

固相接合に対する超音波の効果とその応用

富山県立大学 工学部 機械システム工学科

助教授 松岡信一

(平成2年度研究開発助成 AF - 90004)

1. 研究の背景

多様化、機能化する技術の中で、物と物を接合する技術は、汎用機器、精密機器、半導体関係などのあらゆる分野において欠くことの出来ない基礎技術となっている。なかでも近年、アモルファス合金をはじめとする機能材料、あるいはセラミックス材料等においては、そのものどうし又は異種材料との組み合わせにより、接合体（複合体）として利用するニーズが増し、またその応用分野もますます拡大される傾向にある。

この情勢の中で、種々の材料における超音波接合技術は、常識を越えた接合能力として注目され、常温で容易、迅速、さらにいかなる環境、あるいは材料に対しても適応できる可能性を有し、有益な技術として実用に供せることができる。^{1) 2)}

2. 研究の目的

一般に異種材料間の接合は、固相接合が適用される。この固相接合法には、摩擦接合、爆発接合、拡散接合、超音波接合ならびに有機接着材法など多くの種類があり、いずれの接合法を採用するかは、それぞれの製品、部品に要求される性能、機能を充分考慮したうえで決めなければならない。

本研究では、機能材料として重要なセラミックスと金属間の接合、および汎用性の高いFRTP材どうしの接合を取り上げ、超音波接合の有効性ならびに各接合材の諸特性等について調べる。

3. セラミックス/金属の接合

3.1 接合方法と条件

超音波接合機と接合部位の概要が図1に示す。

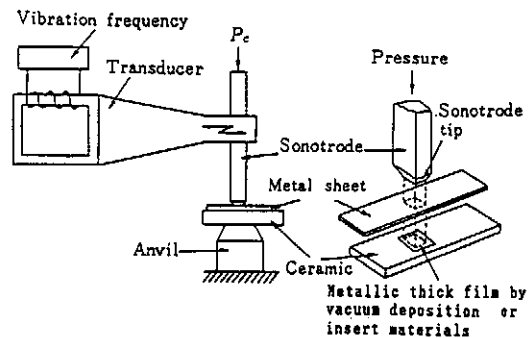


図1 超音波接合機及び接合部位の概要

接合方法は、直接セラミックスと金属材料を接合させる方法と、バインダ材を用いる方法がある。いずれの場合も接合機の出力は 1200W (20KHz)、超音波振動の振幅 a は $20 \mu\text{m}$ (P - P)、印加時間 T : 0.1~5sec、接合圧力 P_c : 5~50MPa の範囲である。

接合に用いたセラミックスは、 SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , AlN , SiC の常温焼結体で、表面粗さは平均 $1 \mu\text{m}$ 程度である。また、金属材料は、Al (A11100), Cu (C1020) の板厚 t : 0.5mm と、インサート材としての圧延銅箔 ($50 \mu\text{m}$) および In (t : 0.1mm) を用いた。接合面積は 2×2 (mm²) で、得られた接合材の特性と評価は、引張強さおよび接合部の SEM 観察など、視覚的・構造的に考察した。

3.2 最適な接合条件と接合可能領域

セラミックスと金属の組み合わせによって、それぞれに最適な接合条件が存在し、それらが巧く合致すると接合強度や特性が大幅に向上する。その一例を図2に示す。

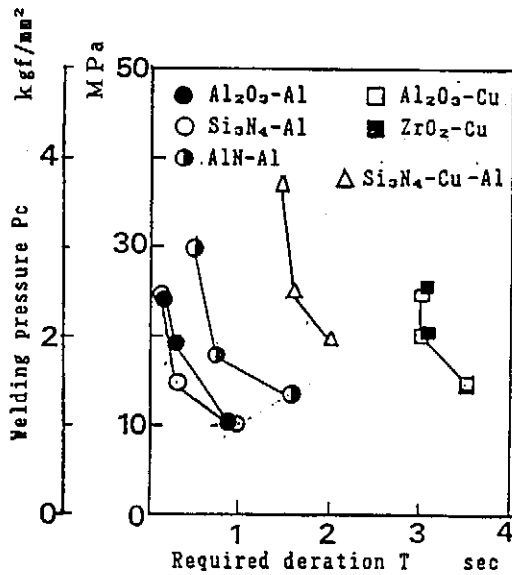


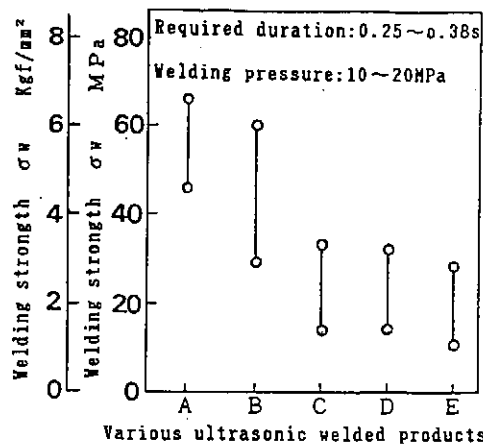
図2 材料の組み合わせと接合可能領域
(△印のCuはバインダ材として試用)

