鑄鉄浸硫層のすべり摩耗抵抗について

竹 内 栄 一*

Eiichi Takeuchi : On a Sliding Wear Resistance by a Sulphurized Layer of Cast Iron.

This study was made to scrutinize the influence or effect on the wear resistance by a sulphurized layer which produces on the outer surface of cast iron subjected to sulphurization.

A piece of spheroidal graphite cast iron used as a stator was treated in a reducing salt bath containing 5% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, and the reaction products produced on the outer surface was observed by X-ray diffraction. It was noticed that in addition to FeS , Fe_{1-x}S and Fe_3S_4 , carbides and nitrides such as Fe_3C , Fe_2N and Fe_3N coexisted with $\alpha\text{-Fe}$ on the sulphurized layer of cast iron treated by a normal salt bath. Whereas, when cast iron had been treated with an inferior bath, porous and brittle reaction products consisting of FeS and Fe_3O_4 appeared around the outer surface, and in the underlayer the reaction products similar to those mentioned above were detected.

The study was further conducted on a dry-sliding wear of these two kinds of sulphurized cast iron in connection with a rotor of S 45 C. As a result, it was recognized that sulphurized iron revealed excellent wear resistance in the compositional range where the adhesive or thermal wear appeared. It seems that such a phenomenon was due to the existence of a sulphurized layer which suppressed adhesion and welding between the stator and rotor, and also due to the said sulphurized layer which tended to produce an oxidized wear under a wide range of wear condition.

In the cast iron treated with an inferior bath, there appeared heterogeneous reaction products on its outer surface as mentioned above, and the wear loss was comparatively great until the reaction products were removed from the surface. When the products were removed, a normal sulphurized layer came to appear on the surface, rapidly improving the wear resistance of cast iron.

It has been made clear that the above observations coincide well with the distribution of sulphuric constituents on the sliding face examined by an X-ray microanalyzer.

(Received February 20, 1971)

I. 緒 言

浸硫処理を施した鉄鋼材料の摩耗に関する従来の研究報告によると、浸硫層における多孔性ならびに凝着現象の抑制作用が耐摩耗性の向上に効果的な影響をもたらす、潤滑摩耗において優れた特性を現わすことが明らかにされている^{(1)~(7)}。しかし、浸硫層は一般に軟質である場合が多く^{(5) (8)}、したがって表面層は摩耗の過程で容易に塑性変形あるいは脱落を起こして、多孔性に依存している油膜保護効果は低下するものと考えるのが妥当である。

そこで、本研究は硫黄塩を添加した還元性塩浴により浸硫処理を行なった球状黒鉛鑄鉄を用い、乾燥 - すべり摩耗のもとで生ずる摩耗特性ならびに摩耗傾向に及ぼす浸硫層の影響を吟味するとともに、浸硫層の凝着あるいは溶着現象に対する抑制作用に重点を置いて検討を加えたものである。

II. 実験に用いた試料ならびに方法

1. 実験に供した試験片

実験に用いた固定試験片は 25 mm Y ブロックの生型に

鑄造したブルス・アイ型球状黒鉛鑄鉄から採取したもので、その化学組成を Table 1 に示す。

まず、供試鑄鉄を所定の寸法、形状⁽⁹⁾に機械加工後 550℃で焼なまし処理を行ない、鑄造あるいは加工時に生じた残留応力を除去したのち、その一部を非処理状態、他を一定条件のもとで浸硫処理を行なって摩耗実験に供した。

また、上述の固定試験片と組合わせる回転試験片は S 45 C 鋼を外径 48 mm、内径 32 mm、厚さ 2.5 mm のリング状に加工したのち 900℃油焼入れ、580℃焼もどしを行なって組織をソルバイトとしたものである。

なお、摩耗前の各試験片のすべり面における表面粗さを触針式仕上面粗さ試験機 (Talysurf) とにより測定した。そ

Table 1 Chemical compositions of specimens

Specimens	Chemical compositions (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
Stator	3.19	2.57	0.34	0.016	0.010	0.05	0.027
Rotor	0.44	0.31	0.46	0.018	0.016	—	—

* 東京都立工業技術センター (The Tokyo Metropolitan Industrial Technology Center, Tokyo)

(1) F.D. Waterfall : Engineering, **187** (1959), 113.

