

歴史的建造物の光学的手法による 3D 形状・振動計測とその計測データを用いた FE 解析による地震応答解析

松田 浩

歴史的建造物を保存・活用するためには、耐震性能の評価が不可欠である。設計図面がない場合が多いので実測する必要がある。本研究では、レーザスキャナやデジタルカメラなどの三次元形状計測システムを用いて、非接触で三次元形状計測を行った。そして、得られた計測結果をデータ変換し、FE メッシュを作成し、FE 解析を実施し、耐震性能を評価することができる。本文では、形状計測、解析、耐震性評価という一連のシステムと、実構造の実計測データに基づく建造物の基礎のモデル化の手法について紹介する。

キーワード：歴史的建造物、3D 計測、デジタル写真計測、FE 解析、実振動計測、耐震性評価

1. はじめに

近年、マスコミ等で世界遺産に関する話題が頻繁に報道されている。土木・建設技術遺産もユネスコ世界遺産の産業・技術関連遺産として注目されるようになり、それらの保存と活用についての調査研究が行われるようになった¹⁾。このような産業・技術関連遺産を保存し活用していくためには、構造物の現況を調査し、安全性を評価する必要がある。しかし、適確な調査法、試験法および診断法は確立されていないのが現状である。また、歴史的建造物は現行耐震基準以前の設計基準で建設されているため、近年頻発している大規模地震に対する耐震性能を考慮すると、補修・補強を講じなければならない場合がほとんどである。

筆者らは構造物の構造特性を把握するために、三次元形状計測を実施し、そのデータを直接有限要素 (FE) 解析に取り込み、計測と解析の自動化を目標として研究を行っている。レーザ光を用いた三次元画像計測システムを開発し、曲面板の振動実験・解析に適用し、本法の有効性を明らかにするとともに、切欠き有する板の非破壊検査への適用性などについても確認してきた²⁾。

一方、実構造物を対象とした三次元計測装置として長距離型レーザスキャナが開発されている。筆者らも長距離型レーザスキャナを用いて、長崎市の平和祈念像の三次元計測を実施し (図-1)、その計測データを FE 解析に取り込み、固有振動解析を実施した³⁾。その結果、レーザスキャナによる計測は簡便かつ短時

間での 3D 計測が可能であることを確認した。また、これまで FE モデル化には膨大な時間と労力が必要であったが、本法を用いることにより構造物の FE モデル作成を大幅に省力化できることなどを確認した。また、最近特に高密度化したデジタルカメラの普及とパーソナルコンピュータやその周辺機器の高速化・低価格化により、三次元写真計測が身近なものになり、レーザスキャナと同様に、デジタルカメラと写真計測システムを用いて 3D デジタルデータを取得できるようになり、さらにそのデータを FE 解析に取り込むことにより、構造物の構造特性を解析的に算定できるようになった。しかし、FE 解析における地盤や支持条件に応じた境界条件の設定が大きな課題であり、これまで地質調査等により地盤定数が算定されてきた。



図-1 レーザスキャナによる 3D 計測

本研究では、FE解析の境界条件を弾性支持としてモデル化し、そのバネ定数を決定するために、レーザドップラ速度計を用いた実振動計測に基づいてバネ定数を同定法についても検討した。

本研究は、①三次元写真計測、②FEメッシュ作成、③実振動計測、④境界条件の同定、⑤静的・動的地震応答解析、⑥耐震性能評価、までの一連の計測・解析・評価システムを開発することを目標としたものであり、これまでの研究成果を紹介する。

2. 平和祈念像の三次元計測とFE固有値解析

(1) 三次元レーザスキャナ計測

三次元レーザスキャナを用いて、平和祈念像の形状計測を行った(図-1)。全体の三次元形状データを取得するために、8方向から計測を行い、それらを繋ぎ合わせて全体の形状データを取得した(図-2)。レーザスキャナ計測は簡便にかつ短時間で計測を行うことができるが、専門的な操作法とバッテリーなどの電源も必要である。計測データは点群データである。点群同士をつなぎワイヤフレームデータを作成し、形成された三角メッシュに面を張ることでサーフェスデータを作成した(図-3)。

