

タイトル	軟弱地盤サイトの地震動強度指標値評価
著者	串山，繁
引用	北海学園大学工学部研究報告，37：23-35
発行日	2010-02-22

軟弱地盤サイトの地震動強度指標値評価

串 山 繁*

Evaluation of Strong Motion Indices at Soft Soil Sites

Shigeru KUSHIYAMA*

Abstract

The city zone of Sapporo has been expanding by river improvement works and urban development since the Meiji era, resulting in unsuitable sites for building construction gradually changing into residential zones.

In this paper, we have chosen areas which have surfaces covered with peat or organic soil, as typical examples of soft soil, and evaluated strong motion indices at these areas based on boring databases. This study showed that ARV (Attenuation Rate of Velocity) maps proposed using the prediction method called RVM (Relevance Vector Machine), are more effective than the current existing ARV maps.

1 序

地表面の入力地震動の大きさは、地盤特性に大きく左右される。この種の地盤調査は、地下深部の地震基盤を対象とする調査と表層地盤を対象とする調査に大きく分けられる。

前者については、地下深部の断層構造や地質構造、形状に起因する地震波の反射、屈折や焦点効果（フォーカシング）の影響が地表面の揺れに特異な影響を及ぼすことが認識され、大深度ボーリング調査や反射地震探査が主要都市部に対して実施されている。また、後者については、表層地盤の増幅特性の整備が推進され、既に地形分類と標高データに基づき簡便に求めた全国版の1 km, 500mメッシュ単位の世界増幅度が提示されている^{1),2)}。ただし、地域特性を十分に反映したより精度の高い世界増幅度の設定は今後の課題である。

増幅特性のより詳しい調査として、PS検層やボーリングデータから得られる地盤特性を使

* 北海学園大学工学部建築学科

* Department of Architecture and Building Engineering, Hokkai-Gakuen University

用する波動伝播理論による調査もあるが、費用や手間がかかるため広域をカバーするには至っておらず、離散的な観測データに留まっている。

以上の様な背景の下に、ボーリングデータベースを活用した簡易な地盤特性の評価を試みってきた。本研究の予測手法；RVM（Relevance Vector Machine：適合ベクターマシン）および地盤の振動特性を評価する基本的な考え方については先の研究^{3),4)}を踏襲し、検討対象地域がより広域で軟弱地盤が想定される地区について新たに検討した。

2 解析法の概要

予測手法は、2001年にM. E. Tippingが提案した手法⁵⁾；RVM（Relevance Vector Machine）を用いた。この手法は、階層ベイズ構造の確率的拡張線形モデルに属する機械学習法のひとつであり⁶⁾、回帰問題、クラス分け問題のいずれにも適用可能で、次の特徴を有している。①レリバンスベクトル数が少なく基底関数がスパースになる、②予測期待値、予測分散の評価について大域的な最適化ができる。予測手法の概要は以下に示す通りである。

機械学習では、予め観測されている訓練データを基に未学習データの予測を行う。

訓練データは、 $\{x_n, t_n\}_{n=1}^N$ で表示する。ただし、 x_n ：入力サンプル、

$t_n = y(x_n; w) + \varepsilon_n$ ：教師値、 $y(x_n; w)$ ：真の関数、 $\varepsilon_n = N(0, \sigma^2)$ ：ノイズ項

このとき、教師値の分布は次式で表される。 $p(t_n | x) = N(t_n | y(x_n), \sigma^2)$ 即ち、 $y(x_n)$ を期待値、 σ^2 をノイズ分散とする正規分布となる。従って、訓練データに基づく尤度関数は次式で表わされる。

$$p(t | w, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-N/2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \|t - \Phi w\|^2\right\} \quad \sim (1)$$

ただし、 $t = (t_1, t_2, \dots, t_N)^T$ ：教師値、 $w = (w_0, w_1, \dots, w_N)^T$ ：重みベクトル

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & K(x_1, x_1) & K(x_1, x_2) & \dots & K(x_1, x_N) \\ 1 & K(x_2, x_1) & K(x_2, x_2) & \dots & K(x_2, x_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & K(x_N, x_1) & K(x_N, x_2) & \dots & K(x_N, x_N) \end{bmatrix} : \text{カーネル関数マトリックス},$$

列ベクトル $\{1\}$ はバイアス項を考慮する場合に付加

上記（1）式を最尤法で解くと過学習（over-fitting）となるため、その回避措置としてスパースな解を強制する様に、パラメータの事前分布を恣意的に以下の様に設定する。

$$p(w | \alpha) = \prod_{i=0}^N N(w_i | 0, \alpha_i^{-1}) = \prod_{i=0}^N \sqrt{\frac{\alpha_i}{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha_i w_i^2\right) = (2\pi)^{-\frac{N+1}{2}} |\mathbf{A}|^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}w^T \mathbf{A} w\right) \quad \sim (2)$$

