

**多種のダンパーを併用した免震建物の地震応答予測**  
**—応答スペクトル法による免震層の応答予測と設計用地震荷重分布—**

明治大学 小町祐介

**1. はじめに**

兵庫県南部地震（1995年）以降、免震建物は地震発生下での有効性が広く認知され、今後、免震技術はより一般化するものと予想される。

免震建築物の技術的基準として建設省告示2009号(以下、免震告示)が制定された<sup>1)</sup>。免震告示では免震建物の技術上の経験の蓄積が十分でないため、構造計算に関わる規定が安全側に設定されているものが含まれている<sup>1)</sup>。そこで本論では、免震告示の構造計算で用いられている応答スペクトル法およびこれまで提案してきている設計用地震荷重分布<sup>2)</sup>を改良することで地震応答予測の合理化を図る。

**2. 設計用地震応答スペクトル**

図1に応答スペクトル法の模式図を示す。また、免震告示では式(1)を用いて入力地震動の加速度応答スペクトル  $S_a$  を算出する。本論ではBCJ-L2の波形包絡形を有する乱数位相の告示波20波を用いて、地盤増幅率および減衰補正係数の検討を行う。表層地盤は図2の地盤モデル<sup>3)</sup>を用いる。

$$S_a = S_0 \cdot G_s \cdot F_h \cdot Z \quad (1)$$

ここで、 $G_s$ : 地盤増幅率、 $F_h$ : 減衰補正係数、 $Z$ : 地域係数（本論では1とする）、 $S_0$ : 解放工学的基盤の加速度応答スペクトル

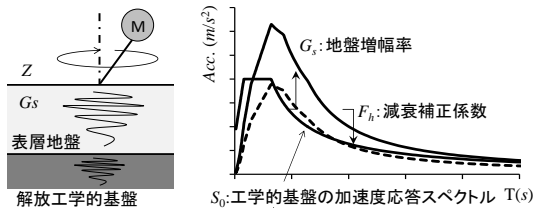


図1 応答スペクトル法の模式図

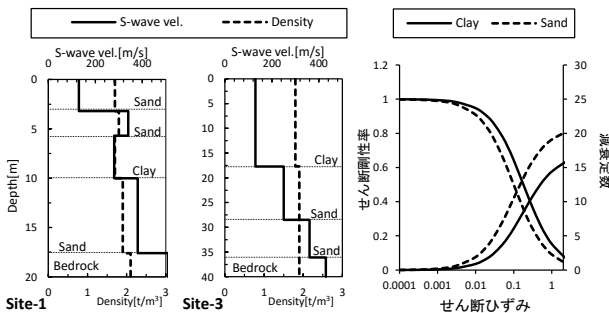


図2 地盤データ 図3 地盤の非線形特性

**2.1 地盤増幅率**

図3に示す地盤の非線形特性<sup>3)</sup>より次元波動伝播理論SHAKEを用いて地震動を増幅させる。本論では免震告示の精算法および井上ら<sup>4)</sup>の提案法を用いて地盤増幅率を算出する。また、告示1457号において下限値1.23が設けられているが、応答予測の合理化を図るため、井上らの提案法では下限値を設けずに地盤増幅率を求めた。図4にSHAKEによる地盤増幅率（工学的基盤に対する表層地盤の伝達関数）の平均値と精算法および井上らの方法による地盤増幅率の比較を示す。精算法と比較して、井上らの方法では卓越周期を適切に評価し、下限値1.23を設けないことで長周期領域の地盤増幅率を適切に表現していることが確認できる。

**2.2 減衰補正係数**

免震告示では式(2)を用いて減衰補正係数  $F_h$  が算出される。一方、笠井らは免震建物の応答予測に式(3)の応答低減率<sup>5)</sup>（以下、笠井式）を用いている。

$$F_h = \frac{1+10h_0}{1+10h} \quad (F_h \geq 0.4) \quad (2) \quad D_h = \sqrt{\frac{1+ah_0}{1+ah}} \quad (3)$$

