

ハニカム材料の直交異方性熱伝導率評価*

小笠原 永久^{*1}, 白鳥 正樹^{*1}
于 強^{*1}, 藏原 鉄二^{*2}

Estimation of Orthotropic Thermal Conductivity of Honeycomb Material

Nagahisa OGASAWARA^{*3}, Masaki SHIRATORI,
Qiang YU and Tetsuji KURAHARA^{*3}Yokohama National University, Dept. of Mechanical Engineering,
Tokiwadai 79-5, Hodogayaku, Yokohama, Kanagawa, 240-8501 Japan

An experimental-computational hybrid system for measurement of thermal conductivity of orthotropic materials is developed. The system consists of two experimental parts and a finite element analysis part. Firstly, a temperature distribution generated by an uniform heating is measured with a thermal video system, and a thermal conductivity of Z direction is calculated. Secondary, a temperature distribution generated by a small area heating is measured with the system. In the final step, thermal transfer analyses simulated the experiment support efficient data, and thermal conductivity of in-plane directions are estimated by comparing between experimental and analytical temperature distributions. The orthotropic equivalent thermal conductivity of honeycomb materials given by this system agreed with the theoretical values.

Key Words: Anisotropy, Heat Conduction, Finite Element Method, Hybrid System, Infrared Thermography

1. 緒 言

産業の発達とともに使用材料に求められる性能が高くなり、複合材料の需要が目立ってきた。建築分野では、軽量、高剛性、高平面精度と優れた特徴をもつ複合構造材料の一つ、ハニカムサンドウィッチ構造材料(HSC)が高層ビルの外壁、パラボラアンテナの鏡面などに使用されてきている⁽¹⁾。

複合材料は従来の材料と異なり、均質、等方、連続という条件を必ずしも満足していないため、設計時には、材料の諸特性を十分に把握し、それに応じた設計をする必要がある。例えば、HSCは連続体ではないが、その内部六角柱が構造全体と比して非常に小さく、また周期的な構造をしているため、巨視的には連続、均質材料として等価することができるものの、剛性および熱伝導特性の直交異方性を考慮しなくてはならない。また、従来の直交異方性に関する研究では、剛性あるいは強度に関するものが多く行われている一方^{(2)・(8)}、熱伝導特性に着目した研究は少ないように思われる。

そこで本研究ではHSCつまり直交異方性材料の各軸方向等価熱伝導率を測定することを目的とし、赤外線映像装置と有限要素法熱伝導解析を利用した実験-計算ハイブリッドシステムを構築した。

2. 等価熱伝導率測定システム

本研究で構築したシステムは、赤外線映像装置を利用した温度分布測定実験と、エンジニアリングワークステーション上で行われる有限要素法熱伝導解析に分けられる。温度分布測定実験は、材料の板厚方向(Z方向)と面内方向(X、Y方向)を対象に2種類の手法が行なわれる。実験-計算ハイブリッド等価熱伝導率測定システムの簡単な流れ図を図1に示す。

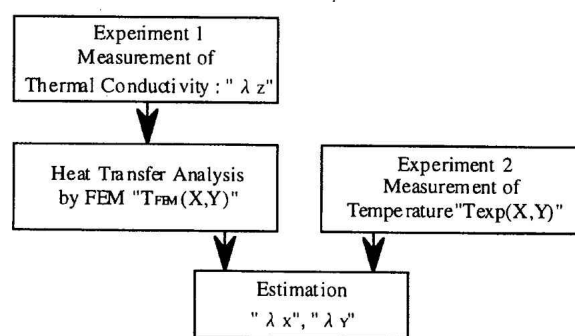


Fig. 1 Flow of experimental-computational hybrid system for measurement of thermal conductivity

本研究の対象材料としては、ハニカム材料の中で最も一般的に使用されているアルミニウム(JIS 5052)製の接着接合材料(図2)を使用した。このハニカム材料の直交異方性等価熱伝導率は、その幾何形

* 原稿受付 1999年1月8日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学工学部(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。^{*2} 横浜国立大学大学院 [現:(株)デンソー]。

