地震動強さの距離減衰式

東京工業大学都市地震工学センター*

翠川 三郎

Ground Motion Attenuation Relations

Saburoh MIDORIKAWA

Center for Urban Earthquake Engineering,
Tokyo Institute of Technology, 4259-G3-3 Nagatsuta,
Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

(Received April 2, 2008; Accepted August 26, 2008)

Recent studies on ground motion attenuation relations in the United States and Japan are reviewed. In the United States, the Next Generation of Ground Motion Attenuation Models (NGA) Project was initiated to develop the updated relations. In the proposed models for peaks and response spectra, effects of faulting style, hanging wall, fault top depth, nonlinear site amplification and basin depth are incorporated. In Japan, owing to recent development of strong motion instrumentation such as the K-NET, many updated attenuation relations not only for peaks and spectral response but also for instrumental seismic intensity and energy spectra have been individually developed. The terms considered in the relations are similar to those for the models of the NGA project. The variance of ground motion in the attenuation relations is also being discussed earnestly because the variance controls the results of seismic hazard analyses. Further efforts should be continued to improve the attenuation relations in response to increasing near-field ground motion recordings and progress of theoretical studies on strong ground motion.

Key words: Attenuation relation, Strong ground motion, Variance, NGA project

§ 1. はじめに

強震動予測の手法として、地震動強さの距離減衰式が提案され、その簡便さから広く利用されてきた。距離減衰式は観測された強震記録の統計解析に基づくもので、古くは、Gutenberg and Richter (1956) や金井 (1966) の先駆的な研究がある。その後、観測記録の蓄積とともに数多くの研究がなされてきた。米国の研究については、Trifunac and Brady (1976), Campbell (1985), Joyner and Boore (1988), Abrahamson and Shedlock (1997), Campbell (2003) などにより、わが国の研究については、

望月 (1983), 井上・他 (1989), 福島 (1993), 大野 (2005) などにより、世界各地での研究については、Douglas (2003, 2004, 2006) などにより、それぞれ研究のレビューがなされている。ここでは、距離減衰式の基本について説明した上で、強震動予測のための最近の距離減衰式の特徴や高度化の方向性について述べたい。

なお、距離減衰式は、距離による地震動の減衰だけでなく地震規模などの影響も含めて地震動強さのレベルを決めるものであるので、距離減衰式では意味が狭くとらえられる恐れがあり、地震動予測式 (Ground Motion Prediction Equation) と呼ぶべきとの意見もある [Boore and Atkinson (2007)] が、ここでは、従来通り距離減衰式と呼ぶこととする。

§ 2. 距離減衰式の基本

ある地震の際に各地点で観測された地震動強さ(振幅)と距離の関係をプロットすると Fig. 1 のように、振幅 (A) が震源からの距離 (X) とともに減衰していることがわかる。距離とともに振幅は減衰するが、距離が非常に近くなると、振幅は飽和する傾向がみられる。距離が同じであれば、地震規模 (M) が大きくなれば振幅は大きくなる。また、地盤条件によっても地震動の強さは異なる。さらに、地震の規模が同じでも地震のタイプ等によって地震動の強さは変わる。例えば、地震調査研究推進本部 (2007) による地震動予測地図で採用されている司・翠川

Fig. 1. Peak ground acceleration vs. distance for the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan earthquake.

*〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-3

(1999) の距離減衰式では以下のような関数型が用いられている.

$$\log A = aM - b \log(X + d(M)) + c_i + e_j + fD + kX \quad (1)$$

右辺の第1項の a は地震動強さが M に依存する割合を示す係数で、地震動強さとして最大加速度や最大速度を用いた場合には、係数 a は一般に 0.5 程度の値をとる. 第2項の b は距離による減衰の割合を表す係数で、1 の値がよく用いられ、ごく浅い地震の場合には観測結果をよく説明している. X に $d(M)$ を加えることで、 X が 0 になっても地震動強さ A は飽和するようになっている.

$d(M)$ を M の関数としているのは、震源に非常に近いところでは地震動の強さが飽和する値は地震規模によってあまり変化しないことからである. 既往の距離減衰式では、標準的な地盤で $500 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ 程度の最大加速度値で飽和するものが多い. ただし、後述するように距離減衰式からの値と個々の観測値との差は小さくないので、このことが震源近傍での最大加速度が 1000 cm/s^2 を上回らないということの意味するものではない.

