

# 地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響

## EFFECTS OF THE SPATIAL CORRELATION BETWEEN GROUND MOTION INTENSITIES ON THE SEISMIC RISK OF PORTFOLIO OF BUILDINGS

林 孝幸\*, 福島 誠一郎\*\*, 矢代 晴実\*\*\*

*Takayuki HA YASHI, Sei'ichiro FUKUSHIMA and Harumi YASHIRO*

Authors have proposed the risk quantification method for a portfolio of buildings, in which the risk reduction effect by diversifying the buildings is given assuming that the variability in the ground motion intensity in each site is fully correlated. Since this assumption gives the conservative results, it is required to obtain the realistic value from the viewpoint of risk management. Recently, large amounts of earthquake observation data have been utilized, so that the spatial correlations of ground motion intensities in the different sites can be calculated. In this paper, abovementioned correlation in the Kanto district is obtained using K-NET and KiK-net data, and is applied to the model portfolio of the buildings, followed by the conclusion that introducing the correlation has a large effect on the estimated losses.

**Keywords:** *Seismic risk assessment, Ground motion intensity, Spatial correlation, K-NET, KiK-net*  
地震リスク評価, 地震動強度, 空間的な相関, 強震ネットワーク, 基盤強震観測網

### 1. はじめに

企業経営等に関して ISO や日本工業規格においてリスクマネジメントの規格制定が検討され、企業がリスクマネジメントに積極的に取り組むようになってきた。このような動向の中で、筆者らは地震環境が異なるような複数地点に配置された建物群(以下、ポートフォリオ)を対象とした地震リスク解析手法を構築し、建物を複数地点に配置することによるリスクの低減効果を定量化してきた<sup>1)</sup>。このリスクの低減効果は複数建物の地震被害が同時に発生しないことによるものであり、したがって、建物が互いに離れている場合ほどその効果は大きいことが示されている。

ポートフォリオを構成する建物の地震被害の同時発生に関わる要因としては、各建物の配置状況の他に、地震動強度の空間的な相関の程度が挙げられる。建物位置の地震動強度は確定的には求められず、距離減衰式を用いた経験的な手法では、地震規模、深さ、震源までの距離を変数とした確率量として与えられる。この確率量は対数正規分布で記述されることが多く、その変動の要因としては震源過程によるものと伝播・地点特性によるものがある<sup>2)</sup>。地震動の空間的な相関は後者の地点間の相関として求められる。

筆者らは、この相関を現状では完全相関と仮定して取り扱っているが、この仮定はポートフォリオの損失の変動を過大に評価することに

繋がっている。一方、完全独立を仮定することは損失の変動の過小評価に繋がる。地震リスクマネジメントにおいては、参照する損失として予想最大損失(以下、PML: Probable Maximum Loss)が用いられることが多い。確率論的なリスク評価においては、所与の年超過確率に対する損失の確率分布を基に、その90%非超過値としてPMLが求められるため、PMLは損失の確率分布の評価に依存する。すなわち、地点間の地震動強度の空間的な相関に依存することとなる。

地震動の変動の空間的な相関に関する検討事例として、例えば、川上ら<sup>3)</sup>は、東京大学生産技術研究所千葉アレーと台湾 SMART-1 アレーにおいて、隣接する2地点間の最大加速度比の確率的特性について論じている。ただし、この検討では、対象範囲が6km程度と、最大加速度がほぼ一定と考えられる狭い領域が対象である。一方、より広い領域を対象とした同様の研究としては、高田ら<sup>4)</sup>が台湾集集地震の観測記録を統計処理し、建物間の距離の関数として相関の大きさを定量化している。得られた成果は有意義なものではあるが、それが台湾集集地震固有のものであるか、一般的なものであるかについては、複数地震による検討が待たれるところである。また同様に、地震規模や深さといった地震の特徴に関わる諸変数と相関の関係についても、複数地震による検討が必要である。

ところで、近年では、K-NET, KiK-netによる地震観測が充実して

\* 東電設計(株) 修士(工学)  
\*\* 東電設計(株) 博士(工学)  
\*\*\* 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 博士(工学)

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Eng.  
Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.  
The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

きており、地震数と観測地点数（観測点密度）の両方の観点から、前述の空間的な相関の大きさを定量的に検討するに十分な地震記録が蓄積されている。

本研究では以上を鑑み、K-NET、KiK-netによる地震観測記録を用いて地震動強度の空間的な相関の特性を評価・整理するとともに、その相関がポートフォリオのリスクに与える影響を検討する。具体的には、K-NET、KiK-netの関東地方における観測記録を収集し、各記録の最大加速度と経験的距離減衰式による推定値との残差を用いて、2地点間の地震動強度の空間的な相関を導く。また、その相関を考慮してモデルポートフォリオの地震リスク解析を行い、相関の考慮の有無が損失の推定誤差に与える影響について論ずる。

## 2. 地震動強度の空間的な相関の評価

### 2.1 評価方法

本研究では、高田ら<sup>4)</sup>と同様に、地震動強度の空間的な相関を論じる指標として、観測記録の最大加速度と経験的距離減衰式による推定値との残差 $\epsilon$ を用いる。ところで、この推定残差 $\epsilon$ には、地震の影響と地点の影響の双方が含まれている。そこで、両者を取り除いたものとして、推定残差 $\epsilon$ を次式で算定する。

$$\epsilon_{ij} = \log(o_{ij}/c_{ij}) - \alpha_i - \beta_j \quad (1a)$$

$$\epsilon_{ik} = \log(o_{ik}/c_{ik}) - \alpha_i - \beta_k \quad (1b)$$

ここで、 $o$ は観測値、 $c$ は経験的距離減衰式による推定値、 $\alpha$ は地震補正係数、 $\beta$ は地点補正係数である。添え字の $i$ は地震を、 $j$ と $k$ は地点をそれぞれ表す。

地点 $j$ と地点 $k$ の空間的な相関係数 $\rho_{jk}$ は、推定残差 $\epsilon$ を用いて、次式で算定する。

$$\rho_{jk} = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_{ij} - \mu_j)(\epsilon_{ik} - \mu_k)}{\sigma_j \sigma_k} \quad (2)$$

