

原子炉用 Zr 合金の溶接

安藤 良夫

原子炉用 Zr 合金 Zircaloy-2 およびその改良合金について、溶接チャンバ内の Ar ガスの純度をかえて TIG 溶接を行ない、溶接条件の変化が継手の切欠靱性、高温強度に及ぼす影響を求めた。

1. まえがき

Zr は 1857°C という比較的高い融点を有し、きわめて耐食性がすぐれており、しかも中性子吸収断面積がきわめて小さい。したがって原子炉材料としては非常にすぐれており、溶接性や強度を高めるために合金の形で原子炉構造材料に使われているが、主な用途は軽水冷却型原子炉の燃料要素のキャニングなどで、HRT のように炉心タンクが造られた例もある。

一般に原子炉の溶接においては放射性物質の漏洩、冷却剤その他による腐食、修理の困難さなどのために、従来の溶接構造物には見られなかったような特殊な問題を伴い、また溶接の品質は飛躍的に優秀なものであることが必要とされている。わが国では原子炉用 Zr 合金の溶接施工に関してはこれまでほとんど研究されておらず、日本溶接協会では昭和 34 年度の科学技術庁原子力平和利用補助金の交付を受けて、原子炉用 Zr 合金および Mg 合金の溶接に関する研究を行ってきたが、このほど研究を完了した。本報告は Zr 合金関係のうち筆者が関係した分をとりまとめたもので、溶接施工は富士電機製造 KK 川崎工場、高温引張り試験は日本原子力研究所東海研究所で実施した。

2. 使用材料

研究に使用した材料は Zircaloy-2 および Zircaloy 改良合金で、その組成を第 1 表に、機械的性質を第 2 表に

第 1 表 使用材料の化学組成

使用材料	化 学 成 分 %											
	C	Ni	Cr	Fe	Sn	Al	Hf	Zr	O ₂	H ₂	N ₂	Cl ₂
Zircaloy-2	.003 ~.005	.058 ~.067	.126 ~.131	.152 ~.186	1.38 ~1.45	.0081 ~.0089	.0055 ~.0060	残	.087	.0026	.0020 ~.0026	<.005
Zircaloy 改良合金	.002 ~.004	.039 ~.043	.109 ~.117	.085 ~.114	1.06 ~1.12	.0074 ~.0089	.0055 ~.0070	残	.058	.005	.0017 ~.0020	<.005

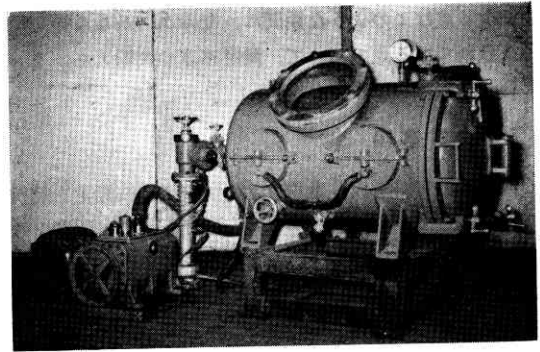
第 2 表 使用材料の機械的性質

使用材料	圧延方向	降伏強さ (0.2%) kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び (G.L =50mm)	硬 度 (H _v , 10kg)
Zircaloy-2	縦	38.2	44.3	37.0	188
Zircaloy 改良合金	縦	29.4	44.2	33.0	177

示す。Zircaloy 改良合金は N₂ の含有量を減らしたスポンジから製造したもので、Sn の含有量を Zircaloy-2 の場合よりもやや少なくしてある。本研究においてはいずれも板厚 1 mm のものを用いた。

3. 溶接方法

溶接は第 1 図に示す可変雰囲気溶接キャビネット中で Tig 法により行なった。キャビネットは軟鋼製で、操作窓、明かり取り窓各 1 個を有し、試料の出し入れは片側に設けた扉を開閉して行なう。内部に Tig 溶接用トー



第 1 図 溶接キャビネット

チ、溶接試料取付け台およびその移行装置を蔵しておりキャビネット外部に出た把手を回転し、チェーン機構によって試料取付け台をレール上で移行させるようになっている。溶接操作はゴム手袋を通して行ない、トーチを固定または手操作し、試料取付け台の移行を手動または

