

## レーザによる熱可塑性プラスチックのラップ接合\* (第3報, 数値シミュレーションによる接合条件の検討)

長谷川 達也\*<sup>1</sup>, 高井 雄一郎\*<sup>2</sup>, 土井 晋太郎\*<sup>3</sup>  
中村 隆\*<sup>4</sup>, 前田 知宏\*<sup>5</sup>

### Laser Lap Welding of Thermoplastic Plates (3rd Report, Discussions on Welding Conditions by Means of Numerical Simulation)

Tatsuya HASEGAWA\*<sup>6</sup>, Yuichiro TAKAI, Shintaro DOI,  
Takashi NAKAMURA and Tomohiro MAEDA

\*<sup>6</sup> Nagoya University, Center for Integral Research in Science and Engineering,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Laser lap welding of PMMA was numerically simulated on the basis of heat transfer equation. When the laser energy was converted into heat only at the transparent/opaque thermoplastic interface, the energy flux necessary for a fixed temperature increase was proportional to the  $-0.5$  power of the irradiation time of laser. This relation was exactly the same as that predicted by dimensional analysis, while it was different from the experimental results with a power index of  $-0.7$ . When the laser energy was absorbed and converted into heat in the opaque thermoplastic plate and radiated from the interface, the energy flux became close to the experimental data and proportional to the  $-0.7$  power of the irradiation time.

**Key Words:** Lap Welding, Thermoplastics, Laser, Heat Transfer, Numerical Simulation

#### 1. 緒 論

透明と不透明の2枚の熱可塑性プラスチックを重ね合わせ、透明プラスチック側からレーザを照射して、両プラスチックの接触面において加熱溶融現象を起こして接合する加工法をレーザラップ接合<sup>(1)</sup>(図1)と呼ぶ。このレーザラップ接合は接着剤が不要であり、安全でリサイクルしやすい部品を作ることができる。また局所的に加熱するので熱ひずみが小さく、精密な溶接が可能である。それゆえ自動車部品や医療器具などの製造に使われ始めている。

本研究の第1報<sup>(2)</sup>においては、ポリアミド(PA)などの熱可塑性プラスチックのラップ接合の単位面積当たりのせん断強度(接合強さ)がレーザ強度によってどのように変化するか、接合状態がどのように変化す

るのかを調べた。そしてレーザ強度の増加とともに接合部が広がり接合強度は大きくなるが、ある臨界レーザ強度を超えると界面が凹凸になり、さらに空洞が出現して接合強度が減少すること、レーザ強度をさらに増加させるとスプラッシュ現象が起こることを明らかにした。また接合部に無機物などの光吸収物質を挟み込めば、透明の熱可塑性プラスチック同士でも接合が可能であることを示した。第2報<sup>(3)</sup>では、ポリメタクリル酸メチル(PMMA)について、レーザ強度だけでなく、スポット径、走査速度が接合に与える影響を調べ

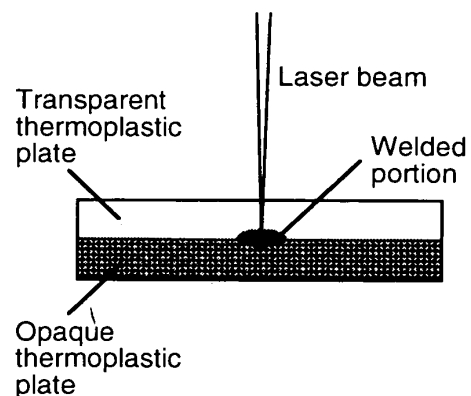


Fig. 1 Laser Lap welding of transparent and opaque thermoplastic plates

\* 原稿受付 2001年9月28日。

<sup>1</sup> 正員, 名古屋大学理工学総合研究センター(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。

<sup>2</sup> 日本写真印刷株式会社(☎604-8551 京都市中京区壬生花井町3)。

<sup>3</sup> 日立建機(株)(☎112-0004 東京都文京区後楽2-5-1)。

<sup>4</sup> 正員, 名古屋工業大学(☎466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

