

鉄道システムの地震リスク評価のための 地震動波形群の作成

坂井 公俊, 室野 剛隆

鉄道構造物、車両等が保有する地震リスクを評価する際には、地震動¹を確率論的に評価する必要がある。本稿では、地震危険度解析に基づく地震の確率論的評価結果と地震動予測によって得られた時刻歴波形を組み合わせることで、発生確率を有する地震波形群（生起確率付地震動群）の作成方法について紹介する。また、適用の一例として東京地域における試算を行ったので、その結果もあわせて示す。本手法を用いることにより、各種鉄道システムの地震リスクを評価することが可能となり、地震対策の順位付けなどを戦略的に実施する際の基礎資料となることが期待される。

キーワード：地震リスク、確率論的地震危険度解析、生起確率付地震動群

1. はじめに

近年、鉄道の地震に対する安全性向上のために、構造物の耐震補強や車両の脱線対策、早期地震警報のための地震計の拡充などが活発に推進されている。しかしながらこのような対策を全路線において同時に行うことは現実的ではなく、長期間にわたって順次対策を実施していくこととなる。こうした中で、地震対策を優先的に行う地点、構造を選択する際には、構造物や車両が保有する地震リスクを評価し、リスクが高い、もしくは対策効果の大きな地点、構造から実施する、といった補強戦略をとることが有効な手法の一つであると考えられる。

構造物、車両等が保有する地震リスクを評価するには、その地点で想定される地震動を確率論的に評価する必要がある。地震動の確率論的評価法（確率論的地震危険度解析）については、古くから研究が行われている（例えば [1]）。また兵庫県南部地震以降、多数の地震調査が実施された結果として、活断層の位置や発生間隔等の情報が飛躍的に蓄積されており、電力、道路など数多くの分野においてこれらの成果は活用されている [2]~[4]。さらに米国では、原子力発電所施設の確率論的地震安全性評価（地震 PSA）や、土木・建築構造物の設計地震動を設定する際に確率論的な概念が積極的に取り入れられている [5]。

一般に、この確率論的地震危険度解析からは地震動

の最大値（最大加速度、最大速度など）の期待値が得られるが、構造物の被害算定や車両の脱線判定を詳細に実施する際には、動的解析を用いることが多く、地震動の最大値情報のみではリスク評価が困難な場合がある。さらに、例えば最大加速度 $PGA=500$ gal といった同じ指標を持った地震動を考える場合においても、その地震を発生させる断層の規模や震源距離、対象地点の地盤条件などの影響により、地震動の継続時間や周期特性が大幅に異なることは明らかである。リスク評価においても従来のような最大加速度 PGA や最大速度 PGV のような指標で構造物や車両の安全性を評価するのではなく、動的解析による評価が望まれつつある。そこで本稿では、確率論的地震危険度解析に基づいて、想定した最大加速度を引き起こす可能性が高い断層とその発生確率を特定し、その想定断層から引き起こされる地震波形群（生起確率付地震動群 [6]）をシミュレートする手法について紹介する。本手法の概略的なフローを図 1 に示すが、2, 3 章ではこのフローの流れに従って説明を行う。

最後に 4 章において本手法の適用例として、サンプル地点における地震発生確率、生起確率付地震動群を算定する。

2. 確率論的地震危険度解析

2.1 地震活動のモデル化

活断層調査結果や、過去の地震観測、解析結果に基づいて、断層位置、地震活動度のモデル化を行う。地

¹ 断層のずれ（地震）に伴って発生する地面の振動のこと。

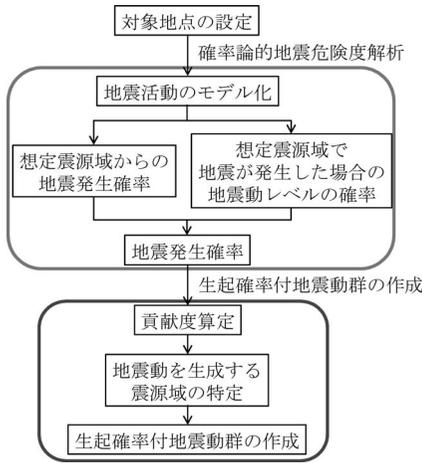


図1 本手法の概略的な流れ

震活動のモデルを作成する際に必要な過去の地震活動を集約したものはいくつか存在する (例えば [7]) が、本検討では地震調査研究推進本部 [2] による結果をもとに以下の3種類の地震活動に対してモデル化を行った。