同図は振幅 $23 \mu\text{m}$ における各種条件の接合可能領域である。全体に接合圧力が增大すると印加時間が短縮され、逆に圧力が低い場合は、印加時間を幾分長く付加しなければならない。また、銅に比べアルミニウムの方が短い時間で接合できることが分かった。これらのことは、金属材料の変形能およびセラミックスの熱伝導や硬さなどに起因するところ大であると推察される。なお、接合圧力が図中のそれ以上になると超音波振動が停止する場合があるので注意を要する。⁹⁾

3.3 接合材の強度

図3は、剪断引張試験法により、各種の接合材の接合強度を調べた一例である。いずれの接合材も伸びはほとんどなく全体に接合部で破断またはせん断が生じるか、あるいは延性材の母材部で破断することが確認できた。また、図中の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 接合材のようにアルミニウムの母材の強度に近い接合強度が得られていることから、充分実用に供することができる。

このように、いずれの接合材についても、ある程度の接合強度が得られることは、単なる機械的結合のみでなく、結合反応（原子間結合など）の要素が充分含まれていると考えられる。

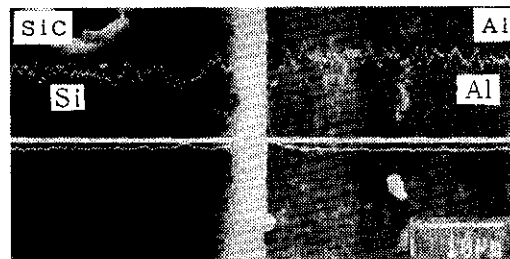


	A	B	C	D	E
Ceramics	Al_2O_3	SrO	Si_3N_4	SiC	Al_2O_3
Metal	Al(A1100)				Cu

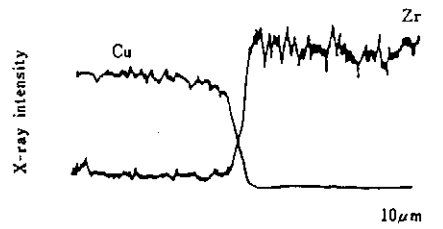
図3 各種接合材の接合（せん断）強度
(せん断速度：3mm/min)

3.4 接合界面の性状と構造

図4は、 SiC/Al (a) および ZrO_2/Cu (b) の各接合界面における、それぞれの元素分布（線分析）を調べた結果である。



(a) SiC/Al



(b) ZrO_2/Cu

図4 各種接合部の線分析

いずれの接合部においても良好な界面が認められ、その部分は1~2 μm 程度の幅で遷移層が確認され、微弱ながらも反応層あるいは拡散層が形成されているものと推察される。

これは、他の接合材についても同様で、接合界面すなわち摩擦界面では両物質の相互移着（凝着）が生じて接合するものと考えられる。また、比較的軟らかく、塑性変形しやすい材料ほど、その効果も大きく良好な接合面が得られる。

3.5 インサート材の効果

これまでの直接接合に対し、インサート材の有無について検討した。これはAl,Cu及びInなどの活性化金属をインサート材として接合する方法と、真空蒸着膜をバインダに用いる方法がある。⁹⁾

図5 (a) 及び (b) は、それぞれの接合材の接合部SEM観察の一例である。

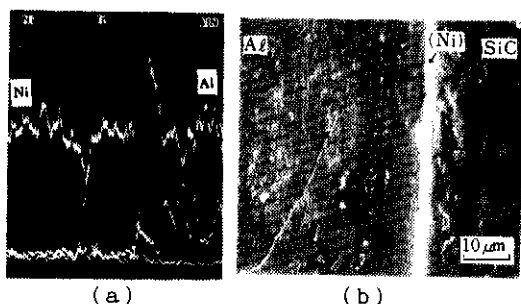


図5 各種接合材の接合部SEM写真と線分析

前者はAlNとNi薄板の間にInをインサート材に用い、超音波接合（接合圧力20MPa、印加時間0.5sec）したものである。一方、後者はSiCの表面にニッケルを真空蒸着し、その面とアルミニウム薄板を超音波接合（ P_c : 20MPa, T : 0.5sec）したものである。いずれのSEM写真からも良好な接合界面が認められ、異種材料間の超音波接合が可能になった。このように補助的な目的で用いたインサート材や蒸着膜は、バインダとして効果を発揮し、接合を促進させることが分かったが、接合強度には顕著な差はみられない。

