

技術論文

# 振動インテンシティ計測によるガスヒートポンプの加振源探査

The Search of Exciting Sources in a Gas Heat Pump Using Vibration Intensity Measurement

小嶋直哉\*  
Naoya Kojima

周海\*\*  
Hai Zhou

大橋光久\*\*\*  
Mitsuhisa Ohhasi

## 要旨

振動加速度ピックアップを用いた振動インテンシティ計測手法について検討し、これを用いてガスヒートポンプにおける加振源の探査を試みた。

振動インテンシティベクトルは、梁や板において屈曲波として伝えられる振動エネルギーの流れを示している。構造物壁面の各測定点における振動インテンシティベクトルの方向と大きさの決定方法として、本報では二つの方法について測定精度と簡便さに関して検討した。第一の方法は、直角二方向における振動インテンシティを測定してそれをベクトル合成するもので、第二の方法は、同一地点で多方向の振動インテンシティを測定しその結果をピックアップの指向性に最小二乗適合させるものである。

次に、ガスヒートポンプのパネルにおいて、その加振源を明らかにするために振動インテンシティ計測を行った。この結果に基づいて騒音対策を行ない、1.6dB(A)以上の騒音レベルの低減を得た。これらのことから、構造物における加振源探査に対して、振動インテンシティ計測が有効な手法の一つであることが分かった。

## Abstract

This paper describes vibration intensity measurements and the search of exciting sources in a gas heat pump using two-channel vibration intensity probe. Vibration intensity vectors show the direction and amplitude of vibration intensity at each point of the structure two determining methods, i.e. the vector composition method employing measurements obtained in two perpendicular directions and the method of least square fitting to the directional characteristic of the probe, were examined in this study. These two methods were discussed from the points of view of accuracy and expediency of the measurements. The vibration intensity measurement was then applied to find the exciting sources in gas heat pump package panels. The result of noise reduction obtained by taking counter measures expresses the utility of vibration intensity measurement for the identification of exciting sources in a machine structure.

Key words: Vibration, Vibration intensity, Measurement, Gas heat pump, Exciting source, Sound

## 1. はじめに

機械構造物における騒音の発生源である振動に対して、その伝播状況と加振源を正確に把握することはその対策を施す上で重要である。しかし、

\* 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台2557)

\*\* 学生員、山口大学大学院

\*\*\* 技術本部要素研究部

実際の機械構造における有効な計測方法はまだ実用化されていないのが現実である。自由平板内を伝播する屈曲波により伝えられるエネルギーの流れを検出する振動インテンシティ法は、D.U.Noisieux<sup>(1)</sup>により提案された後いくつかの報告<sup>(2)~(5)</sup>がなされているが、いずれも理論的な展開及びそれに伴う基礎実験を行ったものであり、実際の機械構造物への適用例はほとんど見られない。筆者らは、この手法を用いてエンジンの衝撃源探査と衝撃応答の伝播状況の解明などについて、すでに報告を行っている<sup>(6)</sup>。

従来、振動インテンシティ（以下、VIと略す）の検出方法については、そのピックアップの指向性の最大感度方向と最小感度方向とが垂直をなす性質を利用して、その最小感度方向を検出し、それと直角方向の成分からVIの方向と大きさとを決定する方法が用いられてきている<sup>(2)</sup>。これに対し本研究では、2つの小型加速度ピックアップを円形底面台に設置したVIピックアップを用い、実際の機械構造物において、各測定点における12方向のVI測定値をピックアップのリニア指向性に最小二乗適合させる方法と、直角2方向におけるVI測定値のベクトル合成による方法を採用した。測定に要する時間の短縮を目指すベクトル合成法と誤差の小さい最小二乗適合法を比較して、ベクトル合成法の有効性を調査した。さらに、ベクトル合成法を用いてガスヒートポンプのパッケージパネルにおける振動伝播状況を調べた。これに基づいて振動遮断対策を施し、振動と騒音の低減効果によってベクトル合成法の実用性を検討した。