第3項の c_i は地盤条件 i による変数で、通常の地盤に対して岩盤での最大加速度は 7 割程度となる結果となっている. 第4項の e_j は地震のタイプ j による変数で、スラブ内地震ではプレート間地震や地殻内地震に比べて最大加速度が 2 倍程度大きくなる結果となっている. 第5項の f は震源深さ (D) に依存する割合を示す係数で、震源深さが 50 km 深くなると最大加速度が 3 割程度大きくなる結果となっている. 最後の項は伝播経路での粘性減衰等を表す項で、距離が遠い場合に影響を及ぼす. この式では、地震の規模・タイプ・深さや、観測点の地盤条件、震源から観測点までの距離、の 5 つのパラメータ (変数) で地震動の強さが予測される.

§ 3. NGA プロジェクト

米国では地震ハザード軽減プログラムの一環として、1996 年に地震ハザードマップが作成されたが、その際に提案されている様々な距離減衰式からどれを選択するかが問題となった. これをひとつの契機として、次世代型距離減衰式の開発プロジェクト (“Next Generation of Ground Motion Attenuation Models” (NGA) Project) が開始され、2003 年に 5 つの開発チーム [Abrahamson and Silva (2007), Boore and Atkinson (2007), Campbell and Bozorgnia (2007), Chiou and Youngs (2006), Idriss (2007)] が選ばれた [Campbell and Bozorgnia (2006)].

そのために必要とされる強震記録のデータベースが整備され、世界各地で発生した地殻内地震 172 地震による約 3500 記録からなるデータベースが作成された

[Power *et al.* (2006)]. このうち、全データの約 50% は 1999 年台湾・集集地震とその余震による観測記録が占めている. また、 M_w が大きい地震における震源近傍でのデータはカリフォルニア以外の地震 (1999 年 Kocaeli 地震, 2002 年 Denali 地震) によるものが大部分を占めている. 日本の観測記録は 1995 年兵庫県南部地震における 22 記録が含まれているのみである.

開発された距離減衰式が耐震設計の実務で利用されるように、1) 地震動パラメータについては、最大加速度・速度・変位および周期 0 ～ 10 秒の 5% 減衰の加速度応答スペクトル, 2) 成分については、水平 2 方向成分の平均および断層走向直交・平行成分, 3) 予測対象とする地震は米国西部の浅発地殻内地震, 4) マグニチュードの範囲は 5 ～ 8.5, 5) 距離の範囲は 0 ～ 200 km, 6) 米国の耐震規定で使われるような一般的な地盤分類が考慮されること、の項目が要求された. なお、ここで用いられている水平 2 方向成分の平均とは、観測された 2 成分の単純な平均ではなく、水平 2 成分から様々な方向の成分を計算し、その平均をとったものである [Boore *et al.* (2006)].

また、技術的に検討すべき主な事項として、1) 破壊伝播効果, 2) 地震動の方向性, 3) 断層上盤効果, 4) 断層タイプの影響, 5) 断層深さの影響, 6) 応力降下量の影響, 7) 基準となる岩盤に対するサイト増幅率, 8) 3 次元深部地下構造の影響、があげられた. これをサポートするための数値シミュレーションも行われ、観測記録の統計解析と理論的な検討が相互に補完する包括的な研究プロジェクトとなっている [Power *et al.* (2006)]. なお、ここで紹介するものは NGA-E と呼ばれる第一段階のもので、数値計算結果はスケーリングのモデル化にのみ利用されている. 数値計算結果の値そのものを積極的に取り入れようとする NGA-H と呼ばれる第二段階のものも計画されている [Abrahamson and Silva (2007)].

Table 1 に前述の 5 つのチームから提案された距離減衰式で考慮されている項目を示す. 破壊伝播効果については、プロジェクトの期限内に十分な検討が行えなかったこと [Campbell (2008)] から考慮されていないが、Abrahamson and Silva (2007) では既往の研究結果 [Somerville *et al.* (1997), Abrahamson (2000)] を使うことができるとして紹介されている. 断層タイプによる地震動強さの違いは、いずれの距離減衰式でも考慮されている. これにより、地震動強さは、逆断層 > 横ずれ断層 > 正断層の順となる場合が多いが、その違いは大きなものとはなっていない.

また、断層上盤側が下盤側よりも地震動強さが大きくなる断層上盤効果が、多くのモデルで考慮されている.

Table 1. Terms considered in NGA attenuation models.

