The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	粒子法を用いたレーザ溶接時におけるキーホール形成機構の解明および溶接変形予測
Author(s)	千村, 伊作
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/59613
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　千村　伊作　　）	
論文題名	粒子法を用いたレーザ溶接時におけるキーホール形成機構の解明および溶接変形予測

論文内容の要旨

レーザ溶接では，高密度なエネルギーを与えるために，微小な溶融幅に深い溶け込みが得られ，熱影響が少ない高品質な接合が可能である．このため，アーク溶接等の従来の溶接法では困難であった接合が可能となる．また，高速・自動で溶接を行うことができるため，自動溶接による生産革新が進められており，レーザ溶接に対する期待は高まっている．その一方で，レーザ溶接は制御が難しく，ポロシティ等の溶接欠陥を防ぎ，適切な溶融を安定して得るために，条件を適切に選定する必要がある．レーザ溶接による溶け込みのプロセスは，微小な領域において高速に変化するものであり，通常は観察できない現象である．近年ではＸ線を用いた観察が進められているが，メカニズムに関しては明らかにされていない部分が多く残されている．

本研究では，レーザ溶接における溶融現象とキーホール生成過程を再現できる数値計算手法の開発を行った．レーザ溶接による溶融部においては，液体表面の形状に大きな変化が生じるが，従来のメッシュを用いる解析法では，このように計算対象の形状変化が大きい場合に対応が困難である．そこで，本研究では粒子法を採用し，密度一定条件において，安定的に解を得られる特徴を持つMPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用い，レーザ光の反射，フレネル吸収，蒸発に伴う反跳圧を考慮した数値計算手法を開発した．

本数値計算手法により，レーザ照射によって金属が溶融し，深いキーホールが形成される過程を再現するとともに，レーザ溶接のX線透視観察との比較を行い，キーホール形成機構の分析を行った．さらに，粒子法による数値計算にて得られたキーホールの入熱量を有限要素法による熱弾塑性解析に適用し，レーザ溶接の変形および残留応力の発生について分析を行った．研究内容の要約は以下の通りである．

第１章では，レーザ溶接の適用と課題について述べ，溶融池の挙動とキーホール形成過程を再現するための数値計算手法についてそれらの特徴を分析し，本研究の背景と目的について述べた．

第２章では，MPS法の特徴と理論について述べ，非圧縮流れ，伝熱計算，相変化，表面張力の計算法について説明した．MPS法においては不安定な圧力振動が発生するため，キーホール内の局所的に変化の大きい流れについて安定して解を得られない．そこで，圧力振動を軽減し安定して解を得るために，非圧縮流れの計算において，圧縮性流れの圧力波を用いて陽的に密度の修正計算を行う手法を用いた．本計算手法による非圧縮性流れの計算について，水柱崩壊の問題を取り上げ，文献に報告されている実験結果と比較し，精度検証を行った．伝熱計算については，瞬間熱源による温度分布を理論解と比較し，精度を検証した．表面張力については，複雑に形状が変化するキーホール内においても，適切に自由表面を捉え，表面変化に対応できるよう，粒子密度の勾配を用いた表面張力の計算モデルを提案した．さらに，液滴振動の計算を行い，理論振動周期との比較を行い，表面張力の計算精度を検証した．

第３章では，レーザ溶接における溶融現象を数値計算する上で必要な，レーザ光照射，偏光吸収率，蒸発による反跳圧の計算モデルの開発について述べた．レーザ光の反射を考慮した計算モデルを用いると，キーホール形状によって，レーザのエネルギーが母材に吸収される割合が変化し，キーホールが深い場合には，エネルギーの吸収率が高まることが確認された．本数値計算手法を用いて，アルミ材を対象にして，レーザスポット照射による溶融計算を行い，現象の再現性と適用性を確認するとともに，溶融池におけるキーホール生成過程を分析した．

第４章では，開発した計算手法の移動レーザ照射による溶融現象への適用性を検証した．純チタンおよびステンレス鋼に対するメルトラン溶接の場合について，開発した計算手法を用い，溶融池の生成およびキーホールの形成過程の数値計算を行った．また，X線その場透視観察法を用いてキーホール形成過程を高速度観察し，開発した計算手法の適用性を確認するとともに，溶融部の挙動およびキーホール形成過程を明らかにした．キーホールの状態を表す重要な物理量である蒸発速度が数値計算によって算出され，照射直後には，キーホール底のレーザによる直接加熱により，最大の蒸発速度が得られ，約1mm/msのキーホールの成長速度が得られた．キーホールが深くなると，レーザ光の多重

反射を含むキーホール壁面の加熱に移行し，蒸発速度が低下し，キーホール成長速度の大幅に減少することが明らかになった．また，レーザ出力および溶接速度の蒸発速度およびキーホールの成長速度への影響を明らかにした．

