

氏名	おおはし りょうじ		
授与学位	大橋良司 博士(工学)		
学位授与年月日	平成21年9月9日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)材料システム工学専攻		
学位論文題目	自動車用高張力鋼板への摩擦攪拌点接合の適用に関する研究		
指導教員	東北大学教授 粉川 博之		
論文審査委員	主査 東北大学教授 粉川 博之	東北大学教授 川崎 亮	東北大学教授 古原 忠
			東北大学准教授 佐藤 裕

論文内容要旨

第1章 結論

産業革命以降、産業や人間活動の活発化に起因した二酸化炭素などの温室効果ガス排出量の増加により、地球規模での温暖化が進行している。国内の炭酸ガス排出量の約二割を占める輸送分野では、自動車メーカがボディの軽量化による省燃費化で炭酸ガス排出量の抑制に取り組んでいる。しかし、一方で、自動車ボディには衝突時における乗員の安全性の確保が強く求められており、ボディ自体を強固にすることで対衝突安全性を高める努力がなされている。このように自動車ボディには燃費改善のための軽量化と重量増加を伴う衝突安全性の確保という、相反する課題の両立を求められており、近年、その解決策の一つとして自動車ボディへの高張力鋼板の適用が加速している。しかし、高張力鋼板は自動車ボディの組立て生産で用いられている抵抗スポット法で溶接を行うと、溶融凝固に伴って割れが発生することがあり、継手強度が安定しないなどの問題が生じている。特に、高強度化を目的に炭素量や合金元素が多く添加された鋼板では、溶接継手の剥離強度がばらつくと言う問題が顕在化している。

このような高張力鋼板の点溶接における不安定さを解決する一つの方法として、摩擦攪拌点接合(Friction Stir Spot Welding: FSSW)の適用が期待されている。FSSWとは通常線接合で行われる摩擦攪拌接合法を点接合として応用した技術(図1)であり、溶融を伴わない接合法である。

しかし、これまでの鉄鋼材料のFSSWに関する報告例は少なく、その殆どが限られた鋼種について接合部の組織観察や継手引張強度を報告したのみである。そのため、自動車で用いられる各種鋼板への適用や、接合のキー技術となる接合ツールの材料選定を含めた体系的な研究報告がなされていないのが実状である。

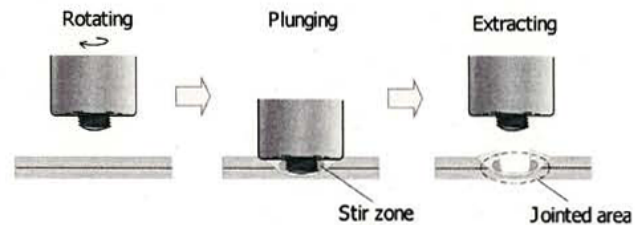


Fig.1 Schematic diagram of FSSW process

このような現状を踏まえ、本論文では以下に掲げる項目を目的に研究を行った。

- IF鋼を用いた鉄鋼材料のFSSW継手形成過程やマイクロ組織、継手強度など基礎的な継手特性の解明
- 高張力鋼板におけるFSSW継手のマイクロ組織と継手の引張強度特性の解明
- 窒化珪素ツールの摩耗特性の評価と耐久性の改善検討

第二章 IF 鋼板を用いた摩擦攪拌点接合継手の基礎的研究

本章では、まず、種々のツール材料候補から鉄鋼材料の FSSW に相応しいツール材料の選定を行った。そして、選定した材料でツールを試作し、これまで解明が不十分であった鉄鋼材料における FSSW 継手の継手形成過程や形成組織を明らかにし、これらが継手の引張強度に及ぼす影響について把握することを目的とした。

種々のツール材料候補について比較検討を行った結果、急激に加えられる回転負荷や最高で 1000℃以上の温度から冷却に耐える熱衝撃性を有する材料として多結晶窒化硼素と窒化珪素が候補に挙げられた。そして、実用性やコストの面から検討を加えた結果、窒化珪素は、1)低熱伝導率に起因して摩擦発熱損失が少ない、2)製造コストが多結晶窒化硼素に比べて極めて安価であること、などの理由から、窒化珪素を鉄鋼材料における FSSW 用ツール材料として選定した。

次に、窒化珪素ツールを用いて IF 鋼の FSSW を行い、接合中の継手形成メカニズムや、マイクロ組織や硬度分布、さらに、継手の引張強度特性など FSSW 継手の基礎的な特性について調べた。その結果、図 2 に示すように、継手のピン孔周辺ではネジの攪拌力によって形成された楕円領域が存在し、その大きさは接合時間とともに増加することがわかった。また、楕円領域の近傍には上下板の未接合界面(フッキング)の先端部が存在し、その位置は楕円領域の成長とともに変化していくことがわかった。特に継手の引張せん断および十字引張強度では、接合時間とともに変化するフッキング位置により強度特性が変化すると説明した。

