

レーザー溶接のモデル

「ニッケル基耐熱合金薄板溶接に対するレーザー光スポット形状の最適化」のために

まず最初に、薄板上にレーザー光を照射し溶接する際の溶融部分の挙動を解析するために必要と思われる物理現象の要素をまとめます。それからそれらを数値的に処理する方法についてまとめます。

以下の5つの空間領域に分けてみます。

領域1 気相

領域2 気相-液相界面

領域3 液相

領域4 液相-固相界面

領域5 固相

領域1 気相

考慮したい物理現象

レーザー光が溶接対象物に伝播する。一部は吸収され一部は反射され、再び対象物に伝播するかあるいは、周りの大気へ出て行く。

周りの大気が存在する。不活性気体を吹き込む場合もある。溶接対象物の温度等に影響を与える。

対象物の温度が、十分高温になる場合には、気化した金属物が、飛散していく。衝撃波が生じ、場合によっては超音速流れが生じる。

上記飛散物から場合によっては、プラズマが生じる。プラズマは場合によってはレーザー光を有意に吸収する。またそこで得たエネルギーは、溶接対象物へも伝達される。

数値的な取り扱い

数値的には実際にどれだけのレーザー光のエネルギーが表面まで届けられるのかを考慮するために、ray tracing monte calro による multi reflection の方法が用いられることが多いようだ。高エネルギーでプラズマが無視できない程度に生じる場合にはそれによる、レーザー光の減衰率も考慮される。またここでプラズマへ渡ったエネルギーはさらに溶接対象物へ伝播される。

今回の実装では、プラズマは考慮しない。

レーザー光の強度の空間変化と時間変化のみを考慮する。場合によっては(溶融物の自由界面が複雑になり、multi-reflection を考慮しなくてはいけない場合) ray tracing monte calro

により mult-reflection を考慮する。
Evaporation については領域 2 で述べます。

領域 2 気相-液相界面

考慮したい物理現象

ここでは Weld pool の形状を主に決定するさまざまな dynamics が生じる。表面張力では、通常考える、表面に垂直な方向への Young pressure の他に、表面に平行な方向への表面エネルギーの温度変化に起因する、表面力が作用する。これにより、表面に平行な方向へ、溶接溶融物はドライブされる。

レーザー光は吸収、反射され、熱エネルギーが供給される。それらは、レーザー光の波長、入射角、表面の状態、溶接対象物の特性により決定される。

溶接溶融物の温度が十分に高まると、表面からの evaporation が有意に生じ、また内部からも boiling によって、溶融物の雰囲気大気中への悲惨が生じる。その際、飛散した気化金属は、反跳として液面を押し込む方向へ、recoil pressure を生じる。高エネルギーレーザーにおいてはこれが非常に重要な表面形状決定要因になりうると考えられている。

数値的な取り扱い

気液界面の追跡には Level set 法を用いる。従来の Level set の気液 2 相流れに、evaporation による損失を考慮するための項を加える。(参考文献 1)

表面張力は Level set 法により比較的容易に組み込むことができる。

Evaporation によるエネルギーの損失、recoil pressure として渡される momentum は、やはり Ki らの論文から、気体分子運動論と compressible flow dynamics、Clasius-Clapeyron を組み合わせて、解析的、数値的に取り扱う。

Boiling は今回は考えない。

レーザー光の吸収、反射については Frenel の反射則等のモデルを用いる。あるいは数値的に入れ込む。

領域 3 液相

考慮したい物理現象

溶融物の convection flow、viscous flow、重力。

熱流れ。温度の変化。

数値的な取り扱い

溶融物の流体解析は、非圧縮流体ソルバーを用いる。explicit なら Harlow-Welch による方法が経験もあってよいのだが、後に述べる、液固界面の取り扱いには、Patankar による semi-implicit のほうが定評があるようだ。熱解析(温度の計算等)も上のふたつを候補にしたい。

領域3 液相-固相界面

考慮したい物理現象

合金における気液界面は複雑なデンドライト等のミクロな形状を生じる。これらは相図における liquidus から solidus にわたる温度範囲で完全な液体から完全な固体の中間の温度領域に生じる。合金でなければ、温度によってきちっと気液界面の線が引ける。

数値的な取り扱い

デンドライトをきちっと追いかけるとすると、phase field を用いることになるのだが、それをするには対象が大きすぎるように思う。どこまでミニマムの分解能が置けるかは、メモリ等のコンピュータリソースに依存する問題で、この問題を実際にどのように扱っているかを、いくつかの文献と経験からまとめると、粗いものから下へ向けて、細かいものへ以下のようなになるだろう。

固相の速度を0にする。(グリッドごと)

固相の速度を0にする。(Level set で分ける)

Mixture theory あるいは volume average 法によりある種の平均を取り扱う。

Phase field できちりデンドライト等をとく。

溶接関係の論文では上の3つが多い。今回の実装では、mixture theory に基づく方法を用いる予定である。Solidus 温度から liquidus 温度にむけてなだらかに気相と液相の性質が変化する。場合によっては、上から2番目も視野に入れる。

領域5 固相

考慮したい物理現象

熱流れ。温度の変化。

数値的な取り扱い

熱流解析は、explicit か Patankar にする予定。

以上を現在のところ考えております。