リニアモータを用いた高層建物制振用 アクティブ・マスダンパの制御手法に関する研究*

藤田 隆史^{*1}, 別所 智彦^{*2}, 洞 宏一^{*3}
田中 清^{*4}, 中村 佳也^{*5}

Control Methods for Active Mass Damper Using Linear Motor for Vibration Control of Tall Buildings

Takafumi FUJITA, Tomohiko BESSHO, Hirokazu HORA,
Kiyoshi TANAKA and Yoshiya NAKAMURA

Linear motors are promising actuators for active mass dampers, because driving mechanisms using them become more simple, reliable and efficient than those of current mass dampers which use AC-servomotors and hydraulic actuators. Control methods using directly measured absolute accelerations of the buildings as feedback signals, are expected to be more reliable than those of current mass dampers using relative velocities and displacements to the ground which are calculated from the absolute accelerations. In this study, controllers were designed for the acceleration feedback control for a mass damper using a linear motor, based on the H^∞ control theory and a model-matching method. A gain-scheduled control law was also developed for the acceleration feedback control. Excitations tests were carried out for a 5-story building model of a 5 800 kg total mass and a 3.4 m height with a mass damper model on the roof. Through the tests, it was shown that the H^∞ controllers had higher performance than the model-matching controllers, and the gain-scheduled control law was very effective.

Key Words: Vibration Control, Active Mass Damper, Linear Motor, Acceleration Feedback Control, H^∞ control, Model-Matching, Excitation Test, Tall Building

1. ま え が き

近年, 高層ホテルを代表例として, 高層建物の居住性向上のためにアクティブ・マスダンパを使用する場合が多くなっている。現在のアクティブ・マスダンパで用いられているアクチュエータには AC サーボモータと油圧アクチュエータがあるが, 最近では, AC サーボモータが主流となっている。

ところで, AC サーボモータの場合, 回転力を直線力に変える機構(ボールねじ, ラック&ピニオンなど)が必要であるが, リニアモータを用いると, それらの機構は一切不要となる。特に, 著者らが従来より提案してきたアクティブ・パッシブ切換え形マスダンパの場合⁽¹⁾⁽²⁾, その切換えがステータに流れる電流の断続によって行うことができる利点は大きい。また, 可動質量のしゅう動抵抗は相対的に小さくなり, パッシ

ブ・マスダンパとしての性能も向上する。実用化においては, 制振装置階下への固体音の伝播が常に問題となるが, リニアモータはその点においても非常に有利なアクチュエータである。さらに, メンテナンスも容易である。したがって, AC サーボモータと比較して, 1 台当たりの出力が小さいことや効率が低いことなどの短所もあるが, 上述のように長所の多いリニアモータは, 今後, アクティブ・マスダンパのアクチュエータとして非常に有望視されるアクチュエータである。

一方, 現在のアクティブ・マスダンパで実用されている制御則のほとんどは LQ 制御による状態フィードバック制御であり, 建物の状態量として相対速度と相対変位をフィードバック信号として用いるのが普通となっている。しかし, これらの信号は, 建物各階の絶対加速度の積分値から 1 階での積分値を引き算することによって求めており, 積分によるドリフトなどの影響を受けやすい信号である。この問題の解決策として, 建物の絶対加速度をそのままフィードバック信号として用いる制御手法⁽³⁾が有効である。

本研究では, リニアモータを用いたアクティブ・マスダンパを対象として, 建物の絶対加速度フィードバックによる制御手法を研究している。制御器の設計にはモデルマッチング法と H^∞ 制御理論を用い, 屋上階

* 原稿受付 1997 年 5 月 13 日。

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (☎ 106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)。

^{*2} 准員, 日揮(株) (☎ 232-0000 横浜市南区みなとみらい 2-3-1)。

^{*3} 正員, 三菱製鋼(株)環境エンジニアリング事業部 (☎ 135-0053 東京都江東区辰巳 3-5-3)。

^{*4} (株)フジタ技術研究所 (☎ 224-0027 横浜市都筑区大綱町 74)。

^{*5} 正員, (株)フジタ技術研究所。

にマスダンパモデルを搭載した五層建物モデルの振動制御実験を通して、種々の制御器の性能を比較検討している。また、風/地震外乱の大きさに応じて制御の強さを変化させるゲイン・スケジューリング制御則⁽⁴⁾も研究し、その有効性を確認している。

