非消耗電極式アーク溶接における 鉄溶接金属の窒素吸収について*

桑 名 武**, 粉 川 博 之**

The Nitrogen Absorption of Iron Weld Metal by Gas Tungsten Arc Welding*

by Takeshi Kuwana** and Hiroyuki Kokawa**

Using an arc atmosphere controlling chamber, effects of the welding condition and atmosphere on the nitrogen content of the iron weld metal were investigated by gas tungsten arc welding. The results are as follows:

- (1) The nitrogen content decreases with increasing the welding current.
- (2) The nitrogen content hardly depends on the arc length and the travel speed.
- (3) The nitrogen content is anomalously high at low arc atmospheric pressure region and constant above 0.2 atm of the nitrogen pressure in N_2 gas atmosphere ($P_{N_2} \leq 1$ atm).
- (4) The nitrogen content increases with increasing the nitrogen partial pressure and is constant above 0.1 atm of the nitrogen partial pressure in the N_2 -Ar and N_2 -He gas mixture atmospheres ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm, $P_{N_2} + P_{He} = 1$ atm).
- (5) The nitrogen content gradually increases with increasing the nitrogen partial pressure in the N_2 - H_2 gas mixture atmosphere ($P_{N_2} + P_{H_2} = 1$ atm).
- (6) The nitrogen absorption into weld metal was discussed with equilibrium data.

1. 緒 言

アーク溶接過程におけるガス・メタル反応を明らかにすることは、溶接工学上重要な課題である。著者らはこれまで消耗電極式アーク溶接 (GMAW) における軟鋼および鉄合金溶接金属の窒素吸収に関して一連の研究¹⁻³⁾を行い、溶接金属中の窒素の冶金物理化学的な挙動を明らかにしてきた。しかし消耗電極法を用いた場合には電極線と母材とが同時に熔融するため、諸現象を解析するに際して幾分複雑な面があることは否めない。例えば消耗電極法では、溶滴の形成および移行の過程ですでに窒素吸収反応が生じたり、電極線と母材の化学組成の差が窒素吸収に影響を与えることが考えられるからである。

本研究は、窒素吸収に関与する因子をできるだけ少なくし、より単純な状況下で溶接金属の窒素吸収挙動に関する基礎的資料を得ることを目的としている。すなわち、タングステン電極による非消耗電極法を用い窒素お

よび窒素を含む各種溶接雰囲気中で純鉄に近い化学組成の鉄をアーク溶接し、溶接金属の窒素吸収におよぼす溶接条件および雰囲気の影響などについて調べ、化学冶金学的な考察を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に示すような溶接雰囲気調整装置 (内容積 1.5 m^3 , 1×10^{-2} mmHg $\sim$ 6 atm まで保持可能) 内に TIG トーチを組み込み、3.2 mm 径の2%トリウム入りタングステン棒電極を用いて (溶加材を用いず) 溶接を行った。なお電源はセレン整流垂下特性型を使用し、装置内に封入するガスはシリカゲルを通して脱水した。

2.2 実験材料

供試材の化学組成を Table 1 に示す。供試材は窒素の吸収および脱窒速度に影響をおよぼす酸素⁴⁾をはじめ他の元素を極力少なくした純鉄に近いものを用いた。

2.3 実験操作

寸法 150 $\times$ 50 $\times$ 12 mm の試験片を表面の酸化スケールなどを除いてから装置内にセットし、装置中を1 $\times$

*原稿受付 昭和58年1月13日 (昭和57年度春季全国大会にて発表)

**正 員 東北大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tohoku University

Fig. 1 Schematic illustration of the welding chamber controlling arc atmosphere.

Table 1 Chemical composition of the base metal used in the present study.

(wt%)											
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N	O	
0.004	0.007	0.006	0.003	0.005	0.018	0.04	0.005	0.003	0.0026	0.0090	

10^{-1} mmHg 以下に排気した後各種ガスを所定の雰囲気になるよう封入しビードオンプレート溶接を行った。溶接条件は、直流正極性で溶接電流を 50~300 A、アーク長を 2~14 mm、溶接走行速度を 5~30 cm/min の範囲で変化させた。使用した溶接雰囲気は N_2 減圧系、 N_2 -Ar 系、 N_2 -He 系および N_2 - H_2 系の 4 系で、それぞれ全圧を 1 気圧とし (N_2 減圧系を除く) 窒素分圧を変化させた。

