

B30 多層溶接における縦方向変形に対する 諸因子の影響に関する検討

Study on the Influence of Various Factors on Longitudinal Deformation in Multi-pass Welding.

大阪府立大学
工学域 機械系学類
海洋システム工学課程
生島研究室 B4 熊田 裕之

多層溶接

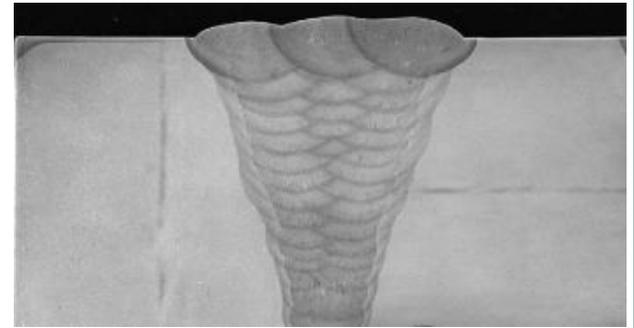
船舶などの大型構造物建造には
厚板の接合が必要



多層溶接が用いられる



https://www.youtube.com/watch?v=YR3__itc00E



https://www.komaihaltec.co.jp/tec/pdf/2015/vol5_3-3.pdf

厚板の多層溶接の問題点

・板厚が大きく剛性が高い→溶接変形の矯正が困難



- ・溶接変形の正確な予測
- ・変形を小さく抑えられる溶接条件の設定

必要

現状では、これらを技術者の実験的知見に頼っている

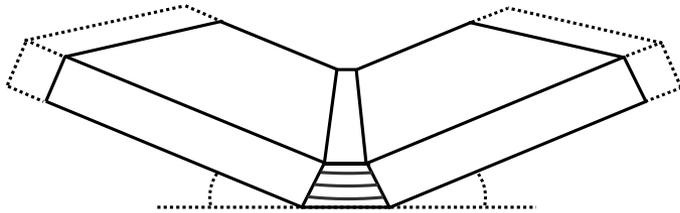
多層溶接の変形予測手法

- ・実験→膨大なパターンの実験は経済的なコストが大きい
- ・数値シミュレーション→大規模構造のため計算時間が膨大

溶接変形を簡易に予測できる手法の確立が重要

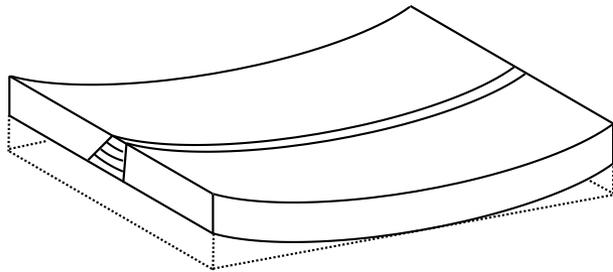
多層溶接における溶接変形の簡易予測に関する先行研究

横変形(角変形・横収縮)



力学モデルを用いた簡易手法が提案されている

縦変形(縦曲り・縦収縮)



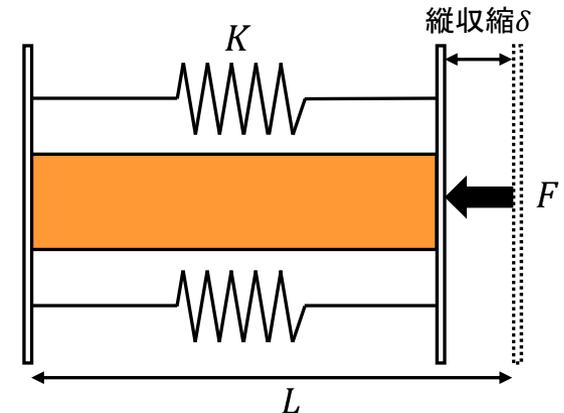
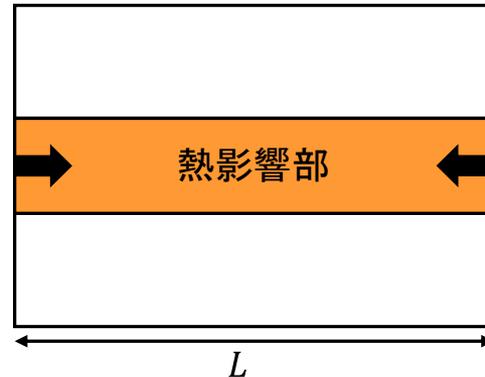
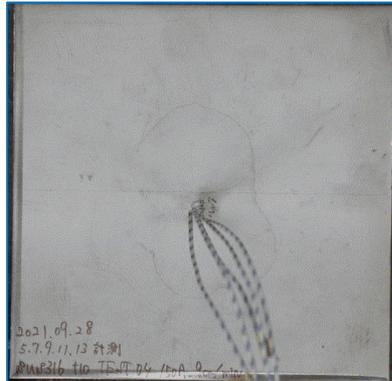
予測手法や変形に影響を与える因子に関する検討例が少ない

本研究の目的

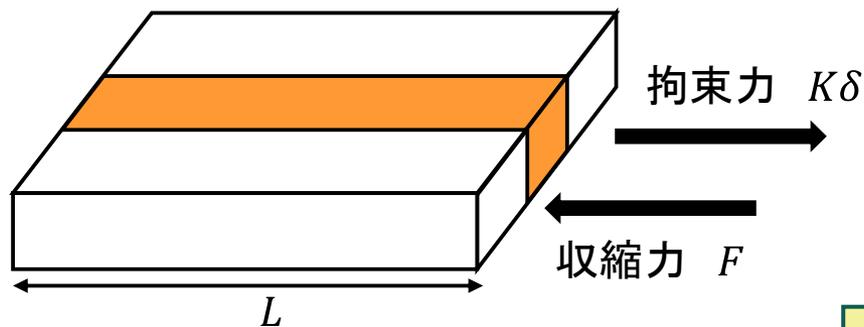
多層溶接における縦変形の簡易予測手法の確立にむけて、縦曲りに対する諸因子(入熱量、開先角度、板形状)の影響についてFEMを用いて検討し、縦方向の変形挙動について考察する

