

氏名	伊藤 真澄	
授与学位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成27年9月25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) 機械システムデザイン工学専攻	
学位論文題目	非圧縮性 SPH 法を用いたアーク溶接 プロセス中流動現象の数値シミュレーション	
指導教員	東北大学教授 福西 祐	
論文審査委員	主査 東北大学教授 福西 祐 流体科学研究所教授 西山 秀哉 東北大学准教授 伊澤 精一郎	東北大学教授 岡部 朋永 准教授 茂田 正哉 (大阪大学接合科学研究所)

論文内容要約

本研究は、新たな数値計算モデルとアルゴリズムを実装した SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics 法) を用いて溶接プロセス中の流動現象を解明し、溶接結果の予測にも役立つ数値シミュレーションを実現しようと試みたものである。対象とする静止 TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接は非消耗電極式ガスシールド溶接の 1 種であり、最大温度が 2 万 K 近くに及ぶシールドガスの流れと融解した金属の液溜まりである溶融池の内部の流れという 2 種の流動現象に加えて、溶融金属による溶融池表面の自由変形や固液相変化、熱伝導といった多数の要素がからむ複雑な現象である。そのため実験計測も数値計算も容易ではない。しかし、溶接プロセスで起こる現象を正しく理解することは溶接品質の向上に必要不可欠であり、溶接結果を予測可能な数値シミュレーション技法が確立されれば、溶接現場において極めて有用な道具となりうる。本研究の目的は、溶接現象の計算手法に粒子法の 1 種である SPH 法を採用することによって、比較的簡単なアルゴリズムで応用性に富む数値シミュレーション方法を開発することにある。そのために必要な改良を従来の SPH 法に加え、計算結果の妥当性について検討するとともに溶接プロセスへの適用を図った。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全編 7 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、溶融池に働く表面張力をできるだけ単純に扱うために、計算粒子間に引力を与える粒子間引力型表面張力モデルの採用について検討し、従来使用例の少ないこのモデルの妥当性を検証する目的で無重力下浮遊液滴の変形挙動を計算している。長楕円体状の初期形状を与え、液滴長さの時間変化を測定した結果、振動数が

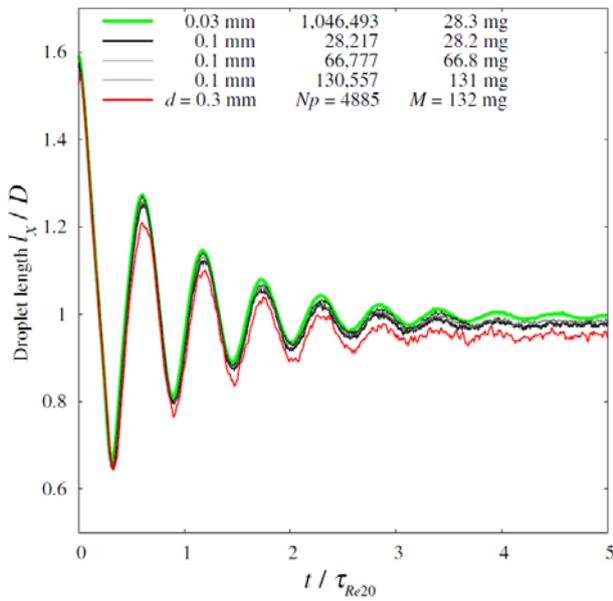


図1 浮遊液滴表面変形振動波形

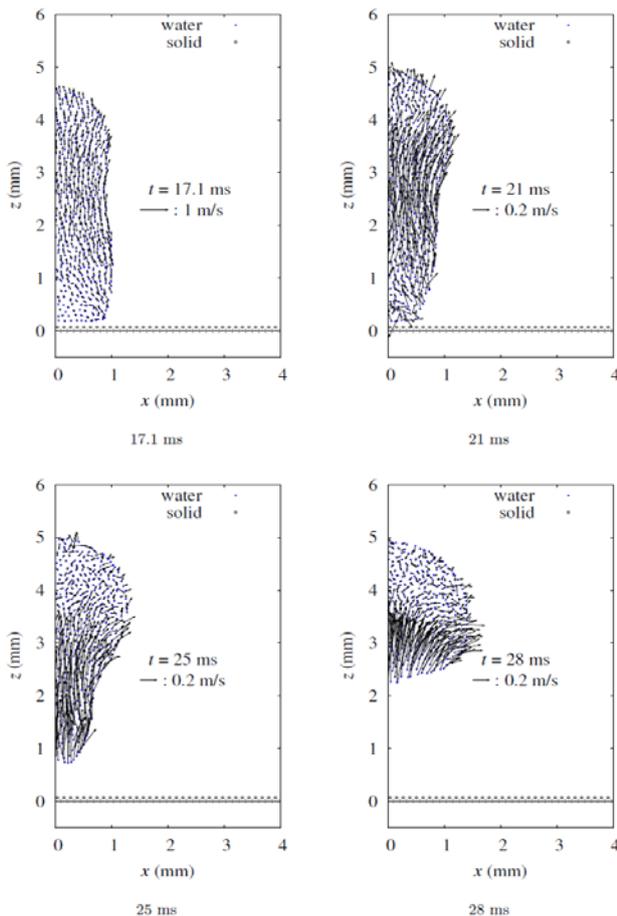


図2 落下液滴のリバウンド挙動

理論解とよく一致し、表面張力の効果として妥当な駆動力がこのモデルによって得られることを示している。また、液滴表面が持続的に振動する際に減衰効果が過大に現れ、液滴サイズによらず同一の波形が現れることを指摘している(図1)。