ここで、 $h_0$ : 初期減衰定数、 $h$ : 減衰定数、 $\alpha$ : 地震動によって異なりBCJ-L2では75

図5にSite-3の変位応答スペクトルのスペクトル比（地震動20波の平均値）および式(2)と

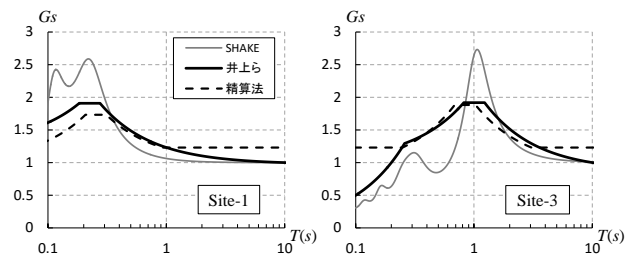


図4 地盤増幅率の比較

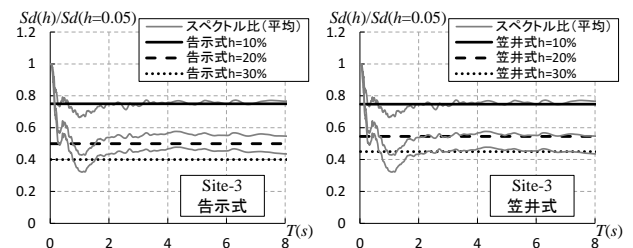


図5 各評価式とスペクトル比の比較

式(3)の応答低減率の比較を示す。式(2)では長周期高減衰領域においてスペクトル比の平均値を下回るが、式(3)はその領域で地震応答を適切に評価していることが確認できる。

### 3. 免震建物の地震応答予測

#### 3.1 建物モデル

解析モデルは1質点系および10質点系のせん断型質点モデルとする。免震層は弾性支承材に支持されるものとし、履歴系ダンパー(以下、履歴系)を用いた場合、流体系ダンパー(以下、流体系)を用いた場合、履歴系、流体系を併用した場合の3パターンとする。解析モデルの概要および各ダンパーの組み合わせを表1に示す。表中の $\alpha_s$ および $\alpha_l$ はそれぞれ鋼材ダンパー、鉛ダンパーの負担せん断力係数である。

表1 解析モデルとダンパーの組み合わせ

建物モデル	
質点数	1質点 / 10質点
質量分布	10000[ton] / 各層1000[ton]
剛性分布	最下層に対して最上層が1/2となる台形分布
復元力特性	弾性(剛性比例減衰2%)
基礎固定時の上部構造周期 $T_s$	0.4, 0.8, 1.2, 1.6(秒)
免震部材の履歴特性	弾性支承材:弾性 / 履歴系ダンパー:完全弾塑性型 / 流体系ダンパー:線形減衰
免震周期	4.0(秒)
ダンパーの降伏変位 $\delta_y$	1.0 3.0(cm)
地震動(告示波)	
地盤	工学的基盤, Site-1, Site-3
位相特性	乱数20波(BCJ-L2の包絡関数)
解析パラメータ	
流体系ダンパーの減衰定数	5% 10% 15% 20% 25% 30%
履歴系ダンパーの負担せん断力係数	0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06
履歴系の負担せん断力係数および流体系の減衰定数の組み合わせ	
SVモデル	流体系の減衰定数 $h_v$
	5% 10% 15% 20%
$\alpha_s$	0.01 case1 case2 case3 case4
	0.02 case5 case6 case7 case8
	0.03 case9 case10 case11 case12
	0.04 case13 case14 case15 case16
LVモデル	流体系の減衰定数 $h_v$
	5% 10% 15% 20%
$\alpha_l$	0.01 case1 case2 case3 case4
	0.02 case5 case6 case7 case8
	0.03 case9 case10 case11 case12
	0.04 case13 case14 case15 case16

#### 3.2 免震層の応答速度

免震層の応答速度  $V$  は式(4)を用いて応答変位  $\delta$  より算出する。免震層の応答速度には基本周期成分以外に高振動数成分が含まれ、擬似速度よりも大きな速度となる。 $\lambda$ はこの影響を表す係数であり免震告示では $\lambda$ を2としている。本研究では $\lambda$ の妥当性について検討するため、式(5)に、時刻歴解析より得られる応答値を代入することで、 $\lambda$ の分析を行う。

$$V = \lambda \cdot \omega \cdot \delta \quad (4) \quad \lambda = V / (\omega \cdot \delta) \quad (5)$$