自動とすることによって手動、自動いずれの溶接も可能である。回転式真空ポンプと油エジェクターポンプの 2 台の真空ポンプを駆動し、到達真空度は最大 10⁻³ mmHg 程度、所要時間は約 15 分である。真空度の測定はガイスラー管によって行なう。

第 3 表 雰囲気種類と溶接試験板の数

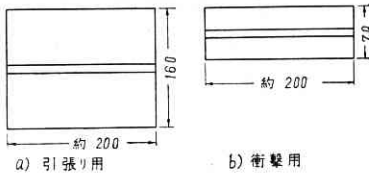
雰囲気	Ar 中の水蒸気 mg/l	Zircaloy-2 試験板		Zircaloy 改良合金試験板	
		引張り枚	衝撃枚	引張り枚	衝撃枚
純 Ar (99.99%以上)	—	3	6	3	6
露点 -7°C	2.95	1	2	1	2
露点 +8°C	8.32	1	2	1	2
露点 +15°C	12.9	1	2	1	2

第 4 表 溶接条件

試験板の種類	開先	ルートギャップ mm	溶加棒	電流 A	速度 mm/min	電極径 mm φ	Ar 流量 l/min
引張り, 純 Ar	I	0	なし	60	105	1.6	10
	I	0	なし	58~60	175	1.6	10
衝撃	I	2mm 棒をはさむ	合金, 2mm φ	65	125	1.6	10

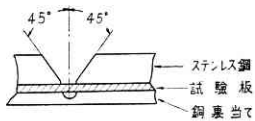
溶接雰囲気は第 3 表の 4 種を用い、その調整は純 Ar に水蒸気を混入し、露点温度計によって露点を計測した。

試験板は第 2 図に示す形状のもので、溶接前処理として脱脂した後に、HF 5%, HNO₃ 10% 溶液に室温で 30~60 秒浸漬して酸洗いを行ない、さらに水洗した。引張り試験板は I 型開先、ルートギャップなしの片側突合せ溶接、衝撃試験板は切欠部の寸法精度を考慮して、板



第 2 図 試験板

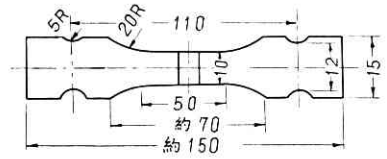
の裏表にビードを出すため、I 型開先、2mm φ の溶加棒を板の間にはさみ、一方を仮どめて片側突合せ溶接を行なった。いずれの場合も直流正極性を用い、試料は自動的に送った。試験板溶接時の押え治具を第 3 図に示す。試験板の数は第 3 表に、またそれらの溶接条件は第 4 表に示すとおりである。純 Ar 中で溶接した試験板の 1/3 は溶接後 500°C 10 分間、1/3 は 650°C 10 分間の熱処理を Ar ガスを入れたベル型炉中で行ない、1/3 は溶接のままとした。



