研 究

炭素鋼の層状のセメンタイト量が加工層に
およぼす影響 (第2報)*

—平面研削した場合—

貴志浩三** 江田 弘**

Influence of Lamellar Cementite on Machined Surface Layer in
Carbon Steels (2nd Report)

—In the case of Surface Grinding Operation—

Kozo KISHI, Hiroshi EDA

In the previous paper, it is investigated the effect of lamellar cementite to experimentally make clear the machinability factors which affect significantly cutting results such as residual stresses and produced structure in machined surface layer. This paper describes the effect due to cementite content for grinding force, surface roughness, furthermore elastic-plastic deformation and produced structure in machined surface layer. As a result, grinding force, surface roughness and residual stresses in finished surface shows the optimum value at the volume fraction of 3.0×10^{-2} cementite and in steels containing $6.0 \times 10^{-2} \sim 7.5 \times 10^{-2}$ cementite a higher value, lowering in steels with more than containing 7.5×10^{-2} cementite. As the cementite content is increasing, residual stresses and plastic deformation in machined surface layer decrease gradually. Therefore, the orthogonal cutting and surface grinding shows a similar tendency on them.

1. 緒 言

研削加工の加工層の残留応力を層状セメンタイトの比体積のことなる各種鋼について比較検討するのが本研究の主たる目的である。すなわち研削加工した表面は研削焼けや熱き裂を生じたり^{1),2)}、中低に³⁾なることがある。この原因は研削点近傍で研削熱を衝撃的に受け急激な熱応力の発生のため、その周辺と応力の平衡が破れることに起因する。そのため研削後、研削表面の応力分布がむらになって製品がねじれたり、ゆがんだりする。

また金属組織的には残留オーステナイトのマルテンサイト化および炭化物の分解と破壊⁴⁾などによる影響もみのがせない。これらの現象は製品に対して遅れ変形を誘起し、ひいては形状誤差を生じ、部品の組立と接触面のなじみを悪化させる。

したがって加工層は材料の疲労強度、耐食性、耐摩耗性などの物理的・化学的な性質に対して大きな支配的要素となつてあらわれる。そこでこれらの支配的要素となる研削加工層の性状を知るため各種研削条件における加工層の残留応力分布ならびに塑性流動の状況をとらえる。一方、組織的には加工層のフェライト相と層状セメン

タイトの挙動をしらべ、前述のことがらを知るうえに必要な基礎資料を得ることを目的とした。

表1 研削条件

砥 石	WA 46 HmV
砥 石 周 速 度	1820 m/min
工 作 物 速 度	5, 10, 15 m/min
砥 石 切 込 み	10, 25, 50, 70 μ
研 削 液	なし
ドレッサの送り速度	1.1 m/min
ドレッサの切込み	20 $\mu \times 2$ 回
使 用 機 械	岡本製精密平面研削盤 (PSG-6F)

図1 試験片の取り方

*原稿受付 昭和45年5月26日。昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和44年10月11日)にて発表。

**正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町 2753)。

2. 実験装置と方法

実験は横軸角テーブル形の平面研削盤（岡本製作所 P SG-6 F）を用い、表 1 に示す研削条件のもとで実施した。試験片は炭素量のことなる 8 種の鋼を用い、入念に鍛造し結晶粒の調質および拡散処理を施した直径 60 mmφ の素材から図 1 に示すような形状に切りだした。

つぎに実験に際して砥石切込みを一定にするため、あらかじめ所定の位置に試験片を取付けた状態で平面度をだした後、各種の鋼について前報で示したと同一条件で熱処理を行なった。

研削抵抗は C. T. Yang⁵⁾ の研削動力計に関する設計方式を応用し、試作した動力計で測定した。実験に用いた研削動力計の二、三の特性値は接線方向のばね定数、 $K_H=450 \text{ kg/mm}$ 、法線方向のばね定数 $K_V=630 \text{ kg/mm}$ 、固有振動数 $f_n=850 \text{ Hz}$ 、の設計値を有するものである。加工層の残留応力、かたさ、仕上面あらさの測定および加工層の組織の観察は前報と同一手法によって行なった。また、研削表面の残留応力は研削表面の位置によって差がみられ、研削面中央でもっとも大きくなり、研削後にあらわれる研削面の中低をうつしとったような変化となる³⁾。ここでこの測定は研削幅中央、研削終端から 10 mm 入った位置について行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 フェライト中の セメントタイト量と 加工層の残留応力

研削加工による残留応力は研削抵抗、研削熱によって大部分は支配されると述べられている。とくに研削熱は研削表面のき裂破壊や加工層の組織におよぼす影響が大きいので、この研削熱をいかに少なくするかについて多くの検討がなされてきた。とりわけ残留応力は実用上とくに問題となるので、従来より研削条件との関係をとらえることに重点がおかれている。