ここで、 $n$ は地点 $j$ と地点 $k$ において共通の地震数である。 $\mu_j$ と $\sigma_j$ は $\epsilon_{ij}$ の平均と標準偏差、 $\mu_k$ と $\sigma_k$ は $\epsilon_{ik}$ の平均と標準偏差である。

なお、(1)式の $\alpha$ と $\beta$ については、次式を最小化するような回帰係数として算定する。

$$\alpha_i + \beta_j = \log(o_{ij}/c_{ij}) \quad (3)$$

ここで、 $i$ は地震を、 $j$ は地点をそれぞれ表す。

### 2.2 地震の選定

空間的な相関を評価する地震は、リスク評価の対象となるポートフォリオの損失に影響を与えるものとした。なお、本研究では後述するように、モデルポートフォリオとして関東地域に配置された建物群を考える。

対象地震は、K-NET、KiK-netで観測されたものとし、建物に被害を与えるような地震を抽出するために、以下の条件で設定した。

- ① 範囲：東経137～142°，北緯34～38°，200km以浅
- ② 地震規模：M5.0以上
- ③ 観測期間：1996年9月～2004年3月

図1に以上の条件を満たす地震の震央分布（全221地震）を示す。また、図2に地震のマグニチュードの頻度と震源深さの分布を示す。マ

グニチュードは、M5.0～6.8に分布しており、M6.0以下で全体の約90%を占める。震源深さは、全体の約70%が25km以下のものである。

### 2.3 観測点

本研究では、観測点はモデルポートフォリオに合わせ、関東地域に限定した。観測点の分布を図3に示す。観測点数は186点で、これより、異なる2地点の組み合わせは1776通りとなる。

地点間距離（以下、離間距離）の分布（0～250km）を図4に示す。

### 2.4 地震記録の整理

上記の地震における関東地域の観測点の記録は、全部で7045記録であった。本研究では、地震動の定義位置を工学的基盤（ $V_s = 400$  m/s程度）とするため、一次元波動論を用いて地表の観測波形を基盤波形（2E）に変換した。

観測点の地盤モデルについては、公開データ<sup>5),6)</sup>を用いることとし、当該せん断波速度（ $V_s = 400$  m/s）が得られる深さまでをモデル化し

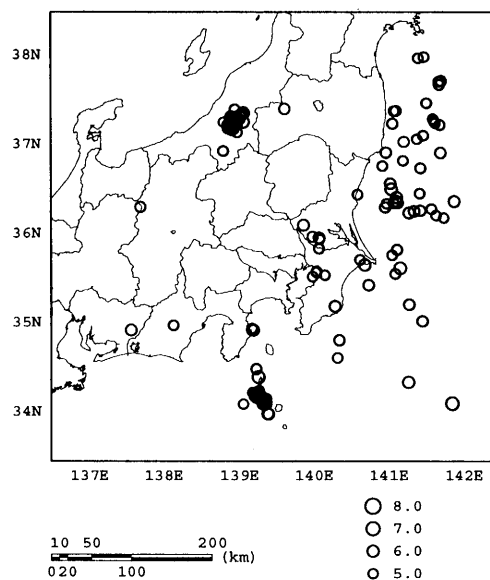


図1 対象地震の震央分布

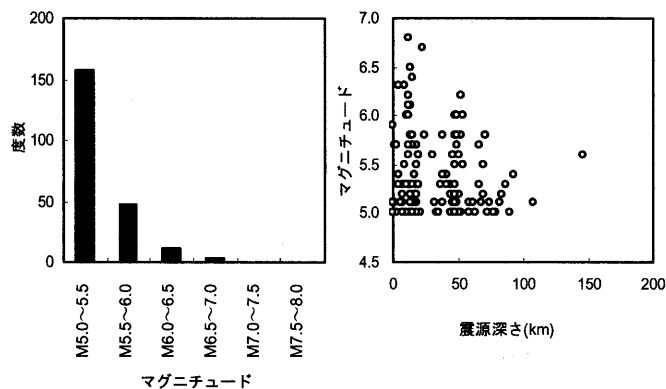


図2 マグニチュードの頻度分布と震源深さの分布

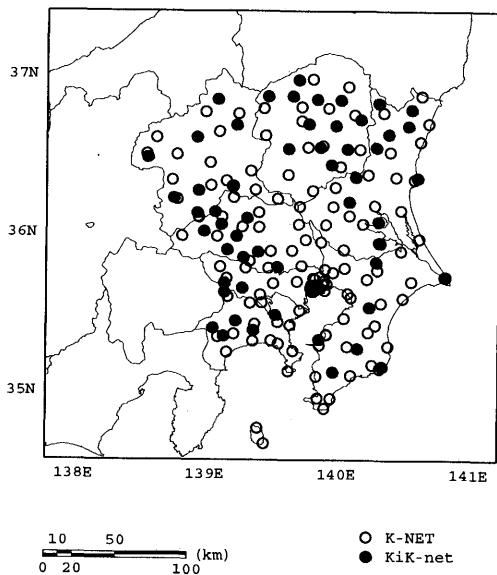


図3 観測点の分布

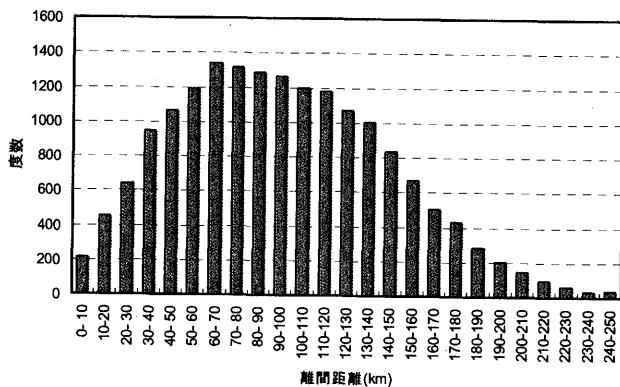


図4 離間距離の分布

た。せん断波速度が所定の値に達しない場合には最深位置を工学的地盤とし、その下方に  $V_s = 400$  m/s の地盤が存在すると仮定した。なお、そのように仮定したモデルは、186 地点中 30 地点であり、本評価に与える影響は小さいと判断した。

