

3 緊急地震速報における震度予測式等ソフトウェアの変更

正木 和明・原 徹夫

1. はじめに

Ai-SYSTEM においては、気象庁が配信する緊急地震速報を受信し、大きな揺れが到達する前に、各企業所在地における予測震度、到達（猶予）時間を計算・表示し、報知している。気象庁から配信されるのは、地震の発生時刻、震源の位置（緯度、経度および深さ）、地震の規模（マグニチュード）であり、これらの情報に基づいて、各企業の端末で、何秒後に、どの程度の揺れが来るかを計算して表示している。

平成 19 年の第 168 回国会（臨時国会）において、気象業務法の一部を改正する法律（平成 19 年法律第 115 号）が成立し、気象庁以外の者が地震動の予報の業務を行う場合は、気象庁長官の許可を受けることが義務付けられた。これに伴い、当大学では、計算手法を気象庁が指定、又は推奨する方法に切り替え、正式に許可を受けて配信を行っている。

本稿では、この計算手法について概要を述べる。

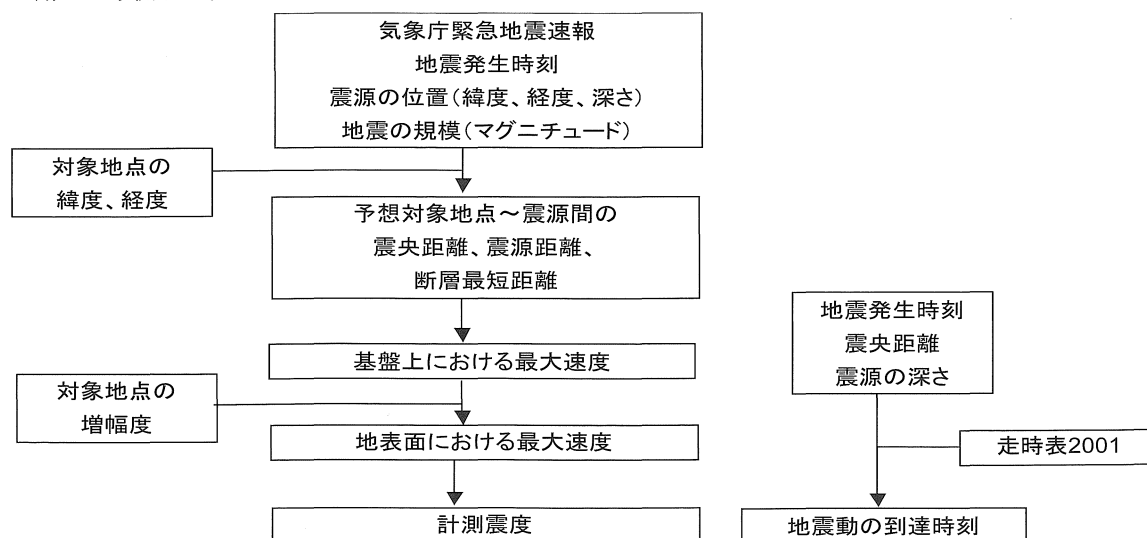
2. 計算のフロー

図 -1 に計算のフローを示す。以下、同図に基づき計算手法の概要を述べる。

本システムにおいては、気象庁緊急地震速報として、地震の発生時刻、震源の位置、地震の規模を受信する。一方、地震動の予想を行うには、対象地点の緯度・経度、その地点における増幅度が必要である。震源と予想対象地点の緯度・経度から、震央距離を算出する。地震の深さと震央距離から、震源距離を求める。さらに、モーメントマグニチュードから断層長を求め、震源距離と組み合わせることにより、断層最短距離を求める。

続いて、モーメントマグニチュード、震源の深さ、断層最短距離から、基盤上における最大速度を計算し、基盤上における最大速度と地盤増幅度を掛け合わせて地表面における最大速度を求める。