4. ガラス繊維強化プラスチックの接合

4.1 接合方法と条件

ガラス繊維強化プラスチック（GF RTP）は、使用するマトリックス、繊維の種類、形状、および強度法などによって、その特性が大きく左右される。⁹⁾

図6は、本実験で用いた超音波接合機（出力：600W、20KHz）と、接合断手の概要を示す。

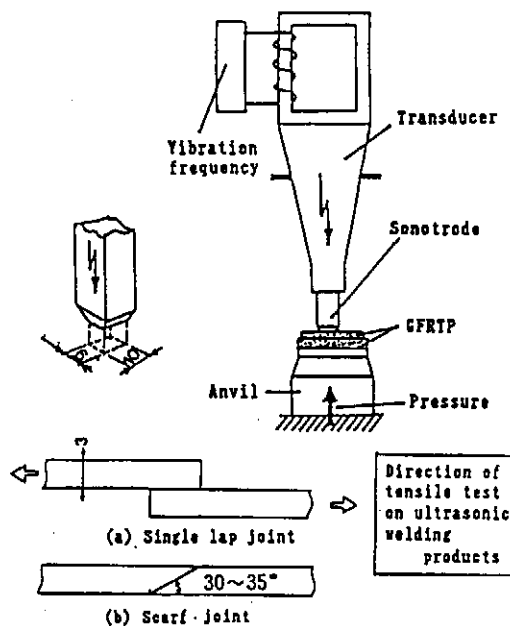


図6 超音波接合機と継手形状の概要

前節の横振動に対し本実験では縦振動を利用する。超音波振動の振幅 a ; 35~66 μm ($P-P$)、接合圧力 P_c ; 0.1~0.5MPa、印加時間 T ; 0.5~4sec、の範囲である。

接合に用いたガラス繊維強化プラスチックは、抄紙法によるラドライト（新日鐵）と含浸法によるXシート（出光NSG）の2種である。いずれもガラス繊維強化熱可塑性プラスチックで、繊維の配向状態により強化材（一方向/配向）と無配向材がある。なお、ここでは、特にことわらないかぎり、繊維含有率40wt%の強化材を用い、もっとも汎用性の高い単純重ね継手材を中心に、その効果と特性について検討した。

4.2 振動条件と接合可能領域

図7は、ラドライトの接合における超音波振動振幅、印加時間および接合圧力の関係を示す。

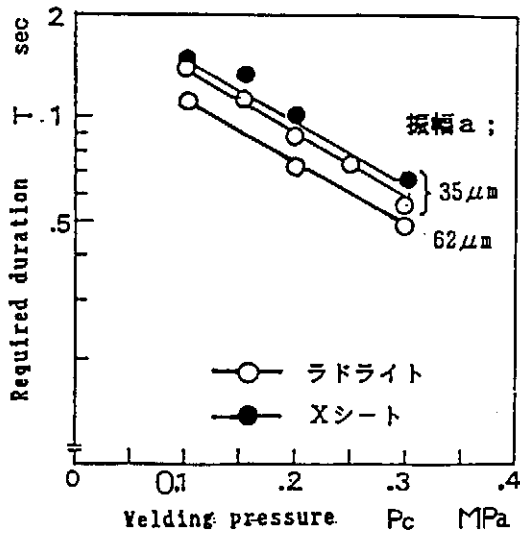


図7 超音波接合による振幅、加圧力及び印加時間の関係(無配向材、単純重ね継手)

いずれの振幅においても接合圧力が増大すると印加時間(接合時間)は短縮され、逆に圧力が低くなると印加時間は若干長くしなければ健全な接合材は得られない。

また、この傾向は振幅が大きいほどその効果も幾分大であることが分かる。ここで、接合圧力や印加時間が図中のそれ以上あるいはそれ以下になると、超音波振動が停止したり接合部性状の悪化につながるため良好な接合材は得られない。