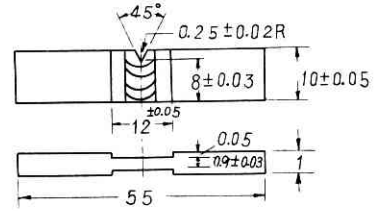
第 3 図 溶接用押え治具

4. 試験片および試験方法

引張り試験片の形状は第 4 図に示すとおりで、各試験板からそれぞれ 10 枚を採取したが、余盛りは加工せず溶接のままとした。

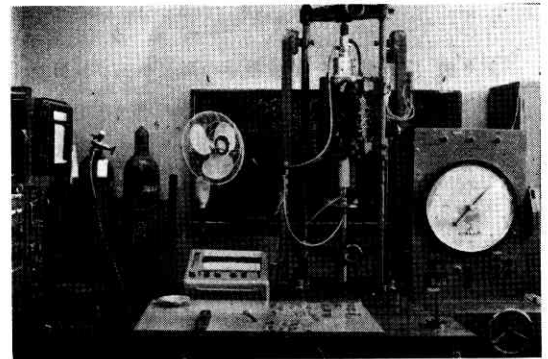


第 4 図 高温引張り試験片

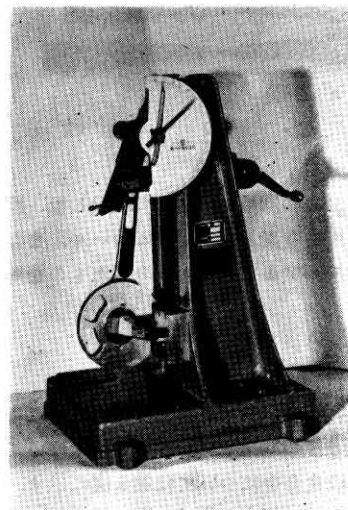


第 5 図 衝撃試験片

衝撃試験片の形状は第 5 図に示すように板厚方向の寸法以外は標準 V シャルピー試験片 (JIS Z 3172) と同様であるが、溶接部付近はビードの高低の影響をなくするために、0.9 mm 厚に仕上げた。切欠位置は溶接中央とボンドの二種とし、1 枚の試験板からおのおの 21 箇の試験片を採取した。このほか母材試験片を用意した。



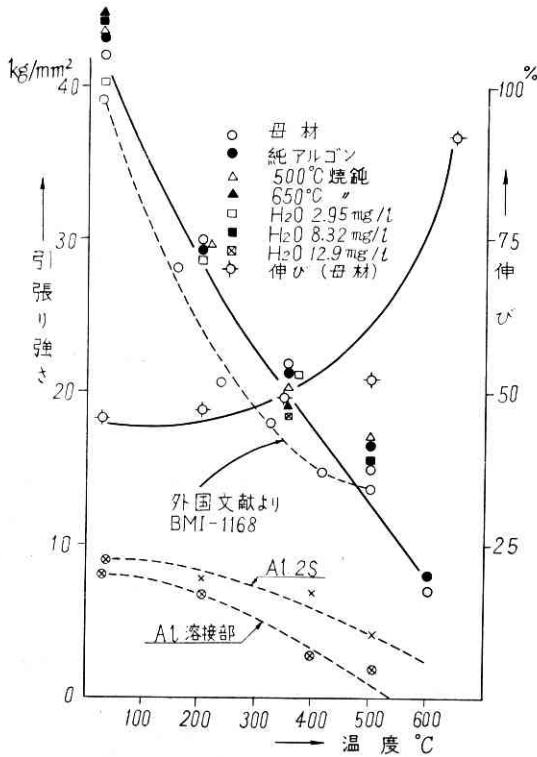
第 6 図 10t 精密引張り試験機



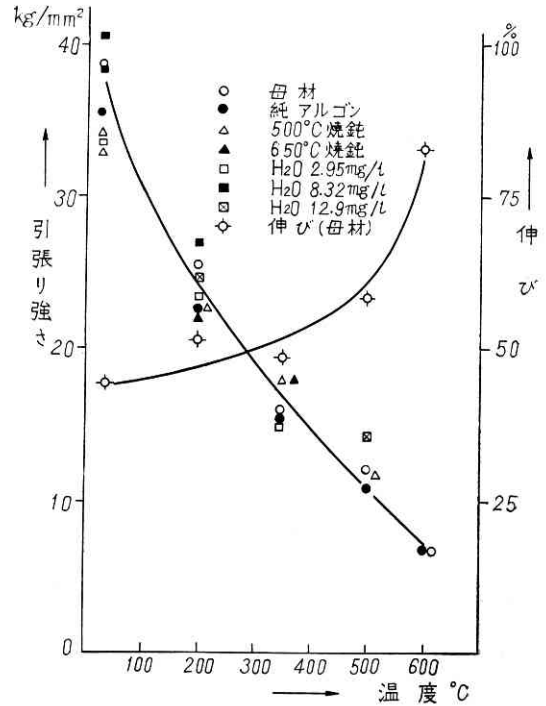
第 7 図 1kg-m シャルピー試験機

高温引張り試験は第 6 図に示す 10t 精密引張り試験機を用いて実施したが、この試験機は試験片を Ar 雰囲気中で加熱し、所定温度に保ちつつ試験することができる。

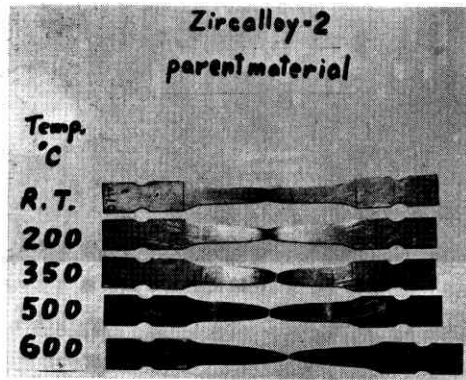
衝撃試験は第 7 図に示す 1kg-m シャルピー試験機を用いて行ない、試験片の横倒れを防ぎ、ハンマーの



