

震後の道路交通機能の実用的な復旧予測シミュレーション

PRACTICAL SIMULATION METHOD FOR RESTORATION PROCESS OF ROAD
TRANSPORTATION SYSTEMS DAMAGED BY EARTHQUAKES

山田善一*・野田 茂**・五十嵐 晃***

By Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA and Akira IGARASHI

In this paper, a Monte Carlo simulation method, which is able to evaluate practically the post-earthquake restoration process of road transportation system, is proposed. The simulation model is divided into three phases; 1) Assessment of damage state of network, 2) Performance evaluation of system included in traffic flow analysis, and 3) Recovery process of damaged network. The restoration problem is separated in two parts, emergency restoration evaluated by considering only connectivity between nodes, and rehabilitation works affected by traffic control. The structural and functional restoration are defined by various useful measures. The present method is then applied to evaluate the performance of road transportation system in the Izu Peninsula during the post-earthquake period. The structural and functional restoration processes, restoration order and traffic volume, as influenced by repair progress, are examined within the context of some constraints such as available manpowers and materials, and an optimum strategy for system restoration is quantitatively discussed.

Keywords: road transportation system, restoration strategies, seismic performance evaluation, practical method

1. ま え が き

本論文は、震後の道路交通網の復旧戦略を検討するため、新しい復旧モデルと実用的な復旧シミュレーションのアルゴリズムを考案し、伊豆半島の道路網に適用して、復旧戦略の相違が道路交通機能に与える影響について比較することにより、本手法の妥当性を検討するものである。

ライフラインの中でも、道路交通網は、消防、救援、復旧、輸送路確保などの諸機能を有しており、とりわけ重要な役割を果たしている。したがって、機能低下による影響や損失はきわめて大きなものとなる。道路交通網は、多数の要素が有機的に結合して機能するネットワークとしての性質を有している。したがって、震後の復旧を考える場合、個々の構成要素の復旧のみならず、ネットワークシステムとしての機能を早期に回復することが重視されるべきである。このような特性を踏まえて震後の復旧戦略を考えることは重要な課題として位置づけら

れている。しかしながら、一般にはその性質の複雑さから、このような特徴の解明には多くの困難を伴っている。

上記のような理由により、最近では、道路交通機能の耐震性や震後の復旧過程を検討することが試みられてきた。

川上¹⁾は、道路交通システムの地震後の連結確率を算定するとともに、交通量配分の手法を用いてシステムの機能低下の程度や各道路の役割を評価するための方法を提案している。具体的には伊豆半島の道路網に適用して手法の有用性を確認しているが、震後の復旧過程を研究するまでには至っていない。

文献2)では、道路構造物そのものの被害は少なく、電力などの機能ダウンに起因する間接的被害を中心に考え、地震発生直後の交通機能マヒとそれが他機能特に消防機能に及ぼす影響を具体的・数量的に分析している。シミュレーションの前提条件を設定して時刻変化を調べた結果、信号が滅灯し道路交通機能がマヒする可能性は相当高いことを報告している。

山田・家村・野田・伊津野³⁾は、被災した道路交通網に対して、復旧に要する作業量を基準とした被害評価を行い、交通ネットワーク上を走行する全車の平均走行時間を用いて交通網の機能性を評価し、ある時点の復旧状況に応じて、次の復旧手順を決定するという手法を用い、

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)

*** 学生会員 京都大学大学院生 工学研究科博士課程
(〒606 京都市左京区吉田本町)

理論上最適な復旧過程を求めている。さらに、被災交通網の復旧シミュレーションを多数回行い、その結果得られた最適な復旧順序のデータに対して、数量化理論Ⅱ類を用い、理論上最適な復旧順序と各種要因との相関性を解析している。

岩崎・大日方・後藤⁴⁾は、震後の道路交通機能の評価手法を取りまとめ、道路網の地震に対する信頼性評価手法、震後の時期区分ごとの交通機能評価手法（優先確保箇所を選定方法など）および震後交通機能評価の試算結果について、その検討結果を報告している。

静岡県⁵⁾では、振興センターを中心とした行政ブロック別に地震による各種施設の被害想定を実施し、幹線輸送体系がおおむね復旧するまでの1か月間の救援物資必要量、防災活動要員必要量、県内外の輸送需要を調査し、震災時における総合的な輸送体系を具体化することを試みている。

交通輸送機能は復旧活動のボトルネックになることが少なくない。このようなことにより、震後における道路交通網のソフト面の研究が取り上げられている。しかしながら、既往の研究では、道路交通機能の被害シミュレーション結果に対し、実用的な復旧予測手法のアルゴリズムを構築して、復旧のための対応（優先順位、復旧手順、資源配分など）を図上演習として追試し、システムの問題点や改良点を検討した例がほとんどない。

本論文では、震後の道路交通網の復旧戦略を検討する目的のため、機能特性を考慮した復旧シミュレーションモデルを新しく提案している。これは、震災直後の道路の啓開作業とそれに続く復旧復興作業を、現実的な制約条件を導入して復旧予測のアルゴリズムに組み込もうとするものである。また、このモデルを用いて復旧過程をシミュレートする計算手順を説明している。具体的には、本シミュレーション法を伊豆半島の道路網に適用し、その有用性を検討している。その際、各種の復旧戦略が復旧過程にどのような影響を与えるのかを明らかにしている。

2. 震後の道路交通機能の復旧シミュレーション法

(1) 道路網のモデル化

対象とした道路網は、図一1に示すように、ノード、リンクとセグメントの結合体で表現する。リンクは1つ以上のセグメントの直列系で表わされ、その両端はノードに接続されている。ノードは道路網における分岐点または1つの都市を表わす。リンクは一本の道路、セグメントは道路上の小区間を表現したものである。ネットワークのノードの総数は M 、リンクの総数は N とする。また、 $n(j)$ はリンク j のセグメントの構成数とする。

上記の3つの要素は次のような機能特性を有するとした。

ノード：交通の発生・吸収を行い、復旧活動の拠点となる。

リンク：交通の通路であり、かつ復旧拠点と被災現場の間の作業ルートとなる。

セグメント：被害発生の場合であり、復旧活動の対象となる。また、リンクの機能状態を決定する。ここでは、1セグメント当たり、被害は1か所で発生すると仮定した。

(2) 被害のモデル化

震災時の道路の被害モード（被害の形態）としては、路面の亀裂、盛土の崩壊、落石、土砂崩落、落橋などが挙げられる。これらの被害により、被災現場では通行止や車線制限の形で交通機能を損なう。

