cm² に較べると 47.2～60.4 %の増加に当る．

撓みも細目錦1号砂の一重インベストメントの 0.90 mm に対し，二重インベストメントの時は 0.97～1.22 mm と 7.8～35.5 %の増加を示している．しかし白珪砂の 1.12 mm に較べると，肌砂の粒度によつて多少の増減が見られる．

通気度は一重インベストメントの4%樹脂量の263に対して肌砂粒度不篩，150 および 200 メッシュを用いた二重インベストメントの場合は，それぞれ 246，249 および 261 と大差なく，僅かに 6.5～0.7 %の減少となつているが，ただ 270 メッシュ肌砂のときだけは 170 と 35.4 %の低減を示す．しかし白珪砂4%樹脂量の一重インベストメントの98に比較すると 73.5～166.3 %の増加で，約2.5倍に当る．

（4） 原型金型面の粗さ1μ程度の布鑢仕上面のものを使用すると，肌砂に不篩，150，200 および 270 メッシュ粒度の珪砂を用いても，鋳鉄の砂肌には大差なく，20 *S* とすることができる．原型面が充分滑らかに仕上げてさえあれば，肌砂には 200 メッシュをピークとする不篩珪砂を用いても充分満足すべき鋳肌を得ることができる．

最後に本研究の発表にあたり，協力された本学助手金田重昭君に対して深謝する．（昭和 31. 1.15.）

文 献

1) 三島： 鋳物 **26** (1954)，12，671.
2) 久恒： 精密鋳造研究会研究報告一1，（1951～1953)，199.
3) R.K. Jackson： Foundry Trade J.，**97** (1954)，1994，599.
4) 加藤： 昭和 30 年鋳物協会秋期講演大会講演概要，第1表，61.

UDC 621.74: 539.58

鋳 包 み の 研 究（第8報）†

―鋳鉄～鋼系の接着現象について―

村 木 庸 益*

Study on Bimetal Castings (Rept. 8)

Tsunemitsu MURAKI

Synopsis： This study is carried out in order to ascertain the conclusions, which were taken from the experiments heretofore carried out by contacting solid steel and molten cast iron.

The joining condition of solid steel and solid cast iron when they are contacted and heated in the inert gas atmosphere, is investigated.

If the model made of the assumptions that founded on the intermetallic diffusion at the contacting surface, is applied to the experimental results, the relation between a logarithm of joining commencement time and a reciplocal of holding time can be expressed as a linear curve.

Therefore, the ascertation of the author, which insists that it is not always necessary to be occured the partial melting but the interdiffusion is taken place at some extent when two metals in solid state are joined together, is backed up somehow.

However, it is still very skeptical to say that diffusion and joining are perfectly the same phenomenon.

It is appropriate to say that diffusion is always accompanied with the joining phenomena.

1. まえがき

固体の鋼と熔融した鋳鉄とを接触させた場合に起る接着現象については，すでに第4報および第5報において報告した．その結論として，固体鋼の表面が鋳鉄側からの滲炭によつて融解点の低下を起こして，局部融解することによつて接着すると云う旧来の俗説は，僅かに現象の極く一部しか説明しておらず，一般的には鋼表面の融

† 昭和 30 年5月本協会春季講演大会において発表
* 早稲田大学鋳物研究所

解は不必要で，鋳鉄，鋼双方の各成分元素の相互拡散が起るような状態でありさえすれば接着し得るものであることを述べた[1),2)]．蓋し熔融鋳鉄を同じ組成の固体鋳鉄と接触させた方が固体鋼と接触した場合に比して，遙かに容易に接着が起るべき筈であるのに，事実は全く反対で，高熔融点で成分元素の濃度勾配の大きい鋳鉄と鋼の組合せの方が接着し易いと云う結果を得たからである．

本報では，それを裏付けする意味で，固体鋼と固体鋳鉄，固体鋳鉄同志の組合せで，それぞれAガス雰囲気中で酸化を防ぎながら加熱し，接着状態を比較した場合の結果について報告する．

その前に，先ず「拡散接着」の意味を明確にしておく必要を認めるので，次に簡単にこれを説明する．

一般に金属同志の接着現象については，熔接，鑞付け，圧接，粉末冶金等種々の現象がある．前二者は接触部に融体を介在させ，後二者は固体状態を保つたままで圧力および熱を加えることによつて接着させるものであるが，筆者の見解によれば，鋳包み現象は寧ろ後二者に近い性質を持つものと云うのが妥当なようである．

