

論文

盛岡市域における震度推定式作成の試み —ボーリング資料に基づく解析—

山本英和*・濱田泰治**・斎藤徳美*

Derivation of Empirical Seismic Intensity Equations for Morioka Area

— Analysis Based on Borehole Data —

Hidekazu YAMAMOTO*, Taiji HAMADA** and Tokumi SAITO*

Abstract

In seismic micro-zoning, it is necessary to know ground vibration characteristics in each local area. Empirical equations proposal of seismic intensity in Morioka area was based on borehole data using multi-variable regression analysis. In boring model, the equation was derived by N-value and water level obtained from borehole data. In ground information model, S-wave velocity and S-wave amplification were used in the equation in addition to the parameters used in the first model. Two data sets were sampled using a 250m square mesh and sampling at a point where both questionnaire seismic intensity and borehole were examined. The former method is called mesh model and the latter close-point model.

The results were as follows:

- (1) Close-point model shows higher correlation coefficient than mesh model. This suggests that vibration characteristics vary in area smaller than 250 m×250 m mesh.
- (2) Ground information model gives higher correlation coefficient than boring model. However, the model has only three principal components, suggesting that the equation has too many predictor variables.
- (3) Four variables namely: ground water level, averaged S-wave velocity between 0 and 5 m in depth, S-wave amplification and its pre-dominant frequency are selected in derivation of the equation of seismic intensity using AIC test.

キーワード：サイスミックマイクロゾーニング, アンケート震度, 重回帰分析, 主成分分析, ボーリング資料, AIC

Key words: seismic microzoning, questionnaire seismic intensity, multi-variable regression analysis, principal component analysis, borehole data, AIC.

* 岩手大学工学部建設環境工学科
Department of civil and environmental engineering,
Faculty of Engineering, Iwate University

** 川崎地質(株)
Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd

本論文に対する討論は平成9年6月末日まで受け付ける。

1. はじめに

Seismic microzoning において、地震時の地盤の振動特性を把握する研究には2通りの手法がある。1つは、理論計算による方法、例えば、成層または不整形地盤の振動応答特性を直接解析する方法、もう1つは、実験的手法、つまり、振動特性を直接表していると考えられる震度を調査することである。理論的に振動特性を計算する場合、計算手法はほぼ確立されているが、地盤構造を正確に把握する必要があり microzoning に対しては現実的な手法とは言えない。一方、実験的手法の一つ、アンケート方式による詳細震度調査では、太田ら(1979)の手法がいろいろな地域、いろいろな地震に対し適用され多くの成果が報告されている(例えば、北海道地区自然災害科学資料センター, 1988)。

こうして得られる詳細震度は、表層地盤構造に強く依存する。都市の地震防災を考える上で、この関係を明らかにするためのいくつかの研究(例えば、野越, 1989, 岡田ら, 1985)が試みられている。野越(1989)は、秋田県全域、市域の詳細震度分布と地形・地質の総合的解析を行っているが、震度差を直接予測する立場では定量的な評価といがたい。一方、岡田ら(1985)は、札幌市における詳細震度分布に基づいて地域内震度予測式を提唱しているが、説明変数が表層地質分類と軟弱層厚のみしか用いていない。表層地盤により震度がどのように影響を受けるのかを把握するには、これら2つの解析法の長所を取り入れた手法が最善であると考えられる。つまり、比較的入手しやすい資料から地域ごとの詳細震度を予測する立場をとることとする。

本研究では、震度が表層地盤の特性にどのように依存するかを明らかにすることを目的とし、ボーリング資料を用いた重回帰分析により、盛岡市域における震度推定式を作成する。振動特性を表す指標として、アンケート調査による盛岡市域の詳細震度分布(斎藤ら, 1989)を使用する。この方法では震度の絶対値を推定することは不可能であるが、表層地盤による振動特性の差異は相対震度が推定されれば十分である。すでに、斎藤ら

(1989)では、盛岡市域における500 mメッシュごとの詳細震度分布が明らかにされ、表層地質とのよい相関が報告されている。一方、簡便に地盤構造を表す指標として、建設基盤調査用のボーリング資料を使用する。弾性波探査等の実施に制約を受ける都市部においても、この資料は比較的容易に入手可能である。

また、このような重回帰分析に基づく推定式の作成方法では、目的変数を予測する際の説明変数の選択の仕方が問題となる。本研究のもう一つの目的として、この説明変数の選択を客観的に行うために、赤池情報量基準(AIC: 赤池, 1976)を利用し、最適推定式を作成する。

2. 解析対象地域

本研究で調査対象とした地域は、岩手県盛岡市及び滝沢村を含む東西約13.6 km、南北約18.9 kmの範囲である。調査対象地域の位置関係をFig. 1に示す。この地域は北上山地と脊梁山地に挟まれた北上川流域の北上低地帯に位置している。