2. 実験モデル

2.1 マスダンパの実験モデル リニアモータを用いたアクティブ・マスダンパの実験モデルを図1に、その仕様を表1に示す。本実験モデルでは、7.6 kWのエレベータ用円筒形リニア誘導モータを用いており、モータ本体の可動部であるロッド(図1のLinear motor rod)だけで十分な質量をもっているため、そのロッドをマスダンパの可動質量として用いている。すなわち、モータのステータ(図1のLinear motor stator)はマスダンパの基礎部に固定され、その中心を通るロッド自体が可動質量となり、ロッドにコイルばねと粘性ダンパが取付けられている。

マスダンパのブロック線図を図2に示す。リニアモータはPIコントローラによって速度制御されており、速度指令電圧と制御力の関係は、次の3式で表すことができる。

$$\dot{e} = u - k_{fv}\dot{x}_d - k_{fd}x_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$e_{PI} = k_p \dot{e} + \frac{k_p}{T_i} e \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_a + T_L \dot{F}_a = k_e e_{PI} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 u , $\dot{e}$ は速度指令電圧および偏差電圧, x_d はマスダンパの設置階に対する相対変位, k_{fv} , k_{fd} はマ

スダンパの速度, 変位のフィードバックゲイン, k_p , T_i はPIコントローラの比例ゲインおよび積分時定数, e_{PI} はPIコントローラの出力電圧, F_a はリニアモータの制御力, T_L , k_e は制御力の時定数と比例ゲインである。

また、マスダンパの運動方程式は次のようになる。

$$m_d \ddot{X}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_d m_d g \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) = F_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 m_d , c_d , k_d , μ_d , X_d はマスダンパの質量, 減衰定数, ばね定数, 摩擦係数, 絶対変位である。上式を線形化するために摩擦を無視して次式を得る。

$$m_d \ddot{X}_d + \bar{c}_d \dot{x}_d + k_d x_d = F_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $\bar{c}_d$ は省略した摩擦を考慮した等価減衰定数

Fig. 2 Block diagram of mass damper

Fig. 3 Transfer function from input voltage to mass damper velocity

Table 1 Specifications of mass damper model

Moving mass	85.8kg
Natural frequency	2.38Hz
Damping ratio	7%
Maximum Displacement	±0.2m
Rated output	7.6kW
Rated thrust	4350N

Fig. 1 Experimental model of active mass damper using linear motor

Fig. 4 Building model with mass damper model

である。式(1)～(3), 式(5)のラプラス変換より, 建物に設置していないマスダンパ単独の, 速度指令電圧からマスダンパ速度への伝達関数が求められる〔ただし, この場合は式(5)において $X_d = x_d$ としている〕。図3はその伝達関数の解析結果と実験結果を示したもので, ほぼ満足し得る一致が得られている。

2.2 建物の実験モデル 図4に建物の実験モデル(頂部にマスダンパの実験モデルが設置されている)を示す。建物モデルは五層せん断変形形モデルで, 各層1100 kg, 総質量5800 kg, 高さ3.4 mである。また, 一次モードの固有振動数は2.4 Hz, 減衰比は0.9%, 二次モードの固有振動数は6.4 Hz, 減衰比は2.1%である。

3. 解析モデル

図5のように, 高層建物を n 質点系でモデル化する。建物・マスダンパ系の運動方程式は, 次のようになる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{s\}(-m_d \ddot{X}_d) - [M]\{1\}\ddot{z} + \{w\} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$m_d \ddot{X}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_d m_d g \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) = F_a \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで, $[M], [C], [K](n \times n)$ は, それぞれ建物の質量行列, 減衰行列, 剛性行列, $\{x\}(n \times 1)$ は建物の地面からの相対変位ベクトル, $\{s\} = \{0 \cdots 01\}^T (n \times 1)$ はマスダンパの設置階(ここでは n 階)を示すベクトル, $\{1\} = \{1 \cdots 1\}^T$, z は地震の地動変位, $\{w\} = \{w_1, w_2, \cdots, w_n\}^T (n \times 1)$ は風による外力ベクトルである。