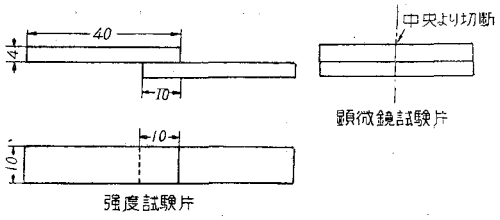
一般に圧接，粉末冶金の接着機構において，低温では変形を与える圧力，高温では拡散がそれぞれ接着を支配する重要な因子であると云われている[3)]．圧力を加えることによつて，表面の酸化皮膜を破壊し，接触点と接触面積とを増加させて，双方の金属原子が相互作用を持つことのできる距離まで接近させる作用が圧接であるとすれば[4),5),6)]その機械的エネルギーが熱エネルギーで置き換えられ，加熱によつて双方の構成原子の熱運動が増大すると共に，界面の障害物を越えて位置交換が行われ接着力の起るのが粉末冶金や鋳包みにおける接着現象であると考えられる[7),8)]．従つて前者においては圧力が，後者においては相互拡散が，それぞれ重要な因子となるのである．

2. 実験法

実験法の要旨は，既に第7報「銅～真鍮系の接着現象について」という報告で述べたものと同様で[9)]，固体の鋼片と鋳鉄片を無酸化雰囲気で加熱し，その接着状況を調査するものであるが，試料の組成は第1表に示す如きものであり，鋳鉄は東京鋳造株式会社に依頼して作製した鋳鉄板，鋼は圧延鋼板よりそれぞれ第1図の如き寸法の試片を作製した．各試験片の表面は，エメリー紙0番まで研磨し，後エーテルで洗滌乾燥したものを重ね合せ，鈍鉄線で軽くしばつた後，ボートに載せて加熱炉内に挿入するようにした．加熱炉の形状並びにAガスの純度は何れも第7報に述べたものと全く同一であるが，今回はAガスの減圧弁の直後に流量計を付け，Aガスの流量を毎分 70 cc～100 cc に調節した．加熱温度は，950°C，1000°C，1050°C，1100°C，1150°C とし，鋳鉄の熔融点以下で，しかも相当活潑に相互拡散が行われ得るような温度を撰んだ．

第1表

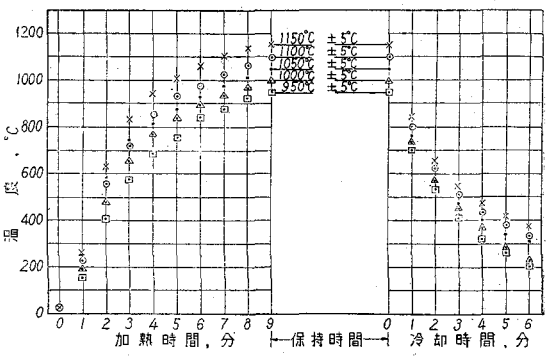
	C	Si	Mn	P	S
鋳　鉄	3.10	2.83	0.44	0.092	0.120
鋼	0.32	0.06	0.54	0.012	0.029



第1図 試料寸法

なお，加熱冷却の際の影響をなるべく少なくするため所要温度以上に過熱した電気炉を試料挿入位置に移動して急速に加熱し，保持時間が終了したら直ちに電気炉を移動し去つて，常温まで急冷するようにした．第2図は各所要温度までの加熱冷却の空実験の結果である．

Aガス雰囲気中で加熱した際の鋼片，鋳鉄片それぞれの試片の表面状態の変化は，肉眼的には金属光沢を残しているが，研磨した面とは異なり，梨地の如く変つている．非常に僅かな酸化物は発生しているかも知れないが，天秤では読みとれぬほどで，寧ろ内部酸化物の還元によると思われる重量減少さえ認められるほどである．従つて各試験片は高温に加熱されても，常温研磨時と略ぼ同じ表面状態を保つているものと仮定することにした．