地盤増幅度は、地表から地下 30 m までの平均 S 波速度から求めるが、S 波速度の推定には、微地形区分、標高、主要河川からの距離などに基づいて推定する松岡・翠川の経験式¹⁾を用いる。計測震度は、地表面における最大速度から経験式を用いて算出する。一方、地震動の到達時刻は、震央距離と震源の深さから、気象庁走時表を用いて予測する。



図一1 計算のフロー

図 -1 計算のフロー

3. 計算の入力値

(1) 地震の発生時刻、震源の位置（緯度、経度および深さ）、地震の規模

気象庁が提供し、予報業務計画書第3項の通り入手する緊急地震速報（予報）、および緊急地震速報（警報）（以下、予報資料という）から、上記に該当するデータをそのまま用いる。

(2) 予想の対象とする地点の位置（緯度・経度）

予想の対象とする地点の緯度・経度に対する計算を行う。

(3) 予想の対象とする地点における地盤増幅度

国土地理院発行の土地条件図 (<http://www1.gsi.go.jp/geowww/themap/lcm/tokai.html>) 等を参考に微地形を区分し、4.3節に示す手法により表-1の係数(a, b, c)を決定し、平均S波速度を算定した上でS波伝播速度が600 m/sに相当する硬質基盤から地表に至る間の地盤増幅度を算定する。

4. 対象地点の震度の予想の手順

4.1 予想の対象とする地点における震源までの距離Xの算出

(1) 震央距離(l_0)

震央の緯度・経度を(ϕ_E , λ_E)、観測点の緯度・経度を(ϕ_X , λ_X)とする(いずれも日本測地系)。

まず(1)式を用いて、震央および観測点の緯度を、地理緯度 ϕ (ラジアン) から地心緯度 ϕ (ラジアン) に変換する。

$$\tan \phi = (1 - e^2) \tan \phi \quad (1)$$

$$e: \text{離心率} \quad e^2 = 6.674372 \times 10^{-3}$$

尚、ノウキャストサーバでは(1)式をべき級数展開した(2)式で計算している。

$$\phi = \phi - (11.55 / 60) \cdot \text{RADIAN} \cdot \sin(2\phi) \quad (2)$$

$$\text{RADIAN} = \pi / 180$$

次に(3)式により、求める震央距離に対応する角距離 Δ_1 (ラジアン) を求める。

$$\sin(\Delta_1 / 2) = \text{SQRT}((A_E - A_X)^2 + (B_E - B_X)^2 + (C_E - C_X)^2) / 2 \quad (3)$$

$$\text{但し} \quad A_E = \cos \phi_E \cdot \cos \lambda_E \quad A_X = \cos \phi_X \cdot \cos \lambda_X$$

$$B_E = \cos \phi_E \cdot \sin \lambda_E \quad B_X = \cos \phi_X \cdot \sin \lambda_X$$

$$C_E = \sin \phi_E \quad C_X = \sin \phi_X$$

Δ_1 に地球半径を乗じて震央距離 l_0 (km) を求める。

$$l_0 = \Delta_1 \cdot a \quad (4)$$

$$a: \text{地球半径} = 6370.291 \text{ (km)}$$

(2) 震源距離(S_0)

上記震央距離の計算において、震源の深さをd (km) とする。

(1)式で地心緯度に変換した後、(5)式により角距離 Δ_S (ラジアン) を求める。

$$\Delta_S = \text{SQRT}((A_E - A_X)^2 + (B_E - B_X)^2 + (C_E - C_X)^2) \quad (5)$$

$$A_E = \cos \phi_E \cdot \cos \lambda_E \cdot (a - d) / a \quad A_X = \cos \phi_X \cdot \cos \lambda_X$$

$$B_E = \cos \phi_E \cdot \sin \lambda_E \cdot (a - d) / a \quad B_X = \cos \phi_X \cdot \sin \lambda_X$$

$$C_E = \sin \phi_E \cdot (a - d) / a \quad C_X = \sin \phi_X$$

ΔS に地球半径を乗じて震源距離 S_0 (km) を求める。

$$S_0 = \Delta_s \cdot a \quad (6)$$

(3) 断層最短距離 (X)