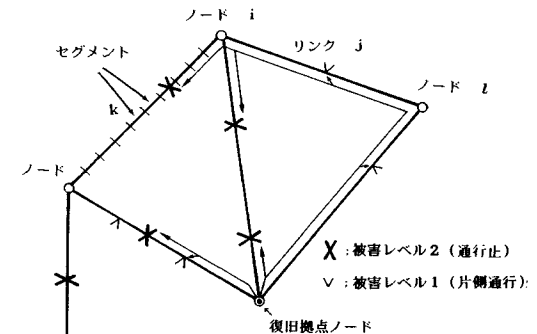
本研究では、このような道路施設の被害を表現するため、特に2車線道路を想定して、リンク j のセグメント k の被害レベル LS_{jk} を次式のように3段階で定義した。

$$LS_{jk} = \begin{cases} 0; & \text{無被害} \\ 1; & \text{片側車線使用可} \\ 2; & \text{通行止} \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

単一のリンク上に $LS_{jk}=2$ のセグメント（すなわち通行止箇所）が1つでも存在すれば、そのリンクは道路としての機能を果たすことができない。リンクが完全に機能するのはすべてのセグメントが無被害のときに限られる。このようなことを勘案し、リンク j の被害レベル LL_j は、式（1）を用いて、次式で表示した。

$$LL_j = \max_{k=1}^{n(j)} (LS_{jk}) \dots\dots\dots(2)$$

式（2）から、被災リンク j の交通容量 $Q_{max,j}$ は、平常時のリンク交通容量を $Q_{max,0,j}$ としたときに、次式



図一1 道路網のモデル化と被害・復旧のパターン

で表わせると仮定した。

$$Q_{\max,j} = \begin{cases} Q_{\max,0j} ; LL_j = 0 \\ \frac{Q_{\max,0j}}{2} ; LL_j = 1 \\ 0 ; LL_j = 2 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

上式は交通機能からみた被害評価を示している。

(3) 復旧作業

本研究では、復旧作業として、啓開作業と復旧復興作業の2つを考えた。

啓開作業とは、前節で示した通行止から生じる孤立地区を解消することを目的に実施するものである。この作業では、各ノード間の連結性を確保することを重要視している。復旧復興作業は主に啓開作業に続く作業であり、日常交通の円滑な処理を目的とし、交通の量的処理能力を向上させるような作業である。啓開作業と復旧復興作業の期間は必ずしも分離されているわけではない。被害要素の復旧時間や復旧班の数に応じて、ある復旧時点では2つの作業が同時処理されるケースもあり得る。

道路施設の被害の種類は多く、また被害程度も各被害箇所によって異なる。それに応じて、復旧工法や資機材量などが違う。道路施設の被害モードや被害レベルは、復旧所要時間によって評価することができると考えられる。ここで、復旧作業とは、各被災セグメントの被害レベル LS_{jk} を $2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ と小さくしていく作業と定義できる。そこで、各被災セグメントの復旧所要時間は、次のように設定した。

① $LS_{jk}=2$ のセグメント

② TR_{jk}^2 : 復旧作業の開始から、 LS_{jk} が1となるのに必要な時間

TR_{jk}^1 : $LS_{jk}=1$ となった後、復旧作業によって完全復旧 ($LS_{jk}=0$) に至る時間 (図-2(a) 参照)

③ なお、被害の性質によれば、復旧作業によって通行止を解除することがそのまま両車線の解放に直結するようなケース (すなわち $LS_{jk}: 2 \rightarrow 0$) も存在する。このような場合、 $TR_{jk}^2 \neq 0$ 、 $TR_{jk}^1 = 0$ で表現する。(図-2(b) 参照)

② $LS_{jk}=1$ のセグメント

TR_{jk}^1 : 復旧作業によって $LS_{jk}=0$ に至る時間
 $TR_{jk}^2=0$ (図-2(c) 参照)

③ $LS_{jk}=0$ のセグメント

$TR_{jk}^2 = TR_{jk}^1 = 0$

上記の TR_{jk}^2 と TR_{jk}^1 の組合せは被害モードなどによって決まると考えられる。

復旧作業時点 t における復旧完了までの残りの時間は、被害レベル1と2に対して、おのおの $t_{R,jk}^1$ と $t_{R,jk}^2$ ($0 \leq t_{R,jk}^l \leq TR_{jk}^l$ ($l=1, 2$)) とする。この場合、 $t_{R,jk}^1$ と LS_{jk} との対応関係は、 $t_{R,jk}^2 > 0$ のとき $LS_{jk}=2$ 、 $t_{R,jk}^2 = 0$ かつ $t_{R,jk}^1 > 0$ のとき $LS_{jk}=1$ 、 $t_{R,jk}^1 = t_{R,jk}^2 = 0$ のとき $LS_{jk}=0$ となる。また、この時点の復旧作業班数を $VR_{jk}(t)$ とする。この $VR_{jk}(t)$ は、各復旧時点において、 $t_{R,jk}^1$ 、 $Q_{\max,0j}$ 、 $Q_{\max,j}$ などの関数 (ここではこれを「復旧戦略」とよぶ。詳細については後述する) として与えられる。本アルゴリズムでは、 TR_{jk}^l が与えられた場合、復旧戦略によって VR_{jk} が時間とともに変化し、したがって、被災セグメント・リンクの復旧日数が変化するという仕組みになっている。このとき、次式の関係が成立する。

$$\frac{dt_{R,jk}^2}{dt} = \begin{cases} -VR_{jk}(t) ; t_{R,jk}^2 > 0 \\ 0 ; t_{R,jk}^2 = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dt_{R,jk}^1}{dt} = \begin{cases} -VR_{jk}(t) ; t_{R,jk}^2 = 0 \text{ かつ } t_{R,jk}^1 > 0 \\ 0 ; t_{R,jk}^1 = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $t=0$ のとき、 $t_{R,jk}^l = TR_{jk}^l$ ($l=1, 2$) である。