E-mail: oga@swan.me.ynu.ac.jp

状とフーリエの式から、式(1)～(3)のように表される⁽⁸⁾。熱伝達あるいは熱放射などの熱伝導以外の熱伝導メカニズムの影響は小さいと考え無視している。式中において、 λ_{al} はアルミニウムの λ_{air} は空気の熱伝導率を、 R はコア密度(セルサイズ： s と壁厚： t の比)を表す。表1に構成材料の材料定数を示す⁽⁹⁾。

次節に、使用した赤外線映像装置の仕様概略とシステムの流れに従った各プロセスの説明を行う。

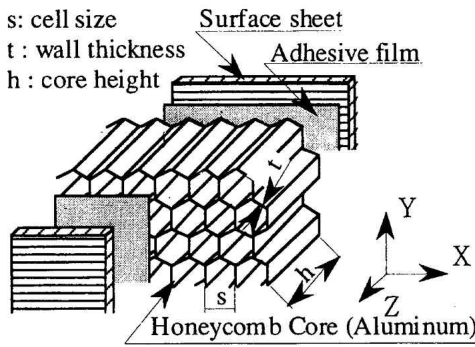


Fig.2 Honeycomb Sandwich Construction (HSC)

$$\lambda_x = \lambda_{air} + \lambda_{al}R \tag{1}$$

$$\lambda_y = \lambda_{air} + \frac{3}{2}\lambda_{al}R \tag{2}$$

$$\lambda_z = \lambda_{air} + \frac{8}{3}\lambda_{al}R \tag{3}$$

$$R = \frac{t}{s} \tag{4}$$

Table 1 Material properties of HSC

Material (293K)	Thermal conductivity [W/m·K]	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg·K]
aluminum	140	2710	896
air	0.027	1.205	1000
CFRP	0.5	1900	884
adhesive mat.	1.9	1500	1000

Table 2 Main specifications of Thermal Video System

Thermal Video System (TVS - 5000)	
Temperature range	-40~280 °C
Sensitivity	0.05 °C
Field of view	10° × 15°
Frame time	0.05 sec.
Picture resolution	256 × 200

2.1 赤外線映像装置 赤外線映像装置は、対象物表面から放射される赤外線を検出し、電気信号に変換、処理することにより対象物の温度分布を可視像として再構成する。特長として、表面温度分布を二次元

データとして、非接触かつリアルタイムに測定、記録できるため、熱電対取付などによる熱境界特異点を生じることなく温度測定ができることがあげられる。本実験で使用した赤外線映像装置の仕様を表2に示す⁽¹⁰⁾。

2.2 Z方向等価熱伝導率測定実験 まず、ハニカム材料の板厚(Z)方向の等価熱伝導率： λ_z を測定する。

ハニカム材料には空疎があり、HSCとして使用する際は、内部空気の熱伝導も考慮しなくてはならない。そのため、内部空気が自由に入り出ることができるハニカム材料単体ではなく、表面板で密閉された状態(HSC)で温度測定を行い、ハニカム材料単体の等価熱伝導率を算出する必要がある。

実験図を図3に、試験片のサイズを表3に示す。なお、表面板の材質はアルミニウムを使用している。

以下に、Z方向等価熱伝導率測定システムを説明する。

側面を断熱したHSC試験片の上面に、シリコンラバーヒーターを用いて一様な熱流束($q=2.0 \text{ kW/m}^2$)を与え、試験片内にZ方向の一次元温度勾配を作る。下面は流冷水(約290 K)にビニールシートを介して接触させ、試験片内温度勾配を大きくしている。十分時間が経過し、下面に取り付けた測温抵抗体の温度変化がなくなったこと(定常状態)を確認したのち、断熱材およびヒーターを取り外し、上下表面板の温度を素早く測定する。赤外線映像装置は、温度分布をリアルタイム(0.05秒毎)にビデオテープに記録できるため、温度測定時における温度損失はないものとする。

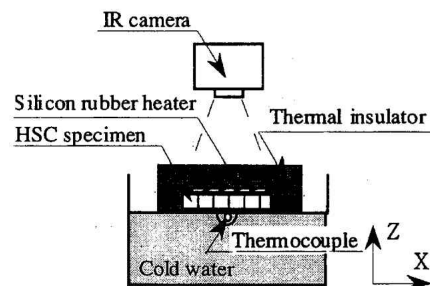


Fig. 3 Measurement system of thermal conductivity of Z direction

Table 3 Size of HSC specimens

HSC specimen	A	B	C
Cell size : s [mm]	6.35	9.525	
Wall thickness : t [mm]	0.061	0.033	
Core ratio : R [10 ⁻²]	0.961	0.346	
Core height : h [mm]	30.0		
Surface sheet thickness : t _s [mm]	0.8	1.0	
Size of specimen : X × Y [mm ²]	250 × 250		

