副質量を有する建物制振用マスダンパに関する研究* (第3報, 実物大建物モデルを用いた制振性能の検討)

藤田 聡^{*1}, 渋谷 真^{*2}, 河相 崇^{*3}, 下田 郁夫^{*4}
持丸 昌己^{*4}, 永井 潔^{*5}, 木本 幸一郎^{*5}

Impact Hybrid Mass Damper for High-Rise Buildings against Destructive Earthquake Input (3rd Report, Investigation of Performance of the System using existing building model)

Satoshi FUJITA, Makoto SHIBUYA, Takashi KAWAI, Ikuo SHIMODA,
Masami MOCHIMARU, Kiyoshi NAGAI and Koichiro KIMOTO

A new tupe tuned-mass-damper, which is designed to reduce the response of main structures against not only weak earthquakes/wind but also destructive earthquakes, has been investigated. The basic construction of this system is obtained by dividing a TMD mass into two parts. The impact forces which are generated by the upper mass and stopper, reduce the displacement of the lower mass. Until the previous report, it was confirmed that the performance of the vibration control system was almost the same as that of an optimal TMD although the maximum amplitude of lower mass is markedly reduced to about a half of the TMD mass. In this report, we applied an active control into this system (for weak earthquakes) using an existing building model and confirmed the change rule, and investigated the performance of IHMD in comparison with an optimal TMD.

Key Words: Active Vibration Control, Impact Hybrid Mass Damper, Impact Force, High-Rise Building

1. ま え が き

近年, 風や中小地震によって高層建物に生じる低周波の振動に対し, 居住性向上の観点からこれらの振動を低減する付加質量型制振装置である動吸振器(Tuned Mass Damper: TMD)やアクティブマスダンパ(Active Mass Damper: AMD)の研究開発および実用化が鋭意進められている。しかしながら, これら付加質量型の制振装置は装置のストローク制限等により, 現在実用化されているもののほとんどは大地震時に質量を固定することとなっており, 制振効果は全くない。したがって大地震に対応できる第2世代マスダンパの研究開発が望まれている。

そこで, 著者らは付加質量を主質量, 副質量の2質量と直列に分割配置し, 小入力時には副質量をアクティブ化することにより積極的に動かすことで従来のマスダンパ形制振装置であるTMDより高い制振性能

を得ることを可能にし, 大入力時には衝撃力を応用することにより, マスダンパの過大な変位を制振性能を損なうことなく抑制する構造を有した入力速度に応じて装置の機構が切り替わるハイブリッド形マスダンパ(Impact Hybrid Mass Damper: IHMD)の研究開発を行っている。第1報⁽¹⁾に予備的検討を行ったが, 本報では, 実建物をモデル化して本制振装置を付加し, 小地震入力から大地震入力に対するシミュレーションを実施し, 非制振時やTMD, パッシブ時の制振性能と比較することによりハイブリッド形マスダンパの制振性能の検討および切替則の検討を行う。

2. 実建物モデルおよび制振装置の概要

2・1 実建物モデル概要 解析対象は, 実在する建物高さ122m, 地下3階・地上29階の鉄骨構造建物である⁽²⁾。

実建物のモデル化に際し, 1階部分までは剛性の高い人工地盤であるので, 解析は2階以上を28質点系のせん断建物モデルとして行った。解析する実建物は耐震設計のために柔構造設計がなされている。一般的に柔構造建物は, 上層になるに従って質量が軽くなるが, 本建物は27層質量のみ重く(20~26層に比べ約1.5倍, 最上層に比べ約1.9倍である), 最上層が軽い

* 原稿受付 1996年12月18日。

^{*1} 正員, 東京電機大学工学部(〒101 東京都千代田区神田錦町2-2)。

^{*2} 学生員, 東京電機大学大学院。

^{*3} 正員, (株)間組技術研究所(〒305 つくば市刈間字西向515-1)。

^{*4} 正員, オイレス工業(株)(〒252 藤沢市桐原町8)。

^{*5} (株)間組技術研究所。

Table 1 Specification of the 28-storey building

Building Mass	kg	4.38×10^7
Building 1st Natural frequency	Hz	0.321
Building 1st Modal Mass	kg	3.38×10^7
Total Damper Mass	kg	1.69×10^5

