

報 告

Sheffield International Conference on Solidification and Casting

高 橋 忠 義*

この会議は、1967年に Brighton で開催された「The Solidification of Metals」に関する国際会議以降の凝固分野でなされた進展を報告し、討論するために7月18日から21日までイギリスの Sheffield で開催されたものである。

凝固に関しては二国間シンポジウムがあり、また広い分野における国際会議でも行なわれているが、表題の会議は凝固のみを広くとらえた唯一の国際会議である。特に第一回にあたる Brighton での会議報告集はその後の世界の凝固に関する研究の展望をきめ、高く評価されるとともに、金属材料の材質改善には凝固過程を制御することの必要性が強く認識され、精力的な研究が行なわれ、多くの成果をみている。

筆者が大学を卒業して凝固の研究をするにあたって参考にしなくてはならないとされたものは、イギリスの鉄鋼協会により主に1924年から1943年までに出版された Special Report No. 1~29 である。その内容は基本的問題に正面から取り組み、着実に組織的に積重ねられたものであり、今日でも重要な示唆を与えるもので、このことがイギリスで凝固に関する国際会議が開催される重要な背景となつているものと思う。

今回は出講希望者が多く、3日間の予定を3.5日に延長して配慮したが、選択に苦慮したようである。会議は7つのセッションに分かれていて、各セッションの講演数は平均11で総数は77であり、一つの会場で第1セッションより順次発表が行なわれた。日本からは4つの論文が報告されている。充分な前刷があるとの立て前より一論文の発表時間は10分間に厳守させられ、各セッションの講演発表後60~75分の総合討論があり、その場での自由な質疑応答が行なわれた。その内容はすべて記録され、後日出版される報告集に掲載されることになっている。

第1分科から第7分科までの主な内容と方向についてふれる。

第1分科：成長形態、溶質分布および凝固過程の安定性

・定常および非定常条件下で方向性凝固したデンドライ

* 北海道大学工学部

トアーム間隔 (J. A. SPITTLE, D. M. LLOYD)

定常および非定常条件下で方向性凝固した Pb-Sn 亜共晶合金のデンドライトアーム間隔を測定している。定常凝固条件下で液相中の温度勾配 (G_L) を約 $2^\circ\text{C}/\text{mm}$ と $20^\circ\text{C}/\text{mm}$ とに変化させて観察すると、(a) 一次アーム間隔 (d_1) および二次アーム間隔 (d_2) は一次の先端進行速度 (R) あるいは G_L の増加につれて減少し、(b) 低い G_L では d_1 と d_2 は合金の初期組成 (C_0) の増加につれて減少し、(c) 高い G_L では d_1 と d_2 は C_0 に依存しない結果を得ている。また非定常凝固の場合には d_1 と d_2 は冷却速度 ($G_L R$) または C_0 が増加するにつれて減少する。

アーム間隔と部分凝固時間との関係は (a) 部分凝固時間に対して d_2 は直線関係にあるが、 d_1 はそのような関係にはならない。また (b) ある部分凝固時間では (i) 定常条件下で凝固した合金での高い G_L では (部分凝固時間の短い場合を除いて) つねに最小の d_1 が生ずる。(ii) d_2 もまた (i) で与えられた条件では小さくなる傾向がある。

・低合金鋼のデンドライトサイズと合金元素との関係における新たな観察 (D. J. HURTUK, R. A. TZAVARAS)

この論文はリパブリックスチールの中央研究所におけるストランド鑄造の凝固過程の理解を深める目的で実験と実際操業とをむすび合わせた結果を述べている。低合金高張力鋼ブルームの連続鑄造における凝固条件と欠陥との因果関係を明確にするために実地試験用のストランド鑄造の数値プログラムを開発した。このプログラムは柱状晶長さ、中心偏析、内部割れなどの鑄放し状態における巨視的特徴をそれぞれの操業上のパラメーターとともに関係づけたものである。

その中でストランド鑄造過程に影響を与える多くのパラメーターがあるにもかかわらず柱状晶領域の長さと鋼塊の炭素量との間には明確な関係が得られた。すなわち最近の考えに反して炭素濃度の増加は低合金鋼の柱状晶長さやデンドライトアーム間隔などの凝固パラメーターの大きさをある炭素濃度で最大限に高めることを示している。この点をこえて炭素濃度が増加するとデンドライ

トの大きいと間隔はほとんど同じ割合で減少する。この挙動は炭素固有のものであり、たとえば硫黄のような他の元素はそのような効果を示さない。炭素の挙動は鉄-炭素合金で生ずる包晶反応により引き起こされるものであろう。

・温度勾配ゾーンメルテングと鑄塊のマイクロ偏析
(D. J. ALLEN, J. D. HUNT)

デンドライト凝固中の“金属に類似した”透明物質(サクシノニトリル)を観察すると、デンドライト主軸の方向にある温度勾配の高い方に向けて二次アーム間隔が移動する。このような現象は温度勾配のあるデンドライト二次間隔の液相の高温側と低温側とで溶解と凝固がそれぞれ別個に起こることによるものであり、これが温度勾配ゾーンメルテング(TGZM)機構である。