HSC 表面板板厚： t_s 、表面板材料の熱伝導率： λ_s 、ハニカム材料高さ： h 、上下表面板の温度差： ΔT 、与える熱流束： q とすると、ハニカム材料単体のZ方向等価熱伝導率は式(5)で表される。

$$\lambda_z = \frac{qh}{\Delta T - 2qt_s/\lambda_s} \quad (5)$$

ただし、ヒーターの加熱面積と試験片面積はほぼ等しく、またヒーター上面にも断熱材を敷き、ヒーターから発せられる熱はすべて試験片に流入するものとする。表面板とハニカム材料間の接着剤は、ハニカム材料の高さと比較して非常に薄いため(約0.04 mm)考慮していない。

図4はZ方向等価熱伝導率に関して理論値と本実験で得られた値を比較したものであり、誤差数%の範囲で測定できていることがわかる。

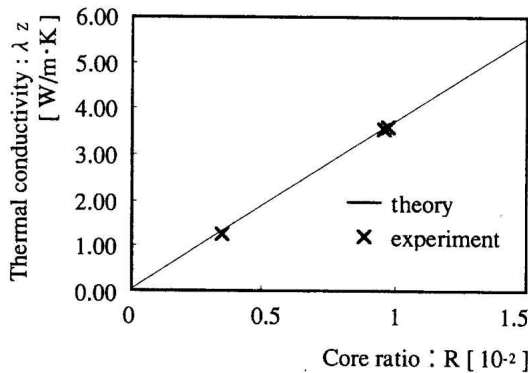


Fig.4 Comparison between theory and experiment

2.3 X、Y方向等価熱伝導率測定 続いてハニカム材料の面内(X、Y)方向等価熱伝導率： λ_x 、 λ_y を測定する。

前節の手法を応用し、HSC試験片の方向を、Z方向から対象面内方向に変えて実験を行うと、表面板の熱伝導の影響が大きく、面内方向に対する一次元温度勾配を作ることは非常に難しい。

そのため、赤外線映像装置を利用した温度分布測定実験と有限要素法熱伝導解析を組み合わせて、面内方向等価熱伝導率を決定するシステムを構築した。

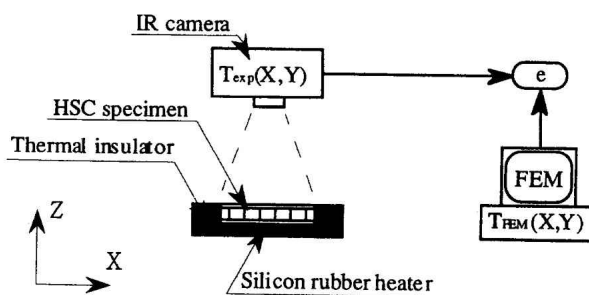


Fig. 5 Hybrid system for measurement of in-plane thermal conductivity

Table 4 Size of HSC specimens

HSC specimen	D	E
Cell size : s [mm]	6.35	3.175
Wall thickness : t [mm]	0.033	0.033
Core ratio : R [10 ²]	0.520	1.04
Core height : h [mm]	24.0	24.0
Surface sheet thickness : t _s [mm]	0.6	0.6
Size of specimen : X×Y[mm ²]	320×210	165×285

面内方向等価熱伝導率測定システムを図5に、使用した試験片のサイズを表4に示す。対象試験片のHSCは、表面板での面内方向熱拡散を少なくするために、熱伝導率が低く板厚の薄いCFRPを使用している。

2.3.1 温度分布測定実験 以下に温度分布測定実験を説明する。

HSC試験片の下面中央に、既知熱流束： q (1.3 kW/m²)をシリコンラバーヒーターを用いて与える。加熱部はセルサイズの数倍である直径30 mmの円形とし、加熱面積： A_q (706.5 mm²)とする。加熱部以外の下面および側面は断熱状態とし、上面は熱伝達境界とする。