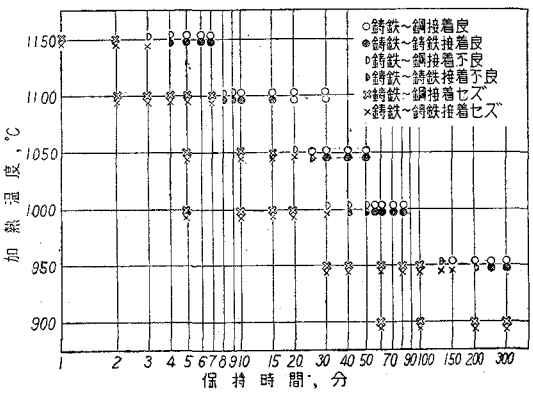


第2図 加熱冷却曲線

接着開始点の判定については，第1図引張試験片による接着強度の測定と顕微鏡観察によつたのであるが，接着面積が接触面全体にわたつている場合と，処々斑点状に接着した場合とでは，その強度に著しい差が現われる．一例を挙げれば，30～40 kg 位の荷重で剝れてしまう場合，700～800 kg の荷重で鋳鉄側から切れてしまうほどよく接着している場合等で，その値には非常にバラツキが多い．しかし，点状に接着して強度の弱いものでも，接着が起り始めているという意味から云えば，全く同じ事であり，ただ接着面積が大きいか，小さいかと云う差があるだけで，果してどの位の接着強度を示せば，接着が開始したと判定してよいかは，非常に微妙な決めにくい問題である．従つて本実験においては，実用的な意味を含めて 100 kg 以上の荷重で剝離したものを「接着した」として扱い，不充分な点は顕微鏡観察でこれを補足したのである．なお開始点の決定は，最初 30 分置きに加熱したものについて上記の試験を行い，先ず接着開始，未了の二つを決定した上で，さらにその中間の時間を縮めていくと云う方法を採つた．しかしこれは当然時間的な遅れを伴つているわけで，その前後に数分間の幅を持つたものであることは云うまでもない．

3. 実験結果

各保持温度において，前記の如き条件に適合する接着開始点決定の推移は，第3図に示す如くである．×印は全然接着しないもの，半円は見掛け接着強度 100 kg 未満のもの，この範囲に入るものは，主として 20～40 kg 程度で 100 kg に近い 70 kg とか 80 kg とかの強度を示すものは殆んど無い．かくして約5分の範囲で接着開始点が決定したら，全く同一条件で顕微鏡試料を作り，鋼



第 3 図　接着開始点と保持温度の関係

第 2 表　保持温度と接着開始点

組合せ ＼ 保持温度 °C	950	1000	1050	1100	1150
鋳鉄～鋼	150分	60分	25分	10分	5分
鋳鉄～鋳鉄	250分	90分	30分	10分	5分

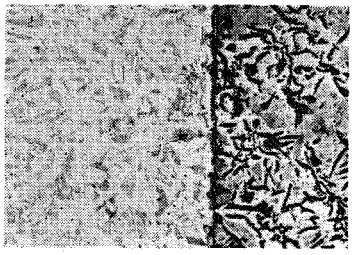
側滲炭深さおよび鋳鉄側脱炭深さ等を測定した．

結果を要約すると第2表の如くで，保持温度が鋳鉄の融点附近で比較的高い場合は，鋳鉄同志の組合せと鋳鉄～鋼の組合せの差はあまりなく，何れも5分，10分程度で接着しているが，温度が段々低くなつて来ると，明らかに両者の差が現われ，両者の間に濃度勾配のある鋳鉄～鋼の組合せの方が，接着しやすくなることを示している．即ちこの実験結果によつて，鋳鉄と鋼とは固体状態のままでも或る程度以上加熱することによつて接着し，しかもその場合，同種のものよりも濃度勾配のある組合せの方がより容易に接着し得ることが明らかになつたのである．これらの現象は筆者が〃鋳鉄～鋼系の鋳包み〃において予てから主張していた〃拡散接着〃即ち熔融鋳鉄と固体鋼が接触した場合，鋳鉄側からの滲炭によつて固体鋼の表面が融解しなければ接着しないと云う説は誤りである．表面[1]はたとえ固体のままであつても，両者の間に相互拡散が行われるような状態になれば接着し得るものだと云う考の正しいことを裏付けるものであろう．

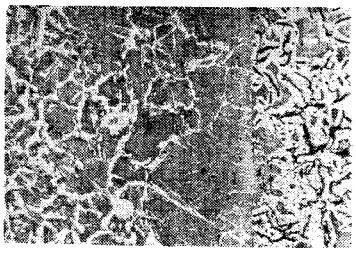
接着開始点における顕微鏡組織の状態は，写真Ⅰ～Ⅸに示す如くで，何れも或る程度の滲炭，脱炭が行われていることを示している，鋳鉄相互の組合せの場合も，グラファイトが境界部にまたがつて成長し，地の部分のみでなく炭素も接着に何らかの作用を及ぼしているように見えるが，この現象については未だ何の説明をも与えることはできない．加熱時間がさらに延びて，引張試験の際鋳鉄側で破断するようないわゆる「良く接着した」場合の顕微鏡組織は，写真Ⅹに示す如くで，接着開始点のものより一層滲炭脱炭の層が明らかであり，且つ相互に跨つた結晶粒の成長が認められる．下部の写真は，境界部のみを拡大したもので，菱形の斑点は微小硬度計の圧痕である．

