

ガスタービン用耐熱鋼 Timken's 16-25-6 の 熔接部に於ける機械的性質

小 野 健 二* 小 川 浩 三**

The Mechanical Properties at the Welded Part of Heat Resisting Steel "Timken's 16-25-6" for Gas Turbine

By Kenji Ono, D.S.E., Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd. and
Kōzō Ogawa Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

In any sort of gas turbines nothing has larger effects on their efficiency and life than the quality of heat resisting steel used in them. In this view, the writers carried out a series of mechanical tests for the Timken's 16-25-6 steel which are mostly favoured by general gas turbine makers. Three different tests, i. e. impact, tensile, and creep tests, were conducted particularly on the seam of the steel, welded either with Timken welding electrode or 18-8 electrode.

The results of the tests are summarized as follows:

- (1) Too much C content of the base metal causes brittleness around the welded part. Good result of welding is first conditioned on a proper amount of C content which secures a sufficient toughness of the metal.
- (2) The tensile strength of welded part is mostly influenced by that of deposited metal. Timken's electrode, proving far better than 18-8 electrode, makes excellent deposit metal approximating forged part when properly peened.
- (3) Creep limit of each deposited metal is almost equal to that of base metal "Timken" at comparatively high temperatures, but lower at low temperatures.

〔I〕 緒 言

最近我国に於ても各種ガスタービンの試作研究が広く開始されたが、特にこの種機関の死命を制するものは耐熱材料であり、先進欧米各国の例に倣い各方面とも異常な努力が払われている。特に Timken's 16-25-6 は最も一般的で且つ大量に使用されている耐熱鋼であるが、著者等はこの耐熱鋼が高温高負荷の苛酷な条件下で使用されることを前提として、主としてこの鋼の熔接部に於ける機械的性質を明らかにするため諸種の機械試験を行つたのでその結果について述べ参考に資する次第である。

* 日立製作所日立研究所 工博

** 日立製作所日立研究所

〔II〕 試 料

高周波電気炉で熔製した Timken's 16-25-6 (以下 Timken と略称す) 60 kg 鋼塊を 15~18 mm 角に鍛伸した後 1,150°C 1 hr 加熱後水冷の熔体化处理を施して熔接試験用の母材とし、熔接棒としては Timken 熔接棒と 18-8 鋼熔接棒との 2 種を使用した。

第 1 表 (次頁参照) はこれらの母材及び熔着鋼の化学組成を示す。

試験片はそれぞれ試験の目的に応じて製作したが、それらの製作方法と熱処理に就いては各試験の章に於て述べる。

第 1 表 母 材 及 び 熔 着 鋼 の 化 学 組 成 (%)

Table 1. Chemical Composition of Base and Deposited Metals

種 別	符 号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Nb	備 考
母 材	標 準	<0.10	0.3~1.0	1.0~2.0	15.0 ~1.70	24.0 ~27.0	5.5~7.0	0.1~0.2	—	—
	T_{11}	0.11	0.30	1.81	15.85	25.66	5.48	0.10	—	母材、熔接両試験用
	T_7	0.07	0.55	1.85	16.26	26.02	6.10	0.11	—	熔 接 試 験 用
	T_{18}	0.18	0.95	1.89	16.79	26.05	5.98	0.15	—	熔 接 試 験 用
	T_{10}	0.10	1.09	1.09	16.30	25.85	5.99	0.11	—	母 材 試 験 用
熔 着 鋼	T_W	0.10	0.09	2.38	16.42	25.62	5.91	0.08	—	(Timken)
	E_W	0.14	0.57	5.59	17.91	8.23	1.45	0.06	0.35	(18-8)

〔III〕 熔 接 部 に 於 ける 硬 さ 及 び 衝 撃 値 の 分 布

熔接部特に熔着鋼と母材との境界附近には脆化が起る場合があり、しばしば亀裂発生の原因となることがあるので熔接部附近に於ける硬さ及び衝撃値の分布を求め、熔接による脆化の生ずる範囲を明らかにするとともに、安全な熔接を行うための母材条件に就いても検討を行った。

