鑄 鐵 と 酸 素 の 研 究

酸素による組織變化に關聯して二, 三の考察

本 間 正 雄* 橋 本 雍 彦*

Masao Homma and Yasuhiko Hashimoto: Research on the Relation between Cast Iron and Oxygen; Some Considerations in Connection with the Structural Changes by Oxygen.

The influence of chemical composition and cooling velocity on the structure of cast iron which is closely related to its oxygen content has been discussed.

Spheroidal kish graphite was easily produced in hypereutectic alloy when it was effectively deoxidized. The results are summarized in Table 1.

(Received June 9, 1952)

I. 緒 言

本論文は前報告⁽¹⁾に關連してなお二, 三の考慮すべき點について補足するものである。化學成分, 冷却速度にかゝらず酸素による組織變化の様相は前論文にて詳述した如くであるが, 同一含有酸素量にありても黒鉛の大きさ, Matrixは含有元素量によつて影響をうけることは豫想される。又冷却速度についても同様のことが考慮される。次に最も關心のもたれることは組織變化を酸素の定量的關係において關連づけることであるが, これについてはその困難性を分析方法と溶解酸素, 非金属介在物の關係から論じた。

II. 普通 について 化學成分の影響について

こゝに化學成分とはガス, 非金属介在物以外の鑄鐵に普通含有される5元素 C, Si, Mn, P, S あるいはその他の金屬元素を指す。Table 1は既報⁽¹⁾のごとく Fe-C, Fe-Si-C

場合は別の機會に考えたい。

1. C, Si の 影 響

飽和度 Sc の 1 以下の場合について特に述べることは

×100

Photo 1 Quasispheroidal Kish Graphite and Fine Granular Graphite. (Sc > 1) IV' Structure.

ないが, Sc 1 以上の過共晶の場合には Kish Graphite の存在が問題になる。普通の酸素量鑄鐵では Kish Graphiteは大きな片狀の初晶としてあらわれるが, 酸素量が減少するにつれ片狀の初晶黒鉛もその厚みを増してきて酸素量 IV'(Table 1 照參)の過共晶鑄鐵では準(擬)片狀 Quasi-

Table 1 Relations between Cast Iron Structure, Oxygen Content, and Cooling Velocity.

1	Dissolved Oxygen	Decrease ← Oxygen→ Increase											
2	Mark	VII'	VI'	V'	IV'	III'	II'	I	II	III	IV	V	VI
3	Structure (100~400°/min at F.pt.)	Ws' & Nodular G	Ws & Nodular G	Inver-se Chill	Fine Granular G	Eutectic G	Rose G	Flake G	Rose G	Eutectic G	Inver-se Chill	Lede-buritic W ₀	Massive Eutectic W ₀ '
4	Structure Change Cooled Slower than 3	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
5	Structure Change cooled more rapid then 3	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙
6	Theoretical O ₂ Amount (O ₂ of Fe-C-O-Fe Cluster)	a %	Difference of Oxygen Amount between Each Stage 0.010-a/8%(Mean Value)									0.010 %	—

Commercial Cast Iron (3.44 % C, 1.72 % Si, 0.59 % Mn, 0.37 % P, 0.076 % S) について行つた實驗の結論でこゝに用いた鑄鐵組成範圍では微量 O₂ の増減に伴う組織變化はこれと異なつた様相を示すことはないが, 普通に含有される各元素について組織變化への影響を吾々の實驗觀察から次のように要約出来る。なお球狀黒鉛化を阻害⁽²⁾するといわれている As, Sb 等の特殊元素の相當量存在する

flake Graphite), 準球狀になる (Photo. 1)。さらに酸素が減じて VI', VII' になれば準球狀, 球狀黒鉛の初晶になる (Photo. 2)。 (Sc 1 以下では C 共晶點で白鉄化し (100~400°/min at Freez. Pt) について固溶體から球狀燒鈍黒鉛を析出する)。

2. Mn の 影 響

Mn は白鉄化促進元素である⁽³⁾から Wo (V) になるのに Mn の多いものは少ないものに比して酸素量がより少くてすむ⁽⁴⁾。また Ws (VI')を生ずるのに酸素量がより多くて

* 東北大學金屬材料研究所

(1) 本間, 橋本, 本誌, 16 (1952), No. 9, p. 486.

(2) 田中, 村松, 早川, 鑄物, 23 (1952), No. 3, p. 1.

