

◆ 耐震・危機管理技術特集 ◆

震災対策体制のパフォーマンス評価手法に関する基礎的研究

— 地震直後の情報収集体制のモデル化 —

野崎智文* 杉田秀樹**

1. まえがき

1995年兵庫県南部地震においては、それまでの予想を上回る強い地震動によって、社会基盤施設に大きな被害が生じた。このように、まれな確率で発生する巨大な地震に対して「絶対に安全な」施設を構築することは不可能であったり、コストの面から見て妥当でない場合がある。したがって、あらかじめ施設の被害が生じることを想定し、勤務時間外の参集、点検、応急復旧、道路啓開、復旧等の震災対策活動を迅速に行うための震災対策体制の整備が必要である¹⁾。

震災対策体制は、震災対策活動を行う要員および要員によって構成される組織と、震災対策活動を支援する機器等からなる。ここでは、これらの要員、機器等を震災対策体制要素あるいは単に要素と呼ぶことにする。

震災対策体制は、多数の要素が連携して構成されるため、実際に地震が発生した場合に要員が迅速に参集できるか、点検や情報の集約が迅速に行われるか、機器等のスピードや安全性は十分か、といったことについては確認するのが難しい。このような震災対策体制・活動の実効性、効率性については、シナリオにしたがった実地訓練を行うことも考えられるが、様々なシナリオや不測の事態に対して検討を繰り返すのが困難である。

本研究の全体目的は、多数の要素から構成される震災対策体制を計算機上のモデルとして表現し、その迅速さ、正確さを定量的に評価する手法について検討することにある。その概要是、震災対策体制において情報を伝達・処理する一つ一つの要素を「ゲート」としてあらわし、それらのゲートをつなぎあわせることによって、震災対策体制あるいはその活動をネットワークとして表現するものである。

震災対策活動は先にも述べたように点検、応急復

旧等の様々な段階(フェーズ)からなるが、本報文では、地震直後の道路施設被害の概略点検と情報収集に関し、仮想のモデル工事事務所を設定し、本研究で提案している手法によってそれらの活動の効率性を評価した。その結果、多数の所管施設を有する工事事務所の、地震直後における情報収集活動の効率性の定量的な評価が可能であることがわかった²⁾。

2. ネットワークとゲートによる震災対策体制の表現

(1) 簡単な例のネットワーク表現

いま、基本的な例として二人の要員からなる簡単な組織を考える(図-1)。要員 A は、時刻 $t_I = 0$ において情報を受け取った後、それに対して必要な処理をした上で B に情報を引き渡すものとする。B はそれに対して必要な処理を行い、これによって全体の処理が終了する。要員 A, B が情報を処理するのに要する時間を T_A, T_B とすると、情報が A に到着してから B の処理が完了するまでに要する時間(ここでは $T_A + T_B$)が計算できる。このような組織は、二者間の「伝言ゲーム」と呼ぶことができ、これをゲートを用いてネットワークとして表現したものが図-1である。この場合、ゲート A, B は必ずしも情報を処理する「人」である必要はなく、情報処理機器の処理や、人の移動、情報の伝送といったイベントなどもゲートで表すことができる。このような方法を基本として、より複雑な震災対策体制の形態やその活動を表現する。

(2) 一般化の条件

伝言ゲームの例はもっとも単純な組織形態であるが、実際の組織においては、そのゲートの動作やネットワーク形態がさらに複雑になる。一般的

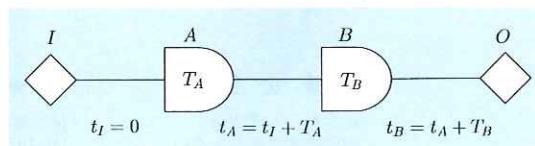


図-1 伝言ゲームのネットワーク表現

な組織にこの考え方を適用するための条件としては、以下のような事項が考えられる。

- ① ゲートは任意の数の入力を持つ。
- ② ゲートの処理時間は確率的に変動する。
- ③ ゲートを流れるのは時刻のみではなく、情報の量なども含まれる。

3. 情報量の定義

体制ネットワーク中を流れる情報 S を、時刻と情報量の組み合わせとして以下のように定義する。

$$S = (t, I) \quad (1)$$

ここで、 t は当該情報がゲートの入力に到達する時刻であり、 I は被災状況に関する情報量を表す。

情報量に関してはさまざまな考え方で定義できるが、ここでは、現場の被災状況の点検結果に関する「確度」として 0~1 の実数値を与えることとした(表-1)。

たとえば表-1(a) は、ヘリコプターによって上空から施設被害を点検した場合、実際の被害規模が甚大ならば、確実に「被害大」と観測するが($I = 1.0$)、被害規模が小さい場合には、これを「被害小」と判定する場合と「被害なし」と判定する場合が半々の確度で起こりうることを表している($I = 0.5$)。