4. 金属接着機構に関する模型

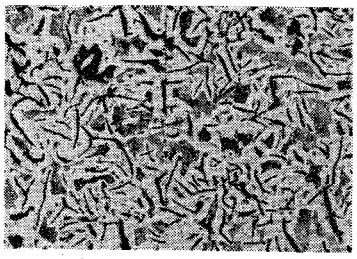
金属同志が接着する場合，その相互が熔体であろうと固体であろうと，何れの場合でも両者の表面原子が相互に力を及ぼし合う距離まで接触すれば，自ら接着が成立すると云う事が一般的な結論であろうが，実際の鋳包み



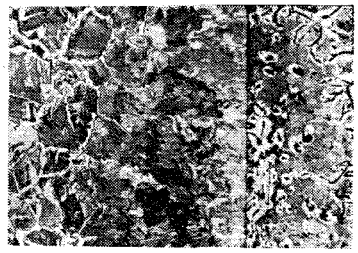
鋼　鋳鉄
1150°C　2分　接着不良
写真—Ⅰ　×100



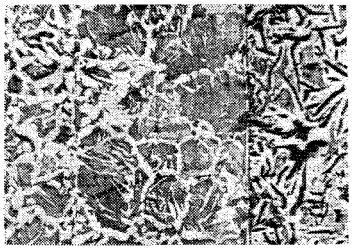
鋼　鋳鉄
1050°C　25分
写真—Ⅳ　×100



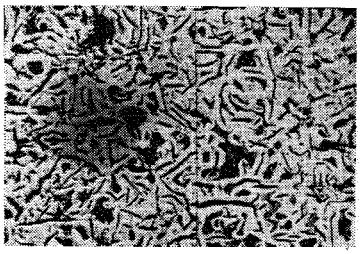
鋳鉄　鋳鉄
1100°C　10分
写真—Ⅶ　×100



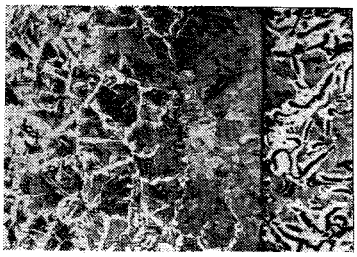
鋼　鋳鉄
1150°C　5分
写真—Ⅱ　×100



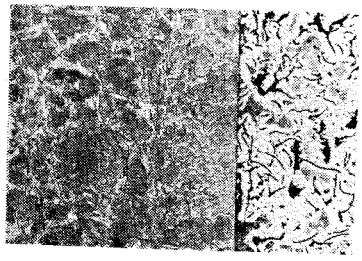
鋼　鋳鉄
1000°C　60分
写真—Ⅴ　×100



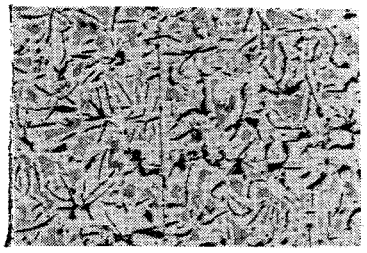
鋳鉄　鋳鉄
1000°C　100分
写真—Ⅷ　×100



鋼　鋳鉄
1100°C　10分
写真—Ⅲ　×100



鋼　鋳鉄
950°C　150分
写真—Ⅵ　×100

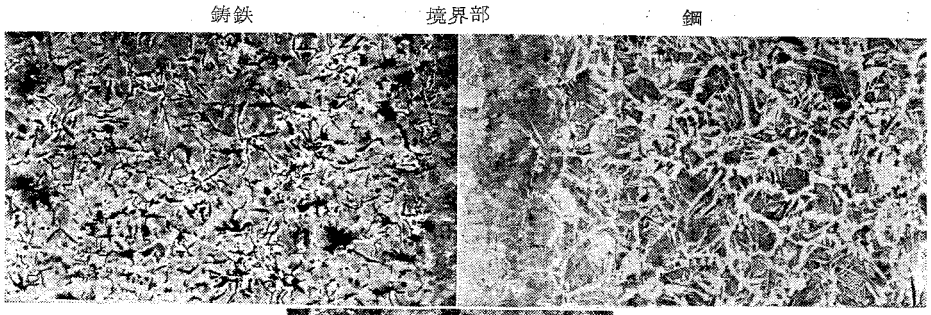


鋳鉄　鋳鉄
950°C　200分
写真—Ⅸ　×100

作業の如く，大気中高温で操業される場合は，完全な金属状態で両者が接触することは，絶対にあり得ないことで，必ず表面は酸化皮膜に覆われていると云つても宜い．従つてその酸化皮膜を通して接着するためには，何らかの形でその皮膜が消滅してしまわなければならないわけである．その消滅の経過として，圧接の場合は機械的エネルギーによる酸化皮膜の破壊，鋳包み，拡散接着等の場合は，熱，相互拡散等による還元が考えられる．従つてこの一連の報告において行つて来た鋳包み過程における金属相互の接着には，どうしても前述の如き相互拡散が或る程度行われなければならないのだと云う考えを基にして，次の如き模型を考えて見ることができる．