- (a) 内陸活断層による地震 (計 332 地震)
- (b) 海溝型地震 (計 34 地震)
- (c) 背景領域による地震 (計 54 領域)

モデル化された震源域を図2にそれぞれ示す。なお、ここで定義した背景領域とは、活断層調査を行っても断層位置を特定することが困難な比較的小規模 (おおむね M6.5 以下) の地震のことを指す。この背景領域による地震は、日本列島をいくつかの地帯構造に区切り、その領域内でランダムに地震が発生するとしている。

以上の震源域に対してそれぞれ、断層の幅、長さ、走向、傾斜角といった位置情報や、地震が発生した場合のマグニチュード、地震の発生間隔、過去の発生履歴、

地震発生の確率モデル、といった地震の規模、発生に関する情報を設定し、データベースとしてまとめている。

2.2 地震発生確率の算定

前節によって評価されたすべての地震発生域を考慮したうえで、対象地点において対象期間 (t 年間) に少なくとも一度は地震動強度 Y (最大加速度, 最大速度など) が y を超える確率 $P(Y \geq y; t)$ は、次式で算出される。

$$P(Y \geq y; t) = 1 - \prod_{k=1}^n \{1 - P_k(Y \geq y; t)\} \quad (1)$$

ここで、 $P_k(Y \geq y; t)$ は k 番目の地震発生域において対象期間に少なくとも一度は地震動強度 Y が y を超える確率であり、以下の式 (2), (3) で表現される。

(1) 内陸活断層による地震および海溝型地震の場合

既往の地震調査結果に基づき、過去の地震が発生してからの経過時間を無視する場合には、地震が定常ポアソン過程に従って発生するとし、過去の発生履歴を考慮する場合は、非定常な地震発生確率に従って発生するとして設定した。

まず、地震の発生が定常ポアソン過程に従うとした場合に、 $P_k(Y \geq y; t)$ は次式で表現される。

$$P_k(Y \geq y; t) = 1 - \exp\{-\nu_k(Y \geq y) \times t\} \\ = 1 - \exp\left\{-\nu(k) \sum_i \sum_j P(Y \geq y | r_i, m_j) \right. \\ \left. \times P_k(r_i) P_k(m_j | r_i) \times t\right\} \quad (2)$$

ここで、 $\nu_k(Y \geq y)$ は k 番目の地震によって地震動強度 Y が y を超える確率、 $\nu(k)$ は k 番目の地震の年発生確率 (1年あたりの発生回数)、 $P(Y \geq y | r_i, m_j)$ は距離 r_i の位置に存在する地震域において、地震規模