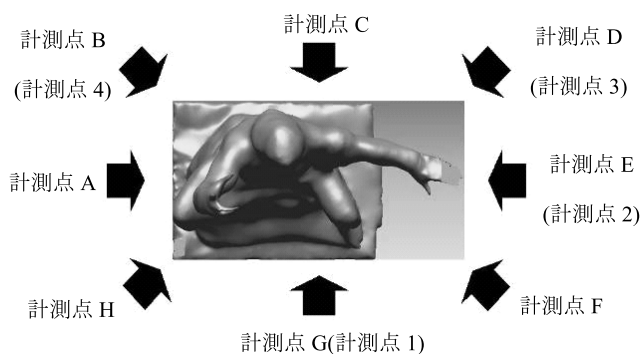


図-2 計測の方向



図-3 計測データ

(2) 三次元デジタル写真計測

写真計測では図-2に示す4方向(計測点1~4)から計測し、各方向それぞれ、わずかにずらした2枚の画像をもとに点群データを取得した(図-4)。デジタル画像の撮影には1メガ画素のデジタルカメラを用い、カメラの焦点距離を一定にするため、ズームをwide端に固定して撮影した。また、写真計測においてもレーザスキャナと同様に、それぞれの計測箇所において計測した結果を繋ぎ合わせるにより全体のモデルを作成した。合成に際しては、まず前面を合成し、次に後面を合成した。そして、前・後面を合成することで、全体のデータを作成した。

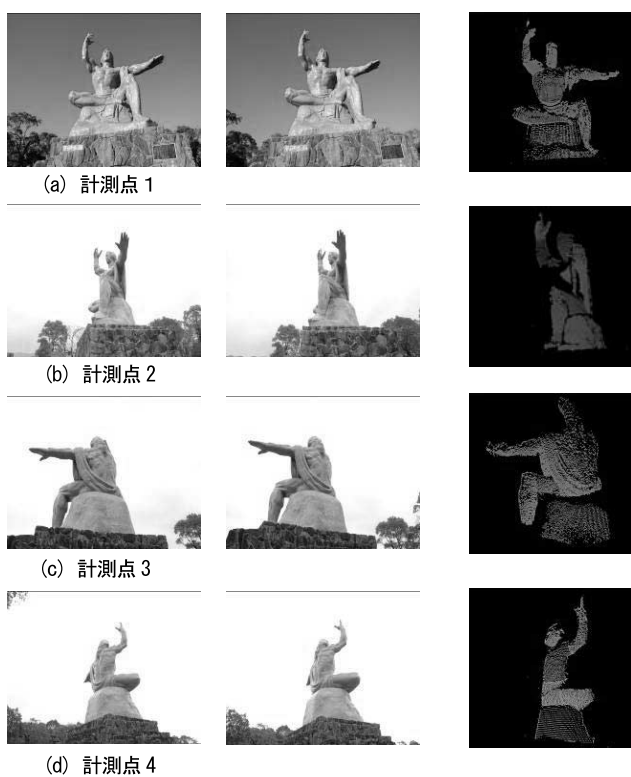


図-4 計測位置

(3) 計測結果比較

トランシットを用い平和祈念像の2点間の水平距離を測量し、レーザスキャナおよびデジタル写真計測による計測結果を比較した。比較箇所は図-5に示す3箇所(a, b, c間の距離)である。結果を表-1に示す。レーザスキャナおよび三次元写真計測の結果は実測値とよく一致している。

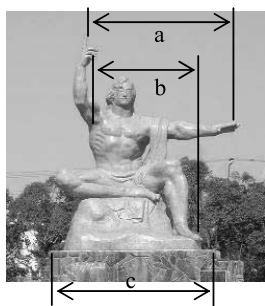
(4) FE固有振動解析結果

サーフェスデータをSTLファイルへ変換し、有限要素汎用コードに入力することにより、FEモデルを作成できる。また、必要があれば内部にテトラ要素

を構築することでソリッドデータを作成することも可能である。STL ファイルは各点の座標と面における法線ベクトル情報を有しているため、面の方向が確定し、点群の座標データをもち、実形状データと等価な情報を有する。