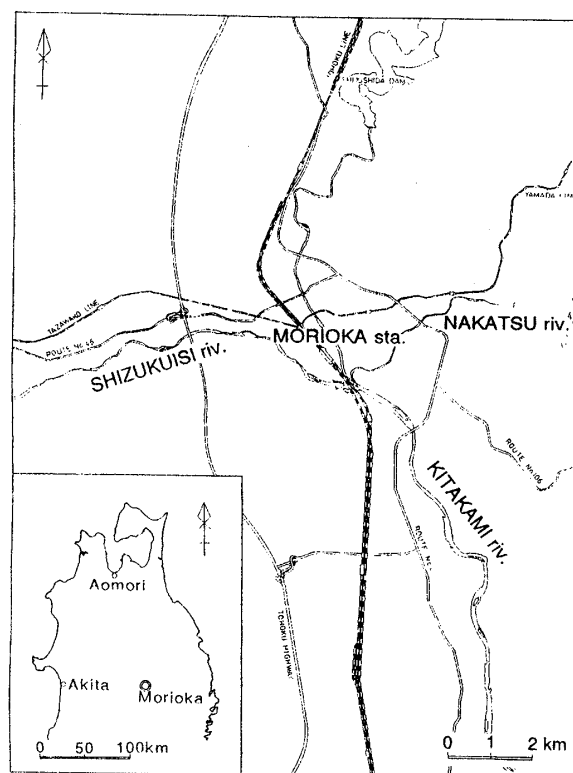


Fig. 1 Location map of Morioka area in Iwate Prefecture.

調査対象地域の地質の概略を Fig. 2 に示す (岩手県, 1978)。地域中央で北上川・雫石川・中津川が合流し、段丘地形が発達している。地域東側には花崗岩・シャールスタイン等の基盤が分布している。市中心部では地表近くに花崗岩が分布している。北西部では火山泥流堆積物が厚く分布している。南西部には砂礫層等からなる河岸平野堆積物が分布している。すなわち、本地域は十数 km 範囲内でも地質の変化が大きく、震度の表層地盤依存性を検討するのに適していると考えられる。

3. 解析に用いたデータ

本研究でもっとも基本となる資料は盛岡市域におけるアンケート調査による詳細震度分布である。アンケート調査は、1987 年岩手県中部沿岸地震 (M6.9) の際、岩手県内の小中学校の生徒・父兄を対象に行われた (斎藤ら, 1989)。調査には、太田ら (1979) によるアンケートを採用した。そのうち、本研究対象の盛岡市域では 4283 枚が回収された。平均震度は 4.1 である。盛岡市域における区域ごとの詳細震度差を把握するために 250 m メッシュごとの分布図を作成した。アンケートが 1 枚以上回収されているメッシュは 954 区画、3 枚以上回収されているメッシュは 423 区画である。各メッシュでの最大震度は 5.1、最小震度は 3.1 でありその変化は大きい。これは、盛岡市域が花崗岩、砂礫、火山泥流堆積物など区域ごとに地質条件が顕著に異なる (大上ら, 1977) ことを反映しているためと考えられる。Fig. 3 に 250 m メッシュごとの詳細震度分布図を示す。市域北西部では 4.4~4.7 と震度が大きい。盛岡駅東側の市中心部では、3.8~4.0 と平均より震度が小さい。大局的には、Fig. 2 と比べてわかるように、火山泥流堆積物の分布する北西部で震度が大きく、花崗岩等の岩盤が地表近くに分布する市中心部では震度が小さい傾向がある。ただし、隣り合うメッシュにおいても、Fig. 3 に示した震度差のランクが 2 段階も違う箇所が見受けられる場合もあり、局所的な地盤特性の違いも震度にかかわっていることが推測される。

ボーリング資料は、官庁・ボーリング会社の協力を得て、盛岡市域の 498 地点で収集されている。資料からは、地下水位、標準貫入試験による 1~2 m 間隔での N 値、土質区分などが得られる。ここで、N 値とは原位置における地盤の締めり具合の相対値を示す量で、建造物の支持基盤は N 値 50 を目安としている。つまり、建設基盤調査を目的とするボーリング資料は容易に収集可能である利点をもつ反面、N 値 50 に到達する深度までしか地盤情報が得られないという欠点も持つ。データの一例として、地表下 5 m までの平均 N 値分布を Fig. 4 に示す。この図から、ボーリング地点の分布は市域中心部に数多く、周辺部において少ないことがわかる。平均 N 値が 5 以下の著しく軟弱な地盤は市域北西部に主として分布する。一方、中心部から東部・南部一帯には平均 N 値 20 から 30 の比較的堅固な地盤が分布するのがわかる。この分布も盛岡市域の地質と調和的である。なお、地表下 10 m までの平均 N 値分布は 5 m までの場合より当然値は大きくなるが、分布の傾向は同様である。