また、同図より、同一振幅下では、ラドライトの方が幾分接合圧力や印加時間が低・短で接合が完了する。すなわち、接合性に優れた材料といえよう。

4.3 接合部の強度

図8は、せん断引張試験による各種接合材(単純重ね継手材)の接合強度 σ_w に対する加圧力 P_c および印加時間 T の影響を調べた一例である。

同図より、 $\sigma_w - T$ の関係については、接合圧 0.2 MPa 一定下において、印加時間 1 sec までは印加時間の増加とともに接合強度も向上するが、それ以上長く印加しても接合強度に差は生じない。

また、 $\sigma_w - P_c$ の関係については、印加時間 2 sec 一定の場合、接合圧力 0.15 MPa を境にそれ以下では接合強度は低く、逆にそれ以上では高強度

で安定することが分かる。ここで、接合圧力が 0.4 MPa を越えたり、あるいは印加時間を極端に長くすると、超音波振動が停止したり、またはマトリックスのPPが溶出する場合があるので、過度の圧力、印加時間は注意を要する。

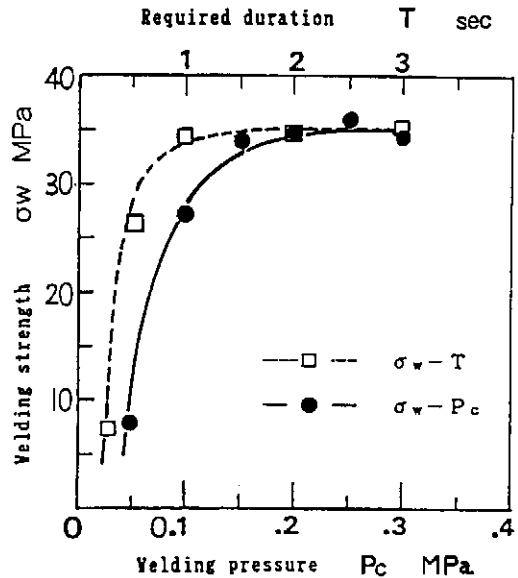


図8 接合強度の及ぼす加圧力と印加時間の関係(ラドライト・無配向材・振幅 $62 \mu m$)

このことは、含浸法Xシートと類似の傾向である。

4.4 強化法及び継手形状による差異

振幅をはじめ接合条件が巧く一致すると良好な接合材が得られる。しかし、実用上では継手形状や繊維配向の組み合わせ等によって、その特性が大きく左右される。

図9は、各種の無配向材による接合強度を比較した一例を示す。いずれも振幅 $62 \mu m$ で接合したもので、それぞれ繊維の強化法や継手形状が異なるため一概に良否を決めることは難しいが、実験的にはラドライトの方が接合性も良く、しかも安定した強度が得られる。

これは、抄紙法によりガラス繊維が密に分散した状態で均等に混合しているため、超音波振動エネルギーが材料内部まで有効に作用し、溶着が促進して良好な接合体が得られるものと推察される。これに比べてXシートは、ガラス長繊維マットに

マトリックス材 (PP) を含浸させたもので、層間せん断強度が高く超音波振動が材料内部まで均一に作用しないため、接合表面あるいは若干の繊維が重なって溶着する場合が多い。

したがって、接合部で繊維が混練される確率も大きく異なり、結果的に接合強度に影響を及ぼすものと考えられる。

また、継手形状については、単純重ね継手の方が接合も容易で、しかもある程度の接合強度が得られることから十分実用に供せるものと考えられる。他方、スカーフ継手は、接合面に作用する振動エネルギーが不均一となり、相対的なすべりなどが生じやすく、前者に比べて十分な効果が期待できず接合強度も低くなる。

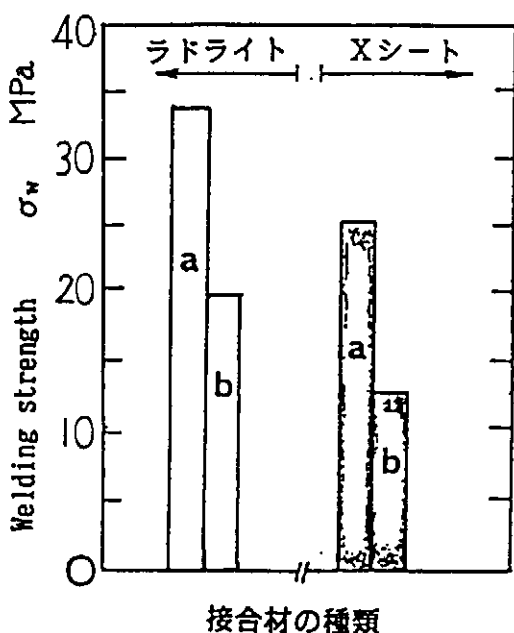


図9 接合強度に及ぼす継手形状と強化繊維の影響 (無配向材/図中のa・bは、図6の継手形状を示す)