## 2. 振動インテンシティ計測方法

振動インテンシティは、平板の単位幅、単位時間あたりに屈曲波として伝えられるエネルギーの大きさと、その流れ方向により定義される。VIベクトルを $I_V$ とすれば周波数領域の諸量を用いて、次式で表わすことができる<sup>(3)</sup>。

$$I_{Vx}(\omega) = \frac{2\sqrt{Dm}}{r\omega^2} E[\text{Im}(S_{21})] \quad (1)$$

ここで、 $D$ は板の曲げ剛さ、 $m$ は板の面密度、 $\omega$ は角周波数、 $r$ は隣接して設置した2つの加速度ピックアップの中心間距離、 $E$ 〔〕は集合平均、 $\text{Im}(S_{21})$ は2つのピックアップにより検出された加速度信号のクロススペクトル $S_{21}$ の虚部を表わす。式(1)によって、各周波数あるいは各周波数帯域におけるVIを算出できる。本研究は図1に示すようなピックアップを用いてVIを計測する。

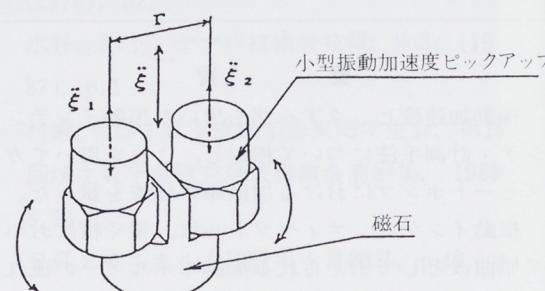
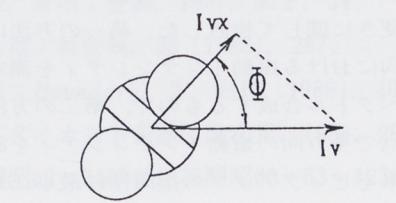
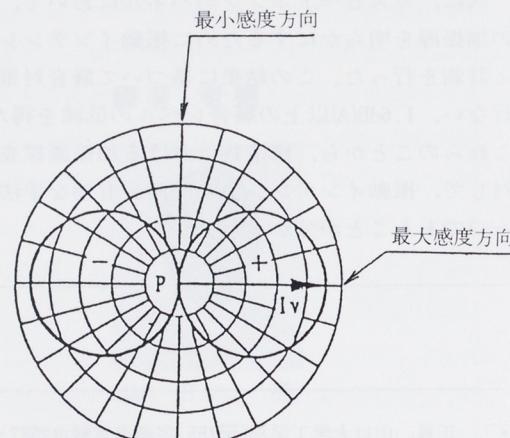


図1 VIピックアップの概略



(a) Detected component of VI vector



(b) Directivity of VI pick-up

図2 VIベクトルの検出

ベクトル量であるVIを検出するには、その大きさと方向を検出する必要がある。図1に示す検出用ピックアップを用いた場合、ピックアップがある方向(X方向)に設置して計測される振動インテンシティの大きさIvxは、図2(a)に示すようにその測定位置における振動インテンシティのX方向成分であるので、次式の関係が成り立つ。

$$Ivx = |Iv| \cdot \cos \phi \quad (2)$$

ここで、 $\phi$ は測定方向とVIベクトル方向のなす角度を表わす。

式(2)より、図1に示すVIピックアップは、図2(b)に示すような指向性を持っている。この指向性曲線は測定点である2つの加速度ピックアップの中心点Pを通る円になることがわかる。測定点Pを足として正の円周に向かう直径はVIベクトルを表わし、その方向は最小感度の方向と直角をなす。この特徴を利用して、VIベクトルを決定する方法が考えられるが、多数方向におけるVIを求める必要があり実験時間と手間が膨大なものとなる。従って、簡便で誤差の少ないVIベクトルの決定方法を確立することは、VI法の実用性を高める上で極めて重要であると言える。