ただし、 $\mathbf{A} = \text{diag}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$ for $\alpha_i > 0$ 、ハイパーパラメータ α の分布は、

$p(\alpha_i) = \Gamma(\alpha_i | a, b) \equiv \Gamma(\alpha_i)^{-1} b^a \alpha_i^{a-1} \exp(-b\alpha_i)$ 或いは $p(\alpha_i) = 1/\alpha_i$ などとする。

ベイズの定理よりパラメータの事後分布は,

$$p(w, \alpha, \sigma^2 | t) = \frac{p(t | w, \alpha, \sigma^2) p(w, \alpha, \sigma^2)}{\int p(t | w, \alpha, \sigma^2) p(w, \alpha, \sigma^2) dw d\alpha d\sigma^2} \quad \sim (3)$$

と表されるが、周辺尤度は解析的に求まらない。

代わりに、 $p(w, \alpha, \sigma^2 | t) = p(w | t, \alpha, \sigma^2) p(\alpha, \sigma^2 | t)$ なる分解をして、右辺第1項； w の事後分布について次の様にベイズの定理を用いて表し考える。

$$p(w | t, \alpha, \sigma^2) = \frac{p(t | w, \sigma^2) p(w | \alpha)}{\int p(t | w, \sigma^2) p(w | \alpha) dw} \quad \sim (4)$$

先に示した様に (1), (2) 式がGauss分布であるので、上式の周辺尤度の畳み込み積分が可能で、最終的に (4) 式は次式で表される。

$$p(w | t, \alpha, \sigma^2) = (2\pi)^{-(N+1)/2} |\Sigma|^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (w - \mu)^T \Sigma^{-1} (w - \mu) \right\} \quad \sim (5)$$

ただし、 $\Sigma = (\sigma^{-2} \Phi^T \Phi + A)^{-1}$: w の事後共分散、 $\mu = \sigma^{-2} \Sigma \Phi^T t$: w の事後平均
予測分布は近似式

$$p(t_* | t) = \int p(t_* | \alpha, \sigma^2) p(\alpha, \sigma^2 | t) d\alpha d\sigma^2 \approx \int p(t_* | \alpha, \sigma^2) \delta(\alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) d\alpha d\sigma^2$$

が成立すると仮定して、 α, σ^2 に関する次式 $p(\alpha, \sigma^2 | t) \propto p(t | \alpha, \sigma^2) p(\alpha) p(\sigma^2)$

において、ハイパーパラメータの事後分布最大化を考える。

ここで、 $p(\alpha)$ 、 $p(\sigma^2)$ を一様な事前分布と仮定すれば、上式右辺第1項目、即ち (4) 式の周辺尤度のみの最大化（換言すれば、 w の最小化）に簡略できる。

$$p(t | \alpha, \sigma^2) = \int p(t | w, \sigma^2) p(w | \alpha) dw$$

$$= (2\pi)^{-N/2} |\sigma^2 I + \Phi A^{-1} \Phi^T|^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} t^T (\sigma^2 I + \Phi A^{-1} \Phi^T)^{-1} t \right\} \quad \sim (6)$$

具体的には、(6) 式の自然対数を取り、 $\beta = \sigma^{-2}$ と置いて α, β を含まない定数項を無視すると、対数周辺尤度は、

$$\begin{aligned} L &= -(1/2) [\log |\beta^{-1} I + \Phi A^{-1} \Phi^T| + t^T (\beta^{-1} I + \Phi A^{-1} \Phi^T)^{-1} t] \\ &= -(1/2) [-\log |\Sigma| - N \log \beta - \log |A| + \beta \|t - \Phi \mu\|^2 + \mu^T A \mu] \end{aligned} \quad \sim (7)$$

と表され、最終的に上式を最大化する α, β の最適値が繰り返し計算で求められる。なお、ハイパーパラメータの更新は、 $\log \alpha, \log \beta$ に関して (7) 式を偏微分し、それを0に等置して得られる次式を用いる。 $\alpha_i^{new} = \frac{\gamma_i}{\mu_i^2}$, $(\sigma^2)^{new} = \frac{\|t - \Phi \mu\|^2}{N - \sum_i \gamma_i}$

ただし、 $\gamma_i \equiv 1 - \alpha_i N_{ii}$, μ_i : i 番目事後重み平均、

N_{ii} : 事後共分散マトリックスの i 番目対角要素

未学習データに対する予測分布は、次式で表わされる．

$$p(t_* | t, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) = \int p(t_* | w, \sigma_{MP}^2) p(w | t, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) dw$$

被積分項の2つの項は、(1), (5) 式よりGauss分布であるので、それらの畳み込み積分もGauss分布となる． $p(t_* | t, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) = N(t_* | y_*, \sigma_*^2)$