よいことになる。この場合の Ws にては黒鉛はより析出しにくくなり又酸素量が充分に減少することにより過冷却度

Photo 2 Spheroidal Kish Graphite. (Sc>1) VI'~VII' Structure.

が大になり白鉄になったものではなく Mn の白鉄化作用により促進されたものであるから Ws の特徴の過冷却針状結晶は出にくくなる。酸素量が多くなり白鉄化した場合と酸素量が少くなり熔湯の過冷却度を増大して白鉄になった場合はその白鉄化機構は區別して考えなければならない。Cr, Mn, Mg 等の白鉄化作用はすでに報告⁽⁴⁾したが前者の酸素の多い場合に属する。なお Mg の場合はその量が少なく脱酸のみに作用しているときは後者の作用（過冷却作用）のみが働くが添加量が多くなり合金するようになると前者の白鉄化作用が働くことになり、これを防ぐために Si を接種してこれによる黒鉛化作用で相殺しなければ球状黒鉛が得られないことになる。球状黒鉛鑄鐵において Mn が強さを増すには必要な元素であるにかゝらず >0.4% または >0.8%⁽⁶⁾ は好ましくないとされるのは全く同一の理由にもとづく。Fe-Si-C 合金にて弱い還元性熔滓で脱酸してゆく場合 Mn 0.003~0.005% では Ws(VI')までゆくが Mn 0.15% になると Ws 迄は組織變化せず III' の共晶黒鉛組織までしか變化しないことはすでに述べた⁽⁶⁾。この場合は酸素量の減少の程度は同じであるが、Mn は酸素とその白鉄化作用の點において同じであるから Mn の多い後者では酸素量がより多いことと同じになり換言すれば過冷却度が充分でなく Ws にならなかつたものである。但し Mn の非常に多い場合は上記のように Mn の白鉄化作用は熔湯を容易に白鉄化することはいふ迄もない。

要するに Mn の作用は C との親和力が大であるから、熔鉄中の C の活量を減少せしめる點にあると考えられる。この點では酸素の作用と同じであるから Table 1 の I より右の組織の生成に對しては Mn の存在によつて O の必要量は少なくなると考えられる。この意味では Mn と O の白鉄化に對する作用は同じタイプと解される。従つて Table 1 の右から左方への組織の漸變に對して Mn の存

在することは等しい酸素量では黒鉛化が妨げられ、等しい黒鉛組織を示すには Mn の少ない場合よりも許容酸素量が少なくなる。Table 1 左端の Ws に對しては Mn の存在が Ws の生成の如き著しい過冷却に好都合か否かによつて許容 O 量が左右される。

3. P, S の影響

微細黒鉛の組織にてステダイトが存在するとその周囲にある黒鉛は比較的に片狀になる (Photo. 3)。これはステ

Photo 3 Fine Granular Graphite, & Flake Graphite Around the Steadite.

Photo 4 Fine Granular G. Cooled 16°/min at Fr. Pt.

ダイトの融點が低いことに基づくと考えることが出来る。これは III', IV' と共に III' 組織にてみられ黒鉛形を不均一にする理由になる。S の白鉄化作用はその存在は酸素増加の場合白鉄 Wo を生ずる傾向を強め、酸素減少の場合は酸素の存在するのと同じ結果になり組織變化を不規則にする。球状黒鉛も S の多いときは生じ難いことは Mg 鑄鐵の場合周知のことである。但し S の白鉄化作用は酸素、Mn, Cr 等とその白鉄化機構は全く異なるのではないかと吾々は考える。S 原子は C 原子と相互反撥的であり O, Mn, Cr 原子等は C 原子と相互吸引的であるからである。つまりこのことは Fe-C 溶體において C 濃度の増すにつれ (Si と同様に) S の活動度は増すのに O, Mn の活動度の減ることから豫想出来る。この點からは S は本來は Si と同じ黒鉛化作用をすると解することが出来る。實際には S が白鉄化作用を呈するのは S の存在は C の活動度を大にするから C 濃度を増すと同じ結果になり、このことは酸素の活動度をさらに小にして従つて酸素と C の間の結合を強めてつまり Fe-C-O-Fe Cluster⁽⁸⁾を増加して白鉄化作用を結果することになる。Si の場合も同様に考えられるが S と酸素との結合力に比して Si 酸素間の結合力

(3) A. Boyles, T. Amer. Inst. Min. Metall. Eng., 125 (1937), 141; 135 (1939), 376; W. J. Williams, J. Iron Steel Inst., 164 (1950), 407.