表-1 では、実際の被害程度と観測される被害程度の組み合わせに対して情報量が設定されているが、これらを利用する際には、ある箇所で観測され

表-1 情報量の設定
(a) ヘリコプターによる点検の情報量

		実際の被害		
		大	小	なし
観測情報量	必要な処置	大規模	小規模	不要
	被害大	1.0	0.0	0.0
	被害小	0.0	0.5	0.5
	被害なし	0.0	0.5	0.5
正答		1.0	0.5	0.5
誤答		0.0	0.5	0.5
過大		0.0	0.0	0.5
過小		0.0	0.5	0.0

(b) 地上点検の情報量

		実際の被害		
		大	小	なし
観測情報量	必要な処置	大規模	小規模	不要
	被害大	1.0	0.0	0.0
	被害小	0.0	1.0	0.0
	被害なし	0.0	0.0	1.0
正答		1.0	1.0	1.0
誤答		0.0	0.0	0.0
過大		0.0	0.0	0.0
過小		0.0	0.0	0.0

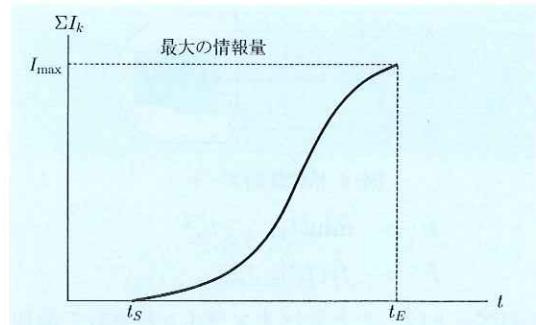


図-2 情報量累積の概念

た被災程度が正答である確度をもって、その箇所で取得される情報量とする(表-1 中「正答」の欄)。

体制のパフォーマンスを評価するには、たとえば多数の点検箇所からの情報量が集約される状況を累積曲線として表示することによって行う(図-2)。

点検活動開始の迅速性は曲線が立ち上がる点($t = t_S$)で、点検活動自体の迅速性は曲線の傾きで、また組織全体としての情報収集のパフォーマンスは収集した情報量と情報収集完了時刻($t = t_E$)によって比較・評価が可能である。

4. ゲートの例

3. で定義された情報 $S = (t, I)$ を処理するゲートについては、次のように考える。

- ① ゲートは任意の数の入力を持つ。
- ② ゲートは、その入力に接続された前段のゲートの出力を利用する。
- ③ 入力情報に対してあらかじめ定められた処理を行い出力する。

