鑄鉄の摩耗に及ぼす残留応力の影響について

竹 内 栄 一*

Effects of Residual Stress on Wear of Cast Iron

Eiichi TAKEUCHI*

The abrasion test was conducted on samples of cast iron, produced by various methods and annealed at various temperatures, with a rotor made of pearlite matrix annealed at 550°C. The following results were obtained.

- 1) The residual stress of the specimen produced in gravity green sand mold (specimen mark; L) was greater than that of specimen in dry sand mold (Q) by centrifugal casting. The residual stress gradually decreased with the rise of annealing temperature when it was below 450°C; however, the stress was rapidly removed at 450~550°C.
- 2) The relation between annealing temperature and wear loss was examined. Under the condition of the wear with mechanical rupture, the minimum wear loss was observed at 450~550°C in specimen L, or at 550~600°C in Q.
- 3) When residual stress increased to a certain value, rapid increase of wear loss was observed. The critical value of the residual stress was called "Critical residual stress for wear."

1. 緒 言

一般に、鑄鉄は鑄造の際の冷却速度のいかんにより鑄造応力が残留し、これが長時間経過するときはヒズミとなって現われてくるため機械類の精度低下をきたすことが広く知られている。したがって通常の場合は、応力を除去するために長期にわたり屋外に放置しておく、いわゆるシーズニング法を行なうか、あるいは500~600°Cの比較的低温で焼ナマシを施し、あらかじめ応力をヒズミに変えたのち工作を行なう方法が採られてきた^{1),2)}。

しかしながら、かかる経年変化を防ぐことを目的として行なわれる低温焼ナマシは、著者らの研究によると鑄鉄の耐摩耗性の向上にも極めて効果的であることが認められた³⁾。すなわち、一般論的にいって、残留応力を保有する鑄鉄はそれがいかなる形態のものであっても硬化現象をとまらな反面、結晶格子が歪んだ状態を呈するため、比較的低エネルギーの衝撃的剪断応力によって破壊を起こし易く、したがって機械的破壊を主体とした摩耗領域では極めて摩耗が生じやすいものと推察される。

そこで、本研究においてはあらかじめ鑄鉄の組成、鑄型の種類、あるいは鑄造方法を変えることにより、異なった鑄造応力が残留するものと考えられる鑄鉄を用い、残

留応力が摩耗に及ぼす影響を検討するとともに、応力除去を目的とした焼ナマシを広範囲にわたる条件のもとで行ない、その結果から両者の関係を求めたものである。

2. 実験試料ならびに方法

2-1 実験に用いた鑄鉄試験法

本研究において残留応力の測定、ならびに摩耗実験に用いた試験片は、従来発動機や空気圧縮機などのシリンダーライナー用鑄鉄として汎用されている普通パーライト鑄鉄から選択したものである。したがって、これらの鑄鉄製品は、その鑄造方法として置注ぎまたは遠心鑄造法が一般に広く採用されている関係上、各試験片はこれらの方法によって鑄造した第1図に示す円筒型鑄鉄管の所定の位置より採取した。

また、摩耗実験において上述の固定試験片と組合わせる回転試験片は外径50mm、内径30mm、厚さ5mmの生砂型へ個々に置注ぎ鑄造した鑄鉄を機械加工によって外径48mm、内径32mm、厚さ2.5mmの円板状に仕上げたのち、鑄造ならびに加工応力を除去する目的から550°Cで1h低温焼ナマシを行なったものである。

第1表はこれらの鑄鉄の化学組成を示したもので、応力測定および固定試験法に用いた鑄鉄のうち生砂型へ置注ぎ鑄造した試験片記号L（以下L鑄鉄と記す）は化炭素量が0.57%であり、したがって素地組織の一部に少量のフェライトの析出がみられる。これに比べて、乾燥砂型へ遠心鑄造を行なった試験片記号Q（以下Q鑄鉄

* 東京都立工業奨励館（東京都港区芝海岸通）
The Tokyo Metropolitan
Industrial Research Institute

と記す)は0.19%のCrを含有し、かつ化合炭素量が共折組成のため完全なパーライト素地を呈することが認められた。また、回転試験片として用いた鑄鉄は、従来ピストンリング材に多用されている高炭素、高燐系に属する組成のものであるが、組織的には化合炭素量が0.60%であるため局部的にフェライトの析出が検出された。なお、この鑄鉄は凝固の際過冷されやすい形状であることから黒鉛は比較的微細化された片状を呈することを知った。