この現象が起これば初期の比較的純粋な固体は再溶解し($K < 1$, K : 平衡分配係数)低温で晶出したより不純な固体とおきかわるので、TGZMはマイクロ偏析を減少させる。鑄塊において観察されたいくつかのマイクロ偏析の特徴はこれをもととして説明されるであろう。

第2分科: 共晶および包晶凝固

・鉄基合金における包晶反応から共晶反応への変化
(H. FREDRIKSSON)

鋼は種々の合金元素の含有量に依存してフェライトあるいはオーステナイトに凝固する。オーステナイト安定化元素を添加すると凝固過程で包晶反応が生ずる。より含有量高めるとオーステナイトの初晶晶出が起こる。そのような合金にフェライト安定化元素を添加すると共晶反応が生ずる。ここでは合金鋼におけるこの複雑な反応をFe-Cr-Ni系およびFe-Cr-Ni-Mo系合金の一方凝固実験で検討している。

第3分科: 核生成と結晶粒微細化

・鑄鋼の核生成(J. V. WOOD)

鑄鋼に使用可能な核生成剤の生産への応用性のために結晶粒微細化の問題に対する種々の理論的アプローチを行なっている。格子不整合モデルの変形が概略され、この理論を検討するために微細化剤として立方晶および六方晶の構造を有する化合物を添加してTiC, ZrB₂が微細化に有効であることを示している。

・エレクトロスラグ再溶解材の結晶粒微細化
(J. CAMPBELL)

オーステナイトステンレス鋼、インコネル 600、そしてニモニック 90 の 75 mm 直径鋼塊のエレクトロスラグ再溶解(ESR)の実験において溶湯と同一組成の(粉末でない)粒子を添加することにより、単純な結晶粒微細化過程に関する理論および実験的評価を述べている。

鑄型内のスラグ層から液体金属プールに粒子を加えると、粒子は(i)結晶粒微細化の核として結晶粒大きさを1/100まで減少させる。また(ii)一般に熱放出のしがたい鋼塊の中心域における凝固速度を増加させる内部

チルとして働く。このように、凝固速度は約10倍増加し、デンドライトアーム間隔は約1/3に減少し、また生産は約2倍まで向上した。さらに適当な速度での電磁攪拌を加えると(i)20%の電力減少(ii)添加粒子の分布の改善、(iii)表面仕上げの向上、(iv)鋼塊の結晶粒数は添加された粒子数の 3×10^5 倍以上の結晶粒増殖等の効果が期待できる。

ニモニック 90 の機械的性質はかなり向上し、熱処理性も改良された。

第4分科: 凝固および品質の制御-連続鑄造

・閉塞頭水平連続鑄造における熱伝達

(R. HADDEN, B. INDYK)

水平連続鑄造は高い鑄造装置や彎曲鑄型装置を必要とせずに安全な管理が容易なために、垂直や彎曲鑄型鑄造よりも実用上の利点が多い。けれども水平連続鑄造のさけられない非対称性は、その装置の設計や操業に考慮しなければならない要因となる。そこで連続鑄造鑄塊の重要な位置に一連の熱電対を設定し、金属から鑄型や冷却系への熱流の測定を行なつた。

その結果多くの場合鑄型の底部は上部よりも熱放出が大きい。引き抜き速度が大きくなると、鑄型の上部の大きな断面積を通しての熱流が底部のそれに相当する断面を通しての熱流よりも大きくなるために温度逆転が起こるということがわかつた。このことは金属の結晶組織に重要な影響を持つので、最終製品の品質にも影響を与えるものである。

・凝固割れの組成依存性に関する実験と理論との比較
(T. W. CLYNE, G. J. DAVIES)

鑄造中の凝固割れ現象を充分に理解し、それを制御するためには、溶質含量の変化が割れにどのような影響を与えるかの機構を理解することが基本的に必要なことである。けれどもこれまでの割れ感受性と組成に関する理論的考察では単純二元共晶系においてさえも実験結果を予測することができない。

本研究では溶質含量の変化によつて生ずる最も重要な効果が不安定な二相(液体-固体)領域を通しての質量輸送に帰因するものであることを述べている。これはまず溶質再分配のときに決まる局部液相率の変化速度をもととしている。この仮定は状態図特性よりなされる割れ感受性の予測を可能にし、これを基礎とした解析も示している。その予測はAl-Mg, Al-SiそしてAl-Zn系において組成と割れ感受性に関する実験データと一致することが示されている。

・連続鑄造における二次冷却と製品の品質

(A. ETIENNE, A. PALMAERS)

連鑄ブルームの割れ生成を冷却条件に関連づけてプラント試験、実験室的規模の実験、およびモデル計算で検討し、割れ生成の基準を示している。

第5分科: 凝固と品質の制御-マクロ偏析, ポロシティ

および凝固シミュレーション

。高炭素鋼塊の凝固 (F. WEINBERG, J. LAIT, R. PUGH)