これらのことを示したのが図-3 である。

具体的なゲートは、この基本ゲートの処理時間、情報処理に関する関数形 f_T 、 f_I を与えることによって設定する。それらのいくつかについて以下に示す。

(1) 最早動作ゲート

最も早くゲートに到着する情報に基づいて出力が決定される。したがって、内部の関数形は以下のようになる。

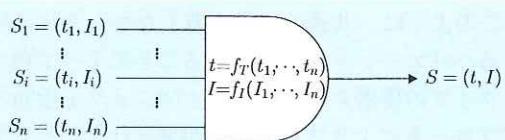


図-3 基本ゲート

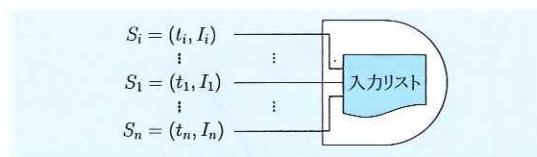


図-4 情報集約ゲート

$$t = \min(t_1, \dots, t_n)$$

$$I = f_I(I_i)|_{t_i=\min(t_1, \dots, t_n)}$$

このゲートは、たとえばオンライン地震計で最初に起動したものの信号によって他の地震計が制御されたり同報装置が起動するような場合に用いる。

(2) 最遅動作ゲート

すべての入力に対して情報が得られた場合に初めてゲートが作動する。この場合、内部の関数形は以下のように表現できる。

$$t = \max(t_1, \dots, t_n)$$

$$I = f_I(I_1, \dots, I_n)$$

このゲートは、すべての要員の情報が集約されて初めて報告や発表が可能となる場合などに用いることができる。

(3) 情報集約ゲート

情報集約ゲートは、各被災箇所からの情報を集約される集約班のイメージである。このゲートは入力に与えられた情報をそのまま内部のリストに蓄積していくもので、出力は持たない。最終的に、リスト中の情報を時刻によって並べ替えるなどの処理をしたうえ、体制の評価に用いる(図-4)。

5. オブジェクト指向アプローチの導入

これまでに説明したゲート、ネットワークの考え方によって実際の震災対策体制・活動を評価する場合、ゲートの数が非常に多くなり、ネットワークの規模は大きいものとなる。筆者らは、そのようなケースに対応するためにテストプログラムを開発した。その際、全てのタイプのゲートは①複数の入力を持ち、②出力に対して要求があったときに入力情報を調べて出力の所要時間等の計算を行うといった共通の基本的な特徴を持つ。

このように、共通の特徴を有しながらそれに対するバリエーションを付加することによって色々なタイプの要素を作る場合、オブジェクト指向のアプローチによりプログラム開発を行うことで開発効率が大幅に向上する。オブジェクト指向型の

言語の場合、FORTRAN等の「プロセデュア型」言語によるよりも人間の直感に近い形でプログラムが作成できるため、新たなタイプのゲートを構築する場合などに柔軟に対応可能となり、開発の負担を軽減することができる³⁾。

そもそも、複雑な体制を「固有の機能を持った要素(オブジェクト)の組み合わせとして捉える」という本研究の発想自体がこのようなオブジェクト指向の考え方から出発しており、このような思想は単にプログラム開発分野のみにとどまらず、複雑なシステムを記述するあらゆる研究分野において有用であると考えられる。

6. 仮想工事事務所のネットワークによる表現

(1) 震災対策活動のフェーズ分析

開発した手法の妥当性を確かめるために、現実の体制を模したケーススタディを行った。まず、複雑な震災対策体制・活動をネットワーク表現するために、地震発生から被害点検結果が集約されるまでの組織の活動をいくつかのフェーズに分解する(図-5)。

図中、「複数ルートの点検」は、河川・道路等の複数の点検ルートに対して要員が別れて点検活動を行うことを意味する。

(2) モデル事務所の設定

具体的なモデル工事事務所として、表-2のような諸元を設定した。

すなわち、モデル事務所は4つの道路の路線を管理し、地震発生時には3出張所の職員が地上点検を行うとともに、昼間の場合はヘリコプター1機によって上空からの点検を行う(図-6)。

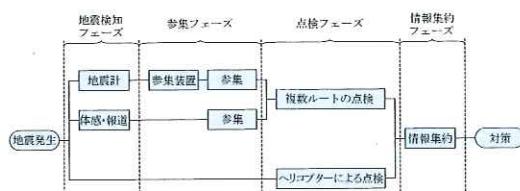


図-5 震災対策のフェーズ分析の例

表-2 モデル事務所の諸元

	単位	数量
路線数	路線	4
1路線あたり点検箇所数	箇所	50または10
出張所数	出張所	3
1出張所あたり点検人員	人	5
地震計	台	5
ヘリコプター	機	1