十分時間が経過し上面の温度変化が確認できず定常状態となった後に、上表面板に生じている二次元温度分布： $T_{exp}(X, Y)$ を赤外線映像装置を用いて測定する。温度測定において、座標系は試験片内部のハニカム材料を基準に図2に示した方向と同じとし、上表面板の中央を原点とする。

本実験で得られた赤外線画像を図6に、X、Y軸に沿った実験温度分布曲線を図7に示す。

下面中央から流入した熱は、上面へと伝導して行く間に面内方向にも拡散していくが、この拡散の度合いは、ハニカム材料の面内方向等価熱伝導率によって決定される。すなわち、測定した上表面の温度分布は、面内方向等価熱伝導率の直交異方性に対応して、同心円形状ではなく楕円形状となる。

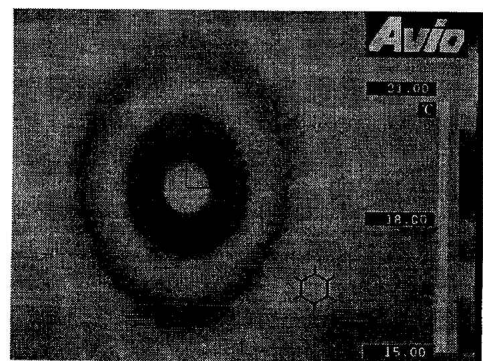


Fig. 6 Thermogram of HSC heated locally

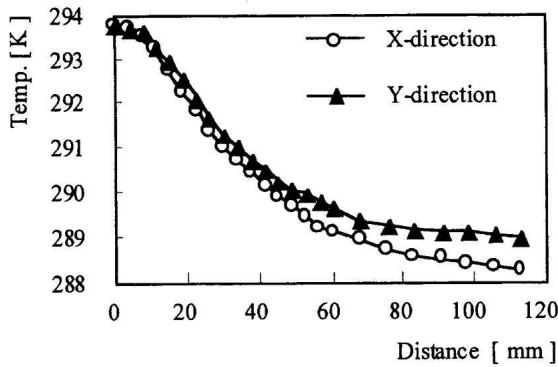


Fig. 7 Temperature distribution along X-Y axis

2.3.2 有限要素法熱伝導解析 実験で得た温度分布から面内方向等価熱伝導率を直接算出することは難しいため、汎用有限要素法プログラムMARCを用いた実験の数値シミュレーションを行い、実験、解析両温度分布を比較することで、面内方向等価熱伝導率を決定する。

以下に解析方法について述べる。

作成した有限要素モデルは、すべて8節点ソリッド要素を使用し、対称性を考慮し試験片サイズの1/4のモデルを用いている。ハニカム材料部は直交異方性材料とし、Z方向等価熱伝導率： λ_z には前節の実験で得られた値を、面内方向の各等価熱伝導率： λ_x 、 λ_y は後述の方法によって変化させた値をそれぞれ代入し、繰り返し解析を行う。要素分割図を図8に示す。

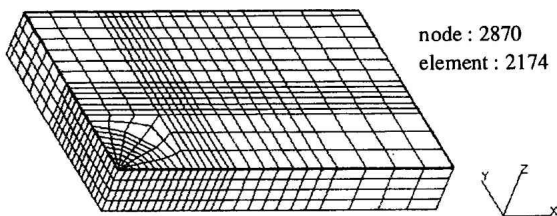


Fig. 8 FEM mesh for thermal transfer analyses simulated experiment

また、未定境界条件である試験片上表面の熱伝達係数： h_t は、実験データを利用し以下の方法で決定した。

試験片下面または側面への熱の流出はなく、ヒーターの発熱はすべて試験片に流入し、熱伝達率および外気温度： $T_o(X, Y)$ は温度分布に依存することなく上表面上部で一定であると仮定すると、熱伝達率は式(6)で得ることができる。ここでAは試験片のXY断面積である。

$$h_t = \frac{qA_q}{\int_A [T_{exp}(X, Y) - T_o(X, Y)] dA} \quad (6)$$

$T_o(X, Y) = const.$

本シミュレーションにおいて、以下の仮定が成り立つ。

1. 面内方向熱伝導率が直交異方性を有しているため、X、Y各軸に沿った温度分布が解析と実験で同じとき、他の全領域の温度分布も等しくなる。また、その時の面内方向の解析等価熱伝導率は、実験等価熱伝導率と等しい。