減衰  $h$  については、 $h = 1/2Q$  により設定した。なお、 $Q$  値についてはせん断波速度を基に、 $Q = V_s/15$  により設定した。

ところで、KiK-net 観測点の地盤モデルについては単位体積重量が記載されていないため、ここでは K-NET 観測点の地盤モデルを統計処理し、表 1 に示す値を設定した。同表は、地質分類と地盤のせん断波速度  $V_s$  ごとに単位体積重量の平均値を求めたものである。該当するサンプルのないものについては、同じ地質の値を参考に設定した。

### 2.5 相関係数の評価

#### (1) 地震補正係数と地点補正係数の分布

地震  $i$  と地点  $j$  に対応する観測値  $o_{ij}$  は、基盤波形の NS 方向の最大値と EW 方向の最大値の幾何平均とした。一方、計算値  $c_{ij}$  は次式に示す距離減衰式<sup>7)</sup>で与えられる最大加速度  $a$  とした。

$$\log a = 0.614M + 0.00501h - 2.203 \log(d) + 1.377$$

$$d = \sqrt{\Delta^2 + 0.45h^2} + 0.22 \exp(0.699M) \quad (4)$$

ここに、 $a$  は最大加速度 (cm/s<sup>2</sup>)、 $\Delta$  は震央距離 (km)、 $h$  は震源深さ (km)、 $M$  はマグニチュードである。

得られた地震補正係数  $\alpha$  と地点補正係数  $\beta$  の分布を図 5 に示す。また、 $\alpha$  の平均値と標準偏差は 0.000 と 0.239、 $\beta$  の平均値と標準偏差は 0.000 と 0.198 となった。

なお、地表での観測値  $o_{ij}$  と (4) 式による推定値  $c_{ij}$  の比 ( $o_{ij}/c_{ij}$ ) の対数平均と対数標準偏差は 0.247 と 0.336 であった。一方、一次元波動論による基盤波の対数平均と対数標準偏差は、0.075 と 0.313 で、基盤上で定義されている推定値に近づき、ばらつきも小さくなっている。

#### (2) 離間距離と変動の相関の関係

一定の範囲内の離間距離を持つ複数の観測点の組み合わせに対する残差の分布を図 6 に示す。同図には (2) 式で定義される相関係数を併記している。離間距離が 6~8km の場合は、相関係数が 0.567 であるが、16~18km では 0.367 と相関が 2/3 程度になる。離間距離が 48~50km になると相関係数も 0.126 と小さくなり、離間距離が 78~80km になるとほぼ無相関である。これらから、離間距離が小さいほど、相関が高いことがわかる。

同じ地震の観測記録が存在する全ての離間距離の組み合わせについて、離間距離と相関の関係を求めたものが図 7 である。離間距離に

表 1 KiK-net 観測点に用いる単位体積重量

$V_s$ (m/s)	F	FL	G	GF	S	SF	M	C	O	V	Pt	R
	表土	埋土・盛土	礫	礫質土	砂	砂質土	シルト	粘性土	有機質土	火山灰質粘性土	高有機質土	岩盤
-50	1.40	1.47	1.33	1.88	1.57	1.39	1.59	1.37	1.48	1.54	1.34	1.79
-100	1.40	1.47	1.33	1.88	1.57	1.39	1.59	1.37	1.48	1.54	1.34	1.79
-200	1.40	1.59	1.53	1.88	1.73	1.66	1.64	1.52	1.87	1.50	1.40	1.79
-300	1.64	1.57	1.77	1.90	1.77	1.73	1.70	1.62	1.68	1.56	1.40	1.71
-400	1.63	1.78	1.73	2.04	1.85	1.79	1.80	1.68	1.68	1.54	1.40	1.94
-500	1.63	1.74	1.79	1.93	1.86	1.89	1.77	1.77	1.87	1.36	1.40	1.76
-600	1.63	1.70	1.77	2.06	1.77	1.85	1.82	1.67	1.87	1.36	1.40	1.84
-700	1.63	1.70	1.73	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	1.91
-800	1.63	1.70	1.77	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	1.94
-900	1.63	1.70	1.96	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	2.15
-1000	1.63	1.70	1.87	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	2.15
-1100	1.63	1.70	1.91	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	1.82
-1200	1.63	1.70	1.91	1.99	1.82	1.85	1.82	1.67	1.87	1.96	1.40	1.91