## 2.1 最小二乗適合法

2つの加速度ピックアップを隣接して設置した

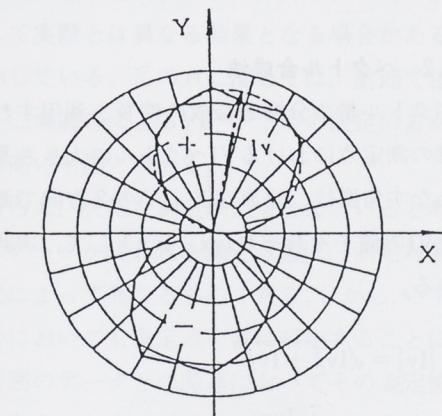


図3 最小二乗法による $|Iv|, \alpha$  の決定例

VIピックアップの指向性曲線である円がわかれば、VIの大きさとその方向を算出できる。測定点Pを原点として、座標系を設定すれば、原点を通る指向性円は次式となる。

$$X^2 - aX + Y^2 - bY = 0 \quad (3)$$

実際の測定データにより指向性円を求める場合、最小二乗法を用いてa, bを決定することになる。すなわち

$$\begin{bmatrix} \sum_{K=1}^m X_K^2 & \sum_{K=1}^m X_K Y_K \\ \sum_{K=1}^m X_K Y_K & \sum_{K=1}^m Y_K^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{K=1}^m (X_K^3 + X_K Y_K^2) \\ \sum_{K=1}^m (Y_K^3 + Y_K X_K^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、mは測定データ数を表わす。求めたa, bから、VIベクトルの大きさ $|Iv|$ 及びその方向角度 $\alpha$ はそれぞれ次式になる。

$$|Iv| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (6)$$

図3は最小二乗法を用いてVIベクトルを決定した一例である。実線は実際に測定した指向性曲線で、破線は最小二乗適合により求めた指向性円である。同図よりこの点におけるVIベクトルが求められる。直線の一点鎖線はこのようにして決定したVIベクトルを表わす。

円の最小二乗適合においてはデータ数が多ければ多いほど適合精度が高いと考えられる。しかし、一方、データ数の増加とともに測定に要する手間と時間が増える。ここで、実際の機械構造物を対象として、適合精度と測定データ数の関係を調べた。

実験は、図4に示すガスヒートポンプの下部パッケージの、左側面パネルに設定した48の測定点において行った。VIピックアップの設定方向性曲線の対称性を利用して $180^\circ$ 内で $15^\circ$ 間隔で12方向に変化させ、それぞれの方向において32回アベレージング処理して求めたVIのデータに対し、最小二

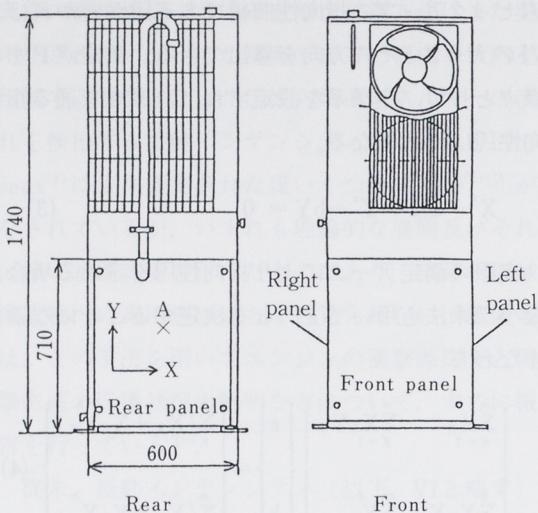


図4 ガスヒートポンプの外観

表1 測定データ数による最小二乗法の誤差の比較

(a) VI大きさのレベル差

Difference of level (dB)	Number of points (% in 48points)	
	6 directions	4 directions
0 - 0.5	46 (96%)	39 (82%)
0.5 - 1.0	2 (4%)	4 (8%)
1.0 - 1.5	—	2 (4%)
1.5 - 2.0	—	1 (2%)
2.0 -	—	2 (4%)

(b) VI方向の角度差

Difference of level (deg)	Number of points (% in 48points)	
	6 directions	4 directions
0° - 5°	40 (83%)	37 (77%)
5° - 10°	7 (15%)	7 (15%)
10° - 15°	1 (2%)	1 (2%)
15° -	—	3 (6%)

乗適合法を用いて各測定点におけるVIを算出した。このように12方向におけるVI値から求めたIvを比較の基準とし、30°ずつ6方向及び45°ずつ4方向において測定した結果から求めたIvとを比較し、それぞれの誤差について検討してみた。その結果を表1に示す。表1から明らかなように6方向と12方向の測定結果のレベル差は1dB以内、方向角度の差は15°以内で計測できていることがわかる。また、角度差が10°以内、レベル差0.5dB以内