2-2 摩耗実験の方法

実験に用いた摩耗試験機は第2図および写真1に示すとき構造を有する100%滑り摩擦方式のもので、実験の手順としては摩擦面における表面粗さを $0.8 \sim 1.0 \mu$ に仕上げた固定ならびに回転試験片を試験片保持具あるいは主軸に取付けたのち、摩擦面接触調節ねじをもって接触状態を調整してから実験を開始した。また、潤滑油は粘度指数80.4のバラフィン系60 Spinを用い、これを第3図に示すような系統を有する潤滑油恒温循環装置により常時 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保温するとともに、実験によって生じた摩耗粉末は2段に設けられたガラスフィルターにより除去した。なお、実験中は60 cc/minの割合で摩擦面に給油を行なった。このほか、摩耗量については実験前後における重量をメトラーM5型天秤によって秤量し、その差異を単位面積当りの値に換算したものである。

3. 焼ナマシ処理にともなう残留応力、カタサならびに組織の変化

鑄鉄の摩耗に及ぼす残留応力の影響を明らかにするため、まず、焼ナマシ処理とこれにともなう応力の減少との関係を求めた。すなわち、前掲第1図に示すとき円筒型鑄鉄管の一部から $10 \times 14.5 \times 100 \text{ mm}$ の角棒状試験片を採取したのち、L鑄鉄は 700°C 以下、Q鑄鉄は 800°C 以下の各温度でそれぞれ1h焼ナマシ処理を施したものを実験に供した。

残留応力の測定は上記試験片のA面を予じめ 0.5μ 前

第1表 供試鑄鉄の化学組成

種類	記号	鑄造方法		化学組成 (%)					
		鑄型	種類	T.C	Si	Mn	P	S	Cr
Stator	L	生砂型	置注ぎ鑄造	3.10	1.14	0.97	0.330	0.092	0.19
	Q	乾燥砂型	遠心鑄造	2.10	1.24	0.60	0.147	0.100	
Rotor		生砂型	置注ぎ鑄造	3.78	1.99	0.61	0.338	0.070	

但し、化合炭素量は L 鑄鉄;0.57%, Q 鑄鉄;0.81%, Rotor;0.60%である。

第1図 残留応力測定ならびに摩耗実験用試験片の採取方法

後の表面粗さをもつ平坦面に研摩仕上げしてこれを基準面と定め、反対側のB面について切削により表面から0.05, 0.50, 1.00, 1.50 および 2.00 mm 除去したときの変形量を順次精密測定した。その結果から

$$\sigma = \frac{E(h-a)^2}{6} \cdot \frac{d(1/\rho)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3} \cdot \frac{1}{\rho} + \frac{E}{3} \int_0^a \frac{1}{\rho} da$$

但し σ ; 残留応力 (kg/mm^2)

E ; 縦弾性係数* (kg/mm^2)

h ; 試験片の厚サ (mm)

a ; 1回の切込み深サ (mm)

ρ ; B面を切削したときに生ずるA面の曲率半径(mm)

なる計算式⁴⁾を応用して固定試験片の摩擦面となる鋳肌表面から1.50 mmの層における残留応力を求めた。

* 供試鑄鉄の縦弾性係数は Dr. Felstar 研究所製 Elastmat 1015 型を用いて測定した。その結果によると、鑄鉄の種類、鑄造方法、あるいは焼ナマシ条件のいかんにかかわらず常温 (15°C) において $12,000 \pm 250 \text{ kg/mm}^2$ となり、したがって残留応力の算出には $12,000 \text{ kg/mm}^2$ は一定とした。

第2図 摩耗試験機の構造略図

写真1 実験に用いた摩耗試験機(左)と
潤滑油恒温循環装置(右)

第3図 潤滑油恒温循環装置構造略図

それによると、焼ナマシ温度と残留応力との関係は第4図に示すごとくなる。すなわち、鋳造のままの状態においては乾燥砂型へ鋳込んだQ鋳鉄に比べて生砂型へ鋳造したL鋳鉄の方が冷却が速に行なわれるため、鋳造状態ではやや残留応力は大きくなる傾向を現わす。しかしながら、Q鋳鉄にはフェライトの析出がまったくみられず、しかも少量のCrを含有することからみてL鋳鉄よりも処理温度の上昇にともなう応力の減少する割合は小さい。例えば、応力が急激に減少する直前の450℃処理の場合を比較すると前者は15%程度の減少であるのに対し、後者は約30%低下することが認められる。しかしいずれの鋳鉄も550℃において焼ナマシを行なったときはほとんど応力が除去されて2.0~2.5 kg/mm²となり、さらに高温側では処理温度の上昇にともなって漸減することが明らかとなった。