溶接における縦変形の理論

ビードオン溶接における縦変形のモデル化



溶接により熱影響部が収縮→**収縮力を受ける弾性体**としてモデル化



断面積 A
ヤング率 E

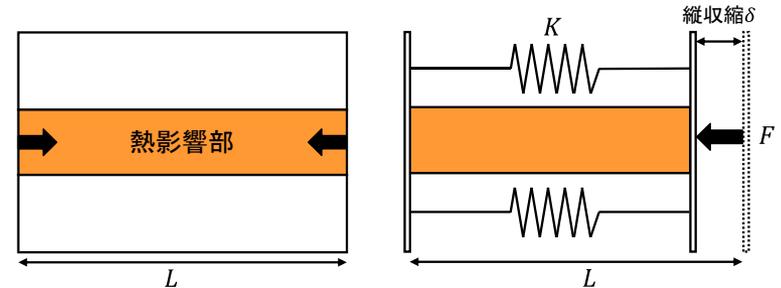
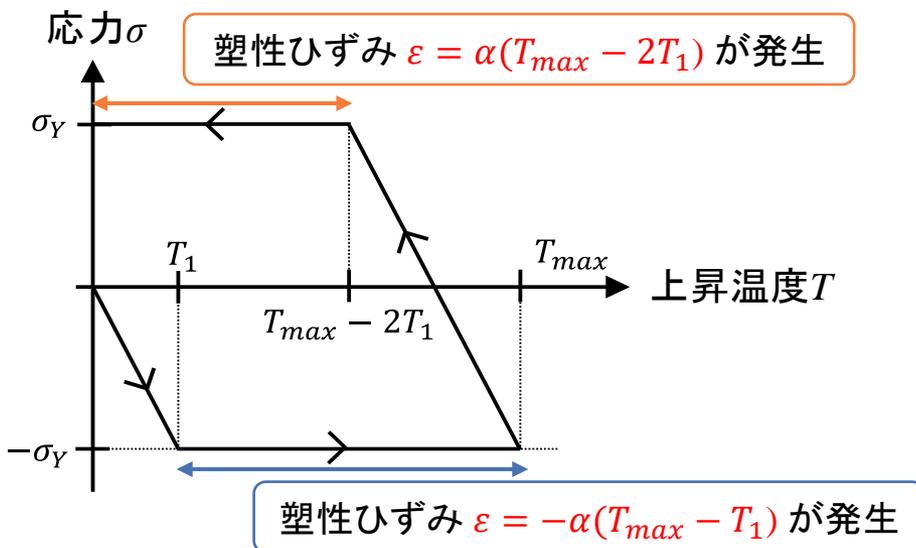
ばね剛性 $K = \frac{AE}{L}$
力のつり合い $F = K\delta$

熱影響部の**収縮力 F (Tendon Force)**
の発生原理と大きさについて考える

Tendon Force の発生原理

熱影響部における溶接時の熱膨張・冷却時の熱収縮が周囲の拘束によって阻まれる

⇒ 塑性ひずみ(固有ひずみ)が生まれ、収縮力となる Tendon Force が発生



- T_1 ... 熱ひずみにより部材が降伏する温度
- α ... 線膨張係数
- σ_Y ... 降伏応力
- T_{max} ... 最高到達温度
- E ... ヤング率

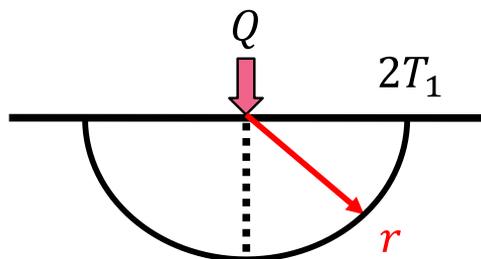
$$\text{固有ひずみ } \varepsilon^* = -\alpha(T_{max} - T_1) + \alpha(T_{max} - 2T_1) = -\alpha T_1$$

$T_{max} > 2T_1$ となる領域を S とすると、Tendon Force F は収縮を正として

$$F = - \int_S E \varepsilon^* dS = \alpha E T_1 \int_S dS$$

Tendon Force の計算

最高到達温度が $2T_1$ を超える領域を考える;

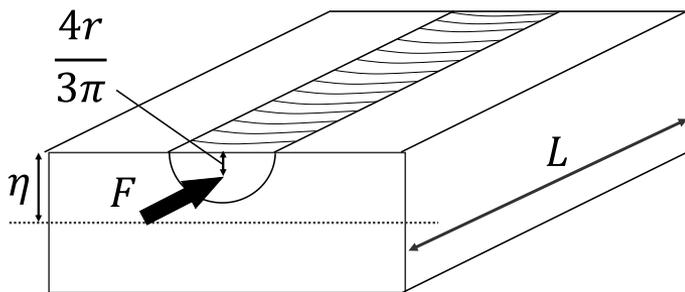


$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi e c \rho T_1}}, \quad \int_S dS = \frac{Q}{e c \rho T_1}$$

Q : 入熱量(単位長さあたり) c : 比熱 ρ : 密度

Tendon Force F は、

$$F = \frac{\alpha E}{e c \rho} Q$$



断面積: A

断面二次モーメント: I

変形量は入熱量にほぼ比例

縦収縮

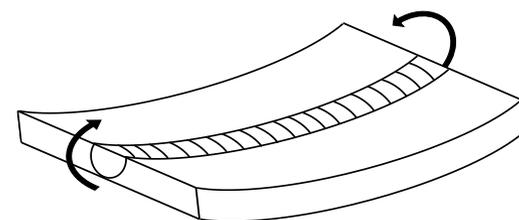
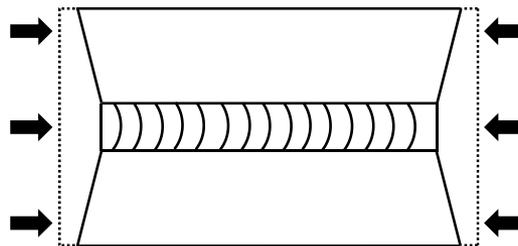
縦収縮量