溶接後、試験片の外観検査および透過 X 線検査を行い気孔の発生状況を調べた。また溶接線に垂直な断面を 20% ナイタルにてエッチングし、溶け込み断面積を測定した。その後溶接金属中央部より分析試料を採取し、水蒸気蒸留法により窒素を定量した。

3. 実験結果および考察

3.1 溶接金属の窒素量におよぼす溶接条件の影響

溶接雰囲気窒素を窒素 1 atm とし、溶接電流、アーク長および溶接走行速度を変化させて溶接し、溶接金属の窒素量 (N) におよぼす溶接条件の影響について調べた。

3.1.1 溶接電流の影響

窒素 1 atm 雰囲気下でアーク長を 10 mm、溶接走行速度を 10 cm/min と一定にし、溶接電流を 50~300 A の範囲で変化させて溶接を行った。Fig. 2 は溶接電流と溶接金属の窒素量の関係を示したものである。溶接電流の増加とともに窒素量は減少する傾向が見られる。なおこの場合、溶接電流の増加とともにアーク電圧は増加し、電流が 50 A の場合約 21 V であるが 300 A では約 30 V を示した。Fig. 3 は溶接電流と溶け込み断面積の関係を示したものである。溶接電流の増加に伴って溶け込

Fig. 2 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the welding current in nitrogen atmosphere.

Fig. 3 Relation between the penetration area of the weld metal cross section and the welding current in nitrogen atmosphere.

み断面積は増加することがわかる。

これらの試験片の外観、断面および透過 X 線検査の結果、いずれの場合にも多数の気孔あるいは表面に開口したピットが認められ、溶接電流の増加とともに気孔が大きくなる傾向が見られた。

3.1.2 アーク長の影響

窒素 1 atm 雰囲気下で溶接電流を 250 A、溶接走行速度を 10 cm/min と一定にし、アーク長を 2~14 mm の範囲で変化させて溶接を行った。Fig. 4 はアーク長と溶接金属の窒素量の関係を示したものである。窒素量はアーク長の増加に伴ってごくわずかに減少する傾向が見られるがほぼ 0.06 wt% の値を示している。これよりこの程度のアーク長変化は溶接金属の窒素量にほとんど影響を与えていないことがわかる。なおこの場合アーク長の増加 (2~14 mm) に伴ってアーク電圧は 13 から 31 V ま

Fig. 4 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the arc length in nitrogen atmosphere.

ク電圧にもあまり影響を受けないようである。一方溶け込み断面積はアーク長の増加(2~8 mm)に伴って幾分増加(33~72 mm²)するが、アーク長が8 mm以上ではほぼ一定となった。

これらの試験片の外観、断面および透過X線検査の結果、いずれも多数の気孔およびピットが認められたが、この範囲のアーク長変化では大きな相違は見られなかった。

3.1.3 溶接走行速度の影響

窒素 1 atm 雰囲気下で溶接電流を 250 A、アーク長を 10 mm と一定にし、溶接走行速度を 5~30 cm/min の範囲で変化させて溶接を行った。Fig. 5 は溶接走行速度と溶接金属の窒素量の関係を示したものである。窒素量は溶接走行速度が 5 cm/min の場合は幾分低い値を示すが、10 cm/min 以上ではほぼ 0.06 wt% と一定の値を示していることがわかる。アーク電圧は溶接走行速度により変化せず、ほぼ 25 V 一定であった。一方溶け込み断

Fig. 5 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the travel speed in nitrogen atmosphere.

Fig. 6 Relation between the penetration area of the weld metal cross section and the travel speed in nitrogen atmosphere.

面積は Fig. 6 に示すように、溶接走行速度の増加に伴い急激な減少を示した。

これらの試験片の外観、断面および透過X線検査の結果、いずれも気孔およびピットが見られ、その数は溶接走行速度が増加するに伴い多くなる傾向が認められた。

3.1.4 各溶接条件の影響についての検討

以上溶接金属の窒素量によらず溶接条件の影響を調べた結果、窒素量は溶接電流の増加に伴って減少するがアーク長および溶接走行速度にはあまり影響を受けないようである。この理由について次のような考察を行った。

