

## オーステンパー処理球状黒鉛鑄鉄の被研削性の研究

機 械 金 属 室 國 吉 和 男  
 琉球大学大学院機械工学専攻 羽 地 龍 志  
 琉球大学エネルギー機械工学科 玉 城 努  
 琉球大学エネルギー機械工学科 當 間 竜 次

### 1. 緒 言

オーステンパー球状黒鉛鑄鉄(Austempered Ductile Iron=ADIと呼ぶ)は球状黒鉛鑄鉄を約1170Kでオーステナイト(以下 $\gamma$ と言う)化し、523Kから723K付近でオーステンパー処理することで、従来のフェライトとパーライトを主体とした基地組織を高強度なベイナイトと延性に富む $\gamma$ の混合組織に改善したものである。その結果引張強度が900~1500N/mm<sup>2</sup>、伸びが10%内外と向上し、耐摩耗性や耐衝撃性が著しく良くなることが評価され、鑄鋼や鍛鋼のような強度部材の有望な代替材として期待されるようになった。<sup>1, 2)</sup>

しかし準安定相として残留している $\gamma$ は、機械加工を受けると室温でも加工誘起マルテンサイトに変態して、被削性が極めて悪くなることが知られている。そのためADIの被削性に関する研究は数多く見られるが<sup>3)~7)</sup>、より加工精度が要求される研削加工に関する研究は少ない<sup>8)</sup>。

そこで本研究ではオーステンパー熱処理によって生じる寸法変化を研削加工で仕上げることを想定して、黒鉛粒数の異なる2種類の球状黒鉛鑄鉄をオーステンパー処理し、主要組織であるベイナイトおよび残留 $\gamma$ 組織と、熱処理前後の寸法変化や被研削性との関係を検討した。

### 2. 実験方法

#### 2. 1 供試材の恒温変態曲線

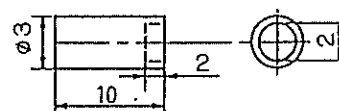
富士電波工機(株)の全自動変態記録測定装置を用い、表1に示す化学組成の球状黒鉛鑄鉄を図1に示す形状寸法の試験片に加工し、供試材の恒温変態曲線(TTT曲線:Time Temperature Transformation curve)を作成した。オーステンパー処理は、真空(9.33x10<sup>-3</sup>Pa)中で試験片を1173Kで30分間保持し $\gamma$ 化を行い、つづいて窒素ガスを吹き付けて5通りのベイナイト化保持温度(523, 573, 623, 673および723K)まで急冷し、保持時間を25秒~10時間変化させ再び窒素ガスによって室温まで急冷した。その際、熱処理途中における膨張および終了後の試験片寸法を測定し、各試験片元長で除した伸び率を求めた。

#### 2. 2 研削試験片及び熱処理方法

図2に示すように肉厚を12mmと52mmの2段階に変化させて、肉厚12mm部には厚さ5mmの平板を置き、フラ

表1 供試材の化学組織 (mass %) と機械的性質

| C    | Si   | Mn   | P    | S    | Mg   | N/mm <sup>2</sup> | HV30 |
|------|------|------|------|------|------|-------------------|------|
| 3.60 | 2.26 | 0.44 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 594               | 192  |



TTT 曲線作成試験片

図1. TTT 曲線作成試験片

樹脂自硬性鑄型に鑄込み、黒鉛粒数の異なる供試材を作製した。肉厚12mm部はチル化が著しかったため、1103K-3時間の黒鉛化焼きなまし処理を施した後、オーステンパー処理をした。このようにして得られた、黒鉛粒数が650および80個/mm<sup>2</sup>の2種類の供試材から、研削試験片(10mmx10mmx50mm)を切り出した。図3にそれぞれの組織写真と球化率、粒径等の特徴量、表2に化学組成をそれぞれ示す。

オーステンパー処理に使用した装置はポット式塩浴熱処理炉(高温部:MSE20-30低温部:LSE20-30(株)サーマル製)で、塩浴剤は高温側(BaCl<sub>2</sub>:KCl:NaCl=4:3:3)、低温側(KNO<sub>3</sub>:NaNO<sub>3</sub>=1:1)を使用した。

熱処理条件は図4に示すとおり、保持温度5水準、保持時間5水準で計25種とした。一つの熱処理条件につき黒鉛粒数の異なる研削試験片を各2本とし、計100本の試験片を作製した。

熱処理前後の寸法変化を検討するため図5のように横穴を明け、中心間距離を三次元測定装置(株)ミットヨ SUPER740)を用いて測定した。またビッカース硬さ(明石VL60)をHV30で測定した。

平面研削盤(岡本工作製 PSG63JA)と4成分動力計(日本キスラー社製 Type9272-5019A)を用い、3種類の砥石(WA60LmV, CBN170N75BD4, CBN170N75BW4)を用いて研削試験を行った。研削条件は表3のとおりである。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 TTT曲線の作成

オーステンパー処理した試験片の顕微鏡写真の例を図6に示す。これは保持温度673Kで見られる羽毛状の上部ベイナイトのベイナイト進行過程を見たものである。白っぽい部分が主に不安定γの集合部分であり、ベイナイト化の開始時点は黒鉛から芽のように出た組織が明らかに観察できる時点とした。