図 2 は同一研削条件でセメントタイト量のことなる鋼の加工層の残留応力分布を示している。セメントタイト量が少ない場合には研削表面の残留応力は引張り側にあらわれているが、その量が増加するにつれて圧縮側に次第に移行する。図中の●印は研削方向の応力で、○印の研削方向に直角な方向の応力に対し、つねに引張り側にあって変化している。そして、この変化はセメントタイト量が少ないほど一様に深くなるが、大きな差は認められず、セメントタイト量の多少にかかわらずその到達深さは研削表面下 150~200 μ に至り、その範囲で残留応力は 25~ -25 kg/mm^2 の値をとる。

一般に切削、研削加工する場合には、工作物は工具によって除去される以前にまず弾塑性変形する。したがって、フェライトがマトリックスの大半を占めるような場合、フェライトは破壊される前にまず圧縮の弾塑性変形を受け、つぎの瞬に工作物表面から切りくずを排出する。そして生成した加工層には著しい弾塑性変形が生じる。この塑性流動が著しい場合には加工層の研削表面に隣接した位置に繊維組織が生成する。もし、このような効果が働くものとすれば、工作物は砥粒によって常に圧縮されているから、切りくず分離後の研削表面には引張りの残留応力が生じることになる。これに対して、セメントタイト量が増大すると研削力におよぼす変形抵抗はセメントタイトによって支配されるようになるから、層状パーライト相がマトリックスの大半を占めるようになると、層状セメントタイトにはさまったフェライトの変形はセメントタイトによって左右されることになる。したがって著しく高い変形抵抗を有するセメントタイトはフェライトにその変形をゆだねるために、その間にはさまっているフェライトはすべり変形を起し、研削方向に引き伸ばされる。つまり研削表面近傍に位置する層状セメントタイトはその下に位置するセメントタイトに比べ、より流動が大きいから、次第に下層に向うにつれて層状セメントタイトの間にはさまっているフェライトの変形は減少す

図 2 加工層の残留応力分布

図3 研削表面の残留応力

る。このように加工層のセメンタイトは研削表面に近くにつれて研削方向に引き伸ばされて流動するから、その間にあるフェライトはそれに伴って引張られる。そのため層状セメンタイト量が増加するほどその層状セメンタイトの間のすべり変形抵抗が大きくなるから、次第に圧縮の残留応力になるものと考えられる。

研削加工による研削表面のき裂破壊は大部分は研削表面から内部に進行するものであって、内部にき裂が起こり、それが破壊に結びつくことはほとんど考えられない。したがって研削表面の残留応力は部品の疲労破壊や耐摩耗性および耐食性に対し、もっとも大きな影響を与える。図3はセメンタイト量に対する研削表面の残留応力の変化を示している。図中実線で示す研削方向の残留応力はセメンタイト量 $7.0 \times 10^{-2} \sim 9.0 \times 10^{-2}$ の範囲で増大し、変曲を示す。しかし、工作物速度が減少するとこの変化は小さくなり、セメンタイト量が増大するにつれて次第に減少する傾向を示す。これに対し、研削方向と直角な方向の残留応力はセメンタイト量 $3.0 \times 10^{-2} \sim 4.0 \times 10^{-2}$ の範囲で一たん減少し、 $7.0 \times 10^{-2} \sim 8.0 \times 10^{-2}$ の範囲で再び変曲を示し、残留応力が大きくなった。この様子は研削抵抗、仕上面あらさにあらわれる変化とよく似ており、セメンタイト量 $3.0 \times 10^{-2} \sim 4.0 \times 10^{-2}$ で一たん減少し、 $7.0 \times 10^{-2} \sim 8.0 \times 10^{-2}$ で増大する。つまり図4、5に示すようになる。このようにマトリックスに固溶している第二相粒子がフェライト相に占める割合を

図4 研削抵抗

図5 仕上面あらさ

変化すると、研削面の残留応力のみならず、研削抵抗、仕上面あらさにも変化があらわれる。この研削方向と直角な方向の研削表面の残留応力は砥石切込み量 70μ の場合、二次元切削の切削表面の残留応力の変化とよく似た変化を示すのに対して、砥石切込み量が 10μ の場合に、フライス削りの切削表面の残留応力と似た変化を示した。

また、工作物速度と砥石切込み量による影響は工作物速度、砥石切込み量を増すにつれて、研削表面の残留応力は増大する。工作物速度、砥石切込み量を小さく選ぶと、圧縮残留応力を示すようになる。つまり、砥石切込みが小さいとき、工作物速度が低いとラッピングによる影響があらわれると思われる。