<sup>5</sup> 丸文(株)中部支社(☎450-0003 名古屋市中村区名駅南1-17-23)。

E-mail: hasegawa@cirse.nagoya-u.ac.jp

空洞やスプラッシュを発生させることなく接合することのできる接合可能限界を明らかにした。また次元解析によってレーザーエネルギー流束とレーザー照射時間の理論関係式を求め、実験結果が理論と似た傾向を示すことを明らかにした。本報では、熱伝導方程式に基づいてPMMAのレーザーラップ接合の数値シミュレーションを行い、温度分布や最大到達温度、接合限界におけるレーザーエネルギー流束とレーザー照射時間との関係について実験との比較検討を行った。

## 2. 数値シミュレーション

**2.1 モデル** レーザラップ接合は接合面に垂直方向の熱伝達とレーザー走査による熱源移動が現象を支配すると考えられる。ここでは奥行き方向の熱伝導を考慮しない二次元モデルを用いて数値シミュレーションを行った。レーザー照射領域は円形であり、本来は奥行き方向の熱伝導を考慮した三次元の数値シミュレーションが必要である。しかし事前に行った予備的な計算によれば、三次元の場合、二次元の場合に比べて最大温度上昇が8%減少するだけであった。したがって二次元で数値シミュレーションすることによって大きな影響はないと考えられる。

本研究で用いたモデルを図2に示す。重ね合わせた板厚  $H$  [m] の透明/不透明熱可塑性プラスチックの透明プラスチック側からスポット径  $d$  [m] のレーザー光が入射する。試料を移動させる方向に  $x$  軸をとり、板厚方向に  $z$  軸をとる。 $x$  軸方向の計算領域の長さは  $L$  [m] とする。レーザー光のエネルギー流束  $q$  [W/m<sup>2</sup>] は式(1)のようなガウス分布をしている。

$$q(x) = \frac{8P}{\pi d^2} \exp\left[-\frac{8(x-d)^2}{d^2}\right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

レーザースポット径  $d$  はガウス分布の指数部が  $1/e^2$  となる点で定義される。

式(1)で  $P$  [W] はレーザーパワーであり、レーザー光の中心は  $x=d$  にある。不透明プラスチックの表面でレーザー光が熱に変換されると仮定して、レーザー光をこの位置に固定して試料を  $x$  方向に速度  $U$  [m/s] で移動

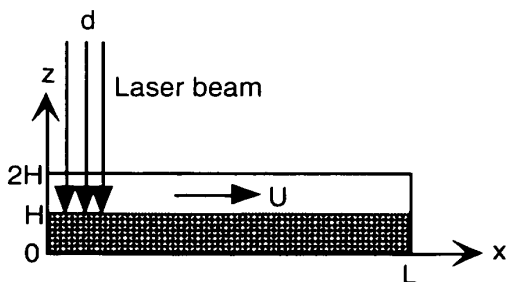


Fig. 2 Simulation model for laser lap welding

させる。このとき温度場は上下対称になるので計算領域は上半分とする。

透明/不透明熱可塑性プラスチックの密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], 比熱  $C$  [J/kg·K], 熱伝導率  $\lambda$  [W/m·K] は同じで一定とする。PMMAのような非晶質プラスチックでは、ガラス遷移点  $T_g$  と融点  $T_m$  は存在するが、結晶化度が零なので融解熱は零である。したがって内部エネルギーと温度の関係は図3のように線形となる。

**2.2 基礎式** 2.1節のモデルに基づくと、エネルギー方程式と境界条件は以下のように書ける。

[エネルギー方程式]

$$\frac{\partial e}{\partial t} + U \frac{\partial e}{\partial x} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T(e)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(e)}{\partial z^2} \right] \quad \dots\dots (2)$$

[接合面における熱流速条件]

$$\frac{\partial e'}{\partial t} = 2\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \eta q(x) \quad \text{at } z=0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

[計算領域の境界条件]

$$e = e_i = \rho C T_i \quad \text{at } x=0 \text{ and } z=H \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = 0 \quad \text{at } x=L \quad \dots\dots\dots (5)$$