作成した FE モデルを図—6 に示す。解析には青銅の材料特性を用い、弾性係数は 1.1×10^5 MPa、ポアソン比は 0.385、引張強度は 130 MPa とし、厚さは 18 mm とした⁴⁾。ここでの境界条件は、台座部分を完全固定として解析した。なお、レーザスキャナで直接得られる計測点数は約 30 万の点群データであるため、直接、計測データを解析に用いると膨大な容量と解析時間を要する。そこで、三次元写真計測データ数と同程度にまで低減させて固有振動解析を行い、解析精度について比較検討した。また、要素数を減少させたことによる解析精度についても検討した。

解析結果を表—2 に示す。レーザスキャナと写真計測の計測データによる振動解析結果の固有振動数はよく一致している。また、三次元写真計測は、高精度の計測が可能であるレーザスキャナと同程度の解析精



図—5 計測箇所



図—6 FE モデル (要素数: 18176)

表—1 寸法比較 (単位: m)

| | a | b | c |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| 測量値 | 6.89 (1.00) | 5.33 (1.00) | 7.33 (1.00) |
| レーザスキャナ | 6.80 (0.99) | 5.27 (0.99) | 7.21 (0.98) |
| 写真計測 | 6.69 (0.97) | 5.17 (0.97) | 7.17 (0.98) |

表—2 固有振動数の比較 (Hz)

| | 1次 | 2次 | 3次 | 4次 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| レーザスキャナ (要素数:610415) | 3.60 (1.00) | 5.10 (1.00) | 9.02 (1.00) | 9.36 (1.00) |
| レーザスキャナ (要素数:17101) | 3.47 (0.96) | 5.07 (0.99) | 8.94 (0.99) | 9.34 (0.99) |
| 写真計測 (要素数:18176) | 3.35 (0.93) | 4.96 (0.97) | 8.80 (0.98) | 9.30 (0.99) |

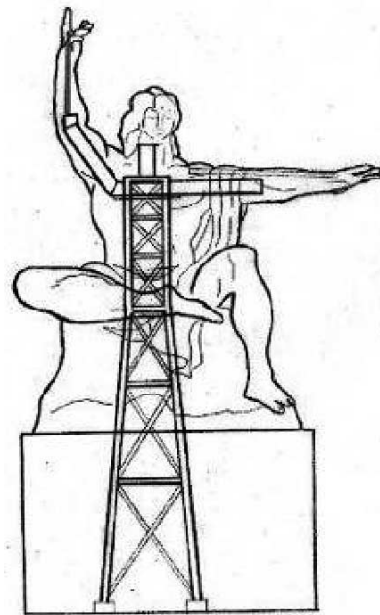
度を有しており、さらに、要素数を減じても同程度の解析結果を得ることを確認できた。

3. 耐震性能の評価方法への利用

(1) 固有振動解析

昭和 30 年に完成した平和祈念像は、当初、左肩から腕部にかけてのみ山形鋼で補強されており、そのほかは空洞であった。その後、昭和 53 年にボルト取替えとステンレスパイプによる補強工事がなされている。また、平成 11 年に全体的な修復が行われている。

平和祈念像は、現在は図—7 に示すように、内部にステンレス鋼による補強が施されている。ステンレス鋼による補強効果を解析的に検討するために、補強された場合と、そうでない場合において固有振動解析を実施した。



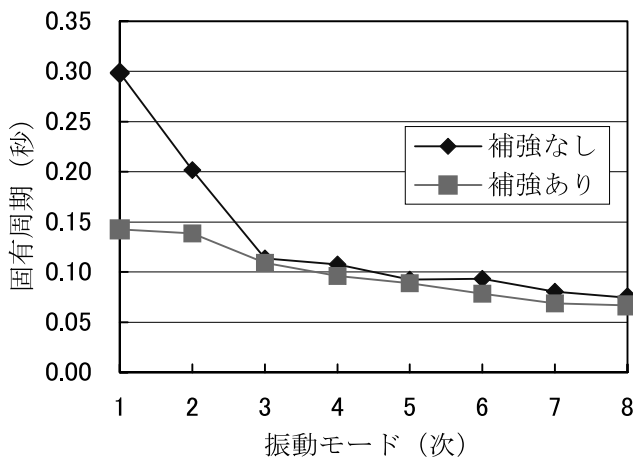
図—7 補強された現在の平和祈念像⁴⁾

なお、ここでの固有振動解析法は、前記同様で、FE モデルは三次元写真計測結果より作成した FE モデルを用いて行った。また、内部のステンレス鋼は 2 節点梁要素 (弾性係数: 2.0×10^5 MPa、ポアソン比: 0.3、引張強度: 450 MPa) を採用した。境界条件としては下端を完全固定とした。また、固有振動数、固有モードより有効質量比をそれぞれにおいて算出することとした。