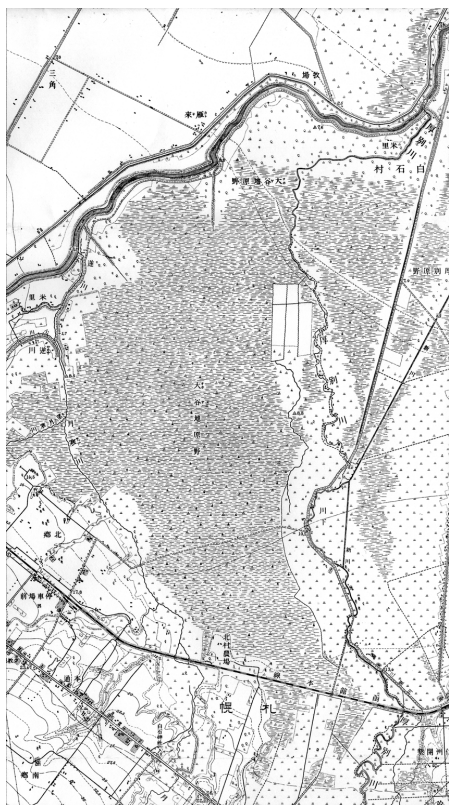
ただし、 $y_* = \mu^T \Phi(x_*)$: 予測期待値、 μ は重み係数 w の期待値、

$$\sigma_*^2 = \sigma_{MP}^2 + \Phi(x_*)^T \Sigma \Phi(x_*) : \text{予測分散} = \text{ノイズの予測分散} + \text{重み係数の予測分散}$$

3 解析例

3.1 解析地区

解析例として取り挙げた地区は、札幌市の新旧地形図を比較し軟弱地盤と想定される図一1(a), (b) に示す地区である．この地区は、河川が改修される以前は厚別川、月寒川、望月寒

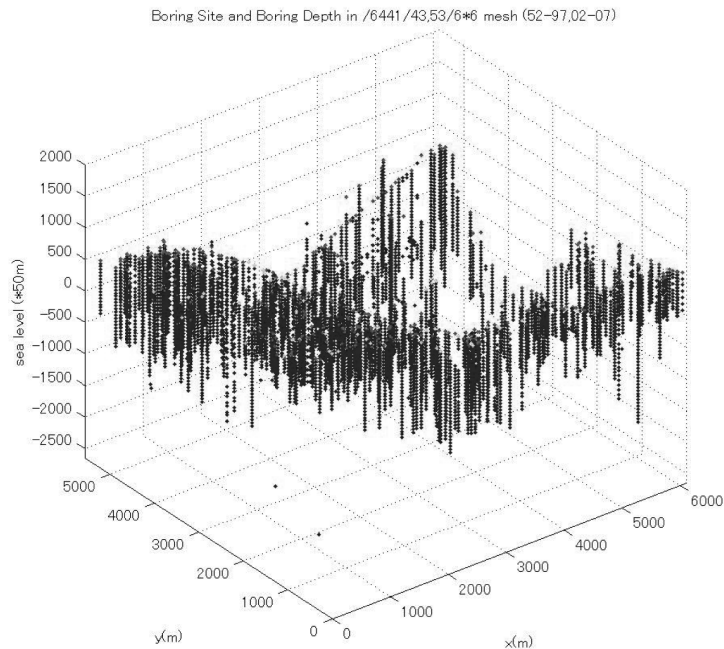


(a) 大正5年(1916)頃



(b) 平成4年(1992)頃

図一1 解析対象地区の新旧地形図⁷⁾ (1/25000抜粋)