[初期条件]

$$e = e_i = \rho C T_i \quad \text{at } t=0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $e' = e/\delta(z)$  [J/m<sup>2</sup>],  $\delta(z)$  はデルタ関数,  $\eta$  は厚さ  $H$  [m] の透明試料の透過率である。

**2.3 数値計算法** 式(2)を対流と熱伝導のそれぞれについて演算子分割法を用いて計算を行う。

[対流]

$$\frac{\partial e}{\partial t} + U \frac{\partial e}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

[熱伝導]

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T(e)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(e)}{\partial z^2} \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

対流項の演算子を  $L_c$ , 熱伝導項の演算子を  $L_h$  とすると,  $e(t)$  の時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  後の解  $e(t + \Delta t)$  は以下のように表すことができる。

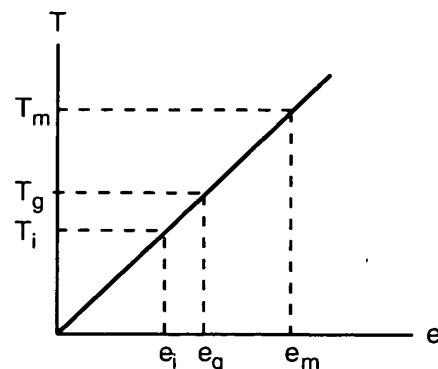


Fig. 3 Relation between internal energy and temperature

$$e(t+\Delta t) = L_h\left(\frac{\Delta t}{2}\right)L_c(\Delta t)L_h\left(\frac{\Delta t}{2}\right)e(t) \dots (9)$$

ここで  $L_c$ ,  $L_h$  が時間二次精度であれば, 全体として時間二次精度を保つ。

対流については, 対流速度一定の場合に差分化による時間・空間数値誤差がほとんどない CIP 法<sup>(4)</sup> を用いた。熱伝導については空間微分には中心差分, 時間積分には予測子-修正子法を用い, 空間・時間二次精度で数値計算を行った。時間間隔  $\Delta t$  は, 拡散方程式の安定条件を満たすように設定した。また界面での境界条件に現れるデルタ関数  $\delta(z)$  は  $1/\Delta z$  で近似した。

**2.4 計算条件** PMMA の物性値<sup>(5)-(7)</sup> は表 1 に示される。試料厚さは 3 mm, 計算領域の長さは 20 mm とし, 初期温度は 300 K とした。厚さ 3 mm の透明 PMMA 試料の赤外レーザー光 (820 nm) の透過率は 93% である<sup>(2)</sup>。用いた格子点数は  $x$  方向に 335 点,  $z$  方向に 151 点であり, 格子間隔は  $\Delta x = 0.06$  mm,  $\Delta z = 0.02$  mm となる。

### 3. 計算結果と考察

**3.1 温度分布** 数値シミュレーションによって得られたレーザー照射開始後 5 秒後の PMMA の初期温度 (300 K) からの温度上昇の分布を図 4 に示す。計算条件は上限界に対応する  $P = 1.54$  W,  $d = 1.6$  mm,  $U = 2$  mm/s,  $\eta = 0.93$  であり, 不透明試料表面に到達したレーザー光は 100% 熱に変換されると仮定してい

Table 1 Physical properties of PMMA

	PMMA
Density [ $10^3$ kg/m <sup>3</sup> ]	1.17
Cristalinity [%]	0 (amorphous)
Specific heat [kJ/kg·K]	1.47
Heat conductivity [J/m·s·K]	0.167~0.251
Glass transition point [K]	363~378
Melting point [K]	473
Pyrolysis temperature [K]	633
Heat of fusion [kJ/kg]	0 (amorphous)

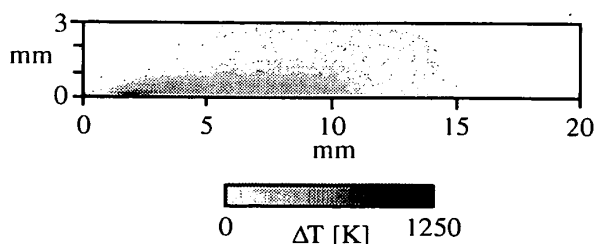


Fig. 4 Temperature distribution of a thermoplastic plate

る。図 4 よりレーザー照射部中心において温度上昇が最も大きくなること, 板厚方向だけでなくレーザー走査方向へ温度上昇部が広がっていることがわかる。ただしこのケースでは最大温度上昇は 1214 K に達し明らかに現実的ではない。これはレーザー光の吸収が不透明試料表面のみで起きると仮定したこと, 輻射損失を考慮していないことが原因であると考えられる。