石井、萬谷および不破⁵⁾ は溶鉄の窒素溶解度について詳細な研究を行い、次式のような関係を得ている。

$$1/2 N_2 = N \quad (1 \cdot a)$$

$$K = \%N / \sqrt{P_{N_2}} \quad (1 \cdot b)$$

$$\log K = -518/T - 1.063 \quad (1 \cdot c)$$

ただし、K: 平衡定数、%N: 溶鉄中の窒素量、 P_{N_2} : 雰囲気中の窒素分圧

この測定結果より窒素 1 atm 下での溶鉄の平衡窒素溶解度を計算すると、鉄の融点(1536℃)では 0.0447 wt%, 1600℃では 0.0458 wt%, 1800℃では 0.0487 wt% 2000℃では 0.0512 wt% となる。本溶接過程における熔融溶接金属の温度について測定を行ったところ1590~1660℃程度の値を得ている。これらの結果から考えると、本実験結果では多くの場合溶接金属の窒素量は平衡溶解度よりもはるかに高い値を示していることがわかる。またすべての場合において気孔およびピットが認められている。これらの事実から、アークによる高温下でいったん熔融溶接金属に溶解した窒素の一部が、熔融溶接金属が凝固するまでの間に放出したと考えられる。したがって窒素 1 atm 雰囲気においては溶接金属の窒素量

は主に冷却時の窒素放出過程に支配されるものと思われる。Fig. 3 に示したように溶接電流の増加に伴って溶け込み断面積が増加するが、このことは溶接金属の溶融量が増加したことを意味し、このため溶融溶接金属の冷却速度が小さくなり、凝固までの時間が長くなったことが考えられる。したがって溶接電流が増加する程窒素放出時間が長くなり、Fig. 2 のように溶接電流の増加に伴って窒素量が次第に減少するのではないかと考えられる。また Fig. 5 において溶接走行速度が 5 cm/min の場合に窒素量が小さな値を示しているが、この理由も Fig. 6 からわかるように溶け込み断面積が他の速度に比べて非常に大きく、溶融溶接金属の凝固までの冷却速度が遅いためと思われる。窒素 1 atm 下で溶接を行った場合のすべてについて、溶接金属の窒素量と溶け込み断面積の関係をまとめて示したのが Fig. 7 である。溶け込み断面積が大きい程窒素量が小さくなる傾向が認められる。このことから窒素 1 atm 雰囲気下においては主に冷却速度すなわち溶融溶接金属の凝固までの時間が窒素量を決定しているのではないかと考えられる。

3.2 溶接金属の窒素量におよぼす溶接雰囲気の影響

溶接電流 250 A, アーク長 10 mm, 溶接走行速度 10 cm/min 一定の条件で各種溶接雰囲気 (N_2 系, N_2 -Ar 系, N_2 -He 系, N_2 -H₂ 系) 中において窒素分圧 (P_{N_2}) を変えて溶接し、溶接金属の窒素量 (N) におよぼす溶接雰囲気の影響について調べた。

3.2.1 窒素雰囲気 ($P_{N_2} \leq 1$ atm) の場合

Fig. 8 は雰囲気ガスを窒素のみとし窒素圧 (P_{N_2}) を 0.05~1 atm の範囲で変化させた場合の溶接金属の窒素量 (N) の変化を示したものである。窒素量は雰囲気中の P_{N_2} が 0.05 atm の減圧のとき 0.26 wt% と非常に高い値を示し、その後急減し P_{N_2} が 0.2 atm 以上ではほぼ 0.06 wt% 一定となっていることがわかる。一方、 P_{N_2} の

Fig. 7 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the penetration area of the weld metal cross section in nitrogen atmosphere.

Fig. 8 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the nitrogen pressure, P_{N_2} , in nitrogen atmosphere.

増加 ($P_{N_2} = 0.05 \sim 1$ atm) に伴って溶け込み断面積も 17 から 75 mm² まで増加した。

これらの試験片の外観、断面および透過 X 線検査の結果、 P_{N_2} が 0.1 atm 以下におけるビードは他と異なり波目の荒い凹んだ形状を呈し気孔の発生は認められなかったが、 P_{N_2} が 0.2 atm 以上になると気孔やピットが多数見られた。

3.2.2 窒素-アルゴン雰囲気 ($P_{N_2} + P_{Ar} = 1$ atm) の場合

雰囲気ガスを窒素とアルゴンのみとし全圧を 1 atm にして、 P_{N_2} を 0~1 atm の範囲で変化させた場合の溶接金属の窒素量の変化を Fig. 9 に示す。これによると P_{N_2} が 0.05 atm ($P_{Ar} = 0.95$ atm) 付近までは窒素量はかなり急激に増加し、それ以上ではほぼ 0.06 wt% 一定の値を示していることがわかる。一方、 P_{N_2} の増加 (P_{N_2}

Fig. 9 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the nitrogen partial pressure in N_2 -Ar gas mixture atmosphere.