Fig. 1 28-storey building model and TMD

特殊な構造となっている。

2・2 制振装置の概要 本解析では、図1に示すように検討対象の28層鉄骨構造建物を単純せん断質点系モデルにモデル化し、図1(a)が非制振時、図1(b)が建物の一次固有振動数に同調したTMDを搭載した状態である。本研究で開発した装置は図2(d)であり、図2(a), (b), (c)はさまざまな入力の際のIHMDの動作モードを表している。図2(b)は、ダンパ質量を主質量(主ダンパ: Damper 1)と副質量(副ダンパ: Damper 2)に分割し、直列に搭載した二質量形マスダンパ(Multi-Tuned Mass Damper: MTMD)であり、副質量の運動により主質量の作動振幅を低減するものである。また、図2(a)は、二質量形マスダンパの副質量がアクティブ化された二質量形アクティブマスダンパ(Multi-Active Mass Damper: MAMD)であり、さらに図2(c)は、MTMDの副ダンパが建物頂部から伸びたストッパに積極的に衝突する機構を有する衝撃力を応用した衝突二質量形マスダンパ(Impact Multi-Tuned Mass Damper: IMTMD)であり、副質量の衝突による力を建物に伝

Fig. 2 28-storey building model with each dampers

えることで、従来の制振性能を保ちつつ、副質量の動きを制限することによって主質量の最大変位を低減できる構造となっている。なお、衝撃力が建物本体に悪影響を及ぼさないことは第2報⁽²⁾で述べた。また、本制振装置であるIHMD [図2(d)]は、入力速度に応じて動作モードが切り替わる構造を有している。小レベル入力に対しては、副質量をアクティブ化したMAMD、中レベル入力に対しては、MTMD、大レベル入力に対してはIMTMDとなり、あらゆる入力レベルに対応している。

3. 運動方程式

3・1 パッシブ時の運動方程式 図2に示した本制振装置(IHMD)を搭載した28層建物のパッシブ時の運動方程式は、以下になる。

A ストッパと副質量が衝突している場合 ($|x_{d2} - x_{28}| > \varepsilon$)

$$m_{d2}\ddot{x}_{d2} + C_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) + k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) + C_{ST}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{28}) + k_{ST}\{x_{d2} - x_{28} - \varepsilon \cdot \text{sgn}(x_{d2} - x_{28})\} = -m_{d2}\ddot{z}_H \quad (1)$$

$$m_{d1}\ddot{x}_{d1} + C_{d1}(\dot{x}_{d1} - \dot{x}_{28}) + k_{d1}(x_{d1} - x_{28}) - C_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) - k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) = -m_{d1}\ddot{z}_H \quad (2)$$

$$m_{28}\ddot{x}_{28} + C_{28}(\dot{x}_{28} - \dot{x}_{27}) + k_{28}(x_{28} - x_{27}) - C_{d1}(\dot{x}_{d1} - \dot{x}_{28}) - k_{d1}(x_{d1} - x_{28}) - C_{ST}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{28}) - k_{ST}\{x_{d2} - x_{28} - \varepsilon \cdot \text{sgn}(x_{d2} - x_{28})\} = -m_{28}\ddot{z}_H \quad (3)$$

$$m_{27}\ddot{x}_{27} + C_{27}(\dot{x}_{27} - \dot{x}_{26}) + k_{27}(x_{27} - x_{26}) - C_{28}(\dot{x}_{28} - \dot{x}_{27}) - k_{28}(x_{28} - x_{27}) = -m_{27}\ddot{z}_H \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ m_i \ddot{x}_i + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_i(x_i - x_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) &= -m_i \ddot{z}_H \cdots \cdots (5) \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3(x_3 - x_2) = -m_2 \ddot{z}_H \cdots \cdots (6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) = -m_1 \ddot{z}_H \cdots \cdots (7)$$