断層最短距離 X は (7) 式で表わされる。

$$X = S_0 - L / 2 \quad (7)$$

S_0 : 震源距離 L : 断層長

モーメントマグニチュード M_w から宇津による (8) 式²⁾ で断層長を算定する。

$$\log L = 0.5M_w - 1.85 \quad (8)$$

但し, X の最小値は 3km とする。($S_0 - L / 2 < 3$ の場合, $X = 3\text{km}$)

4.2 対象とする地点の基準基盤上における最大速度の推定

対象地点の基準基盤上における最大速度の推定は, 最大速度に対する司・翠川の距離減衰式³⁾を採用する。

$$\log(\text{PGV}_{600}) = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002X \quad (9)$$

PGV_{600} : 予想の対象とする地点において, S 波の伝播速度が 600m/s に相当する硬質地盤上における地震動の最大速度振幅 (cm/s)

D : 震源の深さ (km)

X : 断層最短距離 (km)

気象庁マグニチュードからモーメントマグニチュードへの変換は, 宇津による (10) 式⁴⁾を採用する。

$$M_w = M_{jma} - 0.171 \quad (10)$$

M_{jma} : 気象庁マグニチュード

4.3 地表面での最大速度の推定

予想の対象とする地点における S 波の最大速度振幅 PGV (cm/s) は, (11) 式で表される。

$$\text{PGV} = \text{ARV}_{600} \times \text{PGV}_{600} \quad (11)$$

ARV_{600} : 予想を対象とする地点における地盤増幅度

PGV_{600} : 予想の対象とする地点において, S 波の伝播速度が 600 m /s に相当する硬質地盤上における地震動の最大速度振幅 (cm/s)

(1) 地盤増幅度の推定

地盤増幅度の推定には, 松岡・翠川による (12) 式¹⁾を採用する。

$$\log(\text{ARV}_{600}) = 1.83 - 0.66\log(\text{AVS}) \pm \sigma \quad (100 < \text{AVS} < 1500) \quad (12)$$

AVS : 地表から地下 30m までの平均 S 波速度

(AVS が 100m/sec 未満の場合は, 平均 S 波速度 100m/s で評価)

ARV_{600} : 予想を対象とする地点における地盤増幅度

σ : 計算では使用しない

(2) 平均 S 波速度の推定

平均 S 波速度の推定には、松岡・翠川による (13) 式および係数⁵⁾を採用する。

$$\log(\text{AVS}) = a + b \cdot \log(H) + c \cdot \log(D) \pm \delta \quad (13)$$

AVS：地表から地下 30m までの平均 S 波速度

a, b, c：係数 (表 -1)

H：標高

D：主要河川からの距離 (km)

δ：計算では使用しない

表 -1 平均 S 波速度推定式の係数

| No. | 微地形区分 | a | b | c |
|-----|--------------------|------|------|------|
| 1 | 埋立地 | 2.23 | 0 | 0 |
| 2 | 人口改変地 | 2.26 | 0 | 0 |
| 3 | 三角州・後背湿地 (D ≤ 0.5) | 2.19 | 0 | 0 |
| 4 | 三角州・後背湿地 (D > 0.5) | 2.26 | 0 | 0.25 |
| 5 | 自然堤防 | 1.94 | 0.32 | 0 |
| 6 | 谷底平野 | 2.07 | 0.15 | 0 |
| 7 | 砂州・砂丘 | 2.29 | 0 | 0 |
| 8 | 扇状地 | 1.83 | 0.36 | 0 |
| 9 | ローム台地 | 2 | 0.28 | 0 |
| 10 | 砂礫台地 (段丘) | 1.76 | 0.36 | 0 |
| 11 | 丘陵 | 2.64 | 0 | 0 |
| 12 | その他 (火山など) | 2.25 | 0.13 | 0 |
| 13 | 先第三紀 | 2.87 | 0 | 0 |

4.4 計測震度の推定

地表における計測震度の推定には、翠川他による (14) 式⁵⁾を採用する。

$$I_{\text{INSTR}} = 2.68 + 1.72 \log(\text{PGV}) \quad (14)$$

I_{INSTR} ：計測震度

PGV：予想の対象とする地点における S 波の最大速度振幅 (cm/s)

