鑄鐵の研究 (第5報) 鑄鐵の凝固過程について*

五十嵐 勇** 大平五郎** 堀籠健男**

Isamu Igarashi, Gorô Ôhira and Takeo Horigome: The Investigation of Cast Iron (5 th Report) On the Solidification Process of Cast Iron. The authors investigated the solidification process of Fe-C alloy experimentally comparing with that of Al-Si alloy. The results obtained are as follows:

(1) When the hypo-eutectic Fe-C alloy was slowly cooled, primary dendrites of austenite were formed at first, then at eutectic temperature the austenite named SASANOHA structure, which were super-saturated with carbon, developed from the primary dendrites.

The super-saturated carbon crystallized out on the axes of SASANOHA as cementite, which immediately graphitized to so-called flaky graphite. Besides, the links of cementite remained on the grain boundaries of austenite and in a few cases it happened that the blocks of cementite were closed in the austenite, and they turned into chain-like graphite and block graphite with the lapse of time.

(2) As to the hypo-eutectic of Al-Si alloy, the primary dendrites of Al were formed at first, then SASANOHA solid solution of Al developed followed by the separation of Si on the axes of SASANOHA. The final structure was the eutectic Si-needles which corresponded to the flaky graphite in Fe-C alloy.

(Received May 18, 1951)

** 東北大學工學部金屬工學科

* 1951年4月本會東京大會に發表

I. 緒 論

鑄鐵を急冷した場合の凝固過程については先に⁽¹⁾他の多くの二元系共晶合金と比較して述べたが、本研究は特別な急冷は行わない場合の凝固過程、即ち灰鉄組織の生成過程を明らかにするために行つた。こゝで最も問題となるのは黒鉛の生成機構であるがこれに關しては今迄も H. Hanemann⁽²⁾, A. Boyle⁽³⁾, 青木⁽⁴⁾, 谷村⁽⁵⁾等多くの論文が發表されている。本實驗は先ず 10% Si の Al-Si 系合金を用い、それを各温度から水中に焼入れ、その温度における組織を検討することによつて凝固過程を調べた。鑄鐵の凝固過程の實驗は、第三元素の影響を除くために純 Fe-C 系合金を使用し Al-Si 系合金の場合と全く同様な方法で行つた。その結果從來とは異なり Fe-C 系合金も決して一般の合金と異なる特別な過程を経て凝固するものではなく、Al-Si 系と全く同様な凝固過程をたどることが明らかになつた。

II. 實驗試料並に方法

(A) 試料 Al-Si 系: 99.99% の Al と計算配合 10% の金屬 Si を熔製し、それを原材として各 1 回の使用量は 30 g とした。

Fe-C 系: 電解鐵に電極黒鉛を加炭し約 3.8% C のものを作成し、その 50 g を 1 回の實驗に使用した。

(B) 裝置並に方法 熔解にはエレマ爐を用い、燃焼管は石英管で上部に蓋、下部に支えを取りつけ、この支えを取りはずして試料をルツボのまゝ爐の下の水槽に落し込めるようにしてある。實驗は前述の Al-Si 系合金、或いは Fe-C 系合金を既述の量だけ採り、アルミナルツボを燃焼管中に裝入し速かに溶解する。最高溶解温度は Al-Si 系合金の場合は總て 650° に一定にし、この温度に到達後直ちに所定の冷却速度で冷却を始める。冷却速度は何れの合金の場合も熱分析を行いつゝ 2°/min, 10°/min になるように電流を加減する。そして目的の温度に到達した瞬間、爐の下の水槽にルツボのまゝ試料を落し込んで急冷しその組織を調べた。Fe-C 系合金も Al-Si 系合金と全く同様に行つたが、唯だ溶解中の脱炭を防ぐ意味で燃焼管内を還元雰囲気にするため溶解ルツボの下に炭素粉を置き、また最高加熱温度は 1350° である。焼入れの時期は熱分析を行いつゝ、それぞれの合金の共晶開始以前、共晶開始直後から終了迄の區間を適當に區分して焼入れ、その共晶温度における凝固過程を詳しく調べた。更に必要に應じて低温度からの焼入れも行つた。