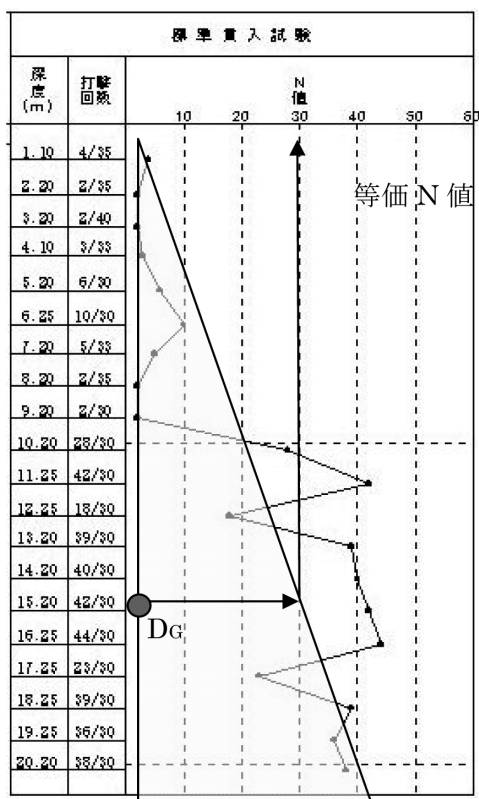


図－２ 調査対象地域ボーリングサイト

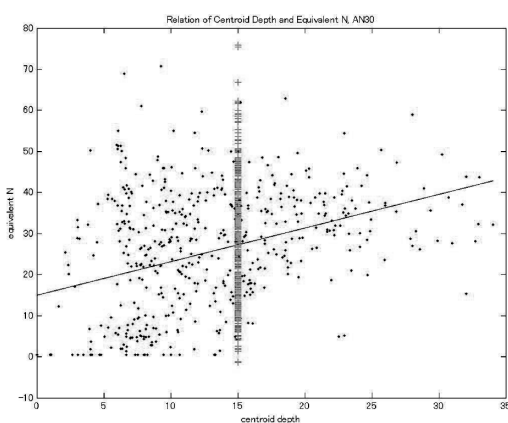
川、豊平川が洪水時に氾濫したと想定される広大な谷地であった。それを由来とする地名「大谷地」が、対象地区右下隅の少し南に離れた位置に現存している。

この地区の地盤は、地盤学会北海道支部提供の「北海道地盤情報データベースVer.2003」のボーリング柱状図によれば、20m前後の深さまで、N値の小さい泥炭（高有機質土）、有機質土（腐植土）、シルト、粘土などが砂や火山灰の層を挟みながら交互に繰り返す様相を呈している。特に軟弱な例では、表層6mまで泥炭で先の様相が深さ45m付近まで続く地点もある。

上記の北海道地盤情報データベースによれば、札幌市のボーリングデータは市内全域で約6000本あるが、その内本論では、図－１の地域に含まれる白石区と厚別区の境界線をまたぐ約6km四方（地域メッシュコード；6441/53/02~07, 6441/43/92~97, 82~87, 72~77, 62~67, 52~57）の合計720本のデータを用いて検討を行った。図－２にこれらのボーリングサイトとボーリング深度を示す。Z軸には海拔を採り、地盤深さが見易くなるよう倍率50を乗じて強調表示されている。下に伸びる青いマーカーはボーリング深度に対応している。また、孔口が水色で印されているサイトは、同一サイトで複数本ボーリング調査がなされたサイトであるが、そこでは最大ボーリング長のデータのみを解析に考慮した。その結果、合計720本のデータ（N値674, qc値46）の内、有効データ数は534本となった。なお、オランダ式二重管コーン貫入試験のqc値と標準貫入試験のN値の関係は、土粒子の粒径に依存する。当該地域では腐植土、有機質土の下には砂礫土或いは腐植土、有機質土混じりの砂礫土が多くみられた



図－3 N値図心深さと等価N値



図－4 等価N値と平均N値 (AN30)

ので、砂礫土に適用される関係式 $q_c = 2.90 \times N$ を用いて、 q_c 値をN値に換算した⁸⁾。

3.2 平均N値 (AN30) の導出

超高層建物や免震建物の様な長周期の建物は深い地盤構造の影響を受け易いのに対して、固有周期が比較的短い建物は、表層地盤の影響を受け易いと云われている。通常、地表面から深さ30mの区間の速度増幅度を基準地盤の水平動最大速度に乗じて地表面最大速度とする取り扱いがなされている。

上記速度増幅度を求める為に、本論では深さ毎にN値が異なるデータを次の様に扱った。図－3に示す様に、ボーリング柱状図を基に柱状図の地表面からの図心深さ D_g を求める。次に、図心深さ D_g に対応する等価N値を求める。等価N値は、最小N値より大きい値のN値から成る折れ線で構成される多角形を面積が等価な直角三角形に置き換え、 D_g に対応する三角形の斜辺との交点を辿り得られる値とする。

以上により求めた等価N値を縦軸に、図心深さ D_g を横軸に採って整理すると、図－4に示すような回帰直線が得られる。この回帰直線は、 D_g が深い程等価N値が大きくなることを示して

いる．回帰直線上の等価N値を調査対象地域の平均的な地盤硬さに見做せば，回帰直線から上側に乖離する程地盤は硬く，逆に下側に乖離する程地盤は柔らかいと判断される．即ち，回帰直線の直交軸座標値が地盤の硬軟を表す指標となり得る．

各サイトの地表面から深さ30mの区間の平均N値は，横軸のD_Gが15mに等しい縦線上に存在すると仮定する．このとき回帰直線の直交軸座標値を平均N値（AN₃₀）としてもよいが，散布図の各点を回帰直線に沿って平行移動してD_G=15mの縦線と交わる点を平均N値とした方が，N値の単位（打撃回数）に一致するので都合がよい．本論では，この様にして得た値（図－4の+記号）をRVM解析用観測点データと考えた．