ここで、 $\omega$  : 固有円振動数

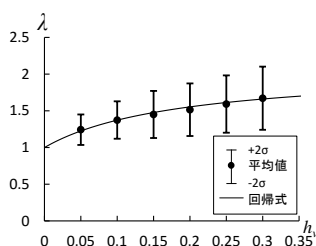


図6  $\lambda$  と  $h_v$  の関係

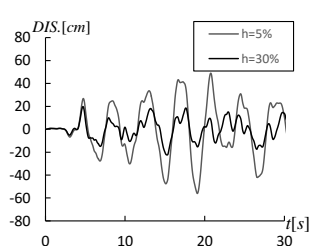


図7 時刻歴応答波形(左:変位, 右:速度)

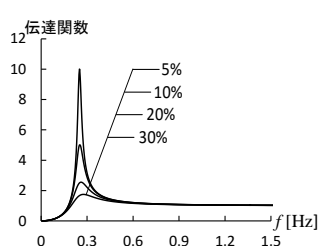
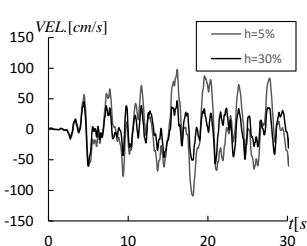


図8 伝達関数

図6に1質点系の流体系を用いた場合の $\lambda$ と減衰定数 $h_v$ の関係を示す。図中には時刻歴解析より求まる $\lambda$ の平均と $\pm 2\sigma$ の値および後述する回帰式を示している。解析結果より、流体系の減衰定数の増加に伴い係数 $\lambda$ が増加することが確認できた。免震告示では $\lambda$ を2としているため、応答速度の予測値と時刻歴解析結果の差が大きいことが確認できる。

図7に応答変位および応答速度の時刻歴応答波形を示す。応答変位と比較して、応答速度には減衰に関わらず高振動数成分が多く含まれていることが確認できる。

次に伝達関数を用いて高振動数成分の影響について示す。図8に地動速度に対する免震層の相対速度の伝達関数を示す。図8から免震周期(0.25Hz付近)では減衰定数の増加に伴い伝達関数が小さくなるのに対し、高振動数領域は減衰によって変動しないことがわかる。従って、減衰の増加に伴い高振動数成分の影響が相対的に大きくなるため、 $\lambda$ が増加することになる。本論では式(6)、図6に示す回帰式を提案する。

$$\lambda = \frac{1+11h}{1+5.3h} \quad (6)$$

#### 3.3 免震部材の負担せん断力の足し合わせ

免震告示では式(7)を用いて免震層の最大層せん断力 $Q_{iso}$ を算出する。弾性支承材と流体系では図9に示すように最大せん断力に位相差が生じるため、二乗和平方根で算出している。また、履歴系を併用した場合においては弾性支承材と同様に変位 $\delta$ 時に最大せん断力となるような構成となっている。しかし、図9に示すように履歴系の復元力特性は変位が0から $\delta$ の範囲で最大耐力を保持するため、式(8)のように履歴系の負担せん断力を根号から移動した形の方が適正である。本研究ではこれを提案する。

$$Q_{iso} = \sqrt{(Q_e + Q_h)^2 + 2\varepsilon(Q_e + Q_h)Q_v + Q_v^2} \quad (7)$$

$$Q_{iso} = \sqrt{Q_e^2 + 2\varepsilon Q_e Q_v + Q_v^2} + Q_h \quad (8)$$

ここで、 $Q_e, Q_h, Q_v$ :それぞれ弾性支承材，履歴系，流体系の負担せん断力， $\varepsilon$ :減衰材として流体系を用いたときの免震層の最大層せん断力を評価するための係数（流体系の場合は $\varepsilon$ を0とする）