(4) 作業班の配分

復旧作業の実施にあたっては、作業に従事する人員や資機材などを確保しておく必要がある。これらが復旧現場に配分されて、作業が実行される。人員と資機材は班単位で編成されることが多い。そこで、被害モードと被害レベルに応じて、一被災箇所当たり、原則として1つの復旧作業班を配分できると考えた。復旧作業は、被災セグメントに割り当てられる作業班の数 $VR_{jk}(t)$ により表現する。各ノードにはある程度の作業班を現場へ派遣する能力がある。問題の簡単化のため、作業班を派遣で

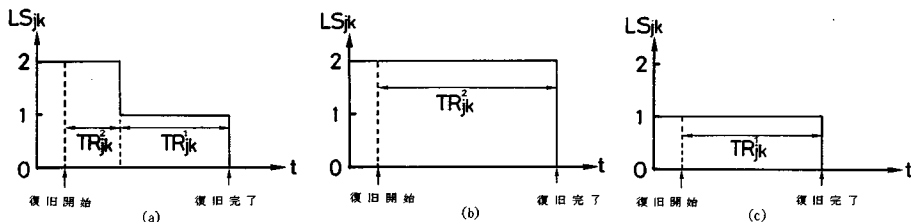


図-2 被災セグメントの復旧所要時間 (復旧作業班数=1の場合)

きるノード数は限定する。ここでは、このようなノードを復旧拠点ノードとよび、他のノードと区別した。

作業班の復旧現場への配分は、次のような条件のもとで行うと仮定した。

① 1つの被災現場に配分できる復旧作業班の数は、被害レベルに応じて変化する。たとえば、数値計算例では、被害レベル1の作業班は1、被害レベル2では1あるいは2としている。

② 作業班の配分は、被害レベル1の被災箇所 ($LS_{jk}=1$ のセグメント) よりも非導通箇所 ($LS_{jk}=2$ のセグメント) を優先させる。

③ 作業班を配分できる被災セグメントは、図一1の矢印で示すように、復旧拠点ノードから最低片側車線が使用できるリンクをパスして到達できる地点に限る。

①の仮定は、特定の被災箇所のみで復旧作業を集中させずに、現実的なシミュレーションを行えるように導入したものである。特定の被災リンクに対して順次1リンクずつ集中復旧するのは分散復旧よりも有利な場合がある。しかし、実際には特定の被災リンクに対して復旧作業を集中させても、復旧完成までの全時間が大幅に短縮される可能性はあまり期待できないということが、既往の研究成果²⁾からも明らかにされている。そこで、ここではより現実性を加味することにした。なお、非導通箇所がリンク上に1つだけ存在する場合のみ、特に緊急性が高いと考えて、被災箇所の左右の道路側から、2つの作業班が従事することを可能とした。

発震後の孤立地区はできるだけ早急に解消することが重要である。したがって、②の仮定は、既往の地震に対する道路復旧事例^{6),7)}からみても妥当なものと考えられる。

③の仮定は、作業班がリンクの非導通箇所を通行できないということを意味する。実際には、幹線道路ではなく迂回ルートを通り、非導通箇所を越えて次の被災現場に向かうことができる。しかし、復旧に必要な資機材の供給や搬入には困難を伴う。そこで、1つのリンク上において非導通箇所を越えて作業班を配分することはできないと仮定した。なお、本研究で対象とした伊豆半島の道路の多くは切土や斜面に作られており、この仮定はかなり妥当であろう。

(5) 復旧戦略

被害発生モデルにより与えられた1つの被災道路ネットワークにおいて、復旧班をどのように配分し、どの被災箇所から復旧していくかを時々刻々決定する指針が復旧戦略である。この決定法は、各ノードへの交通流の順位を考慮したうえで、交通量との兼ね合いから、被災箇所の復旧順位を決めていく作業である。したがって、復旧順位の決定基準の違いにより、いくつかの復旧タイプ

が考えられる。

ここでは、いくつかの復旧タイプを設定して、それぞれの復旧タイプの違いによって復旧状況がどう変わるかを検討することにした。各被災リンクに与える復旧優先順位としては、たとえば、被害の大きい順、被害の小さい順、平常時交通量の多い順、交通容量の大きい順、復旧時点ごとの混雑率の高い順などが考えられる。実際に採用した復旧戦略については4.(2)で示す。このような復旧モデルには、①事前計画で決定できるもの、②震後の状況の把握の後に決定できるもの、③復旧の進展に応じて時系列的に検討しなければならないものが含まれる。

復旧段階ごとに作業班を配置するのに必要な被災箇所が多いときには、投入できる復旧班を吟味しながら、優先順位に応じて、時系列的に復旧班をはりつけていく。ただし、2.(4)で述べた仮定により、優先順位が上位であっても、作業班の配置が行えないようなリンクが存在することもある。

(6) 復旧度の評価

ネットワークの構造的な被害と機能的な被害は一般には一致しない。システム全体の構造的な被害の程度が同一であっても、ネットワークの機能にはほとんど影響しない場合もあれば、機能に致命的なダメージを与える場合も存在する。したがって、復旧がどこまで進んでいるかを知るためには、構造的な復旧度と機能的な復旧度を評価しておく必要がある。

ここでは、構造的な復旧度を、未復旧の被災箇所数や被災リンク数によって評価することにした。一方、機能的な復旧度は、対象道路網に交通量配分を行った結果に基づいて考えた。

ところで、交通量配分ではトリップの起点 (O) と終点 (D) との間の最も適当な経路を選択し、道路網の各リンクの交通量を求めることができる。交通工学の分野ではいくつかの理論が開発されている⁸⁾。本研究では、主に計算時間の都合上、分割配分法を採用した。この方法では所与のOD交通量を n 等分し、OD間の最短時間経路に配分していき、そのつど速度・所要時間を修正するという繰返し計算を行う。本研究では $n=10$ とし、最短経路の探索にはダイクストラ法を用いた。ただし、復旧の初期段階において、OD間に通行可能なパスが存在しない場合には、そのOD交通量の発生は抑制されると考えて、配分の対象から除くことにした。

機能評価の指標としては、次の3つを考えた。

① 総交通量の平常時からの減少量 ΔQ

総交通量はOD表 (ノード i とノード l 間の交通量 t_{il}) から計算できる。道路網の被害が大きいときには、被災リンク上の非導通箇所 (被害レベル2の通行止) に