4. 解析方法

本研究では、重回帰分析による震度推定式を作成する。説明変量をボーリング資料から得られる項目とし、目的変量を盛岡市域における 1987 年岩手県中部沿岸地震時のアンケート震度とした推定式を作成する。その際、項目の組み合わせにおいて考えられる限りの回帰式を作成する。それらの各回帰式について AIC (赤池情報量基準; 赤池, 1976) を計算し、AIC 最小モデルを最適モデルとする。ここで、AIC とは赤池 (1976) により提案された尺度で、複数のモデルの中から最適なモデルを選び出すとき、客観的な判断をあたえてくれる。また、情報の重複を避けるためのもう一つの解析として、すべての項目に対し主成分分析を行い、寄与率の高い主成分の個数を求め、重回帰式で選ばれたモデルの項目の個数と比較・検討を行う。具体的には累積寄与率が 80% 以上に相当する主成分の個数を標本の持つ情報量と考える。本手法の流れを Fig. 5 に示し、解析に用いた説明変量

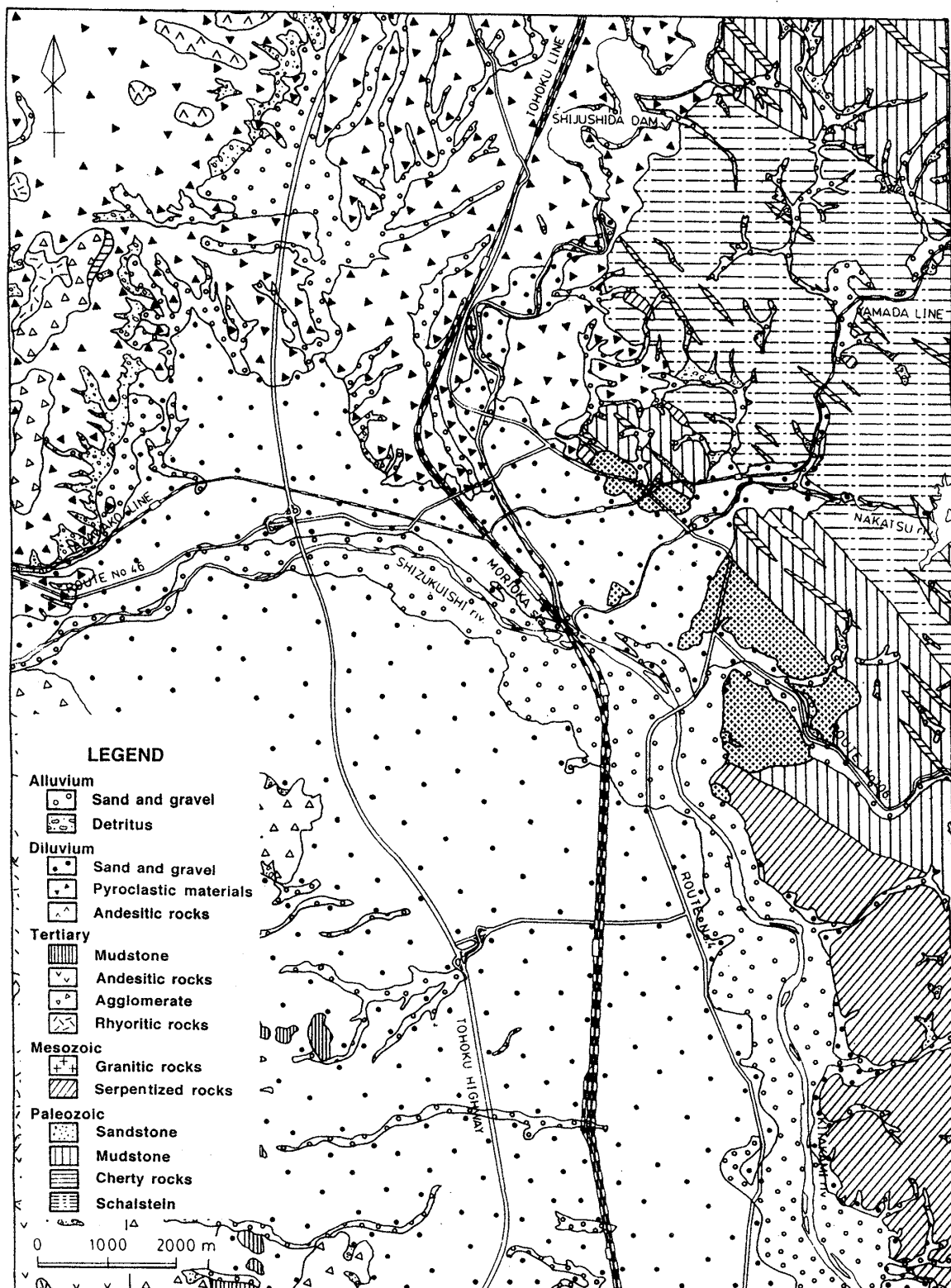


Fig. 2 Geological map of Morioka area in Iwate Prefecture [after Iwate prefecture, 1978].