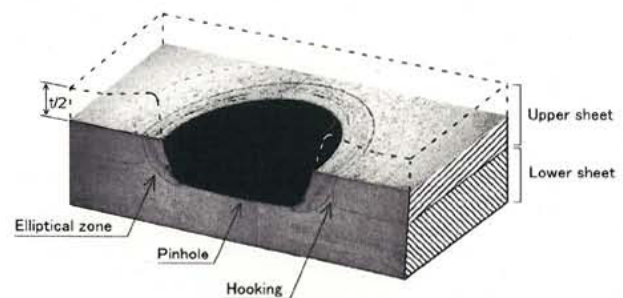


Fig.2 Cross and horizontal sectional view of FSSWed IF steel joint

接合領域は結晶粒の形態によって Zone 1 から 3 の三領域に分けられ、Zone 1 では接合中の熱によって一方向に成長した粒が形成され、Zone 2 および楕円状領域の Zone 3 では、Zone 1 と比較して結晶粒が細粒化していることが確認された。接合部のマイクロビッカース硬さを測定した結果、Zone 2 から 3 にかけて硬さの増加が認められ、結晶方位解析の結果から、この領域では部分的にマルテンサイトが形成されたことが示唆され、このことが硬さ増加の要因であると推察された。

第三章 高張力鋼板の摩擦攪拌点接合継手の組織・強度特性に関する研究

本章では、自動車のボディに多用される DP590 鋼板を対象として窒化珪素ツールにより FSSW を行い、継手の形成過程やマイクロ組織、また、ツールへのコーティングやシールドガスの条件が、マイクロ組織や硬さ分布に与える影響について明らかにすることを目的とした。さらに、継手の強度特性の把握と組織および硬さの継手強度への影響について解明を行った。

継手の形成過程を観察した結果、ツールが圧入されたのち、材料側のピン先端部近傍で楕円状の領域が形成され、その大きさは接合時間とともに拡大することが分かった。上下板の未接合界面の先端部は楕円領域の拡大・成長に引きずられる様に上板の上方へ移動した。これらは IF の継手形成過程と同様の傾向であった。接合領域は、図 3 に示すように金属組織的な

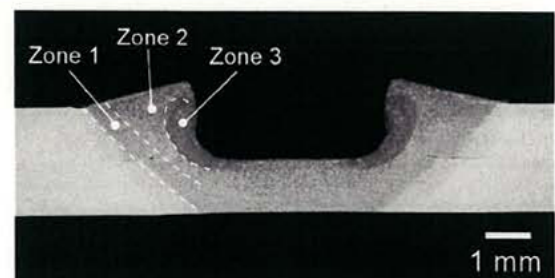


Fig.3 Cross section of FSSWed DP590 steel joint

特徴によって Zone 1 から 3 までの三領域に分類された。Zone 1 はフェライトとマルテンサイトの混合組織であったのに対し、Zone 2 および 3 はほぼマルテンサイト組織であった。これらの組織形成機構は接合中の熱履歴における最高温度によって説明可能であった。

Zone 3 内のマルテンサイト組織の結晶粒形態は使用したツールの条件によって異なっていた。特に無コートツールでガスを用いなかった場合が最も微細なマルテンサイト組織が得られ、接合領域で最も高い硬さが得られた。一方、コーティングツールを用いた場合、Zone 2 および 3 では組織、硬さともに均一な分布が得られた。

無コートツールを用いた場合、図 4 に示すように Zone 3 内でツールや雰囲気から混入した Si、N、O が確認された。これらのうち Si は特徴的なバンド組織を形成したのに対し、N、O は比較的均質に存在していた。シールドガスをを用いた場合、O の混入が抑制され、ツールへコーティングを行うことで Si、N の混入は防止され、Si のバンド組織は消失した。

Zone 3 における硬さおよび結晶粒組織は、接合中に混入した元素によって大きく影響を受けることが分かった。無コートでツールガスをを用いなかった場合、Si、N、O の含有量が最も多く、図 4 に示すように、Zone 3 内のマルテンサイトが微細化していた。また、硬さも大きく増加していた。一方、混入元素が殆ど認められなかったコーティングツールの場合は、均質な結晶粒組織と硬さ分布が得られた。Zone 3 に混入した個々の元素が与える結晶粒組織と硬さへの影響についてについて考察した。その結果、マルテンサイト粒の微細化は N、O による影響が強く、硬さの増加は微細化による効果に加え、Si、N の固溶や、酸化物、窒化物粒子の形成に起因していると考えられた。