$$\delta = \frac{FL}{AE} = \frac{\alpha L}{e c \rho} Q$$

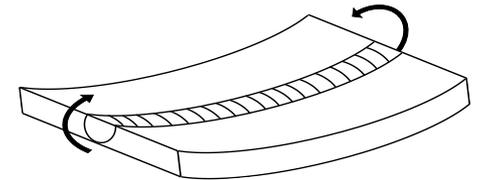
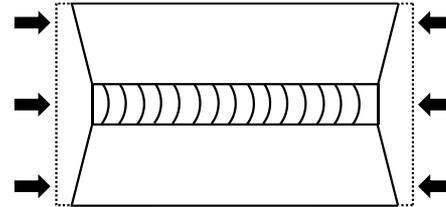
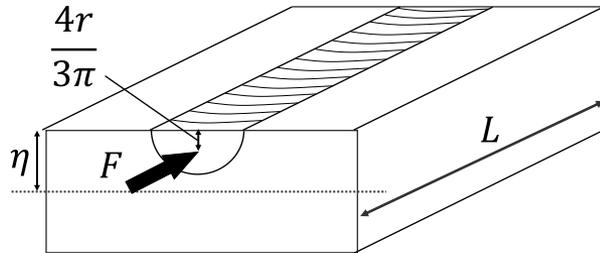
縦曲り

曲率

$$\kappa = \frac{\alpha}{e c \rho I} \left(\eta - \frac{4r}{3\pi} \right) Q$$



ビードオン溶接における縦変形の理論(再掲)



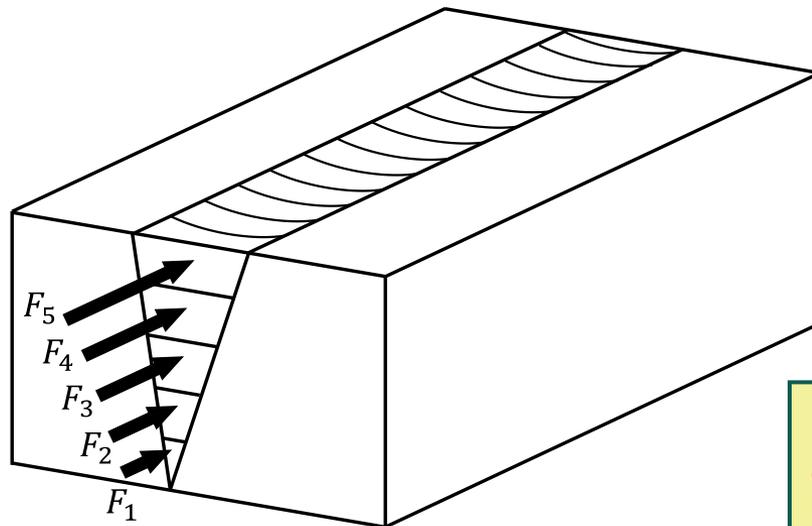
縦収縮

縦収縮量 $\delta = \frac{FL}{AE} = \frac{\alpha L}{ec\rho} Q$

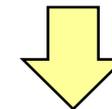
縦曲り

曲率 $\kappa = \frac{\alpha}{ec\rho l} \left(\eta - \frac{4r}{3\pi} \right) Q$

多層溶接への応用



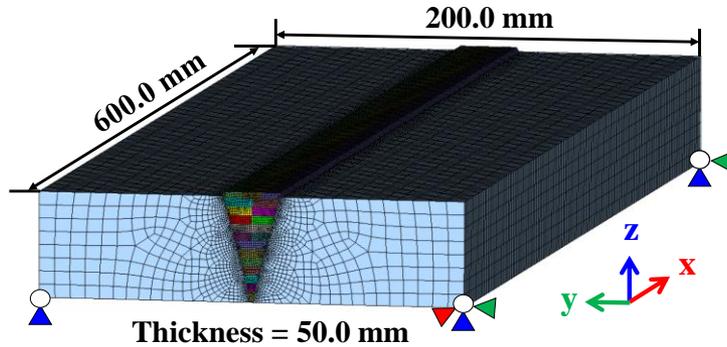
多層溶接をビードオン溶接の積み重ねと考えるとモデル化



多層溶接における縦変形の変形挙動・諸因子が及ぼす影響が説明可能か検証

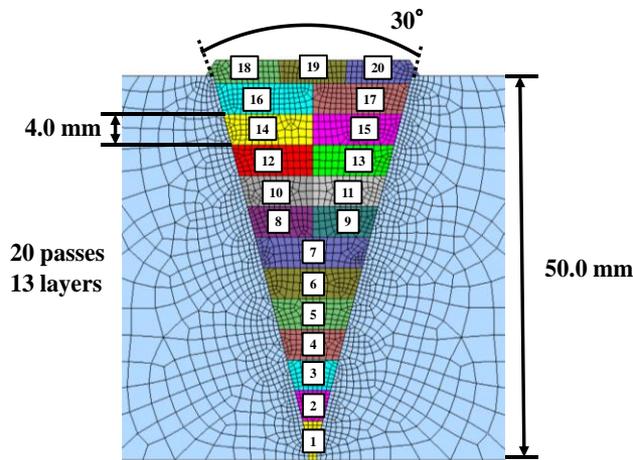
多層溶接の縦変形に諸因子が及ぼす影響

基本モデル形状・溶接順序



Thickness = 50.0 mm

Nodes : 456,322
Elements: 441,900

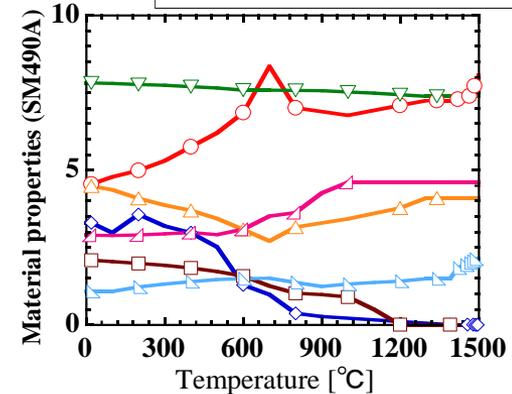


20 passes
13 layers

50.0 mm

材料定数

- : Specific heat [10^2 J/kg K]
- ▽: Density [10^{-6} kg/mm^3]
- △: Thermal conductivity [10^{-2} W/mm K]
- ◇: Yield stress [10^2 MPa]
- : Young's modulus [10^2 GPa]
- ▲: Thermal expansion coefficient [$10^{-5} / \text{K}$]
- ▽: Poisson's ratio [10^{-1}]