(2) F.D. Waterfall : Metal Treat. and Drop Forging, **29** (1962), 3.

(3) J.C. Gregory : Metal Treat. and Drop Forging, **31** (1964), 113.

(4) R.B. Waterhouse : Wear, **8** (1966), 421.

(5) J.C. Gregory : Wear, **9** (1966), 249.

(6) 小川, 竹内 : 金属学会第 62 回大会に発表 (1968.4).

(7) 小川, 竹内 : 金属学会第 64 回大会に発表 (1969.3).

(8) 山崎 : 鑄物, **33** (1961), 503, 560.

(9) 竹内 : 金属学会誌, **34** (1970), 59.

Fig.1 は固定試験片を $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 5% 添加浴中で 570°C , 2 時間処理後急冷したときの表面から内部にわたって変化する反応生成物の状態を示したものである。この結果によると、表面には FeS , Fe_{1-x}S , Fe_3S_4 などの硫化物のほかに Fe_3C , Fe_2N , Fe_3N などの炭、窒化物が検出され、表面から漸次内部へ測定面が移動するにともなってこれら反応生成物の X 線強度の減少が起こり、約 0.027 mm 除去したときはほとんど $\alpha\text{-Fe}$ から成ることを認めた。

また、塩浴の劣化が浸硫効果に及ぼす影響を検討するため同一塩浴を継続使用し、処理条件 $570^\circ\text{C} \sim 2$ 時間を 1 つの単位として 1 回の処理が終了する毎に新たな固定試験片を処理し、それらの表面層に生成される反応生成物を X 線回折によって観察した。この結果によると、処理回数が 3 回までは反応生成物にほとんど変化がみられず、処理回数 4 回以上では表面が暗黒色状を呈し、かつ表面付近の反応生成物に著しい変化が認められた。たとえば 4 回目の処理を行なった表面層は Fig.2 に明らかなごとく表面から 0.020 mm 前後までは FeS と Fe_3O_4 の混合状態から成り、より内部において Fig.1 と同様な浸硫層の存在することが認められた。なお、これら異状層はきわめて多孔質であり、かつその厚さは本実験の範囲内で処理回数の多いものほど漸増する傾向にある。

IV. 浸硫処理を施した铸铁の摩耗特性

浸硫層の存在が摩耗抵抗におよぼす影響を検討するに当り、まず速度 - 摩耗特性曲線を求めた。すなわち、固定試験片には 550°C で焼なましあるいは浸硫処理を施した铸铁を用い、これとソルバイト組織の S 45 C 鋼の回転試験片を組合わせて接触圧力 5 および 15 kg/cm^2 のもとですべり速度を $0.05 \sim 4.00\text{ m/sec}$ まで変化させた実験を行なった。

Fig.3 はこれら铸铁の定常摩耗域における速度 - 摩耗特性曲線を示したものである。

Fig.3 Effect of sulphurization on wear characteristics of cast iron
Specimens : Stator, Spheroidal graphite cast iron, (A) 550°C -1 hr annealed, (B) 570°C -2 hr sulphurized. Rotor, S 45 C, 900°C oil q., 580°C temper
Wear Condition : p , 5 and 15 kg/cm^2 . 1, continuous wear range

これによると、 550°C 焼なましのいわゆる非処理铸铁は接触圧力 5 kg/cm^2 、すべり速度 0.30 m/sec 以下の低速側で酸化摩耗が多く現われ、摩耗粉末からは $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が観察された。しかし、速度 $0.50 \sim 1.00\text{ m/sec}$ の範囲においては凝着現象をとまなう摩耗を起し、凝着痕やすべり面間に介在する摩耗粉末のため引掻きあるいは掘起しによる摩耗が現われて摩耗率は著しく増加し、ことに速度 0.60 m/sec 付近において最大値を呈することが確認された。なお、この領域で得られた摩耗粉末は $\alpha\text{-Fe}$ が主体であることを認めた。また、より高速側の熱的摩耗領域では別報⁽¹⁰⁾でも述べたごとく $\gamma\text{-Fe}$ の摩耗粉末を生成して摩耗率は一旦減少するが、溶着現象をとまなうときは摩耗率の急激な増加を生ずる傾向にあることが認められた。