式(6)の運動方程式をモード行列 $[T]$ を用いてモード座標 $\{q\}$ に変換し, 次式を得る。

Fig. 5 Analytical model

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\rho_i t_{ni} \ddot{X}_d - \beta_i \ddot{z} + v_i \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで, $q_i, \zeta_i, \omega_i, \rho_i$ は i 次のモード変位, モード減衰比, 固有円振動数, 質量比で, t_{ni} はモード行列の ni 成分, β_i は i 次の刺激係数, v_i は i 次の単位モード質量当りの一般化風外力である。式(8)を, モード絶対座標 $Q_i = q_i + \beta_i z$ を用いて書き換えると以下のようになる。

$$\ddot{Q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{Q}_i + \omega_i^2 Q_i = -\rho_i t_{ni} \ddot{X}_d - 2\zeta_i \omega_i \beta_i \ddot{z} - \omega_i^2 \beta_i z + v_i \quad \cdots \cdots (9)$$

4. 制御器

4.1 制御器の設計目標 本研究では, 制御器の設計にモデルマッチング法と H^∞ 制御理論を用い, 以下の4点を考慮して制御器の設計を行っている。

- (1) 制御対象は建物の一, 二次モードとする。
- (2) 外乱から出力までの伝達率を小さくする。
- (3) 考慮外モードによるスピルオーバー不安定を防ぐため, 観測ノイズから制御電圧への伝達関数にローパス特性をもたせる。
- (4) マスダンパのドリフトを防ぐため, 出力から制御電圧への伝達関数にハイパス特性をもたせる。

出力としては, モード絶対加速度と特定階の絶対加速度の二つの場合を考える。モード絶対加速度の場合, モーダルフィルタを用いて $\ddot{Q}_1, \ddot{Q}_2$ を取出し, それぞれのモードに対して制御器を設計する。特定階の絶対加速度の場合, j 階の絶対加速度 $\ddot{x}_j + \ddot{z}$ を,

$$\ddot{x}_j + \ddot{z} \cong t_{j1} \ddot{Q}_1 + t_{j2} \ddot{Q}_2 + \cdots + t_{jk} \ddot{Q}_k \quad \cdots \cdots (10)$$

のように近似し, それに対して一つの制御器を設計する。

4.2 H^∞ 制御理論による制御器 H^∞ 制御理論による制御システムのブロック線図を図6に示す。

制御のための低次元化の際に無視された非制御高次モードが公称プラントに対して, Δ_a という加法変動で表されるとし, W_R はすべての周波数帯域で $W_R \geq \Delta_a$ となるような伝達関数とする。非制御高次モード

Fig. 6 Block diagram of control system in H^∞ control theory

に対するロバスト性を確保するため、仮想的な外乱 w から仮想的な出力 Z_R までの伝達関数

$$Z_R/w = W_R(-C(1-PC)^{-1}) \quad (11)$$

の H^∞ ノルムが

$$\|Z_R/w(s)\|_\infty < 1 \quad (12)$$

を満たすように制御器を設計する。

また、制御対象の応答がある特定の周波数帯域で落とすために、出力に周波数依存の重み付けを行う。 W_S をその周波数重み関数とし、外乱 w から出力 Z_S までの伝達関数

$$Z_S/w = W_S(1-PC)^{-1} \quad (13)$$

の H^∞ ノルムが、ある係数 γ に対して

$$\|Z_S/w(s)\|_\infty < \gamma \quad (14)$$

を満たすように制御器を設計する。

以下に、三つの場合に対して設計した制御器について述べる。

(i) 出力がモード絶対加速度で、センサ数が3個の場合：センサは最上階、二次モードの腹に当る3階、三次モードの腹に当る4階に設置した。出力 y は $\dot{Q}_1, \dot{Q}_2$ とし、それぞれのモードに対して制御器を設計した。重み関数 W_S, W_R として式(15), (16)を採用し、 W_S は制御帯域で高ゲインとなるフィルタ特性を、 W_R はドリフトおよび考慮外モードによるスピルオーバー不安定に対してロバストになるように低、高振動数で高ゲインとなるようなフィルタ特性をもたせた。

$$W_S = \frac{s^2 + 2\zeta_q \omega_p s + \omega_p^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2} \quad (15)$$

$$W_R = k_r \frac{s^2 + 2\zeta_c \omega_p s + \omega_p^2}{(s + \omega_a)(s + \omega_b)} \quad (16)$$