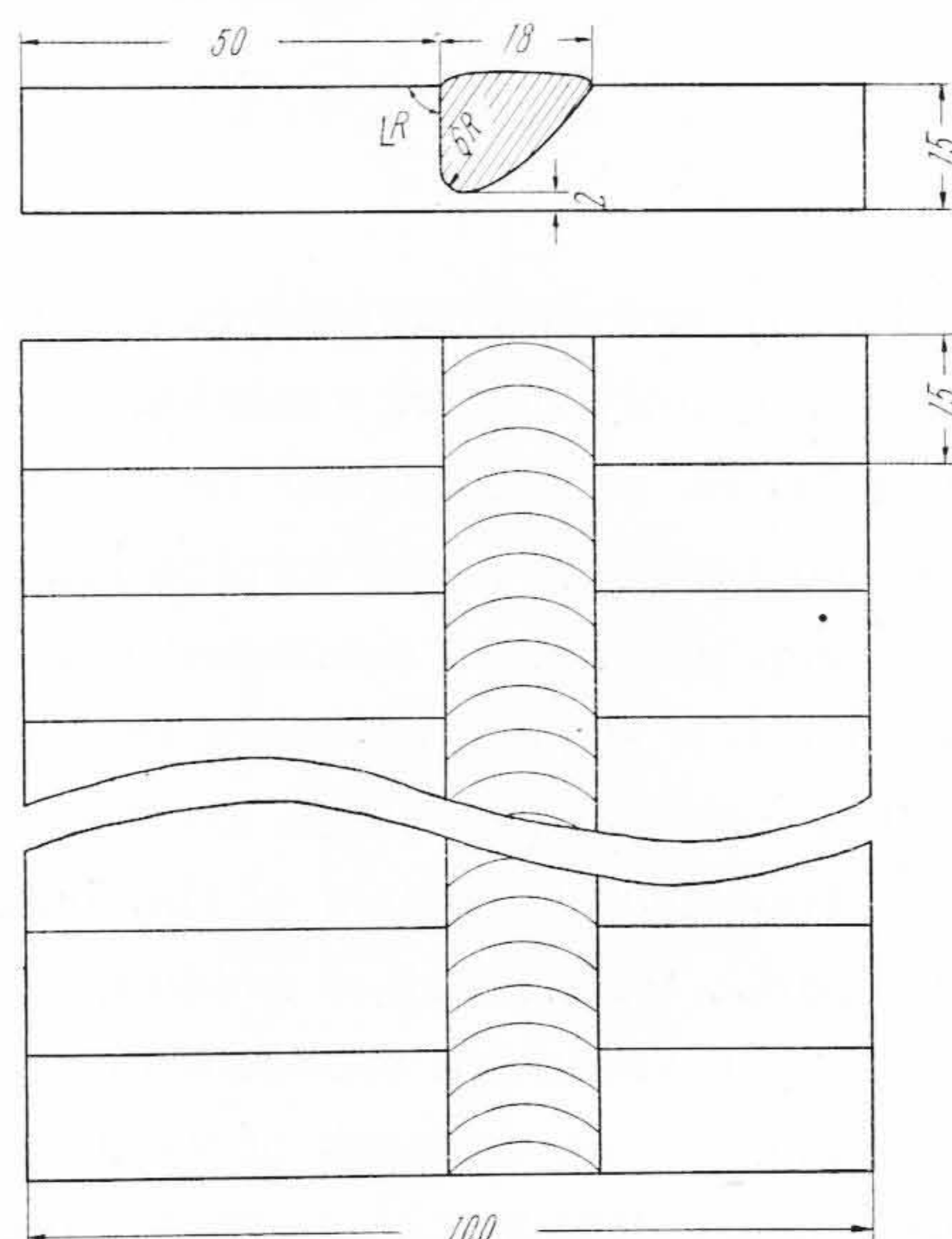
(1) 実 験

まず試験片の製法に就いて述べる。第1図に示されるように半V型に開先した15mm角、長さ100mmの母材を並列し、開先部に径4mmの熔接棒を以て熔接した。熔接に際しては電流は120~130Aとし、直流熔接機を以て逆極性(熔接棒を正極)にして行つた。なおピーニングを施す場合は1層盛るごとに3~5kg/cm²の空気槌を使用して約1m/minの速さで20回繰返し槌打した。

硬さ測定はビッカース硬度計によつた。開先に際し底面に直角に切られた側を熔接部の境界とし、これを原点として母材部及び熔着鋼部に1mmごとに硬さを測定した。次に衝撃試験片のノッチの位置も境界を原点として両側に1mmごとに設け、試験にはシャルピー型試験機を使用した。第2図は試料の熔接条件を示し、熱処理としては硬さ測定の場合のみ熔接のまゝでも行つたが、他はすべて650°C 10hrの応力除去処理を施してある。硬さ測定は常温で、衝撃試験は常温及び600°Cで行つた。

(2) 結 果

第2図は硬さ測定結果を示す。18-8鋼熔接棒で普通熔接した場合には境界より母材部へ約2mmに亘つて硬さが上昇しているが、650°C 10hrの応力除去処理を行つても母材部の硬さの増加は著しくなく、一方Timken熔接棒でピーニング熔接した場合には応力除去処理後硬



第1図 硬さ測定及び衝撃試験片の製作方法

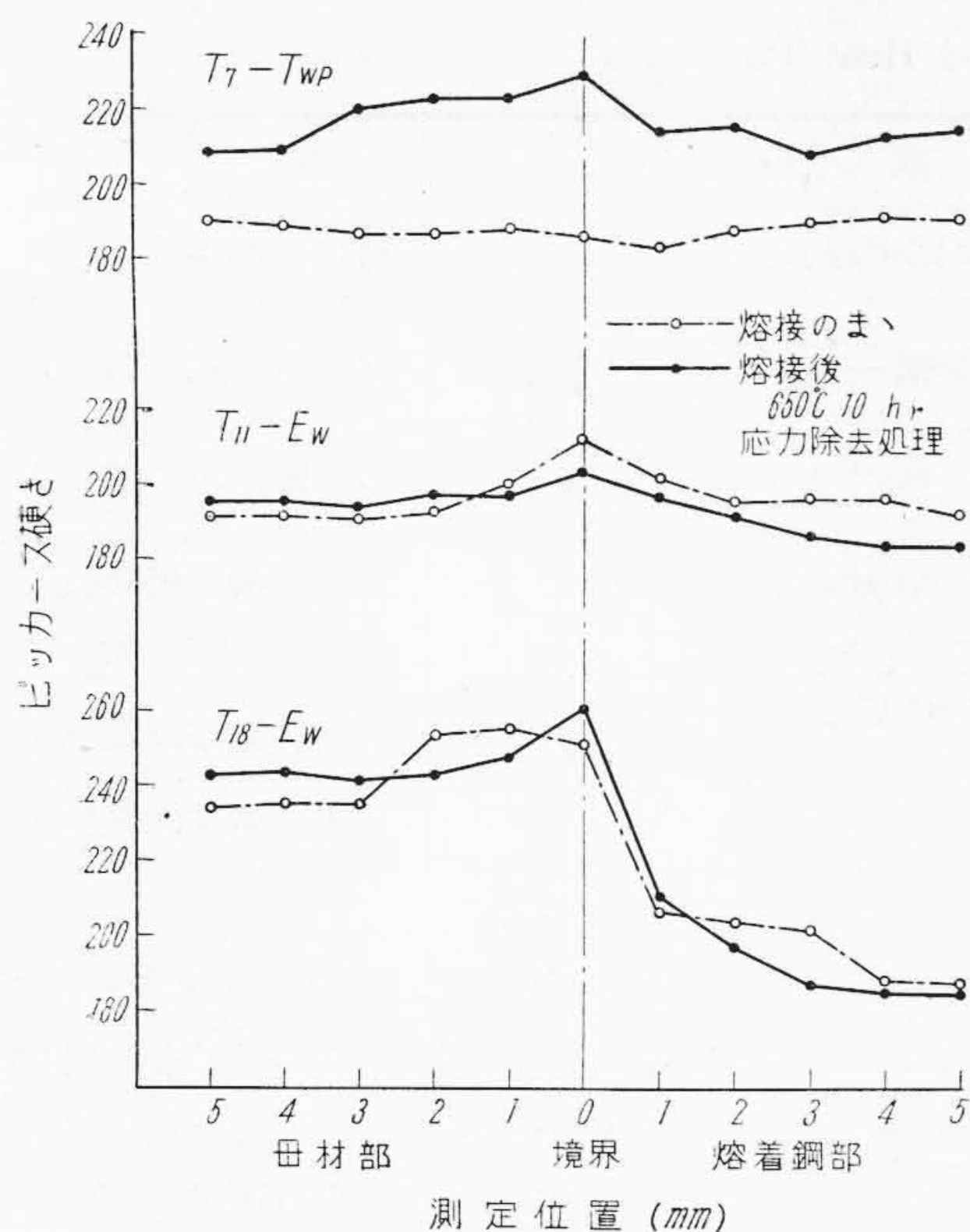
Fig. 1. Preparation of Test Piece for Hardness and Impact Test