	Abrahamson and Silva	Boore and Atkinson	Campbell and Bozorgnia	Chiou and Youngs	Idriss
Directivity	△	×	×	×	×
Style of Faulting	○	○	○	○	○
Hanging Wall	○	△	○	○	×
Fault Top Depth	○	×	○	○	×
Nonlinear Site Amplification	○	○	○	○	×
Basin Depth	○	×	○	×	×

これらのモデルでは、断層面上端の深さも考慮されている。これは、地表断層よりも地中断層（地表を切らない断層）の方が地震動が強くなるという特性を表現するためのものである。

サイト特性については、地表から深さ 30 m までの平均 S 波速度 (V_s30) をパラメータとして、地盤の非線形化も考慮できるモデルが導入されている。また、いくつかのモデルでは、深部の堆積層厚により周期 1 秒以上のサイト特性を補正することができる。これら 2 つの効果に関する係数は観測記録のみから決められたものでなく、数値シミュレーションの結果を拘束条件としている。

これらのモデルは複雑な式からなっていて、電卓で簡単に計算できるようなものではないが、Excel で計算できるようなファイルも準備されている [PEER (2008)]。これらのモデルの比較も行われており [Abrahamson *et al.* (2008)]、データの多い $M 5.5 \sim 7.5$ では大きな違いがないことが確認されている。

これらのモデルの一例として、Abrahamson and Silva (2007) の結果を示す。Fig. 2 は岩盤での周期 0.2 秒および 3 秒の加速度応答値の距離減衰を示したものである。距離がごく短い 1 km の場合、短周期では $M 5$ から振幅が飽和しているが、長周期では $M 7$ を越えないと飽和する傾向がみられない。なお、中間報告では、 M が非常に大きくなると逆に振幅が小さくなる (Over Saturation) という結果も報告されていたが、最終的な結果には、数値シミュレーションの結果を参照して、Over Saturation が起こらないようなモデル化がなされている。

Fig. 3 は断層上盤効果を示した図で、上盤側では下盤側に比べて最大で 3 倍程度地震動が強くなる結果を示している。また、断層が地表に現れる場合 (実線) に比べて断層が地表に現れない場合 (点線) には 2 倍程度地震動が強くなることも示されている。

§ 4. 最近の日本の距離減衰式の特徴

兵庫県南部地震以降に強化された K-NET などの強震

Fig. 2. Magnitude scaling for spectral acceleration at $T = 0.2$ s (a) and $T = 3$ s (b) for strike-slip earthquakes and rock site conditions [Abrahamson and Silva (2007)].

Fig. 3. Hanging wall effect on peak acceleration for $M 7$ reverse faulting earthquakes [Abrahamson and Silva (2007)].

観測網により強震記録が多数得られるようになり、その恩恵を受けて、わが国でも新しい距離減衰式が近年多数の研究者により個別に提案されている [例えば、西村・堀家 (2003), Kanno *et al.* (2006), Zhao *et al.* (2006), 松崎・他 (2006), 内山・翠川 (2006), 片岡・他 (2006), 大淵・高田 (2007)]. これらには、地震動の最大振幅や応答スペクトルだけでなくエネルギースペクトルや震度の予測式も含まれている。

Kanno *et al.* (2006) は、1968 年十勝沖地震から 2003 年十勝沖地震までの日本の強震記録に加えて、カリフォルニアの 8 地震およびトルコの 2 地震の記録を用いて、最大加速度、最大速度および加速度応答スペクトルの距離減衰式を提案している。深さ 30 km より浅い地震と深い地震に分けて、それぞれに対して、 M_w 、断層最短距離、 V_{s30} をパラメータとした式が得られている。

これと同様の日本の強震記録を用いて、内山・翠川 (2006) は、工学的基盤 (V_{s30} で 500 m/s 程度) での応答スペクトルの距離減衰式を、 M_w 、震源深さ、断層最短距離、をパラメータとして提案している。これに V_{s30} から評価される地盤の増幅率 [内山・翠川 (2003)] を乗ずれば地表の応答スペクトルが推定できる。

これらの 2 式は、地震規模、震源深さ、断層距離、 V_{s30} をパラメータとした地震動予測式であり、NGA プロジェクトで提案された式と共通する点がある。Fig. 4 に $M 6.5$ のごく浅い横ずれ断層から 10 km 離れた岩盤地点での Abrahamson and Silva (2007), Campbell and Bozorgnia (2007), Kanno *et al.* (2006) および内山・翠川 (2006) の各式から得られるスペクトルの比較 [内山 (2008)] を示す。それぞれの結果に大きな違いはみられないが、内山・