**3.2 接合可能限界におけるレーザーエネルギー流束とレーザー照射時間の関係** 不透明試料の表面でのみレーザー光が熱に変換されると仮定した次元解析によればレーザーエネルギー流束  $q$  とレーザー加熱時間  $\tau$  の関係は以下のように表される<sup>(3)</sup>。

$$q \propto \alpha^{0.5} \tau^{-0.5} C_H \Delta T \dots (10)$$

ここで  $\alpha$  は熱拡散率,  $C_H (= \rho C)$  は単位体積当たりの熱容量,  $\Delta T$  は初期温度からの温度上昇である。式 (9) にレーザーエネルギー流束の定義  $q = 4P/(\pi d^2)$  とレーザー加熱時間の定義  $\tau = d/U$  を代入すればレーザー出力  $P$  は  $U$ ,  $d$  の関数として以下のように表される。

$$P \propto \alpha^{0.5} U^{0.5} d^{1.5} C_H \Delta T \dots (11)$$

式 (10), (11) において物性値を含めた比例定数を  $A$  とすると次のように書ける。

$$q = A \tau^{-0.5} \Delta T \dots (12)$$

$$P = A U^{0.5} d^{1.5} \Delta T \dots (13)$$

PMMA の物性値を与え, さまざまなレーザー強度, レーザー走査速度, レーザスポット径において数値シミュレーションを行った。得られた最大温度上昇  $\Delta T_{\max}$  に基づいて  $q/\Delta T_{\max}$  と  $\tau$  の関係を表すと図 5 のようになる。レーザーエネルギー流束  $q/\Delta T_{\max}$  は  $\tau^{-0.5}$  に比例しており, その比例定数は  $A = 0.00077$

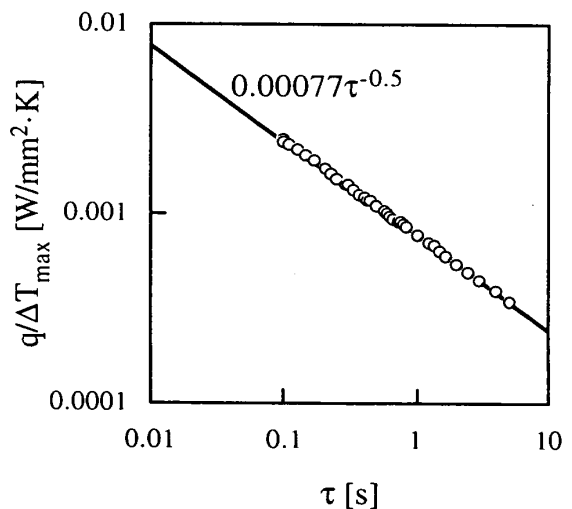


Fig. 5 Relation between laser energy flux divided by maximum temperature increase and irradiation time for PMMA lap welding

[Ws<sup>0.5</sup>/mm<sup>2</sup>·K]である。したがって、数値シミュレーションからも式(12)および式(13)の関係式が成り立つことが示される。

レーザーラップ接合を行った場合、これ以下のレーザーエネルギー流束ではレーザーラップ接合ができないという限界を下限界と定義し、レーザーエネルギー流束が大きくなり、接合部に空洞を生じる限界を上限界と定義する。PMMAの場合、下限界が融熔点温度(初期温度300 Kからの温度上昇  $\Delta T=173$  K)で生じ、ホール形成による上限界が熱分解温度(初期温度300 Kからの温度上昇  $\Delta T=333$  K)で起きると仮定すると、式(12)より、PMMAの接合可能限界は図6の実線のようになる。図中のPMMAの実験データ<sup>(3)</sup>と比較すると、接合可能限界の予測値は実験データよりも1けた程度小さいことがわかる。これは数値計算で得られた温度上昇がかなり大きく、比例係数が小さく見積もられたからである。また計算で得られた接合限界の関係ではレーザー照射時間の指数係数が-0.5であるが、実験データから得られた接合可能限界の近似式の指数係数は-0.5ではなく-0.7である<sup>(3)</sup>。