3.3 平均N値，ARV，I_s，PGA，PGV相互関係式

前項3.2で導出した平均N値を揺れ易さの指標と見做すことも可能であるが，平均N値から表層地盤の平均S波速度（AVS₃₀），速度増幅度（ARV）を求め，更により一般的な指標（気象庁計測震度I_s，地表面最大速度PGV，地表面最大加速度PGA）を示した方が分かり易い．既往の研究によりN値は上記指標と図－5に示す様な関係にあり，種々の関係式が提案されている．以下に，本論で採用した関係式を記す．

a) 関係式①

N値とV_s（平均せん断弾性波速度m/sec）の間には，全土質或いは各地盤種別を対象とした種々の関係式が提案されている^{9),10)}．本論では全土質を対象とした $V_s = 91.0 \times N^{0.337}$ を参考にして，NをAN₃₀，V_sをAVS₃₀と置換した次式を関係式①とした⁹⁾．

$$AVS_{30} = 91.0 \times AN_{30}^{0.337} \quad \sim (8)$$

ただし，AVS₃₀：地表面～地盤深度30m間の平均せん断弾性波速度（m/sec）

AN₃₀：地表面～地盤深度30m間の表層地盤の平均N値

b) 関係式②

基準地盤に対する表層地盤の速度増幅度ARVは，AVS₃₀を用いて次式で表される¹⁾．基準地盤とは，V_s=600（m/sec）相当の硬質地盤である．

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \quad \sim (9)$$

ただし，100 < AVS₃₀ < 1500，ARV：地表～地盤深度30m間の速度増幅度

c) 関係式③

司・翠川は，基準地盤の最大速度を距離減衰で表した次式を提案した¹¹⁾．

$$\log PGV_{b600} = 0.58M_w + 0.0038D + d - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002X \quad \sim (10)$$

ただし、 PGV_{b600} ：S波速度600m/sec相当硬質地盤の水平動2成分中大きい方の最大速度（kine）

M_w ：モーメントマグニチュード， D ：震源深さ（km）， d ：地震のタイプ別係数

X ：断層最短距離（km）

ただし、本論では図－5に示す特性化震源モデルから出発せずに基準地盤水平動の最大速度： PGV_{b600} を仮定値とする取り扱いとした。

d) 関係式④

地表面最大速度PGVと地表面最大加速度PGAとの関係式は、内閣府の地震被害想定支援ホームページ資料¹²⁾にある次式を用いた。

$$PGA = 10^{0.908} PGV^{1.13} \quad \sim (11)$$

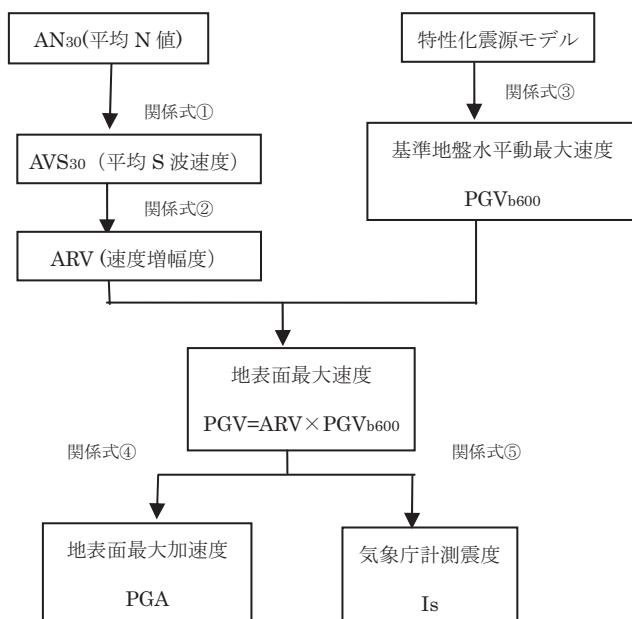
ただし、 PGV ：地表面最大速度（kine）， PGA ：地表面最大加速度（gal）

e) 関係式⑤

気象庁計測震度 I_s と地表面最大速度PGVの関係式は、同上ホームページ資料掲載式を用いた。

$$I_s = 2.4 + 2.02 \log PGV \quad \sim (12)$$

なお、関係式④と関係式⑤は、5つの地震（1995兵庫県南部地震，1993北海道南西沖地震，1993釧路沖地震，1993能登半島沖地震，1994三陸はるか沖地震）に関する合計128の気象



図－5 AN30, AVS30, ARV, PGV, PGA, I_s 相互関係

序データから得た相関関係式である。

3.4 解析結果および考察

図－6 は、各ボーリングサイトの平均N値のプロット図である。ボーリングサイトの分布が極端に線上に密になっている場所は、道央自動車道環状線と岩見沢方面へ向かう道央自動車道に対応している。図－7、8 は、いずれも図－6 を基に得られた応答曲面であり、夫々基準化したサイト座標値表示でwidth=1.0, width=0.5と仮定して得られた結果である。widthパラメータとは、本論で用いたGauss Kernel基底関数の σ_{ker}^2 を意味している。

$$K(x_m - x_n) = \exp \left[-\frac{\|x_m - x_n\|^2}{\sigma_{ker}^2} \right] \quad \sim (13)$$