より、ネットワークが複数のノードを含むゾーンに分断され、いくつかの孤立地区が出現する。この場合、ゾーン内では復旧班や車の移動が可能だが、異なるゾーン間での通行はできない。

いま、ノード i が含まれる分断ゾーンの番号を m_i とする。そのとき、 ΔQ は次式で示される。

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^M \sum_{l=i+1}^M (1 - \delta_{m_i m_l}) t_{il} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 δ_{ab} はクロネッカー・デルタ記号である。平常時には常に $\delta_{m_i m_i} = 1$ となる。

復旧の進展とともに、非導通リンクあるいは分断ゾーンの数は減少する。導通リンク数が増え、各ノードがすべて連結された時点で、 ΔQ は 0 となる。この指標は啓開作業の期間中にのみ用いることが可能である。

② 平均走行時間 \bar{T}

各リンクの長さ (L_j) と Q - V 条件が与えられれば、 \bar{T} は次式によって評価される。

$$\bar{T} = \frac{\sum_{j=1}^N T_j Q_j}{\sum_{j=1}^N Q_j} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$T_j = \frac{L_j}{V_j} \dots\dots\dots (8)$$

$$V_j = \begin{cases} V_{\max,j} - b_j Q_j & (Q_j \leq Q_{\max,j}) \\ V_{\min,j} & (Q_j > Q_{\max,j}) ; LL_j = 0 \\ \frac{V_{\max,j} + V_{\min,j}}{2} - b_j Q_j \left(Q_j \leq \frac{Q_{\max,j}}{2} \right) & \\ V_{\min,j} & \left(Q_j > \frac{Q_{\max,j}}{2} \right) ; LL_j = 1 \\ 0 & ; LL_j = 2 \end{cases} \dots\dots\dots (9.a)$$

$$b_j = \frac{V_{\max,j} - V_{\min,j}}{Q_{\max,j}} \dots\dots\dots (9.b)$$

道路網の分断が解消され、連結性が保証された時点 ($\Delta Q = 0$) 以降、平均走行時間 \bar{T} はしだいに減減し、平常時の \bar{T} に戻る。したがって、この指標は、主に啓開作業後の復旧復興作業の期間において威力を発揮するであろう。

③ 換算交通量損失 $\Delta Q \bar{T}$

本研究では、換算交通量損失 $\Delta Q \bar{T}$ という指標を定義し、次式で表示した。

$$\Delta Q \bar{T} = \Delta Q + w \Delta \bar{T} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $\Delta \bar{T}$ は平均走行時間の平常時からの増加量である。 w は ΔQ と $\Delta \bar{T}$ を関連づける重み係数である。

いま、総交通量の単位減少量当たりの経済的損失を c_1 、平均走行時間の単位増加量当たりの経済的損失を c_2 とすれば、各復旧時点ごとの経済的損失 E は次式で

表わせる。

$$E = c_1 \Delta Q + c_2 \Delta \bar{T} \dots\dots\dots (11)$$

上式を c_1 で割れば、

$$\frac{E}{c_1} = \Delta Q + \frac{c_2}{c_1} \Delta \bar{T} \dots\dots\dots (12)$$

となる。このとき、 $\frac{E}{c_1} = \Delta Q \bar{T}$ 、 $\frac{c_2}{c_1} = w$ とすると、式 (10) が得られる。式 (10) は、式 (11) のような経済的な効果を捉えようとしたものである。

この指標は、上記①と②の指標の利点をミックスしたものである。啓開作業と復旧復興作業の全復旧作業の期間を通して、 $\Delta Q \bar{T}$ は地震直後からしだいに減り、復旧完了時点で 0 になる。

(7) 復旧シミュレーションのフロー

被災ネットワークに対する復旧シミュレーションの計算ステップは、次のように構成される。

① 復旧シミュレーションに必要な入力データは以下のとおりである。

- i) ネットワーク特性と被害データ
リンクとノードの数、各リンクの端点ノード番号・長さ・構成セグメント数、被災シミュレーションから得られた各セグメントの被害レベル LS_{jk}
- ii) 交通量配分のデータ
OD 表と各リンクの Q - V 条件
- iii) 復旧データ
被災セグメントの復旧時間 (TR_{jk}^l ($l=1, 2$)), 復旧優先順位を決める復旧方針と復旧拠点ノードの指定、各復旧拠点ノードに対する復旧作業班の数

② 式 (2) と (3) により、被災リンクの被害レベルと交通容量を求める。

③ 各リンクの機能状態は、計算フローの 2 回目のサイクル以降について計算する。まず、全被災リンクと非導通リンクの総数や全被災箇所数と通行止箇所数を求める。また、式 (6)、(7) と (10) から ΔQ 、 \bar{T} と $\Delta Q \bar{T}$ の機能評価を行い、前回のサイクルの機能状態との比較をする。機能状態の変化したリンクが存在しなければ、次のステップの④と⑤を省略する。

④ 被災リンクの通行止箇所数により、あるゾーンが孤立することなく隣接するゾーンと道路による連結性を保持されているかどうかをチェックする。すなわち、ネットワークの分断状態を判定する。この段階では、分断ゾーンの総数と各分断ゾーンに属するノード番号が得られる。

⑤ 最短時間経路探索にダイクストラ法を用いて、分割配分法によって交通量配分を行う。

⑥ 各分断ゾーン内の復旧拠点ノードの作業班数を求

める。

⑦ 各分断ゾーンの被災箇所（被害レベルが1または2のセグメント）をチェックする。

⑧ 優先順位を決定する指標を、たとえばリンク交通量などに基づいて計算する。

⑨ 各リンクの指標の値の大小の順にリンクのランキングを付ける。

⑩ 優先順位の高い被災リンクから被害レベル2のセグメントに作業班を割り当てていき、なお作業班数に余裕があるときには被害レベル1の被災セグメントに残りの作業班を配分する。

⑪ 作業班を配分する被災セグメントがなくなれば、復旧シミュレーションの計算を終える。

⑫ Δt だけ時間ステップを進め、被災セグメントの復旧作業を実施する。

⑬ 復旧作業の進捗により、通行止が解除されて片側通行が可能になったり、完全に復旧した被災箇所があれば②のステップへ、その他は⑩のステップへ戻る。

3. 被災シミュレーションの適用例

2. で提案した復旧シミュレーション法を適用するためには被災道路網のデータが必要である。ここではこのデータを得るために、被災シミュレーションを実施することを試みた。