(2) 解析結果

補強の有無における固有周期の比較を図—8 に、

また固有周期および有効質量比を表—3, 4 に示す。有効質量比は、その構造物の振動モードに対する寄与率を示すものであり、この値の最大のモードがその構造物の卓越モードである。補強なしの場合も補強ありの場合も、X 方向で2次, Y 方向で1次, Z 方向で3次の値が高くなっている。したがって、補強なし、補強ありのいずれの場合でも、1次および2次モードが卓越モードであると考えられる。また、図—8より卓越モードであると考えられる1次および2次モードにおいて固有周期の値が、補強を施すことによって減少しており、耐震性能が増大することを確認できる。



図—8 補強の有無による固有振動数の比較

表—3 固有周期および有効質量比 (補強なし)

| 固有モード | 固有周期(秒) | x | y | z |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| 1次 | 0.1426 | 12.24 % | 25.06 % | 0.10 % |
| 2次 | 0.1386 | 26.25 % | 12.65 % | 2.00 % |
| 3次 | 0.1091 | 1.49 % | 11.32 % | 34.19 % |
| 4次 | 0.0962 | 0.68 % | 1.88 % | 4.57 % |
| 5次 | 0.0886 | 2.43 % | 0.63 % | 31.24 % |
| 6次 | 0.0782 | 1.26 % | 2.61 % | 1.89 % |
| 7次 | 0.0689 | 1.04 % | 4.76 % | 4.44 % |
| 8次 | 0.0666 | 4.30 % | 0.15 % | 2.28 % |
| 合計 | | 49.68 % | 59.06 % | 80.71 % |

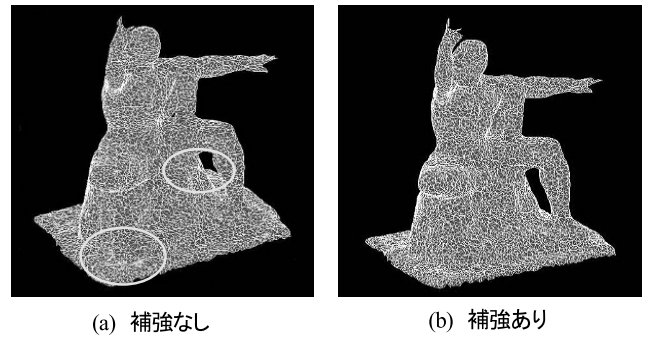
表—4 固有周期および有効質量比 (補強あり)

| 振動モード | 固有周期(秒) | x | y | z |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| 1次 | 0.2985 | 12.04 % | 25.03 % | 0.11 % |
| 2次 | 0.2016 | 25.45 % | 12.05 % | 1.89 % |
| 3次 | 0.1136 | 2.26 % | 9.93 % | 30.43 % |
| 4次 | 0.1075 | 1.37 % | 3.26 % | 2.34 % |
| 5次 | 0.0926 | 2.06 % | 1.09 % | 13.02 % |
| 6次 | 0.0934 | 0.14 % | 2.79 % | 25.19 % |
| 7次 | 0.0803 | 1.55 % | 4.32 % | 4.84 % |
| 8次 | 0.0745 | 4.16 % | 0.24 % | 2.83 % |
| 合計 | | 49.03 % | 58.71 % | 80.65 % |

(3) 地震応答解析

前記の FE モデルを用いて地震応答解析を実施した。入力地震波には兵庫県南部地震で観測された地震波を Y 方向 (平和祈念像の前後方向) に加振させた。図—9 は地震応答解析における塑性ひずみ分布図を示したものである。補強の有無により塑性ひずみ分布が異なり、補強なしの場合は塑性ひずみが大きくなっている箇所が示されている。これは補修・補強を施す場合の資料となり得ることを示唆するものである。

さらに、平和祈念像の右手先端の変位の応答は、補強なしの場合には最大変位が 11.8 cm であったのに対して、補強ありの場合には 1.95 cm で約 2 割にまで大幅に低減された。