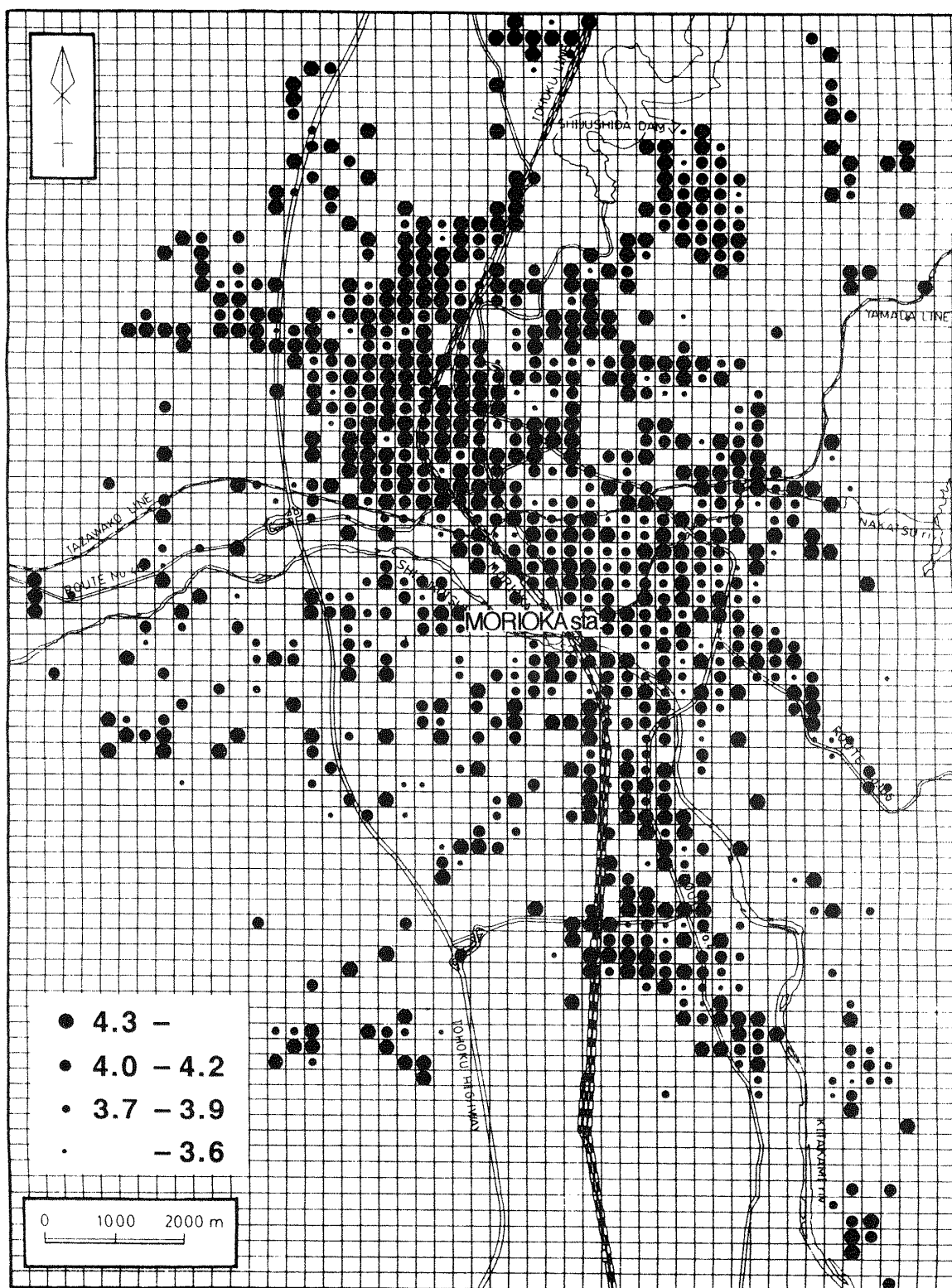


Fig. 3 Precise distribution of questionnaire seismic intensities at 250 m × 250 m meshes in Morioka area.