=0~1 atm) に伴って溶け込み断面積も12から 75 mm² まで増加を示した。

これらの試験片の外観, 断面および透過X線検査の結果, $P_{N_2}=0$ atm ($P_{Ar}=1$ atm) の場合だけは気孔もピットも見られなかったが, その他の場合にはいずれも気孔およびピットの発生が多数認められた。

3.2.3 窒素—ヘリウム 雰囲気 ($P_{N_2}+P_{He}=1$ atm) の場合

雰囲気ガスを窒素とヘリウムのみとし全圧を 1 atm にして, P_{N_2} を 0~1 atm の範囲で変化させた場合の溶接金属の窒素量の変化を Fig. 10 に示す。窒素量は $P_{N_2}=0.05$ atm 付近まで急激に増加し, それ以上ではほぼ 0.06 wt% 一定の値を示しており, この傾向は先の N_2 -Ar 雰囲気で得られた結果と非常に類似していることがわかる。溶け込み断面積は $P_{N_2}=0$ atm ($P_{He}=1$ atm) の場合には 110 mm² と極めて高い値を示すが, N_2 が添加されると急激に減少して $P_{N_2}=0.05$ atm では 45 mm² となり, それ以後 P_{N_2} の増加とともに溶け込み断面積はゆるやかに増加し $P_{N_2}=1$ atm で 75 mm² となった。

これらの試験片の外観, 断面および透過X線検査の結果, $P_{N_2}=0$ atm ($P_{He}=1$ atm) の場合だけは気孔もピットも見られないが, その他の場合にはいずれも気孔およびピットが多数認められた。この傾向も N_2 -Ar 雰囲気の場合と類似している。

3.2.4 窒素—水素雰囲気 ($P_{N_2}+P_{H_2}=1$ atm) の場合

雰囲気ガスを窒素と水素のみとし全圧を 1 atm にして, P_{N_2} を 0.4~1 atm の範囲で変化させた場合の溶接金属の窒素量の変化を調べた。 N_2 - H_2 雰囲気ではアークの発生が困難で, アーク長が 10 mm の条件では $P_{N_2}=0.8$ ~1 atm の範囲しか溶接できなかった。そこでやむを得ずアーク長を 6 mm にしたところ $P_{N_2}=0.4$ ~1 atm

まで溶接が行えた。それらの結果を Fig. 11 に示す。アーク長が 6 mm の場合の方が 10 mm に比べてわずかに高い窒素量を示すようであるが, いずれの場合も窒素量は P_{N_2} が 0.8 atm まで P_{N_2} の増加に伴ってゆるやかな増加を示し, $P_{N_2}=1$ atm で急に増加することがわかる。また, 先に述べた他の系に比べて窒素量はかなり低い値を示していることがわかる。溶け込み断面積は, H_2 が添加されると他の系に比べて大きい値 (87~154 mm²) を示すが, P_{N_2} との間にははっきりとした関係は見られない。

これらの試験片の外観, 断面および透過X線検査の結果, いずれもビード幅が大きく, 気孔およびピットは数は少ないが大きいものが観察され, 他の系で得られたビードとはかなり異なっている。

3.2.5 各ガス系雰囲気についてのまとめ

窒素を含む各種混合ガス雰囲気の場合の P_{N_2} と溶接金属の窒素量との関係をまとめて示したのが Fig. 12 である。また図中には石井, 萬谷, 不破が求めた1700℃における溶鉄の平衡窒素溶解度も示してある。図によると N_2 減圧系においては P_{N_2} の減圧下で窒素量が異常に高い値を示している。また N_2 -Ar 系と N_2 -He 系はほぼ同程度の値であるが, N_2 - H_2 系は前者の系に比べて低い窒素量を示していることがわかる。Fig. 13 は各種雰囲気における溶接金属の窒素量と $\sqrt{P_{N_2}}$ との関係をまとめて示したものである。 P_{N_2} が 0~1 atm の範囲において溶接金属中の窒素量と $\sqrt{P_{N_2}}$ とは直線的関係にならず, 溶融溶接金属への窒素の溶解は Sieverts の法則に従わないことがわかる。なお N_2 - H_2 系の場合, 一見直線関係にあるように見えるが, Fig. 11 に示されるように厳密な意味では異なっている。すなわち, Fig. 12 および Fig. 13 からわかるように, アーク溶接過程は平衡状態とは違って同一 P_{N_2} であっても雰囲気により窒素量が必

Fig. 10 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the nitrogen partial pressure in N_2 -He gas mixture atmosphere.