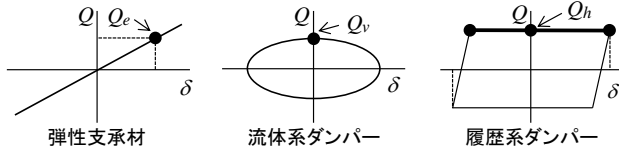


図9 免震部材の復元力特性・減衰力特性

図10に履歴系および流体系を併用した場合の式(7)および式(8)の層せん断力係数の予測値と時刻歴解析結果の対応を示す。なお、各免震部材のせん断力の足し合わせの検討を行うため、式(7)および式(8)の $Q_e, Q_v$ には時刻歴解析結果の最大値を代入している。式(7)と比較して、式(8)の予測値と時刻歴解析結果との対応は良好であり、予測式としての改善が確認できる。

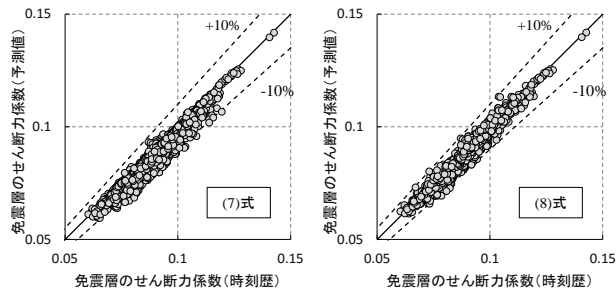


図10 せん断力係数の予測値と解析値の比較

#### 4. 設計用地震荷重分布

免震告示では、建物各階の設計用せん断力係数分布 $\alpha_i$ を次式で与えている<sup>2)</sup>。

$$\alpha_i = \gamma \cdot \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (9)$$

ここで、 $M$ :上部構造の総質量， $g$ :重力加速度， $\gamma$ :免震部材の力学特性のばらつき等の影響を考慮する係数(本論では、 $\gamma=1$ )， $A_i$ :建築基準法の基準せん断力係数分布

本研究ではこれまでに履歴系および流体系を使用した免震建物における設計用せん断力係数分布の提案<sup>2)</sup>を行っており、また、多種の

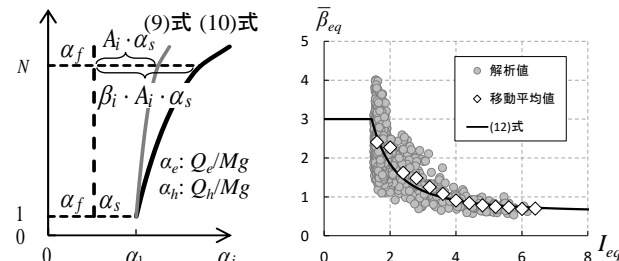


図11  $\alpha_i$ の構成 図12  $\bar{\beta}_{eq}$ と $I_{eq}$ の関係

ダンパーを併用した免震建物に対する等価免震係数の新たな提案<sup>6)</sup>を行なった。本論のせん断力係数分布 $\alpha_i$ は、式(10)~(14)より求める。図11に履歴系のみの場合のせん断力係数分布 $\alpha_i$ の構成を示す。また、図12に等価増幅率 $\bar{\beta}_{eq}$ と等価免震係数 $I_{eq}$ の関係を示す。図中の解析値および移動平均値は文献6)の時刻歴解析結果より求まる等価増幅率である。

$$\alpha_i = \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i \cdot \beta_{eq,i}(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (10)$$

$$\beta_{eq,i} = \frac{\bar{\beta}_{eq} - 1}{N - 1} i + \frac{N - \bar{\beta}_{eq}}{N - 1} \quad (11) \quad \bar{\beta}_{eq} = \frac{5.0}{I_{eq}^2} + 0.6 \quad (12)$$

$$I_{eq} = \left( \frac{1}{hI^2} \frac{Q_h}{Q_h + Q_v} + \frac{1}{vI^2} \frac{Q_v}{Q_h + Q_v} \right)^{-0.5} \quad (13) \quad I = T_{b1}/T_0 \quad (14)$$