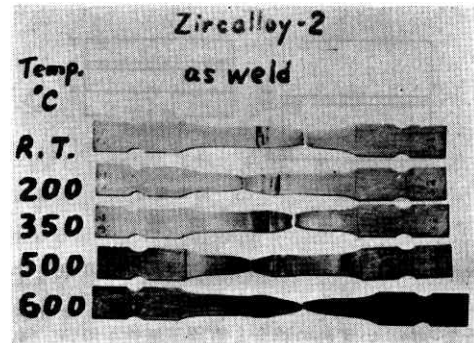
第8図 Zircaloy-2 溶接継手の高温引張り試験結果



第9図 Zircaloy 改良合金溶接継手の高温引張り試験結果



(a) 母材



(b) 溶接継手 (溶接のまま)

第10図 高温引張り試験片

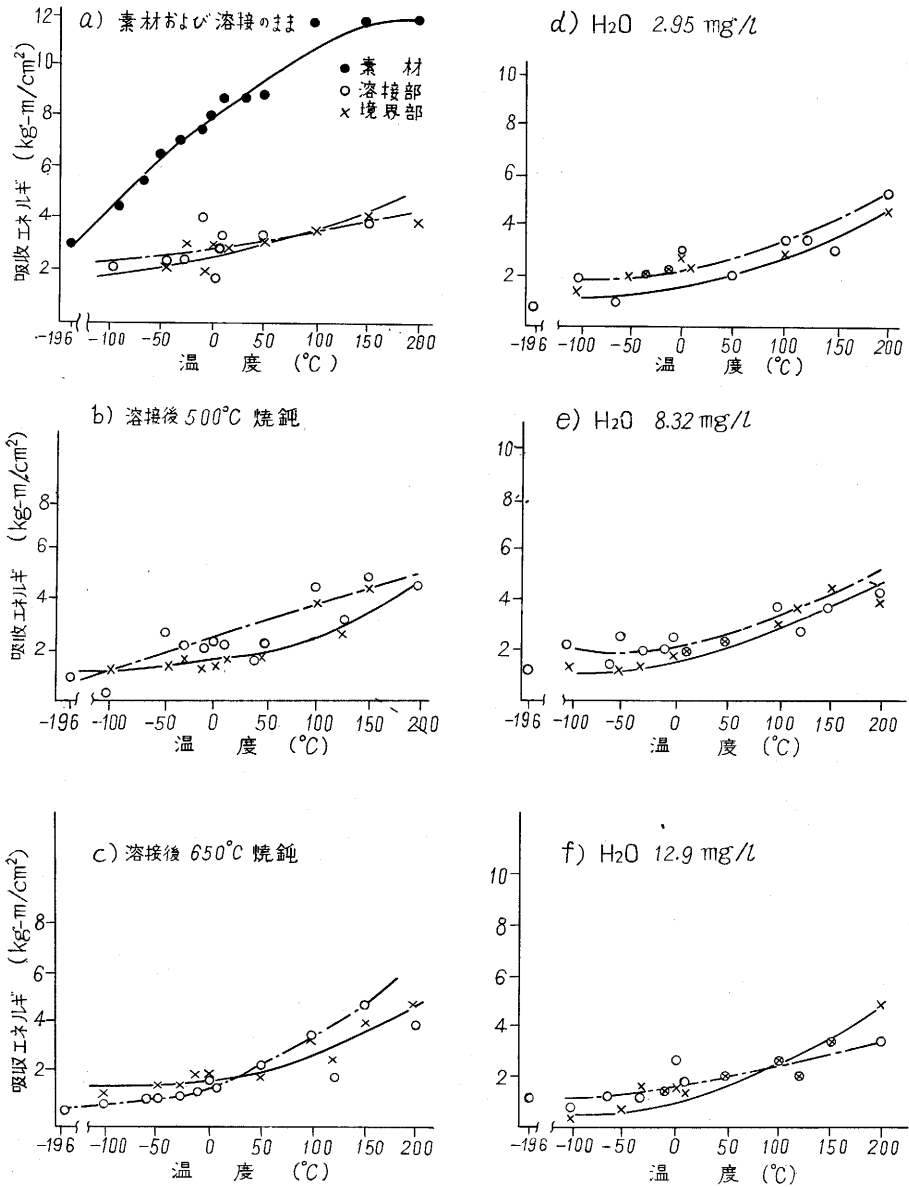
衝撃位置をあわせるために治具にはさんで試験した。所定温度をうるために液体窒素とエチルアルコール、またはドライアイスとエチルアルコールを混合したものを用いた。