つぎに、上述の諸条件で焼ナマシ処理を施した各鋳鉄について可及的摩擦面附近のカタサ測定を行ない、これ

と残留応力との関係を検討した。その結果は第4図に示すごとく処理温度の上昇にともなう軟化し、ほぼ残留応力の場合と同様な傾向が認められる。ことに600℃付近から急激な軟化が起り、さらに高温側ではセメンタイトの分解にともなう黒鉛化現象が現われる関係上、この現象が顕著になることを認めた。

したがって組織的には黒鉛化がみられるまでは鋳造状態とほとんど変わりがなく、700℃前後から高温側ではセメンタイトの分解によるフェライトの析出がみられ、組織は著しく変化する。

換言すると、鋳鉄は鋳造後550℃付近において焼ナマシを行なうことにより、残留応力はそのほとんどが除去されるにもかかわらず、カタサはこれよりも約50~100℃高温側に著しく低下する温度が存在する。したがって550℃付近で処理を行なったものは組織ならびにカタサの変化が少なく、しかも残留応力が十分除去されることから経年変化を十分防ぎ得るものと考えられる。

試料: L, Q 鋳鉄 (パーライト鋳鉄) 10×14.5×100 mm
 焼ナマシ条件: 各温度に 1h 保温後徐冷

第4図 焼ナマシにともなう残留応力
 ならびにカタサの変化

4. 鋳鉄の摩耗に及ぼす残留応力の影響

4-1 摩耗条件の決定

鋳鉄の摩耗に及ぼす残留応力の影響を検討するに当たり、まず供試鋳鉄に固有な安定した摩耗条件を求めた。すなわち、摩耗量の再現性に優れた安定な摩耗条件は主として接触圧力あるいは摩擦速度などと深い関連性を有するものであり⁵⁾、したがって、本実験の場合も圧力 10~50 kg/cm²、速度 0.60~4.22 m/s の範囲に変化させて実験を行ない、そのときの摩耗量ならびに摩擦面の状態を観察した結果からこれを求めた。

接触圧力の変化が摩耗に及ぼす影響については、摩擦速度 1.05 m/s、摩擦距離 10,000 m に一定とした場合第5図に示すような結果が得られる。すなわち、Lおよび

試料: Stator パーライト鋳鉄 (as cast)
 Rotor パーライト鋳鉄 (生砂型置注鋳造法)
 550°C, 1h 焼ナマシ
 摩耗条件: v 1.05 m/s, l 10,000 m, Lube. Oil P 系 60 Spin
 Oil Temp. 20°C

第5図 パーライト鋳鉄の摩耗に及ぼす
 接触圧力の影響

びQ鋳鉄とも類似した摩耗特性を現わし、しかも接触圧力 30 kg/cm² において摩擦面にはともに機械的破壊をともなった摩耗痕が現われ、摩耗量は最大となることを認めた。しかしながら、各鋳鉄についてこの領域での摩耗量の絶対値を比較した場合顕著な差異が現われ、ことに上述の最大摩耗量となる条件のもとではQ鋳鉄の摩耗量はL鋳鉄の約 1/2 に軽減することが明らかとなった。かかる現象は供試鋳鉄の組成ならびに組織的な違いによることは勿論であるが、このほかに後述のごとく摩擦面に残留する応力が 20 kg/mm² (角棒状試験片で測定した値、以下同じ表現法による) 前後では僅かな応力の相違が摩耗に著しい影響をもたらすものであることから推察して、この影響をも含んでいるものとみることができ。したがって、極めて軽負荷条件の領域では上述のごとき諸性質の影響が比較的少なく、両者の摩耗量はほぼ同程度の値となることを認めた。

以上の結果から、摩擦速度を 1.05 m/s に一定とした場合はいずれの供試鋳鉄も接触圧力 30 kg/cm² 以下が摩耗量の再現性に優れた安定な摩耗領域となり、ことに圧力 30 kg/cm² はこれらの鋳鉄の耐摩耗限界となることを知った。