ここで、 ω_p, ζ_p は制御対象の固有円振動数、減衰比で、 ζ_q, ζ_c はともに任意減衰比、 k_r は係数重み、 ω_a, ω_b は

ともに任意円振動数である。

図7は、一次、二次モードについての重み関数、外乱から出力までの伝達関数を示している。ここで、 P_{dy} は開ループ伝達関数、 W_{dy} は閉ループ伝達関数であり、目標減衰率は一次モードで10%、二次モードで5%である。

(ii) 出力がモード絶対加速度で、センサ数が2個の場合：センサは最上階と二次モードの腹に当る3階に設置した。 W_S については(i)と同じ関数を採用したが、 W_R については考慮外モードに対するロバスト性を大きく見積る必要があったため、式(17)を用いた。

$$W_R = k_r \frac{(s^2 + 2\zeta_c \omega_p s + \omega_p^2)^2}{(s + \omega_a)^2 (s + \omega_b)^2} \quad (17)$$

この場合の重み関数、外乱から出力までの伝達関数を図8に示す。目標減衰比は一次モードで10%、二次モードで5%である。

(iii) 出力が屋上階絶対加速度で、センサ数が1個の場合：センサは最上階に設置した。出力 y は $t_{s1}\dot{Q}_1 + t_{s2}\dot{Q}_2$ とし、一つの制御器を設計した。重み関数は W_S, W_R として式(18), (19)を採用し、 W_S は制御対象モードである一、二次モードで高ゲインとなるフィルタ特性をもたせた。

$$W_S = \frac{(s^2 + 2\zeta_{q1}\omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_{q2}\omega_2 s + \omega_2^2)}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2\omega_2 s + \omega_2^2)} \quad (18)$$

$$W_R = k_r \frac{(s + \omega_p)(s^2 + 2\zeta_c \omega_p s + \omega_p^2)}{(s + \omega_a)^2 (s + \omega_b)} \quad (19)$$

ここで、 ζ_{q1}, ζ_{q2} は任意減衰比である。図9にこの場合の重み関数、外乱から出力までの伝達関数を示す。目標減衰比は一次モードで10%、二次モードで5%である。

Fig. 7 Weight functions and transfer functions from disturbance to modal accelerations (3 sensors)

Fig. 8 Weight functions and transfer functions from disturbance to modal accelerations (2 sensors)

Fig. 9 Weight functions and transfer functions from disturbance to roof floor accelerations (1 sensor)

Fig. 11 Transfer function from disturbance to modal accelerations and controller characteristics (3 sensors)

Fig. 10 Block diagram of control system in model matching method

ある。

4.3 モデルマッチング法による制御器 図 10 に示すようなシステムを考える。ここで r, u, y, v, d はそれぞれ、目標値、制御入力、出力、観測ノイズ、外乱を表す。このシステムにおいて、 $y=L(\ddot{Q}_i)$, $d=L(\ddot{z})$, $u=L(u)$ とおくと、 y は次式で表される。

$$y = P_{dy} \cdot d + P_{uy} \cdot u \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 P_{dy}, P_{uy} はそれぞれ、プラントの外乱および制御入力から出力までの開ループ伝達関数である。また、 C_{ru}, C_{yu} をそれぞれ、制御器の目標値および出力から制御入力までの開ループ伝達関数とすると、目標値、観測ノイズ、外乱から出力までの閉ループ伝達関数 W_{ry}, W_{vy}, W_{dy} は以下のように表される。

$$W_{ry} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{uy} C_{ru} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$W_{vy} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{uy} C_{yu} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$W_{dy} = (1 - P_{uy} C_{yu})^{-1} P_{dy} \quad \dots\dots\dots (23)$$