上広がりとは下広がりとの鑄型に 550 kg と 2500 kg 重量の 0.7% C 鋼塊を鑄造して、オートラジオグラフによる溶湯流動、炭素偏析および鑄造組織を検討した。ここで用いた二つの鑄型形状においては溶湯流動が異なり、誘起流の生じないこと等の現象を見い出している。低密度液体の上昇流による A 偏析の規則的な配列には Au¹⁹⁸ や C が濃縮しているのが観察された。A 偏析パターンは二つの鑄型形状において異なり、炭素のマクロ偏析は主として A 偏析と関係があつた。また鑄造組織を溶湯流動と V 偏析とに関連づけて考察している。

第 6 分科：組織と材質の関係および溶接

。オーステナイト鋼の凝固中の偏析と組織におよぼす成分の影響 (O. HAMMAR)

偏析、ミクロ組織と熱間加工性におよぼす成分元素 (C, N, Cr, Ni, Mn, Mo) の影響を試験して、熱間加工性の改善には δ 晶の分布状態が大きな要因となることより、 δ 晶が得られる Ni と Cr の成分限界を示している。

第 7 分科：新しい凝固方法

。アルミニウムとアルミニウム合金の板形鑄造方法

(A. HANDASYDE Dick, D. D. DOUBLE, A. HEL-LAWELL, M. C. SIMS)

古くから行なわれているパイプオルガンのパイプをつくるための板の製造法を省エネルギーの見地より近代工業に応用しようとする試みである。デンドライトの形態を変化させるために種々の微量添加物を加えたアルミニウム、アルミニウム銅合金、アルミニウムシリコン合金に関して小規模のプラントの設計と操作を述べている。

。金属製針金の急速凝固 (J. V. WOOD)

金属製針金およびリボンを溶湯から急速冷却して製造する技術を記述している。米国のバットル研究所で開発された“ペンダントドロップ”溶湯抽出方法を詳細に述べ、かつ生産に必要な変動因子の重要性を説明している。

。シクソキャスト鋼の組織と性質

(K. P. YOUNG, R. G. RICK, M. C. FLEMINGS)

半固体のレオキャストしたスラリーの揺変性を利用したダイキャストのシステムを記述している。このシステムはマサチューセッツ工科大学においてパイロットプラントの規模にまで開発している。そのシステムは鑄塊を連続的につくるレオキャスト、個々の装入物を半固体状態に再加熱する再加熱炉、その再加熱装入物が鑄造や商業用常温ダイキャスト機に適しているかを決定するための“ソフトネスインジケーター”から成っている。

この方法で行なつた AISI 304, 440C およびその他の鋼における初晶粒子の大きさ、相・酸化物系介在物とミ

クロ偏析に検討を加え、また性質と組織との関係も示し、普通鑄込み合金との比較を行なっている。

。液体金属処理による鑄鋼の複合組織の改良

(P. A. BLACKMORE, A. SEQAL, A. J. BAKER, P. R. BEELEY)

主としてマルエージング鋼型のマトリックス組成を有する鑄鋼の鑄造直前に溶湯浴にかなりな量の炭化物形成元素を添加すると、粗大な炭化物の分散状態が得られ、条件によつては塊状の一次炭化物の容積率が 14% までになる。

ニオブウムやヴァナジウムが添加されると溶湯中に第一相として粗大な炭化物が均一に分散し、凝固後半にはデンドライト間隙内に層状形態のより細かな炭化物が形成される。

また得られたマトリックス組織の改良のために熱処理が施こされ、その材料を光学顕微鏡と電子顕微鏡、機械的試験および蛍光 X 線法による分析を行ない、3~10 μ m の範囲の分散した粗大な炭化物は普通のマルエージング溶体化処理によつては影響を受けないが、熱処理を受けたマトリックスはマルエージング鋼の急速時効硬化反応およびその他の一般的特性も示す結果を得ている。

他の鋼にも同様な結果が得られ、その複合組織は金型や工具へそのまま利用できる。

。低炭素鋼の凝固過程における電磁攪拌の冶金学的考察 (R. WIDDOWSON, H. S. MARR)

連続鑄造への電磁攪拌の応用を述べている。鑄型内での攪拌は表面や表面下での酸化物と硫化物系介在物の含有量を減少させるので、表面品質が改良され、アルミニウム脱酸低炭素ストリップ鋼の生産にその技術に応用する目的でパイロットプラント段階まで研究を行なつた。さらに内部健全性や組織の改良および鑄造条件の許容範囲の増加を期待して、鑄型の下での電磁攪拌をいくつかの連続鑄造プラントに適用した。

ここでは各セッションで筆者が特に注目した論文を要約してのべたものである。

総体的に感じたことは材質改善と省エネルギーなどの多角的な面から凝固プロセスの、積極的な見なおしが進行しているように見られる。

会議の初日には、Sheffield 市長招待のレセプションが 1600 年代に建てられた Cutler's Hall で午後 8 時より午前 2 時まで古いしきたりを交え豪華に行なわれた。

今回の会議に印象的であつたことは、イギリスの現状に対して種々の意見や見方があるが、人類の進展過程を知っているかのように、迷うことなく一歩、一歩着実な道を前進しているイギリス研究者の態度であつた。