翠川 (2006) の結果が他の結果に比べてやや大きい。これは、岩盤の定義が V_{s30} で 500 m/s と他のもの (V_{s30} で 760 m/s) と異なることがその理由のひとつと考えられる。

一方、これらの式には、NGA プロジェクトで検討対象となった、破壊伝播効果や断層上盤効果、深部堆積層厚の影響は考慮されていないが、破壊伝播効果については、観測記録や地震動シミュレーションにより補正係数が提案されている [大野・他 (1998), 司・翠川 (2001), 引田・他 (2006)]. 断層上盤効果については、簡単な地震動シミュレーションから検討され [翠川 (1989), Ohno *et al.* (1993)], 2004 年新潟県中越地震などの逆断層の内陸地震での観測記録にもその影響がみられることが指摘されている [Midorikawa (2006)] が、観測記録に基づく十分な検討はみあたらない。

深部堆積層厚の影響については、主要な堆積盆地に対して長周期での地震動スペクトルの補正係数が観測記録の分析に基づいて提案されていたり [建築研究所・日本建築センター (1992), 座間 (2000)], 関東平野での K-NET の記録に基づいて基盤深度と補正係数の関係が提案されている [増井・翠川 (2006)] が、検討例は比較的限られている。

このように最近の日本の距離減衰式も米国の NGA プロジェクトによる式と同様の方向、すなわち、近年の強震観測網の充実に伴って豊富になりつつある観測記録を利用し、理論的結果から予想される結果も加味して距離減衰式を補正するという方向で高度化が進められている。しかし、断層上盤効果など検討が十分でない面もみられる。2007 年新潟県中越沖地震をはじめとする近年の地震により震源近傍での強震記録は益々増加しており、理論的な研究の進展とあわせて、距離減衰式のさらなる高度化を進める必要があろう。

§ 5. 距離減衰式のバラツキ

距離減衰式は個々のデータから得られる平均的な関係であり、Fig. 1 に示したように、実際の個々の観測結果は距離減衰式からバラツキを持って分布している。確率論的地震動評価において低確率での地震動強さは、このバラツキに大きく支配されるため、近年の研究では、距離減衰式から得られる平均的な地震動強さのみならず、そのバラツキについても重要視されている。

Fig. 5 は司・翠川 (1999) の距離減衰式からの最大加速度値に対する観測値の比をとり、その対数の値の頻度分布を示したものである。距離減衰式に対する観測値のバラツキは対数正規分布となっている。この場合の標準偏差は 0.3 であり、既往の他の距離減衰式の標準偏差も

Fig. 4. Comparison of acceleration response spectra for $M 7$ shallow strike-slip earthquake at rock site with distance of 10 km [Uchiyama (2008)].

Fig. 5. Residuals of peak ground acceleration from the attenuation relationship [Si and Midorikawa (1999)].

同程度の値を示す。

このバラツキについては、 M 依存性、距離依存性、振幅依存性などが指摘されている。前述の NGA モデルのなかで、Campbell and Bozorgnia (2007) は、地盤の非線形性の影響によりバラツキに振幅依存性がみられるとの立場から、岩盤での加速度が大きいほど、また、地盤が軟弱なほどバラツキが小さくなるモデルを示している。Abrahamson and Silva (2007) は地盤の線形性の影響に加えてバラツキの M 依存性も考慮したモデルを示している。

日本の記録による検討では、翠川・大竹 (2003) は、バラツキの M 依存性、距離依存性もややみられるが、振幅依存性が最も顕著にみられ、これが M 依存性、距離依存性の相乗効果によるものと推測している。しかし、その後の検討では振幅依存性はあまり明確にはみられていない [坂本・他 (2006)]。

森川・他 (2006) は同一の震源域で発生した複数の地震による同一地点での観測記録のバラツキは、様々な地震による様々な地点での記録に基づく距離減衰式の標準偏差に比べて明らかに小さく、地点を特定すれば予測結果のバラツキは小さくなることを示している。Wang and Takada (2006) も同様の結果を示している。

また、バラツキの要因の理論的な検討として、震源特性に関して、山田・他 (2007) や福喜多・他 (2006)、糸井・他 (2007) はアスペリティの位置や破壊開始点の位置などを变化させた地震動シミュレーション結果に基づいて距離減衰式を作成し、そのバラツキの大きさを示している。

伝播特性に関しては、地殻やマンツルの減衰構造の影響 [中村・植竹 (2002)] や地殻の速度構造のゆらぎの影響 [Hoshiba (2000)] などが、地盤特性に関しては、観