つぎに摩擦速度と摩耗量との関係から安定な摩耗領域を求めた。すなわち、上述の実験より得られた接触圧力 30 kg/cm² のもとで摩擦速度のみを 0.60 から 4.22 m/s まで変化させて摩耗を行なった。第6図はその結果を示したものである。これによると前述の接触圧力の場合と同様、各供試鋳鉄とも摩擦速度 1.05 m/s のもとで摩耗量は最大となり、摩擦面は多くの機械的破壊をともなう摩耗痕が検出された。

以上の実験結果を総合して考察した場合、安定な摩耗

試料: Stator パーライト鋳鉄 (as cast)
 Rotor パーライト鋳鉄 (生砂型置注鋳造法)
 550°C, 1h 焼ナマシ
 摩耗条件: P 30 kg/cm², l 10,000 m, Lube. Oil P 系 60 Spin
 Oil Temp. 20°C

第6図 パーライト鋳鉄の摩耗に及ぼす
 摩擦速度の影響

領域にあり、しかも耐摩耗限界をもって現わされる摩耗条件は鑄造方法のいかんにかかわらず接触圧力 30 kg/cm²、摩擦速度 1.05 m/s がその一例であることを確認した。したがって、次項で述べる残留応力と摩耗との関係を吟味した実験ではこの条件を採用することが最も合理的であることを認めた。

4-2 鑄鉄の摩耗と残留応力の関係

上述の諸条件のもとで焼ナマシ処理を施すことにより、残留する応力値を相違させたLならびにQ鑄鉄をそれぞれ固定試験片とし、これにパーライト鑄鉄の回転試験片を組合わせて潤滑、滑り摩耗を行ない、その結果から摩耗に及ぼす鑄造応力の影響を検討した。この場合、摩耗条件としては前項の実験から得られた接触圧力 30 kg/cm²、摩擦速度 1.05 m/s を選んだ。

第7図はこの実験結果を現わしたもので、横軸に焼ナマシ温度、縦軸に前述の角棒状試験片から求めた残留応力ならびに摩耗量を併記した。すなわち、生砂型へ置注ぎ鑄造したL鑄鉄の場合はその摩耗量が処理温度の上昇にともなって減少し、450~550°C 付近において最低となるが、さらに高温側ではセメントの分解にともなうフェライトが析出し、再び摩耗量は増加する傾向が認められた。これに比べて、乾燥砂型へ鑄込んだQ鑄鉄は上述の現象がやや高温側へ拡大され550°C 前後が最も耐摩耗性に優れた状態を呈する。

つぎに、これらの結果を残留応力との関係によって現わすと第8図にみられるごとくなり、残留応力が 18 kg/cm² 以下ではいずれの供試鑄鉄ともほとんど摩耗量に無関係であるが、より高い応力を保有するものについては僅かな応力の増加によっても著しく摩耗量の多くな

る傾向を認めた。ただし、この図においては焼ナマシ処理によってフェライトの析出がみられる場合は、これの方がより顕著に摩耗に影響をもたらすため550°C 以下で処理したものについてののみ吟味したものである。

以上の実験から、鑄造あるいは加工などによって生じた残留応力が摩耗に影響をもたらす場合は、その絶対値が 18 kg/mm² 以上であることが確認された。この原因については、通常比較的低位の応力を保有する鑄鉄は摩耗の際に摩擦面に生ずる衝撃的剪断応力に耐えうるため顕著な破壊現象の発生がみられず、これに対し上述の 18 kg/mm² よりも多くの残留応力を有するものはその値が多くなるほど表面におけるモロサも増すことが考えられ、このために破壊を促進する結果となって摩耗量が著しく増加するものと推考される。

したがって、残留応力と摩耗との関係において、摩耗量が急激な増加を起こすときの応力値には第8図にもみられるごとく限界が存在し、この限界を本研究では応力・摩耗限界と称した。なお、応力・摩耗限界は各鑄鉄に固有な値であり、組成、組織⁹⁾、機械的強さの影響を受けるものと考えられる。

5. 結 言

鑄造あるいは機械加工によって摩擦面に生じた残留応力が摩耗に及ぼす影響について検討する目的から、生砂ならびに乾燥砂型へ鑄造したパーライト鑄鉄を固定試験片とし、これに生砂型に鑄込んだ高炭素、高磷系パーライト鑄鉄の回転試験片を組合わせて潤滑、滑り摩耗実験を行なった。その結果を要約すると

i) まず、生砂型へ置注ぎ鑄造したL鑄鉄および乾燥砂型へ遠心鑄造を行なったQ鑄鉄の焼ナマシ処理にともなう残留応力の減少傾向について検討した。

試 料: Stator L, Q 鑄鉄 (パーライト鑄鉄) 各温度で 1 h 焼ナマシ
Rotor パーライト鑄鉄 550°C, 1 h 焼ナマシ
摩耗条件: P 30 kg/cm², v 1.05 m/s, l 10,000 m
Lube. Oil P 系 60 Spin, Oil Temp. 20°C