第4図Aの如く，固体鋳鉄と固体鋼との接触面は，研磨時に表面に生じた条痕によつて点接触をしていると考えられる．それが高温に保持している間に，凹凸がつぶれて接触部が点から面に変化し，接着してしまうわけであるが，この点接触から面接触に移行する経過を一つの突起について，更に細かく考えて見ると，第4図Bの如くなる．

即ち双方，断面が三角形の突起の頂点において接触している場合，高温になつて構成原子の位置交換が活潑に行われるようになると，双方の表面に既に在つた酸化皮膜内をも拡散して，炭素原子や鉄原子が外層へ出て来ることになり，これら表面の金属原子は自由表面の原子の

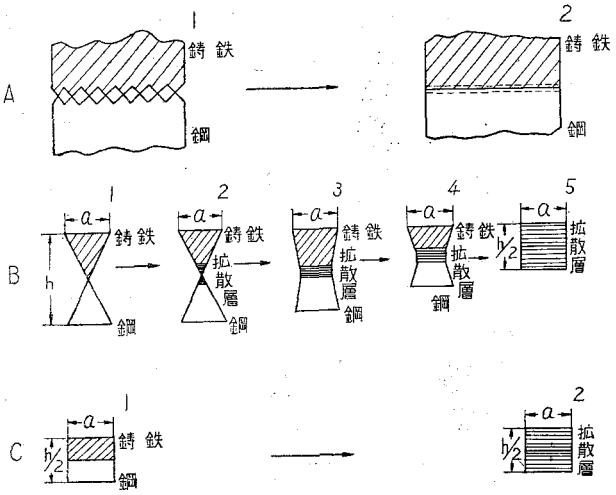


×100

写真—X　1150°C　7分

×400

如く，相当活性化された状態であるとすると，或る確率を持つて鋼側の突起の鉄原子と鋳鉄表面の炭素原子とが位置交換を行つたり，或いは単に鋼内部に炭素原子が進入していくことも可能になる筈である．次の瞬間には鋼側，鋳鉄側の非常に薄い層において両者の組成が等しくなつた部が生じ，その部分が同じように変形して B-2, 3 の如くになるとし，更にこの変化が連続的に起つて B-5 の如き状態まで変形すると，接着は一応完了したものと考えるのである．実際の接着進行過程において，果してこのように規則正しく変形するかどうかは，甚だ疑問であるが，前掲の写真にも見られるとおり，結果の顕微鏡組織は，層状の滲炭脱炭層が相当明瞭に現われていることから，実際とさほどかけ離れたものではあるまいと想われるのである．而して B-1～5 の経過を一応是認するとすれば，その間に相互の間で交換された原子数は，C-1～2 間の拡散において移動した原子数と同じと考えても宜い筈である．