モデルマッチング法によってプロパな制御器を設計するには上記の開ループ伝達関数が実現条件、連結条件、次数条件の三つの条件を満たす必要があり、さら

Fig. 12 Fuzzy partitions for gain-scheduled control

に制御器に動特性をもたせることによって、フィルタ特性を組込むことができる。制御系は外乱から出力までの伝達関数 W_{dy} を指定することによって設計する。なお、モデルマッチング法に関する詳細は文献(5)を参考にされたい。

モデルマッチング法の場合には、出力がモード絶対加速度で、センサ数が3個の場合と2個の場合の制御器を設計した。ところで、本手法の場合、外乱から出力への閉ループ伝達関数 W_{dy} を試行錯誤によって設定する必要がある。出力が屋上階絶対加速度の場合には、試行錯誤によって指定すべきパラメータが多すぎるため、制御器の設計を断念した。

目標減衰比は、 H^∞ 制御理論による制御器と同じに設計して実験で比較しようとしたが、そのままではスピルオーバー不安定を回避できなかったため目標減衰比を小さくした。センサ3個の場合、1次8%、2次5%、センサ2個の場合、1次5%、2次5%とした。図 11 は、センサ数3個の場合の一、二次モードにおける外乱から出力までの伝達関数 W_{dy} と制御器の伝達関数を示したものである。

Table 2 Threshold values of mass damper displacement

Controller	$d_1(m)$	$d_2(m)$
H^∞ controller (2 sensors)	0.03	0.045
H^∞ controller (1 sensor)	0.03	0.05

4.4 ゲイン・スケジューリング 本来、ゲイン・スケジューリングはフィードバック・ゲインを切換えて可変制御系を実現するものである。本研究では、目標減衰比の異なる二つの制御器を用意し、常にそれぞれの制御入力を計算し、それらの線形結合を取ることによって可変制御系を実現している。

ここでは、外乱の大きさによらず、常にマスダンパ変位が作動限界内に収まるように制御の強さを変化させる場合を考える。そのため、マスダンパの相対変位と相対速度に注目して可変制御を行った。図12はファジィ領域分割を示しており、領域 f_1 では強い制御、 f_2 では弱い制御を行う。ただし、 d_1, d_2 は変位のしきい値、 v_1, v_2 は速度のしきい値であり、これらには次の関係がある。

$$v_1 = 2\pi f_1 d_1, \quad v_2 = 2\pi f_2 d_2 \quad (24)$$

ここで f_1 は建物モデルの一次固有振動数(2.4 Hz)である。

目標減衰比が大きい制御器の制御入力を u_1 、それが小さい制御器の制御入力を u_2 とすると、本制御器による制御入力 u はファジィ領域分割にしたがって次のように定めた。

$$(1) \quad \frac{x_d^2}{d_1^2} + \frac{\dot{x}_d^2}{v_1^2} \leq 1 \text{ のとき}$$

$$u = u_1 \quad (25)$$

$$(2) \quad \frac{x_d^2}{d_2^2} + \frac{\dot{x}_d^2}{v_2^2} \geq 1 \text{ のとき}$$

$$u = u_2 \quad (26)$$

$$(3) \quad \frac{x_d^2}{d_1^2} + \frac{\dot{x}_d^2}{v_1^2} > 1 \text{ かつ } \frac{x_d^2}{d_2^2} + \frac{\dot{x}_d^2}{v_2^2} < 1 \text{ のとき}$$

$$u = t \cdot u_1 + (1-t) \cdot u_2 \quad (27)$$

ただし、 t は図12において、A点と原点を結んだ直線の、内側のだ円との交点と外側のだ円との交点のA点からの距離の比を $t:1-t$ とした場合の比率である。実験では変位限界を仮想的に ± 0.06 m とし、しきい値 d_1, d_2 を表2のように定めた。