第2表 熔 接 条 件

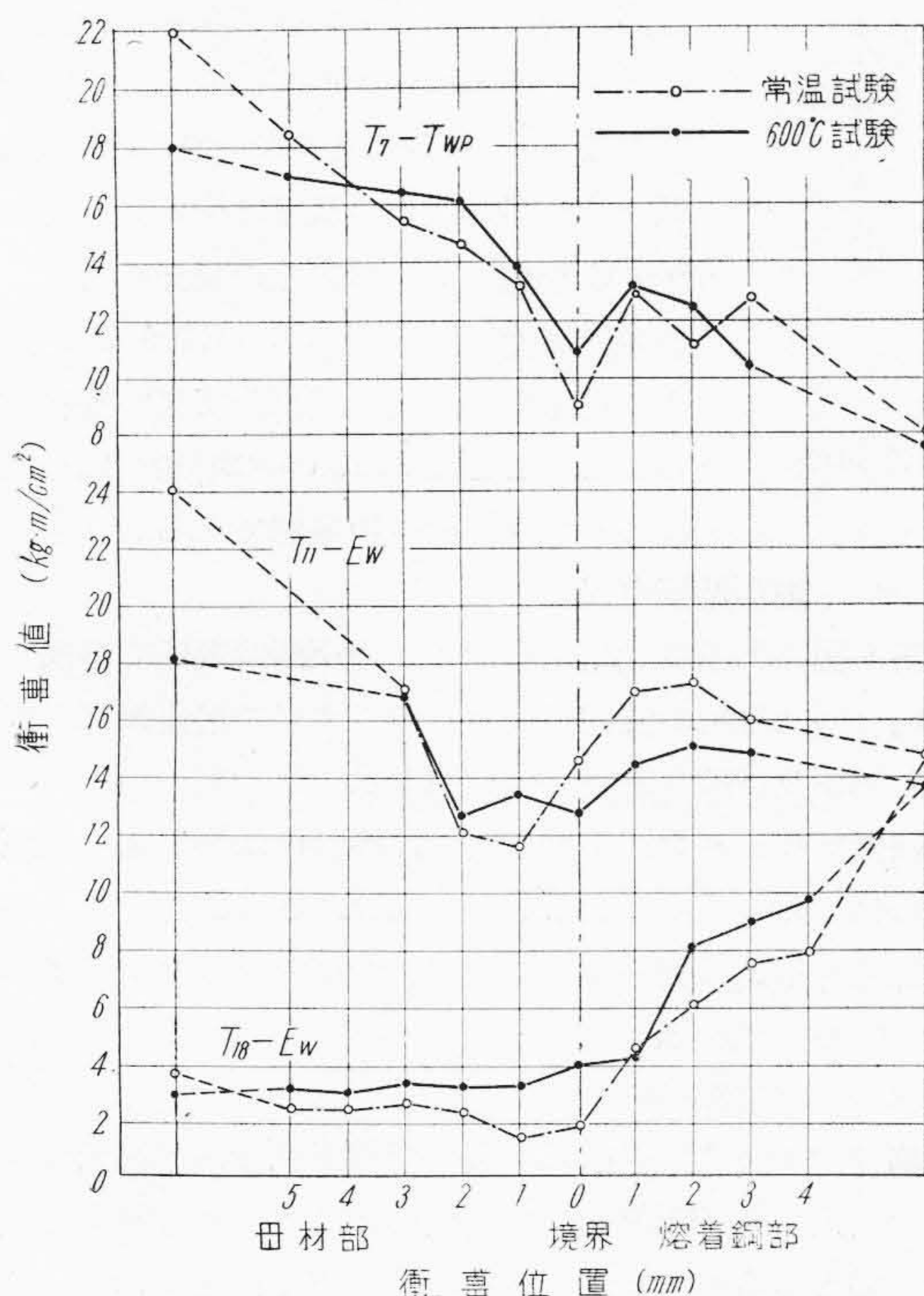
Table 2. Welding Condition

符号	母材	熔接棒	熔 接 及 び 熱 処 理 時 間
T_7 T_{WP}	T_7	Timken	1,150°C → ピーニング → 650°C 10 hr 1 hr 水冷 → グ 熔 接 → 応力除去処理
T_{11} E_W	T_{11}	18-8	1,150°C → 普通熔接 → 650°C 10 hr 1 hr 水冷 → 普通熔接 → 応力除去処理
T_{18} E_W	T_{18}	18-8	1,150°C → 普通熔接 → 650°C 10 hr 1 hr 水冷 → 普通熔接 → 応力除去処理

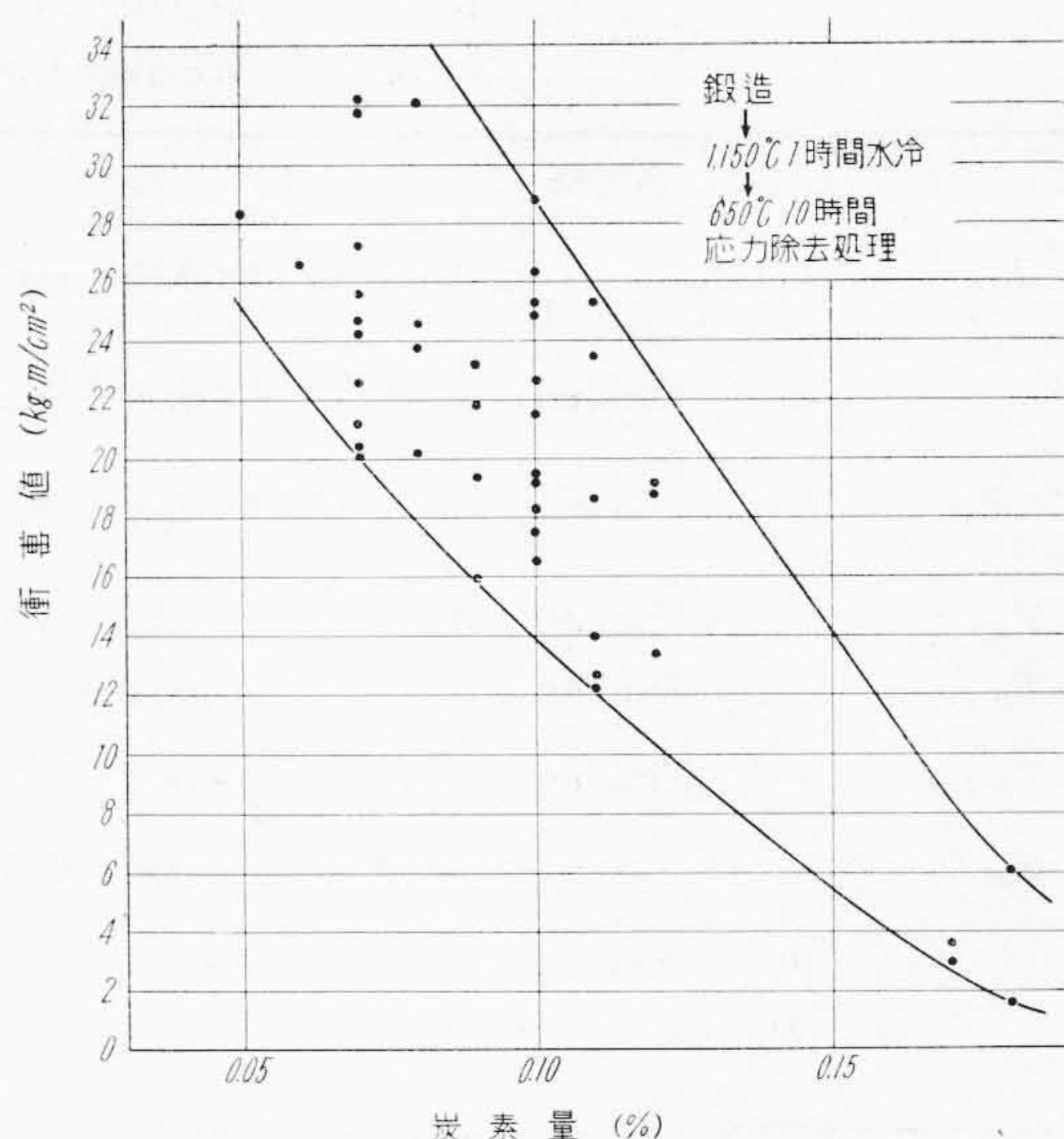
さの増加が著しいのは、母材部もピーニングを受けるのでその残留応力により析出硬化が促進されるものと考えられる。第3図は衝撃試験結果を示す。熔接棒の種類、熔接方法の如何を問わず母材部の脆化は境界より数mm