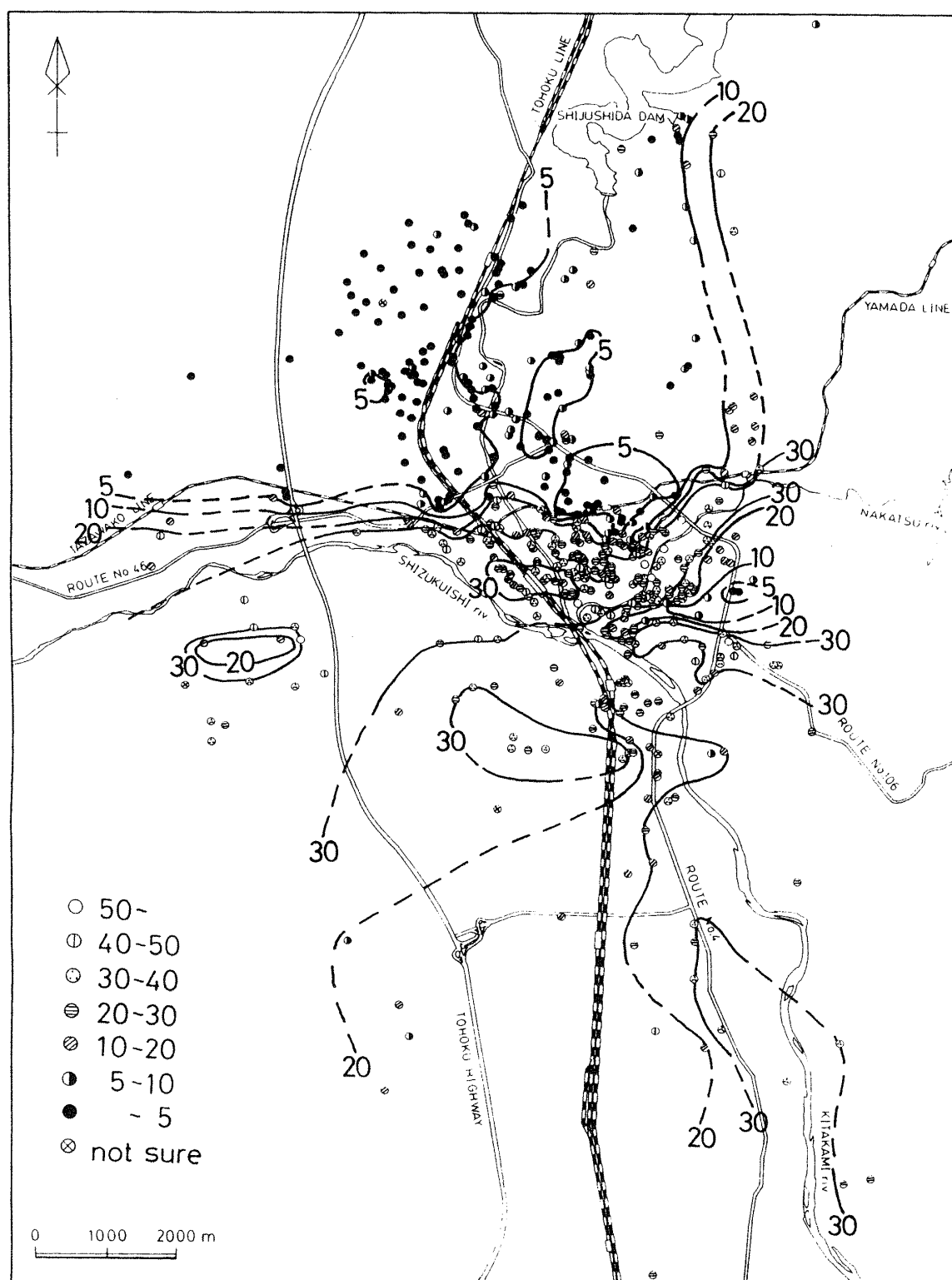


Fig. 4 Distribution of N-values obtained from borehole data.

Flow-Chart for Analysis

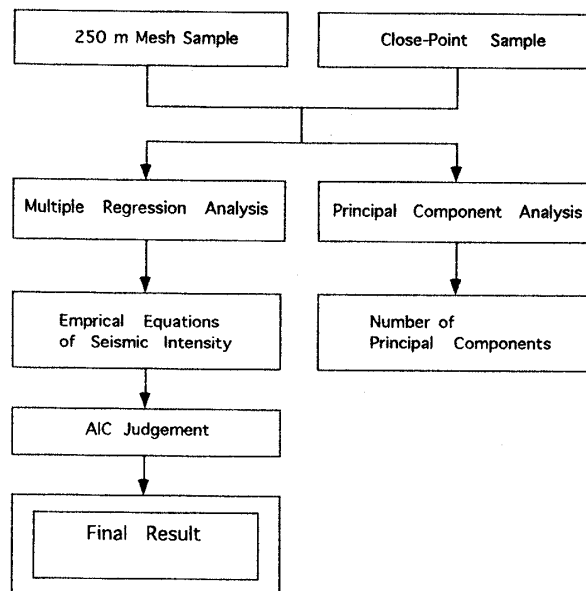


Fig. 5 Flow chart for constructing empirical equation in this study.

を表 1 に示す。以下の解析では、ボーリング資料そのものから得られる項目から震度を推定するモデル（ボーリングモデルと呼ぶ）と、N 値・土質区分などからいったん S 波速度・増幅率を推定しそれらを併合して震度を推定するモデル（地盤情報モデルと呼ぶ）の 2 通りの解析を行う。

5. ボーリングモデルによる解析

ボーリングモデルでは、ボーリング資料から直接得られる項目、すなわち、地下水位、N 値 50 以上の基盤までの深さ、地表から深度 5 m 及び 10 m までのそれぞれの平均 N 値の 4 項目を説明変量として重回帰式を作成した。ボーリング資料から得られる土質の情報はこの解析では除いてある。次節の地盤情報モデルでは土質情報も利用する。メッシュごとの標本を用いたモデルを“メッシュモデル”と呼称することとすると、この場合は、199 区画にすべてのデータが存在する。しかし、重相関係数は 0.19 で無相関を意味している (Fig. 6a)。これは、250 m メッシュでは同じメッシュ内においても表層構造の変化がかなり大きいためであると考えられる。そこで、ボーリング地点と