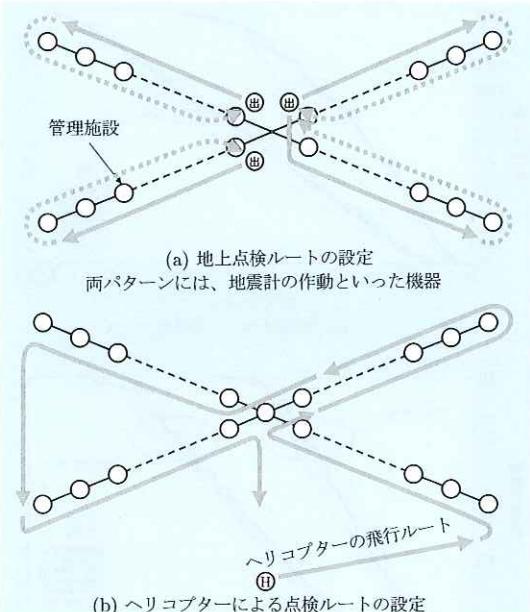


図-6 モデル事務所の点検ルート設定

(3) ネットワークによる体制の表現

上記のように設定されたモデル事務所の震災対策体制を、昼と夜の別に分けてネットワークによって表現したものを図-7に示す。

両パターンには、地震計の作動といった機器の動作を表すゲート、要員の移動を表すゲート、点検や報告といった要員の活動を表すゲートが用いられている。ネットワーク“DAY”は昼間に地震が発生した場合であり、ヘリコプターによる点検が可能となっている。またネットワーク“NIGHT”は夜間に地震が発生した場合で、地上点検しか行えないほか、要員が参集する必要があることが表現されている。

(4) 被害パターンのバリエーション

① ルート間の被害分布

DAY、NIGHTの各ネットワークに対して、さまざまな被害状況に対する震災対策体制・活動のパフォーマンスの違いを見るために、「一様」、「傾斜」という二種類の被害分布パターンを設定した(表-3)。

すなわち「一様」パターンでは4つのルートすべてについて被害大・小・なしの各ランクの箇所比率が同じなのに対して、「傾斜」パターンではルート間で各被害程度の発生率が異なる。

② ルート内の被害分布

ルート内の被害程度の分布についても、「ランダム」、「大→小」という二つのパターンを設定した。

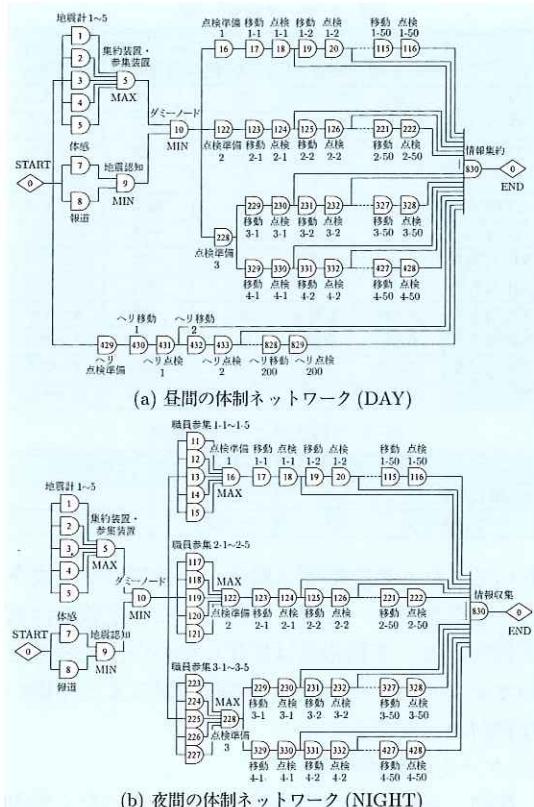


図-7 ネットワークによる体制表現

表-3 ルート間の被害分布のパターン

	ルート	被害大 (%)	被害小 (%)	被害なし (%)	合計 (%)
一様	全体平均	20	30	50	100
	1	20	30	50	100
	2	20	30	50	100
	3	20	30	50	100
傾斜	全体平均	20	30	50	100
	1	50	50	0	100
	2	20	40	40	100
	3	10	20	70	100
	4	0	10	90	100

「大→小」パターンは、ルート上の被害程度を大→小の順番に並べたもので、点検の際に被害程度が大きい箇所から優先的に点検することを模擬的に表している。

③ 全試算ケース

以上のパターンを組み合わせた試算ケース設定の一覧を表-4に示す。

(5) パラメーター設定

① 情報量

点検において得られる各箇所の情報量は3に述べた考え方にして、表-5のように設定した。

すなわち、各点検ルート中の「点検」ゲートに

表-4 ケース設定一覧

ケース	ヘリコプター点検	職員参集	1ルートあたり箇所数	ルート間被害分布	ルート内被害分布
DAY-1	可能	不要	50	一様	ランダム
DAY-2	可能	不要	50	傾斜	ランダム
DAY-3	可能	不要	50	一様	大→小
DAY-4	可能	不要	10	一様	ランダム
DAY-5	可能	不要	10	傾斜	ランダム
DAY-6	可能	不要	10	一様	大→小
NIGHT-1	不可能	必要	50	一様	ランダム
NIGHT-2	不可能	必要	50	傾斜	ランダム
NIGHT-3	不可能	必要	50	一様	大→小
NIGHT-4	不可能	必要	10	一様	ランダム
NIGHT-5	不可能	必要	10	傾斜	ランダム
NIGHT-6	不可能	必要	10	一様	大→小