III. 實驗結果並に考察

(A) Al-Si 系合金 (a) 實驗結果: 共晶温度以上から急冷したものの組織は Al の初晶デンドライトと、焼入れ當時未だ湯であつた所の微細な共晶組織であつた。共晶直後に焼入れたものの組織を Photo. 1 に示す。初晶の Al のデンドライトと微細な共晶との他に、初晶から發生しかけている笹の葉に似た小さな Al の固溶體が現れている。更にほんの少し共晶反應を進行させた後に焼入れたものの組織を Photo. 2 に示す。初晶から發達しかけていた小さな Al の固溶體の軸に Si が針狀であるが斷續的に析出しているのがわかる。更に共晶温度を進行させてから焼入れたものの組織 Photo. 3 では、Photo. 1, 2 では小さかつた笹の葉狀の Al の固溶體は相當成長し、それにつれてその中に存在する Si も大となつて來ているのが判る。然し Si はやはり斷續的で一つの結晶でないことも寫眞から明かである。共晶反應後に焼入れたものの組織は Photo. 4 に示すように普通の Silumin の粗い共晶組織である。

(b) 考察: 以上の結果から Al-Si 系合金の凝固過程は先ず温度の降下につれて Al の初晶がデンドライトとして晶出する。共晶温度に到達すると、Photo. 1 に示されるような小さな Al の固溶體が初晶から笹狀に晶出し始める。この固溶體は横斷の状態にあるものにも縦斷の状態にあるものにも Si は見出せないが、次の時期 (Photo. 2) にはその軸に Si の析出が認められるから今迄考えられているように共晶反應において、Al と Si が同時に晶出するのでなく、先ず湯から Al の固溶體が晶出しその中に Si が固體から析出する。従つて笹葉狀に晶出する Al の固溶體は Si に過飽和であると考えざるを得ない。すなわちシルミンの凝固過程は、先ず Si に過飽和な Al の固溶體が晶出し、Si は過飽和な固溶體から析出する。このことはシルミンの eutectic colony において共晶地たる Al は一つの結晶であること、また共晶の Si は決して一つの針狀結晶ではなく斷續的に連結したものであることなどもその晶出機構を指示するものゝように思われる。

(B) Fe-C 系合金 (a) 實驗結果: この合金を共晶温度以上から焼入れたものは、初晶オーステナイトのデンドライトと、焼入れ當時は湯であつた所の微細レーデブライトのみで黒鉛は存在しない。即ち黒鉛の生成は亜共晶成分のものにおいては共晶温度以上には行われぬ。このことは從來の研究結果とも一致する。Photo. 5 はこの合金を共晶凝固反應の途中で焼入れたものであるが、初晶オーステナイトから初晶とは形態的に明らかに區別し得る笹の葉狀のオーステナイトが發達しているのが見られる。以後このようなオーステナイトを便宜上笹の葉オーステナイトと名づける。所でこの笹の葉オーステナイトの軸には既にさかであるが黒鉛らしきものゝ存在が認められる。所が Photo. 6 は共晶反應開始瞬間に急冷したもので笹の葉オーステナイトの集合が見られるが、この多くの笹の葉オー

(1) 五十嵐, 大平, 堀籠, 本誌, B-15(1951), 324,

(2) H. Hanemann, Stahl u. Eisen, 51 (1932), 966.

(3) A. Boyles, A. I. M. E., 125 (1937), 141.

(4) 青木, 本誌, 13 (1949), No. 11 P. 16.

(5) 五十嵐, 大平, 堀籠, 本誌 B-15 (1951) P. 324

ステナイトには Photo. 5 に相當する黒鉛らしきものもまた Fe_3C も存在しておらず、ただかすかな線が見えるだけである。Photo. 7 も Photo. 6 と同様な處理を行つた試料の組織の一部であるが、笹の葉 オーステナイト の軸に Fe_3C が斷續的に析出しているのが認められた。Photo. 8 は Photo. 7 と同じ試料の他の部分の組織であるが、これは笹の葉 オーステナイト の軸に Fe_3C と黒鉛が斷續的に走っているのを示している。Photo. 9 は共晶途中で焼入れたもので相當凝固が進行したもので笹の葉 オーステナイト

の軸に所謂片狀黒鉛がはつきりと存在している。Photo. 10 は共晶完了附近で急冷したもので少量のレーデブライトを残すのみで大部分の組織は普通の片狀黒鉛組織である。Photo. 11, 12, 13 は共晶凝固の進行の過程を全體的に見たものであつて、Photo. 11 は共晶初期、Photo. 12 は途中、Photo. 13 は終了附近で急冷したもので次第に笹の葉 オーステナイトが増加成長し、それにつれて黒鉛も大且つ多くなつて行くのを示している。