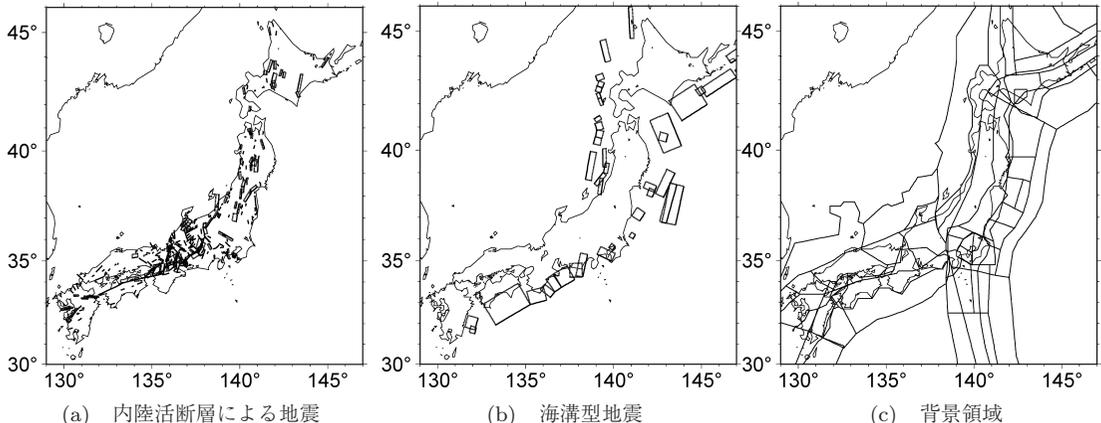


図2 地震活動のモデル化

m_j の地震が発生した場合に、地震動強度 Y が y を超える条件付確率である。

次に、地震の発生が非定常であるとした場合には、 $P_k(Y \geq y; t)$ は次式で表現される。

$$\begin{aligned} P_k(Y \geq y; t) &= P(k; t) P(Y \geq y|k) \\ &= P(k; t) \sum_i \sum_j P(Y \geq y|r_i, m_j) \\ &\quad \times P_k(r_i) P_k(m_j|r_i) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $P(k; t)$ は k 番目の地震が対象期間において発生する確率であり、BPT 分布 (Brownian passage-time distribution) による更新過程で評価される [8][9]。地震の発生間隔が平均 μ 、ばらつき α の BPT 分布に従う場合、確率密度関数は次式で表現できる。

$$f(t; \mu, \alpha) = \left(\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\mu\alpha^2 t} \right) \quad (4)$$

BPT 分布、ポアソン分布の試算例として、平均発生間隔 1000 年の地震を想定した場合の、現在からの経過時間に伴う地震発生確率の変化を図 3 に示す。過去の発生履歴を考慮することで、発生確率の立ち上がりのタイミングが変化していることがわかる。

(2) 背景領域による地震の場合

背景領域による地震においては、発生位置と地震の規模をそれぞれ独立事象として扱い、発生時系列は全て定常ポアソン過程として表現する。発生位置は、背景領域内においてランダムに発生するものとした。また、地震が発生した場合の規模の確率分布は、各領域ごとに設定された最大マグニチュード m_{\max} と最小マグニチュード m_{\min} の間の規模を持つ地震が、次式で表現される Gutenberg–Richter の関係式 [10] に従って発生すると仮定する。

$$\log_{10} N(m) = a - bm \quad (5)$$

ここで、 m は地震規模 ($m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$)、 a, b は歴史地震データより推定される係数である。

以上より、背景領域において地震が発生した場合の位置と規模が設定されたので、式 (2) を用いて各領域からの $P_k(Y \geq y; t)$ が算定される。

2.3 地震動強度の算定 (距離減衰式)

前節の式 (2)、(3) における、 $P(Y \geq y|r_i, m_j)$ を求めるには、地震動の距離減衰式を用いる。構造物の地震リスクは、対象地点直下の地盤条件の影響を強く受ける。そのため、確率論的地震危険度解析によって得られる結果も、対象地点における表層地盤の影響を考慮可能となっていることが望ましい。そこで今回はま

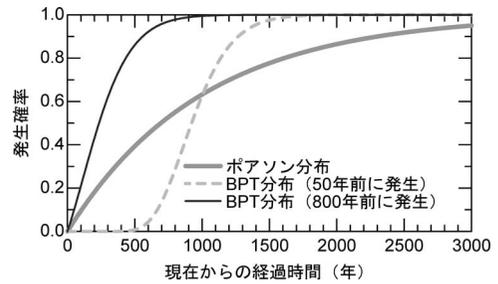


図 3 地震発生確率の試算例 ($\mu = 1000, \alpha = 0.24$)

ず耐震設計上の基盤面 (工学的基盤面²、せん断弾性波速度 $V_s = 400$ m/s 程度の連続地層) において地震動を評価することとした。

今回用いる距離減衰式としては、司・翠川の最大加速度距離減衰式 [11] に深部地盤の影響 [12] と表層地盤の影響 [13] を考慮したものをを用いることとした。司・翠川による最大加速度距離減衰式は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \log PGA &= 0.50M_w + 0.0043D + d + 0.61 \\ &\quad - \log(X + 0.0055 \cdot 10^{0.50M_w}) - 0.003X \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 PGA : 最大加速度 (gal), 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 (地殻内地震は $d = 0.00$, プレート間地震は $d = 0.01$, プレート内地震は $d = 0.22$), X : 断層最短距離 (km) である。

