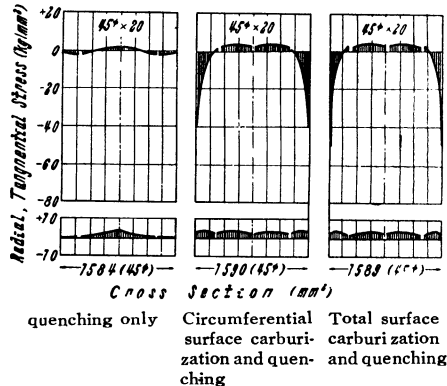


Fig. 9 Effect of carburized position on residual stress in disk.

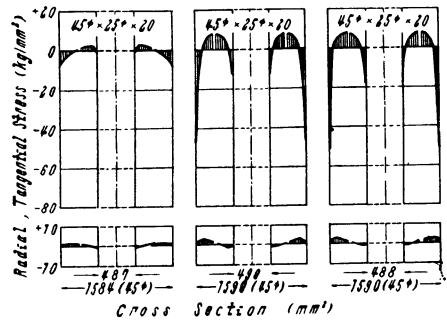


Fig. 10 Effect of carburized position on residual stress in ring.

通りである。焼入れのみの場合には試験片内外の応力変化は比較的に少ないが、周面浸炭し焼入れた場合には浸炭部に相当する位置に最高 40 kg/mm²、あるいはそれ以上の応力を発生している。全面浸炭焼入れにおいては縁面浸炭の 3 次的効果によつて最高応力値は増加の傾向にある。

4. 内外径変化の残留応力におよぼす影響

試験片長が短くなると縁面の諸影響の結果として最高応力値は減少する結論を得た。板状・環状試験片の内外径を変化せしめた場合について検討する。

(イ) 外径の残留応力におよぼす影響

巾 20 mm に一定し、外径を 40 φ, 60 φ, 80 φ と変えた 3 種の試験片に 0.5 mm の前面浸炭を施し, 845° から油中に直接焼入れした。Fig. 11 から明瞭なとおり最高応力値は外径の増加とともに 50 kg/mm² から 60 kg/mm² に増加し, 内部引張応力の分布は変態型から熱応力型に変わる分布を示した。表面浸炭しており試験片長が比較的小さいので Böhler⁽⁹⁾ 等の理想試験片の結果と直接の比較にはならないとしても, 結果の傾向は十分比較しようと考えられる。

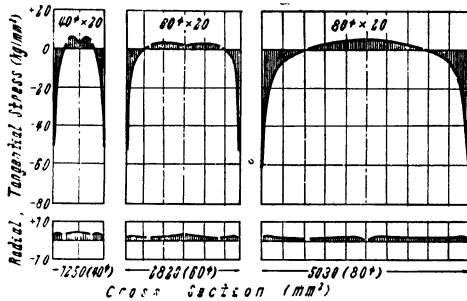


Fig. 11 Effect of diameter on residual stress.

3 種の試験片では

$$L/D \text{ が } \frac{20}{40} = 0.5, \frac{20}{60} = 0.33, \frac{20}{80} = 0.25$$

となり, 試験片長 22.5 mm, 14.8 mm, 11.5 mm に相当するから Fig. 6, Fig. 8 の応力分布に匹敵する。したがって, L/D の影響からすれば当然最高応力は減少するはずであるにもかかわらず増加している。径がさらに増すと L/D は小さくなり最高応力は減少するとも考えられるが, 今回の実験範囲内では最高圧縮応力は増加すると考えられる。

(ロ) 内径比の残留応力におよぼす影響(比 0.5 の場合)

40 φ × 20 φ × 20, 60 φ × 30 φ × 20, 80 φ × 40 φ × 20 3種の試験片に有効深さ 0.5 mm の全面浸炭焼入れした場合の結果は Fig. 12 に示すごとく, 冷却面に相当する位置に圧

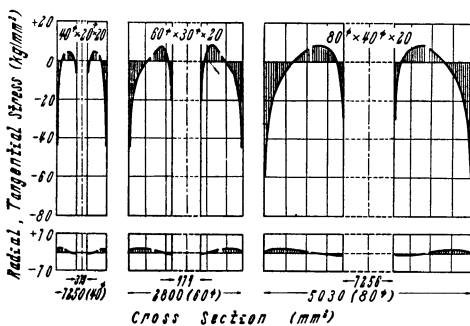


Fig. 12 Effect of diameter on residual stress.

Case of $\frac{d}{D} = 0.5$

縮応力を肉厚内部に引張応力を残留する熱応力型分布を示している。内外周浸炭部に発生する最高圧縮応力は径の増加とともに増加の傾向を示し, 内周部では 7~30 kg/mm²

外周部では 45~60 kg/mm² に増加している。

この種の試験片においては L/D は 0.5, 0.33, 0.25 となり径の増加とともに応力値は減少する傾向にあるが, それ以上径の増加による熱的影響が大きく, 最高応力値は増加すると考えられる。

(ハ) 内径比の残留応力におよぼす影響(比 0, 0.5, 0.75 の場合)

60 φ × 20 mm 試験片とこれに 30 φ, 45 φ の孔を開けた 3 種の試験片に 0.5 mm 浸炭焼入れした場合, その応力分布は Fig. 13 に示すごとく最高応力値は比の値の増加とともに幾分減少を示し, 内部においては比 0 の場合は引張応力を有し, 内部に冷却面を作ると圧縮応力に変化する。内径が比較的小さい時は内面の冷却が不十分で引張塑性の程度は少なく, したがって僅かの圧縮応力を発生するのみである。 d/D がある程度大きくなつて, 試験片の冷却状態と肉厚のある関係に達した時に内周面の圧縮応力は最高となり d/D がそれ以上大きくなると熱応力的効果は少なく, 内周面圧縮応力は減少するのではないかと考えられる。

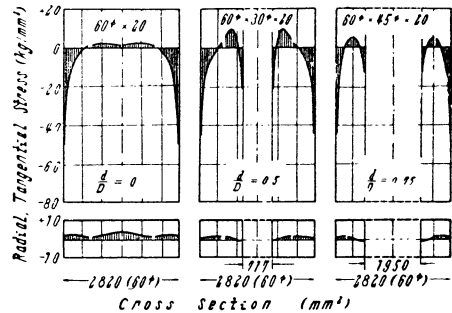


Fig. 13 Effect of $\frac{d}{D}$ on residual stress.

Case of $\frac{d}{D} = 0 : 0.5 : 0.75$

IV. 総 括

連続式ガス浸炭炉における熱処理条件を一定として, すなわち, 有効深さ 0.5 mm に浸炭焼入れした場合, 円形状試験片の寸法変化と応力の変化を考察した。その結果

- (1) 中空円筒は中実円筒と異なり内周冷却面にも圧縮応力を肉厚の中心部に引張応力が発生している。
- (2) 中実, 中空円筒の長さを短くすると, 弾性的, 変態的, 熱的影響によつて
 - (イ) 中実円筒 (円板を含む) では ($L/D=0.44$) 約 30 %
 - (ロ) 中空円筒 (環状を含む) では ($L/D=0.44$) 約 15 %
 最高残留応力は減少した。熱処理後の切断による応力の除去は (イ) と同傾向である。
- (3) 円板状試験片外径増加とともに最高圧縮応力は増加する傾向である。
- (4) 内径比一定にして径を増すと内外周冷却面の最高圧縮応力は増す傾向にある。
- (5) 内径比(一定)比が増すと最高圧縮応力は減少の傾向にある。