(b) Fe-C 系合金實驗結果の考察： 以上の結果から黒鉛

Photo. 1~12

の生成過程を考えて見る。従来黒鉛は共晶温度において湯中から黒鉛核を中心として晶出成長し、その發達につれて周囲にオーステナイトが晶出して筐の葉オーステナイトが生成し、黒鉛は初晶デンドライトに到達して彎曲或いは成長が止るものとされている。もしそうならば Photo. 6 の如く多くの筐の葉オーステナイトの集合にも係らず黒鉛が全然存在しておらない組織、或いは Photo. 7 の黒鉛の代りに Fe_3C の存在するもの、更に Photo. 8 の Fe_3C と黒鉛が斷續的に連結しているような組織は、黒鉛が先ず晶出成長し然る後筐の葉オーステナイトが晶出するという従來の考えからは全く説明がつかない。更に興味あるのは Photo. 9 でこれは筐の葉オーステナイトと初晶オーステナイトの接續部を示している

り、それ故次の段階において Fe_3C が筐の葉の軸に析出し、高温度のため直ちに黒鉛化を行い、所謂片状黒鉛となる。Photo. 6, 7, 8, 5 及び 9 はこの順序を明瞭に示すものと思われる。要するに黒鉛は湯から晶出するのではなく、共晶温度において晶出した C に過飽和な筐の葉オーステナイトから析出するものであつて全くシルミンの凝固過程と同じであるが、たゞ Fe-C 系合金においては析出した Fe_3C が黒鉛化を行うために複雑に見えるだけである。なお Photo. 15 は共晶以下 30° から急冷したもので少量の free Fe_3C が残留しているだけでレーデブライトは全然存在していない。そしてその中の黒鉛は上述の所謂片状黒鉛の他に、オーステナイト粒界に存在する黒鉛、更に塊状黒鉛の存在が見られる。Photo. 16 はオーステナイト粒

Photo. 13~17

が、この両オーステナイト中の急冷によつて析出した Fe_3C の方向が全く同じであるということ、筐の葉の軸をなす黒鉛が初晶オーステナイトに幾分喰い込んでいることである。若し従來のように黒鉛が湯中から優先的に成長したものであるなら黒鉛は初晶に喰い込み得ないし、また従來の考えによれば初晶オーステナイトと筐の葉オーステナイトは全然別箇に晶出したものであるからその中の Fe_3C の析出方向が同じであることはあり得ない。すなわちこの筐の葉オーステナイトはこの初晶オーステナイトから成長したものである。筐の葉オーステナイトの發生源以外のデンドライトとは、はつきりした境界があることは Photo. 14 から明かである。以上のことから吾々は黒鉛の生成の過程を次の如くに考えた。即ち Fe-C 系合金もシルミンと全く同様に湯が共晶温度に達すると先ず初晶オーステナイトから筐の葉オーステナイトが晶出發達する。そしてこのオーステナイトもシルミンの場合と同じく C に過飽和であ

界の黒鉛を擴大したもので Fe_3C と黒鉛が連鎖状に連結しておりこれは凝固完了時にオーステナイト

粒界に残された少量の湯、或いは冷却の際に析出した Fe_3C が黒鉛化して生成したものであろう。また塊状黒鉛はオーステナイトに囲まれた少量のレーデブライト或いは Fe_3C が分解して生じたものであることは Photo. 17 (共晶途中焼入れ) から考えられる。結局亜共晶 Fe-C 系合金には片状黒鉛の他に上述のような黒鉛もみられる。以上 Fe-C 系合金の凝固過程について述べたが、Si, Mn 等の第三元素の影響については後の機会に譲る。

IV. 總 括

(1) Fe-C 系亜共晶合金を湯から冷却すると (i) 初晶オーステナイトが晶出。 (ii) 共晶温度において C に過飽和な筐の葉オーステナイトが初晶から成長する。 (iii) 筐の葉の軸に Fe_3C が析出する。 (iv) Fe_3C は黒鉛化する。かくして黒鉛が湯から直接晶出した形跡は見出せなかつた。なおこの他にオーステナイト粒界の Fe_3C 、更にオーステナイトに囲まれた小塊の Fe_3C が分解して生じた黒鉛が存在する。

(2) 亜共晶 Al-Si 系合金も、初晶 Al のデンドライトに次いで共晶温度において初晶から Si に過飽和な筐の葉状 Al の昇容量が晶出し、その後その軸に Si が析出して、Fe-C 系合金の片状黒鉛に相當する析の針状共晶組織を示す。

本研究の一部は文部省科学研究費によつたことを記して謝意を表わす。