単位:  $\times 10$  kN/m<sup>3</sup>

太字: K-NET データの平均値

下線: K-NET データの平均値を基に、本研究で設定した値

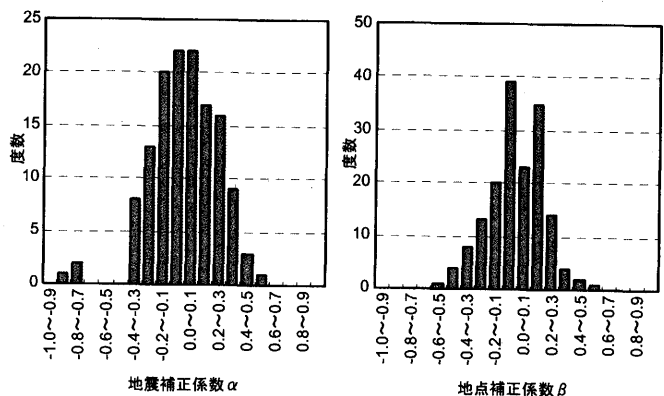


図5 地震補正係数と地点補正係数の分布

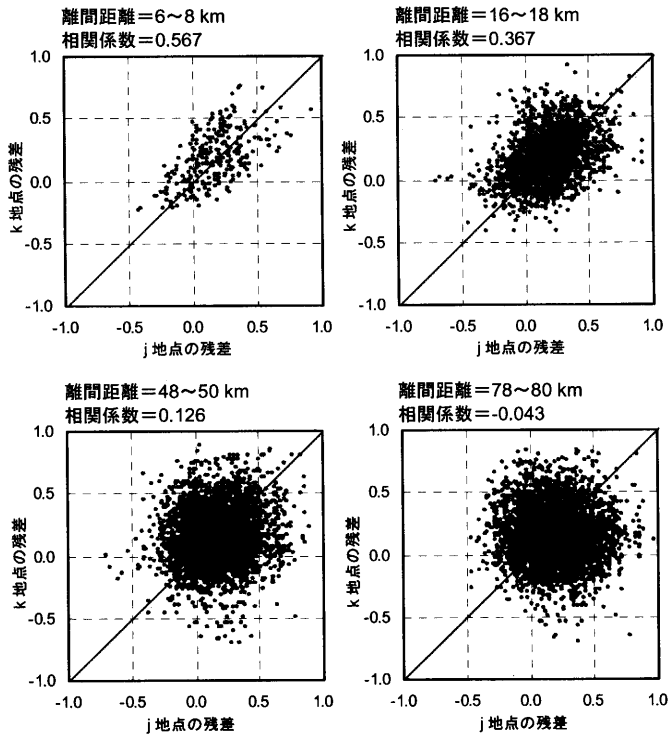


図6 残差の分布

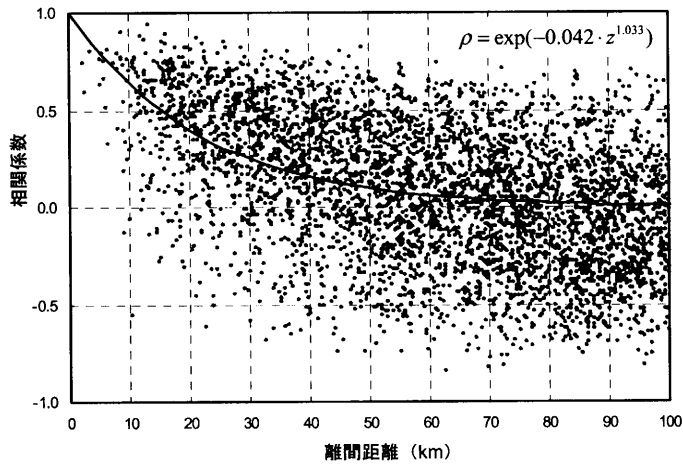


図7 離間距離と相関の関係

対して相関の大きさは逆減的であり、また、離間距離が大きくなるとばらつきが大きくなる傾向が見られる。

離間距離 10km 程度以上では負の相関も見られるが、平均については、離間距離の増大に伴い 0 に漸近すると考えられる。そのため、離間距離が 0km で完全相関 ( $\rho=1$ )、無限大で無相関 ( $\rho=0$ ) となるような式を用いてこれらを近似することが適当であると考えられる。

そこで、図 7 及び文献 4) を参照し、近似モデルとして次式を設定した。

$$\rho = \exp(-\gamma \cdot z^\delta) \quad (5)$$

ここで、 $z$  は離間距離 (km)、 $\rho$  は相関係数、 $\gamma$  と  $\delta$  は関数の形状を規定する定数である。回帰には遺伝的アルゴリズムを用い、負側の相関値も含めて回帰した。回帰の結果、 $\gamma = 0.042$ 、 $\delta = 1.033$  が得られ

た。図 7 には、これらの定数を用いた回帰曲線も併記した。これによると、離間距離 10km では  $\rho = 0.639$  であるが、50km では  $\rho = 0.095$  と 1/7 程度になる。また、離間距離 100km では  $\rho = 0.008$  とほぼ無相関になった。

### (3) 回帰式に与える諸変数の影響

地震を特徴づける変数として、地震規模と震源深さを取り上げ、これらが地震動強度の相関に与える影響を評価した。

地震規模については、対象地震の  $M$  を 0.1 毎に区分し、各  $M$  について(5)式を用いて相関係数の回帰を行った。一方、震源深さについては 20 (km) 毎に区分し、各深さについて同様に回帰を行った。ただし、対象地震数が少ない地点の組み合わせについては、適切な相関が得られないと判断し削除した。回帰の結果を表 2 に、得られた回帰曲線を図 8 に示す。

表2 回帰係数に与える変数の影響

変数	変数の値	$\gamma$	$\delta$	組み合わせ数
地震規模 $M$	5.0	0.119	0.809	3076
	5.1	0.025	1.216	2306
	5.2	0.034	1.191	587
	5.3	0.034	1.141	3668
	5.8	0.012	1.322	2346
	6.0	0.008	1.389	310
震源深さ $h$ (km)	0-20	0.037	1.114	6554
	20-40	0.050	1.092	1002
	40-60	0.022	1.178	8878
	60-80	0.030	1.120	7834

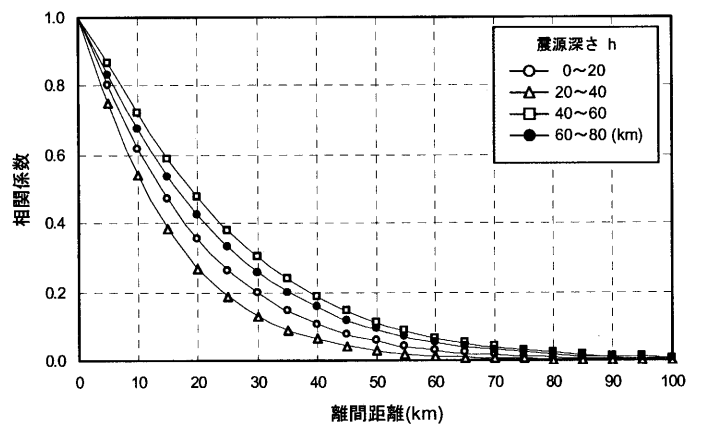
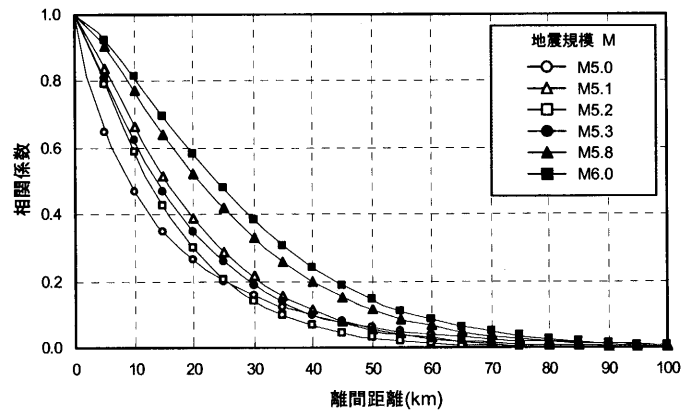