(4) 本間, 橋本, 布施, 岩瀬, 本誌, 16 (1952), No. 5, 260; 265.

(5) 本間, 橋本, 本誌, 16 (1952), 169.

(6) M. Kuniansky, Foundry, 76 (1950), No. 1, 62; A. P. Gagnebin, K. D. Millis, N. B. Pilling, Iron Age, (1949), Feb. 17; 鑄物便覧, (1952), p. 340.

(7) Smith, J. Amer. Chem. Soc., 70 (1948), 2724; Schadburn, Marshall, Chipman, Metal Progress, 56 (1949), 214; J. P. Morris, T. Amer. Soc. Metals, 41 (1949), 1425; Ch. Sherman, H. Elvander, J. Chipman, J. Metals, 188 (1950), 334; 佐野, 本誌, A-15 (1951), No. 2, 46; No. 3, 92.

(8) 岩瀬, 本間, 本誌, 16 (1952), 111.

は非常に大であるからこの點で著しく結果が異なつてあらわれてくるものと考えることが出来る。

4. N_2, H_2 について

組織變化に對して普通の化學成分以外に N_2, H_2 が如何に影響するかについても多くの研究⁽⁹⁾があるが O_2, N_2, H_2 の鑄鐵に對する影響は後二者に比して O_2 が非常に大であることは異論はないと思われ、 N_2, H_2 の影響は O_2 を通して第二義的に表われると考えることも出来る。しかし今日迄の鑄鐵の N_2, H_2 に關する研究は研究試料の酸素含有量を考慮しないで行われたものが多く従つてその結果も研究者により一致していない。吾々は既知の種々の酸素量のものについて N_2, H_2 の影響が系統的に求められなければならないとの考えの下に研究を進めている。Table 1 の結果を得た實驗試料中の N_2 量は鑄鐵 I より酸素増加の場合は特に酸素の多い V, VI 鑄鐵にて酸素によりすでに溶解していた N_2 が追出されて 0.005% 程度は減少するが鼠銃の範圍には變化のないことはすでに報告した⁽⁴⁾。又鑄鐵 I より酸素減少の場合は吾々の實驗において試料 Fe-Si-C 合金にては常に 0.008~0.009% の範圍にあり N_2 量一定における變化と考えることが出来る。 H_2 については分析を試みなかった。

III. 冷却速度の影響について

Table 1 は一定冷却速度の下における酸素變化に基づく組織變化であるが同一酸素量の鑄鐵にも冷却速度により組織が左右にずれることが當然豫想される。Table 1 は 100~400°/min at Freezing Point の一定冷却速度の下に對比されたものであるが、今冷却速度をこれより遅くした場合を考えると Table 1 の 4 欄に示すように酸素量の特に少いものはより右側の組織の方向へずれる傾向を示し、酸素量の特に多いものはより左側方向へずれることになる。中庸の酸素量のもの I にありてはその片狀黒鉛はますます粗大になる。たとえば冷却速度 ab 400°/min では組織 III, IV 程度の酸素量の Fe-C 合金を ab 16°/min の冷却速度にすると左へずれて片狀黒鉛になる。又冷却速度 ab 400°/min で組織 VI', VII' 程度の酸素量のことを ab 16°/min に徐冷すると過冷却が減少し C 共晶點から C' 共晶點凝固になり白鉄から IV' の細粒狀黒鉛(過熱)組織(IV') Photo. 4, 5 になる。もつとも徐冷すれば必ず Ws が出ないというのでなくさらに極端に酸素の少いものにては Ws (あるいは直接に球狀黒鉛の晶出) になるもので何れも酸素量と冷却速度の相關關係によるものである。又 Piwowarsky, 組織(IV')のものも肉厚鑄物では内部にゆくにつれ共晶黒鉛(III')を生じ易くなる。次に冷却速度を早くした場合は Table 1

の 5 欄に示すように組織 I より左側のものはさらに左方向の組織にずれる傾向を示し、又右側のものは右方向の組織

×100
Photo 5 Fine Granular G., & Primary Quasiflake & Nodular Kish Graphite Coaled 16°/min.