なお、継手形状が同じであれば、無配向材より配向強化した材料の方が、強度は概して大きい。

4.5 接合界面の構造モデル

接合のメカニズムは、無配向材のラドライト及びXシートのいずれも、接合前の材料表面は粗さも異なるため部分的に接触し、その後、所定の圧力に到達すると同時に強力な超音波振動が印加さ

れ、短時間のうちに熔融状態となり、接触面全体で溶着を呈し接合が完了する。

ここで、強化材のガラス繊維は振動エネルギーによる破壊や切断もなく、繊維の混練や距離を縮めた状態で接合される。

前節で述べたように、抄紙法の材料はガラス繊維がほぐされて密に分散し、均等に配向しているため、振動が無駄なく有効に作用し、若干の混練も期待できる。一方、含浸法の材料は、部分的に繊維の粗密が生じ、ガラス繊維が折り重なった状態で接合する場合が多い。

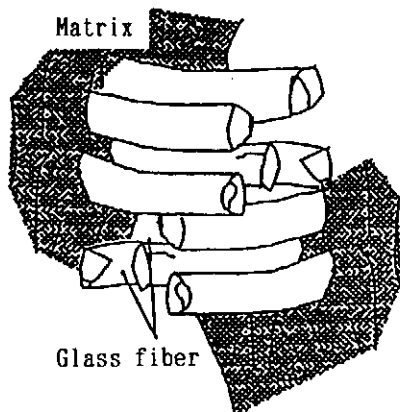
したがって、このような部材は、後に行う引張試験あるいは塑性加工において両者の差が明瞭に現われる。

図10の界面モデルのように、抄紙法材は短繊維が無数に且つ均等にマトリックス材から発現するような破断面に対して、含浸法材は、長繊維束が剥き出しとなり、おうとつの激しい破面を呈していることが確認されている。このことは、他の加工に応用した場合、変型性や加工性を左右するだけでなく、強度特性にも少なからず影響を及ぼすものと考えられる。

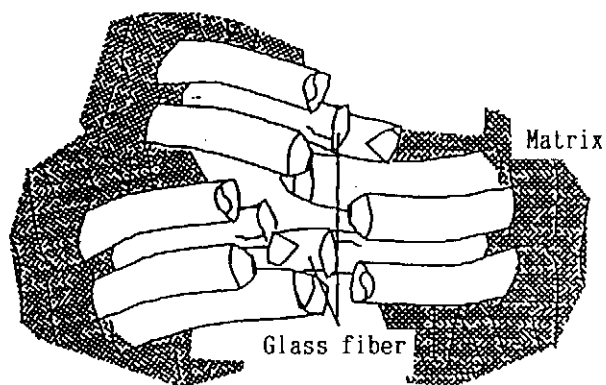
5. 結論

セラミックス/金属およびガラス繊維強化プラスチックに対して、超音波接合の効果と、その特性について検討した。いずれも本方法を利用することにより、迅速にかつ容易に接合ができ、また、それぞれの材料間においていかなる材料にも適用できる見通しが得られた。

本研究で得られた主な特徴として、セラミックス/金属間の接合では、(1) 超音波振動により材料表面は清浄となり、表面処理が不要、(2) 熱による脆弱化がほとんどない、また、GF RTPの接合では、(3) 振幅が大きいほど接合性が高まる。(4) 単純重ね継手は、接合も容易に実用に供することができる、(5) 抄紙法材は、接合性が良く接合強度が安定している。また曲げ加工も可能、などが挙げられる。



(a) 抄紙法



(b) 含浸法

スタンバブルシートの構造モデル

このように省エネルギーの観点からも極めて有利な技術と思われる超音波接合法は、十分実用に供せるものと考えられる。

おわりに、本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けて行ったものであることを付記し、関係各位に甚大なる謝意を表します。

[参考文献]

- (1) 松岡：塑性と加工,28-322 (1987),1186.
- (2) 松岡：機論C,55-517 (1989),2481.
- (3) 松岡：超音波 TECHNO,3-1 (1991),65,4-2 (1992),44.
- (4) 松岡：43回塑加連講論,(1992),317.
- (5) 松岡：合成樹脂,38-1 (1992),53.