5. 地震動の到達時刻の予想の手順

5.1 計算の方法

S 波の走時を、気象庁による走時表 JMA2001 を用いて算出する。

震央距離は、上記 4.1 節 (1) によって求められる l_0 を、震源深さ d は緊急地震速報にて与えられる値を用いる。走時表で与えられる走時はメッシュ状の値であるため、震央距離、深さの両方向について補間し、 l_0 、 d に対応した走時を求める。

以下に補間の手順を示す。

(1) 算出式

走時算出の目的とする震央距離 x 、震源深さ y に着目し、走時表上の近傍 9 点の走時値を用いてラグランジュ補間する。9 点の座標を $(x_0, y_0), (x_1, y_0), (x_2, y_0), (x_0, y_1), (x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_0, y_2), (x_1, y_2), (x_2, y_2)$ とし、各座標上の走時を $T(x_m, y_n)$ とする。ラグランジュ補間では、 x, y 各々について 2 次式で表されるものとし、震源深さ y 方向の補間走時 $T(x_0, y), T(x_1, y), T(x_2, y)$ は、(15) ~ (17) 式で表すことができる。

$$T_{(x_0, y)} = \frac{(y-y_1)(y-y_2)}{(y_0-y_1)(y_0-y_2)} T(x_0, y_0) + \frac{(y-y_0)(y-y_2)}{(y_1-y_0)(y_1-y_2)} T(x_0, y_1) + \frac{(y-y_0)(y-y_1)}{(y_2-y_0)(y_2-y_1)} T(x_0, y_2) \quad (15)$$

$$T_{(x_1, y)} = \frac{(y-y_1)(y-y_2)}{(y_0-y_1)(y_0-y_2)} T(x_1, y_0) + \frac{(y-y_0)(y-y_2)}{(y_1-y_0)(y_1-y_2)} T(x_1, y_1) + \frac{(y-y_0)(y-y_1)}{(y_2-y_0)(y_2-y_1)} T(x_1, y_2) \quad (16)$$

$$T_{(x_2, y)} = \frac{(y-y_1)(y-y_2)}{(y_0-y_1)(y_0-y_2)} T(x_2, y_0) + \frac{(y-y_0)(y-y_2)}{(y_1-y_0)(y_1-y_2)} T(x_2, y_1) + \frac{(y-y_0)(y-y_1)}{(y_2-y_0)(y_2-y_1)} T(x_2, y_2) \quad (17)$$

引続き、震央距離 x 方向の補間走時 T(x,y) を (18) 式により求める。

$$T_{(x, y)} = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} T(x_0, y) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} T(x_1, y) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} T(x_2, y) \quad (18)$$

(2) 具体的計算手順

予測の対象とする地点の位置および予報資料のうち震源位置から震央距離 x および震源の深さ y を求め、これについて、以下の方法により S 波の走時を求める。

(15) 式を適用するため、 $3 \times 3 = 9$ のデータを用いる。このため x, y について、下式を満たす x_0, x_1, x_2 および y_0, y_1, y_2 を求める。

$$\frac{x_0 + x_1}{2} < x < \frac{x_1 + x_2}{2} \quad \frac{y_0 + y_1}{2} < y < \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (19)$$

図-2 において、dk, dh は下記のように定義する

$$dk = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} \quad dh = \frac{y_1 - y}{y_1 - y_0} \quad (20)$$

走時表から、下記要素の走時を読み込む。

$$T_{0,0}, T_{0,1}, T_{0,2}, T_{1,0}, T_{1,1}, T_{1,2}, T_{2,0}, T_{2,1}, T_{2,2}$$

(15) 式において、

$$\left. \begin{aligned} y_1 - y_0 &= y_2 - y_1 = p \\ y_1 - y &= p \cdot dh \\ y - y_0 &= p(1 - dh) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