つぎに、接触圧力 15 kg/cm^2 における速度 - 摩耗特性曲線は上述の結果と類似した傾向を呈するが、全般的に摩耗率が大きく、かつ異なった摩耗機構の現われる領域は低速側へ移行する。すなわち、すべり速度 0.10 m/sec が酸化から凝着へ機構的な移行が起こる限界条件となり、 0.30 m/sec において凝着などに起因する機械的な破壊を伴う摩耗のため摩耗率は最大値を呈することが明らかとなった。

これに対して、浸硫処理を施した铸铁の速度 - 摩耗特性曲線は Fig.3 中に併記したごとく非処理铸铁のそれと類似した傾向を呈するが、摩耗率は著しく低い。

すなわち、接触圧力を 5 kg/cm^2 とした場合、すべり速度 0.60 m/sec 付近において摩耗率は最大となり、この領域で得られた摩耗粉末は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が主成分で極く一部に $\alpha\text{-Fe}$ と FeS が検出され、酸化摩耗と一部機械的な破壊をとまなう摩耗機構を現わすものといえる。また、速度 $2.00 \sim 4.00\text{ m/sec}$ のいわゆる熱的摩耗域では Fe_3O_4 の摩耗粉末が多く採取された。

つぎに接触圧力を 15 kg/cm^2 としたときの速度 - 摩耗特性曲線からは、すべり速度 0.30 m/sec において最大摩耗率が得られ、このときの摩耗粉末は $\alpha\text{-Fe}$ と少量の FeS および $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が混在した状態となる。また、より高速側の速度 $2.00 \sim 4.00\text{ m/sec}$ においては摩耗粉末のほとんどが Fe_3O_4 となることを X 線回折の結果から確認された。

このような現象から、浸硫処理した铸铁の広範囲にわたる摩耗条件のもとで生ずる摩耗機構には酸化現象がともなうものであり、しかも浸硫層の存在によって凝着が起こりにくいこととあわせてこれらが優れた摩耗抵抗を現わす原因になるものと考えられる。したがって、凝着や溶着をとまなうような苛酷な摩耗条件のもとにおいて非処理铸铁との摩耗抵抗の差異が顕著に認められる。

V. 浸硫層の摩耗傾向

前項の実験で得られた摩耗機構の異なる 3 条件のもとで長距離摩耗を行ない、その結果から浸硫層が摩耗傾向に及

(10) 竹内：鋳物，40(1968)，463。

ばす影響を検討した。

Fig. 4 は接触圧力を 5 kg/cm^2 に一定とした場合、すべり速度については酸化摩耗域の条件として 0.30 m/sec 、凝着摩耗域では 0.60 m/sec 、また熱的摩耗域にあるものには 4.00 m/sec をそれぞれ選び、すべり距離 5000 m もしくは 10000 m まで継続的摩耗を行なったときの摩耗傾向曲線を示したものである。

これによると、摩耗機構のいかんにかかわらず浸硫処理鋳鉄の摩耗傾向は、非処理のものに比べてすべり距離 100 m における摩耗量が多く、したがって、初期摩耗現象が明瞭に認められる反面、定常摩耗状態となつてからの単位すべり距離当りの摩耗量の少ないことが特徴といえる。すなわち、前者の初期摩耗量が大きく現われる現象については浸硫処理鋳鉄の表面硬さが非処理鋳鉄のそれよりも $\text{Hv } 100$ 前後低く、しかも多孔性であることによるものと考えられ、また、後者の定常摩耗域で摩耗量の増加割合が少ない現象は浸硫層を構成する各種反応生成物がすべり面間に生ずる凝着または溶着を抑制すること起因していると推考される。ことに凝着および溶着現象の抑制作用についてはすべり面における反応生成物と密接な関係があり、前掲 **Fig. 1** またはすべり面上の硫黄成分を X.M.A. により検討した後述の結果から明らかなごとく、比較的多量の硫、窒化物などが存在する摩耗痕深さ 10μ 以下において顕著に現われる。したがって、摩耗が進行し、摩耗痕深さが 15μ 以上に達すると浸硫処理によって生じた反応生成物の多くが消失するため、この段階から摩耗量は急激に増加する傾向を示す。