また共晶セル粒界部がほとんど見られなくなり、硬さが全体的に一様な低い値になる時点ベイナイト化の終了時間と見なした。このようにして得られたTTT曲線を図7に示す。

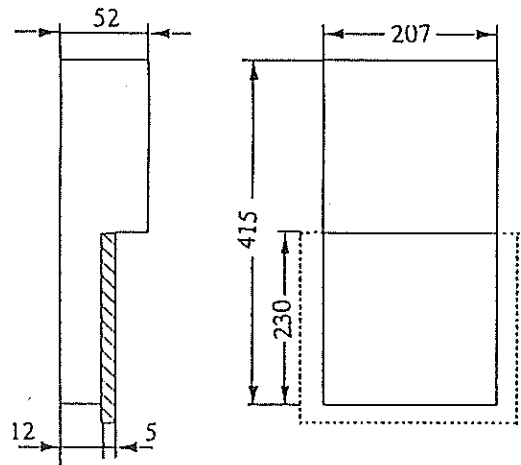


図2 段階状の鑄型

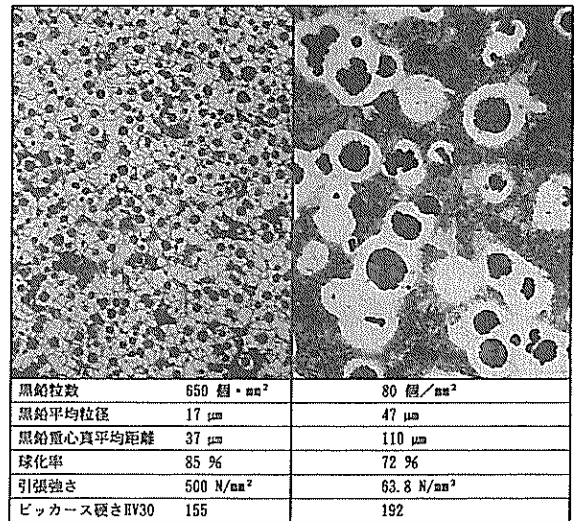


図3 供試材の組織写真

表2 供試材の化学組織(mass %)

| C    | Si   | Mn   | P    | S    | Mg   |
|------|------|------|------|------|------|
| 3.74 | 2.32 | 0.73 | 0.03 | 0.01 | 0.04 |

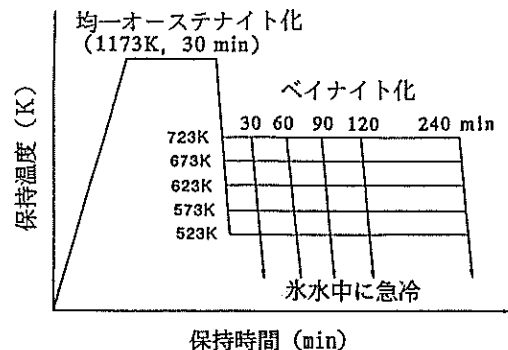


図4 オーステンパ熱処理の概略

オーステンパ保持温度が523Kおよび573Kの下部ベイナイトにおいては、10時間保持しても共晶セル粒界部が存在しているが、本報では、共晶セル粒界部がほとんど見られなくなる時点を終了点と見なし、約90%ベイナイト化が終了したものとして表示した。

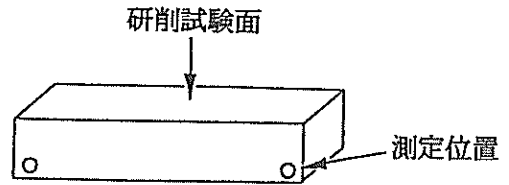


図5 横穴の位置

この図から、ベイナイト化は保持温度が高いほど早く生じる傾向にあり、それに伴って終了点も早くなることがわかる。高温保持の場合は673K-2.5hr、723K-2hrでベイナイト化はほぼ終了しているのに対し、低温保持の523Kおよび573Kにおいては10時間保持でも完了は認められない。しかし低温保持の523Kおよび573Kにおいても、組織観察から約2.5時間以降ベイナイト化の進行がかなり鈍る傾向にあることが分かった。これは、高温であるほど炭素の拡散が速やかであるためと考えられる。

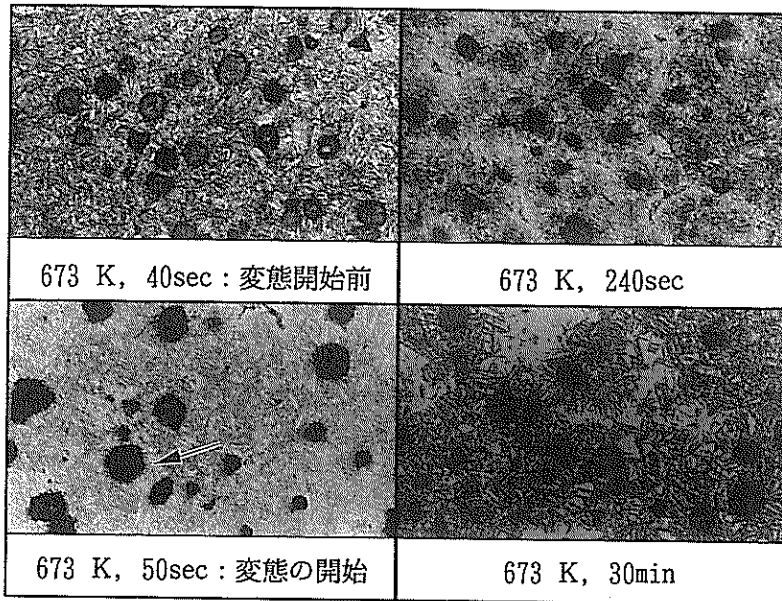


表3 研削条件

| 項目        | 条件                                      |
|-----------|---|
| 試験片寸法     | 10×10×50 mm                             |
| 砥石回転速度    | 1650 m/min                              |
| テーブル送り速度  | 6 m/min                                 |
| 切り込み深さ    | 20 μm                                   |
| 砥石        | WA60LmV<br>CBN170N75BD4<br>CBN170N75BW4 |
| ドレッシング WA | 10 μm×8, 0.6 m/min                      |
| CBN       | ホワイトストーン                                |
| 研削方法      | プランジ研削<br>乾式<br>湿式(リタケール AF-S)          |
| 砥石寸法      | 305φ×127φ×38mm                          |
| 研削盤       | Okamoto PSG-63JA                        |