第2図 熔接部に於ける硬さ分布
Fig. 2. Distribution of Hardness No. at the Welded Part



第3図 熔接部に於ける衝撃値分布
Fig. 3. Distribution of Impact Value at the Welded Part



第4図 炭素量と衝撃値との関係

Fig. 4. Relation between Carbon Content and Impact Value

に及ぶが特に 2 mm 附近までが著しい。T₁₈のごとく C 量が高く靱性に乏しい母材を熔接すると、熔着鋼部にノッチを設けても破断は熔着鋼部で起らず、ノッチとその裏面の境界を結ぶ線上で起るため熔着鋼部は実際より低い衝撃値を示した。即ち Timken は熔接母材として C 量が必要以上に高いと熔接部の脆化が問題になるが、C が標準量で靱性に富むなら心配するには及ばない。なお C 量と衝撃値との関係に就いて第 4 図が示すように熔接面から見て C 量は標準組成内にとどめることが好ましいことが知られる。

〔IV〕 熔接部の高温引張及び衝撃試験

〔III〕に於て熔接部は母材と熔着鋼との境界附近に於て脆化が見られることを述べたが、次に使用温度附近の高温に於て果してどの程度の強度及び靱性を有するかを知ると共に、熔接部の一部を占める熔着鋼の性質をも明らかにした。

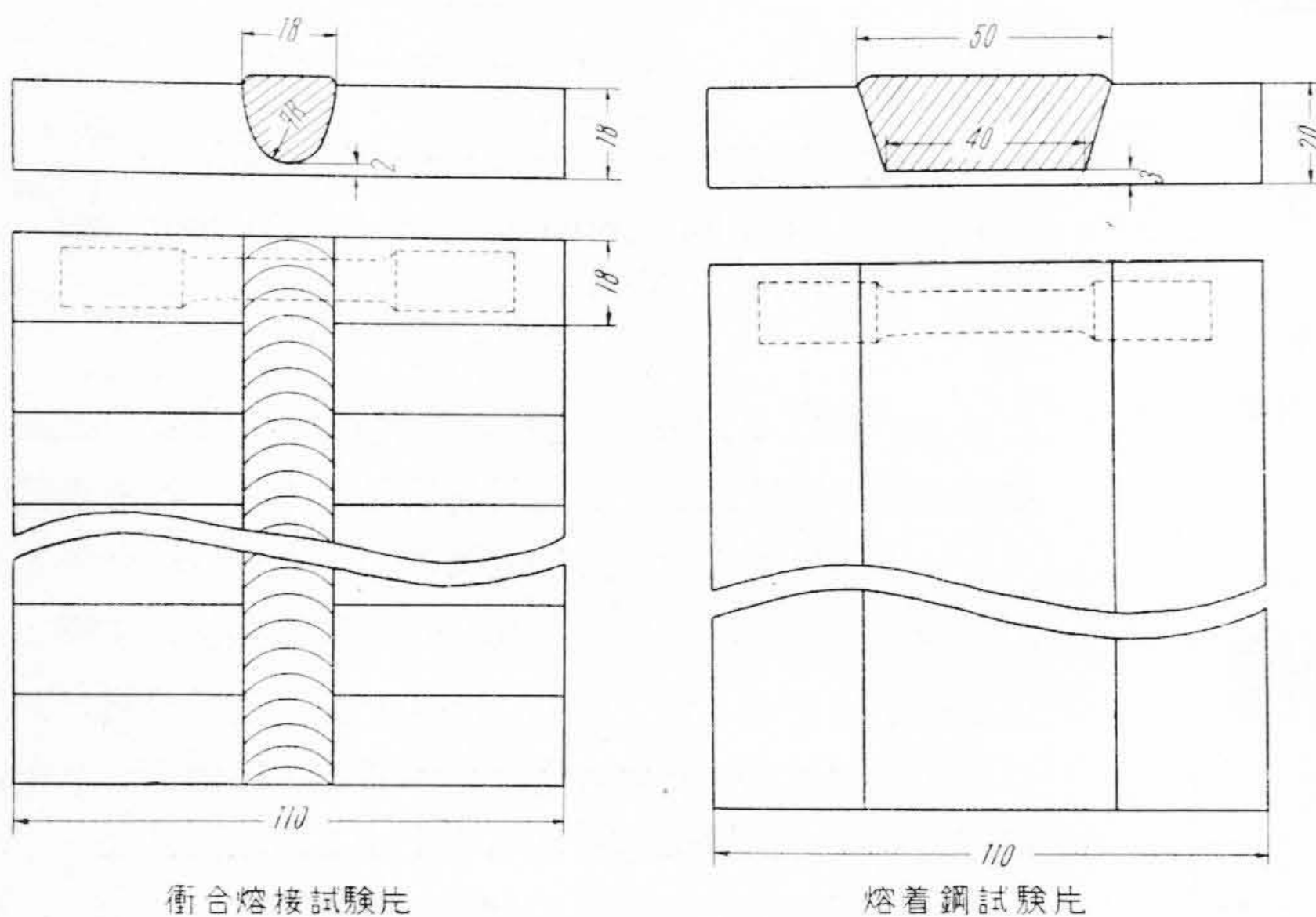
(1) 実 験

まず試験片の製法に就いて述べる。衝合熔接試験片は第 5 図 (次頁参照) 左に示されるように U 字型に開先した 18 mm 角、長さ 110 mm の母材を並列し開先部を熔接した。又熔着鋼試験片は第 5 図右に示されるように 18-8 不銹鋼板上に設けられた開先部に熔接した。熔接方法は〔III〕の場合と同様である。第 6 図 (次頁参照) は試験片の寸法を示し、衝合熔接試験片では熔着鋼部が試験片の中央部に位置するようにした。