たとえば、すべり速度 0.30 m/sec の mild wear 領域において酸化現象が摩耗損失の主体となるときは摩耗抵抗に対する浸硫処理の影響はほとんど認められない。しかし、速度 0.60 m/sec の凝着をともなう摩耗領域では浸硫層による凝着抑制作用のため摩耗抵抗は著しく向上し、非処理鋳鉄との差異が顕著に認められた。また、すべり速度 4.00 m/sec の熱的摩耗域のもとではすべり面温度の急激な上昇が起こり、非処理鋳鉄の場合すべり距離 $500 \sim 1000 \text{ m}$ において表面層にマルテンサイトが生成され、このため摩耗損失は比較的少ない値を示す。しかしながら、さらにすべり距離が増すとすべり面間には激しい凝着または溶着が生じ、これにともなう摩耗量は急激に増加するとともに、組合せ相手となる回転試験片は金属転移による重量増加現象が認められた。これに対して浸硫処理を施した鋳鉄ではすべり面

Fig. 4 Effect of sulphurization on wear tendency of cast iron Specimens : Stator, Spheroidal graphite cast iron, (A) 550°C -2 hr annealed, (B) 570°C -2 hr sulphurized. Rotor, S45C, 900°C oil q., 580°C temper
Applied condition : $p, 5 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 5 Effect of sulphurization on wear tendency of cast iron Specimens : Stator, Spheroidal graphite cast iron, (A) 550°C -2 hr annealed, (B) 570°C -2 hr sulphurized. Rotor, 900°C oil q., 580°C temper
Applied condition : $p, 15 \text{ kg/cm}^2$

に正常な浸硫層が存在する状態のもとで摩耗量が極めて少なく、これが消失すると非処理鋳鉄と同様な摩耗傾向を呈するようになる。

つぎに同様な組合せのもとで接触圧力を 15 kg/cm^2 とした場合の摩耗傾向曲線を求め、**Fig. 5** に示した。これによると、摩耗抵抗に及ぼす浸硫処理の影響は一層顕著に現われることが認められた。

すなわち、すべり速度 0.30 m/sec の凝着摩耗域において非処理鋳鉄は実験の開始直後から引掻きあるいは掘起こし現象をともなう激しい摩耗損失を生ずる。しかし、浸硫処理を施したものはすべり距離 250 m まで主として酸化

摩耗が起こり、より長距離側で漸次すべり距離が増すにしたがい α -Feの摩耗粉末が多く検出され、この状態で摩耗量は著しい増加傾向を示した。また、速度4.00 m/secのいわゆる熱的摩耗域においても浸硫処理鋳鉄は非処理鋳鉄に比べて優れた摩耗抵抗を現わし、すべり距離が3500 mまでは Fe_3O_4 を主成分とする摩耗粉末が採取され、3500~5000 mの範囲で摩耗痕深さが 20μ 以上に達し、浸硫層がほとんど除去された状態になると摩耗量の急激な増加とともに摩耗粉末からは α -Feと γ -Feの共存が確認されるようになる。

なお、上述の実験における回転試験片の摩耗傾向の一例として速度4.00 m/secのものをFig.5中に付記した。これによると、非処理鋳鉄と組合わせた回転試験片は初期摩耗段階から激しい凝着や溶着による金属転移を起こし、これにともなう摩耗後著しい重量増加現象がみられた。これと比較して浸硫処理を施した鋳鉄と組合わせたものはほぼ正常な摩耗傾向となり、浸硫層の存在が凝着または溶着の起こりにくい状態をもたらすことが認められる。

VI. 劣化浸硫浴により処理した鋳鉄の摩耗傾向

同一塩浴により浸硫処理を継続実施するとき、塩浴は酸化、分解にともなう変質劣化を起こし、これが浸硫層の反応生成物に影響をもたらすことは前掲Fig.1および2を比較検討した結果から明らかである。本実験の場合も継続処理回数4回以後の処理において、表面層にはFeSと Fe_3O_4 の混合から成る異状浸硫層が現われ、かつその下層にはFig.2に示すように正常な浸硫層の生成を認めた。