表 1 説明変量の一覧

A	地下水位(m)
B	N 値 50 到達深度(m)
C	深度 0 - 5 m の平均 N 値
D	深度 0 - 10 m の平均 N 値
E	深度 0 - 5 m の平均 S 波速度(m / s)
F	深度 0 - 10 m の平均 S 波速度(m / s)
G	0 - 10 Hz 増幅卓越周波数(Hz)
H	2 - 6 Hz 増幅卓越周波数(Hz)
I	0 - 10 Hz 最大増幅率
J	2 - 6 Hz 最大増幅率

注) 地盤モデルで使用した項目は A ~ D, 地盤情報モデルで使用した項目は A ~ J.

アンケート調査地点の近接した地点（半径 50 m 以内）のみを標本にして同様の解析を行った。本研究では、データの近接点から得られる標本を用いたモデルを“近接点モデル”と呼ぶこととする。この場合、重相関係数は 0.60 となる (Fig. 6b)。メッシュモデルより近接点モデルのほうが相関係数が高く、資料収集地点はできるだけ近いことが望ましいことがわかる。ボーリング近接点モデルで得られた重回帰式は(1)式に示す。なお、' は標準化したデータを意味する。ここで標準化とは、データが正規分布すると仮定して、平均からの差を標準偏差で割った規格化を意味する。

$$\begin{aligned}
 Y &= -0.0739A - 0.0086B - 0.0181C \\
 &\quad - 0.004D - 4.8649 \\
 Y' &= -0.306A' - 0.302B' - 0.771C' + 0.173D' \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、Y は推定される震度である。A, B, C, D は表 1 に示されている説明変量である。

(1)式から、地下水位、N 値 50 到達深度は震度に対し負の効果を与えている。また、深度 5 m までの平均 N 値も震度に対し負の効果を与えている。つまり、表層地盤が軟らかいほど相対震度は大き

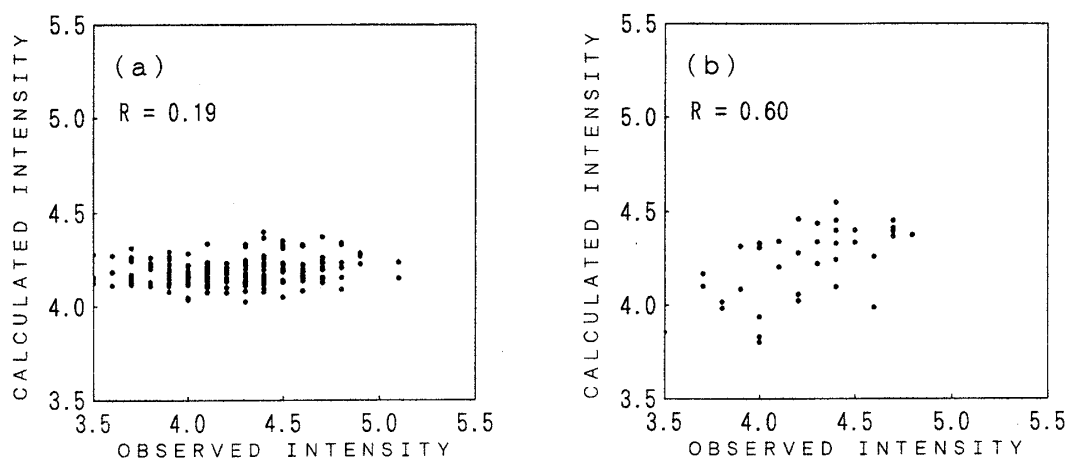


Fig. 6 Relation between observed intensity and calculated one in boring model.
(a) 250m×250m mesh model, (b) close-point model.

い。これは、従来考えられている結果と矛盾しない。深度 10 m までの平均 N 値は震度に対し正の効果をもたらしているが、後述の通り AIC の検討においてこの変量は削除されるため、震度推定に対し他の説明変量に比べると大きな貢献をしていないと判断される。

一方、主成分分析の結果、3つの固有値で 90% 近くを寄与していることが判明した。つまり、説明変量を 4 項目用いても情報が重複していると考えられる。また、AIC の検討では、地表から 10 m までの平均 N 値の項目を抜いたモデルが最適であったが、全項目を使用したモデルでも AIC の値はほとんど差がなく、まだモデルとしては不完全であることを意味している。

6. 地盤情報モデルによる解析

上述の解析では、ボーリング資料で与えられている土質の情報が入っていない。土質のような質的データを考慮する重回帰分析の手法の一つに層別因子を含む帰帰分析法（奥野，1981）がある。しかし、本研究では質的データを数値データに変換する方法を採用する。すなわち、N 値・土質を用いた S 波速度推定式（太田・後藤，1978）を用いて新たな情報を加えることとする。また、N 値 50 に到達しているボーリング地点ではその深さを便宜上の基盤と考え、換算された S 波速度を用い Haskell（1960）の方法で増幅率を計算した。