測点毎の地盤構造による増幅特性の違い [翠川・大竹 (2003)] や地震波の散乱現象によって生ずる地盤増幅特性のゆらぎの影響 [Abrahamson (1988)] などが検討されている。距離減衰式のバラツキの要因については検討がなされるようになったばかりで不明の点が多く、バラツキのモデル化についても今後の大きな検討課題のひとつである。

§ 6. ま と め

最近の米国および日本での距離減衰式の研究について紹介した。これらの研究では、近年の強震観測網の充実に伴って豊富になりつつある観測記録を利用し、理論的結果から予想される結果も加味して距離減衰式を構築するという方向で高度化が進められている。2007 年新潟県中越沖地震をはじめとする近年の地震により震源近傍での強震記録は益々増加している。理論的な研究の進展も踏まえて、今後も解析を進め、バラツキのモデル化も含め距離減衰式のさらなる高度化への努力を継続する必要がある。

謝 辞

大成建設技術センター内山泰生氏には NGA プロジェクトについてご教示いただいた。

文 献

- Abrahamson, N. A., 1988, Statistical properties of peak ground accelerations recorded by the SMART 1 array, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 26-41.
- Abrahamson, N. A., 2000, Effects of rupture directivity on seismic hazard analysis, *Proc. Sixth International Conference on Seismic Zonation (CD-ROM)*, 50.1-50.6.
- Abrahamson, N. A. and K. M. Shedlock, 1997, Overview, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 9-23.
- Abrahamson, N. A. and W. J. Silva, 2007, Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, PEER Report 200X/XX, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley, 353 pp.
- Abrahamson, N., G. Atkinson, D. Boore, Y. Bozorgnia, K. Campbell, B. Chiou, I. M. Idriss, W. Silva, and R. Youngs, 2008, Comparison of the NGA ground-motion relations, *Earthquake Spectra*, **24**, 45-66.
- Boore, D. M. and G. M. Atkinson, 2007, Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, PEER Report 2007/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley, 110 pp.
- Boore, D. M., J. Watson-Lamprey, and N. A. Abrahamson, 2006, Orientation-independent measures of ground motion,