3.2 加工層と研削くずの組織

研削点における研削現象はランダムな寸法形状の砥粒切れ刃による瞬間的な切削作用であるために、研削温度の完全な解析はきわめて困難であり、その理論的取扱いは多くの仮定を必要とする。また、実験的にふく射温度計やカロリメータおよび熱電対などを用いて測定する方法がとられているが技術的にかなり問題がある。単に研削温度といってもいろいろな考え方があり、理論値や実験値がどのような意味をもった値か確かめないと非常にあいまいになる恐れがある。したがって現在ではこれらから検討した研削温度と金属組織的な変化からみた研削温度にはかなり差がある。そこで、これらと平行して研削温度を解析する手段として、加工層と高温に加熱後冷却される切りくずの組織の変化から帰納的に観察するために、加工層と切りくずがどのような熱的状态にさらされたかを金属組織学的に観察すれば、これがどのような過程を経てきたかということを考察できるはずである。ここに、まず研削温度を知る基礎的な資料を得る意味で、とりあえず加工層と切りくずの組織の変化を調べることとした。また、切りくずの組織についてはその形態によって他の金属組織にみられない組織⁶⁾を示すので、この点についても考察する。

図6はセメンタイトの比体積 1.0×10^{-2} 、 7.4×10^{-2} 、 14.1×10^{-2} の研削くずを示したものである。セメンタイ

図6 研削くず

工作物速度: 5 m/min
砥石切込み: 70μ
($\times 50$)

ト量が少ないと連続流れ形の切りくずが多く、セメンタイト量が增大するにつれて、研削くずの中に脱落した砥粒がみられるようになり、切りくずはむしれ形や球状になった溶融形の切りくずがあらわれる。溶融形は図中の矢印に示すように球状になっている。これは研削熱によって溶融し、研削後急激に冷却されるために、大きな表面張力が働き、これによって、球状になったものと考えられる。

したがって、研削熱の影響を受けた切りくずと研削点近傍の炭素は空気中の酸素* あるいは酸化鉄**と化合して燃焼するから、切りくずと研削表面の炭素量は減少するはずである。切りくずの炭素量の減少を調べるために工作物マトリックスの炭素量 Φ 、切りくずの炭素量を ϵ として、切りくずの炭素減少率を $\zeta = (\Phi - \epsilon) / \Phi$ として表わし、セメンタイト量との関係を図7に示した。炭素量が少ない場合 ζ は数%の減少にすぎないが、セメンタイト量 6.0×10^{-2} 付近になると ζ は 50% も減少している。またこの研削熱によって切りくずおよび研削表面近傍の鉄は高温に加熱され酸化物を作っている。図7と同一研削条件で、工作物速度 5 m/min の場合、加工層の研削表面下約 100μ までオーステナイト系ステンレス鋼(炭素含有量 0.08%)の刃物を使用して削り取り、その部分について炭素量の減少率を測定したところ、0.97% C の場合 4~8% の減少を示し、その間においては直線的に減少し 0.97% C においてこの点に至る。

鉄は 570°C 以上で酸化すると、酸化物層を作りその約 90~98% は FeO (Wüstite) で、その層の上に数%の

図7 炭素量減少率

*研削表面の酸素濃度に関しては1次反応である。 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 94.3 \text{ kcal}$ また Meyer⁷⁾ は

の反応機構を示している。

** $2\text{FeO} + \text{C} = 2\text{Fe} + \text{CO}_2$

セメンタイトの比体積: 1.1': 1.0×10^{-2}
 2.2': 7.4×10^{-2} , 3.3': 14.1×10^{-2}
 工作物速度: 5 m/min, 砥石切込み: 70μ ($\times 400$)

図 8 加工層と切りくずの組織

Fe_3O_4 (Magnetite) と微量の Fe_2O_3 (Hematite) を生ずる。ところがヴスタイトは他のマグネタイトやヘマタイトに比べ空気中では不安定なために、マグネタイトとヘマタイトになりやすい。したがって研削後の研削表面とそれから分離した切りくずには αFe 、マグネタイトおよびヘマタイトが見られる。研削後の加工層と切りくずの顕微鏡組織の一部を図 8 に示した。セメンタイト量 1.0×10^{-2} のときはその右図に示す連続流れ形の切りくずが多い。また、セメンタイト量 7.4×10^{-2} のときは溶融形が比較的多くみられる。また、セメンタイト量 14.1×10^{-2} になると、図に示すようなむしれ形の切りくずが生じる。溶融形の切りくず組織には層状セメンタイトがほとんど観察されず、流れ形やむしれ形の組織とかなり異なっている。また、表面の光沢は無色である。そこで、砥粒、セメンタイト、フェライトおよび溶融形の切りくずかたさ (H_V) を測定してみると、砥粒 (Al_2O_3) 2100、セメンタイト 1250、フェライト 120 および溶融形の切りくずは 500 程度のかたさを有した。溶融形切りくずのかたさは加工層の研削表面のフェライト相のかたさの約 2 ～ 3 倍近い値に相当する。このような高い値をもつことについて本報における実験結果からはっきりした結論を示すことはできないが、前記の αFe と酸化鉄の層に関係すると思われる。もちろん、このかたさの増加は冷却効果が大きく作用している。

