



Title	固相接合を前提とした高P耐候性鋼の開発指針と固相接合技術の適用性
Author(s)	川久保, 拓海
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/91930">https://doi.org/10.18910/91930</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名 ( 川久保 拓海 )

論文題名 固相接合を前提とした高P耐候性鋼の開発指針と固相接合技術の適用性

## 論文内容の要旨

本論文は、固相接合を前提としてPを活用した新しい耐候性鋼を開発するために、基礎的な知見を得ることを目的とした。

第1章では、橋梁等のインフラ構造物の長寿命化の重要性を取り上げ、耐候性鋼の現状と、耐食性向上の手法とメカニズムについて述べた。加えて、固相接合を前提とすると、溶接性の問題から制限されているPを活用した耐候性向上が可能になることについて説明した。その上で、本研究の目的および本論文の構成を示した。

第2章では、研究背景として、耐候性鋼の耐食性向上における各種合金元素の役割について概説し、特にP活用の重要性を述べた上で、鉄鋼材料の溶接性、靱性におけるP活用の課題を整理した。加えて、Pの活用を可能とする摩擦攪拌接合および線形摩擦接合の原理、特徴、および適用状況についてまとめた。

第3章では、固相接合を前提とした高P耐候性鋼の開発に向けて、Pに加えて、ミクロ組織制御や強度向上に有効であるが溶接性を劣化させるCにも着目し、高P耐候性鋼の接合性、微視組織および機械的特性に及ぼすC、P量の影響について議論した。C量を0.1~0.5 wt%、P量0.1~0.3 wt%で変化させた全ての鋼材において、摩擦攪拌接合により欠陥のない健全な接合体が得られた。また、0°Cでのシャルピー試験において、P量が0.1 wt%よりも多い鋼材(0.1 wt%C)の母材では脆性破壊が起こるのに対し、結晶粒微細化した攪拌部ではP量が0.3 wt%の鋼材においても接合条件に関わらず延性破壊を呈した。このように、P量を増加しても靱性を維持するためには、結晶粒径を8 μm程度まで微細化することが有効であることが明らかとなり、高P耐候性鋼の設計指針が得られた。

第4章では、高P耐候性鋼の母材および摩擦攪拌接合継手の攪拌部におけるPの粒界偏析の実態と、粒界偏析が靱性に及ぼす影響について議論した。平衡状態では、粒界偏析が結晶粒微細化により軽減することが報告されているが、 $A_1$ 点以下の温度で接合された攪拌部(細粒)の粒界P濃度は、 $A_3$ 点以上の攪拌部(粗粒)と比較して高いことが明らかとなった。摩擦攪拌接合後の冷却中の粒界偏析を想定して、非平衡状態の粒界偏析に及ぼす結晶粒径の影響について計算により検討し、Pのように溶質の拡散距離が結晶粒径に比べて十分小さい場合には、溶質の粒界濃度は結晶粒径の影響を受けないが、Cのように溶質の拡散距離が結晶粒径に対して無視できない場合には、溶質の粒界濃度は結晶粒が小さいほど低くなることを明らかにした。また、Pの粒界偏析濃度と靱性との関係を整理することにより、Pの粒界濃度を約7 at%以下に抑えると、Pの粒界偏析は靱性に悪影響を及ぼさないことを示した。

第5章では、高P耐候性鋼の線形摩擦接合を行い、接合性および温度制御に及ぼす板厚の影響について議論した。3.2 mm厚の耐候性鋼に対して、印加圧力により接合温度の制御が可能であることを確認したが、250 MPaの高い印加圧力条件では欠陥が生じ、 $A_1$ 点以下の温度での良好な継手は得られなかった。その原因として、印加圧力と界面の摩擦力からなる相当応力が材料の降伏応力を上回ると、界面が昇温する前に突出し部の材料が塑性変形し、欠陥の形成につながると推察した。一方で、接合前に材料を予圧し加工硬化させると、塑性変形を軽減でき、 $A_1$ 点以下の温度で欠陥のない継手が作製できることを明らかにした。12 mm厚の厚板の耐候性鋼の線形摩擦接合でも、欠陥のない継手が得られ、ツールを用いない線形摩擦接合の適用により、板厚によらず接合可能であることを確認した。