- Bull. Seism. Soc. Am., **96**, 1502-1511.
- Campbell, K., 1985, Strong motion attenuation relations: A ten-year perspective, *Earthquake Spectra*, **1**, 759-804.
- Campbell, K., 2003, Strong-motion attenuation relations, in "International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology Part B", ed. by W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, 1003-1012.
- Campbell, K., 2008, personal communication.
- Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia, 2006, Next Generation Attenuation (NGA) empirical ground motion models: Can they be used in Europe, *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (CD-ROM)*, 458.1-458.10.
- Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia, 2007, Campbell-Bozorgnia NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, PEER Report 2007/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley, 120 pp.
- Chiou, B. S.-J. and R. R. Youngs, 2006, Chiou and Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds, Interim Report Issued for USGS Review, 71 pp.
- Douglas, J., 2003, Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates, *Earth-Science Reviews*, **61**, 43-104.
- Douglas, J., 2004, Ground motion estimation equations 1964-2003, Research Report Number 04-001-SM, Imperial College, 217 pp.
- Douglas, J., 2006, Errata of and additions to 'Ground motion estimation equations 1964-2003', Intermediary Report BRGM/RP-54603-FR, 99 pp.
- 福喜多 輝・壇 一男・宮腰淳一・岡崎 敦, 2006, 統計的グリーン関数法に用いるランダムパラメータが強震動予測結果に及ぼす影響, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 0083.1-0083.4.
- 福島美光, 1993, 地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動向, *地震* **2**, **46**, 315-328.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter, 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, paper II, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **46**, 105-195.
- 引田智樹・池浦友則・八代和彦, 2006, 強震記録に基づく Near-Fault Rupture Directivity 効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, **B1**, 13-14.
- Hoshihara, M., 2000, Large fluctuation of wave amplitude produced by small fluctuation of velocity structure, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **120**, 201-217.
- Idriss, I. M., 2007, Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes, Interim Report Issued for USGS Review, 37 pp.
- 井上涼介・神山 真・亀田弘行・土岐憲三・野田 茂・野田節男, 1989, 強震地動と設計地震動, 土木学会(編)「動的解析と耐震設計 第1巻 地震動・動的物性」, 技報堂出版, 3-80.
- 糸井達哉・内山泰生・坂本成弘・翠川三郎, 2007, 統計的グリーン関数を用いた地震動強さのパラツキの評価 その2 アスペリティと破壊開始点の位置の影響, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, S145-017.
- 地震調査研究推進本部, 2007, 「全国を概観した地震動予測地図」2007 年版 < http://www.jishin.go.jp/main/chousa/07_yosokuchizu/index.htm >.
- Joyner, W. B. and D. M. Boore, 1988, Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, in "Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation", ed. By J. Lawrence Von Thun, American Society of Civil Engineers, 43-102.
- 金井 清, 1966, 地震動の振動特性に関する実験式, 日本地震工学シンポジウム(1966)講演集, 1-4.
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima, 2006, A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 879-897.
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明, 2006, 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, **62**, 740-757.
- 建築研究所・日本建築センター, 1992, 設計用入力地震動作成手法技術指針(案)本文解説編, 73 pp.
- 増井大輔・翠川三郎, 2006, 工学的基盤での地震記録にみられる深い地盤構造による地盤増幅特性, 土木学会論文集 A, **62**, 225-232.
- 松崎伸一・久田嘉章・福島美光, 2006, 断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発, 日本建築学会構造系論文集, **604**, 201-208.
- 翠川三郎, 1989, 小地震の加速度包絡波形の合成による大地震の最大加速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, **398**, 23-30.
- Midorikawa, S., 2006, Some problems on empirical prediction of strong motion, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **81**, 253-258.
- 翠川三郎・大竹 雄, 2003, 地震動強さの距離減衰式にみられるパラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, **3**, 59-70.
- 望月利男, 1983, 強震地動と最大地動予測式, 日本建築学会(編)「地震動と地盤-地盤震動シンポジウム 10 年の歩み」, 62-81.
- 森川信之・神野達夫・成田 章・藤原広行・奥村俊彦・福島美光, 2006, 震源域と観測点を特定した地震動強さのばらつき-観測記録に基づく検討-, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 0005.1-0005.4.
- 中村亮一・植竹富一, 2002, 加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィー, *地震* **2**, **54**, 475-488.
- 西村利光・堀家正則, 2003, 強震ネットワーク(K-NET)データから推定した水平・上下最大加速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, **571**, 63-70.
- 大淵正博・高田毅士, 2007, 時刻歴波形構築のための地震動エネルギースペクトルに関する距離減衰式の提案, 日本建築学会構造系論文集, **611**, 21-27.
- 大野 晋, 2005, 距離減衰式のバリエーション, 「地盤震動-現象と理論」, 丸善, 194-205.

- Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura, and M. Takemura, 1993, Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, **218**, 69-81.
- 大野 晋・武村雅之・小林義尚, 1998, 観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 133-138.
- PEER, 2008, Next Generation of Ground Motion Attenuation Models (NGA) Project, <http://peer.berkeley.edu/products/rep_nga_models.html>.
- Power, M., B. Chiou, N. Abrahamson, and C. Roblee, 2006, The "Next Generation of Ground Motion Attenuation Models" (NGA) project: An overview, *Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering (CD-ROM)*, 2022.1-2022.10.
- 坂本成弘・内山泰生・翠川三郎, 2006, 応答スペクトルの距離減衰のばらつき, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 0064.1-0064.4.
- 司 宏俊・翠川三郎, 1999, 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集*, **523**, 63-70.
- 司 宏俊・翠川三郎, 2001, 統計的グリーン関数法に基づく地震動最大振幅に対する破壊伝播効果による方位依存性の評価, *日本建築学会構造系論文集*, **546**, 47-53.
- Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson, 1997, Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 199-222.
- Trifunac, M. D. and A. G. Brady, 1976, Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **4**, 455-471.
- 内山泰生, 2008, 私信.
- 内山泰生・翠川三郎, 2006, 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, **606**, 81-88.
- 内山泰生・翠川三郎, 2003, 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, *日本建築学会構造系論文集*, **571**, 87-93.
- Wang, M. and T. Takada, 2006, A Bayesian updating framework for prediction of site-specific seismic ground motion, *J. Struct. Const. Eng. (Transactions of AIJ)*, **607**, 183-191.
- 山田雅行・先名重樹・藤原広行, 2007, 強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメータのバラツキについて～, *日本地震工学会論文集*, **7**, 43-60.
- 座間新作, 2000, やや長周期帯域における加速度スペクトルの半経験的表現, *消防研究所報告*, **89**, 1-10.
- Zhao, J. X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H. T. Thio, P. Somerville, Y. Fukushima, and Y. Fukushima, 2006, Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 898-913.