B ストッパと副質量が衝突していない場合 ($|x_{d2} - x_{28}| < \varepsilon$) は、式(1)と式(3)は以下に示すようになるが、式(2)および式(4)～(7)に変更点はない。

$$m_{d2} \ddot{x}_{d2} + c_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) + k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) = -m_{d2} \ddot{z}_H \cdots \cdots (1)'$$

$$m_{28} \ddot{x}_{28} + c_{28}(\dot{x}_{28} - \dot{x}_{27}) + k_{28}(x_{28} - x_{27}) - c_{d1}(\dot{x}_{d1} - \dot{x}_{28}) - k_{d1}(x_{d1} - x_{28}) = -m_{28} \ddot{z}_H \cdots \cdots (3)'$$

ただし、 i は層番号であり、 $2 \leq i \leq 27$ である。ここで、 $x_1, \dots, x_{28}, x_{d1}, x_{d2}$ は建物各層とマスダンパ各質量の地表面に対する相対変位、 $m_1, \dots, m_{28}, m_{d1}, m_{d2}$ は建物各層とマスダンパの質量、 $k_1, \dots, k_{28}, k_{d1}, k_{d2}, c_1, \dots, c_{28}, c_{d1}, c_{d2}$ は建物モデルおよびマスダンパの剛性と減衰係数、 k_{ST}, c_{ST} はストッパを剛性と減衰係数、 ε はストッパと副質量 m_{d2} 間の距離、 z_H は地動変位である。なお、式 B は MTMD に対する運動方程式である

3.2 アクティブ時の運動方程式 28 層建物のアクティブ時の運動方程式は、式(1)～(7)の式(1)と式(2)に制御力の項(5.3 節参照)が加わり以下のようにになる。

$$m_{d2} \ddot{x}_{d2} + c_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) + k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) = -u - m_{d2} \ddot{z}_H \cdots \cdots (1)''$$

$$\begin{aligned} m_{d1} \ddot{x}_{d1} + c_{d1}(\dot{x}_{d1} - \dot{x}_{28}) + k_{d1}(x_{d1} - x_{28}) \\ - c_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) - k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) = u - m_{d1} \ddot{z}_H \end{aligned} \cdots \cdots (2)''$$

モードを考慮して建物の運動方程式を次のように示す。

$$\begin{aligned} [M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] \\ = [S](2\rho_3 \zeta_{d1} \omega_{d1} \dot{y}_{d1} + \rho_3 \omega_{d1}^2 y_{d1}) - [M][1] \ddot{z}_H \end{aligned} \cdots \cdots (8)$$

ただし、

$[M]$: 質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

$[x]$: 変位ベクトル

$$y_{d1} = x_{d1} - x_{28}$$

$$\dot{y}_{d1} = \dot{x}_{d1} - \dot{x}_{28}$$

$$[S] = [\vec{0}_{m27} 1]^T$$

$$[1] = [\vec{E}_{m28}]^T$$

$\vec{E}_{m28}$: 1 行 28 列の要素がすべて 1 の行列

$\vec{0}_{27}$: 1 行 27 列の 0 行列

とする。

ここで、モード質量マトリックス $[T]$ およびモード座標 $[q]$ を用いて、

$$[x] = [T][q] \cdots \cdots (9)$$

と座標変換し、式(8)に代入する。

$$\begin{aligned} [M^*][\ddot{q}] + [C^*][\dot{q}] + [K^*][q] \\ = [T]^T [S] (2\rho_3 \zeta_{d1} \omega_{d1} \dot{y}_{d1} + \rho_3 \omega_{d1}^2 y_{d1}) \\ - [M^*][\beta] \ddot{z}_H \end{aligned} \cdots \cdots (10)$$

ただし、

$[M^*]$: モード質量マトリックス

$[C^*]$: モード減衰マトリックス

$[K^*]$: モード剛性マトリックス

$$[1] = [T][\beta]$$

β : 刺激係数

以上の式を用いて最適制御理論を適用し、その評価関数として建物の一次、二次モードの地面からの相対変位、副質量の建物頂部からの相対変位、および制御電圧を考慮しアクチュエータの最適制御入力を求める。