第3表 熔接及び熱処理条件

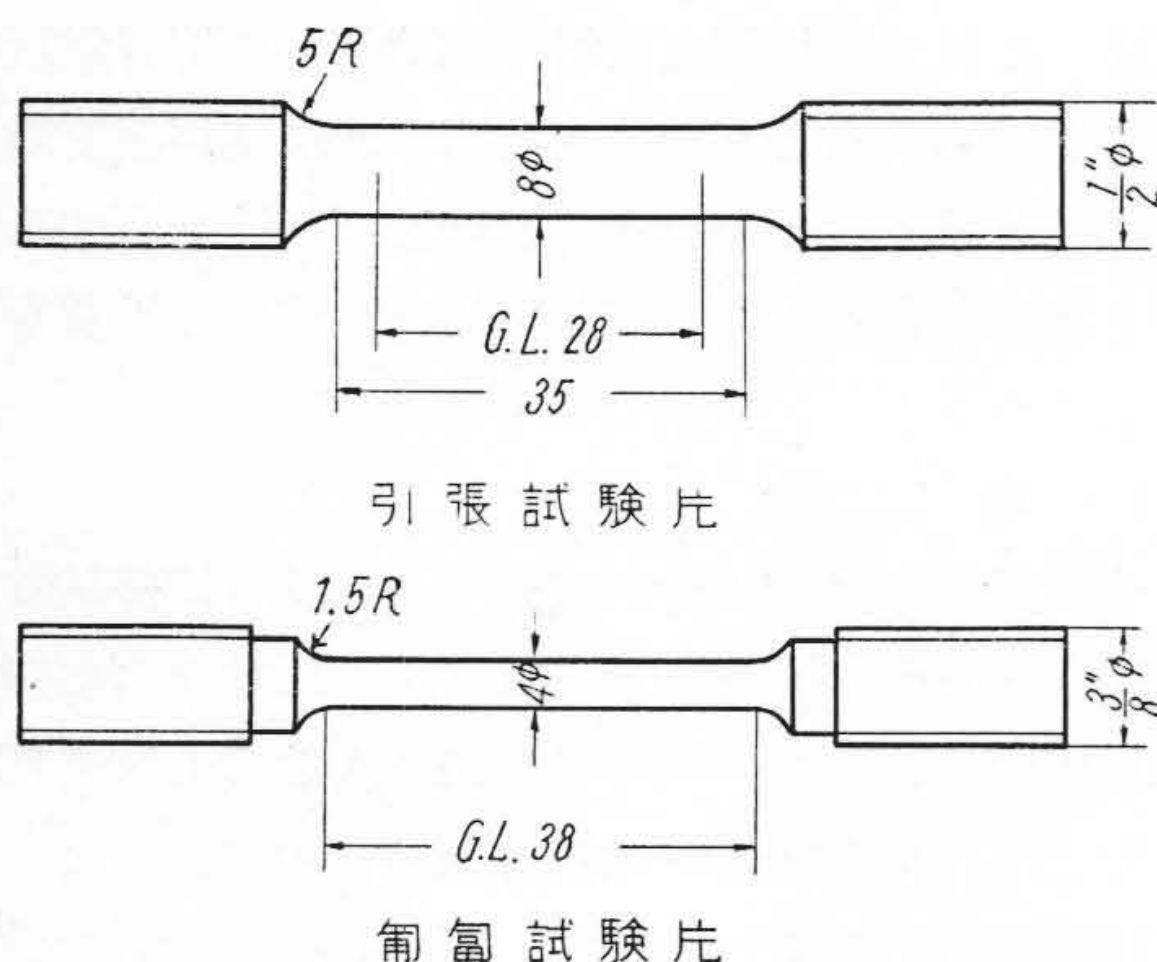
Table 3. Welding Condition and Heat Treatment

符 号	母 材	熔接棒	熔 接 及 び 熱 処 理	備 考
T_{11}	T_{11}	—	1,150°C 1hr 水冷→650°C 10hr 応力除去処理	引張、衝撃両試験片
T_7-T_{WP}	T_7	Timken	1,150°C 1hr 水冷→ピーニング熔接→650°C 10hr 応力除去処理	引 張 試 験 片
$T_{11}-E_W$	T_{11}	18-8	1,150°C 1hr 水冷→普 通 熔 接→650°C 10hr 応力除去処理	引 張 試 験 片
T_W	—	Timken	普 通 熔 接→650°C 10hr 応力除去処理	引張、衝撃両試験片
T_{WP}	—	Timken	ピーニング熔接→650°C 10hr 応力除去処理	引 張 試 験 片
T_{WPH}	—	Timken	ピーニング→1,000°C 1hr 空冷→880°C 1hr 油冷→650°C 10hr 応力除去処理	引張、衝撃両試験片
E_W	—	18-8	普 通 熔 接→650°C 10hr 応力除去処理	引張、衝撃両試験片



第5図 熔接部及び熔着鋼の引張試験片の製法

Fig. 5. Preparation of Tensile Test Piece for Welded Part and Deposited Metal



第6図 引張及び匍匐試験片の寸法

Fig. 6. Dimension of Tensile and Creep Test Piece

高温引張試験には20tアムスラー型万能試験機を使用した。試験温度は母材試験では常温～1,350°Cとしたが、その他はすべて常温、500, 600, 700 及び 800°Cとした。第3表は各種試験片の熔接及び熱処理条件を示す。

(2) 結 果

(A) 母材の場合

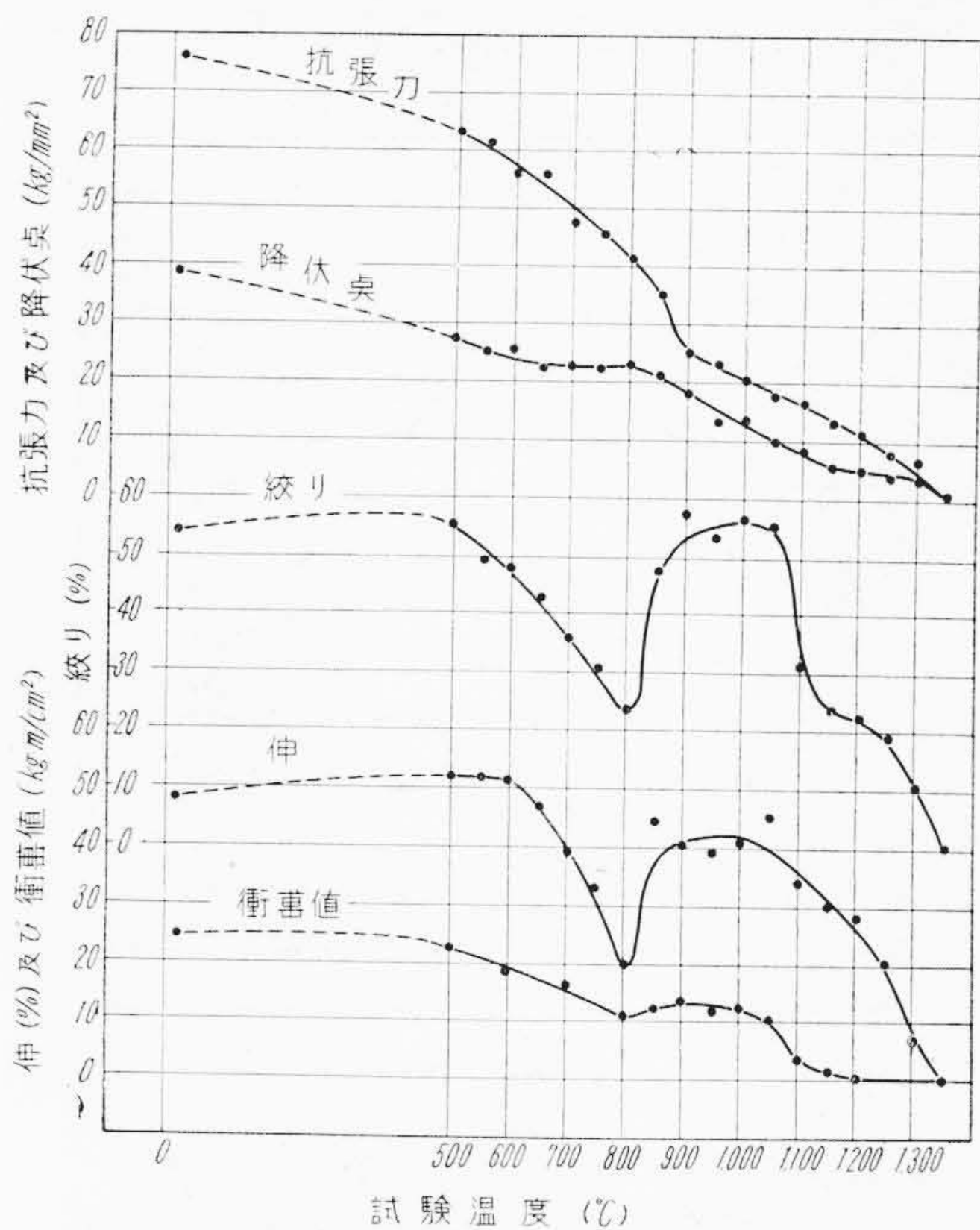
第7図は母材の引張及び衝撃試験結果を示す。即ち600～800°Cに於ては析出脆性が著しいので伸び、絞り及び衝撃値は低下するが降伏点の低下は少い。しかし800°Cを超えると析出物の凝集により、急激に靱性を回復するが、1,100°C 附近より結晶粒の成長に基因して再び脆化する。このことはTimkenの熔接或は鍛造に際して注意すべき事柄である。