大きなwidthパラメータは大域的な傾向を、小さなwidthパラメータは局所的な傾向を表すのに適しているが、小さ過ぎると汎化性能が劣る。なお、夫々の図におけるレリバンスベクトル数はwidth=1.0で10個、width=0.5で21個であった。両図共、RVMによる応答曲面の平均N値は領域の中央部で大きく凹み、図－6 の左下隅に該当する領域で平均N値が大きい傾向がみられる。

図－9 (a), (b) は、図－7、8 の下に投影された平均N値の等高線図を表示しており、(a) 図の等高線の数値は大凡10～46、(b) 図の等高線の数値は大凡4～48と範囲が広がっていることが分かる。(b) 図の右上を図－6 と比較すると、岩見沢に向かう道央自動車の線上でN値が大きく現れている様子が窺える。これは、この線上に沿うボーリング深度が深いため硬い土質の影響が平均N値を高めることに寄与した結果と思われる。また、図－9 の左下隅で平均N値が大きい、図－1 (a) の古い地形図の等高線を参照すると、この領域は中央の谷地部より標高が高い台地の裾野に該当し、(a) 図より (b) 図の方がやや対応が良好である。それ故、以下ではwidth=0.5の結果についてのみ示す。なお、図－10によれば、平均N値の標準偏差値は、12前後とかなり大きい。

図－11～14は、基準地盤の水平動最大速度PGV_{b600}を30 (kine) と仮定して得られた結果である。これらは、前項3.3で示した関係式を用いて図－9 (b) の平均N値を基にARV, PGV, PGA, Isの分布予測図を求めた為、いずれも図－8 の形状と非常によく似ている。図－11, 12より、PGVは大凡44～80 (kine)、PGAは大凡600～1100 (gal) の変動幅であることが分かる。また、図－13より、Isは震度5強～6弱（変動幅は大凡5.7～6.2）となることが予測される。

一方、図－14によれば、地盤の速度増幅度ARVは1.48～3弱である。これを表－1 に示した地形分類と標高データから簡便に求めた解析地区の速度増幅度（500mメッシュデータ）ホームページ公開値と比較する。図－15は、メッシュグリッドの中央点で公開値が代表されるとして、既存速度増幅度マップのARVを等高線図で示したものである。ただし、表中0とある

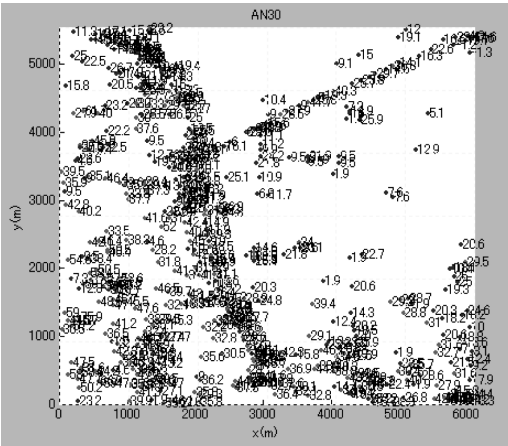


図-6 平均N値AN30

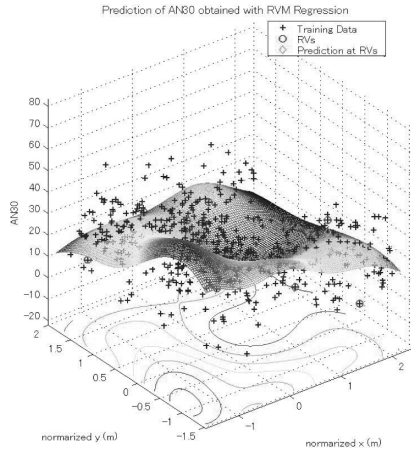


図-7 RVM応答曲面 (width=1.0)

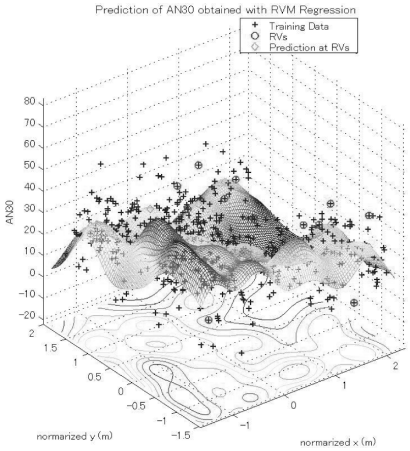


図-8 RVM応答曲面 (width=0.5)