表-5 点検方法ごとの情報量

	被害大	被害小	被害なし
地上点検	1.0	1.0	1.0
ヘリ点検	1.0	0.5	0.5

おいてこれら被害程度に対応した情報量が生成され、報告ゲートへと伝えられる。この定義では被災程度によって情報量は変化しないが、被災程度のカテゴリーごとの情報量蓄積情報によって細かな検討が可能である。

② ゲートの処理時間

移動、点検等の所要時間は一定値ではなく変動する場合がある。今回の試算では、各ゲートの処理時間は正規分布によって変動すると仮定し、処理内容ごとに平均値・分散を設定した。このとき、夜間の点検や被害程度が大きい箇所の点検には長い時間を要すると設定している。

たとえばヘリコプターの移動に要する時間は一定値(30分)で設定するが、職員の移動は平均5分、標準偏差2分の正規分布といったように、すべてのゲートについて、一定値あるいは確率分布のパラメータを設定した。

以上の設定に基づき、各ケースのネットワークのパフォーマンスを評価するには、地震が発生してからすべての箇所の点検を終了するまでの間、情報集約ゲートに蓄積された情報量を時刻順にソートし、その情報量の累積値をグラフ化する。

7. 諸条件の変化が震災対策活動の効率性に与える影響

(1) 昼間と夜間の比較

1ルートあたりの点検箇所数が50箇所の場合、10箇所の場合の情報量蓄積状況について、各々図-8(a)、(b)に示す。

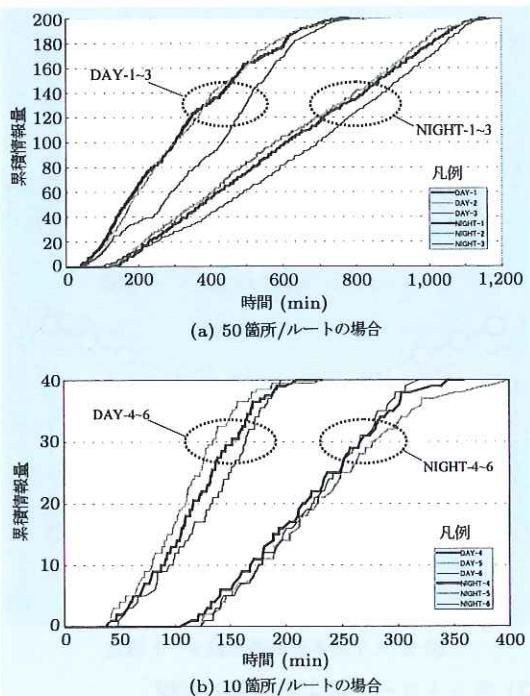


図-8 情報量蓄積状況

昼間/夜間の比較では、当然のことながら昼間の方が情報蓄積の立ち上がりが早く、またすべての箇所の情報を収集し終える時間も短いことが分かる。

(2) 点検優先順位による違い

被害程度が大→小の順番でルート上に整列している場合(DAY-3、NIGHT-3、DAY-6、NIGHT-6)は、他の場合に比べて情報量の累積速度が遅いが、これについては、点検初期に被害程度が大きい箇所を点検するために所要時間が長くかかり、その後被害程度が小さい箇所を短い時間で点検するためにこのような結果となる。NIGHT-6についてはNIGHT-4、5と差がないが、これは夜間の点検のためにそもそも長い点検時間を要する一方、点検対象箇所が少ないとことから、被害程度の違いによる差が目立たないためである。

この結果のみでは、「大→小」パターンすなわち被害程度が大きい箇所から点検するパターンは、効率が低いように見えるが、今回の設定では、情報量Iの定義として、被害程度に関係なくその確からしさのみを考慮しているためである。この点を明快にするには、被害程度ごとの累積情報量を整理するか、情報量に被害程度に応じた「情報の重要さ」を含めて定義することにより、「大→小」パターンは「ランダム」パターンに比べて有利になる。