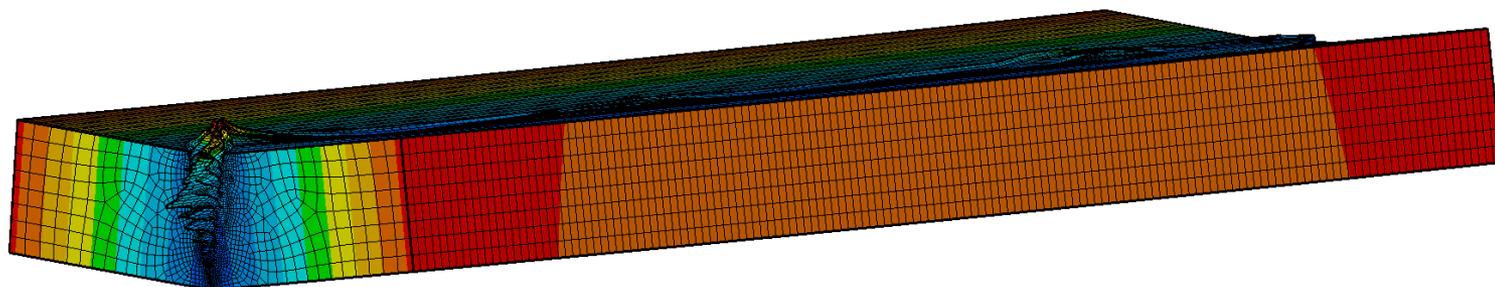
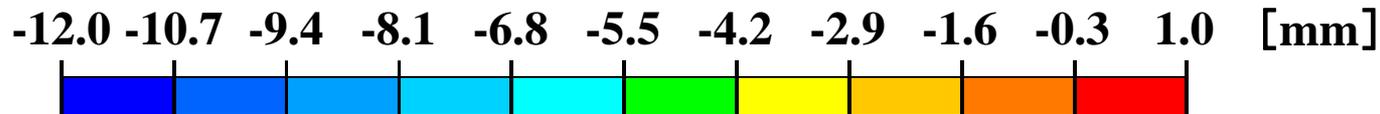


溶接条件

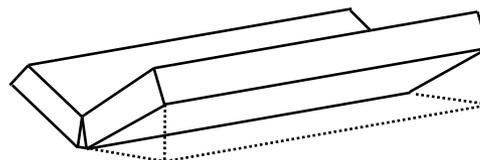
単位長さ・面積当たり 入熱量	30.0 [J/mm^3]
溶接速度	10.0 [mm/s]

上記の基本モデルから入熱量・開先角度・板厚をそれぞれ変更して解析
 → 各パラメータが縦曲がりに及ぼす影響について整理し、変形挙動について考察

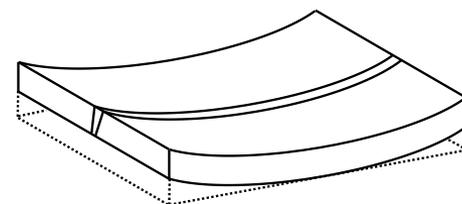
Z方向変位分布



Z方向変位は角変形・縦曲りの重ね合わせであることがわかる



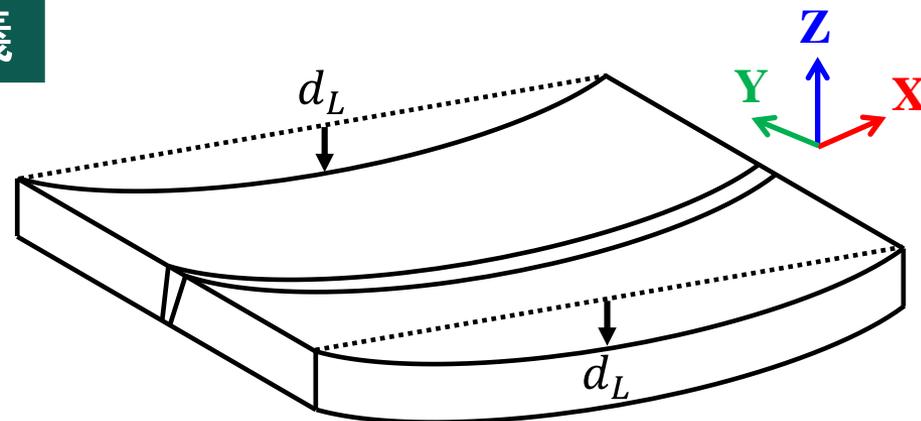
角変形



縦曲り

本研究における縦曲がり量の定義

左右両端における溶接線方向の中央と両端での平均Z方向変位差を縦曲がり量と定義



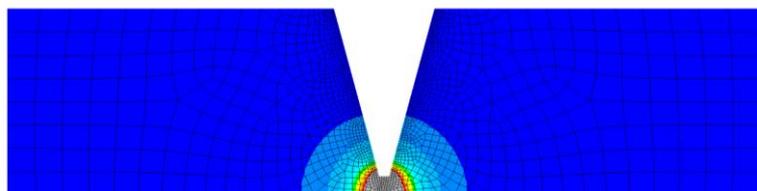
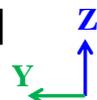
入熱量が縦曲がりに及ぼす影響

入熱条件

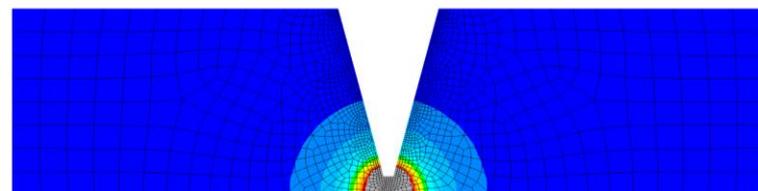
単位長さ・面積当たりの入熱量 $Q[\text{J}/\text{mm}^3]$					
30.0	36.0	42.0	48.0	54.0	60.0