図6 顕微鏡写真(上部ベイナイト)

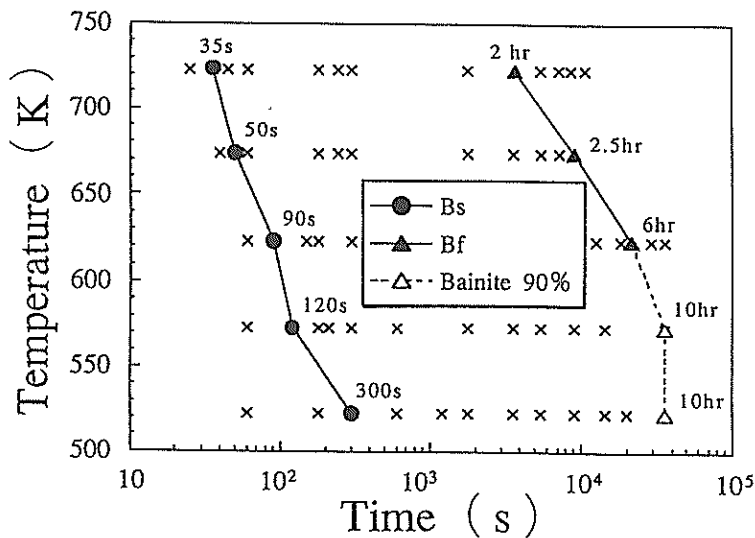


図7 TTT 曲線

### 3. 2 熱処理による寸法変化量

TTT 曲線を求めるための熱処理で、試験片は図8の膨張曲線にみられるように、 $\gamma$ 化中に膨張しその後ベイナイト化温度への急冷中に収縮し、再びベイナイト変態中に膨張する。すなわち熱処理後の試験片寸法には $\gamma$ 化中の膨張とベイナイト変態中の膨張が影響することとなり、このことは母材の基地組織とベイナイト変態量が関係することを意味する。

そこで各実験の膨張曲線および熱処理前後の試験片実寸法測定からベイナイト化時の伸び率と実寸法の伸び率を求めた。

ここでベイナイト化時の伸び率とは、図8に示されるような各ベイナイト化温度保持中での伸び量を各試験片の元長で除してパーセント表示した値である。図9はベイナイト化時の伸び率と実寸法の伸び率の関係を示したものである。これを見ると、ベイナイト化時の伸び率が約0.25%の時に、実寸法の伸び率が最小値を示すことが分かる。

図10は各保持温度ごとに、保持時間とベイナイト化時伸び率の関係を示したものである。これから、保持時間が $10^3 \sim 10^4$  secでベイナイト化時の伸び率は最大値を示し、その後停滞することが分かる。また保持温度が高くなるに従い、ベイナイト化時の最大の伸び率が低くなっており、すなわち上部ベイナイトの膨張量が小さいことが分かる。

次に各ベイナイト化温度における保持時間と実寸法の伸び率との関係を示したのが図11である。これから実寸法の伸び率は保持時間が $10^3 \sim 10^4$  secで最小値を示す傾向にあることが分かる。

また、図10および11の同一温度のものを比較すると明らかのように、ベイナイト化時の伸び率が最大になる前に実寸法の伸び率は最小値を示している。

以上のことから、実寸法の伸び率を最小にするベイナイト化時の最適な伸び率、すなわち最適なベイナイト化保持時間があることがわかる。また、上部ベイナイトと下部ベイナイトで膨張量が異なることから、オーステンパー処理前後の寸法変化を最小にするには、適正な処理温度（本実験では623K）があること、あるいは所定の組織（上部ベイナイトもしくは下部ベイナイト）を得る場合に、保持時間によって寸法変化量を事前に知ることが可能であることを示している。

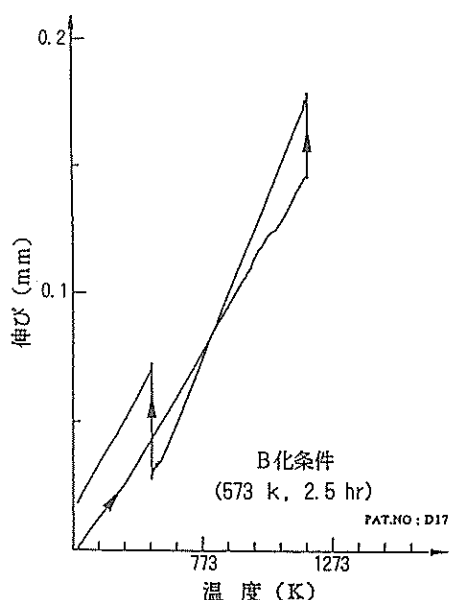


図8 熱膨張曲線 (573K, 2.5hr)