図8 回帰曲線に与える変数の影響

地震規模に関しては、M5.0～6.0の範囲で6ケースの相関が得られた。同図では、M5.1の相関が他と傾向が異なるものの、全体的にはMが大きくなるにつれ、空間的な相関が高くなる傾向が認められる。離間距離10kmの場合、M5.0では $\rho = 0.465$ であるが、M6.0では $\rho = 0.812$ と1.7倍程度の高い相関を示す。また、 $\rho \leq 0.05$ をほぼ無相関と定義すると、空間的に無相関になる離間距離は、M5.0が54km、M6.0では64kmと、10kmの差がある。

一方、震源深さに関しては、0～80kmの範囲で4ケースの相関が得られたが、明確な傾向は見られない。相関は、20～40kmが最も低く、40～60kmが最も高い結果となった。これは、距離の影響としては、震源深さだけでは不十分で、震源距離が影響を与える可能性が考えられ、今後、検討の余地がある。

### 3. ポートフォリオ解析における地震動強度の空間的な相関の反映

#### 3.1 ポートフォリオ解析

筆者らが提案してきたポートフォリオの地震リスク評価手法(以下、ポートフォリオ解析)は、地震ハザード解析をベースとしたものである。ポートフォリオ解析の概念を図9に示す。同図で、 $x_j(i), j=1, \dots, n$ はイベント*i*(地震ハザード解析で用いる個々の要素地震を本研究ではイベントと称する)による建物*j*の損失を示す。 $n$ は建物総数である。また、 $x_p(i)$ はイベント*i*によるポートフォリオの損失である。

従来の手法では地震動の不確実性をモンテカルロシミュレーション(以下、MCS)により評価してきた。これを示すのが次式である。

$$a_j = a_{0j} \cdot \exp[\varepsilon(0, \sigma)] \quad (6)$$

ここで、 $a_j$ は地点*j*における地震動強度、 $a_{0j}$ は地点*j*における地震動強度の中央値、 $\varepsilon(0, \sigma)$ は平均0、標準偏差 $\sigma$ のランダム変数である。同式からも明らかのように、従来は地震動強度の変動は互いに完全相関であることを仮定している。本研究では、(6)式をさらに以下のように書き直す。

$$a_j = a_{0j} \cdot \exp[\varepsilon(0, \sigma_e) + \varepsilon(0, \sigma_s)] \quad (7)$$

ただし

$$\sigma^2 \equiv \sigma_e^2 + \sigma_s^2 \quad (8)$$

とする。ここで、 $\sigma_e$ は地震間のばらつき(地震補正係数のばらつき)で、全地点についてイベントは共通のものであるから完全相関を仮定する。 $\sigma_s$ は地震内のばらつき(地点補正係数のばらつき)で、離間距離に応じた相関を与える。

#### 3.2 相関を有する正規乱数の生成

ポートフォリオを構成する建物数を*n*、MCSの試行数を*m*とする。このとき、相関を有する正規乱数の発生は以下の手順<sup>9)</sup>により行う。

- ① 要素数*m*の行ベクトル ${}_0r_j^T, j=1, \dots, n$ を発生させる。ここで、 ${}_0r_j^T$ は互いに独立な $N(0, \sigma_e)$ の正規乱数ベクトルとする。
- ②  $n$ 個の ${}_0r_j^T$ より、 $n$ 行*m*列の行列 ${}_0R$ を作成する。
- ③ 行列 ${}_0R$ の*k*番目の列ベクトルを ${}_0r_k, k=1, \dots, m$ とする。
- ④  ${}_0r_k$ の左側から行列*C*を乗じ、列ベクトル $r_k$ を求める。

$$r_k = C \times {}_0r_k \quad (9)$$

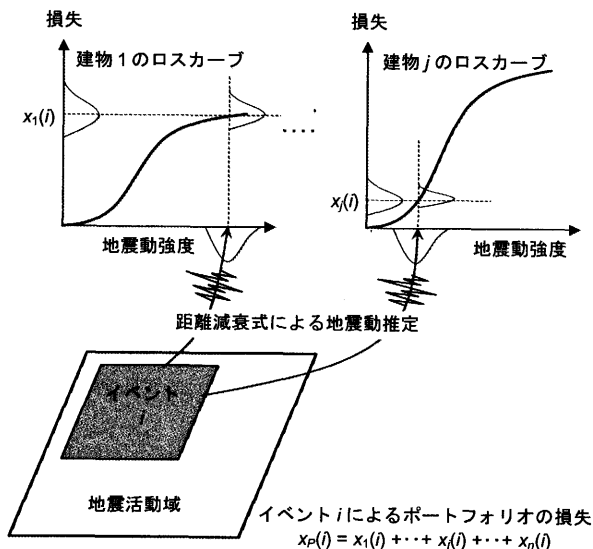


図9 ポートフォリオ解析の概念

- ⑤  $m$ 個の $r_k$ より、 $n$ 行*m*列の行列*R*を作成する。
- ⑥ 行列*R*の*j*番目の行ベクトル $r_j^T$ を、建物*j*に与える正規乱数ベクトルとする。 $r_j^T$ は相関を有する正規乱数ベクトルで、 $N(0, \sigma_e)$ の性質を有する。

なお、(9)式における*C*は下三角行列で、次式を満たすものとする。

$$\rho = C \times C^T \quad (10)$$

ここで、行列*ρ*は*n*行*n*列の相関係数マトリクスで、その要素 $\rho_{ij}$ は建物*i*と建物*j*における地震動のばらつきの相関で、2.5(2)に示したように、離間距離の関数として与えられる。