第５章では，粒子法を用いた本数値計算手法によって得られたキーホールと入熱計算結果から，熱源モデルを作成し，有限要素法による熱弾塑性解析に適用する手法について検討を行った．実際に，粒子法によって計算された入熱情報を用いて，有限要素法による熱弾塑性解析を行い，キーホールを伴うレーザ溶接による変形と残留応力有限要素法を用いて予測可能であることを確認した．

第６章では，本論文の総括を行うと共に，本研究にて開発した粒子法を用いた数値計算手法の課題と，今後の展望について述べた．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　千村　伊作　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	村川 英一
	副 査　教授	藤久保昌彦
	副 査　教授	大沢 直樹
	副 査　准教授	川人 洋介

論文審査の結果の要旨

レーザ溶接は従来のアーク溶接と比較し多くの特長を有しているが、制御が難しくポロシティ等の溶接欠陥を防ぎ安定な溶融状態を得るためには溶接条件を適切に選定する必要がある．しかし、レーザ溶接における溶け込みのプロセスは，微小な領域において激しく変化するものであり，近年、X線を用いた観察が可能となったが，メカニズムに関しては明らかにされていない部分が多く残されている．

本研究では，レーザ溶接における溶融現象とキーホール生成過程を解明することを目的として数値計算手法の開発を行っている．レーザ溶接による溶融部においては液体表面の形状変化が大きく，従来のメッシュを用いる解析法では対応が困難なので，本研究では粒子法の中でも，密度一定条件においても安定に解が得られる MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を採用し，レーザ溶接特有の光の反射，偏光吸収，蒸発に伴う反跳圧が考慮可能な数値計算手法を開発している．

研究内容は以下の６章にまとめられている．

第１章では，レーザ溶接の特長と解決すべき課題について述べ，溶融池の挙動とキーホール形成過程を再現するために提案されている既往の数値計算手法の特徴を分析するとともに，本研究の背景と目的について述べている．

第２章では，MPS 法の特徴と理論について述べ，非圧縮流れ，熱伝導，相変化，表面張力の計算法について説明している．非圧縮流れの計算においては不安定な圧力振動が発生するので，安定して解を得るために圧縮性流れの圧力を用いて陽的に密度の修正計算を行う手法を用いている．計算手法の妥当性を確認するため，水柱崩壊の問題を取り上げ，文献に報告されている実験結果と比較し精度検証を行っている．熱伝導問題については，瞬間熱源による温度分布を理論解と比較し精度を検証している．一方，表面張力については，複雑に形状が変化するキーホール内においても適切に自由表面が捉えられるように粒子密度の勾配を用いた表面張力の計算モデルを提案し，液滴振動を例に精度を検証している．

第３章では，レーザ溶接における溶融現象について数値計算を行う上で必要なレーザ光照射，偏光吸収，蒸発による反跳圧の計算モデルの開発について述べている．レーザ光の反射を考慮した計算により，キーホールの深さによってレーザのエネルギーが母材に吸収される割合が変化し，キーホールが深い場合にはエネルギーの吸収率が高まることを明らかにしている．さらに，アルミニウム材を対象にしてレーザスポット照射による溶融計算を行い，現象の再現性と適用性を確認するとともに，溶融池におけるキーホール生成過程を分析している．

第４章では，移動レーザ照射の下での溶融現象を対象に本研究にて開発した計算手法の適用性を検証している．具体的には，純チタンおよびステンレス鋼に対するメルトラン溶接の場合について，溶融池の生成およびキーホールの形成過程の数値計算を行いX線その場透視観察で得られた結果と比較し計算手法の適用性を確認している．さらに，キーホールの状態を表す重要な物理量である蒸発速度に注目し，照射開始直後にはキーホール底がレーザにより直接加熱されるため蒸発速度が大きくキーホールの成長速度が約 1mm/ms となり，これに対しキーホールが深くなると，レ

ーザ光の多重反射によるキーホール壁面へのエネルギー分散が増加するため，蒸発速度が低下しキーホール成長速度が大幅に減少することを示している．また，レーザ出力と溶接速度が蒸発速度およびキーホールの成長速度におよぼす影響を明らかにしている．

第５章では，粒子法により計算したキーホールおよび溶融池における温度分布に基づき熱源モデルを作成し，これを用いた熱弾塑性有限要素法によりレーザ溶接による変形と残留応力が予測可能であることを確認している．

第６章では，本論文の総括を行うとともに，本研究にて開発した粒子法の課題と今後の展望について述べている．

以上のように，本論文はレーザ溶接における溶融現象とキーホール生成過程を解明することを目的として，レーザ溶接に特有の諸現象が考慮可能な粒子法を開発し，その有効性をＸ線その場透視観察結果との比較により検証するとともに，蒸発速度とキーホールの成長速度の関係を明らかにしている．これらの成果はレーザ溶接における，ポロシティ等の溶接欠陥を防ぎ安定な溶融状態を得るための条件を選定する際における理論的指針を与えるものであり，レーザ溶接の品質および信頼性向上に大いに貢献するものと期待される．

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．