**3.3 レーザ光の不透明プラスチック内部での吸収と表面からの輻射損失の効果** 以上の数値シミュレーションでは不透明試料の表面でのみレーザー光が熱に

変換されると仮定していた。しかし実際には不透明PMMA試料はレーザー光をわずかに透過し、不透明試料内部でも加熱される可能性がある。また不透明試料表面からの輻射損失も考えられる。そこで不透明試料内部でのレーザー光吸収と輻射損失を考慮して数値シミュレーションを行った。

不透明試料内部でのレーザー光吸収を考慮して数値シミュレーションを行う場合、計算モデルと基礎式を変更する必要がある。計算モデルを図7に示す。図1の計算モデルとの違いは、上下対称の条件を用いず、座標原点を不透明試料の下面に取り、板厚方向の計算領域を  $2H$  としている点である。

レーザー光の吸収は Lambert-Beer 式で表される。

$$P = P_0 \exp[-k(H-z)] \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで  $P_0$  [W] は不透明試料表面におけるレーザーパワー、 $k$  [m<sup>-1</sup>] は吸収係数である。不透明PMMA試料のレーザー光(波長820 nm)に対する吸収係数の実測値は  $k=3.69 \times 10^3$  [m<sup>-1</sup>] であった。式(1)と式(14)を用いると不透明試料内部でのレーザーのエネルギー流束  $q$  [W/m<sup>2</sup>] は以下のように書ける。

$$q(x, z) = \frac{8P_0}{\pi d^2} \exp[-k(H-z)] \exp\left[-\frac{8(x-d)^2}{d^2}\right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

不透明試料中でのレーザー光の吸収を考慮すると、 $0 \leq z \leq H$  においてエネルギー式は以下ようになる。

$$\frac{\partial e}{\partial t} + U \frac{\partial e}{\partial x} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T(e)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(e)}{\partial z^2} \right] + \eta k q(x, z) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで  $\eta$  は透明試料のレーザー光透過率である。 $H < z \leq 2H$  においては式(2)を用いる。境界条件、初期条件は2.2節と同様であるが、接合面における境界条件の式(3)は不要である。

次に不透明試料表面からの輻射損失が黒体輻射であり、透明試料による反射や吸収はないものと仮定してこれを考慮する。このとき式(16)のエネルギー式の右

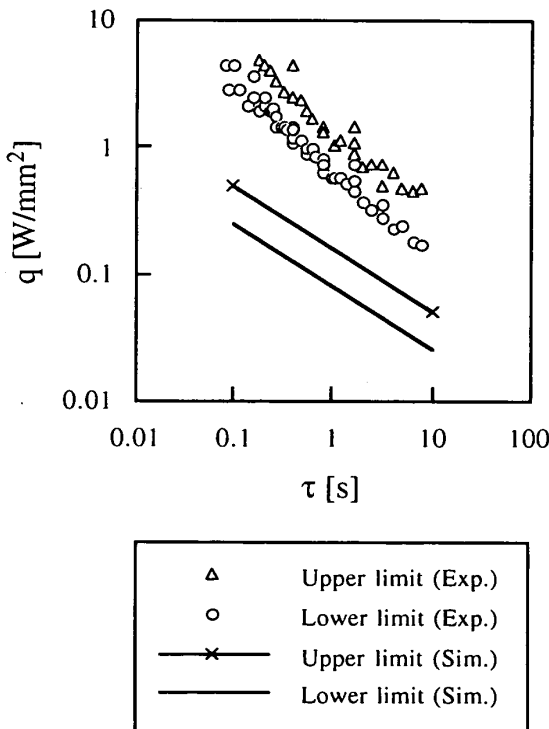


Fig. 6 Relation between minimum and maximum laser heat fluxes and irradiation time for PMMA lap welding