この場合、増幅率の計算されている地点は 180 点である。新たな項目は、地表から 5 m 及び 10 m までの平均 S 波速度、増幅率計算における 0～10 Hz 及び 2～6 Hz の範囲内の増幅率及び増幅卓越周波数の 6 項目である。2～6 Hz の範囲内を説明変量に加えた理由は、この周波数帯が木造家屋の固有周波数や倒壊率の関係に対応するからである（金井，1969）。以上、計 10 項目の説明変量を用いて震度を推定する。近接点モデルの場合、すべてのデータが存在するのは 29 地点である。

全 10 項目での重回帰分析の結果、メッシュモデルでは相関係数は 0.43、近接点モデルでは相関係数は 0.78 となり、近接点モデルが強い相関を示していることがわかる（Fig. 7）。ただし、主成分は 3 つのままであり、本来の情報量より説明変量の個数が多く、情報が重複していることを意味している。そこで、AIC 最小モデルから期待される説明変量の組み合わせを検討した結果、地下水位、0～5 m 平均 N 値、0～10 Hz の増幅卓越周波数、2～6 Hz の増幅率の 4 項目からなる重回帰式が最適モデルと判明した（Fig. 8）。相関係数は 0.72 となり、説明変量の 10 個から 4 個への大幅な減少に比べ相関係数の減少はほとんどない。AIC 判定で選ばれた地盤情報近接点モデルで得られた重回帰式を(2)式に示す。ちなみに、各変量に対し、標準化を行った標本も作成し、同様の解析を試みた結果も同時に記す。’は標準化した変量を意味

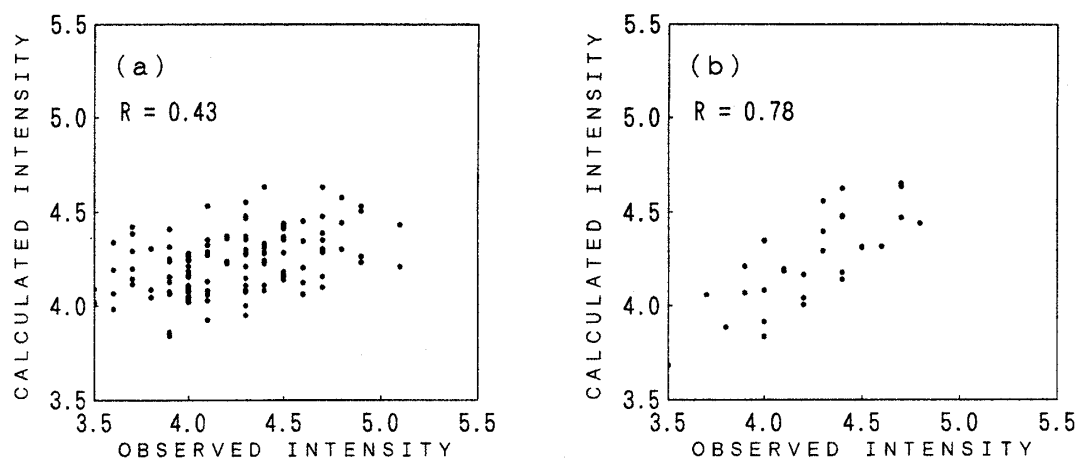


Fig. 7 Relation between observed and calculated intensity in ground information model.
(a) mesh model, (b) close-point model.

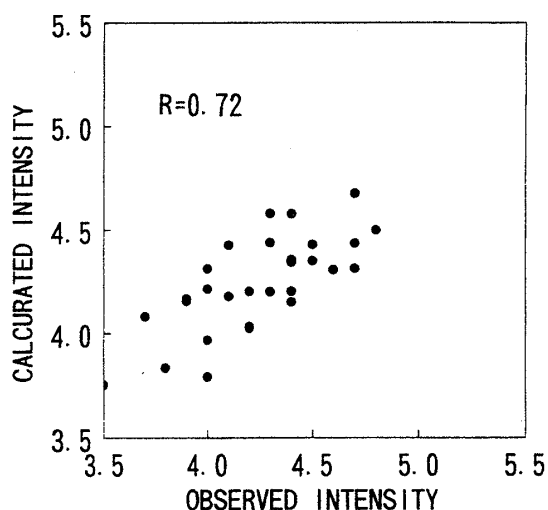


Fig. 8 Relation between observed and calculated intensity in the best equation estimated by AIC test.