4. 設 計 指 針

本装置の基本構造を決定する上で、以下に示す項目に考慮する。

(1) MAMD は小地震(地動最大速度 0.1 m/s 程度)で、副質量をアクティブに作動し高い制振性能を得る。

(2) MTMD は中地震(地動最大速度 0.25 m/s とする)で、TMD に比べ同様な制振性能を有し、主質量の最大変位(ダンパストローク)を低減できる。

(3) IMTMD は、大地震(地動最大速度 0.50 m/s とする)で TMD, MTMD に比べ、同様な制振性能を有し、主質量のストロークを大幅に低減できる。

(4) 建物に制振装置を搭載するための実現性を考慮しダンパ質量は、建物一次モード質量の 0.5% とする。

(5) 衝撃力を応用する IMTMD は、建物に衝撃力の悪影響を及ぼさない。

(6) アクティブ制御時の制振性能目標は、非制振時の RMS 応答変位を 50% 低減するものとする。

5. 予 備 的 検 討

5.1 MTMDの諸元の決定 本建物の建物一次モード質量は33800 tであり、これに対する二質量形ダンパの総質量は169 tとなる。二質量形ダンパは、総ダンパ質量に対する副質量の質量比を $r=m_{d2}/(m_{d1}+m_{d2})=0.1, 0.3, 0.5$ とし、本報では、 $r=0.3$ について述べる。

MTMDの諸元は、正弦波加振に対する建物最上部の加速度応答倍率が最小になるようなダンパ減衰比 ζ_{d1}, ζ_{d2} 、剛性 f'_{d1}, f'_{d2} の値を最適値と決定した。まず、剛性は主、副質量とも同一とし、非減衰系での剛性を仮の剛性 f_{d1}, f_{d2} とする。次に減衰比は、図3に示すように副質量の減衰比を変化させた場合の加速度応答倍率から、最適減衰比は減衰比を変化させても通過する2定点が極大値となるものであり、

$$\zeta_{d1}=c_{d1}/2\sqrt{m_{d1}k_{d1}}=0.05$$

$$\zeta_{d2}=c_{d2}/2\sqrt{m_{d2}k_{d2}}=0.10$$

を用いることにする。次に剛性は、図4に示すように建物加速度応答倍率を最小にするために、以下のような補正係数で剛性を除した剛性 f'_{d1}, f'_{d2} とすることによって、二つの極大値の大きさが等しくなるように調整を行った。なお、数値解析法には数値積分法のRunge-Kutta-Gill法を用い、計算刻み時間は1 msとした。

$$f'_{d1}=f_{d1}/(1+0.011)$$

$$f'_{d2}=f_{d2}/(1+0.011)$$

5.2 IMTMDの諸元の決定 ここで、IMTMDのダンパ部の諸値はMTMDと同一であり、ストッパ

と副質量の距離 ϵ 、ストッパの剛性 f_{ST} 、ストッパの減衰比 ζ_{ST} を決定する。

まずストッパと副質量の距離 ϵ を決定する。図5に示すように、ストッパの剛性 $f_{ST}=5$ Hz、ストッパの減衰比 $\zeta_{ST}=4$ とし、建物にIMTMDを搭載し、最大速度50 kine($=0.5$ m/s)のEl Centro NS波(Imperia Valley地震:1940年)を入力し、ストッパと副質量の距離を0.1~4.0 m、0.1刻みで変化させた場合の変化を調査した。図5(a), (b)は、各質量比における建物頂部加速度、主質量、副質量変位の最大応答値、RMS応答値である。ストッパ間隔を大きくすれば、建物RMS応答値は低減するが、主質量最大変位が増加し、またストッパ位置を小さくすると、主質量最大変位は低減するが、建物最大加速度に悪影響を及ぼす。よって、建物に加速度の影響がなく、主質量最大変位を低減でき、TMDと同等な制振性能を有する $\epsilon=2.0$ mを採用した。