表2 ベクトル合成法による測定誤差

(a) VI大きさのレベル差

Difference of level (dB)	Number of points (% in 48points)
0.0 - 0.5	31 (65%)
0.5 - 1.0	9 (19%)
1.0 - 1.5	4 (8%)
1.5 - 2.0	2 (4%)
2.0 -	2 (4%)

(b) VI方向の角度差

Difference of level (deg)	Number of points (% in 48points)
0° - 5°	18 (38%)
5° - 10°	14 (30%)
10° - 15°	5 (10%)
15° - 20°	2 (4%)
20° - 25°	3 (6%)
25° - 30°	1 (2%)
30° -	5 (10%)

の点数は48測定点全体の96%以上に達している。これに対して、4方向における測定結果から決定したVIの値は誤差が大きくなっている。大きい誤差を示す測定結果の割合も増えている。これらのことより、測定方向の間隔を30°以内、すなわち180°内6方向以上の測定を行えば、測定値に幾分異常なデータが含まれる場合であっても、かなり良い精度でVIベクトルを計測できることが明らかとなつた。

## 2.2 ベクトル合成法

ベクトル量の分解と合成の性質を利用すれば、任意の測定点におけるVIベクトルの大きさ及びX軸となす角度は、垂直なX、Yの2方向で測定されたVIの値をそれぞれIvx、Ivyとして、次式で示される。

$$|Iv| = \sqrt{Ivx^2 + Ivy^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{Ivy}{Ivx} \quad (8)$$

このように、2つの直角方向のVIの値がわかれば、ベクトル合成によりこの点のVIベクトルは求められる。

この方法によれば互いに直角な2方向のVI値を測定すればよく、測定に要する時間は大幅に短縮される。さらに取り付け台の上に互いに直角な2方向に4つの加速度ピックアップを設置する場合は、一つの測定点において、一回の測定操作でVIを算出でき、測定時間が短くなるとともに操作も簡単になると考えられる。しかしへクトル合成法の算出式から見ると、実際に測定された2方向の分量 $I_{Vxx}$ ,  $I_{Vyy}$ には相当の誤差が含まれており、VIの算出結果に影響を及ぼす。そこで次に暗振動が検出信号に重畠され、振動伝播経路と加振源が複数あると考えられる実際の機械構造物に対して、ベクトル合成法でどの程度VIを正確に検出できるかについて検討した。

最小二乗法で計算する時に用いられた12方向の測定データから直角のX, Yの2方向の測定値を取り出し、ベクトル合成法で計算した結果と12方向のデータを用いて最小二乗法で計算した結果の差を表2に示す。表において、方向差は68%の点が $10^\circ$ 以内で、レベル差は84%の点が1dB以内であることがわかる。しかしレベル差が1dBを越す測定点が48点中に8点(16%)あり、その中で2dBを越す点も2点ある。この2点は角度差においても $50^\circ$ 以上と大幅な差が現われており、VIベクトルの決定に関して実際とは異なる結果となる場合があることを示している。この点に関しては、前節で述べた最小二乗適合によるVIベクトルの決定の方が信頼性の高い手法と言える。

もちろん、大幅な測定誤差を含んでいると考えられるデータが現われる測定点数は、測定対象物の状況によって異なるものである。しかし、いずれの場合においても測定点を密に設定することにより、周囲のデータとの関連においてその測定値が異常であることを判断でき、2方向の測定値によるベクトル合成により、全体的な振動の伝播状況