第 4 図 接 着 の 模 型

従つてこの C-1～2 の場合，或る一方の原子のみについてその移動量 dm を仮定し，これに Fick の第1式を当て嵌めると，次式の如くなる．

$$dm=-D\,dc/dx\,qt \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

dm……拡散接着に必要な原子移動量

t……拡散接着所要時間

q……接触面積

D……dm に相当する原子の拡散恒数

dc/dx……dm に相当する原子の濃度勾配

上式右辺の（−）符号は dc/dx が一般に（−）で現わされるため，dm を（+）にするために附したものであるから，初めから dc/dx を（+）にとるようにすれば不要となる．即ち

$$dm=D\,dc/dx\,qt$$

この場合 dc/dx, dm, q は一定であるから，次の如く書き変えられる，

$$dm=KDt \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

次に D の温度変化の式は

$$D=D_0e^{-\frac{E}{RT}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

これ等の（2），（3）式を対数に直して組合せると

$$ln\,dm=ln\,K+ln\,D_0-\frac{E}{RT}+lnt \cdots (4)$$

$$ln\,t=(ln\,dm-ln\,K-ln\,D_0)+\frac{E}{RT} \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

となる．（5）式の（　）内は一定と考え得るから

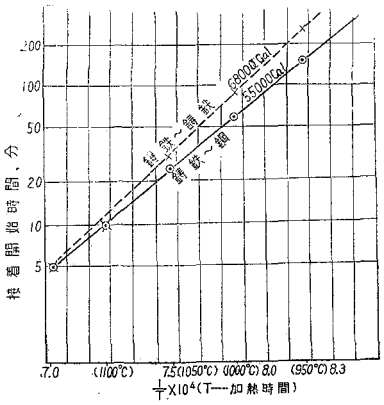
$$ln\,t = ln\,K + \frac{E}{RT} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

$$\log t = \log K + \frac{E}{RT} \times 0.4343 \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

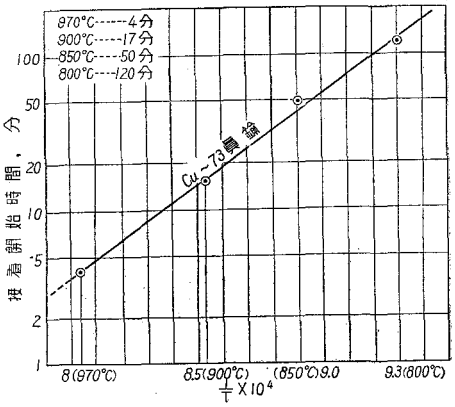
（7）式から，接着開始時間 t の対数と保持温度の逆数は直線関係を持つことになるわけである．

5. 実験結果と模型との関係

前掲第2表の保持温度と接着開始点との関係について時間の対数と保持温度（絶対温度）の逆数に直して第5図を描くと，模型の解釈の如く，見事な直線関係にある．しかも，明らかに鋳鉄同志の組合せよりも鋳鉄～鋼の組合せの方が容易に接着することを示している．直線の傾斜から，接着の活性化エネルギー（この場合は主として炭素拡散の活性化エネルギーに相当するものであろう）を計算すると，鋳鉄～鋼の組合せの場合が 55,000 cal，鋳鉄同志の場合が 68,000 cal 程度となり，これを普通軟鋼中の滲炭現象において測定されている活性化エネルギー 36,600 cal[10] に比べると，大分大きいが，活性化エネルギー本来の在り方から云うと，そんなにかけ離れたものではなく，相当よく一致していると見ることができる．また考え方を変えて，接触面に新らしい結晶が成長して接着が完成するとして，Van Liempt の理論的考察による再結晶の活性化エネルギーの第一近似式 $32\,Ts$（Ts……金属の融点の絶対温度）[11] に鉄の融点 $1803°T$ を仮に入れて計算して見ると，略ぼ 58,000 cal 位になり，この方が前記の実験結果による値に似ている．しかし後者は元来大略の近似に過ぎないものであるから，接着の場合の活性化エネルギーが，拡散の活性化エネルギーよりも再結晶のものによく一致すると云うことは，そう簡単に断定すべきことではなく，元来の仮定に鑑みて寧ろ拡散の影響をこそ，より大きく受けると考うべきが至当であろう．値の一致しない点は，接着機構が炭素の拡散のみに因るような単純なものではなく，種々複雑な要素の錯綜した結果と解釈することにより了解し得られる．次に比較のため，第8報における純銅と 7—3 真鍮についての保持温度と接着開始時間との関係を図示すると[4] 第6図の如く略ぼ直線になり，鋳鉄～鋼，鋳鉄同志の場合のみでなく，銅合金においても全く同じような機構で接着することを確かめられることがわかつた．