×300
Photo 6 Nodular G., & Ledeburitic Structure of VI' Iron Cooled more Rapidly than 400°/min.

にずれる傾向を示す。

たとえば II'~III' の酸素量のもを 70×15×100 mm の大きさの楔形に乾燥砂型に鑄造した場合楔形先端の冷却速度の早いため白鉄になった部分は普通鑄鐵金型白鉄組織に類似してくる。また Ws (at 400°/min) のものをさらに早く冷却すると

Photo. 6 のような白鉄になり球狀黒鉛の析出も少くなる。以上のようにより一定酸素量において冷却速度による組織のずれはあるが極端な急冷(何れも白鉄になる)と徐冷は別として Table 1 に示すような順序で酸素變化による組織變化を行うものと考えてよい。たとえば同一酸素量鑄鐵では吾々の實驗した 100

~400°/min at Freezing Pt. (15 m/φ×200 mm 丸棒の乾燥砂型鑄造は 200°/min at Freezing Pt. である) の範圍では同一の組織を示す。又冷却速度にかゝらず冷却速度による過冷度は全酸素量範圍で一定であるから前報⁽¹⁾で述べたように比較的 Table 1 右端のものは白鉄化度 100% 左端は過冷度 100%, I 組織は白鉄化度、過冷度共に 50% と考えることが出来る。次に吾々が共晶黒鉛組織の鑄鐵を得た場合たとえば 200°/min 前後の冷却速度なら酸素量が普通量よりかたよつて多いか少いか何れの場合であるが、中庸の酸素量の I 鑄鐵においても冷却速度の調節(その範圍はせまいが)によつては共晶黒鉛の生ずることに留意せねばならない。なお Matrix の變化を考えると鼠銃鐵の範圍にて冷却速度の遅いほど黒鉛の周圍にフェライトが析出するのは當然であるが、酸素量のますますパーライトは安定度をますます Ar₁' 點にて黒鉛の周圍にフェライトの析出する際すでにある黒鉛表面積密度により影響をうけ片狀黒鉛 I と酸素の多い場合の共晶狀黒鉛 III では後者の方がフェライトの多い場合も豫想される。又黒鉛形への冷却速度の影響は C'~C 共晶點間を通過の際に決定されその後に量的にも析出速度においても黒鉛形への影響は少いがフェライトは主として Ar₁'—Ar₁ 間およびそれ以後にお

(9) Jominy, Foundry, (1926), 508; 田中, 鐵と鋼, 22 (1936), 487; 23 (1937), 857; 宮下, 鐵と鋼, 21 (1935), 5; 23 (1937), 136; A. L. Norbury, J. Iron Steel Inst., 134 (1936), 327; 眞殿, 鐵と鋼, 27 (1941), 832; 佐藤, 堀川, 鐵と鋼, 35 (1949), 373; 金屬, 20 (1950), No. 9, 44.

ける冷却速度により決定されるということが出来る。

IV. 各組織の酸素量と酸素分析について

鑄鐵中の酸素は Heredity の現象の研究においては常に注目され従つて又その分析法は古くから研究されてきたがその精度の點で今でも問題を残している。鑄鐵中の酸素がその融體と固體において存在形態が非常に異なることに分析の困難性のあることはすでに指摘⁽¹⁰⁾されている。鑄鐵の組織を第一義的に決定するのはいう迄もなく炭素である。他の元素は C を介して組織に關與する⁽¹¹⁾。融體中の酸素においても統計的に炭素原子にその attractive force で結合（分子ではない）して O 原子（Fe-C-O-Fe Cluster の O 原子）のみが組織に關與するもので他の溶解 O 原子（たとえば Commercial Cast Iron の融體にて Fe 原子とのみ隣接している遊離 O 原子, Si, Mn 原子にもその attractive force で隣接する O 原子、つまり Fe-Si-O-Fe, Fe-Mn-O-Fe Cluster の O 原子）は組織に對しては間接的存在で殊に不溶の酸化物分子はそれがない所に比したら黒鉛晶析出をより早める核になることもありうるが黒鉛形態に全く關係のないものである。Fe-C-O-Fe Cluster の O 原子は融體にありても他の溶解 O 原子の遊離 O 原子, Fe-Si-O-Fe Cluster 等に關係して温度により相互に量的に變化するが凝固して固體になつてからはこの O 原子は FeO, Silicate の O 原子になる。一方他の溶解 O 原子、不溶酸化物も FeO, Silicate 等になりこの間の兩者の分析上の區別は全く困難である。濕式法による酸化物分析法の結果は組織に關與する酸素の直接の指示としては極めて不充分のことになる。又融體にて Al を相當量に投入して酸素を Al_2O_3 として把握して Al_2O_3 の分析値から酸素を知らうとする方法⁽¹²⁾は熔鋼の場合のように溶質 O 原子がほとんど遊離状態にあるときは比較的問題が少ないが、熔銑融體にて Al により脱炭される酸素は一部分に過ぎずさらに固體になつてからも他の形の酸化物との相互關係が複雑で所謂 FeO 値が何を指すか疑問である。真空熔融抽出法にありても鋼の場合⁽¹³⁾に比して鑄鐵にては（容器等外部からの酸素の入りくる可能性は別として）超高温度にて始めて存在する全酸素をその存在形態に無關係に分析出来るだけで抽出温度の變化により抽出される酸素を存在形態から區別することはほとんど不可能である。以上の諸分析法が酸素の融體中における存在形態との