高張力鋼板の継手強度を調べた結果、図 5 に示すようにコーティングツールを用いることで継手の引張強度が向上することが分かった。特に無コートツールでガスをを用い場合と比較すると、十字引張強度が大幅に増加することが判明した。これは、Zone 3 における硬さ増加のため切り欠きの感受性が高まったことが原因と推察された。コーティングツールを用いて Zone 3 内への混入元素を抑制することで、そのような硬化が抑制され、継手の強度特性を改善できることが明らかとなった。

第四章 超高張力鋼板の摩擦攪拌点接合継手の組織・強度特性に関する研究

本章では、少しずつ適用が進む超高張力鋼板の DP980 材に対して窒化珪素ツールで FSSW を行い、形成される組織や硬さについて明らかにすること、さらに、結晶粒組織の形成や継手の引張強度特性に及ぼす混入元素の影響について解明することを目的とした。接合領域は金属組織的な特徴によって Zone 1 から 3 までの三領域に分類された。Zone 1 ではフェライトとマルテンサイトの混合組織であったが、Zone 2 および 3 はほぼマルテンサイト組織が形成され

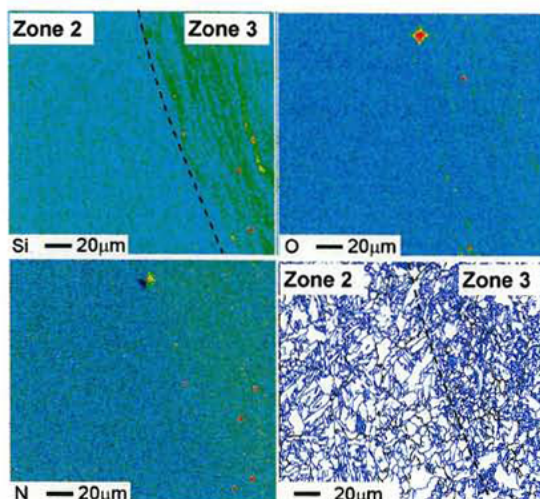


Fig.4 EPMA map of Si, N, O and EBSD result showing martensite boundary

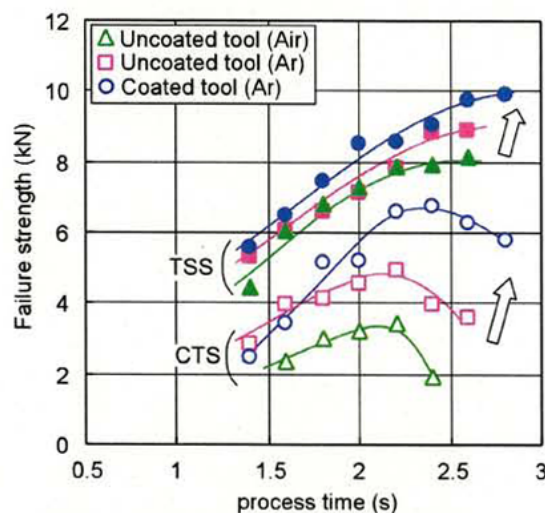


Fig.5 Failure strength in tensile shear and cross tensile test of joint

ていた。無コートツールを用いた場合、Zone 3 内にツールや雰囲気から Si、N、O の混入が確認され、DP590 材と同様に Si は特徴的なバンド組織を形成したのに対し、N、O は比較的均質に存在していた。Zone 3 における硬度分布および結晶粒組織は、接合中に混入した元素によって影響を受け、Si、N、O の含有量が最も多い無コートツールガス無しの場合で、Zone 3 内の結晶が最も微細化し、かつ硬度も高かった。一方、コーティングツールの場合、均質な結晶粒組織と硬度分布が得られた。

DP980 材の FSSW 継手の強度特性を調べた結果、コーティングツールを用いた場合、無コートツールの場合と比べ継手の引張強度が大幅に向上した。特に無コートツールでガスを用い場合と比較すると、十字引張強度が顕著に増加した。以上のような混入元素による Zone 3 の硬さ増加や継手の引張強度の劣化および混入元素の抑制による硬さの均質化や継手引張強度の向上は、DP590 材と同様のメカニズムで説明できると考えられた。