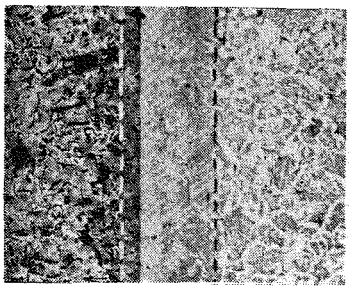


第 5 図　接着開始時間と保持温度との関係



第 6 図　保持温度と接着開始時間との関係

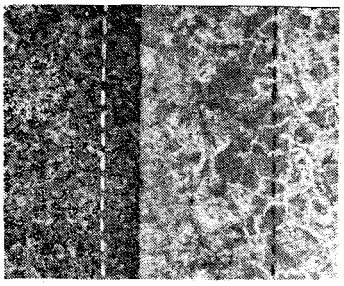
かように鋳鉄～鋼系の接着において相互の成分元素の拡散（特に炭素）が大きな影響を持つとすれば，前記（1），（2）式から保持時間の増加によつて滲炭層，脱炭層がそれぞれ直線的に増加するであろうことは，容易に推測し得るところである．その1例として 1150°C 加熱の場合の例を挙げると，写真 XI～XIII の如くで，すでに第7図に示したような直線となる．しかし，この直線が時間0の点に集まらないのは，重ね合せた板が始めはよく密着せず，間に隙間があるためで，両者の拡散が始まるまでに表面が接触するための，云わば塑性流動の時間とも考えられる．また，実際に接着が起る時間5分と間の差3分は，云わば実験法の不備による時間の幅或いはその他の誤差によるものと考えられる．前記の滲炭，脱炭深さの測定に関聯して，同じ試料を使つて接着部の微少硬度を測定すると，第8図に示す如くである．この図で鋳鉄，鋼両者に跨つて硬度の高い部分はいわゆる「滲炭脱炭層」に相当し，引張試験の際には鋳鉄側の脱炭層と鋳鉄層との境界で破断が起り，接着部で剥離することは殆んど無いようである．