Fig. 11 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the nitrogen partial pressure in N_2 - H_2 gas mixture atmosphere.

Fig. 12 Relation between the nitrogen content of the weld metal and the nitrogen partial pressure in various atmospheres.

Fig. 13 Relation between the nitrogen content of the weld metal and square root of the nitrogen partial pressure in various atmospheres.

ずしも同一にならないこと、また N_2-H_2 系の一部を除いて平衡状態よりもかなり高い値を示し、しかも溶接金属の窒素の溶解は Sieverts の法則に従わないこと大

きな特徴がある。

3. 2. 6 アーク下における溶接金属の窒素吸収についての検討

一般に平衡状態における溶鉄中の窒素量 (N) と窒素圧 (P_{N_2}) との間には次式の関係が成り立つ。

$$1/2 N_2 = N \quad (1 \cdot a)$$

$$K = \%N / \sqrt{P_{N_2}} \quad (1 \cdot b)$$

この場合ガス相と液相とは温度が同一であり、溶鉄中の窒素量 (N) は P_{N_2} によって一義的に決定される。このことは雰囲気ガスが N_2 減圧系、 N_2-Ar 系、 N_2-He 系、 N_2-H_2 系であっても P_{N_2} が同一であるならば雰囲気ガスのいかにかわらず溶鉄中の窒素量 (N) は一定値であることを意味し、また (1・b) からわかるように Sieverts の法則も満足する。

(1・a) および (1・b) 式の関係についてはこれまで数多くの研究者^{5,6)}によって測定されているが、これを化学熱力学的な観点より一歩進めて考えると次の3式が同時に成立していると考えることができる。

$$1/2 N_2 = N \quad K_1 = \%N / \sqrt{P_{N_2}} \quad (1)$$

$$1/2 N_2 = N \quad K_2 = P_N / \sqrt{P_{N_2}} \quad (2)$$

$$N = N \quad K_3 = \%N / P_N \quad (3)$$

すなわち、平衡状態においてはその時の温度 (例えば 1700℃) において分子状ガス N_2 の一部は解離し原子状ガス N となっており、これらのガスの分圧すなわち P_{N_2} および P_N を満足するように溶鉄中の窒素量 (N) が決定されるわけである。これまで平衡測定においては (1) 式における熱力学的数値を求めている。しかし、アーク下においては (2), (3) 式を十分考慮する必要がある。すなわちアーク下においてはガス相は 5000 ~ 6000℃ となっており、ガス相には (2) 式の $1/2 N_2 \rightarrow N$ なる解離反応でかなりの N が存在する。このガス相はアーク直下の液相の熔融溶接金属と接触すると、溶接金属の温度が低い (1700℃程度) ためガス相は冷却され、同時に $N \rightarrow 1/2 N_2$ なる反応で N は再結合し熔融溶接金属の温度における平衡状態 ((2) 式) になろうとする。もしこの際 $N \rightarrow 1/2 N_2$ なる反応が速やかに完了すれば、溶接金属の窒素は平衡状態における窒素と同様の挙動を示すであろう。しかしながら N の再結合の反応が未完了の非平衡状態すなわち過剰の N が存在する状態で熔融溶接金属がガスと接触するため、(3) 式で $N \rightarrow N$ の反応が促進されその結果溶接金属に過剰の窒素が溶解することになる。この溶接金属に過剰に溶解した窒素はアーク周辺部や熔融溶接金属が凝固するまでに放出することが十分予想される。これらの理由のため、Fig. 12 および Fig. 13 に示したように溶接金属の窒素の挙動が平衡測定の場合と大きく異なったものと考えている。

各系についてもう少し説明を加えると次のようになる。 N_2 減圧系における低圧領域で見られた高い窒素量は, 著者¹⁾らの消耗電極法を用いた研究においても認められたものであるが, これらは低圧下ではアーク下において (2) の $1/2 N_2 \rightarrow N$ なる解離反応が容易となり, N が比較的安定状態にあって過剰の窒素が溶接金属に吸収されること, また, 溶接金属の溶け込みが小さく, 熔融溶接金属の凝固までの冷却速度が速く, 溶接金属からの窒素の放出が少ないことが理由として挙げられる。このことは減圧下では溶接金属に気孔やピットが生じていないことから推察される。