5. 振動制御実験

図13に制御システムの構成を示す。制御はDSPによって行い、サンプリング周期は1 msとした。

5.1 定常不規則波加振実験

Fig. 13 Control system

Fig. 14 Control performance for random noise excitation

(0.5~20 Hz でパワースペクトル一定)を振動台入力加速度とし、入力加速度から最上階の応答加速度への伝達関数を算出した。図14は、マスダンパを設置しない非制振と、それぞれの制御の場合の伝達関数を比較したものである。括弧内の数値は加速度センサの数を表している。どの制御についても制御対象である一、二次モードのみの応答を低減していることがわかる。また、スピルオーバー対策の成果として、三次モード以上の高次モードに悪影響を与えていないことがわかる。一次モードに関しては、どの制御器も設計どおりの制振性能が得られた。しかし、二次モードに関しては、センサ1個の場合の H^∞ 制御器が、設計どおりの性能を実現することができなかった。

5.2 地震波加振実験 図15は神戸NS波 1 m/s^2 を入力した場合の、最上階応答加速度の最大値と二乗平均値である。どの制御器についても、非制振と比べて応答が低減していることがわかる。センサ3個の

Fig. 15 Control performance for earthquake excitation (Kobe-NS)

Fig. 16 Performance of gain-scheduled control for Earthquake excitation (Kobe-NS)

H^∞ 制御器の場合、最大値で 60%，二乗平均値で 50% まで応答を低減している。センサ数の多い方が性能はよいがセンサ 1 個でも安定な制御ができることが確認された。

また、 H^∞ 制御器とモデルマッチング法による制御器を比較すると、 H^∞ 制御器の性能が優っていた。 H^∞ 制御の場合、考慮外モードによるスピルオーバー不安定を防ぐための高次の制御器を設計することが容易にでき、結果として、目標減衰比が大きく、安定な制御器を設計することができたためと考えられる。

5.3 ゲイン・スケジューリングによる加振実験結果 入力地震波として神戸 NS 波を用いたときの入力加速度と屋上階加速度との関係、およびマスダンパ変位との関係を図 16 に示す。これはセンサ 1 個の H^∞ 制御器の場合についての結果である。強い制御だけの場合、入力加速度 0.75 m/s^2 までしか変位制限内で制御できない。ゲイン・スケジューリングを用いると、入力加速度 0.75 m/s^2 までは強い制御と同じ制振性能をもち、入力加速度が大きくなるにつれて制振性

Fig. 17 Comparison between experimental and analytical results

能は悪くなるが、 1.5 m/s^2 まで変位制限内で有効な制御を続けていることが示されている。

5.4 解析結果 図 17 はセンサ数 1 個の H^∞ 制御器の場合について、八戸 NS 波 0.5 m/s^2 の場合の実験結果と解析結果を比較したものである。シミュレーション解析は時間刻み 1 ms のルンゲ・クッタ法で行った。図示してある波形は、一番上が入力波で、左側が実験、右側が解析による最上階応答加速度、制御電圧、マスダンパ変位である。波形、最大値、二乗平均値のいずれも良好な一致が得られており、解析モデルの妥当性が示されている。

6. あとがき

本研究では、リニアモータを用いたアクティブ・マスダンパの加速度フィードバック制御について研究し、五層建物モデルの振動制御実験を通して、以下のような結論を得た。

(1) リニアモータを用いたアクティブ・マスダンパの制御手法として加速度フィードバック制御が適用できることを確認した。そのことにより、制御システムの構成を簡単化できる見通しを得た。

(2) H^∞ 制御理論による制御器の方が、モデルマッチング法による制御器よりも、優れた制御性能を示した。

(3) ゲイン・スケジューリング制御を、目標減衰比の異なる二つの制御器を用いることにより、実現した。

(4) 実験結果と計算結果の比較により, 解析モデルの妥当性が示された。

文 献

(1) 藤田隆史・米沢実・ほか5名, 機論, **60**-572, C(1994), 1195-1202.

(2) 藤田隆史・田中清・ほか5名, 機論, **62**-594, C(1996), 516-521.

(3) 山田就康・西谷幸, 日本建築学会構造系論文集, **484**(1996), 49-58.

(4) 藤田隆史・鎌田崇義・正木信男, 機論, **59**-558, C(1993), 379-385.

(5) 田川泰敬・ほか3名, 機論, **54**-507, C(1988), 2689-2696.