3. 生起確率付地震動群の作成

3.1 貢献度の算定、地震発生震源域の選択

前章で紹介した確率論的地震危険度解析では、ある最大加速度や最大速度といった地震動指標を持った地震動の期待値が算出される。この指標に合致した構造物、車両の被害フラジリティカーブと組み合わせることで、それぞれが有する地震リスクを算定することが可能である。しかしながら例えば同じ最大加速度の地震を想定した場合においても、その地震を発生させる断層のマグニチュードや震源距離が異なると、地震動の周波数特性や経時特性は大きく変化することがわかっている³。そのため構造物の損傷程度、車両の脱線といった現象は、地震動のピーク値で表現するよりも、

² 深度数 $m \sim$ 数十 m の位置に存在し、構造物を設計するときに地震動を設定する際の基準となる比較的良好な地盤。

³ 一般に、地震の規模 (マグニチュード) が大きくなると、周期の長い成分 (長周期成分, 低振動数成分) が卓越する傾向が強くなり、地震動の継続時間は長くなる。また、地震の震源からの距離が離れた場合にも同様の傾向 (相対的に長周期成分が卓越し、継続時間も長くなる) を示す。

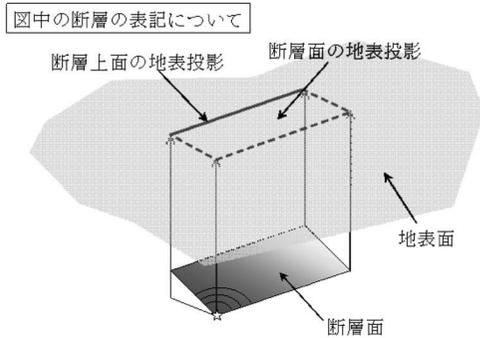
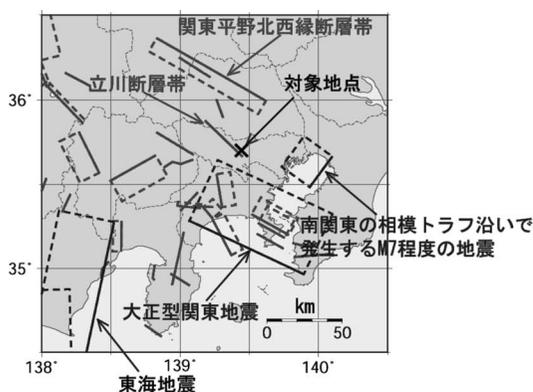


図4 対象地点と断層の位置関係概略

時刻歴波形を用いて動的解析を実施することで、より正確に表現できると考えられる。また、耐震設計上の基盤面位置での時刻歴波形を規定することにより、建設地点の地域特性、表層の地盤特性を含んだ検討が可能になるため、同一地点における地盤条件の違いによる構造条件の変化なども明確に表現されたと考えられる。

そのため本章では地震危険度解析結果に基づいた地震発生確率を有する地震動（生起確率付地震動群）の作成方法について検討を行う。まず、加速度 a (gal) の地震における各震源域からの貢献度 [14] を次式で算定する。

$$C(X_k, a) = \frac{P_{X_k}(A > a; t)}{\sum_i P_{X_i}(A > a; t)} \quad (7)$$

ここで、 $C(X_k, a)$ は、加速度 a (gal) の地震における k 番目の震源域 X_k の貢献度、 $P_{X_i}(A > a; t)$ は対象地点で t 年間に震源域 X_i から a (gal) 以上の地震が発生する確率である。算定された貢献度に従って、想定した地震動が発生する震源域を特定する。具体的には、ある加速度レベルの地震動を複数波作成する場合には、貢献度の割合に従って各震源域からの地震発生数を割り振る。