2. 下面から与える熱量が一定であるため、上表面における温度分布の積分値は、面内方向等価熱伝導率に依存せず実験値と等しく一定となる。そして、中心の温度はX、Y軸で共有しているため、実験温度および解析温度が原点で等しくないかぎり、必ずX、Y軸どちらかまたは両方の解析温度分布曲線が実験温度分布曲線と交わる。

3. 実験、解析の両等価熱伝導率の差が大きき場合、温度勾配の差が大きくなる。つまり、面内方向等価熱伝導率が低い場合、面内方向の熱拡散が抑えられるため、試験片上表面における中心付近の温度が高くなる。

仮定1より、X、Y軸に沿った各点における実験と解析の両温度の差の絶対値の和： e_1 (式(7))は、温度分布の誤差を表すパラメータと言え、これを最小とする解析面内方向等価熱伝導率が対象材料の正しい面内方向等価熱伝導率であると定義する。

$$e_1 = e_{1X} + e_{1Y}$$

$$e_{1X} = \sum |T_{FEM}(X, 0) - T_{exp}(X, 0)|$$

$$e_{1Y} = \sum |T_{FEM}(0, Y) - T_{exp}(0, Y)| \quad (7)$$

また仮定2より、X、Y軸に沿った実験と解析の両温度の差の和： e_2 (式(8))は、どちらか一方または両方の軸において式(7)の値と一致せず、仮定3より、 e_1 と e_2 が大きく異なる軸、つまり温度分布曲線が交わっている軸は実験、解析の両等価熱伝導率の差が大ききことが推定される。

解析で得られた中心温度 $T_{FEM}(0, 0)$ が実験の中心温度： $T_{exp}(0, 0)$ より高い場合は、X、Yどちらか一方または両方の等価熱伝導率が、実際の値より低いことが考えられるため、 e_1 と e_2 の比の絶対値： $|e_2 / e_1|$ が小さい方の軸の等価熱伝導率を増加させる必要がある。

$$e_{2X} = \sum (T_{FEM}(X, 0) - T_{exp}(X, 0))$$

$$e_{2Y} = \sum (T_{FEM}(0, Y) - T_{exp}(0, Y)) \quad (8)$$

任意の面内方向等価熱伝導率を用いて熱伝導解析を行い、得られた温度分布を上述のように評価し、X、Y(面内方向)どちらかの等価熱伝導率を変化させ再び解析を行う。このプロセスを e_1 が充分小さくなるまで自動的に繰り返し行い、面内方向等価熱伝導率を決定した。解析の流れを図9に示す。

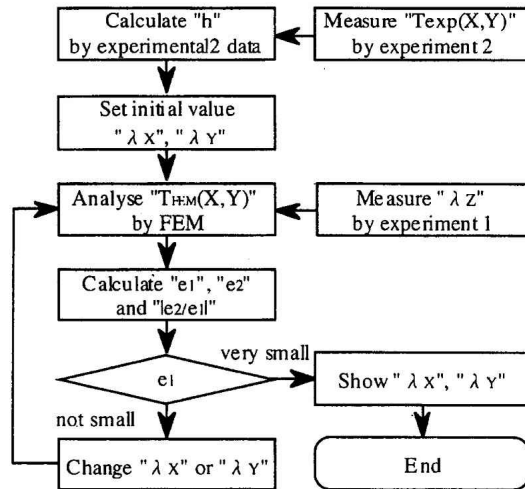


Fig. 9 Flow of analysis part of the hybrid system

2種類ハニカム試験片に対し、本システムを用いて面内方向等価熱伝導率を求めた結果、X、Y両等価熱伝導率において、理論値と比較して誤差の少ない値を得ることができた。結果を表5に示す。

Table 5 Results of proposed hybrid system

Thermal conductivity [W/m·K]		Proposed system	Theory Eq.(1)(2)	Error [%]
Specimen A (s = 3.175mm t = 0.033mm)	λ_x	1.449	1.482	2.2
	λ_y	2.126	2.210	3.8
Specimen B (s = 6.35mm t = 0.033mm)	λ_x	0.755	0.755	0.1
	λ_y	1.044	1.118	6.6