關聯性の得られないことの他に次に述べるように各組織相互間の酸素量の差が極めて微量で分析精度の誤差範囲に入つてしまうという事實から酸素分析の困難をさらに倍加するものと思われる。吾々は複平衡圖において $E-E' = 0.0075\%$ C から状態圖の考察からこれに等量の 0.010% O_2 (Fe-C-O-Fe Cluster) を以て白銑化酸素量 Wo(V) の理論値と考えた。Table 1 において VII'~V の 9 種類の組織 (IV, V' は中間組織として除く) において各組織が全く等量の酸素量の差があるとは考えられないが隣接する組織間の酸素量の差の平均値は $(0.010-a)/8\%$ と考えることが出来る (VII' の酸素量 (Fe-C-O Fe Cluster) を $a\%$ と考えた, VII' 鑄鐵が完全に脱炭されてるとは考えられない) つまり極めて微量變化で組織が多種類に變化することが判る。このことから (1) 上記のように分析法の不完全とまつて鑄鐵の諸性質特に Heredity の現象を上記の正確度の少い酸素分析値から識別することの困難のこと、(2) この程度の微量の酸素量の差は鑄鐵熔解爐の種類、雰囲気、熔滓の種類、熔解温度により變化することが豫想されるからこれらの條件の異なる毎に得られる鑄鐵の性質が容易に異なることが納得出来る。(3) さらにこの程度の微量の酸素の偏析は 1 ケの試料、鑄造品においても考えられるので（他の元素もこの微量は偏析するがそれは組織やその他の性質に影響する程の量にならない）組織が場所により變化する理由になる。その代表的例が IV および V' の逆チル組織でこの場合縁部と内部で酸素量の差は $(0.010-a)/8\%$ と考えることが出来る*。

VI. 酸素と組織に關係する從來の研究とその批判

酸素増加による組織變化については多くの研究があり、その結果もほとんど一致しているが酸素減少の場合についてはその實驗の困難性と相俟つて研究が少い。最近の研究の二、三についてみると H. Morrough⁽¹⁴⁾と共に Ce による球狀黒鉛鑄鐵の研究者として知られている W. J. Williams⁽¹⁵⁾は J. Chipman および C. Sims, J. Dahle⁽¹⁶⁾等の研究結果を参照しながら黒鉛化傾向と酸素の關係を Fig. 1 のように圖式的に示されるとした。この圖は吾々の Table 1 と大體の關係について一致しているが吾々の立場からは次のような批判の餘地がある。(1) 酸素の少い場合の Williams の Laminated white iron eutectic は Si, Al の最も脱炭の強いと考えられる critical amount にお

(10) J. E. Johnson, T. Amer. Inst. Min. Eng., 50 (1914), 344; J. G. Thompson, Amer. Inst. Min. Metall. Eng., Tech. Public. No. 466, (1932), 22.

(11) 本間, 坂元, 本誌, 投稿中。

(12) 學振編, 鐵鋼ならびに鋼滓分析法(迅速法), (1943) 49; 3 A. Kinzel, J. Egan, R. Price, Metals & Alloys, 5 (1934), 96; 前川, 鐵と鋼, 4 (1948), No. 4-6, p16; 木下, 中島, 鐵と鋼, 37 (1951), 420.