図—9 地震応答解析における塑性ひずみ分布図

4. 境界条件の同定 (煙突への適用)

前項までは、境界条件は完全固定として FE 解析を行ってきたが、実構造における地盤や基礎の境界条件は完全固定であることはまずあり得ない。ここでは、固有振動数の実測値に基づく境界条件の同定法を述べる。

(1) 実振動計測によるバネ定数の同定

昭和 52 年に建造された長崎大学文教キャンパスにある煙突を三次元写真計測を行った。4 方向から、それぞれ 3 枚ずつ、計 12 枚撮影し、各方向から取得したデータを繋ぎ合わせて全体の形状データを作成した (図—10)。

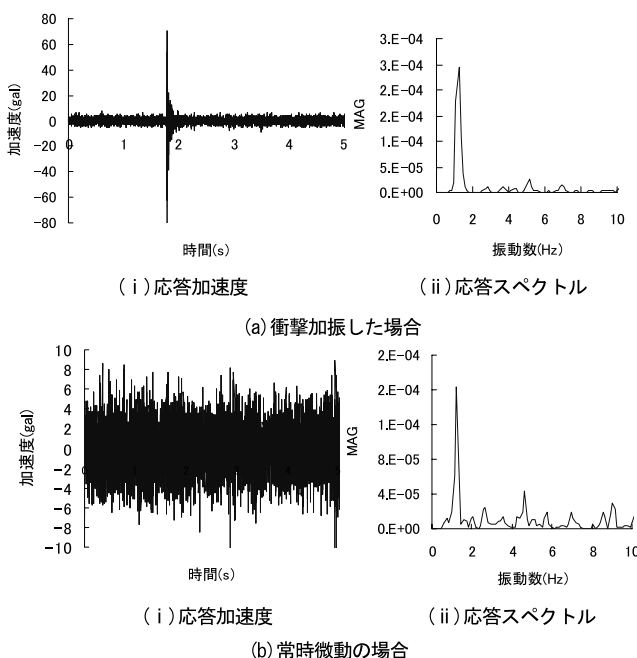
本研究では、非接触による振動計測法としてレーザドップラ速度計による方法を採用した。本計測器は構造物にレーザ光を照射し、その反射光を受光し、反射光のドップラ効果を利用して、物体の速度を非接触で検出するものである。また、数 m ~ 数十 m 離れた場所から構造物の振動を測定でき、センサ設置など高所作業を伴う危険な測定作業を回避できる。また、比較



図一10 煙突構造のモデル化

的大きな応答から、常時微動まで測定可能である。

実構造物において歴史的構造物や大規模構造物などでは、ハンマリング試験やワイヤカット試験を容易に行えない場合がある。そこで、構造物の常時微動計測による固有振動解析を行った。加振による振動と常時微動の計測を行った。計測位置は地面から約10mの位置、煙突までの距離は約15mとし、サンプリング周波数は1000Hz、約5秒間計測を行った。図一11には加振した場合と常時微動の場合の振動波形およびそのフーリエスペクトルを示す。この結果より、加振した場合と常時微動の場合ともに、固有振動数は22Hzとなり、常時微動の場合であっても、加振した



図一11 振動計測での振動波形とフーリエスペクトル

場合と同等に、固有振動数を求めることができることが確認される。

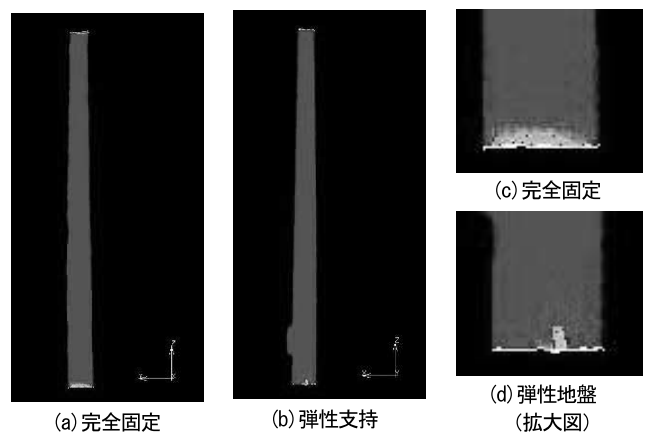
FE解析において境界条件を水平・鉛直・回転弾性バネを用いてモデル化した。バネ定数は、常時微動による実測値に近くなるように、各々、 3.1×10^8 , 3.9×10^8 (N/m), 1.8×10^9 (Nm/rad) と設定した。表一5にその場合の固有振動数を示す。