3.2 選択された断層からの地震動作成

震源域の地震規模、震源距離に基づき振幅特性、位相特性を距離減衰式により設定することにより、条件を満足する地震動群を作成する。まず、次式によって表現される応答スペクトル⁴の距離減衰式 [15] を用い

て、選定した震源域から想定される加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の形状を設定する。

$$\log Sa(t) = c_m(t)M + c_h(t)D - c_d(t) \log(R + c_1 \exp(c_2 M)) + c_0(t) \quad (8)$$

ここで、 $Sa(t)$ ：周期 t 秒の加速度応答スペクトル ($h=0.05$)、 M ：マグニチュード、 D ：震源深さ、 R ：断層最短距離、 $c_m(t), c_h(t), c_d(t), c_1, c_2, c_0(t)$ ：回帰係数である。これにより得られる加速度応答スペクトルは、目標とする応答スペクトルの形状である。

次に振幅の初期情報を設定する。フーリエ振幅スペクトルは非減衰の速度応答スペクトルとおおむね一致するという関係 [16] を用いて、初期のフーリエ振幅スペクトル $A_0(\omega)$ を設定した。ここで、非減衰の速度応答スペクトルは、式 (8) によって得られる減衰定数 5% の加速度応答スペクトルを補正 [17] することにより推定した。

位相特性としては、次式で表現される群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ の平均値と標準偏差の距離減衰式 [18] を用いて設定した。

$$\begin{aligned} \mu_{t_{gr}}^{(j)} &= \alpha_1^{(j)} \times 10^{\beta_1^{(j)} M} \times R^{\gamma_1^{(j)}} \\ \sigma_{t_{gr}}^{(j)} &= \alpha_2^{(j)} \times 10^{\beta_2^{(j)} M} \times R^{\gamma_2^{(j)}} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\mu_{t_{gr}}^{(j)}$ ：群遅延時間の平均値、 $\sigma_{t_{gr}}^{(j)}$ ：群遅延時間の標準偏差、 M ：マグニチュード、 R ：断層最短距離、 $\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}, \gamma^{(j)}$ ： j 次の回帰係数である。式 (9) に従った正規乱数を発生させることにより、群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ を求め、これを積分することにより位相スペクトル $\phi(\omega)$ を設定した。

以上の作業により、目標応答スペクトル、位相スペクトル、初期振幅スペクトルが決定した。そこで、繰り返し計算により振幅を調整することで、目標応答ス

⁴ 地震動の大きさを構造物の応答という観点から表現したもの。横軸に構造物の固有周期をとり、縦軸にそれぞれの固有周期を持った構造物（1 質点系にモデル化）が対象とする地震動において示す応答の最大値をプロットしたもの。1 質点系の動的解析を多数繰り返し実行することで、求めることができる。