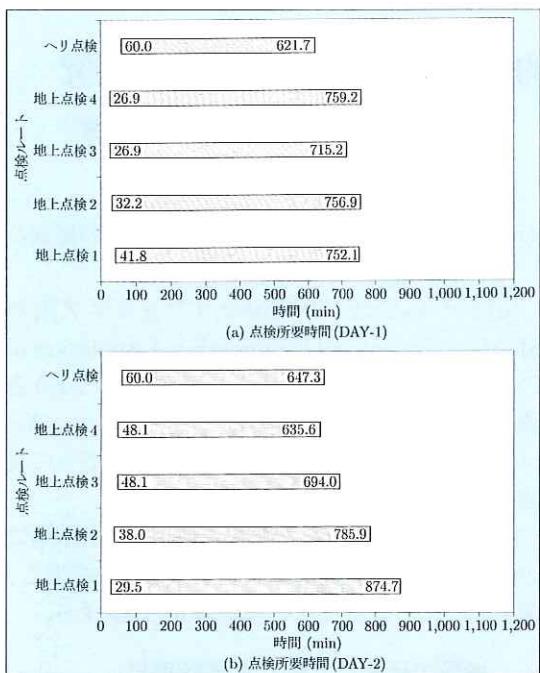


図-9 点検所要時間の比較

(3) ルート間で被害程度が異なる場合

各被害程度の発生頻度が全ルートで同様の場合(たとえばDAY-1、NIGHT-1)と、ルート間で被害程度の頻度に偏りがある場合(たとえばDAY-2、NIGHT-2)では、曲線の概形に大きな違いはない。そこで、DAY-1とDAY-2の二つのケースについて、ルートごとの地上点検活動に関する、開始時刻、終了時刻および所要時間を比較してみる(図-9)。

すべてのルートについて被害程度の発生頻度が同じ場合(DAY-1)、確率的変動によって若干の差はあるものの、ルート間の点検時間に系統的な差はない。一方、被害程度の頻度がルートごとに偏っている場合(DAY-2)、ルート上の被害程度が大きい箇所の頻度と点検所要時間が対応している。今回の試算では、点検要員数によって各箇所の点検所要時間を変化させていないが、地震直後の検知システム、被害推定技術の情報に基づき、被害程度が大きいルートに対して要員を多く振り向けることによって、点検所要時間を平準化し、短縮することができる。このことは、地震発生直後に所管施設の被害程度を検知・即時推定することが重要であることを意味している。

(4) 考察

以上の結果は、ネットワークやケース設定などから帰結される直感的な予想と同じであるが、本手法

の特徴は、情報収集の速さを定量的に評価できることにある。特定の要員の収集が不可能になったり、あるルートに到達する時間が非常に長くなった場合に、ネットワークの形態やパラメーターなどの条件を変化させ、その影響を検討することができる。

8. 今後の課題

本報文では、公共施設を管理する工事事務所の震災対策体制のうち、地震直後の点検活動を、ネットワークとして表現し、点検活動・情報処理の効率性を評価することを試み、その適用性を検討した。この手法は実際の震災対策体制を抽象的な表現によって扱うものであるが、実際の工事事務所等における事前計画に役立てるためには、被災度および情報の考え方や、処理時間の設定方法に関する以下のような課題について調査検討を進める必要がある。

- ① 情報量の定義への、被害程度に応じた重要度の考え方の組み入れ方法の検討。
- ② 収集不能、機器の故障といった各ゲートのリスクの組み入れ方法。さらに、このようなリスクや所要時間の確率分布・パラメーターの計測・同定方法の検討。
- ③ さまざまな活動パターンを表現するゲートの追加(たとえば時間制限や入力条件によって出力情報や接続状況を変更できるようなフレキシブルなゲートなど)。

これらの課題を解決することにより、より全般的な震災対策体制・活動へ本手法を適用可能となり、地震時の危機管理対策への応用が期待できる。

参考文献

- 1) 「震災対策計画の高度化に関する研究」、土木技術資料 Vol.40, No.4, 1998年4月
- 2) 「震災対策体制のパフォーマンス評価手法に関する基礎的研究」、土木研究所資料第3587号、1998年6月
- 3) たとえばThe Visual C++ Handbook, Osborne McGraw-Hill

野崎智文*



建設省土木研究所
耐震技術研究センター
防災技術課主任研究員
Tomofumi NOZAKI

杉田秀樹**



同 防災技術課長
Hideki SUGITA