$\beta_{eq,i}$ :履歴系および流体系の併用時の増幅率， $N$ :上部構造の層数， $\bar{\beta}_{eq}$ :最上層の増幅率， $I_{eq}$ :等価免震係数， $hI, vI$ :それぞれ履歴系および流体系に対する免震係数<sup>7)</sup>， $T_{b1}$ :免震層の1次剛性に対する固有周期（流体系の場合は支承材の水平剛性に対応する固有周期）， $T_0$ :基礎固定時の1次固有周期

#### 5. 免震建物の地震応答予測

本章では図13に示す免震告示の応答スペクトル法（以下、告示法）と本研究の提案法による免震建物の地震応答予測の比較を行う。

図14に10質点系（ $T_0=0.8$ 秒）のSVモデルの告示法および提案法の予測値（応答変位 $\delta$ ，応答速度 $V$ および免震層のせん断力係数 $\alpha_{iso}$ ）と時刻歴解析結果の比を示す。横軸の等価減衰定数 $h_{eq}$ は時刻歴解析結果の応答変位より算出

告示法 START	提案法 START
地盤増幅率	地盤増幅率
精算法	井上らの方法(下限値無し)
減衰補正係数	減衰補正係数
$F_h = \frac{1+10h}{1+10h}$	笠井式 $F_h = \frac{1+75h}{1+75h}$
応答変位	応答変位
$\delta = 1/\omega^2 \cdot S_0 \cdot G_s \cdot F_h \cdot Z$	$\delta = 1/\omega^2 \cdot S_0 \cdot G_s \cdot F_h \cdot Z$
応答速度	応答速度
$V = \lambda \omega \delta$ $\lambda = 2$	$V = \lambda \omega \delta$ $\lambda = (1+11h)/(1+5.3h)$
各部材の負担せん断力	各部材の負担せん断力
$Q_e = K_f \delta$ $Q_v = C_v V$ $Q_h$	$Q_e = K_f \delta$ $Q_v = C_v V$ $Q_h$
最大層せん断力	最大層せん断力
$Q_{iso} = \sqrt{(Q_e + Q_h)^2 + 2\varepsilon(Q_e + Q_h)Q_v + Q_v^2}$	$Q_{iso} = \sqrt{Q_e^2 + 2\varepsilon \cdot Q_e \cdot Q_v + Q_v^2} + Q_h$
せん断力係数分布	せん断力係数分布
$\alpha_i = \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e}$	$\alpha_i = \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i \beta_{eq,i}(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e}$
$K_f$ :支承材の剛性 $C_v$ :流体系ダンパーの減衰係数	変更点

図13 告示法および提案法の計算フロー

した免震層の等価減衰定数である。

解析結果より、高減衰領域で告示法の応答変位の予測値が時刻歴解析結果を下回る結果となった。これは図4に示す地盤増幅率の安全側の評価が図5に示す減衰補正係数の危険側の評価を下回ったためである。一方、提案法は地震応答を適切に評価していることが確認できる。また、応答速度においても、同様に提案法の予測値と時刻歴解析結果の対応は良好であり、式(6)の係数 $\lambda$ により高振動数成分の影響が適切に評価されたためであると考えられる。