(1) 対象とした道路網

シミュレーションは伊豆半島の道路網を対象にして実施した。これは、1978年伊豆大島近海地震時の道路の被害・復旧の特徴^{6),7),9),10)}からして、本研究で提案したシミュレーション法を適用するのに適切と考えられるからである。

伊豆半島の道路網は、図-3のようなモデルに簡略化した。モデル化にあたっては道路地図¹¹⁾を参照した。ノード数は25、リンク数は38である。国道135号はリンク35-19-15-10に対応し、ノード21の伊東市とノード4の下田市を結んでいる。また、国道136号はリンク5-3-4-8-12-27-26-25-33のルートに相当する。その他、主要地方道、県道や有料道路が山間部を通過している。

各リンクの長さは道路地図から求め、セグメントは1 kmごとに1つ設けた。なお、セグメント長のとり方が、後述の復旧シミュレーションの結果に影響を与えることはない。国道135号・136号と伊豆スカイライン沿いのリンク34-21-18のルートの Q_{max} は1200(台/時)、 V_{max} は60(km/時)とした。その他の道路の Q_{max} と V_{max} は小さめに、 $Q_{max}=1000$ (台/時)、 $V_{max}=50$ (km/時)とした。なお、すべての道路について、 V_{min} は5(km/時)とした。

(2) シミュレーションの前提条件

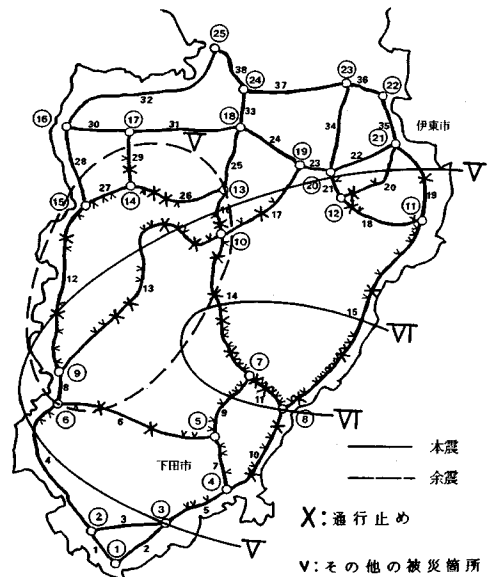


図-3 対象とした道路網と被災シミュレーション結果

a) 想定地震

村井ら¹⁰⁾は、伊豆大島近海地震の発生後に現地調査とアンケート調査を行い、本震と余震の震度の分布を明らかにしている。本研究では、伊豆大島近海地震が再び同じ場所で起こるとして、村井らの震度分布をもとに、図-3のようなモデル地震を想定した。伊豆大島近海地震の本震と余震の発生時には約19時間の差があったが、ここでは2つの地震がほとんど同時に発生するとした。

b) 被害モード

被災箇所の復旧所要時間はその被害の内容と程度によって決まる。道路被害は主に斜面に関するものであった。そこで、被害モードとして、次の2つを仮定した。

被害モード1：路面上方の斜面からの崩土・落石による被害

被害モード2：路面の段差・クラック・陥没による被害

また、各被害モードに対して、通行止は被害レベル2、片側通行は被害レベル1とした。なお、被害モードを1と2の2つに明確に分けることは困難かもしれないし、1と2の混合型が生起することが考えられる。しかしながら、ここでは問題をできるだけ単純化することとした。

c) 被害確率マトリックスの設定

被害確率は、伊豆大島近海地震時の道路網の被害事例を参考にして、震度別および被害モード・被害レベル別に被害確率マトリックスとして整理した。

震度VIの被災地域としては、国道135号、修善寺下田線、湯ヶ野谷津線の当刻区間について検討した。各路線の被災箇所数は、おのおの18、54、6であった⁷⁾。当刻

区間の総延長は 32.5 km であるので、1 km 当たりの被災箇所数は 2.4 となる。被害の発生はポアソン過程に従うと仮定すると、単位長さ当たりの被害確率は $0.91 (= 1 - e^{-2.4})$ となる。一方、被害モード 1 と被害モード 2 の被災発生箇所数の比率は、東伊豆海岸道路沿いの被害分布とその要因（文献 10）の第 6 図）および修善寺下田線のそれ（文献 9）の第 3 図）から、それらの数を列挙して求めた。それらの比率はおよそ 0.65 : 0.35 であった。その結果、被災箇所数 78 のうち、被害モード 1 の箇所数は 51、被害モード 2 の数は 27 と推定できる。また、3 つの路線当刻区間の通行止は 10 か所であり、そのうち 8 か所は被害モード 1 に相当し、2 か所は被害モード 2 に対応するものであった⁷⁾。通行止以外の被災箇所は被害レベル 1 と仮定した。このようにして、各被害モード・被害レベル別に被災箇所数の割合を定め、0.91 に乗じることにより、各被害モード・被害レベル別の被害確率を求めた。

震度 V の被災地域は、主に、国道 136 号線の天城湯ヶ島町から松崎町までの区間および下田松崎線であった。延長 64.5 km の被災箇所数は 20 で、そのうち被害モード 1 に相当する通行止箇所数は 6 であった⁷⁾。結果として、被害モード 1 の被害レベル 1 と 2 の被害数は 7 と 6、モード 2 については 7 と 0 と推定した。これより、上記と同様にして、各被害モード・被害レベル別の被害確率を求めた。

震度 IV の地域は無被害とした。

表一は、被害確率マトリックスをまとめて示したものである。なお、表中には無被害（被害レベル 0）の確率も併記している。

(3) 被災シミュレーションの結果

まず、図一3の震度分布から、各リンクの各セグメントに関する震度の情報が得られる。次に、各セグメントごとに 0 から 1 の間の一様乱数を発生させる。その結果と表一の被害確率マトリックスとの対比により、各リンクの構成セグメントの被害モードと被害レベルが決められる。乱数の初期値を変え、多数回のシミュレーションを実施し、異なる被災ネットワークを作成した。そのうちの代表的な被災ネットワークを示したのが図一3である。図中、×は通行止箇所を、∨はその他の被災箇所を示している。