N_2 -Ar 系および N_2 -He 系においては, P_{N_2} が 0.1 atm まで窒素量は急激に増加するがそれ以上の P_{N_2} では窒素量は一定となる。このような傾向は, 消耗電極法¹⁾の場合や宇田, 大野, 和田⁷⁾のアーク溶解の場合においても認められている。この現象に関しては, アーク直下における熔融溶接金属の窒素吸収とアーク周辺部分からの窒素放出の相対的關係およびそれに加えて熔融溶接金属が凝固するまでの窒素の放出が考えられ, それらの結果として $P_{N_2} > 0.1$ atm の範囲で窒素量が一定になったものと思われる。このことは N_2 減圧系で P_{N_2} が 0.2 atm 以上の範囲についてもいえることである。

一方, N_2 - H_2 系の場合は他の系と比べてかなり低い窒素量を示しているが, これは次のように考えることができる。 H_2 は N_2 と同様に 2 原子分子であるため, Ar や He と違ってアーク内で単原子に解離しうることから熱効率がよく大きな溶け込みを示し, 熔融溶接金属の凝固までの時間が他の系に比べてかなり長いと考えられ, 溶接金属から多量の窒素放出が予想される。それに加えて, 水素が熔融溶接金属中にいったん溶解し放出する際に, 同時に窒素の放出を助長する作用があるのではないかと考えられる。そのため凝固完了までに十分な窒素放出が行われ低い窒素量を示したのではないかと推測される。

4. 結 論

非消耗電極法で純鉄に近い化学組成の母材を種々の条件および雰囲気でアーク溶接し, 溶接金属の窒素量を調べたの結果を得た。

(1) $P_{N_2} = 1$ atm において, 溶接電流が増加すると溶接金属の窒素量は減少する。

(2) 溶接金属の窒素量は, アーク長の変化すなわちアーク電圧の変化にほとんど影響を受けない。

(3) 溶接金属の窒素量は, ごく低速の範囲を除いて, 溶接走行速度の影響を受けない。

(4) N_2 雰囲気 ($P_{N_2} \leq 1$ atm) においては, P_{N_2} が 0.1 atm 程度の減圧下で溶接金属の窒素量は非常に高くなるが, P_{N_2} が増加し 0.2 atm 以上の範囲では約 0.06 wt% となりほぼ一定の値を示す。

(5) N_2 -Ar および N_2 -He 雰囲気において, 溶接金属の窒素量は P_{N_2} が 0.1 atm 付近まで急激に増加するが, P_{N_2} が 0.1 atm 以上の範囲では約 0.06 wt% となりほぼ一定の値を示す。

(6) N_2 - H_2 雰囲気では, 溶接金属の窒素量は他の雰囲気と比べて低い値を示す。

(7) 各種溶接雰囲気において, 溶接金属への窒素の溶解は Sieverts の法則に従わない。

(8) アーク溶接過程の窒素の挙動について化学冶金学的な検討を行った。

終わりに臨み本実験遂行にご協力下さった東北大学本田明枝官ならびに内藤賢一郎工学修士に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小林卓郎, 桑名武, 菊地靖志; 軟鋼溶接金属の窒素含量および気孔, 溶接学会誌, 35-3 (1966), 237-245.
- 2) 小林卓郎, 桑名武, 菊地靖志; 溶接金属の窒素含量におよぼす溶接雰囲気ならびに溶接極性の影響について— Fe-Cr-Ni 系溶接金属の窒素吸収に関する基礎的研究 (第1報), 溶接学会誌, 40-3 (1971), 221-231.
- 3) 小林卓郎, 桑名武, 木口立而; 鋼溶接金属の窒素含量におよぼす合金元素の影響 (第1報)—窒素雰囲気の場合, 溶接学会誌, 41-3 (1972), 308-321.
- 4) 長隆郎, 井上道雄; 表面活性成分を含む溶鉄の窒素吸収速度に関する研究, 鉄と鋼, 54-1 (1968), 19-34.
- 5) 石井不二夫, 萬谷志郎, 不破祐; 溶鉄の窒素溶解度および窒素溶解度におよぼす VIa 族元素の影響, 鉄と鋼, 68-8 (1982), 946-955.
- 6) R. D. Pehlke and J. F. Elliott; Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys, 1. Thermodynamics, Trans. AIME, 218 (1960), 1088-1101.
- 7) 宇田雅広, 大野梧, 和田次康; アークおよびレベテーション溶解における溶鉄および溶鉄合金中への窒素溶解量について, 溶接学会誌, 38-4 (1969), 382-392.