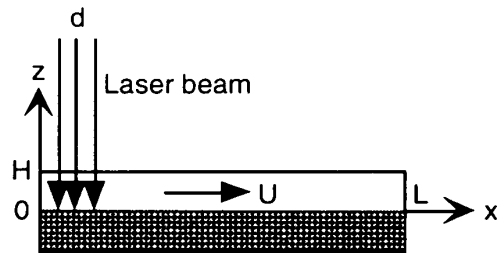


Fig. 7 Modified simulation model for laser lap welding in consideration of laser absorption in the opaque plate

辺に以下の輻射損失項を付け加える。

$$q_{rad} = -\sigma T^4 \delta(H-z) \dots\dots\dots (17)$$

ここで  $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ ) である。デルタ関数  $\delta(H-z)$  は  $1/\Delta z$  で近似する。

以上の基礎式を用いて数値シミュレーションを行った結果(初期温度からの温度上昇の分布)を図8に示す。計算条件は図4と同じである。分布は上下非対称となり、最大温度上昇は不透明試料側で生じる。また最大上昇温度は 414 K であり、図4の不透明試料表面でのみレーザ光の吸収と発熱が起きるとした場合の 1214 K よりもかなり小さくなる。これは不透明試料によるレーザ光吸収と発熱が表面だけで集中的に行われるのではなく、不透明試料の内部で分散して行われること、また不透明試料表面からの輻射損失があることに起因している。ただし輻射損失を考慮しないで図8

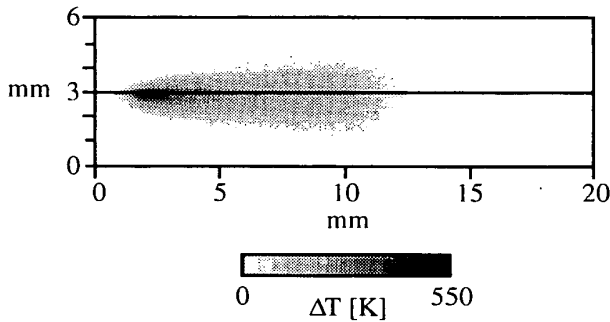


Fig. 8 Temperature distribution of thermoplastic plates in consideration of laser absorption in the opaque plate and radiation heat loss

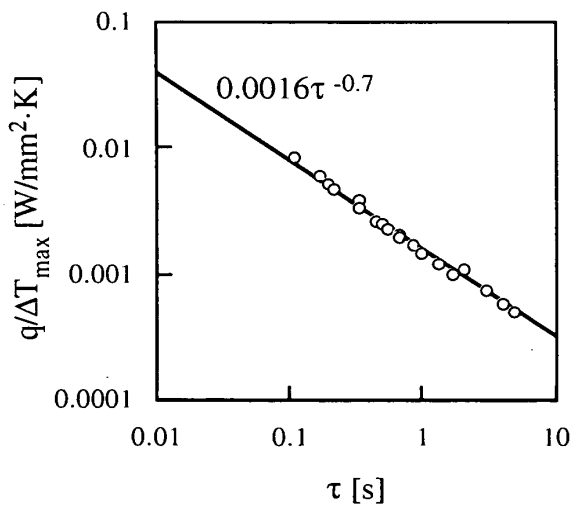


Fig. 9 Relation between the laser energy flux divided by maximum temperature increase at  $z=3$  mm and the irradiation time for PMMA laser lap welding in consideration of laser absorption in the opaque plate and radiation heat loss

と同条件での数値解析を行ったところ、不透明試料表面での最大温度上昇は 422 K であった。したがって輻射損失の寄与は不透明試料内部でのレーザ光吸収の寄与に比べると小さいことがわかる。

さまざまなレーザ強度、レーザ走査速度、レーザスポット径において数値シミュレーションを行い、得られた不透明試料表面 ( $z=3$  mm) での最大温度上昇  $\Delta T_{max}$  に基づいて  $q/\Delta T_{max}$  と  $\tau$  の関係を表すと図9のようになる。レーザエネルギー流束  $q/\Delta T_{max}$  はほぼ  $\tau^{-0.7}$  に比例しており、その比例定数は  $0.0016 [Ws^{0.7}/mm^2 \cdot K]$  である。すなわち数値シミュレーションで得られた接合可能限界の指数係数は実験データ<sup>(3)</sup>の指数係数  $-0.7$  と一致する。