表一5 境界条件による固有振動数の相違 (Hz)

| | 実測値 常時微動 | FE解析値 | |
|----|-------------|--------|--------|
| | | 境界条件 | |
| | | 完全固定 | 弾性支持 |
| 1次 | 1.22 | 1.48 | 1.22 |
| 誤差 | — | (1.00) | (1.00) |
| 2次 | 4.46 | 6.45 | 4.42 |
| 誤差 | — | (1.45) | (0.99) |

(2) 地震応答解析

境界条件の影響を明らかにするため、地震応答解析を行った。入力地震波には兵庫県南部地震で観測された地震波を用い、解析手法は直接積分法であるNewmarkの β 法を用い、積分区間は0.01秒とした。材料特性はコンクリートの材料特性を用いた(弾性係数: 22.43 GPa, ポアソン比: 0.2, 単位体積重量: 24 kN/m³)。地震応答解析を行った結果の塑性ひずみ分布を図一12に示す。完全固定とした場合、塑性ひずみは水平方向に広がっている。しかし、弾性地盤とした場合、水平方向への塑性ひずみの進展はないことがわかる。地盤のモデル化、すなわちバネ定数を如何に実構造物に合致するように設定するかが重要であることが確認される。



図一12 境界条件による塑性ひずみ分布図の相違

本研究では、レーザドップラ速度計を用いた実計測値に基づいてバネ定数を求めた。逆解析技術等を用い

てバネ定数の同定法を改良する余地があるものの、レーザードップラ速度計を用いた実計測に基づくバネ定数の同定方法の有効性を窺うことができる。

5. あとがき

本文では、①三次元写真計測、②FEメッシュ作成、③実振動計測、④境界条件の同定、⑤静的・動的地震応答解析、⑥耐震性能評価、までの一連の計測・解析・評価システムについて紹介した。個々の要素技術については改良の余地が多々あるものの、計測機器や解析法は日進月歩で進歩している。歴史的建造物のデジタルアーカイブ化も進んでおり、それに本文で述べたような一連の計測・解析・評価システムを用いて構造力学的特性を付与することもできるので、歴史的建造物の保存と活用と有用となるものと考えられる。

JCMA

《参考文献》

- 1) 古田陽久・古田真美：世界遺産ガイド 一産業・技術編一，シンクタンクセとち総合研究機構（2001）
- 2) 松田・大石ほか：ホログラフィ干渉計測および3次元計測による薄肉構造部材の非破壊検査に関する研究 応用力学論文集，**5**，pp.847-854（2002）
- 3) 鶴田・松田ほか：歴史的建造物の三次元デジタル画像化とその地震応答解析への利用，コンクリート工学年次論文集，[28]，pp.1609-1614，日本コンクリート工学協会（2006）
- 4) 平和祈念像修復懇話会：平和祈念像の修復報告書，長崎市（2000）

【筆者紹介】

松田 浩（まつだ ひろし）
長崎大学
工学部構造工学科



建設機械ポケットブック

＜除雪機械編＞

本書では、除雪機械について事故や故障を未然に防止するための主要な点検項目や点検時の留意点などを整理しました。日常点検や定期点検・整備における基礎資料として活用され、点検、整備および修理を的確かつ効率的に実施し、道路の維持除雪工事を安全で適正に施工するための一助となれば幸いです。

監修／国土交通省北海道開発局事業振興部機械課
発行／社団法人 日本建設機械化協会

目次

1. 整備点検のあらまし
2. 除雪トラック

3. 除雪グレーダ
4. 除雪ドーザ
5. ロータリ除雪車
6. 小形除雪車
7. 凍結防止剤散布車
8. 資料編

●パスポートサイズ／87ページ

●平成17年9月発刊

●定 価

1,000円（本体953円）送料250円

※送料は複数冊申込みの場合、又は他の図書と同時申込みの場合、割引となる場合があります。

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>