最高到達温度分布

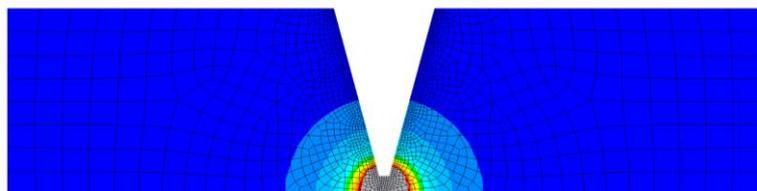
20.0 51.5 83.1 114.6 146.2 177.7 209.2 240.8 272.3 303.9 335.4 [°C]



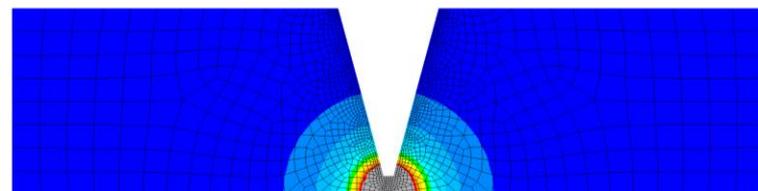
$Q = 30.0[\text{J}/\text{mm}^3]$



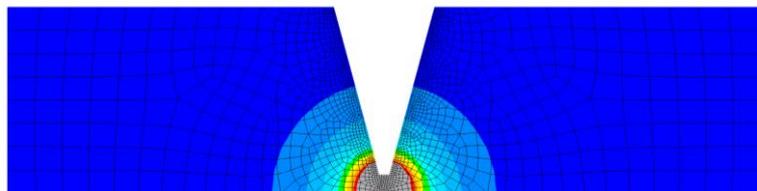
$Q = 36.0[\text{J}/\text{mm}^3]$



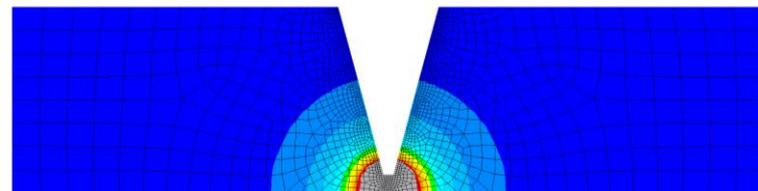
$Q = 42.0[\text{J}/\text{mm}^3]$



$Q = 48.0[\text{J}/\text{mm}^3]$



$Q = 54.0[\text{J}/\text{mm}^3]$



$Q = 60.0[\text{J}/\text{mm}^3]$

固有ひずみが発生する領域は概ね円形で、入熱量が大きいほど大きくなる

板側面におけるZ方向変位分布

-1.00 -0.89 -0.78 -0.67 -0.56 -0.45 -0.34 -0.23 -0.12 -0.01 0.10 [mm]



$Q = 30.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



$Q = 36.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



$Q = 42.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



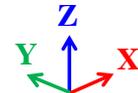
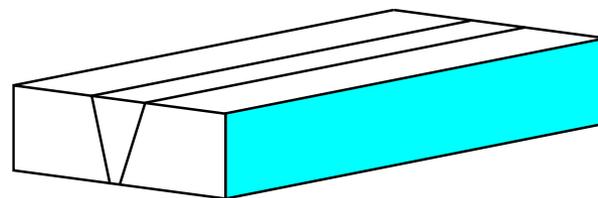
$Q = 48.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



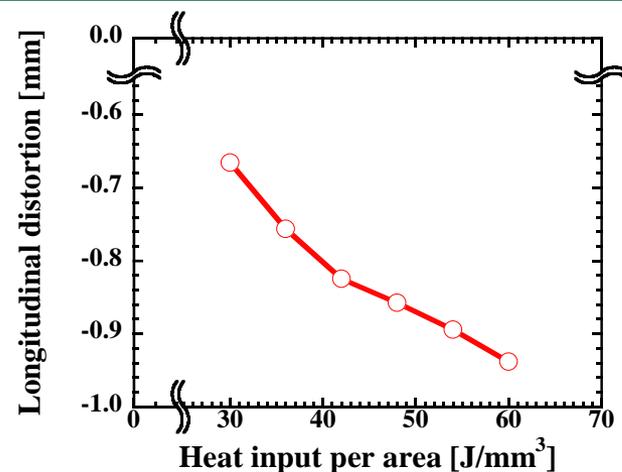
$Q = 54.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



$Q = 60.0 \text{ [J/mm}^3\text{]}$



入熱量と最終縦曲がり量の関係



- ・入熱量が大きいと縦曲がり量も大きくなる
- ・縦曲がり量と入熱量は比例する

先述した入熱量と曲率の関係は多層溶接においても有効である

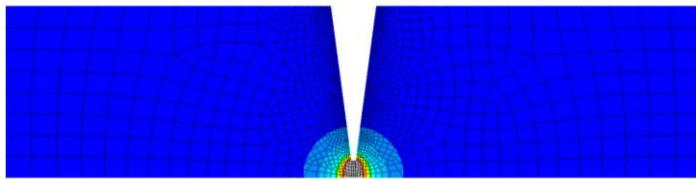
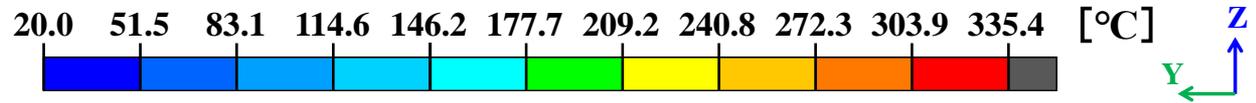
開先角度が縦曲がりに及ぼす影響