(13) K. Reeve, Amer. Inst. Min. Metall. Eng., Preprint, No. 56, (1933), 21; 矢島, 鐵と鋼, 24 (1938), 974; 大中, 鐵と鋼, 27 (1941), 779.

* 本誌, B15 (1951), No. 6, 268 にて逆チル組織の内外部の酸素量の差を 0.0022% としたのは誤りでこゝに訂正する。

(14) H. Morrough, W. J. Williams, J. Iron Steel Inst., 155 (1947), 321; 158 (1948), 306.

(15) W. J. Williams, J. Iron Steel Inst., 164 (1950), 407.

(16) J. Chipman, A. Schneble, T. Amer. Found. Assoc., 52 (1944), 113; C. Sims, F. Dahle, T. Amer. Found. Assoc., 46 (1944), 65.

いて白鉄になりその前後の量においては鼠鉄であるという實驗結果からもつてきたもので, Si, Al による脱酸の程度

Fig. 1 Graphical Representation of the Graphitizing Effects of Sulphur and Oxygen in Pure Iron-Carbon Alloys by Williams.

は I~II' 鑄鐵程度であつて十分に酸素が少なくなり過冷却により生じた特徴ある Ws(VI') とは異なるものである。

Photo. 7 Needle like Eutectic, & Fine Granular G. & Tempered G. (Fe-C Alloy).

る。酸素の多い場合の Williams の Massive carbide eutectic は酸化鐵添加にとり得たものでこのように多量に酸素のある場合の特徴の白鉄⁽¹⁷⁾であつて, 共晶黒鉛鑄鐵 (III) について酸素増加で白鉄になるものは Ledeburitic cementite であつてさらに酸素が増えたと始めて Massive carbide eutectic になる。(2) Williams は酸素の増えた場合の微細黒鉛を Undercooled graphite として酸素減少による Undercooled graphite と同一のものにしているが前者は過冷却によるものでなく酸素増加による黒鉛化阻止によるものである。(3) Williams は酸素減少による黒鉛の微細化について白鉄化を以て黒鉛化傾向の減少としているが事實は逆に酸素減少により過冷度増大による黒鉛結晶が微細化しついで白鉄になるもので酸素減少により黒鉛

化傾向は増大する方向にある。このことは Table 1 においてこの白鉄から直ちに球狀黒鉛の析出することから了解出来る。吉田⁽¹⁸⁾は Fe-C 合金に繰返し H_2 處理 (40 回)

Photo. 8 The Same as Photo. 7

により白鉄を得ている。この組織は吾々の示している過冷白鉄組織 (VI')(Photo. 7, 8) と同一のものと考えられる。吉田はこの組織を H_2 の影響が著しくなりかつ黒鉛核が少なくなり Fe_3C の大なる結晶の發達したものであるとしているが, H_2 は Fe_3C パーライトの黒鉛化

を阻止することは周知の事實⁽¹⁹⁾であるが共晶點における白鉄化は繰返し H_2 處理による酸素の充分の減少による過冷却によると考えるべきであらう。又黒鉛核の有無は組織を決定するものでなくたとえばこの白鉄を生ずる程度の繰返し H_2 處理實驗において過共晶成分か共晶成分であつても冷却速度が遅ければ球狀黒鉛が生ずるものと豫想される。又 H_2 處理数の増加につれ黒鉛形の从小から大へ再び小になりついに白鉄になる過程は H_2 , 硫化物酸化物等の介在物, 酸化鐵の種々の影響ではなく單に溶解酸素變化によるものと考えられる。

VII. 結 論

酸素による組織變化に關連して (1) 化學成分の影響として過共晶成分にては脱酸により球狀の Kish Graphite を生ずること, Mn の黒鉛の微細化, 球狀化に對する影響について考察した。(2) 冷却速度により酸素量對組織のづれを Table 1 で説明した。(3) 酸素減少の場合についての最近の研究について二, 三の考察を試みた。

終りにのぞみ本研究にあたり終始御懇篤な御指導を賜つた東北大學岩瀬慶三教授に深甚な感謝の意を表します。本研究の研究費の一部は文部省科學研究費の補助によるものであることを附記して感謝の意を表します。

(18) 吉田, 鐵と鋼, 36(1950), 337.

(19) 澤村, 本誌, 16 (1952), 201.

(17) 音谷, 鑄物, 15 (1943), 448.