(B) 衝合熔接の場合

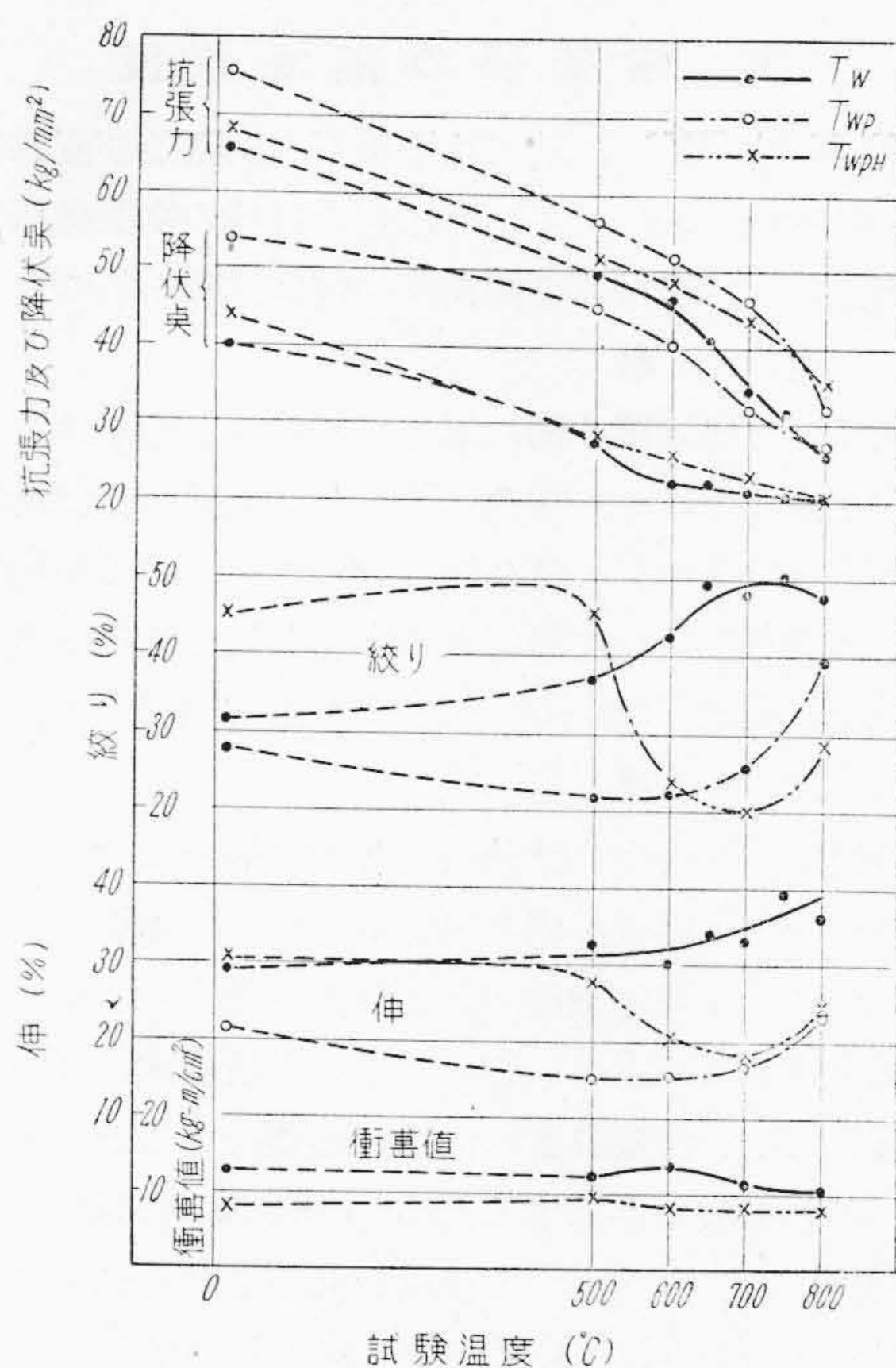
第8図は引張試験結果を示す。18-8鋼熔接棒で熔接した場合には母材の強度が大きいのですべて熔着鋼部で破断し伸び及び絞りと共に低い値を示した。次に Timken 熔接棒でピーニング熔接を行つた場合には熔着鋼の強度が母材に近づくので、破断の大部分は熔着鋼部であるが一部境界付近で起るようになり、伸び及び絞りも前者に比べて高い値を示した。