伊豆大島近海地震時の道路被害の特徴の 1 つには、急

斜面上の地震に弱い道路区間と烈震地域（震度 VI）が一致したため、被害がそこに集中したという点が挙げられる。強震地域（震度 V）においても、被害箇所に地域的な片寄りがみられた。これは、被害発生が地震動の強度のみならず、道路条件に大きく依存していることを示している。本シミュレーションではこのようなリンク特性の相違を考慮していない。したがって、伊豆大島近海地震時の特に震度 V の地域と比べると、被害の分布が少し異なっている。

なお、図一3の被害分布より、地震直後の孤立した地域は 5 つのゾーンに分断されることがわかる。分断ゾーン [1] はノードの 1~6 と 7, 9 を、分断ゾーン [2] はノード 8 を、[3] はノード 10 を、[4] はノード 11 を、分断ゾーン [5] はノードの 12~25 を含んでいる。このように、通行止箇所の出現により、伊豆半島の南部地域は孤立してしまっている。

4. 復旧シミュレーションの実行

(1) OD 交通量

震災後と平常時の OD 交通量はかなり異なることが考えられる。伊豆半島では特に観光目的の交通が多いが、震後の交通量は激減すると予想される。一方で、復旧活動などに伴う緊急目的の交通が新たに発生するであろう。復旧段階における交通量配分にあたっては、復旧時点における OD 交通量を用いることが望ましい。しかし、このような OD 交通量を知ることは難しい。本シミュレーションの交通量配分の目的はネットワークの機能的な復旧度を明らかにすることである。したがって、平常時の OD 交通量を用いてネットワーク特性を知ることには意味があると考えられる。そこで、交通量配分は平常時 OD 交通量を用いて実施することにした。

平常時交通量は次の手順で推定した。

① 図一3のネットワークの各ノード間のリンクの中心点を境界とするようなノードゾーンを設定する。各市町村は複数のノードゾーンに分割する。各ゾーンの面積比、市内・市外地の人口密度比などから、その比を各市町村人口（昭和 56 年度統計量⁴⁾に掛け合わせて、ノードゾーン内の人口を求めた。

② 各ノードの発生吸引交通量は、ノードゾーン内人口に比例すると仮定し、次式によって推定した¹¹⁾。

$$\begin{aligned}
 &= (\text{各ノードゾーンのピーク 1 時間当たり発生吸引交通量}) \\
 &= (\text{各ノードゾーンの人口}, a_1) \\
 &\quad \times (\text{自動車保有率}, a_2) \\
 &\quad \times (\text{1 日 1 台当たりの発生トリップ数}, a_3) \\
 &\quad \times (\text{ピーク時の 1 日交通量に対する比率}, a_4) \\
 &\quad \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

表一 被害確率マトリックス

被害レベル 震度	0	被害モード = 1		被害モード = 2	
		1	2	1	2
IV	1.0	0	0	0	0
V	0.72	0.10	0.08	0.10	0
VI	0.10	0.50	0.09	0.29	0.02

注 1) 埼玉大学工学部の川上英二氏との私信による。

ただし、 $a_2=0.343$ (台/人)、 $a_3=5$ (トリップ/台・日)、 $a_4=1/12$ (時/日)とした。

③ ②で求めた発生吸引交通量から、各 OD 交通量は重力モデル式によって計算した。

$$t_{il} = k \frac{T_i^a U_l^b}{r_{il}^c} \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 T_i 、 U_l 、 r_{il} 、 t_{il} は、おのおのノード i の発生交通量、ノード l の吸引交通量、ノード il 間の距離、ノード il 間の交通量である。ここで、 $a=b=1$ 、 $c=1.5$ 、 $k=0.02$ とした。

④ フレータ法で収束計算を行い、 $\sum_{l=1}^M t_{il}$ と T_i 、 $\sum_{l=1}^M t_{il}$ と U_l が一致するように修正した。

⑤ 分割配分法を用いてリンク交通量を求めた。

⑥ 伊豆地方道路交通量観測図から得られたリンク交通量(文献7)の図4-1)と本結果を比較し、発生吸引交通量に適当な値を掛けて補正した。

⑦ 実測のリンク交通量と計算値がおおよそ一致するまで、③~⑥の手順を繰り返した。

(2) 復旧条件および復旧戦略

図-3の被災ネットワークに対し、各被災箇所ごとに被害モードと被害レベルに応じて、復旧所要時間を決めなければならない。本研究では既往の震災事例の復旧期間⁶⁾を参考にして、被害モード・被害レベル別の復旧期間の上・下限を設定した。表-2は、啓開作業と復旧復興作業の期間の範囲を示したものである。これより、モンテカルロシミュレーションにより、被災箇所の被害特性に応じて、 TR_{jk}^i ($l=1, 2$)を決めた。なお、簡単のため、作業班の移動 Loss は特に考えなかった。

一般的には、被害レベルが大きければ、復旧所要日数も多いという関係がある。被害モード1では、被害があっても、復旧は比較的短時間でできるということが考えられる。一方、被害モード2では、いったん被害が発生すれば、復旧にかなりの時間を要する場合がある。なお、表中の最下欄において、上・下限とも0日としているのは、被害モード2・被害レベル2のセグメントの復旧が、図-2(b)のパターンで行われることを意味する。

次に、復旧拠点ノードについて検討した。図-3の被災ネットワークをみると、伊東市(ノード21)は北側の沼津・熱海方面からの資材供給に全く支障のない位置にある。半島の中部から南部にかけての道路は至る所

寸断されている。下田市(ノード4)は人口も多く、また海上からの資材の供給も可能な場所に位置している。以上のことより、復旧拠点ノードとしては21と4を考えた。

各復旧拠点ノードから派遣される復旧作業班について考えてみた。被災状況が把握されるにつれ、他地域からの応援隊が到着することで、仮復旧の終了時点にもなると、作業班は十分な数に達するであろう。本シミュレーションでは、作業班数の時間的な変化を扱うことが可能である。しかし、ここでは作業班の増援の状況を特に考えず、作業班の数は限定した。そして、異なる復旧戦略が復旧過程に及ぼす影響を調べるため、2つの復旧拠点ノードの作業班はおのおの3班に設定した。