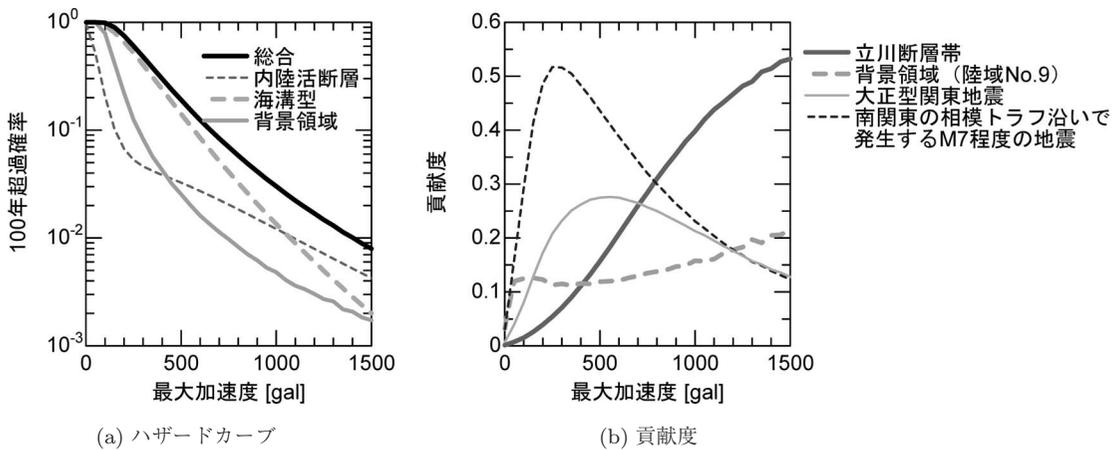


図5 対象地点における地震危険度解析結果

ベクトルに適合させた。最後に得られた応答スペクトル適合波の最大加速度を想定地震レベルに調整することで、地震動を設定した。さらに、算定された地震動には、地震危険度解析によって推定された発生確率が付与される。

4. 東京地域における試算例

本手法の適用例として、サンプル地点（鉄道総研国立研究所，北緯 35.7029°，東経 139.4430°）を対象に地震危険度解析，生起確率付地震動群を算定する。検討対象地点と断層の位置関係を図 4 に示すが，対象地点は立川断層帯の東側に位置していることがわかる。

4.1 地震危険度解析

対象地点において地震危険度解析を実施した。なお，構造物の設計耐用期間は 100 年間であると考え [19]，地震動を評価する期間は 100 年に設定した。得られたハザードカーブ，各加速度における貢献度を図 5 に示す。

まず図 5(a) のハザードカーブより，ある加速度を持った地震動の発生する確率がわかる。例えば，今回の地点においては 500 gal 以上の地震が発生する確率はおおむね 20% 程度となっている。また，この図には，モデル化した 3 種類の地震活動（内陸活断層による地震，海溝型地震，背景領域による地震）のそれぞれの超過確率も同時に示している。この結果を見ることで，対象地域においてどのような地震活動が大きな影響を及ぼすのか，といった考察が可能となる。

図 5(b) の貢献度算定結果から，ある加速度の地震動を考えた場合に，その地震動がどの震源域から発生する可能性が大きいのか，といったことをつかむことができる。例えば今回の対象地点において 300 gal 程度の地震は，海溝型地震のうちの一つ（南関東の相模ト

ラフ沿いで発生する M7 程度の地震（首都直下地震）から引き起こされる可能性が高い。さらに想定する地震動が大きくなり 1000 gal 程度の地震動を考えると，立川断層帯からの可能性が高くなっている。

今回の結果においても言えることだが，内陸活断層の地震は数千～数万年に一度発生し，海溝型地震は数十～数百年に一度発生するということが過去の活動履歴よりわかっている。一方で今回の対象地点と活断層の距離は，海溝型地震と比較すると距離が近いため，一度発生した場合の地震動レベルが非常に大きくなる可能性が高い。これらの影響を受けて，全体的な傾向としては，高い確率（小さな加速度レベル）を想定した場合には海溝型地震の貢献度が高く，低い確率（大きな加速度レベル）を想定した場合には内陸活断層の地震による貢献度が高くなっている。

4.2 生起確率付地震動群の作成

地震危険度解析，貢献度算定結果に基づき，生起確率付地震動群を作成する。まず図 5(b) の貢献度より，各地震動を発生させる震源域を特定する。今回は加速度として 100～2000 gal まで 100 gal 刻み，各加速度ごとに 20 波ずつの合計 400 波を生起確率付地震動群として設定し，前述した手法により各震源域からの波形合成を行った。波形の割り当て結果を表 1 に，生成された生起確率付地震動群の例を図 6 に示す。これより，同一加速度レベルの地震動であっても，想定される震源域の地震規模，対象地点と震源との距離が各地震動ごとに異なるため，経時特性が異なった結果となっていることがわかる。具体的には，地震規模，震源距離が大きくなるほど継続時間が長くなっている。また，地震動群の応答スペクトルから，地震規模が大きいかほど長周期側が卓越する傾向となっていることがわかる。