(C) 熔着鋼の場合

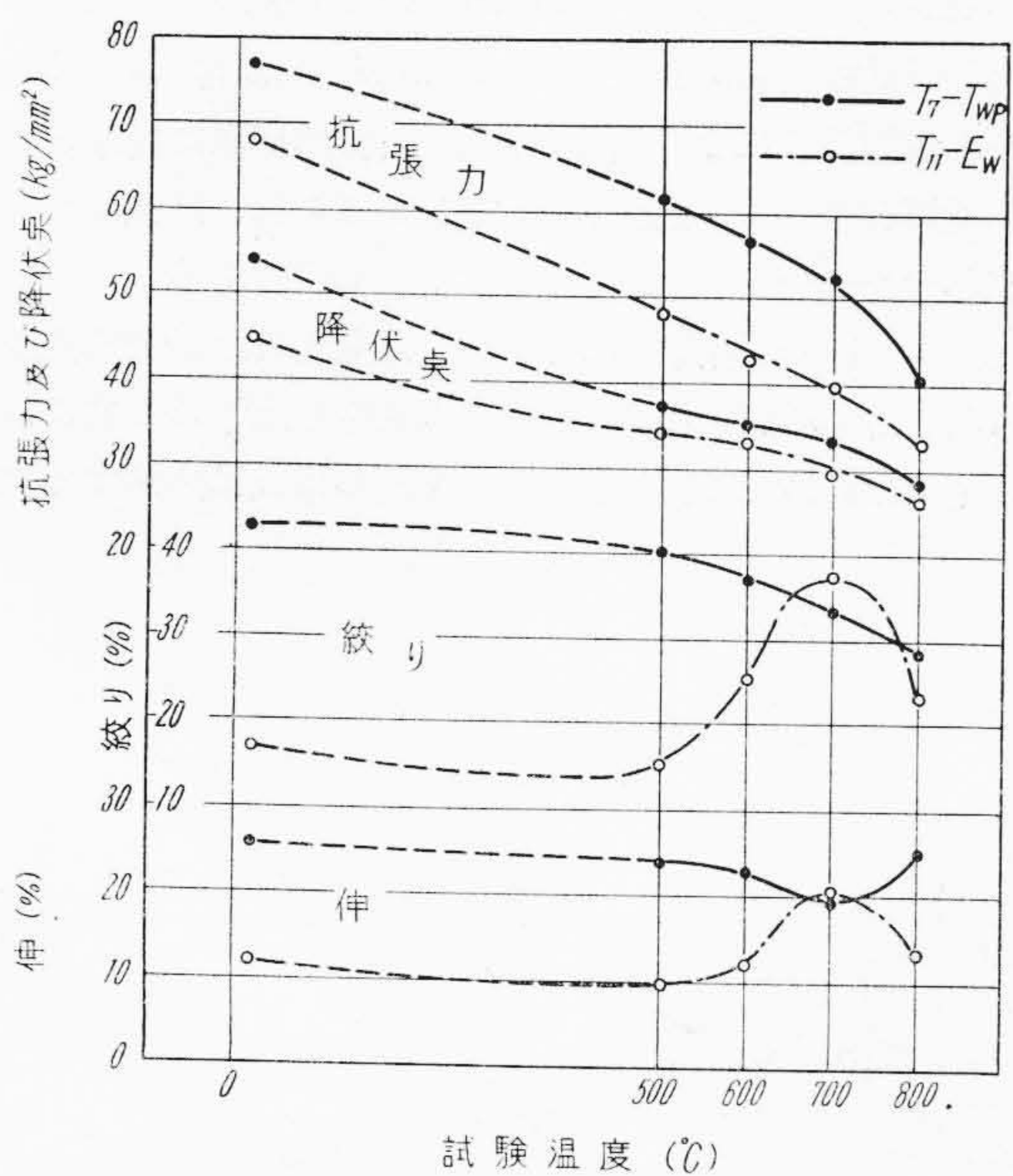
第9, 10図は熔着鋼の引張及び衝撃試験結果を示す。この結果より Timken 熔着鋼にピーニングを施すと強度は増大するが靱性が低下する。一方これを1,000°Cで処理すると拡散が進行して樹枝状晶が一部消滅し始めるので、その機械的性質の温度による変化は鍛造材に近くなるが、過析出により強度は低下する。



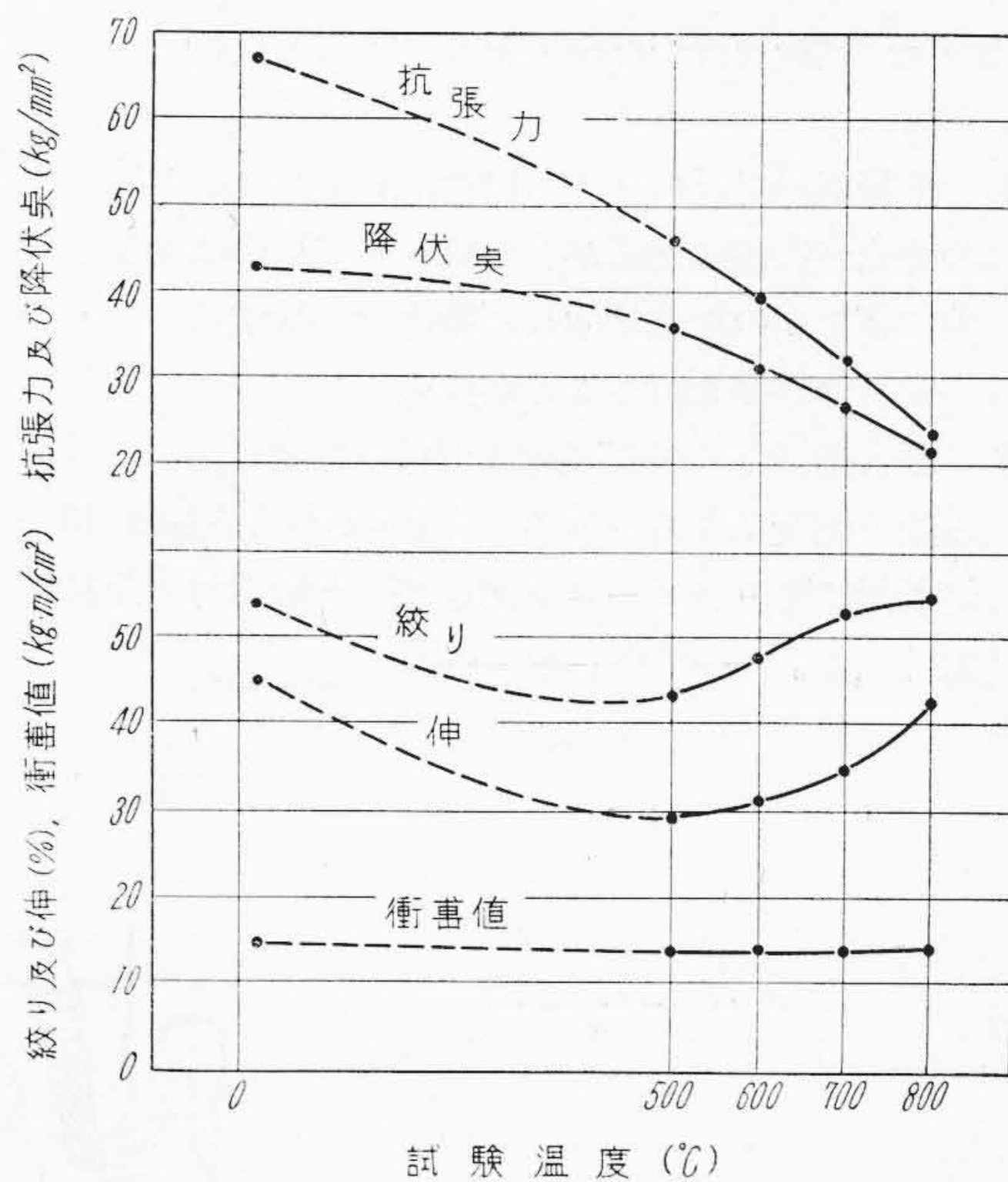
第7図 Timken 鍛造材の高温機械性
Fig. 7. Mechanical Properties of Forged Timken at High Temperatures