5. 試験結果

室温、200、350、500、600°C の各温度で引張った各種試験片の高温引張り試験結果を Zircaloy-2 については第8図、Zircaloy 改良合金については第9図に示す。代表的な試験片の破断後の写真を第10図に示すが、母材試験片では試験温度とともに延性を増し、溶接継手試

験片では破断がいずれも母材部で生じていることが分かる。

各種条件の溶接試験片についての衝撃試験結果を温度に対して置点すると第11、12図の遷移曲線がえられ、+100、0、-100、-200°C における各種試験片の衝撃値を求めると第5表のようになり、溶接試験片の衝撃値は母材のそれよりかなり劣るが、溶接試験片相互の間では、切欠位置、応力除去焼鈍、Ar ガス純度の影響はそれほど顕著ではなかった。Zircaloy-2 の衝撃値に比して、Zircaloy 改良合金の衝撃値がやや上まわる傾向がみられた。



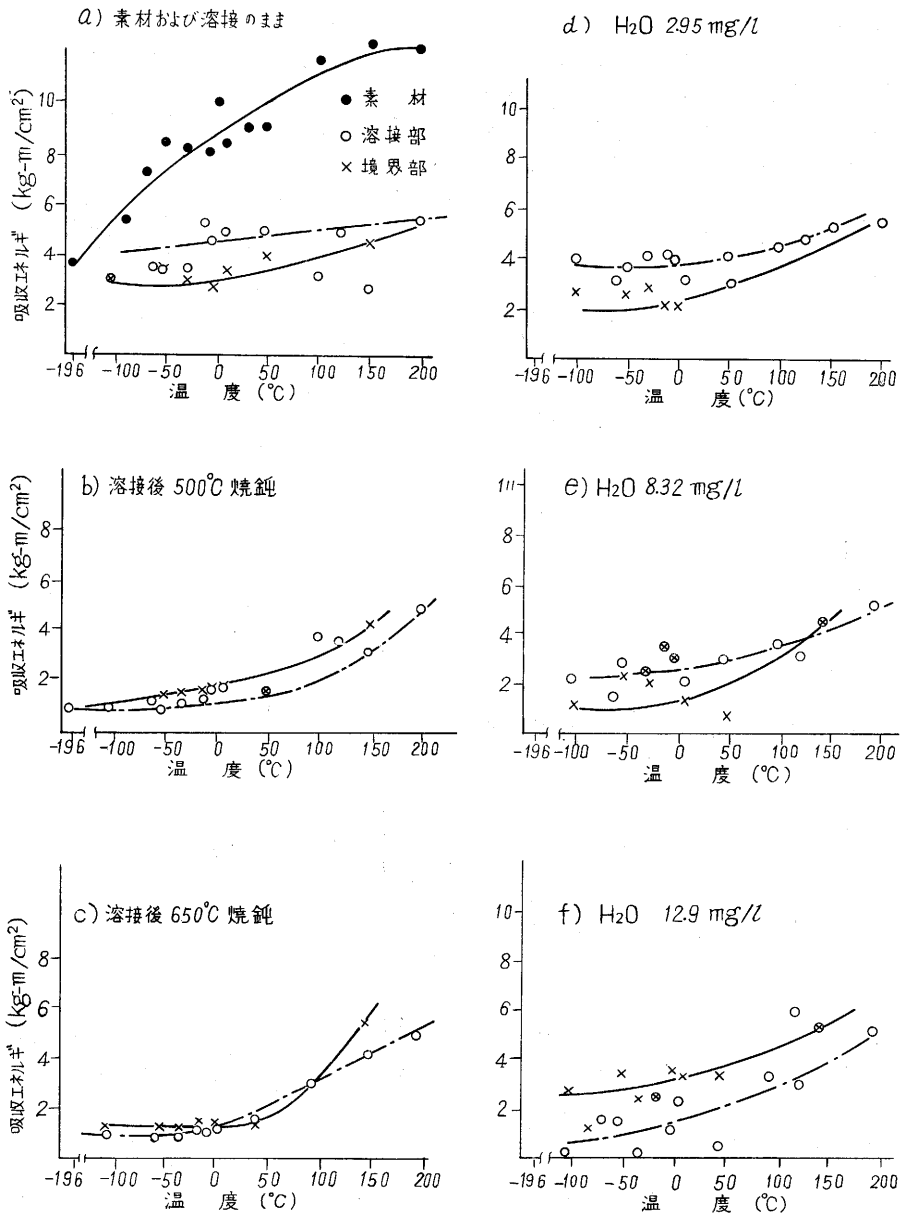
第 11 図 Zircaloy-2 溶接継手の衝撃試験結果

第 5 表 各種試験片の衝撃値

試験片の条件	切欠位置	Zircaloy-2				Zircaloy 改良合金			
		E ₋₁₀₀ *	E ₀ *	E ₁₀₀ *	E ₂₀₀ *	E ₋₁₀₀	E ₀	E ₁₀₀	E ₂₀₀
素 材	—	4.2	8.2	10.8	11.8	8.0	10.0	11.8	12.4
純 Ar, 溶接のまま	W	2.2	3.0	3.8	5.0	3.0	3.4	4.0	5.3
	B	1.8	2.6	3.2	4.4	2.8	3.1	3.9	5.4
純 Ar, 500°C 焼鈍	W	1.6	2.2	3.0	5.8	1.0	1.7	3.1	5.0
	B	1.2	1.5	3.5	5.0	1.2	2.0	2.4	5.8
純 Ar, 650°C 焼鈍	W	1.0	1.6	3.8	6.0	0.9	1.1	2.7	5.0
	B	1.4	1.8	3.2	5.0	1.2	1.5	3.4	6.2
H ₂ O 2.95 mg/l	W	1.6	2.4	3.6	4.6	3.5	4.0	4.6	5.5