下限界が溶融点温度 ( $\Delta T=173$  K)、上限界が熱分解温度 ( $\Delta T=333$  K) で起きるとすると、PMMA の接合可能限界は図10の実線のようになる。図6と比較すると、不透明試料内部へのレーザ光の浸透と発熱と表面からの輻射損失を考慮することにより、計算値は実験値に近づくことがわかる。また図中の破線は熱変換効率を 40% とした場合の予測値であり、実験データとほぼ一致する。

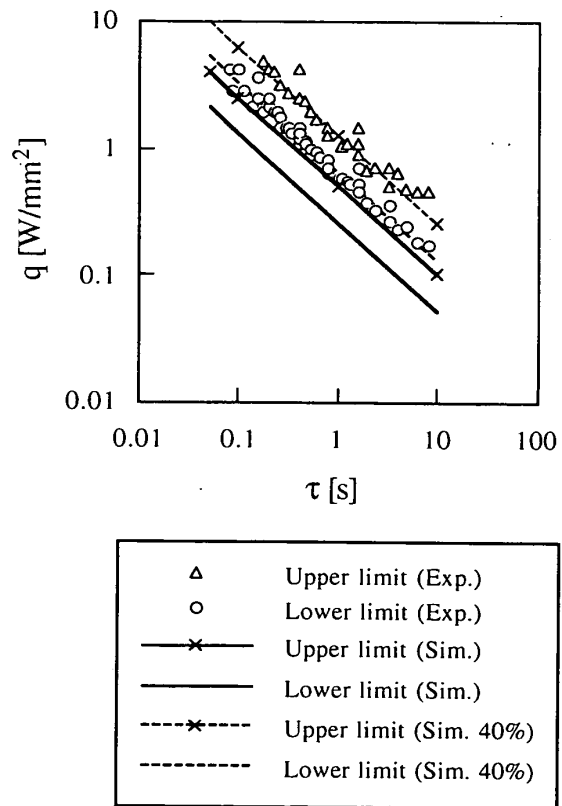


Fig. 10 Relation between minimum and maximum laser heat fluxes and irradiation time for PMMA lap welding in consideration of laser absorption in the opaque plate and radiation heat loss

## 4. 結 言

PMMA のレーザーラップ接合の条件を数値シミュレーションによって調べ、以下のことが明らかとなった。

(1) 透明/不透明熱可塑性プラスチックの界面においてのみレーザー光の熱変換が生じると仮定した場合、数値シミュレーションで得られたレーザーエネルギー流束とレーザー加熱時間の関係式は次元解析によって求められた関係と一致する。しかし接合可能限界の予測値は実験データよりも1けた程度小さく、また実験データから得られた接合可能限界の近似式の指数係数は $-0.5$ ではなく $-0.7$ である。

(2) 透明熱可塑性プラスチック内部でのレーザー吸

収と発熱、表面での輻射損失を考慮することにより、実験で得られたレーザーエネルギー流束とレーザー加熱時間の関係を定性的に予測できる。

## 文 献

- (1) Puetz, H., Haensch, D., Treusch, H. and Pflueger, S., *Modern Plastics*, (1997-9) 121-124.
- (2) 長谷川達也・前田知宏・中原修一・高井雄一郎・中村隆, 機論, 67-661, C (2001), 2997-3001.
- (3) 長谷川達也・土井晋太郎・高井雄一郎・前田知宏・中村隆, 機論, 67-661, C (2001), 3002-3005.
- (4) 矢部孝・肖鋒, 日本数値流体力学学会誌, 7-2 (1999), 70-81.
- (5) 藤重昇永, 機能性高分子材料の基礎, (1990), 67-73, 工業調査会.
- (6) Brandrup, J. and Immergut, E. H., *Polymer handbook*, (1987), 77-79, John Wiley & Sons Inc.
- (7) 中條澄, エンジニアのためのプラスチック教本, (1997), 214-215, 工業調査会.