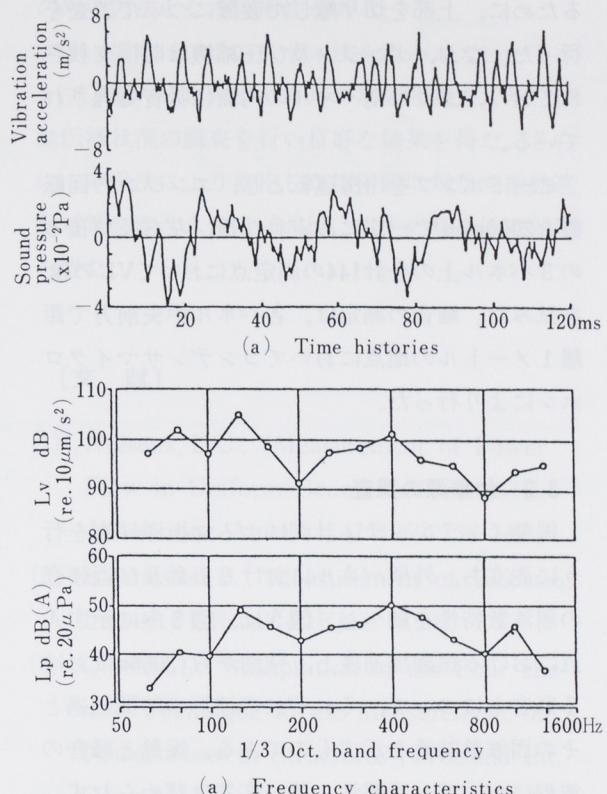


図5 後パネルA点の振動加速度とその近傍(300mm)の音圧特性

を明らかにすることがある程度可能であると考えられる。

### 3. ガスヒートポンプにおける加振源探査

振動インテンシティ法をガスヒートポンプの外壁パネルに適用し、振動の伝播状況を調査するとともに、その加振源について検討した。本実験におけるVIベクトルの決定は、直角の2方向におけるVIの測定値からベクトル合成によって求める方法を採用した。

#### 3.1 実験装置及び実験方法

図4に示すガスヒートポンプの上部には熱交換器とファンが、下部には圧縮機や動力源である横型単気筒4サイクルエンジン等が設置されている。本実験では室外機の下部における加振源に注目す

るために、上部を切り離した装置について調査を行った。なお、エンジン及び圧縮機は防振支材されており、また外壁パネルの内側は吸音処理されている。

ヒートポンプを冷房運転とし、エンジンの回転数を2000rpmで一定に設定した後、左右及び後ろの3パネル上の合計144の測定点においてVIの検査を試みた。騒音の測定は、各パネル中央前方で距離1メートルの地点においてコンデンサマイクロホンにより行った。

### 3.2 加振源の探査

振動インテンシティ計測による加振源探査を行うに先立ち、外壁パネルにおける振動及び近接音の周波数特性を調べた。図5は、図3中に示すA点における振動加速度と、壁面から300mmにおける騒音について、それぞれの波形の時間経過とその周波数特性を示すものである。振動と騒音の波形において、衝撃性の強い応答は認められず、また外壁パネルからは125Hz及び400Hzを中心とする広い帯域にわたる騒音が放射されている。そこで振動と騒音の周波数特性により加振源探査に際し400Hz付近の周波数成分に着目して、1/3オクターブバンドの中心周波数315Hzから500Hzにわたる成分のエネルギー和によりVI値を算出し、ベクトル合成法によりその伝播方向を求めた。

図6にこのようにして決定したVIベクトルの分布状態を示す。図に示されるように後パネルには振動は両側端から中央に伝わっている。左パネルと右パネルには、後パネルに近い点の振動の伝播方向は外に向き、他は後パネルから前パネルに向かってVIが分布している傾向が見える。これらのことから、この周波数帯域の振動は、後パネルと両側パネルの接合部から伝わっていると考えられる。

内部の構造を見ると、エンジン吸気管がこの角のフレームの中央部に固定されており、振動はこの固定点からフレームを介してパネルへと伝わっ

ていることが明らかとなった。

### 3.3 騒音対策と効果

前の解析に基づいて、パネルの振動を低減して、パネルから放射される騒音を低減する方法が考えられる。ここで振動を低減するために、吸気管をフレームから外し、エンジンと吸気フィルタカバーとで支持する対策を行った。フレームの吸気管の固定を外した後の振動インテンシティベクトルの分布を図7に示す。この対策による騒音低減効果を図8に示す。図より明らかのように、吸気管とフレームとを振動遮断することにより、400Hz近傍の周波数領域の騒音は著しく低減し、騒音の音圧レベルはそれぞれ、後側で1.6dB(A)、左側で3.1dB(A)、右側で1.8dB(A)それぞれ低下した。