次に、図6に示すように、上記のストッパ位置 ϵ で、各ストッパ減衰比においてストッパ剛性を変化させた場合に同様な地震波を入力した場合の応答の変化を調査した。図6(a), (b)は、各質量比における建物頂部加速度、主質量、副質量変位の最大応答値、RMS応答値である。ダンパ部の最大・RMS応答変位には大きな変化はなかったが、建物最大加速度においては、減衰比が小さい場合に剛性の変化に対して悪影響が見られた。よって、同様に建物に影響がなく、主質量最大変位を低減でき、TMDと同等な制振性能を有する。

$$f_{ST}=\sqrt{k_{ST}/m_{d2}}/2\pi=5.0 \text{ Hz}$$

Fig. 3 Confirmation of Damper damping

Fig. 4 Confirmation of Damper frequency

(a) Maximum

(b) RMS

Fig. 5 Confirmation of stopper position

Fig. 6 Confirmation of stopper frequency

$$\zeta_{ST} = c_{ST} / 2\sqrt{m_{d2}k_{ST}} = 4.0$$

を採用することとした。

5.3 MAMDの諸元の決定 動作モード MAMDの際のアクティブ制御は、最適制御を用い二次モードまで考慮した変位制御とする。また、一次モードの重み＝二次モードの重みとし制御の重みは、副質量変位に置く重みを1.0、制御電圧に置く重みを 2.0×10^{-3} 、一、二次モード変位に置く重みを 1.0×10^2 とした。なお、本研究では現在のところ具体的な実物大アクチュエータは開発していないため、第1報で対象とした小形リニアモータ・アクチュエータを建物の規模に合せて仮想的に複数台使用することとした。なお、小形アクチュエータとしてはリニアモータを使用し、その特性は下記のとおりである。また、諸定数を表2に示す。

$$L_a \dot{i} = K_e(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) - R_a i + v$$

$$u = K_f i$$

第1報で用いた建物モデルの一次モード質量は 8.90×10^2 kgであり、今回用いた実在建物モデルが 3.38×10^7 kgであることから、これらの数値の比率を参考に模擬的に小形アクチュエータの30 000台分の容量を有するアクチュエータを対象とすることとした。

L_a : リニアモータの電機子コイルのインダクタンス

R_a : リニアモータの電機子コイルの抵抗

Table 2 Specification of Actuator

	Actual value
La H	8.2×10^{-2}
Ra Ω	8.00
Ke Vs/m	26.3
Kf N/A	26.3

Table 3 Specification of the Dampers

TMD Natural circular frequency ω_d rad/s	2.01
TMD Damping ratio ζ_d	0.0319
MTMD Natural circular frequency ω_{d1}, ω_{d2} rad/s	2.78
Damper1 Damping ratio ζ_{d1}	0.05
Damper2 Damping ratio ζ_{d2}	0.10
Stopper position ϵ m	2.0
Stopper Natural frequency f_{ST} Hz	5
Stopper Damping ratio ζ_{ST}	4

Fig. 7 Displacement of added mass against input

K_e : リニアモータの誘起電圧

K_f : リニアモータの推力特性

表3に、各制振装置の諸値を示す。

6. IHMDの切替則の決定方法

ハイブリッド形マスダンパであるIHMDは、アクティブモードからパッシブモードもしくはパッシブモードからアクティブモードへの切替が必要とされる。過去に切替則を用いた論文⁽⁴⁾があるが、本論文でも同様に入力に対する制振性能を比較し切替則の検討を行う。

6.1 アクティブモードからパッシブモードへの切替 図7は、4種類の自然地震波の入力速度とMAMDを搭載した際の副ダンパの応答変位の関係を示している。今回用いた制振建物モデルにおいては、

(1) 入力速度が0.1 m/s以上

(2) 副質量変位が1.5 m以上である

のいずれかの条件を満足した場合に、アクティブモード→パッシブモードへの切替を行うのが妥当である

と考えられる。

6.2 パッシブモードからアクティブモードへの切替 パッシブモードからアクティブモードへの復帰条件を考える場合、切替が頻繁に起こることは望ましくないものと考えられる。そこで、パッシブ形マスダンパである MTMD とアクティブ形マスダンパである MAMD の各地震波入力最大速度 0.02 m/s に対する副ダンパ変位を比較したものを表 4 に示すが、MAMD は MTMD に比べて 1.5 倍程度副質量の応答変位が大きくなっており、このことから、アクティブモードへ復帰後、ただちにストッパに衝突したりすることのないようスムーズに復帰する条件としては、アクティブモードからパッシブモードへの切替条件の 2/3 程度の応答変位と入力速度を考慮することが好ましい。そこで、