表 1 貢献度に基づく波形の割り当て

PGA (gal)	100年 発生 確率	波形 出力	震源域						合計
			活断層	海溝型			背景領域		
			立川断 層帯	南関東 で発生 する M7 程度の 地震	大正型 関東 地震	想定東 海地震	陸域 No. 9	フィリ ピン海 No. 5	
100	1.02×10^{-1}	貢献度	0.00	0.29	0.08	0.14	0.13	0.19	1.00
		出力数	0	7	2	3	3	5	20
200	2.95×10^{-1}	貢献度	0.00	0.49	0.17	0.17	0.12	0.07	1.00
		出力数	0	11	4	1	3	1	20
300	2.25×10^{-1}	貢献度	0.07	0.52	0.23	0.00	0.12	0.00	1.00
		出力数	1	12	5	0	2	0	20
400	1.40×10^{-1}	貢献度	0.11	0.48	0.26	0.00	0.12	0.00	1.00
		出力数	2	11	5	0	2	0	20
500	8.45×10^{-2}	貢献度	0.16	0.44	0.28	0.00	0.12	0.00	1.00
		出力数	3	9	6	0	2	0	20
600	5.16×10^{-2}	貢献度	0.21	0.39	0.28	0.00	0.12	0.00	1.00
		出力数	4	8	6	0	2	0	20
700	3.20×10^{-2}	貢献度	0.26	0.34	0.27	0.00	0.13	0.00	1.00
		出力数	5	7	6	0	2	0	20
800	2.09×10^{-2}	貢献度	0.31	0.30	0.25	0.00	0.14	0.00	1.00
		出力数	6	6	5	0	3	0	20
900	1.37×10^{-2}	貢献度	0.36	0.26	0.23	0.00	0.15	0.00	1.00
		出力数	7	5	5	0	3	0	20
1000	9.34×10^{-3}	貢献度	0.40	0.23	0.21	0.00	0.16	0.00	1.00
		出力数	8	5	4	0	3	0	20
1100	6.35×10^{-3}	貢献度	0.44	0.20	0.20	0.00	0.16	0.00	1.00
		出力数	9	4	4	0	3	0	20
1200	4.63×10^{-3}	貢献度	0.47	0.18	0.18	0.00	0.18	0.00	1.00
		出力数	10	4	3	0	3	0	20
1300	3.40×10^{-3}	貢献度	0.49	0.16	0.16	0.00	0.20	0.00	1.00
		出力数	10	3	3	0	4	0	20
1400	2.45×10^{-3}	貢献度	0.51	0.14	0.14	0.00	0.21	0.00	1.00
		出力数	11	2	3	0	4	0	20
1500	1.74×10^{-3}	貢献度	0.53	0.12	0.13	0.00	0.22	0.00	1.00
		出力数	12	2	2	0	4	0	20
1600	1.48×10^{-3}	貢献度	0.55	0.11	0.12	0.00	0.23	0.00	1.00
		出力数	12	2	2	0	4	0	20
1700	1.10×10^{-3}	貢献度	0.56	0.10	0.10	0.00	0.24	0.00	1.00
		出力数	11	2	2	0	5	0	20
1800	8.62×10^{-4}	貢献度	0.56	0.09	0.09	0.00	0.26	0.00	1.00
		出力数	12	1	2	0	5	0	20
1900	6.76×10^{-4}	貢献度	0.56	0.08	0.08	0.00	0.28	0.00	1.00
		出力数	12	1	1	0	6	0	20
2000	4.98×10^{-4}	貢献度	0.57	0.07	0.08	0.00	0.28	0.00	1.00
		出力数	12	1	1	0	6	0	20

これらは既往の地震観測記録から得られている知見と同様の傾向を示している。

ここで得られた生起確率付地震動群は、耐震設計上の基盤面位置での地震動であるため、対象地点の地盤情報を用いた地盤応答解析を実施することにより、地表面位置における生起確率付地震動群として設定することが可能となる。