	B	1.4	2.2	3.2	4.7	2.3	2.5	3.9	6.2
H ₂ O 8.32 mg/l	W	2.2	2.4	3.4	4.4	2.2	2.5	3.6	5.4
	B	1.2	2.0	3.2	4.0	2.0	2.4	—	—
H ₂ O 12.9 mg/l	W	1.0	1.5	2.4	3.6	1.0	1.9	2.3	5.0
	B	0.6	1.6	2.6	4.8	1.9	3.0	4.2	6.4

§ W: 溶接部 B: ボンド

* 添字の温度 (°C) における衝撃値 (kg-m/cm²)



第 12 図 Zircaloy 改良合金溶接継手の衝撃試験結果

6. 考察と結論

Zircaloy 改良合金の厚さ 1 mm の板は溶接キャビネット中で初期真空度 10⁻³ mmHg, Ar 純度 99.99% 以上を使用して突合せ Tig 溶接が可能で, ガス純度が若干落ちても適正条件であれば溶接することができる。

Zircaloy-2 と Zircaloy 改良合金の溶接性の差はほとんど見られない。

Zr 合金は高温になるにしたがって引張り強さが低下し, 延性を増すが, Zircaloy-2, Zircaloy 改良合金ともに素材と溶接継手の特性は大差なく, また Ar 中における 500°C 10 分間および 650°C 10 分間焼鈍は引張り強さに影響しない。

衝撃試験において, 素材の衝撃値は -200~+200°C の間で典型的な衝撃値-温度遷移曲線が求められるが, 溶接継手の衝撃値は温度によってあまり変わらず, 素材と比較してかなり低かった。溶接部と融合部 (ボンド) の衝撃値はほとんど差がなく, 500°C, 650°C の応力除去焼鈍によっても, また 2.95~12.9 mg/l 程度の水蒸気を Ar ガス中に混入しても衝撃値の差は顕著ではない。Zircaloy 改良合金の衝撃値は Zircaloy-2 のそれより少し高い傾向にあった。

終わりに本研究を行なうに当たり協力をいただいた原研藤村理人所員, 富士電機出口義治氏, 生研飛田正蔵助手, 長谷川功三技官に謝意を表す。(1961年4月13日受理)