開先角度が縦曲がりに及ぼす影響

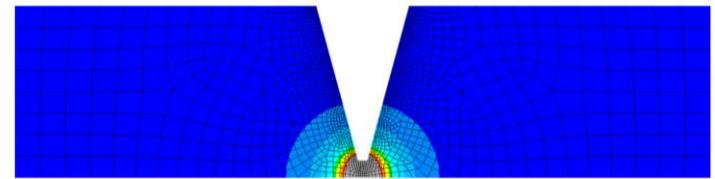
解析条件

開先角度[°]	15	30	45	60	75
パス数	14	20	27	37	50

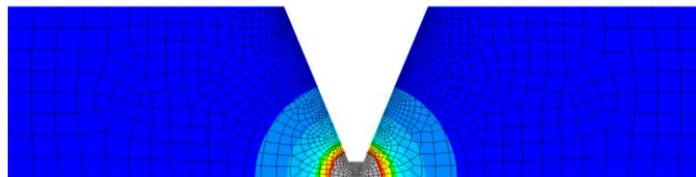
最高到達温度分布



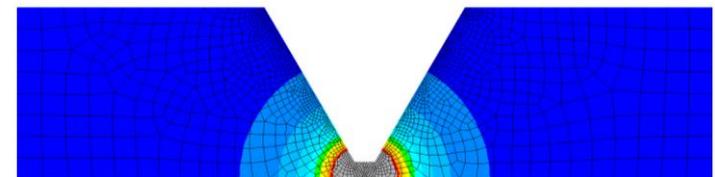
開先角度15°



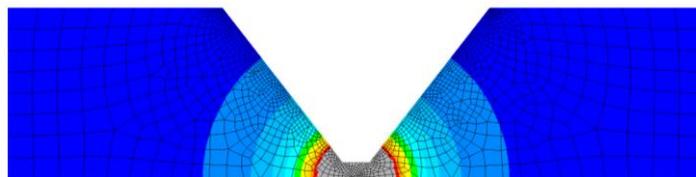
開先角度30°



開先角度45°



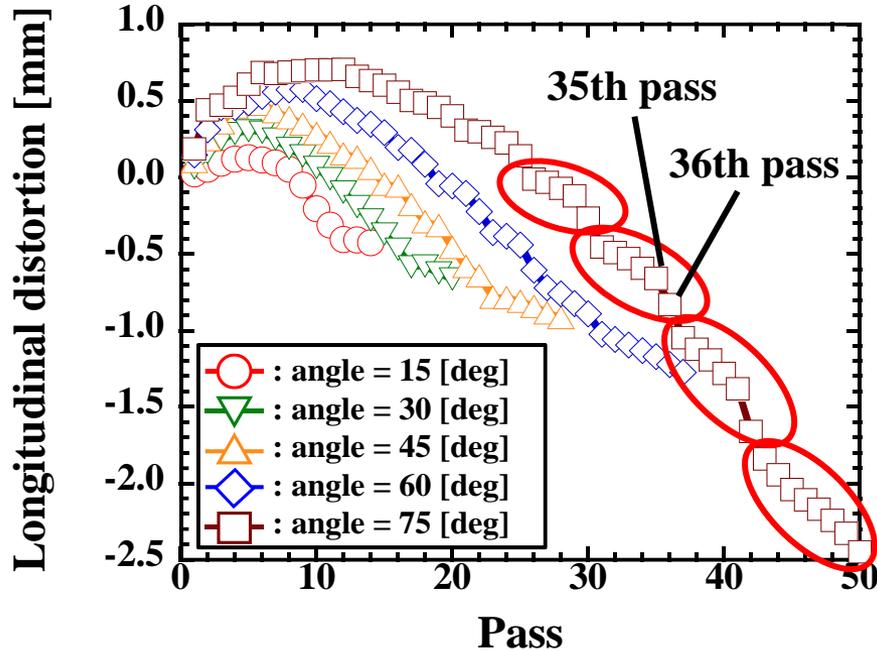
開先角度60°



開先角度75°

開先角度が大きくなるとパス数が増える

1パスごとの変形履歴

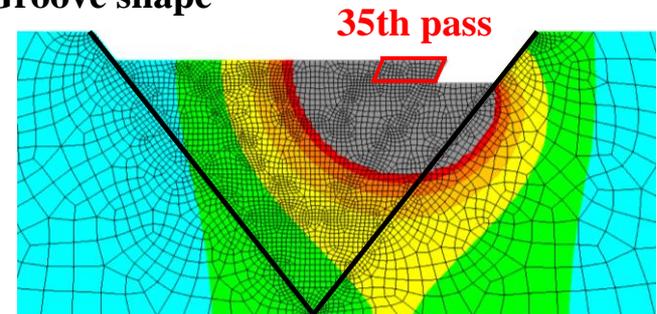


- ・1パスごとの変形量は層が変わると大きく変化する
- ・同じ層の中では層内最終パスが変形が大きい

35, 36パス目の比較

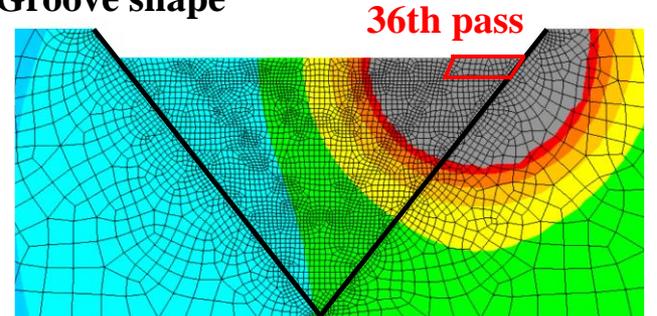


Groove shape



最高到達温度(35パス)