第9図 Timken 熔着鋼の高温機械性
Fig. 9. Mechanical Properties of Deposited Metal from Timken Welding Rod at High Temperatures



第8図 熔接部の高温機械性
Fig. 8. Mechanical Properties of Welded Part at High Temperatures



第10図 18-8 熔着鋼の高温機械性
Fig. 10. Mechanical Properties of Deposited Metal from 18-8 Welding Rod at High Temperatures

〔V〕 熔接部の匍匐限度

〔III〕及び〔IV〕に於ては熔接部の引張及び衝撃試験の結果に就いて述べたが、更に耐熱材料の高温機械性を知る方法として母材及び熔着鋼の匍匐試験を行つた。

（1）実 験

試験片の寸法は第6図に示されており、熔着鋼試験片の製作方法は〔IV〕の場合に準じた。試験方法は所謂短期試験方法を採用し、負荷後3~6hrに於ける平均匍匐速度が0.005%/hrに対応する応力を以て匍匐限度とした。試験温度は500, 600及び700°Cとした。

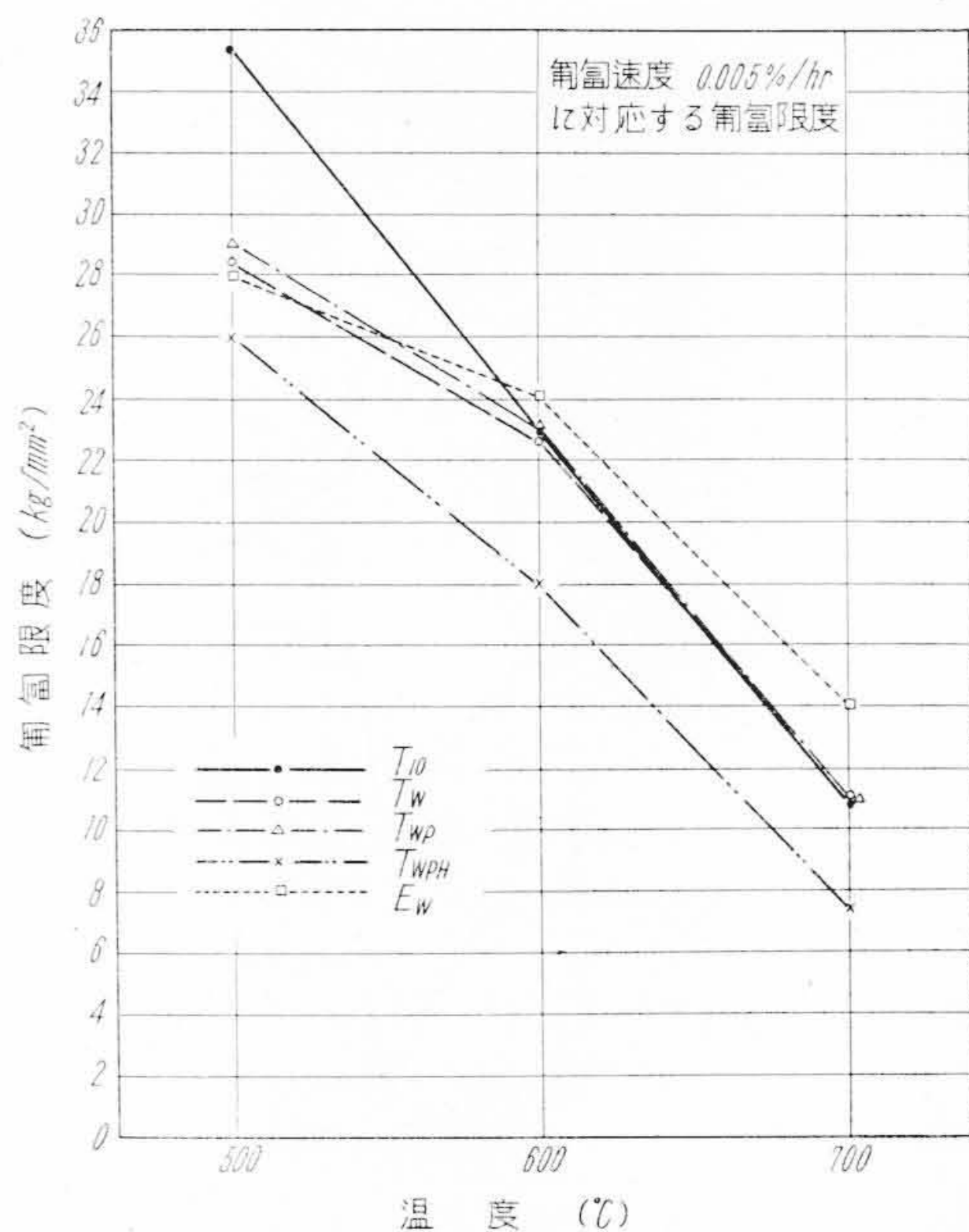
（2）結 果

第11図は匍匐限度と試験温度との関係を示す。この結果よりその化学組成が同じ場合鍛造材と熔着鋼とは比較的高い温度では匍匐限度があまり変わらないが、低い温度では鍛造材の方が遙かに強いこと、又熔着鋼にピーニングを施しても、匍匐限度には殆ど影響ないことがわかつた。しかし拡散を促進するため1,000°Cで処理したものは過析出によりかえつて強度を低下させる結果になつた。又18-8熔着鋼はC量が少し高く且Nb及びMoを含有しているため抗張力は低いにも拘らず相当高い匍匐限度を示している。

〔VI〕 結 言

耐熱鋼 Timken's 16-25-6 の主として熔接部に就いて各種の機械試験を行つた結果を要約すると次の如くである。

1. 熔接境界附近に於ける母材はC量が高いと熔接部の脆化が問題になるが、母材としてCが標準量で靱性に富むものを選定すれば脆化を心配することもなく安全な熔接を行うことが出来る。
2. 衝合熔接部の引張強度は母材の強度が高いので熔着鋼の強度に左右される。Timken 熔着鋼は18-8熔着鋼に勝り、ピーニングを施すと鍛造材のそれに近くなる。



第11図 匍匐限度と温度との関係

Fig. 11. Relation between Creep Limit and Temperature

3. 短期匍匐では熔着鋼の匍匐限度は鍛造材に比べて、比較的高温度に於てはこれに近似し、低温度では低い。

以上のように耐熱鋼 Timken's 16-25-6 はその組成が適当で靱性に富んでおれば、Timken 或は含 Nb, Mo 18-8 鋼熔接棒により熔接された場合、熔接部に於ける機械的性質が極めて優秀であることが知られ、熔接ガスタービンローターの可能なことを示すものである。

終りに臨み終始御指導を賜わつた兼先日立研究所長並びに村上武次郎博士に対し厚く御礼申し上げますと共に、実験に従事された永山幸、小川卓三の両氏に感謝する次第である。