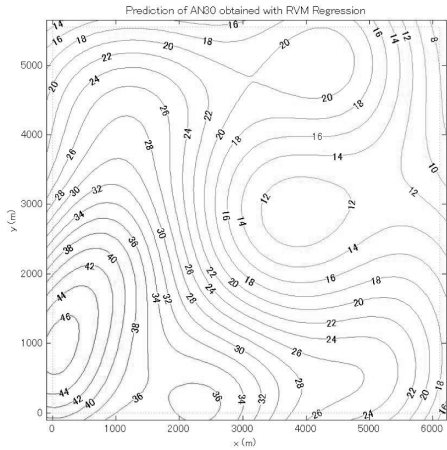


図-9 (a) 平均N値 (width=1.0)

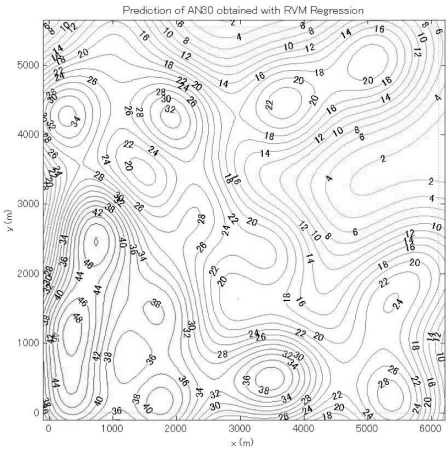


図-9 (b) 平均N値 (width=0.5)

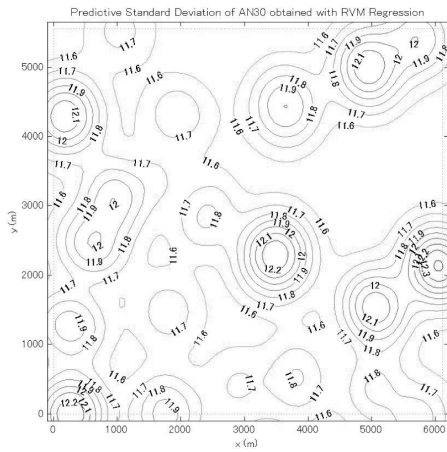


図-10 平均N値STD (width=0.5)

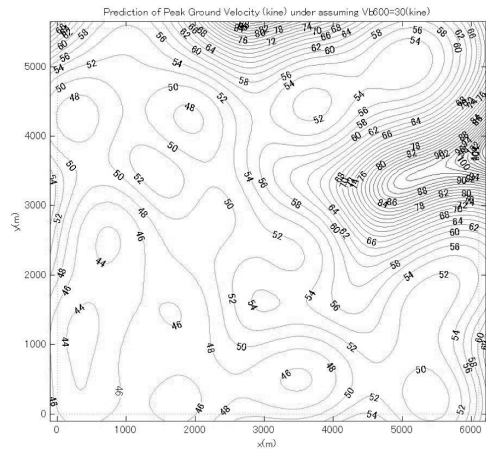


図-11 PGV (width=0.5)

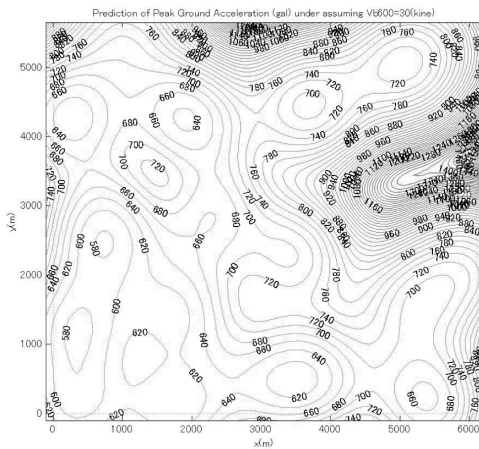


図-12 PGA (width=0.5)

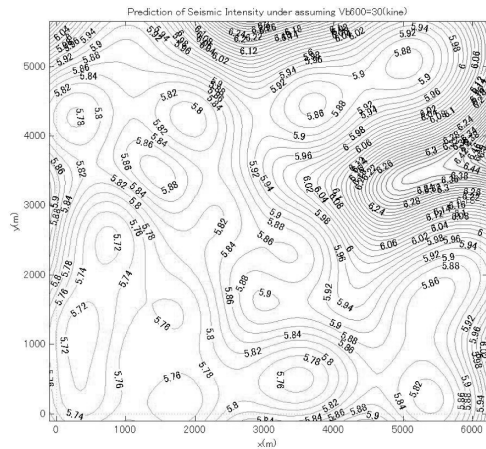


図-13 気象庁計測震度Is (width=0.5)

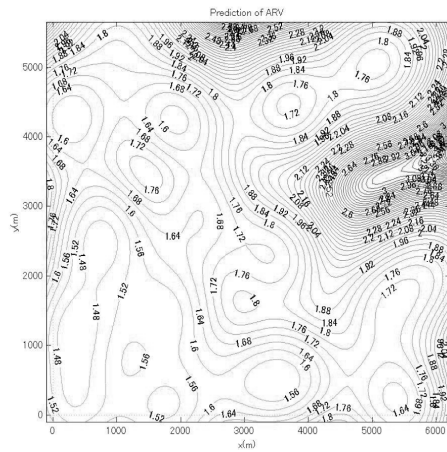


図-14 速度増幅度ARV (width=0.5)