### 4. モデルポートフォリオにおける相関の影響

#### 4.1 諸条件の設定

##### (1) 対象ポートフォリオ

関東地方に配置された20の建物からなるポートフォリオを設定した。建物の資産額は一律に100とした。建物群の配置を図10に示す。

また、ポートフォリオを構成する建物の fragility と被害率(建物資産に対する損失の比)は、小破、中破、大破、倒壊の各被害程度について設定し、その値については文献1)を参照し、表3のように設定した。

##### (2) 地震環境

地震活動域モデルについては文献7)を参照して設定した。大地震発生活動域は、海域ではM7.5程度以上、陸域ではM7.0以上の地震が繰り返し発生する領域とし、固有地震モデルを用いた。中小地震発生活動域についてはグーテンベルグ・リヒターモデルを用いた。図11に設定した地震活動域を、表4に地震活動域の諸元を示す。

距離減衰式は(4)式に示した安中式を採用した。距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、図5に示した結果を基に、自然対数で0.715(常用対数で0.310 =  $\sqrt{0.239^2 + 0.198^2}$ )と設定した。

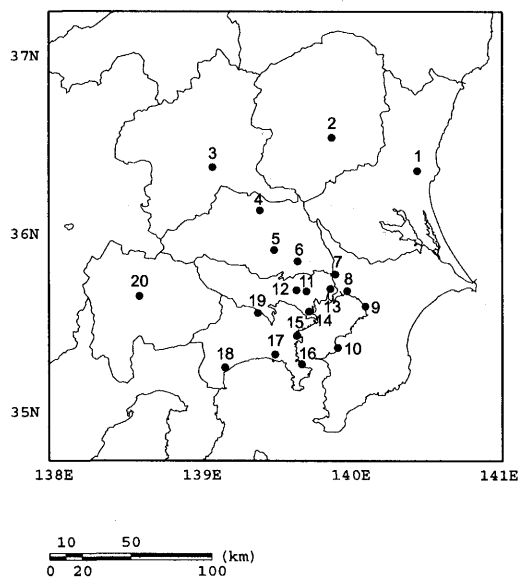
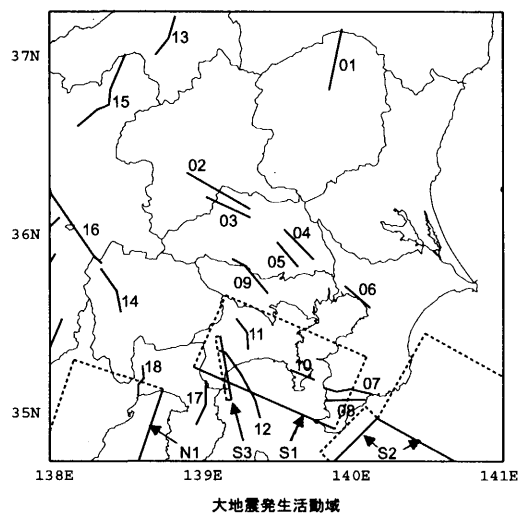
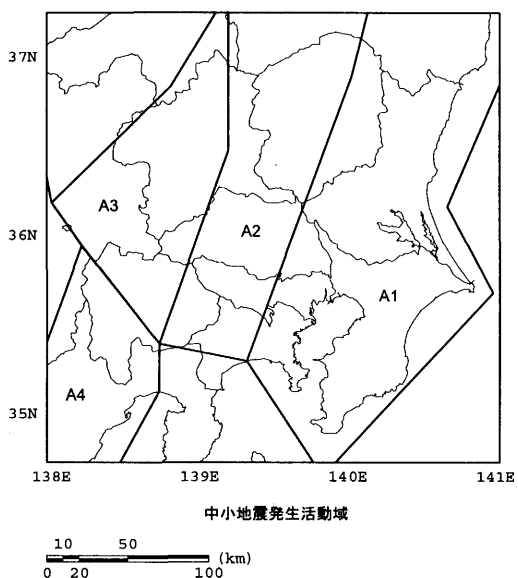


図10 建物群の配置



大地震発生活動域



中小地震発生活動域

図11 ポートフォリオ周辺の地震発生活動域

表3 被害程度別のフラジリティ特性値と被害率

被害程度	フラジリティカーブの特性値		被害率 (%)
	中央値 (Gal)	対数標準偏差	
小破	200	0.4	5
中破	600	0.4	10
大破	1000	0.4	30
倒壊	1400	0.4	100

表4 地震発生活動域の諸元

活動域番号	Mの範囲	発生間隔(年)	活動域番号	Mの範囲	発生間隔(年)
01	7.0-7.5	2033	02	7.0-7.6	1182
03	6.9-7.3	5212	04	7.0-7.4	79283
05	6.8-7.2	5931	06	6.8-7.2	5676
07	7.1-7.5	2842	08	7.0-7.4	2639
09	7.1-7.5	8710	10	6.6-7.0	1365
11	6.9-7.3	7239	12	7.5-7.9	1625
13	7.0-7.4	2399	14	7.1-7.5	2851
15	7.4-7.8	1090	16	8.1-8.5	1071
17	7.1-7.5	877	18	6.8-7.2	1917
S1	7.8-8.2	200	S2	7.8-8.2	1000
S3	6.8-7.2	73	N1	7.6-8.0	130
活動域番号	Mの範囲	A値	活動域番号	Mの範囲	A値
A1	5.0-7.0	2.344	A2	5.0-7.0	4.235
A3	5.0-7.0	1.645	A4	5.0-7.0	2.344

中小地震発生活動域のb値は一律に0.9と設定

(3) 解析ケースの設定

本研究では、地震補正に関する変動と地点補正に関する変動の按分により、表5に示すような3つの解析ケースを設定した。なお後者については、(5)式に基づき離間距離に応じた変動の相関を設定した。

表5 解析ケース一覧

解析ケース	地震補正に関する変動 (対数標準偏差)	地点補正に関する変動 (対数標準偏差)	備考
1	0.715	0.000	従来ケース
2	0.550	0.456	本研究での提案
3	0.000	0.715	参考ケース