- (1) 入力速度が 0.065 m/s 以下である
- (2) 副質量変位が 1 m 以下である

Table 4 Comparison between damper 2 of MTMD and MAMD

	MTMD m	MAMD m	MAMD/MTMD
El Centro NS	0.18642	0.26657	1.4299
Taft EW	0.12962	0.23638	1.1320
Hachinohe NS	0.20881	0.40218	1.4299
Akita NS	0.17820	0.18775	1.0536

(0.02m/s input)

(3) (1), (2) を同時に満たしたとき

の条件をもってアクティブモードに復帰させることとした。なお、ダンパ部の固有周期が 3 秒程度であることを考慮して、この状態を 4.5 秒継続したら復帰する条件を加えた。

7. 地震応答解析

以上で決定した諸元を有する IHMD を 28 層建物

Fig. 8 Displacement of IHMD El Centro NS input

Fig. 9 Performance of IHMD against El Centro NS input

モデルに搭載し、地震応答解析を行った。まず、切替則の確認を行うために、入力速度に対する建物28層、主質量、副質量変位をTMD, MAMD, IMTMDと比較したものを図8に示す。ここで使用した地震波はEl Centro NS波である。図8よりアクティブモード

からパッシブモードへの切替えがスムーズに行われていることが確認された。

図9は、El Centro NS波加振に対し、最大入力速度0.02, 0.25, 0.50 m/s(最大加速度0.2 m/s², 2.5 m/s², 5.0 m/s²)に対する建物RMS応答変位およびダンパ

Fig. 10 Time history of response against El Centro NS input

部最大変位を示したものである。最大入力速度 0.02 m/s では, IHMD は常にアクティブモードであるので非制振時に比べ RMS 応答変位が 50%程度にまで低減されている。最大入力速度 0.25 m/s では, アクティブモードからパッシブモードへの切替えが起こりパッシブ形マスダンパとして作動し従来形マスダンパである TMD と同程度の制振性能を示している。最大入力速度 0.50 m/s では, アクティブモードからダンパは衝撃力を応用したパッシブ形マスダンパとして作動することにより副ダンパ変位は IMTMD と同等なものの主ダンパ変位を抑えつつ制振性能を保っている。

切替モードと衝突現象の確認のため図 10 には, El Centro NS 波(最大入力速度 0.25 m/s)加振に対する非制振時および各制振装置搭載時の時刻歴応答波形を示す。この図より, IHMD のアクチュエータは加振後ただちにパッシブモードに切替わっているが, 最終的な自由振動領域においてはアクチュエータの復帰が見られるために IMTMD に比べ早い建物応答の減衰が期待できる。パッシブモードからアクティブモード

に復帰する際, 副ダンパの加速度にパルス状のものが見られる。この反力が主ダンパの加速度に見受けられるが建物への影響は見られない。これは, 他の近地地震, 遠地地震でも同様なことがいえた。また, この加速度は, 副ダンパがストッパに衝突するときの加速度よりも小さい値を示しておりアクチュエータの切替えによる悪影響は見受けられない。

8. あ と が き

本制振装置は耐震健全性の向上を目的とした設計を行うことが可能で, 大地震を考慮した制振装置として成立することが検証された。

今後は建物モデルを弾塑性形建物として取扱い, さらに詳細な解析を行い, 実用化を目指す。

文 献

- (1) 藤田聡・ほか 5 名, 機論, **61**-587, C(1995), 2800-2805.
- (2) 藤田聡・ほか 5 名, 機論, **62**-597, C(1996), 1719-1725.
- (3) 日経アーキテクチュア, 千葉ポートスクエア, (1994), 日経 BP 社.
- (4) 藤田隆史・ほか 5 名, 機論, **59**-557, C(1993), 36-43.