そこで、これら浸硫層の相違が摩耗傾向に及ぼす影響を検討する目的から、接触圧力5 kg/cm²、すべり速度0.30 m/sec一定条件のもとで長距離摩耗を行なった。Fig.6は連続的に毎回新しい試験片を1~5回浸硫処理した鋳鉄の摩耗傾向曲線を示したものである。これによると、正常な浸硫層が生成される処理回数1~3回のものについては、

Fig. 6 Relation between the number of employment of bath for sulphurization of cast iron and wear tendency
Specimens : Stator, Spheroidal graphite cast iron, (570°C-2 hr sulphurized). Rotor, S 45 C (900°C oil q., 580°C temper)
Applied condition : p , 5 kg/cm². v , 0.20 m/sec

前掲Fig.4にみられる摩耗傾向曲線と類似の結果が得られる。しかし、4回以後の異状浸硫層が表面付近に生成したもののについては、その層の厚さに相当する摩耗痕深さ25~30 μ に達するまで表面層の破壊脱落のため摩耗量は急激に増加し、正常な浸硫層がすべり面に存在するようになると明らかに摩耗抵抗は改善され、しかもこの領域での摩耗量の増加傾向は、処理回数1~3回の定常摩耗域におけるそれとほぼ同様な状態となることを認めた。

VII. 摩耗抵抗に及ぼす浸硫層の影響

上述のごとく、浸硫処理を施した鋳鉄の摩耗抵抗は浸硫層を構成する反応生成物のいかんによって著しい影響を受ける。すなわち、浸硫層がFeS、 Fe_{1-x}S 、 Fe_3S_4 などの硫化物あるいは Fe_3C 、 Fe_2N 、 Fe_3N などの炭、窒化物と α -Feが共存する状態のもとで優れた摩耗抵抗を現わすが、劣化浴中で処理した鋳鉄表面層のごとくFeSおよび Fe_3O_4 のみが混在するものについては激しい摩耗損失の生ずることを認めた。

そこで、この原因を究明する目的から各種摩耗条件のもとで実験を行なったときに得られた固定試験片の摩耗傾向が異なるものについて、摩耗痕深さとすべり面に存在する硫黄成分をX.M.A.により線分析した結果を比較検討し、これらの関係が摩耗傾向に及ぼす影響を吟味した。Fig.7はその一例を示したものである。これによると、摩耗痕深さが増加するにともなう硫黄成分は漸次減少し、ことに10 μ 以上ではこの傾向が顕著となり、16 μ 以上において硫黄の存在を確認することはほとんど困難となる。この結果を前掲Fig.4あるいは5の摩耗傾向曲線と比較すると、定常摩耗域における浸硫処理鋳鉄の摩耗量の増加傾向は摩耗

Fig. 7 Residual sulphur on the sliding surface after wear of cast iron sulphurized by a normal salt bath

Specimens : Stator, Spheroidal graphite cast iron (570°C-2 hr sulphurized)

Applied condition : Accelerating voltage, 25 kV. Absorbed electron current, 0.2 μ A. Analyzing crystal, PbSD. Detector, F.P.C. X-ray size, 5 $\mu\phi$. Scanning speed, 96 μ /min. Chart speed, 20 mm/min

痕深さ $10\sim 15\mu$ 以下において極めて少なく、より深くなるとこれにともなって摩耗損失を急激に増加し、上述のすべり面における硫黄の存在状態とはほぼ一致する。すなわち、このような関係は正常な浸硫層の存在のもとで凝着あるいは溶着現象の発生が抑制されていることを現わしているものと解釈することが妥当である。

また、劣化浴により処理した鋳鉄については、前述のごとく表面付近に多孔質でかつ脆性のある FeS と Fe_3O_4 の混合状態より成る異常浸硫層が存在し、これが初期摩耗の段階で脱落したのち、すべり面に正常な浸硫層が現われるときは優れた摩耗抵抗が観察されるようになる。

Fig. 8 はその一例として連続処理回数 4 回目の鋳鉄を固定試験片に用い、接触圧力 5 kg/cm^2 、すべり速度 0.30 m/sec のもとで、異常浸硫層のほとんどが摩耗粉末として脱落し終るまで摩耗を行なったのちのすべり面における硫黄成分を X.M.A. により吟味したものである。これによると、摩耗痕深さ 27μ においてもなお相当量の硫黄が検出され、これらは前掲 Fig. 2 から明らかなように FeS 、 Fe_{1-x}S 、 Fe_3S_4 のほかに Fe_3C 、 Fe_2N 、 Fe_3N などの反応生成物と $\alpha\text{-Fe}$ との共存した状態を呈している。