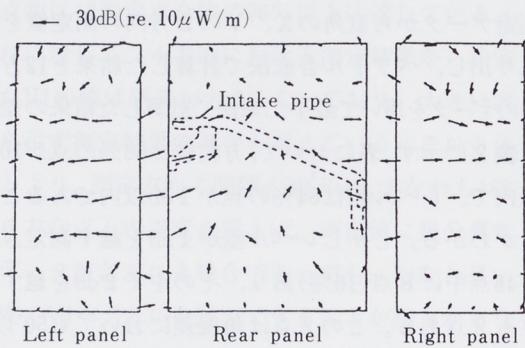


図6 吸気管がフレームに装着してある時の振動伝播状況

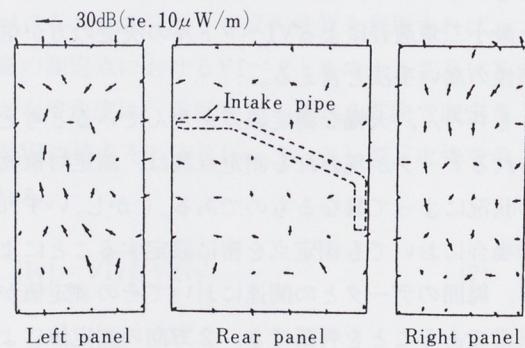


図7 吸気管をフレームから外した後の振動伝播状況

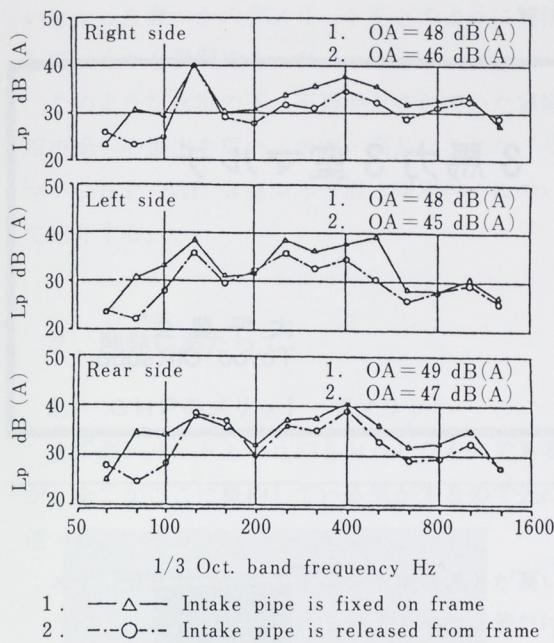


図 8 振動遮断による騒音低減効果

#### 4. 結 論

振動インテンシティの方向の検出方法、及び実際の機械構造物であるガスヒートポンプの加振源探査と騒音対策への適用例について検討した。その主な結果を以下に要約する。

(1) 振動インテンシティの大きさ及び方向の決定については、6方向以上のVI算出結果をピックアップの指向性円に最小二乗法で近似することにより良好な結果がえられた。

(2) 直角な2方向におけるVI計測値のベクトル合成法は、精度要求が高くない場合には測定時間

の短い方法として実用性がある。

(3) 振動インテンシティ法を用いガスヒートポンプ下部パッケージパネルの加振源探査、及び振動伝播状況の調査を行い良好な結果を得た。さらに、本手法により検出した加振源に対して振動遮断対策を取り入れ、1.6dB(A)以上の騒音低減効果を得た。

#### 〔文 献〕

- (1) Noiseux, D.U., "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates", J. Acoust. Soc. America, 47 (1969) 238-247
- (2) Rasmussen, P., "Measurement of Vibration Intensity", Brüel & Kjaer (1983)
- (3) Quinlan, D., "Adaptation of the Four channel Technique to the Measurement of Power Flow in Structures", Proc. 2nd Int. Cong. on Acoustic Intensity (1985). 227-234
- (4) 吉巣・石山・鈴木・丸山, "バイブレーションインテンシティ(VI)の計測法の検討", 日本機械学会講演論文集, No.860-7, (1986), 208-209
- (5) 小白井・立石, "板の振動エネルギー流れの可視化による比較 一振動インテンシティの測定-", 日本音響制御工学会講演論文集, (1986), 277-280
- (6) 小嶋・貝原・古谷・周, "振動インテンシティ法による衝撃源探査に関する一考察", 機論, 55-518, C, (1989)
- (7) 長松昭男, モード解析, 培風館, 1985

#### ■著者■



大橋光久