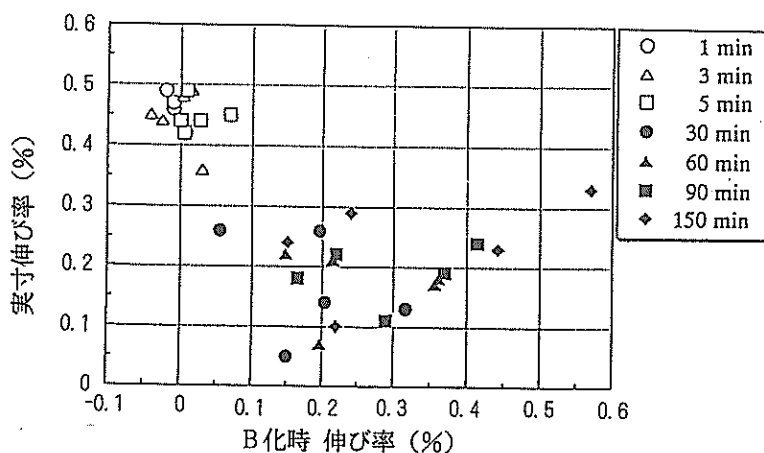


図9 B化時の伸び率と試験片実寸法の伸び率の関係

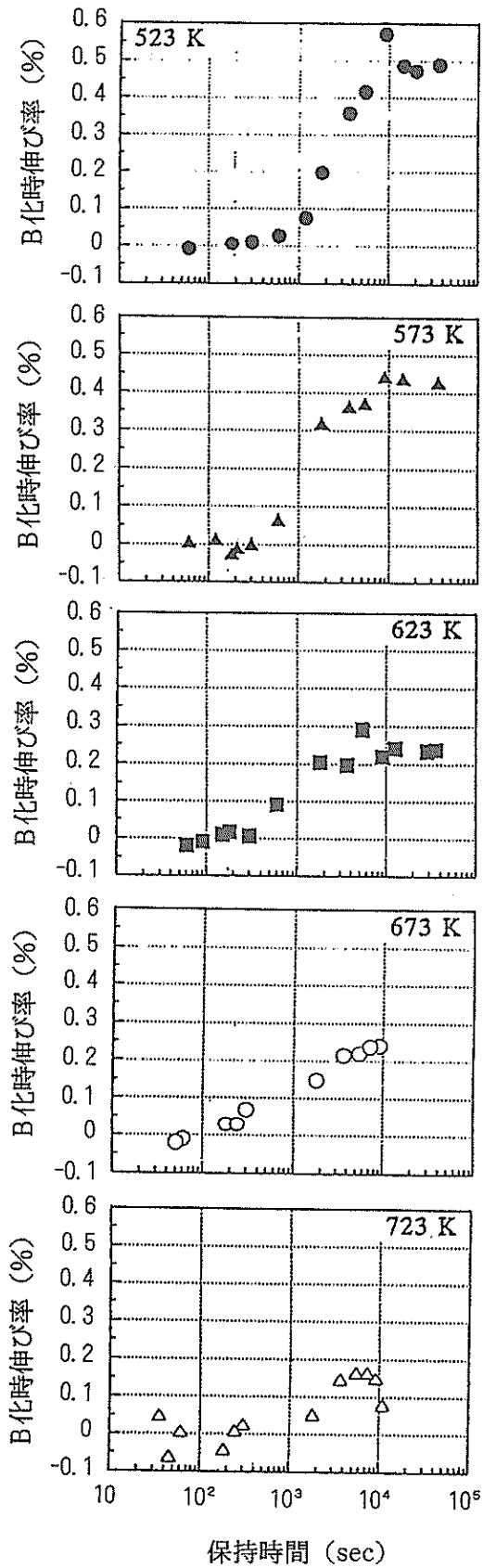


図10 B化保持時間とB化時の伸び率の関係

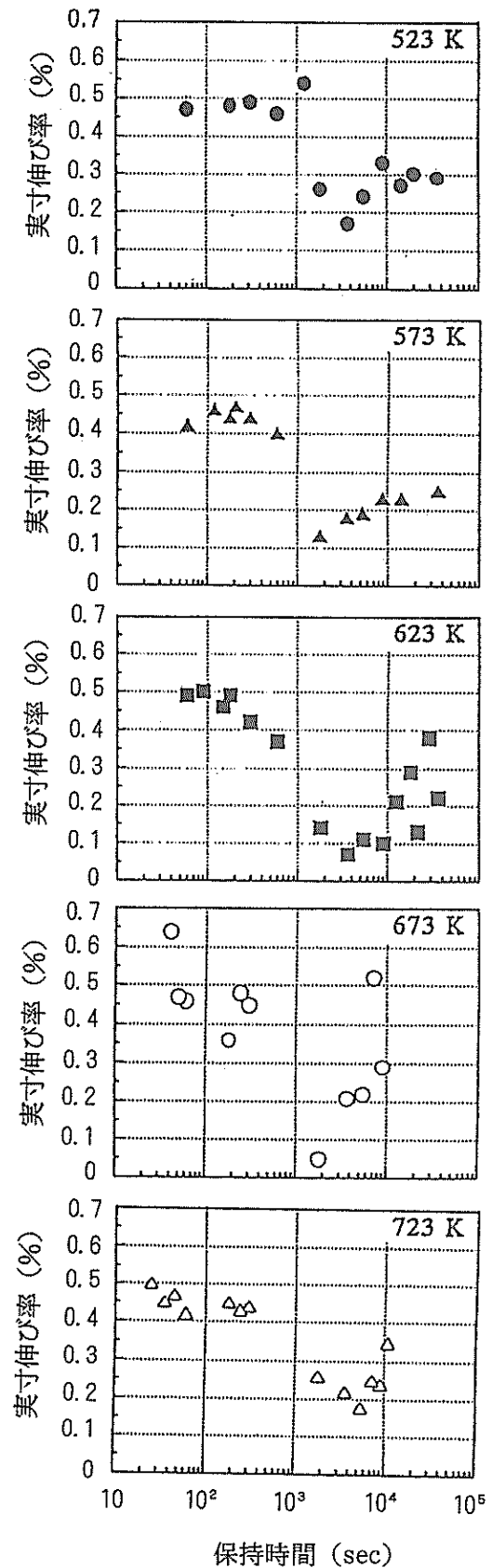


図11 B化保持時間と試験片実寸法の伸び率の関係

### 3. 3 黒鉛粒数と被研削性

ADIの基地組織であるベイナイトや残留 $\gamma$ 等の量や分布状況は黒鉛粒数と関係が深く、その機械的性質も著しい影響を受けると考えられる。ここでは、ADIの最終仕上げを研削加工で行うことを想定して、黒鉛粒数の異なる2種類のADIについて残留 $\gamma$ 量、硬さ、熱処理後の寸法変化および研削抵抗を検討した。

#### 3. 3. 1 黒鉛粒数と残留 $\gamma$ 量

図12および13に黒鉛粒数別にX線回折により測定した残留 $\gamma$ 量を示す。研削前の試験面を残留応力除去のため電解研磨して測定した。残留 $\gamma$ 量は本試験における黒鉛粒数の違いではいずれも、保持時間30~120minでは保持温度673Kで最大値を示し、長時間保持の240minでは623Kで最大値を示した。

またわずかではあるが黒鉛粒数の多い方が残留 $\gamma$ 量が多い傾向を示し、673Kでは長時間保持するとベイナイトの析出と安定 $\gamma$ 化が進み残留 $\gamma$ が減少する。さらに723Kでは安定 $\gamma$ （高炭素 $\gamma$ ）が $\alpha$ -Fe（ベニティックフェライト）と炭化物に分解していると考えられ、残留 $\gamma$ 量は著しく減少している。