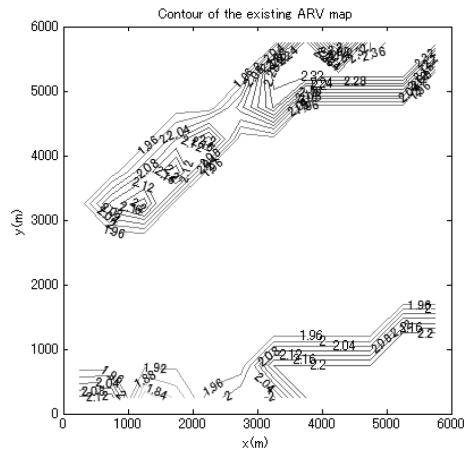


図-15 500mメッシュARVマップ

表－1 500mメッシュARVの数値²⁾

c	c	c	c	c	c	c	m	c	n	m	m
c	c	c	c	c	c	m	m	m	m	m	c
c	c	c	c	c	0	l	c	c	c	c	c
c	c	c	0	k	c	c	c	c	c	c	c
c	c	0	k	c	c	c	c	c	c	c	c
c	h	k	c	c	c	c	c	c	c	c	c
0	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	j	j
c	c	c	c	c	c	j	j	j	j	j	j
g	i	a	b	d	f	e	j	j	j	j	j

a=1.772201,b=1.851774,c=1.93019,d=1.974146,e=1.986989
 f=2.036631,g=2.125387,h=2.136278,i=2.143665,j=2.201713
 k=2.228763,l=2.284901,m=2.350257,n=2.368378

4箇所値をそのまま用いて等高線図を描くと分布傾向がゆがむ為、左右両隣の平均値を0の代わりに置き換え描いた。図－15によれば、図の大部分を占める白い領域ではARV=1.92～1.96のほぼ一定値であり、上部の等高線が密な領域でARV=1.96～2.36,下部右半分の等高線が密な領域でARV=1.96～2.2,下部左半分x=1000～2000 (m)の領域でARV=1.84～1.92,下部左端x=0～1000 (m)の領域でARV=1.96～2.12の範囲となっている。

本論の手法で得たARVの分布範囲1.48～3弱は、表－1に示す速度増幅度マップ(500mメッシュデータ)の分布範囲約1.77～2.37より広めで、図－14, 15の比較から分布傾向も明らかに異なり、図－14の方がきめ細かに地盤特性を反映していることが分かる。

以上のことから、本論の解析結果は、局所領域における地盤の揺れの相違を定量的に示したものと解釈できる。約6km四方と狭い地区であっても軟弱地盤では揺れの相違が大きく、厳しい評価となる場所も見込まれるので、重要度の高い建物の設計には十分な配慮が必要となろう。現状では上部構造のモデル化や解析精度に比べ入力地震動の評価精度はかなり劣るので、本論で提案したボーリングデータを有効に生かした地盤特性の評価の考え方は、入力地震動の評価精度改善に寄与するものと思われる。

4 まとめ

ボーリングデータベースを活用して約6km四方の軟弱地盤地区の地震動強度指標をRVM (Relevance Vector Machine)を用いて予測した。その結果、狭い領域内であってもこれら指標の最大値は最小値に対して速度増幅度で約1.5倍、PGV, PGAで約2倍の相違が認められ、既存の500mメッシュARVマップより本論提案のARVマップの方がきめ細かく評価されていることから、本手法がより現実的で有用な入力地震動評価に繋がると云えよう。

参考文献

- 1) 松岡，翠川：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング，第22回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，1994.
- 2) <http://www.j-map.bosai.go.jp>
- 3) 串山繁：RVMによる予測と応用事例，日本建築学会北海道支部研究報告集，No. 79，2006. 7.
- 4) 串山繁：Kriging法による局所地盤の地震動強度指標値予測，日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 77，2004. 7.
- 5) Michael E. Tipping：Sparse Bayesian Learning and the Relevance Vector Machine, Journal of Machine Learning Research 1 (2001), pp.211–244.
- 6) 石黒真木夫他，“階層ベイズモデルとその周辺”，岩波書店，2004.10.
- 7) 地図で見る札幌の変遷：財団法人日本地図センター，1994. 8.
- 8) 建設技術教育研究所編：標準－土質・コンクリート試験ハンドブック，オーム社，1999.12.
- 9) N値の話編集委員会：N値の話，理工図書，1999，pp. 120－pp. 123.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002. 3，pp. 25－pp. 27.
- 11) 司，翠川：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集，第523号，1999，pp. 63－pp. 70.
- 12) <http://www.bousai.go.jp/>