する。

$$Y = -0.0983A - 0.0085C + 0.0484G \\ + 0.0891J + 4.0303$$

$$Y' = -0.452A' - 0.319C' + 0.326G' + 0.331J' \quad (2)$$

(1)式と同様に、 Y は推定震度、 A 、 C 、 G 、 J は表1に示す説明変量である。標準化した変量を用いた震度推定式も、AIC判定により選択される説明変量は変わらない。上式からわかるように、説明変量のうち、地下水位、0~5 m 平均 N 値は震度に対し負の効果、及び、0~10 Hz の増幅卓越周

波数、2~6 Hz の増幅率は正の効果を与えている。つまり、表層速度が遅いほど、かつ、増幅率が高いほど相対震度は大きい。これらは、従来考えられている結果と整合している。

なお、本研究はアンケート調査による震度の差異について、表層地盤特性という要因に基づいて解析を行ったものである。また、導かれた推定式は、特定の既往地震における震度推定式である。いうまでもなく、震度は地震の震源過程、伝播経路の特性、サイトの特性などの諸要因に支配される。震源における周波数成分が異なれば、当然、観測される振動の特性も異なる。また、震度の絶対値を推定するためには距離減衰の項が推定式に導入されなければならない。これら諸問題の解明のために、今後、他の地震を対象にした推定式の検証および上記要因を包括した形での検討など、研究の展開を図ることが必要と考えられる。

7. 結 論

本研究では、建設基盤調査用ボーリング資料及びそれらから推定される地盤情報をもとに、盛岡市域の震度推定式の作成を試みた。震度推定式作成において、250 m メッシュを基本とする標本(メッシュ)と、すべての資料が50 m 以内に存在する標本(近接点)の2種類で解析を行った。また、説明変量として、ボーリング資料からそのまま得られる項目と、S波速度・増幅率を推定し加

味した項目の2通りの解析を行った。また、重回帰分析で任意性の残る説明変量の選択にAIC判定を導入し、作成された推定式の中から最適なものを選び出した。

その結果、以下のことが明らかになった。

(1) ボーリングモデル・地盤情報モデルのいずれの解析の場合でも、メッシュ・近接点の標本のうち近接点モデルが相関係数が高い。つまり、250 m メッシュの狭い範囲内でも地盤条件・振動特性が変化することが明らかになった。

(2) ボーリング資料のみを用いた説明変量による震度推定式より、S波速度・増幅率を推定し説明変量に加えた震度推定式のほうが相関係数が高い。ただし、主成分分析の結果、寄与率の高い主成分の個数は3個であった。つまり、説明変量が増加したために相関係数が見かけ上高くなった可能性がある。

(3) 適切な説明変量を選択するためにAICを用いた判定を行った。その結果、地盤情報モデルにおいて、地下水位、0~5 m 平均N値、0~10 Hzの増幅卓越周波数、2~6 Hzの増幅率の4項目の説明変量からなる重回帰式が最適モデルと判明した。相関係数は0.72であり全項目を使用した場合に比べ大幅な相関係数の減少はみられない。

現在我々は、盛岡市域の多数の測点で短周期微動の観測を行い、微動と浅部地下構造との関係を明らかにしつつある。今後の研究として、微動観測結果と震度との相関やボーリング資料と微動情報をあわせた本手法による多変量解析を行い、震度推定に必要な最小限の情報を明らかにする予定である。

謝 辞

盛岡市域のボーリング資料は、岩手県庁、盛岡市役所ならびに岩手県内のボーリング関連会社のご協力を得て提供していただいた。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 赤池弘次：情報量基準 AIC とは何か，数理科学，No.153，pp.5-11，1976.
- 2) Haskell, N.A. : Crustal reflection of plane SH wave, J. Geophys. Res., Vol.65, pp.4147-4150, 1960.
- 3) 北海道地区自然災害科学資料センター：北海道地区自然災害科学資料センター報告，Vol.2，1988.
- 4) 岩手県：北上山系開発地域土地分類基本調査 盛岡 5 万分の一表層地質図，1978.
- 5) 金井清：地震工学，pp.132-135，共立出版，1969.
- 6) 野越三雄：Seismic microzonation 研究（I）－地震による高密度震度（秋田県，秋田市，能代市）と微地形・表層地質との関係－物理探査，Vol.42，pp.141-164，1989.
- 7) 岡田成幸・宮川忠芳・太田 裕：高密度震度調査にもとづく地域内震度予測式の構成，日本建築学会構造系論文報告集，No.348，pp.52-59，1985.
- 8) 大上和良・遠藤真哉・村井貞允：ボーリング資料に基づく北上低地帯の地下地質（その1）－盛岡付近－，岩手大学工学部研究報告，Vol.30，pp.21-30，1977.
- 9) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正：多変量解析法－改訂版－，日科技連出版，1981.
- 10) 太田 裕・後藤典俊：横波速度を推定するための実験式とその物理的背景，物理探査，Vol.31，pp.8-17，1978.
- 11) 太田 裕・後藤典俊・大橋ひとみ：アンケートによる地震時の震度の推定，北海道大学工学部研究報告，Vol.92，pp.117-126，1979.
- 12) 斎藤徳美・中村 操・野越三雄：1987 年岩手県中部沿岸地震における岩手県内の高密度震度分布と地質構造との関係，地震，Vol.42，pp.81-90，1989.

(投稿受理：平成7年11月8日
訂正稿受理：平成8年2月15日)