セメンタイトの比体積: 7.4×10^{-2}
 工作物速度: 5 m/min, 砥石切込み: 70μ

図 9 溶融形切りくずの組織

球状になった切りくず内部は中空になっている場合が多い。電子顕微鏡で観察すると、図 9 に示すごとく光学顕微鏡で観察された結晶粒はその内部でさらに微細な結晶粒に分かれており、これらが集合して一つの結晶粒を形成している。他の流れ形、むしれ形、せん断形の切りくずの組織は、フェライト相に著しいすべり度形がみとめられ、それに隣接するセメンタイト相がフェライト相のすべり方向に層を形成して平行に流動している。すなわちフェライトのすべり帯と層状セメンタイトの断熱帯*が生じ、いわば断熱すべり帯があらわれ炭化物は完全に切りくずのすべり帯に沿って板状に流出する。そしてフェライトの部分は再結晶組織を呈す。一方、加工層の組織についてはこのような微細結晶粒の集合組織はみられず、研削表面に近づくにつれてち密な繊維組織が観察された。また加工層の塑性流動はセメンタイト量が増加するにつれて漸次減少する。たとえば、図 10 に示すようにセメンタイト量 1.0×10^{-2} の場合数 10μ も流動するのに対し、 14.1×10^{-2} になると数 μ の流動を示すにすぎない。

4. 結 言

鋼の標準組織であるフェライトと層状セメンタイトの占める比体積の割合が平面研削した加工層に与える影響を残留応力および金属組織より検討した結果、つぎのようなことが明らかとなった。

1) 加工層の残留応力はセメンタイト量が増大するにつ

*この組織は、高速切削にあらわれることは指摘されている。フェライトのすべり帯に隣接したセメンタイトの集合組織で層状セメンタイトより広い帯を示すので熱伝導を低下させる。

セメンタイトの比体積 14.1×10^{-2} セメンタイトの比体積 1.0×10^{-2}

図 10 加工層の層状セメンタイトの変形 (工作物速度: 5 m/min, 砥石切込み: 70 μ)

れて引張り側から圧縮側へ漸次移行する。これは研削表面下 150~200 μ の範囲まで続き、セメンタイト量が減少するにつれて深くまで分布する傾向を示す。

2) 研削表面の残留応力はセメンタイト量 3.0×10^{-2} ~ 4.0×10^{-2} と 7.0×10^{-2} ~ 8.0×10^{-2} の範囲で増減する。

3) 加工層の変形組織は残留応力の分布深さからみた深さと著しく差を示し、応力分布深さの 1/4~1/8 程度である。

4) 加工層の表皮 100 μ における 0.97% C の炭素量は 4.0~8.0% 減少率を示すが、切りくずの減少率は 70~80% も減少する。

5) 加工層の研削表面に隣接するフェライト相のかたさは、むしろ形、流れ形、せん断形のかたさ (H_v) とほぼ同一で 230~250 になるが、溶融形のかたさは 500 程度になる。

6) 加工層の研削表面近傍の組織はち密な繊維組織となり、セメンタイト量が少ないと著しく流動する。この組

織は切りくずには認められない。

5. 文 献

- 1) H. Opitz, K. Gühring: High Speed Grinding, 17th CIRP General Assembly Ann. Arbor, September (1967) 84.
- 2) 高沢孝哉: 研削加工変質層におよぼす研削液の効果 (第1, 2報), 砥粒加工, **3**, 11 (1959).
- 3) 貴志浩三, 江田 弘: ジェット注液研削の研究, 機械学会講演論文集, **700**, 7 (1970) 101.
- 4) S. Hori, K. Kishi: Influence of Carbide Dispersion on Strengthening and Fracture in Spheroidized Steels, Proc. Inter. Cont. Strength Metals and Alloys, Supl. Tr. JIM **9** (1968) 986.
- 5) C.T. Yang: Design of Surface Grinding Dynamometer, Trans. ASME Feb. (1968) 127.
- 6) 貴志浩三, 江田 弘, 橋内良雄: 研削切りくずの金属組織学的観察, 機械学会講演論文集 **700**, 5 (1970) 89.
- 7) L. Meyer: Der Mechanismus der Primärreaktion zwischen Sauerstoff und Graphit, Z physikal chem Abt. B. Bd. 17, Heft 6.