第3章では、2章で取り上げた粒子間引力型表面張力モデルによって液体表面の形状が適切に計算されることを検証する目的で、壁面上に静止した液滴および壁面へ落下衝突し跳ね返る液滴の計算を行っている。このとき表面張力モデルの粒子間引力を液体粒子間の場合と液体・個体粒子間の場合に分けて扱うことで、所定の接触角となるように固体表面の濡れを調整している。立方体状の初期形状を与えた壁面上の液滴は、表面張力の効果によって丸まり鉛直軸に対称な形状となって静止する様子が再現され、その断面形状についても接触角 30° から 180° の範囲で解析解とよく一致することを示している。一方の落下液滴の計算では、壁面の濡れ性を変えた2通りの計算を行って既存の実験結果と比較したところ、図2に示すように、実験同様撥水性の強い表面に落下した液滴が空中へ跳ね返る様子を捉えている。壁面への衝突前後の液滴形状の変化も実験結果とよく一致しているが、壁面衝突時のように接触線の移動を伴うときの液体形状を正確に捉えるためには、接触角の動的変化を考慮する必要があることを指摘している。これらの結果は、本計算の粒子間引力型表面張力モデルを採用することで、静止 TIG 溶接のように界面の大きな変形を伴う液体の流動現象を正しく予測できることを明らかにしたものである。

第4章では、母材が上部からの熱で融解し溶融池を形成する静止 TIG 溶接プロセスの数値シミュレーションを行っている。計算にあたっては、固液相変化の効果に加え、溶融池に働く表面張力、浮力、ガス流との摩擦、および電磁力の4種類の駆動力全てを組み込んでいる。ただし、電磁場およびシールドガスの温度と速度については先行研究のデータを利用することで計算を省き、母材の温度場と流れ場のみを計算している。その結果、溶融池内の流動は母材の硫黄含有率によって異なり、溶け込みの深さに違いが現れる様子を捉えており、既存の実験結果ともよく一致することを示している。これは本計算手法が、溶接プロセス中に起こる現象を正しくシミュレーションできることを示すものである。

第5章では、実際の溶接環境に近い条件で計算を行うために、熱源が移動する2つの部材の突き合わせ溶接のシミュレーションを行っている。その結果、熱源の移動に伴って母材が融解し、熱源の通過後に冷却されて凝固

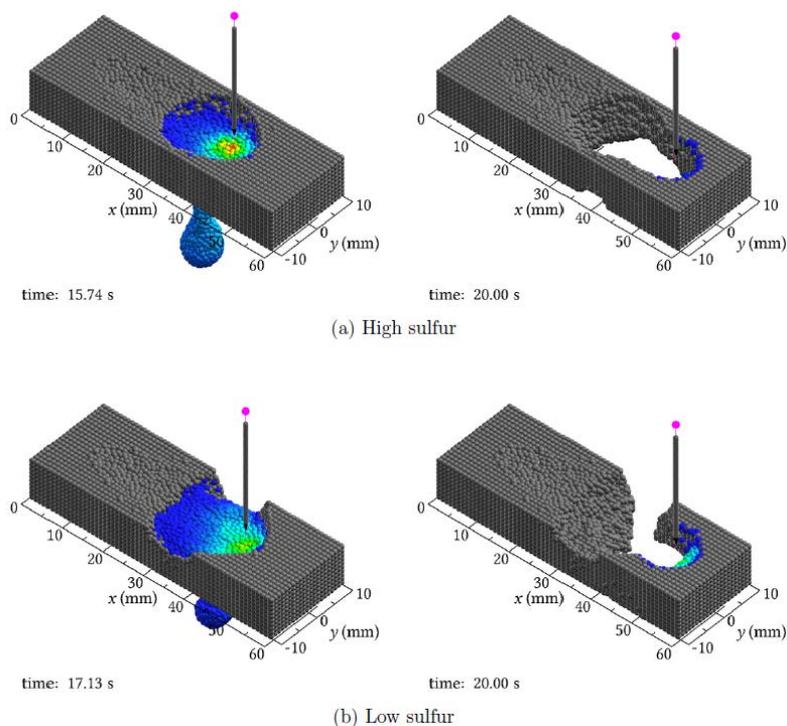


図3 熱源移動をともなう溶接シミュレーションの例

することで溶接ビードが形成される様子が再現され、隙間を空けて置かれた2つの部材が溶接により一体化する過程のシミュレーションに成功している。その際、硫黄含有率に応じて溶融池内の流動が変化し、異なる溶け込み形状となることも捉えている。また、熱源移動の速度が遅すぎる場合には、母材の底まで溶け込みが達し、溶け落ちが発生する様子も捉えている(図3)。これらの結果は、本研究において開発された計算プログラムが実際の溶接の現場において溶接結果を予測するための道具となる可能性を示すものである。

第6章では、TIG 溶接時の高温の気流を計算するために必要となる熱膨張アルゴリズムを提案し、その検証を行っている。本アルゴリズムでは、粒子サイズを温度の関数として粒子体積を変化させることで熱膨張の効果を模擬し、さらに分裂モデルおよび合体モデルを計算に組み込むことにより粒子サイズを自動的に調節する手法を新たに開発し、最高温度 13,000K、およそ 45 倍の密度変化を含む流れ場に適用できることを示している。これは将来における母材とガス流の連成計算に道を開くものである

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、非圧縮性 SPH 法に様々な計算モデルやアルゴリズムを実装することで自由表面の変形を含む溶融金属の流動や2つの母材の接合プロセス、熱膨張する高温ガス流といった TIG 溶接における様々な流動現象を再現できることを示したものである。