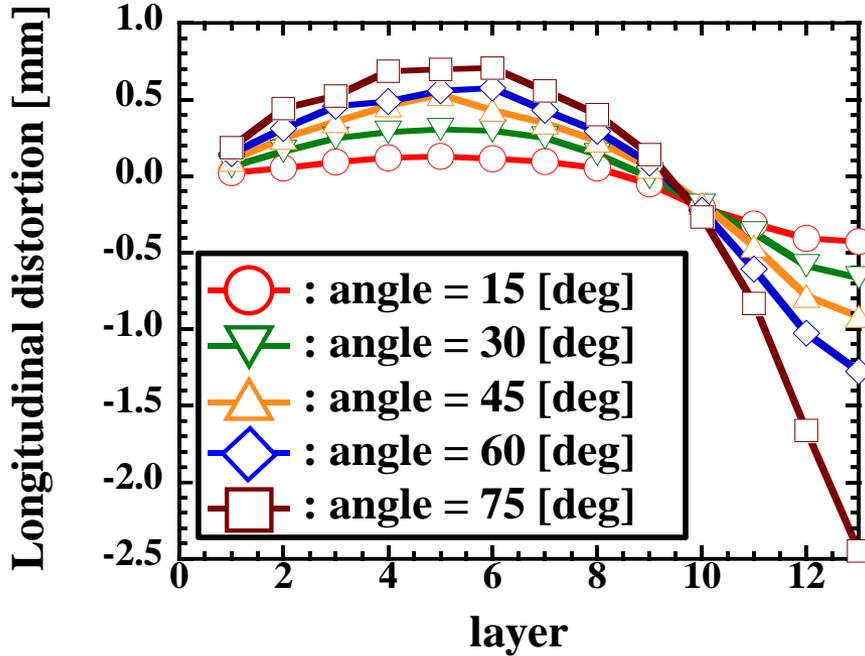
Groove shape



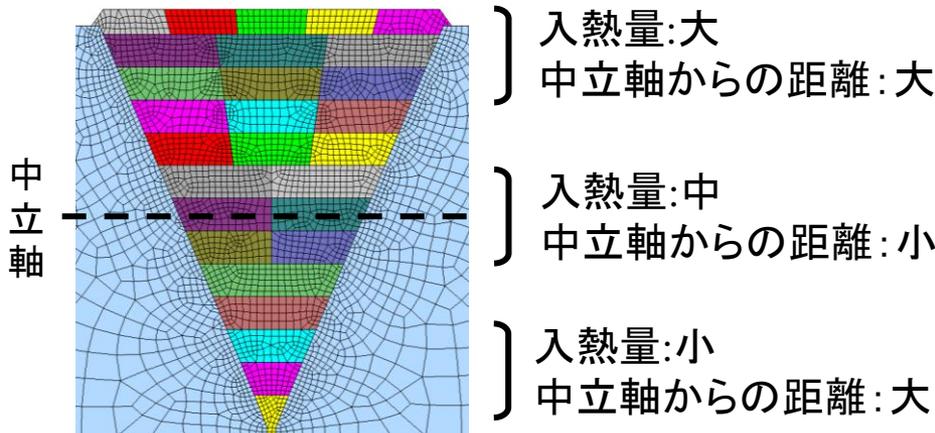
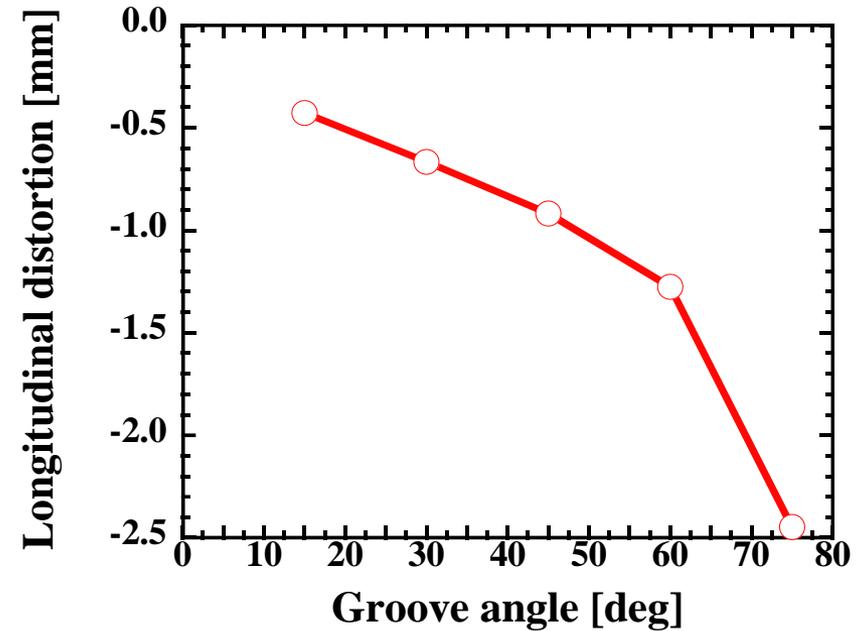
最高到達温度(36パス)

- ・周辺部材との接触面積が大きいと拘束が強くひずみが入りやすい
- ・母材への熱伝導の効率が上がり温度が上昇しやすい

1層ごとの変形履歴



開先角度と最終縦曲り量の関係



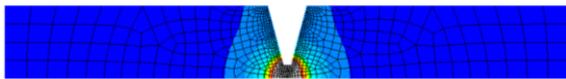
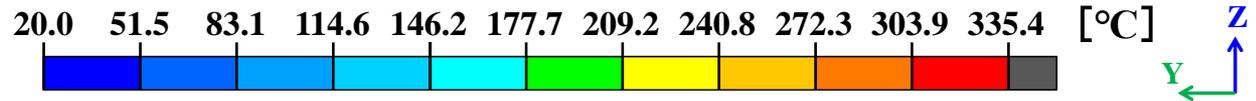
- ・開先角度が大きいと変形も大きくなる
- ・前半の溶接においては上に凸
後半の溶接においては下に凸の変形となる
- ・溶接途中の層ごとの変形挙動は同じである
- ・表面付近の溶接による変形が大きく
最終変形への寄与率が高い

板厚が縦曲がりに及ぼす影響

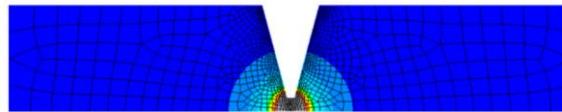
解析条件

板厚[mm]	26	38	50	62	74
層数	7	10	13	16	19
パス数	8	13	20	29	38

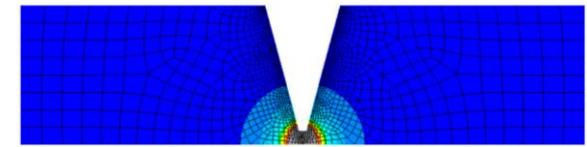
最高到達温度分布



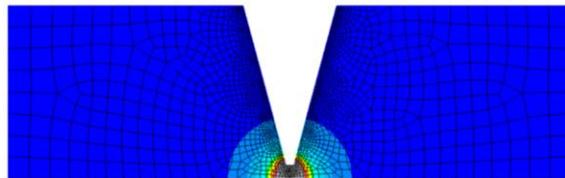
板厚26[mm]