第7図 焼ナマシにともなう残留応力の変化が鑄鉄の摩耗に及ぼす影響

試 料: Stator L, Q 鑄鉄 (パーライト鑄鉄)
Rotor パーライト鑄鉄 550°C, 1 h 焼ナマシ
摩耗条件: P 30 kg/cm², v 1.05 m/s, l 10,000 m
Lube. Oil P 系 60 Spin, Oil Temp. 20°C

第8図 機械的破壊摩耗領域における鑄鉄の摩耗量と残留応力との関係

それによると、いずれの供試鑄鉄も 450°C 付近までは処理温度の上昇にともなう徐々に応力の減少がみられ、 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ において急激に除去される。例えば L 鑄鉄は 550°C 、1 h 焼ナマシ処理を施すことにより 90% 強、また Q 鑄鉄では約 80% の応力除去が認められた。なお、これらの鑄鉄の応力が除去されていく傾向を比較した場合、Q 鑄鉄は乾燥砂型へ鑄造を行なったため冷却速度が生砂型へ鑄込んだ L 鑄鉄よりもやや遅く、したがって鑄造状態では僅かに残留応力は少なくなるが、その反面少量の Cr を含有し、かつ完全なパーライト素体を有するため焼ナマシにともなう応力除去傾向には僅かに抑制現象がみられた。

ii) 上述の残留応力除去にともなう摩擦面付近のカタサ変化は両者ともやや類似の傾向が現われる。すなわち、焼ナマシ温度の上昇にしたがってカタサの低下がみられ、いずれも 600°C 前後から急激に軟化しはじめる。しかし 700°C 付近から高温側でみられる軟化現象はセメントタイトの分解にともなうフェライトの析出が原因となる。したがって、組織的には黒鉛化がはじまる 700°C より低温側では鑄造状態とほとんど変わらないことが認められる。

iii) 残留応力が摩耗に及ぼす影響を検討するに先立ち、まず供試鑄鉄に特有な安定した摩耗条件を求めた。その結果によると、各鑄鉄とも接触圧力 30 kg/cm^2 、摩擦速度 1.05 m/s が耐摩耗限界となり、上述の摩耗条件が極めて摩耗量の再現性に優れていることを認めた。したがって、本実験においてははこの条件により上述の関係を吟味した。

iv) 焼ナマシ温度が漸次上昇するにともない摩耗量の減少がみられ、L 鑄鉄の場合は $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ 、また Q 鑄鉄では $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ において最も摩耗量は低下する。またこのときの各鑄鉄の摩擦面に相当する層における残留応力を角棒状試験片により測定した値は 18 kg/mm^2 以下であることを認めた。すなわち、本実験において鑄造あるいは加工により生じた残留応力は、これが 18 kg/mm^2 以下の場合、いずれの供試鑄鉄とも摩耗の際に摩擦面で生ずる衝撃的剪断応力に耐え得るための顕著な破壊現象がみられず、これに対し 18 kg/mm^2 よりも多くの残留応力を有するときは摩擦面のモロサを増し、このために破壊が起こりやすく、摩耗量の急激な増加がみられるものと推考される。

したがって、残留応力と摩耗との関係には、摩耗が著しく促進されるときに残留応力に限界のあることが知られ、本研究においてはこれを応力・摩耗限界と称したが、L および Q 鑄鉄ではこれが約 18 kg/mm^2 となることを認めた。

本研究を遂行するにあたり、応力測定実験にご指導ならびにご協力下さいました防大小野浩二教授、当館機械部田中益夫主任研究員に感謝の意を表します。

(1964. 4. 6 受理)

文 献

- (1) M. M. Hallett and P. D. Wing, Foundry Trade J., Aug. 11 (1949)
- (2) C. O. Burgess, Foundry, **31**, No. 9, 128 (1953)
- (3) 小川, 竹内, 精密機械, **21**, 356 (1956)
- (4) 応力測定技術研究会編, 応力測定法, 374 (1956)
- (5) 竹内, 鋳物, 投稿中
- (6) 竹内, 未発表