第五章 接合ツールの寿命改善に関する研究

本章では、窒化珪素ツールについて連続打点による耐久試験を行い、ツールの摩耗特性や継手強度への影響などの基礎的な知見を得ることを目的とした。さらに、窒化珪素ツールの摩耗原因に関して実験的な検証を行い、得られた結果に基づき耐摩耗性の向上策を論じ、ツールの寿命改善の指針を得ることを目的とした。

窒化珪素ツールを用いて連続打点試験を行った結果、まずピンのネジ部で摩耗が生じ、これにより継手強度が変化した。さらにツールの摩耗が進行してネジ部が摩滅すると、ピンの中心部が括れるように摩耗し、最終的に折損に至った。シールドガスを用いて窒化珪素の酸化を防止することで、若干の摩耗抑制効果は認められたが、摩耗傾向に変わりはなく、本質的な摩耗防止策とはならなかった。

Zone 3 内におけるツールの残留物を分析したところ、シールドガスを用いない場合には、脱落した Si_3N_4 粒子と思われる物質が認められた。シールドガスを用いた場合、そのような粒子は殆ど見られなかった。一方、シールドガスの有無に関わらず、Zone 3 内では Si_3N_4 粒子の他に Si がバンド状に分布している様子が認められた。

接合中のピン内部の温度を測定した結果、最表面の温度は 1400 K 以上に到達していると推察された。高温、真空中における窒化珪素と鋼材の反応性を実験的に調べたところ、Si が鋼中に拡散した形跡が確認され、窒化珪素と鋼材の間に反応性が認められた。Zone 3 内で見られた Si のバンド分布は、このような反応性に起因しているものと推察される。一方、窒化珪素の表面に鋼との反応性が低い物質をコーティング処理することで、Si の拡散を抑止可能であること示された。

窒化珪素と鋼材の反応を防止するため、ツール表面に TiC/TiN コーティング処理を施し、実際の FSSW における耐久性を評価した結果、無コートツールと比べて耐久性が向上することを確認し、窒化珪素ツールの寿命改善に有効であることが分かった。

第六章 総括

本章にて本研究で得られた結論を総括した。

論文審査結果の要旨

近年、自動車の軽量化および衝突安全性能の向上を目的に自動車ボディへの高張力鋼板の適用が加速している。しかし、高張力鋼板は難溶接材料であり、自動車ボディの組立てに用いられる抵抗スポット溶接では溶接割れなどの問題が顕在化している。そこで、本研究ではこれらの課題を解決するため、自動車用鋼板に固相接合法である摩擦攪拌点接合法を行い、接合部の形成メカニズムや組織の形態、継手の引張強度特性について材料科学的に検討している。本論文は6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、窒化珪素ツールを用いてIF鋼板の摩擦攪拌点接合を行い、Niトレーサーによって接合時間とともに上下板の未接合界面が消失する様子やツールによって楕円状領域が成長していく過程を明らかにしている。また、結晶方位解析から接合部では部分的にマルテンサイトが形成され硬さ増加の要因となった可能性を示している。さらに接合時間と継手の引張強度との関係を明らかにし、破断形態が未接合界面先端を起点としたリガメント長さによって変化することを示している。

第3章では、引張強さが590MPa級の高張力鋼板に摩擦攪拌点接合を行い、接合部領域の組織を接合中の熱履歴によって説明している。また、ツールのネジによって形成された楕円状の領域で微細なマルテンサイトが形成されて硬さが増加し、それがツールおよび雰囲気から混入した珪素、窒素、酸素に起因することを示している。また、混入元素の個々の影響について議論し、硬さの増加要因がマルテンサイトの微細化や固溶強化であると考察している。そしてツールコーティングおよびシールドガスによって元素の混入を防止することで硬さ上昇を抑制でき、継手強度を大幅に改善できることを明らかにしている。

第4章では、980MPa級の超高張力鋼板の摩擦攪拌点接合部における組織を明らかにするとともに混入元素による結晶粒微細化について考察している。また、元素混入を抑制することで、継手強度が大幅に向上することを明らかにし、それらが590MPa級高張力鋼板と同様のメカニズムで説明できることを示している。

第5章では、窒化珪素ツールの摩耗特性について明らかにするとともに、摩耗が窒化珪素の酸化および鉄鋼材料との反応に起因していると考察している。さらに、これらの知見に基づきツールへのコーティングが寿命改善に有効であることを実証している。

第6章は本研究の結果をまとめた総括である。

以上要するに本論文は窒化珪素ツールを用いた高張力鋼板の摩擦攪拌点接合継手において、接合部に形成される組織、硬さ、継手強度への影響因子を明らかにし、ツールへのコーティングが継手強度とツールの寿命改善に有効であることを示しており、材料システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。