鋳鉄　脱炭層　滲炭層　鋼

1150°C　7分

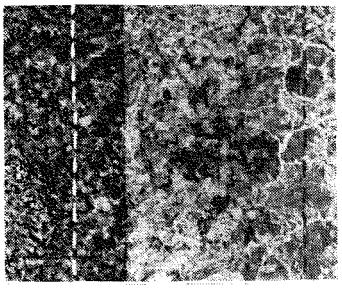
写真—XI　×50



鋳鉄　脱炭層　滲炭層　鋼

1150°C　10分

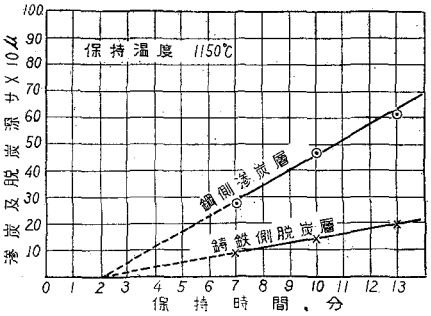
写真—XII　×50



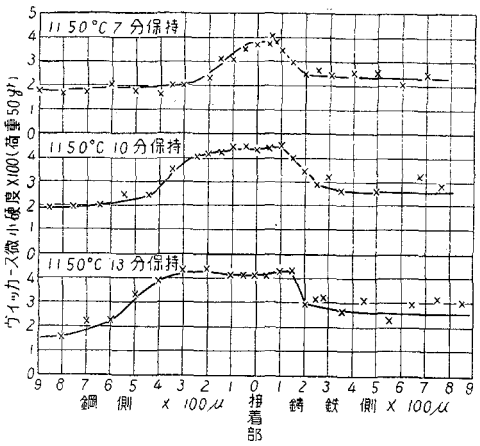
鋳鉄　脱炭層　滲炭層　鋼

1150°C　13分

写真—XIII　×50



第 7 図　接着境界層の成長と保持時間との関係



第 8 図　接着部の硬度変化

6. 総　括

この実験の目的は前にも述べた如く，熔融鋳鉄と常温の固体鋼とを接触させた時に起る接着現象，いわゆる実際の鋳包み作業を中心として実験を行つている内に出て来た結論を，より端的に表現しようとして行つたものである．一応の結論としては，鋼，鋳鉄等の場合も，前報の銅合金の場合におけると同じく，固体状態でも或る温度，或る時間以上不活性の雰囲気で加熱してやれば接着を起し，その強度，金属組織等も鋳包みの場合と殆んど同じであることが確かめられたわけである．また，次の問題である接着時における相互拡散の寄与については，拡散を土台にして考えた接着時の理論的模型は，実験結果と相当よく一致しているが，元来金属相互の接着と云うのは，接着さるべき二つの金属表面の原子が，或る距離即ち原子間の引力と斥力との平衡点において相接すれば，そこで接着が成立することになる筈であり，表向き拡散と関係があるわけではない．従つて拡散即ち接着と断定することは避くべきであるが，この模型は活性化された金属表面の場合ではなく，どんなに磨いても次の瞬間には必ず薄い酸化皮膜に覆われてしまう．云わば自然状態の金属表面が熱によつて接着する場合のもので，この場合には相互拡散が影響を持つのである．しかしどれだけの深さ，お互の成分原子が拡散しなければ接着しないと云うわけではなく，拡散の可能性が生じた瞬間が接着の始まりと解すべきで，拡散層が広いから充分接着していると云うわけではなく，顕微鏡観察による拡散層は，云わば接着に附随する二次的現象と考えるべきであろう．

（昭和 31.2.10.）

参　考　文　献

1) 村木： 鋳物 **25** (1953), 3, 123.
2) 村木： 鋳物 **25** (1953), 5, 246.
3) M.A. Miller, G.W. Oyler： Welding J. **30** (1951), 9.
4) R.T. Tylecote： British Welding J. **3** (1954), 1, 117.
5) R.T. Tylecote： Metal Industry **81** (1952),

43.
6) G.M. Kline and F.W. Reinhart : Mech. Eng., **72** (1950) 9, 717.
7) G.C. Kucynski : A.I.M.E. **185** (1949), 169.
8) I. Ming Feng. : J. Appl. Phys. **23** (1952), 1011.
9) 村木 : 鋳物 **27** (1955), 9, 616.
10) R.M. Barrer : The Proceedings of the Physical Soc. **52** (1940), 289, 56.
11) W. Seith, 橋口隆吉訳 : 「金属に於ける拡散」 p. 138.

附 記

質 問

① 100 kg 以上の荷重……を接着したと定義しているが，(P. 567, 左段 14 行目以下) それ以下のごく僅かの力でも接着は開始されているのではないでしょうか.

② これに関聯した質問ですが，鋳鉄～鋼の組合せの方が接着しやすいとは，(p. 567 右段第2表より下へ7行目以下) この場合の方が接着部の強度が高いと云う事で，接着しやすいか否かの判定にはなり難いと思います．特に鋳鉄～鋳鉄の場合，その接着部に黒鉛が存在するため，強度は弱くなるが，接着は容易に行われているというような事はないでしょうか.

③ また接着強度に見掛け (P. 567 左段 3. 実験結果の項の3行目) とありますが，これは何を意味するのですか. (編集委員会)

回 答

1, 2, 3 項の質問は，何れも共通した要素から成つておりますから，まとめて御答えします.

どの位の強度を以て接着したと判定したら良いかどうかは，筆者も非常に迷つた点でして，実際には御質問の通りかとも思いますが，100 kg 以下の接着強度の場合は手で持つただけで剝離したり，また一方では 20～30 kg 程度の引張強度を示すものもあり，事実の再現性がないので，所謂「接着開始点」の決定が不可能でありました．そこで，止むを得ず比較的再現性のある 100 kg 程度を境界点としたわけです，

又鋳鉄～鋳鉄同志の場合は，接着力が弱いために接着しにくいと誤解したのではないかとの御質問ですが，これは唯一点のみをとつて比較したのではなく，第3図を見て頂いてもわかる通り，鋳鉄と鋼との場合は一寸接着していても，鋳鉄同志の場合は全然くつついていないと云うような経過を段々追求して判断を下したことで，強度のみで簡単に決定しているわけではありません．又鋳鉄同志の接着強度が銅との場合に比べて弱いと云うことはこの実験法でははつきりした数字となつて出て来ません．即ち，鋳鉄～鋼でも 100 kg 以上の，いわゆるよく接着している場合は，鋳鉄部の切断によつて強度が表現されてしまうので，鋳鉄同志でも鋳鉄～鋼でも殆んど同じような値になつてしまうから，御質問のような誤解はあまり無い筈だと考えられます.

かように，強度で接着の程度を云々することは非常に危険なことですから，本文でも接着点決定の目安に使つたに過ぎず，「見掛け強度」と云う言葉であいまいに記しておきました．本当の接着強度ならば，単位接着面積当りで表現しなければならないのですが，唯 1 cm^2 の接触面積のものを，引張つて切れた時の値をそのまま用いておいたからです. (村木庸益)