被災リンクの復旧優先順位を決める復旧戦略としては、次の7つの方針を考えた。ただし、2.(4)で述べたように、作業班の配分法の仮定①~③を考慮する必要がある。

- 復旧方針1：復旧時間の短い順
- 復旧方針2：復旧時間の長い順
- 復旧方針3：平常時のリンク交通量の多い順
- 復旧方針4：復旧時点ごとのリンク交通量の多い順、ただし非導通リンクについては平常時リンク交通量の多い順
- 復旧方針5：(平常時リンク交通量/総復旧時間)の大きい順
- 復旧方針6：リンク交通容量の大きい順、ただし交通容量の同じリンクが存在するときは平常時リンク交通量の多い順
- 復旧方針7：孤立ノードを含む分断ゾーンの解消時点までは復旧方針1を、解消後は復旧方針3を採用した混合戦略

ここで、復旧時間とは、非導通リンクに対しては導通に要する時間 $\sum_{k=1}^{n(i)} TR_{jk}^i$ を、その他のリンクに対しては完全に復旧するのに要する時間 $\sum_{k=1}^{n(i)} TR_{jk}^i$ を意味する。総復旧時間は $\sum_{k=1}^{n(i)} (TR_{jk}^i + TR_{jk}^i)$ より求める。

復旧シミュレーションは、地震直後から復旧完了まで0.1日ごとに実施した。

(3) 計算結果および考察

図-4は、復旧方針の違いが構造的な復旧度に及ぼす影響を調べたものである。図中には、全被災リンク数、非導通リンク数、全被災箇所数と通行止箇所数の時系列変化を示している。どの復旧方針を採用しても、復旧の完了には50日前後を要している。

復旧方針は被災(通行止)箇所数にほとんど影響していない。復旧方針2を採用すれば、全被災箇所数の減少率は他の方針に比べて小さくなっている。復旧の初期段階において、復旧方針1による通行止箇所数は多少早く

表-2 復旧シミュレーションで用いた復旧作業の期間

被害モード	被害レベル		下限(日)	上限(日)
1	1	TR_{jk}^i	0	1
		TR_{jk}^i	0	5
	2	TR_{jk}^i	1	4
2	1	TR_{jk}^i	1	5
		TR_{jk}^i	5	20
	2	TR_{jk}^i	0	0

減少している。一方、全被災（非導通）リンク数の復旧過程をみると、復旧方針の相違が如実に現われている。これは、リンクが複数のセグメントの直列系により構成されているからである。復旧方針1と2は、復旧所要時間が短い被災リンクから復旧を進めていくのと逆に長い被災リンクから復旧させるというように、両極端な復旧対策となっている。この復旧時間は被害の大小関係を表わすものである。

復旧方針1あるいは5が効率的であり、復旧方針2は好ましくない復旧対策といえる。復旧所要時間の長いすなわち被害の大きい箇所から復旧を進めると、復旧から取り残された地区が多く生じてしまうからである。マンパワーが十分であれば、この点は解消されるであろう。復旧方針1, 2, 5以外の他の方針によると、全被災リンク数の復旧過程はほぼ同じである。ただ、非導通リンク数の減少過程の違いは認められる。

図-5は、総交通量の平常時から減少量 ΔQ 、平均走行時間 \bar{T} と換算交通量損失 $\Delta Q \bar{T}$ を示したものである。ただし、式(10)の重み係数 w は400(台/時/時)とした。

ΔQ が早期に0となるのは復旧方針5のケースであることがわかる。この方針では、回復交通量の最大を指向することを意図している。一方、 ΔQ の時間変化率からみれば、復旧方針の1や7の良さも見逃せない。 ΔQ はノード相互の連結性（孤立性）を表現したものである。復旧方針の1や5はなるべく早期に非導通リンクをなくすことを目指した戦略である。ノード間の連結性の回復を考えるならば、これらの戦略は有効であろう。復旧方針2は、機能面からみても、最悪の方針となっている。

次に、 \bar{T} の過程について検討した。図中、総交通量が平常時の水準（すなわち $\Delta Q=0$ ）に回復した時点 t_0 以降の状態が主に注目されることである。 t_0 から10

日程度の期間で、復旧方針の差が現われている。 t_0 以降の復旧の初期段階では復旧方針1, 5, 6, 7が有利である。しかし、復旧方針3と4はその後の急速な回復状況をもたらし、15~22日の時期では復旧方針1などよりも優れている。復旧方針3や4は交通機能の面からみて有利な復旧を行おうと意図したものである。したがって、この時期において、交通機能を無視した復旧方針1との差が強調されたものといえる。しかし、復旧方針3や4は機能のより速い回復を指向しているにもかかわらず、総体的にみて、復旧方針1などに比べて特に勝っているとはいえない。これは、交通量のみを基準としても効果的な復旧が得られるとは限らないことを示唆するものである。

$\Delta Q \bar{T}$ をみると、復旧方針2を除いた他の方針による違いはそれほど目立たない。このことは、機能的な単一の指標で復旧戦略の相違を評価することに無理があることを示すものといえよう。したがって、本ケーススタディのような場合、ここで提案したように、復旧の初期段階（孤立地区の解消時期まで）は ΔQ で、その後は \bar{T} で評価するというように、多機能多段階評価をすることが望ましい。

図-6には、復旧方針1に対する啓開作業と復旧復興作業の期間を非導通リンクとその他の被災リンクに区別して示した。図よりわかるように、復旧所要時間の短いリンクなかでも非導通リンクを最優先させる復旧戦略は的確に実行されている。被害モード・被害レベル別に2つの復旧作業が進展しており、被災リンクのランキングを設ける意義が認められる。本結果は、図上演習の状況と一致しており、ここで利用した復旧シミュレーション