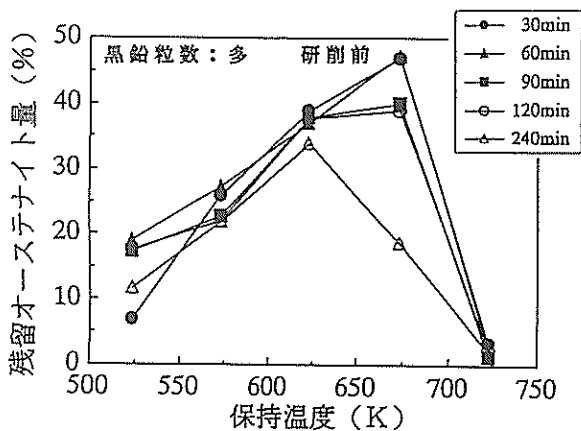


図12 保持温度と残留オーステナイト量の関係

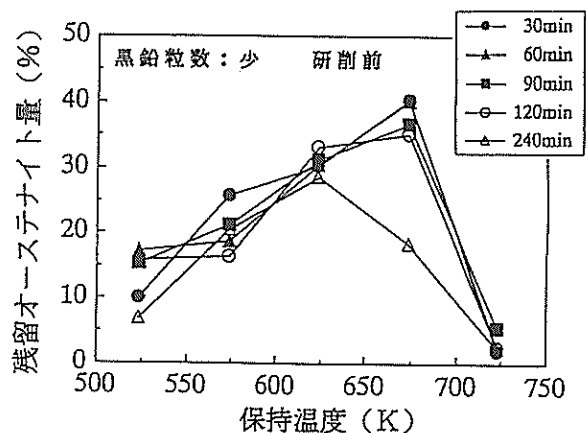


図13 保持温度と残留オーステナイト量の関係

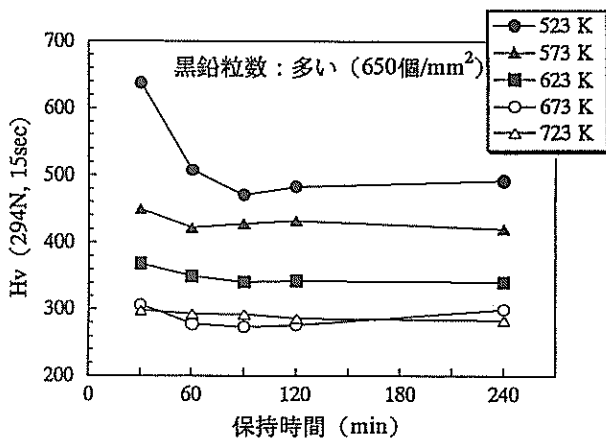


図14 黒鉛粒数が多い場合のピッカース硬さ

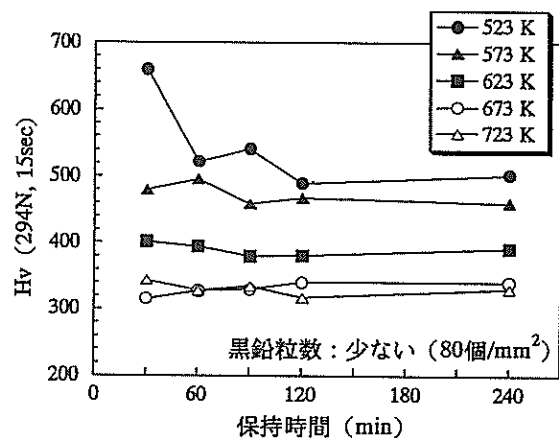


図15 黒鉛粒数が少ない場合のピッカース硬さ

### 3. 3. 2 黒鉛粒数とビッカース硬さ

図14および15に黒鉛粒数別に保持時間と硬さ(HV30)の関係を示した。全体的には粒数の少ない方が硬さはやや高く、保持温度の低い下部ベイナイトで高い硬さを示している。保持温度が高くなると次第に硬さは低下し、上部ベイナイトの723Kで300HV30程度となった。また523Kの30minで650HV30と高い値を示した以外は、保持時間によって硬さの変化はみられず、保持温度によって300~500HV30の間で一定の硬さを示した。ミクロ的にはベイナイト量は保持時間とともに増加していくが、523K、30min以外の試験片ではHV30というマクロ的な硬さには保持時間の影響が少ないことになる。

### 3. 3. 3 黒鉛粒数と研削抵抗

図16~図23に黒鉛粒数別に砥石別、乾式湿式別に垂直方向の研削抵抗と保持温度との関係を示す。図16および17はWA60LmVの乾式研削で、図16は粒数の多い試料の抵抗値である。図をみると保持温度623Kは低く、523Kは90minで山をなして高い抵抗値を示している。図17は粒数の少ない場合であるが673Kと723Kが90minで最大値を示し、他は保持時間が長くなると抵抗値は低くなる傾向を示している。

図18および19はWA60LmVの湿式研削で、図18は粒数の多い試料の抵抗値である。保持時間が長くなるに従い抵抗値が高くなり、乾式に比べて全体的に高い抵抗を示している。図19は黒鉛粒数の少ない場合で保持温度523Kが60minで、他は90minで抵抗値のピークを示し、240min保持すると保持温度に関係なく約12N/mmの抵抗値を示している。

図20および21はCBN砥石の乾式研削で、図20は粒数の多い試料の抵抗値である。523Kと573Kの30minが6.2N/mmとやや高い抵抗値を示した他は5.3N/mmの低い水準であった。図21は粒数の少ない方で保持時間の短い30minで研削抵抗は高く保持時間の増加に対して低下し、保持温度に関係なく240min保持で約5.9N/mmの抵抗値を示した。

図22および23はCBN砥石の湿式研削で、図22は粒数の多い試料の抵抗値である。523Kが30~90minで7N/mmと高く他は6N/mm程度で保持時間と保持温度による差は見られなかった。図23は粒数の少ない方で、保持時間の短い30minと60minで研削抵抗は約5.5N/mmと低く、90~240minで6.5N/mmと高くなる傾向を示した。

全体的にみるとWA砥石はCBN砥石に比べて研削抵抗は高く、ばらつきも大きい傾向である。これは崩壊性の高いWA砥石がCBN砥石より硬度も低く切れ味が悪いためと考えられる<sup>9)</sup>。また保持温度が低い場合でも保持時間30min以上では下部ベイナイト化が進んで、硬さと韌性が高まり研削抵抗を大きくしていると考えられ、図では左上がりの傾向を示している。湿式の方が抵抗値が高い傾向を示しているが、研削機構と共に研削液の潤滑作用、冷却作用、洗浄作用等<sup>10)</sup>の検討と切り粉観察を行っておらず、その原因を明らかにすることはできなかった。黒鉛粒数が多いと研削抵抗がやや低い傾向を示しているが、この原因は粒数が多いと硬さが低く、黒鉛分布も均一化していることによるものと考えられる。