4. 結 言

赤外線映像装置による温度測定実験と有限要素法による熱伝導解析を組み合わせた実験-解析ハイブリッドシステムを構築し、熱伝導特性に直交異方性をもつハニカム構造材料の3軸方向等価熱伝導率を求めた。得られた実験等価熱伝導率を理論値と比較し、良好な結果を得ることができた。本システムを応用することで、ハニカム材料の仕様（展張率、セルサイズ、セル壁厚など）が未知であるHSCや、配合などが未知である複合材料の面内方向の等価熱伝導率を求めることが可能であると考えられる。

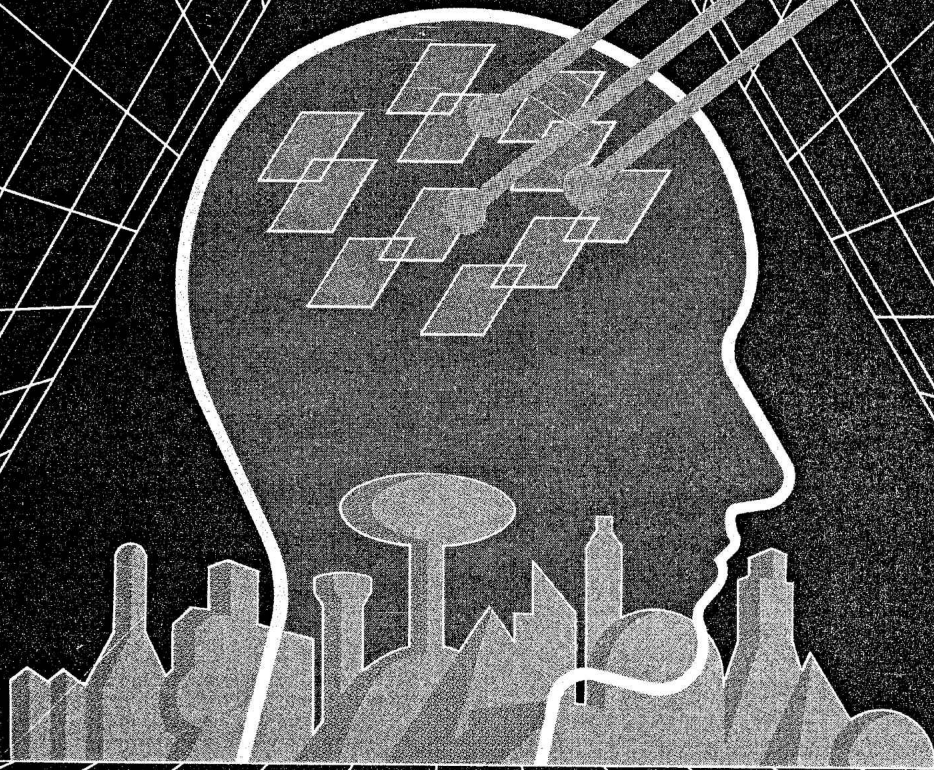
本研究においては、横浜国立大学鳥居薫教授から多くのご助言をいただきました。また、昭和飛行機工業株式会社から試験片の提供を、また日本アビオニクス株式会社より赤外線映像装置使用の便宜を受けました。記して謝意を表します。

5. 参考文献

- (1)佐藤編, ハニカム構造材料の応用技術, 先端材料技術協会監修, (1995)
- (2)L. J. Gibson and M. F. Ashby, Cellular Solids - Structure & Properties, Pergamon Press, (1988).
- (3)吉野・大塚・近藤, 機論63-613, A(1997), 1939-1946
- (4)小林・臺丸谷・奥戸, 機論60-572, A(1994), 1011-1016
- (5)辻井・田中・西田, 機論61-587, A(1995), 1608-1614
- (6)小笠原・白鳥・于・宮野, 機論64-624, A(1998), 2059-2064
- (7)山口・浅古, 機械学会第73期全国大会講演論文集(III), (1995), 7-8
- (8)小笠原・白鳥・于・蔵原, 機論65-629, A(1999), 127-132
- (9)アルミニウムハンドブック, 軽金属協会編集, (1994)
- (10)M. Shiratori, Q. Yu, Y. Takahashi and N. Ogasawara, JSME Int. J., Ser. A, Vol. 37, No.4, (1994), 396-402

日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS



B

編

平成十一年十一月

November, 1999

第639号

第 **65** 卷

日本機械学会