5. まとめ

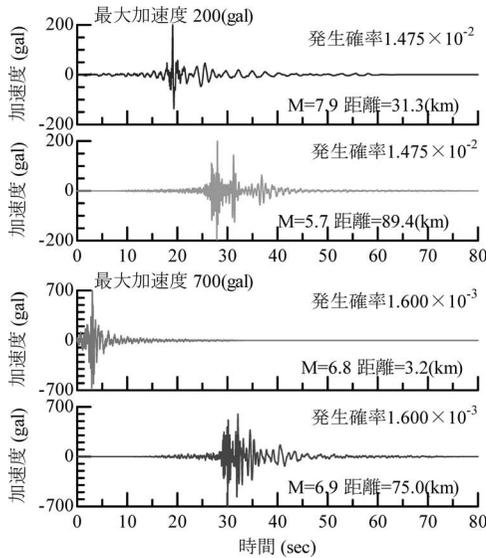
鉄道システムの地震リスクを評価するための地震の確率論的評価手法、地震動波形形成手法についての検討を行った。また、提案手法の適用例として、東京地

点において確率論的地震危険度解析、生起確率付地震動群を作成した。

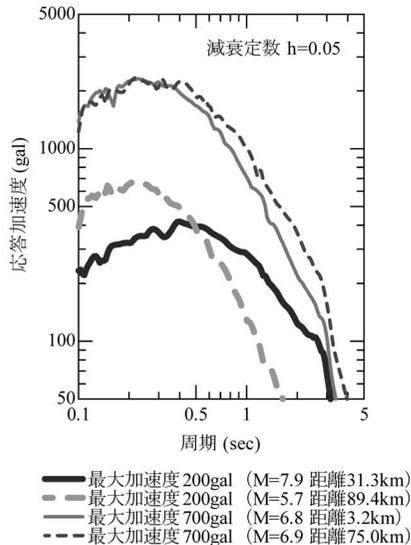
本手法を用いることで、動的解析による各種鉄道システムの地震リスクの評価が可能となり、各種構造が保有する地震リスクを比較することで、地震対策の順位付けなどを戦略的に実施する際の基礎資料となることが期待される。

参考文献

- [1] Cornell, C. A.: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606, 1968.
- [2] 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測



(a) 時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 6 生起確率付地震動群の例

地図, 2009.

- [3] 中島正人: 確率論的地震ハザード解析システムの開発—地震ハザード再分解機能の実装—, 電力中央研究所報告, N05051, 2006.
- [4] 中尾吉宏, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一: 確率論的な地震ハザードマップの作成手法, 国土技術政策総合研究所研究報告, No. 16, 2003.
- [5] Leyendecker, E. V., R. J. Hunt, A. D. Frankel and K. S. Rukstales: Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motion Maps, *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, pp. 21–40, 2000.
- [6] 安中正, 香川敬生, 石川裕, 江尻讓嗣, 西岡勉: 期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, 2005.
- [7] 佐藤輔編著: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
- [8] Matthews, M. V., W. L. Ellsworth and P. A. Reasenberg: A Brownian Model for Recurrent Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 6, pp. 2233–2250, 2002.
- [9] 島崎邦彦: 大地震発生の長期的予測, 地学雑誌, 110, pp. 816–827, 2001.
- [10] Gutenberg, B. and C. F. Richter: Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 34, pp. 185–188, 1944.
- [11] 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集, Vol. 523, pp. 63–70, 1999.

- [12] 坂井公俊, 室野剛隆: 地震基盤深度を考慮した距離減衰式の補正係数, 土木学会地震工学研究発表会論文集, 30, 1–0009, 2009.
- [13] 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表面位置の距離減衰式から工学的基盤位置の地震動を推定する簡易手法, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 332–339, 2011.
- [14] 亀田弘行, 石川裕, 奥村俊彦, 中島正人: 確率論的想定地震の概念と応用, 土木学会論文集, No. 577/I-41, pp. 75–87, 1997.
- [15] 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 161–164, 1997.
- [16] 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- [17] 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 最大地震動および地震応答スペクトルの推定法—(その 5) 減衰定数による地震応答加速度スペクトルの補正式の開発—, 土木研究所資料, 第 2001 号, 1983.
- [18] 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦: 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No. 640/I-50, pp. 119–130, 2000.
- [19] (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 1999.