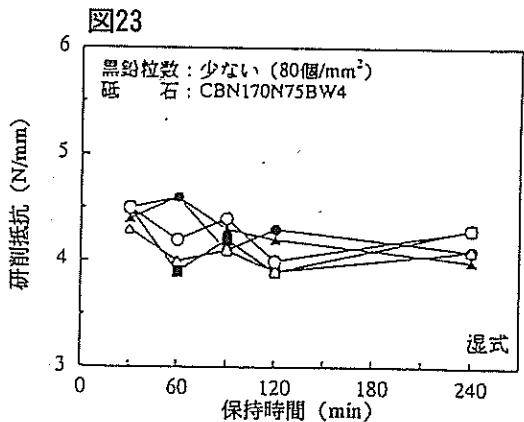
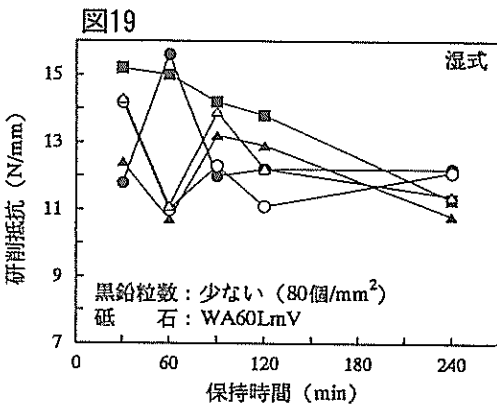
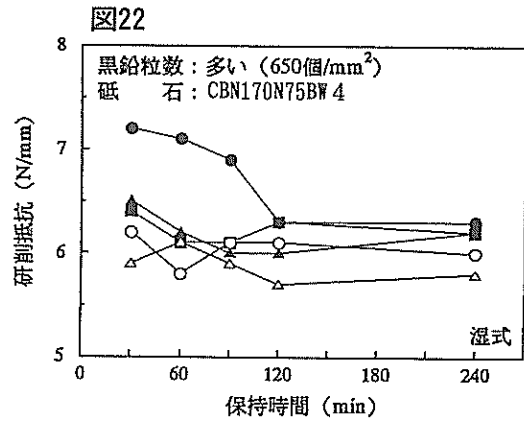
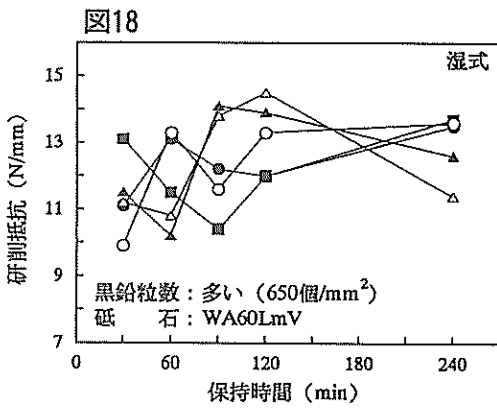
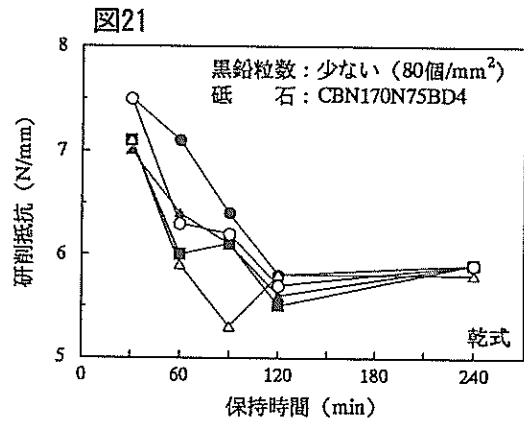
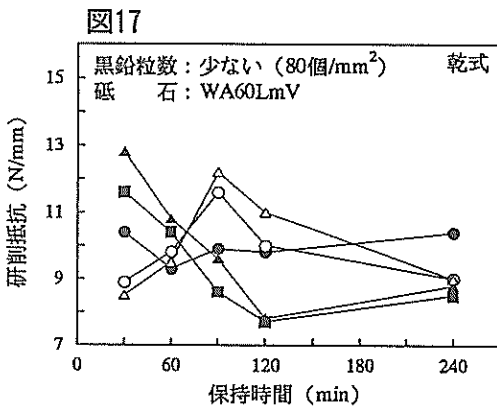
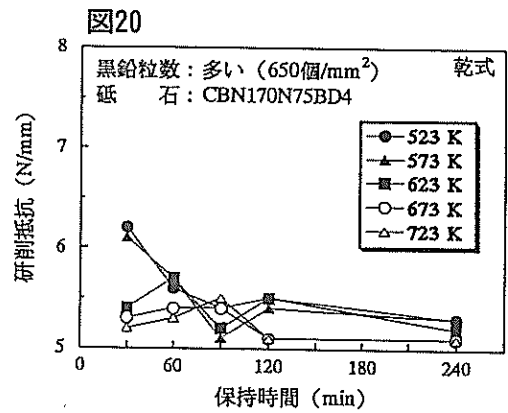
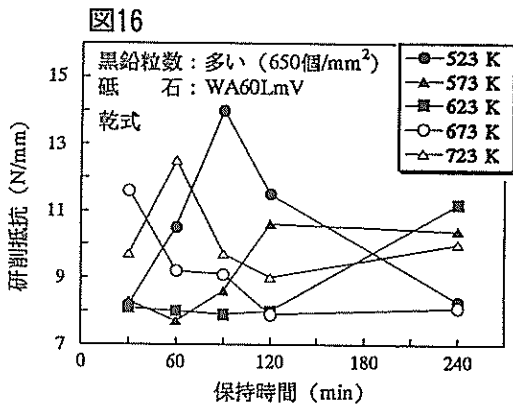


図16~19 WA60LmV砥石による研削

図20~23 CBN砥石による研削抵抗



### 3. 3. 4 黒鉛粒数と膨張率

図24および25に黒鉛粒数別に膨張率と保持温度との関係を示す。図を見ると、下部ベイナイト域では、不安定 $\gamma$ がマルテンサイト変態したため、黒鉛粒数の多少に関わらず高い膨張率を示したと考えられる。ちなみに焼入材の膨張率は黒鉛粒数の少ないもの5.1%、多いもの5.6%であった。また723K保持の上部ベイナイトで膨張率が増加するのは、安定 $\gamma$ が $\alpha$ -Fe+炭化物に分解したためと考えられる。さらに黒鉛粒数の多少に関わらず残留 $\gamma$ 量の最高値を示す保持温度で、膨張率が最小値を示している。

また黒鉛粒数の多いものがやや膨張率が高い傾向を示している。

糸村によれば同じ $\gamma$ 化条件に対して、フェライト地の素材の方がブルスアイ組織よりも $\gamma$ 化中の膨張量が大きいことが示されている<sup>11)</sup>。この理由は $\gamma$ 中の固溶炭素量の増加に伴う格子定数の増加によるものであり、図3に示すように黒鉛粒数の多い方がフェライト面積率が高く、したがって膨張率も黒鉛粒数の多い方が大きくなったと考えられる。