を代入すると、最終的に (22) 式を得る。

$$\begin{aligned} T_{(x_0, y)} &= \frac{(-p \cdot dh) \cdot (-1 - dh) \cdot p}{(-p) \cdot (-2p)} T(x_0, y_0) + \frac{p(1 - dh) \cdot (-p)(1 + dh)}{(p) \cdot (-p)} T(x_0, y_1) \\ &+ \frac{p(1 - dh) \cdot (-p \cdot dh)}{(2p) \cdot (p)} T(x_0, y_2) \\ &= \frac{1}{2} (dh^2 + dh) \cdot T(x_0, y_0) + (1 - dh^2) \cdot T(x_0, y_1) + \frac{1}{2} (dh^2 - dh) \cdot T(x_0, y_2) \\ &= \frac{1}{2} (T(x_0, y_0) - 2T(x_0, y_1) + T(x_0, y_2)) dh^2 + \frac{1}{2} (T(x_0, y_0) - T(x_0, y_2)) dh + T(x_0, y_1) \end{aligned} \quad (22)$$

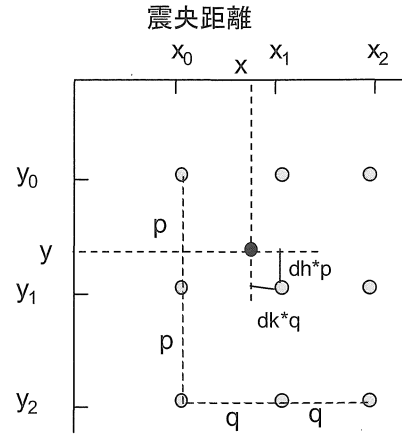


図2 S波走時の計算法

以下、同様にして (23) 式, (24) 式が得られる。

$$T(x_1, y) = \frac{1}{2}(T(x_1, y_0) - 2T(x_1, y_1) + T(x_1, y_2)) dh^2 + \frac{1}{2}(T(x_1, y_0) - T(x_1, y_2))dh + T(x_1, y_1) \quad (23)$$

$$T(x_2, y) = \frac{1}{2}(T(x_2, y_0) - 2T(x_2, y_1) + T(x_2, y_2)) dh^2 + \frac{1}{2}(T(x_2, y_0) - T(x_2, y_2))dh + T(x_2, y_1) \quad (24)$$

(22) ~ (24) 式から、最終的に (25) 式を得る。

$$T(x, y) = \frac{1}{2}(T(x_0, y) - 2T(x_1, y) + T(x_2, y)) dk^2 + \frac{1}{2}(T(x_0, y) - T(x_2, y))dk + T(x_1, y) \quad (25)$$

ここに $T(x, y)$ が求める走時であり, $T(x, y)$ を地震の発生時刻に加算して到達時刻とする。

6. むすび

愛知工業大学地震防災コンソーシアムのプロジェクトにおいて、緊急地震速報の配信を開始してから2年が経過した。この間の配信は、研究目的での試験配信であったが、緊急地震速報においては、気象庁から震源位置とマグニチュード、地震発生時刻が配信され、受信した側で、その場所における震度と予想到達時刻を算出する仕組みになっている。そのため、「気象庁以外の者による地震動の予報業務」と位置づけられ、気象庁長官の許可を受けることが義務付けられた。このことは、当プロジェクトにおける緊急地震速報の配信が、研究目的の配信から業務目的の配信へと切り替わったことを意味する。

配信事業者間の差異をなくすため、計算手法の共通化を図る必要があり、気象庁から計算手法についての詳しい提示があった。これに従ってプログラムの変更を行い、2008年4月1日から新プログラムに変更した。

本プロジェクトでは、引き続き、緊急地震速報に基づく各観測点での予測震度の精度向上のための研究を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 松岡昌志・翠川三郎：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資料集，23-24（1994）
- 2) 宇津徳治：地震学，共立出版（1977）
- 3) 司宏俊・翠川三郎：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，【523】63-70（1999）
- 4) 宇津徳治：各種のマグニチュードの間の関係，地震研究所彙報，Bull. Earthq. res. Inst., vol.57, pp.465-497（1982）
- 5) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，51-56（1999）