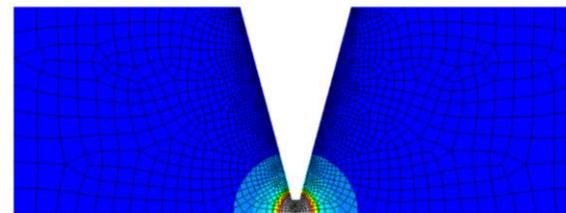
板厚38[mm]



板厚50[mm]



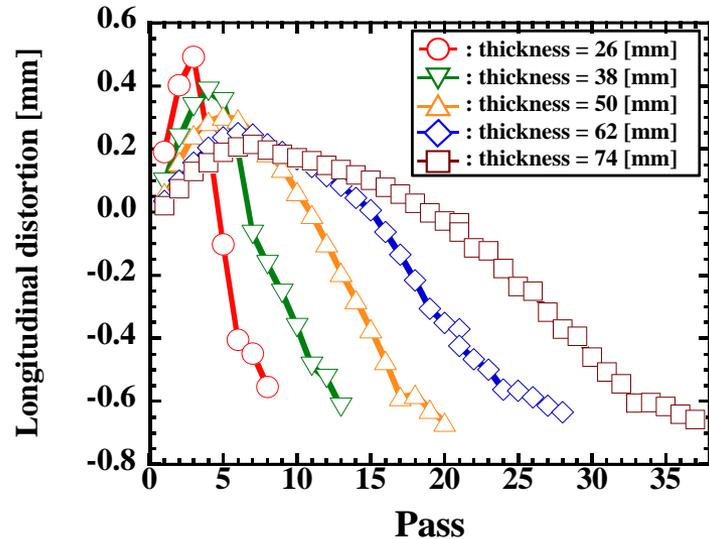
板厚62[mm]



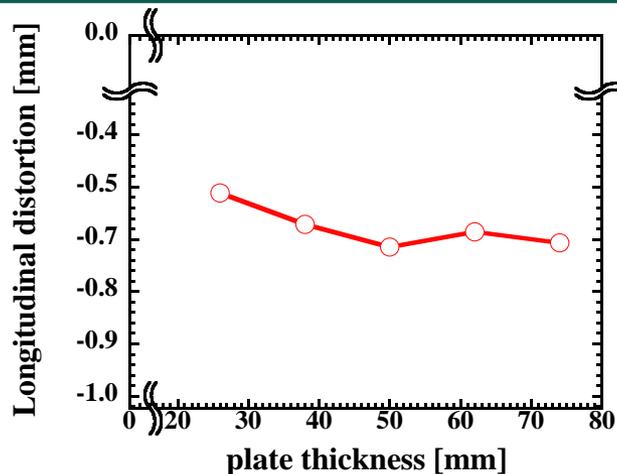
板厚74[mm]

板厚が大きくなると層数とパス数が増える

1パスごとの変形履歴

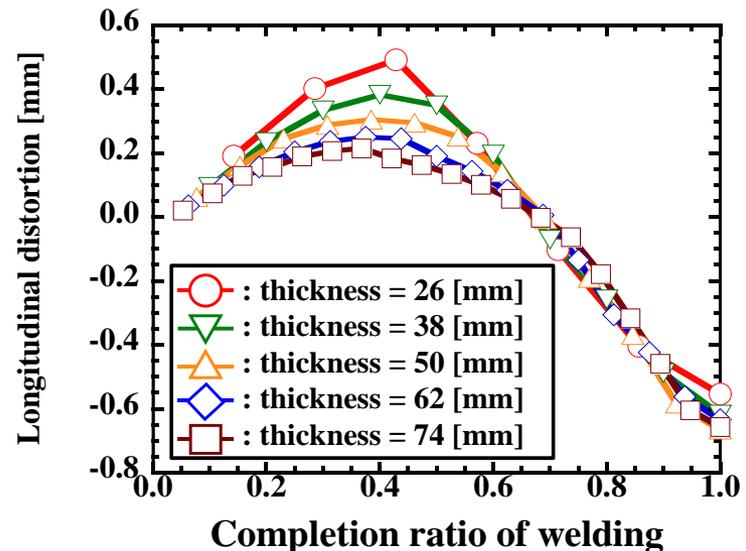


板厚と最終縦曲り量の関係



積層率と変形履歴の関係

$$\text{積層率} = \text{溶接完了層の厚さ} / \text{板厚}$$



- ・板厚が薄いと途中の変形が大きくなる
- ・最終的な縦曲がり量は板厚によらずほぼ一定
- ・溶接層の積層率で比較すると変形挙動が一致

本研究では、理想化陽解法FEMを用いて多層溶接のシミュレーションをすることで、多層溶接における溶接条件や開先形状、板形状が縦曲りに及ぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

1. 入熱量が溶接変形に及ぼす影響について、パス面積あたりの入熱量が大きいと縦曲りが大きくなり、その関係はほぼ線形であることが確認できた。
2. 同じ層内のパスについては、後から溶接するパスの方が、変形が大きくなることがわかった。これは後から溶接するパスは周囲からの拘束により塑性ひずみが発生しやすいためであると考えられる。
3. V開先の多層溶接における縦曲りの最終変形においては、最終層付近の変形の寄与率が大きいことがわかった。理由として、最終層付近は開先幅が大きく1層あたりの入熱量が大きくなることと、溶接層と中立軸の距離が大きく、曲げモーメントが大きくなることが考えられる。
4. 板厚は縦曲りの大きさに寄与しないことが確認された。これは開先角度と入熱量が一定の場合、Tendon Force の分布が相似になるからであると考えられる。