解析ケース2における変動の按分は、対数分散の比で0.239 : 0.198とした  
地点間の相関は、(5)式により与えた ( $r=0.042, \delta=1.033$ )

4.2 解析結果

(1) リスクカーブの比較

図12に、解析ケース毎のリスクカーブを示す。同図は、所与の年超過確率における損失の非超過確率値を結んだフラクタイルリスクカーブを示すものであり、細い実線は、10%から90%まで10%刻みで求めたフラクタイルリスクカーブである。太い実線は、90%非超過確率値を結んだリスクカーブで、リスクマネジメントにおいてPMLを求める際に、通常用いられるものである。太い破線は、50%非超過確率値を結んだリスクカーブである。

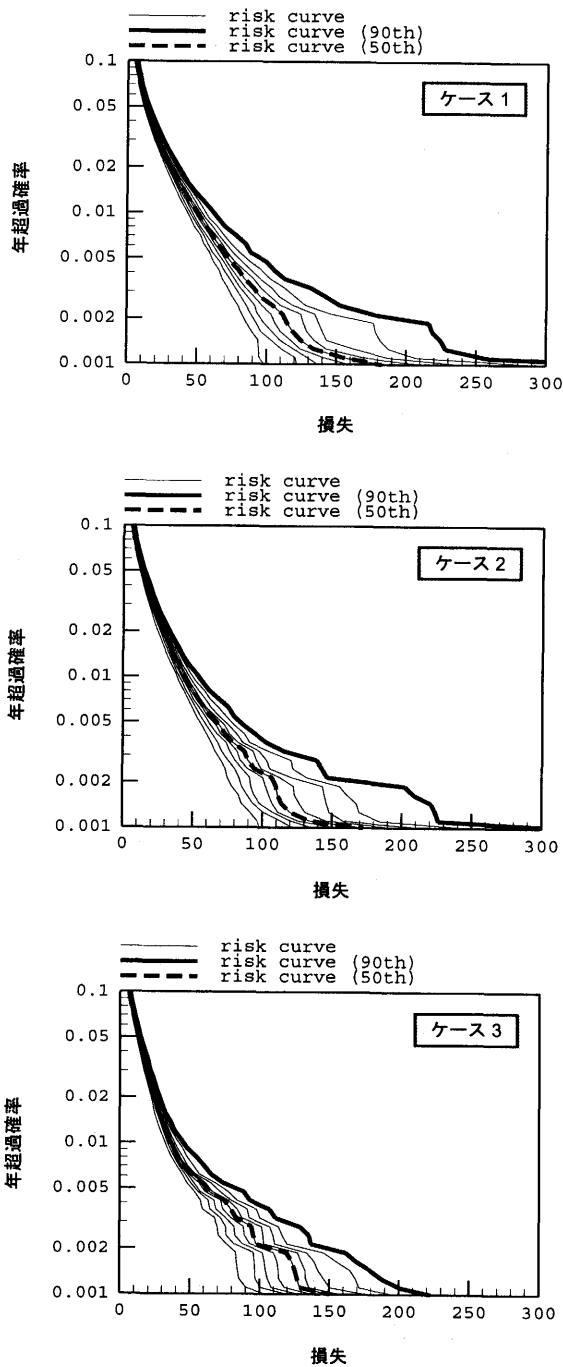


図12 リスクカーブの比較

フラクタルリスクカーブの幅は、損失の推定誤差に対応することから、この幅が狭いほど推定誤差が小さいことを意味する。図12からは、地震動の相関が小さいほど、推定誤差が小さいことがわかる。また、年超過確率が小さくなるに従い、推定誤差が大きくなる傾向も見られる。

PML 評価においては、分布の裾野である90%非超過値を採用することが多いために、変動の相関が与える影響は無視できない。

また、ケース3のように、相関を低く見積もることは損失を過小評価することに繋がり、リスクマネジメントの観点からは適切ではない。

(2) 種々の損失の比較

表6に、いくつかの年超過確率に対するPMLの値、および年期待損失（以下、AEL: Annual Expected Loss）を示す。なお、AELは50%非超過確率のリスクカーブ、損失軸、年超過確率軸で囲まれた部分の面積として求めた。

PMLに関する一般的な傾向としては、相関が小さいほど、あるいは、年超過確率が小さいほど、低減の傾向が強い。相関が小さいほどリスクカーブの推定誤差が減少し、結果としてPMLが小さくなる。また、年超過確率が小さいほど低減効果が大きくなるのは、図12に示したように、変動の幅が大きくなり、分布の裾野と中央値が大きく離れるからである。なお、年超過確率1/200の場合に、解析ケース2の方が解析ケース3よりもPMLが小さいが、これは解析上の誤差と思われる。

一方、AELについては、50%非超過確率のリスクカーブを用いていることから、解析ケースによる差はほとんど見られない。

表6 損失一覧

解析ケース	PML			AEL
	AEP=1/100	AEP=1/200	AEP=1/475	
1	61.0 (1.14)	94.9 (1.12)	182.2 (1.23)	3.02 (1.00)
2	53.7 (1.00)	84.4 (1.00)	147.7 (1.00)	3.03 (1.00)
3	45.3 (0.84)	86.1 (1.02)	137.1 (0.93)	3.03 (1.00)

AEP: 年超過確率  
括弧内の数値は、解析ケース2の損失に対する比率

4.3 回帰の不確実性が与える影響

図7あるいは図8に示したように、相関係数の評価そのものに大きな不確実性がある。図7の不確実性（回帰曲線周りのデータのばらつき）は回帰曲線のばらつき、図8の不確実性は回帰曲線の推定誤差と考えることができる。ここでは、後者の大きさを捉えるため、図8に示した相関の上限と下限を与えるような回帰係数を求め、リスクカーブに与える影響を検討する。

表5に示した解析ケース2を基本ケースとし、表7に示すような相関係数についてポートフォリオ解析を実施した。

得られたリスクカーブの比較を図13に、また、損失の比較を表8にそれぞれ示す。これらより、回帰における不確実性の影響はそれほど大きくないことがわかる。すなわち、損失評価の観点からは、地震規模や震源深さに対する距離依存性を考慮することは、特に必要ないと考えられる。