第6章では、12 mm厚の厚板の高P耐候性鋼で作製した線形摩擦接合継手における残留応力分布を、厚い試料の内部における残留応力を測定可能な中性子回折法を用いて調査した。印加圧力条件によらず、接合中心部では振動方向および加圧方向に降伏応力相当の高い引張の残留応力が形成されたことが明らかとなった。接合中心部における振動方向(接合線平行方向)の残留応力が降伏応力相当となるのは熔融溶接と同様の傾向であり、両端固定棒のモデルで説明できた。一方で、接合中心部における加圧方向(接合線直角方向)の残留応力は熔融溶接の場合より高く、降伏応力相当となった。これは、表面や端部においてそれを補うような高い圧縮の残留応力が存在することを意味しており、表面からのき裂の発生や進展を抑制する効果があると推察した。

第7章は総括であり、本研究で得られた知見について総括した。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 川久保 拓海 )	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 教授 藤井 英俊
	副 査 教授 藤本 慎司
	副 査 教授 小泉 雄一郎
副 査 教授 三上 欣希	

## 論文審査の結果の要旨

本研究では、固相接合を前提とすることにより、従来の溶接用鋼材では制限されてきた P を活用した新しい耐候性鋼の開発を目指し、微視組織および機械的特性に及ぼす P の影響について調査している。実際に橋梁等の構造物に適用することを見据えて、厚鋼板の接合に有利である線形摩擦接合について、接合温度制御および残留応力等の継手特性の観点から調査している。これらの結果を通して、固相接合を前提とした高 P 耐候性鋼の開発指針を提示し、線形摩擦接合の温度制御に及ぼす板厚や材料強度の影響について明らかにしている。主要な成果は以下の通りである。

- (1) 従来の溶接用鋼材では許容されなかった 0.1 wt%以上の P 添加を行った鋼材を複数作製し、その母材と摩擦攪拌接合した継手攪拌部の微視組織と機械的特性を評価し、接合性、相の構成、P のマイクロ偏析、強度、延性、靱性等の特性に及ぼす P の影響を明らかにしている。その結果、結晶粒径を 8  $\mu\text{m}$  程度まで微細化すると 0.3 wt%の P を添加した鋼材でも延性的に破壊することを明らかにし、高 P 耐候性鋼の開発に対して結晶粒の微細化を活用する指針を提示している。
- (2) P を 0.3 wt%含有する高 P 耐候性鋼に対して 2 種類の条件で摩擦攪拌接合を行い、結晶粒径の異なる攪拌部を作製し、攪拌部の結晶粒界近傍の元素分布について 3 次元アトムプローブ分析を用いて解析した。これにより、P の粒界濃度は結晶粒が小さい方が高くなり、C の粒界濃度は結晶粒が大きい方が高くなることを示している。さらに拡散方程式を用いた計算を行い、溶質の拡散距離が結晶粒径に比べて十分小さい場合には、溶質の粒界偏析は結晶粒径に依存しないが、溶質の拡散距離が結晶粒径に比べて無視できない場合には、溶質の粒界濃度は結晶粒の微細化に伴い低減することを立証した。加えて、P の粒界偏析と靱性の関係を整理し、少なくとも 0.3 wt%までの P 添加であれば、P の粒界偏析が母材および攪拌部の靱性を低下させる可能性は極めて低いことを実証している。
- (3) 板厚の異なる高 P 耐候性鋼に対して線形摩擦接合を行い、その接合性を評価し、板厚 12 mm の厚鋼板でも接合可能であることを実証している。加えて、高い印加圧力条件での線形摩擦接合において、突出し部の材料が大きく塑性変形し、接合界面に欠陥が生じる問題に対して、接合前の試料に予圧を施して加工硬化させる新しい手法を用いることで、接合中の塑性変形を軽減させ、より高い印加圧力条件で接合可能となることを明らかにしている。高い印加圧力条件ではより低温で接合でき、機械的特性に優れる継手が得られる可能性が高まる。
- (4) 高 P 耐候性鋼の線形摩擦接合継手における残留応力について中性子回折測定を用いて解析し、鋼板の線形摩擦接合継手内部の残留応力分布を初めて明らかにしている。接合中心部においては、振動方向、加圧方向に降伏応力相当の高い引張の残留応力が形成されていることを示し、従来の熔融溶接法との相違点についても明示している。

以上のように、本論文は従来添加量を制限されてきた P を活用した耐候性鋼の諸特性に及ぼす P の影響を明らかにし、固相接合の構造物への適用性についても重要な知見を得ており、材料工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。