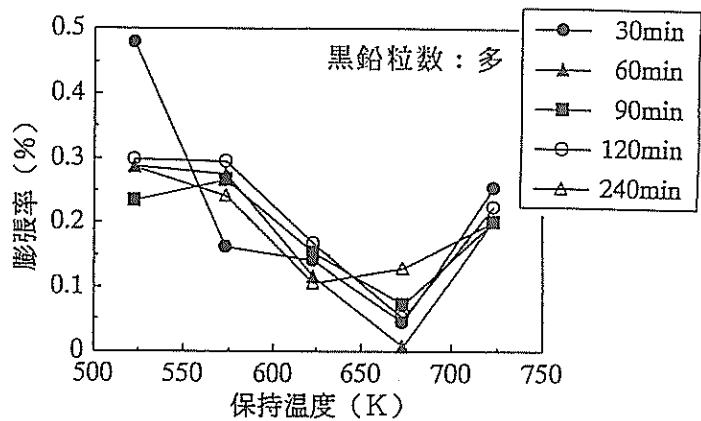


図24 保持温度と膨張率

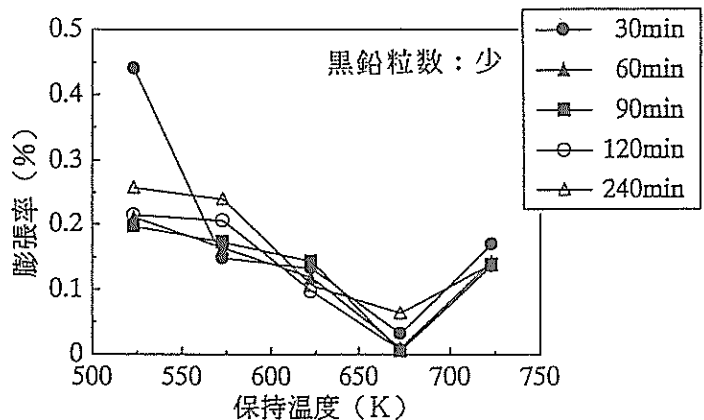


図25 保持温度と膨張率

## 4. 結 言

球状黒鉛鋳鉄FCD600を1173Kで $\gamma$ 化してベイナイト化保持温度523~723KでTTT曲線を測定し、熱処理途中および終了後の伸び率を測定した。また黒鉛粒数の異なる2種類の球状黒鉛鋳鉄を同様にベイナイト化保持温度523~723Kの5水準と、保持時間30~240minの5水準でオーステンパー処理して、黒鉛粒数と残留 $\gamma$ 、機械的性質、研削抵抗等の関係を検討した結果を以下に要約する。

- 1) TTT曲線から723K保持ではベイナイト化は、35秒で開始し2時間で完了するが、低温保持になるほど開始・終了とも遅れ、523K保持では5分後に開始し10時間でも完了しない。

- 2) オーステンパー処理では、 $10^3 \sim 10^4$  secの保持時間で実寸法は最小値を示し、その後ベイナイト化時の伸び率は最大値を示すことから、寸法変化量を事前に知る事が可能である。
- 3) 残留 $\gamma$ 量は黒鉛粒数の多い( $650$ 個/ $\text{mm}^2$ )方がやや多く、保持時間30~120minでは673K、240minでは623Kで最大値を示した。
- 4) HV30の硬さは黒鉛粒数が多いとやや低い傾向を示し、保持時間が短く、保持温度が低いほど高い値を示した。また保持時間60min以上では保持時間にはほとんど関係なく、保持温度に依存して硬さは変化する。
- 5) 硬さは残留 $\gamma$ の少ない下部ベイナイト域で高く、保持温度が高くなると大きく低下する。
- 6) ADI材を研削すると乾式湿式を問わずCBN砥石の方がWA砥石より、研削抵抗が4~5 N/mmも低く、ばらつきも小さかった。
- 7) 黒鉛粒数の多い方がやや研削抵抗は低い傾向を示した。
- 8) ADI材の湿式研削は乾式研削に比べて抵抗値は高い傾向を示したが、研削機構等の確認を行っておらず、その原因は明らかにできなかった。
- 9) 保持時間が長くなるとやや右下がりに研削抵抗は低下し、また下部ベイナイトから上部ベイナイトに変化したことによる硬度低下の影響もみられた。
- 10) 研削試験片(10×10×50mm)による実寸法伸び率は、黒鉛粒数の少ない方が若干大きく、上部ベイナイトより下部ベイナイトの方が大きい。また保持温度673Kで実寸法伸び率は最小値を示した。

最後に本研究を遂行するに当り、ご指導ご助言を下さった琉球大学機械システム工学科助教授糸村昌祐先生に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三井ミ-ハーナイト・メタル(株)技術開発部：素形材, 92, 1, P3
- 2) 塩川忠：鋳物, Vol. 56-6(1984), PP362-369
- 3) 石原安興：鋳物, Vol. 58-12(1986), PP823-830
- 4) 新谷一博、加藤秀治、塩谷外司、藤村善雄：鋳物, Vol. 63-6(1991), PP523-527
- 5) 木曾弘隆、小山満晴、田口富雄：鋳物, Vol. 61-9(1989), PP615-619
- 6) 田中雄一、清水章裕、横内弘宇：鋳物, Vol. 65-2(1993), PP93-98
- 7) 藤田武男、関口克彦、北川亮三、小池範法、大城桂作：  
「ADIのドリル被削性(第1報~2報)」1993, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, PP361-364
- 8) 中満清博、清水一道：日本機械学会  
北海道支部第34回講演会講演論文集, No932-1('93-8-20, 21. 札幌), PP85-87
- 9) 竹中規雄、佐藤久弥：「研削砥石の使用法と選択」誠文堂新光社
- 10) 中島利勝、鳴瀧則：「機械加工」コロナ社
- 11) 糸村昌祐：「球状黒鉛鋳鉄の溶接割れ低減に関する基礎的研究」大阪大学博士論文, 1994, 19

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。