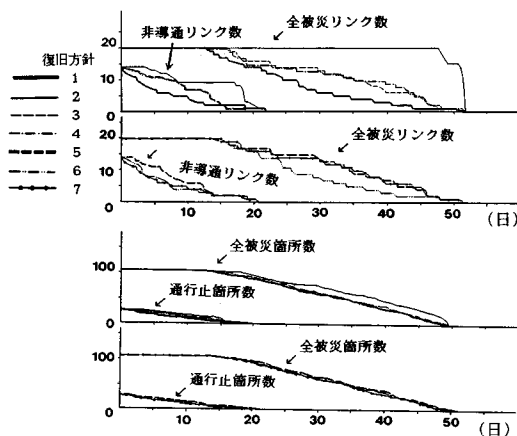


図-4 各種の復旧方針が構造的な復旧度に及ぼす影響

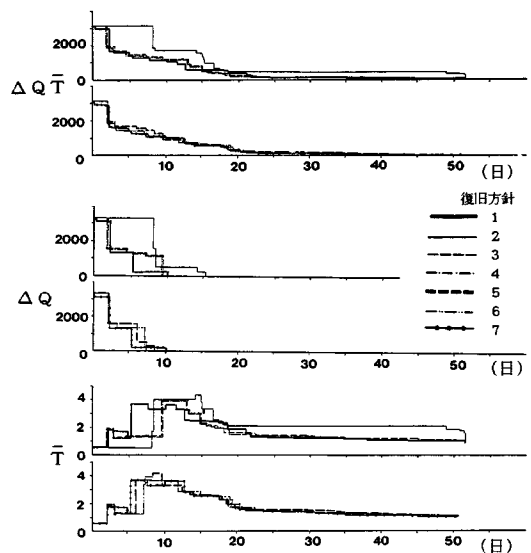
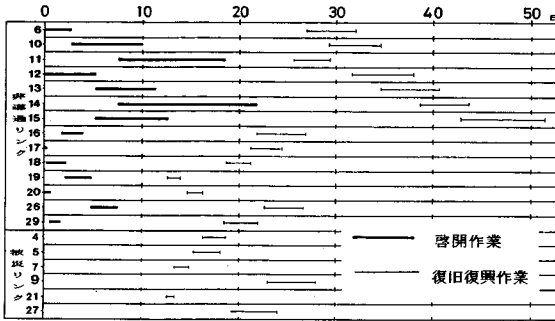


図-5 各種の復旧方針が機能的な復旧度に及ぼす影響



図—6 復旧方針1に対する啓開作業と復旧復興作業の期間

モデルが有効性をもっていることを示している。

5. あとがき

本研究で提案した方法論の基本的な考え方と、数値計算例から得られた主な結果は、次のようにまとめられる。

(1) 今回開発したシミュレーションモデルは、被害発生モデルと復旧モデルの2つのサブモデルからなっている。道路上の各施設は、震度・被害モード・被害レベル別の被害確率マトリックスによって、確率的に被害を発生させることができる。復旧モデルは、復旧作業班をどのように配分し、どの被災箇所から復旧していくかを予測しようとするモデルである。後者の過程は現実にはきわめて複雑な意思決定過程であるが、ここではいくつかの単純なタイプを考えた。

(2) 復旧作業としては、ネットワークの孤立地区の解消を目指して連結性に重点を置いた啓開作業と交通量の円滑な処理を果たすための復旧復興作業の2つを設定した。復旧作業班は各作業の目的に応じて配分した。被災リンクの優先順位を決める復旧方針としては具体的に7つを考えた。

(3) 復旧度は構造的と機能的な指標で評価した。前者では被災箇所数・通行止箇所数・被災リンク数・非導通リンク数を求めた。後者の指標としては、総交通量の平常時からの減少量、平均走行時間と換算交通量損失を定義した。復旧の進展に応じて、これらの指標が復旧方針によってどのように変化するかを定量的に調べた。

(4) 2. で提示した復旧シミュレーションのアルゴリズムの有用性を調べるため、伊豆半島の道路網に適用した。被害想定としては、1978年伊豆大島近海地震のデータを反映させたシミュレーションを実施した。さらに、交通量のデータなどは現実的な値を採用した。各種の復旧方針が(3)で定義した構造的および機能的な指標やリンク交通量の復旧過程に及ぼす影響を検討した。

(5) その結果、①できる限り早期に平常時機能の回復を指向することを考えるならば、復旧時間の長い被災リンクから作業に取りかかることは好ましくない、②道路網の孤立地区を含む断片ゾーンの解消時期までは総交通量の減少量によって、それ以降の復旧期は平均走行時間によって評価できる、③したがって、復旧方針としては構造的被害に関与した物理量（たとえば復旧時間）からリンク交通量のような機能に基づくものに時系列的に変化させた混合戦略をとることが望ましい、ことなどがわかった。

なお、シミュレーション結果と実問題における既往の震災事例を直接的に比較することは、本論文の目的とするところではない。むしろ、比較のときに問題となるのは、シミュレーションの手法をどのように改良すべきかという点である。過去における実地震時の復旧過程の問題点を明らかにしたり、具体的にある被災箇所をどのように復旧すれば復旧完成までの時間がどのくらい改善されたかなどの点については、シミュレーション手法の改良の後に論じられるべきものと考えられる。このような問題に関してはさらに研究を実施中であるので、その結果については別途発表の予定である。

参考文献

- 1) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，第327号，pp.1~12，1982年11月。
- 2) 総合研究開発機構：都市機能の複合化と防災性に関する研究—宮城県沖地震を事例として—，第6章 道路交通機能，pp.211~265，NRC-80-4，昭和57年5月。
- 3) 山田善一・家村浩和・野田 茂・伊津野和行：道路交通網の最適な震後復旧過程の評価，土木学会論文集，第368号/I-5，pp.355~362，1986年4月。
- 4) 岩崎敏男・大日方尚巳・後藤勝志：地震後の道路交通機能の評価手法，土研資料第2128号，昭和59年3月。
- 5) 静岡県：震災時総合輸送体系調査報告書，昭和60年3月。
- 6) 岩崎敏男・中島威夫・後藤勝志：既往地震における震後の交通確保に関する調査，土研資料第1854号，昭和57年7月。
- 7) 日本道路協会：道路の震災対策に関する調査報告（I）—1978年伊豆大島近海地震災害—，昭和54年3月。
- 8) 佐佐木綱：都市交通計画（第2版），国民科学社，昭和58年1月。
- 9) 恒石幸正・伊藤谷生・狩野謙一：岩盤強度の低下による道路災害—1978年伊豆大島近海地震の被害—，地震研究所彙報，Vol.53，pp.1069~1084，1978。
- 10) 村井 勇・角田信子・辻村芳子：1978年伊豆大島近海地震の被害・震度と地震断層，地震研究所彙報，Vol.53，pp.1025~1068，1978。
- 11) 昭文社：昭文社のレジャーガイド伊豆，昭和60年5月。
(1987.7.28・受付)