Fig. 8 Residual sulphur and nitrogen on the sliding surface after wear of cast iron sulphurized by an inferior bath
Specimen: Stator, Spheroidal graphite cast iron (570°C -2 hr sulphurized)
Applied condition: Accelerating voltage, 25 kV. Absorbed electron current, $0.2\mu\text{A}$. Analysing crystal, PbSD. Detector, F.P.C.X-ray size, $5\mu\phi$. Scanning speed, $96\mu/\text{min}$. Chart speed, 20 mm/min

つぎに、この結果を Fig. 6 の摩耗傾向曲線において、摩耗抵抗の向上がみられる領域での摩耗痕深さと比較すると、両者はほぼ符合することが認められた。すなわち、この場合も前述と同様な現象が摩耗抵抗を向上させる原因になっているものと解することができる。

VIII. 結 言

浸硫処理を施したブルス・アイ型球状黒鉛鋳鉄の表面層に生成される浸硫層が摩耗抵抗におよぼす影響を乾燥-す

べり摩耗状態のもとで検討した。つぎにその結果を要約すると

(1) 固定試験片に用いる鋳鉄を、還元性塩浴に 5% の $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ を添加した浸硫浴中で処理した場合、表面層には FeS 、 Fe_{1-x}S 、 Fe_3S_4 のとき硫化物のほかに Fe_3C あるいは Fe_2N 、 Fe_3N などの炭、窒化物が生成される。しかし、同一塩浴を長時間使用するときは塩浴の変質劣化が起こり、鋳鉄の表面付近には FeS と Fe_3O_4 のみから成る異常浸硫層が存在するようになる。しかしながら、この下層には上述のごとき正常な浸硫層が認められた。

(2) 浸硫あるいは非処理状態にある鋳鉄とソルバイト組織の S 45 C 鋼を組合わせて接触圧力 5 および 15 kg/cm^2 のもとですべり速度 $0.05\sim 4.00\text{ m/sec}$ まで変化させ、各圧力のもとにおける速度-摩耗特性曲線を求めた。その結果、異なった摩耗機構を呈する領域はほぼ同様な摩耗条件となる。しかし、浸硫処理鋳鉄は非処理のものに比べて酸化現象が起こり易く、しかも浸硫層が凝着または溶着作用を抑制するため摩耗率は著しく低い値を示す。

(3) 異なった摩耗機構の現われる摩耗条件のもとで摩耗傾向を吟味した。それによると、一般に非処理鋳鉄に比べて浸硫処理を施したものは初期摩耗量が大きく、定常摩耗状態となつてから平均摩耗量は小さい。しかしながら、漸次摩耗が進行し、すべり面における上述の反応生成物が消失するときは非処理鋳鉄と同様な摩耗傾向を現わすようになり、摩耗量は急激に増加する。

(4) 劣化塩浴により処理した鋳鉄の摩耗傾向は表面層に存在する異常浸硫層が消失するまで摩耗損失は大きい。しかし、これが除去され、正常な浸硫生成物によってすべり面が構成されるようになると摩耗抵抗は急速に改善されることを認めた。

(5) 塩浴の劣化に関係なく、浸硫処理を施した鋳鉄の摩耗傾向曲線において優れた摩耗抵抗を現わす領域でのすべり面には FeS 、 Fe_{1-x}S 、 Fe_3S_4 のような硫化物を形成する硫黄成分が残存するとともに、 Fe_3C 、 Fe_2N 、 Fe_3N などの炭、窒化物が $\alpha\text{-Fe}$ と共存する。したがって、これら反応生成物がすべり面に存在することは金属同志の直接接触を阻止することとなり、その結果、凝着または溶着現象が抑制され、摩耗抵抗に向上がみられるものと考えられる。

終りに本研究を遂行するに当たり、ご指導を賜った関西大学教授津田昌利博士、関東学院大学教授小川喜代一博士、ならびに試料の調製および実験にご協力下さった高丘工業株式会社の関係者各位、東海大学学生菊間国治君に深謝いたします。