表7 回帰係数に与える変数の影響（地震規模）

解析ケース	$\gamma$	$\delta$	備考
2	0.042	1.033	表5のケース2
2M1	0.119	0.809	表5のケース M5.0
2M2	0.008	1.389	表5のケース M6.0
2H1	0.050	1.092	表5のケース h=20-40
2H2	0.022	1.178	表5のケース h=40-60

ばらつきの按分は、解析ケース2と同じ

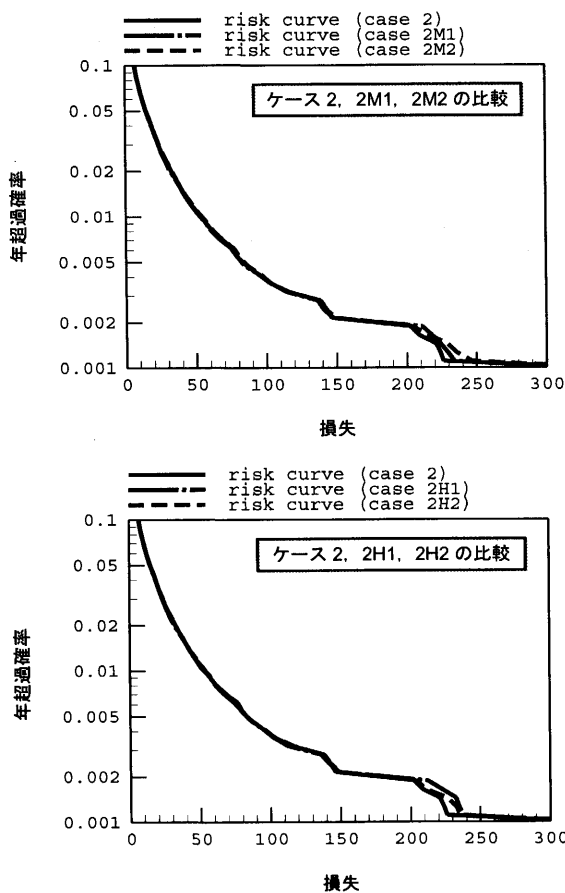


図13 回帰の不確実性がリスクカーブに与える影響

表8 回帰の不確実性が損失に与える影響

解析 ケース	PML			AEL
	AEP=1/100	AEP=1/200	AEP=1/475	
2	53.7 (1.00)	84.4 (1.00)	147.7 (1.00)	3.03 (1.00)
2M1	52.1 (0.97)	83.5 (0.99)	150.1 (1.02)	3.03 (1.00)
2M2	53.4 (0.99)	84.2 (1.00)	151.8 (1.03)	3.01 (0.99)
2H1	52.5 (0.98)	83.9 (0.99)	150.8 (1.02)	3.03 (1.00)
2H2	53.1 (0.99)	84.3 (1.00)	150.1 (1.02)	3.02 (1.00)

AEP: 年超過確率  
括弧内の数値は、解析ケース2の損失に対する比率

5. まとめ

本研究では、ポートフォリオのリスク評価の推定誤差の低減を目的とし、地震動強度の空間的な相関が損失の評価に与える影響を定量化した。検討に先立ち、K-NET および KiK-net の観測記録を用いて、工学的基盤位置における地震動強度の変動の空間的な相関を評価した。さらに、モデルポートフォリオを対象に、相関を考慮することによる影響を検討した。この検討を通じ、相関の考慮が損失の推定誤差を低

減することを確認した。

また、以上の検討を通じ、以下の知見を得た。

- 1) 2 地点間の離間距離が大きくなるに従い、地震動強度の相関は低減する。
- 2) 地震規模が大きくなるに従い相関が大きくなる傾向が見られるのに対し、震源深さと相関の大きさの関係には明確な傾向は見られない。
- 3) 完全相関を仮定すること（全ての変動を震源特性の変動と仮定すること）は、PML をかなり過大に評価することとなる。一方、全ての変動を地点特性の変動と仮定することは小さめの PML を与えるが、その程度は大きくない。
- 4) 今回の検討では、相関係数の地震規模依存性や震源深さ依存性が PML 評価に与える影響は、無視しうる程度であった。

本研究では、対象ポートフォリオを関東地域に設定し、それに支配的な地震のみを対象としたため、大地震を含む十分な地震データが得られなかった。そのため、本研究で得られた結果の極めて大きな地震への適用性については、一層の検討が必要である。また、地震データの不足により仮定を用いて設定した地盤モデルについても、より精度の良いモデル化の検討が必要である。

今後は、記録の蓄積を待つとともに、より広範な地域のデータを対象に、地震動強度の相関に関しての評価精度の向上を図っていく。さらに、相関係数の回帰方法についても検討を行い、リスクの定量化における扱い方についても検討を実施する予定である。

謝辞

本研究の実施に際し、防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の強震記録を使用させていただきました。また、東電設計(株)安中正氏には、地震活動域モデルならびに距離減衰式のばらつきに関する貴重なご意見を頂きました。

ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, 第 552 号, pp.169-176, 2002 年
- 2) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.7
- 3) 川上英二, 茂木秀則: 強震動アレーデータに基づく隣接二地点間の最大加速度比の確率分布, 土木学会論文集 No.626/I-48, pp.219-230, 1999.7
- 4) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, No.565, pp.41-48, 2003.3
- 5) K-NET: 観測点一覧 (土質データ), 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/db/>), (参照 2005-03-14)
- 6) KiK-net: 観測点コード一覧 (地質図), 防災科学技術研究所 (オンライン), 入手先 (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>), (参照 2005-03-16)
- 7) Annaka, T. and Yashiro, H: Uncertainties in a probabilistic model for seismic hazard analysis in Japan, Risk Analysis II, WIT PRESS, pp.369-378, 2000
- 8) Ang, A.H-S. and Tang, W.H., 伊藤學, 亀田弘行訳: 土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988

(2005年7月10日原稿受理, 2005年10月14日採用決定)