免震層のせん断力係数は告示法、提案法とも

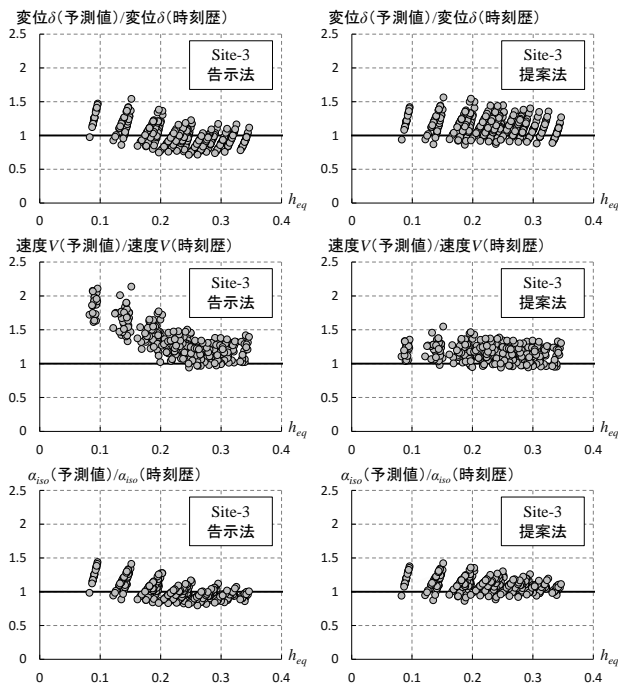


図14 解析結果に対する予測値の比

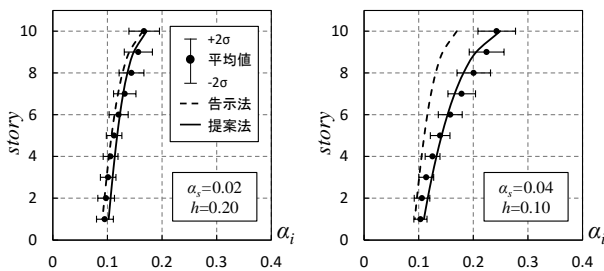


図15 せん断力係数分布 (case8, case14)

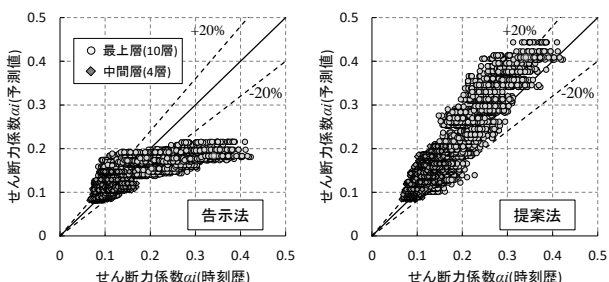


図16 告示法と提案法の比較(せん断力係数)

に予測値と時刻歴解析結果の対応は良好である。告示法では、応答変位から求まる弾性支承材の負担せん断力を危険側に、応答速度から求まる流体系の負担せん断力を安全側に評価するためである。しかし、各免震部材の負担せん断力は上部構造の設計用地震荷重分布の算出に用いられるため適切に評価する必要がある。

図15にSVモデルのcase8およびcase14のせん断力係数分布を示す。また図16に全解析結果のせん断力係数(中間層および最上層)と告示法および提案法の予測値との対応を示す。告示法の予測値と比較して、提案法の予測値と時刻歴解析結果の対応は良好であった。また、case8およびcase14の比較から、流体系の割合が大きい場合においては、上部構造の応答増幅が抑制され、提案法はその現象を適正に評価できる合理的な手法であることが確認できた。

## 5. まとめ

本論では免震告示に示される応答スペクトル法に基づいてその改善案の提案を行い地震応答予測の合理化を図った。

提案法は既往の研究で提案されている地盤増幅率および減衰補正係数、さらに本論で提案した係数 $\lambda$ 、免震層の最大層せん断力、設計用地震荷重分布の評価式によって構成される計算方法である。提案法は免震層の最大応答値および上部構造のせん断力係数分布を適切に評価し、多種のダンパーを併用した場合の効果を表現できる合理的な手法であることを示した。

### 参考文献

- 1) 建築研究所：改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景, 2001.8
- 2) 小林正人, 谷崎豪, 松田紳吾：免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布, 日本建築学会構造系論文集, 第676号 pp.859-868
- 3) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.2
- 4) 井上和歌子, 林康裕, 新井洋, 中井正一, 飯場正紀：表層地盤による地震動増幅率評価法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第16巻, 第32号 pp.107-112, 2010.2
- 5) 笠井和彦, シムアンパン・サラシ, 松田和浩：上部構造の柔性を考慮した免震構造の性能曲線の提案その1 1 質点2層モデルによる簡易な応答予測理論
- 6) 小林正人, 小町祐介：多種のダンパーを併用した免震建物の設計用地震荷重分布と等価免震係数の提案(免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布 その2), 日本建築学会構造系論文集, 第81巻第720号, pp.251-260, 2016.2
- 7) R. I. Skinner, W. H. Robinson and G. H. McVerry : An Introduction to Seismic Isolation, Wiley, 1993 (監訳 川島一彦, 北川良和：免震設計入門, 鹿島出版会, 1996)