

降雨の影響を考慮した盛土の材料物性の評価と耐震性評価

Evaluation of Soil Property and Seismic Performance of Embankments Considering Rainfall Effect

秦 吉 弥 (はた よしや)

日本工営株式会社 主任研究員

一 井 康 二 (いちい こうじ)

広島大学大学院准教授 工学研究科

1. はじめに

2004年新潟県中越地震, 2007年能登半島地震, 2009年静岡県駿河湾の地震における道路盛土の被害など, 土構造物の地震時被害は近年においても数多く報告されている。このような地震被害の中には, 地震後の緊急対応や復旧において重要な役割を担う高速道路の盛土などもあり, 耐震性評価法の検討が行われている^{1),2)}。こういった盛土構造物の耐震性評価では, 地震時変形量を予測することが近年増えつつあり, 動的FEMなどによる方法が用いられている。このような手法を用いて精度よく地震時変形量を算定するためには, 盛土の材料物性, 特に土のせん断強度定数 (c, ϕ) などの入力パラメータを正確に設定することが必要不可欠である。

しかしながら実際の設計実務などでは, 動的FEMなどの入力パラメータを直接的に得るために必要な地盤調査や土質試験は予算や時間の制約から必ずしも十分には実施できない。すなわち, 技術者は限られた地盤調査結果や既往の文献資料などに基づいてせん断強度定数などを設定することになるが, 技術者の判断や経験によって, 特に, 材料物性の設定結果により解析結果が変動することが報告されている³⁾。特に, 砂質土地盤を対象とする場合には, ϕ 材としてモデル化することで見かけの粘着力の影響を無視したり, 動的FEMなどの数値解析の安定のために少量の粘着力をダミー値として考慮するなど, 粘着力の設定方法が技術者により大きく異なる³⁾。

一方で, 地震時における盛土被害は, 沢部や谷部などの集水地形に建設された盛土や排水性の悪い材料による盛土に被害が集中する傾向にある。すなわち排水条件に応じて, 降雨の浸透などにより盛土の地盤物性が変化し, その結果として盛土の耐震性が低下している。ところが一般の盛土の耐震設計では, 降雨などにより地盤物性が変化することについては, ほとんど考慮されていない。

そこで本稿では, 動的FEM解析において, 降雨による盛土の耐震性低下を土中含水比の増加に伴う粘着力の低下と単位体積重量の増加によりモデル化する手法を概説する。具体的には, 人工降雨による盛土の振動台実験^{4),5)}, 過去の降雨ならびに地震による被災盛土⁶⁾を対象に行った再現解析の結果を, 主に地盤物性値の設定法に着目して報告する。

2. 振動台実験の再現解析

2.1 人工降雨下の盛土の振動台実験

実験⁴⁾は1G場の振動台実験であり, 盛土断面とその計測状況は図-1に示すとおりである。盛土材料としてはまき土を使用し, 密度管理のもとで作成している。盛土材料の単位体積重量 γ_t は 16.17 kN/m^3 および含水比 w は 9% (飽和度 S_r は 32%) である。

降雨の有無による耐震性能を比較検討するため, 口絵写真-3に示すように同一形状の盛土を2体同時に作成し, 同写真奥側の盛土のみに降雨装置により人工降雨を与えた後, 同時加振を実施している。降雨強度は 95 mm/h 程度であり, 断続的な計20分間の降雨である。図-2は加振実験終了後の盛土内における含水比の分布であり, 降雨の影響により天端部, 斜面部表面, 法尻部では 15% 以上の含水比 (飽和度 S_r で約 53% 以上) まで上昇している。入力振動波形は, 5 Hz の正弦波20波である。

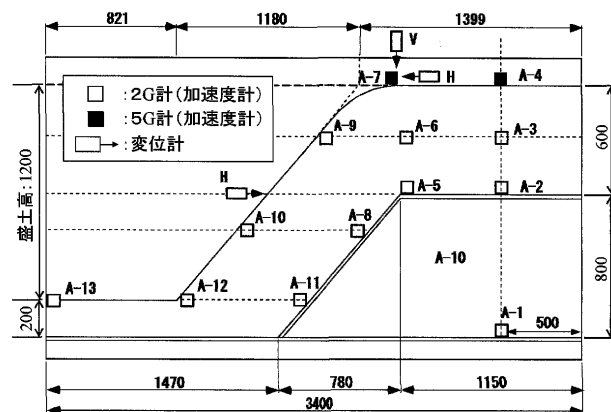


図-1 模型盛土の概要 (単位: mm)⁴⁾

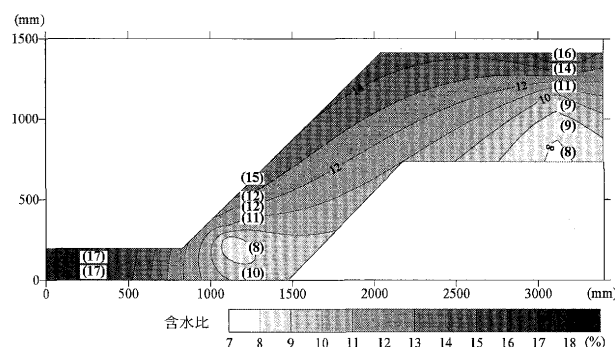


図-2 振動実験後の含水比の分布⁴⁾

2.2 実験結果の再現

解析⁵⁾では、二次元 FEM 逐次非線形解析手法として、解析コード FLIP を用いた。基盤については、剛な弾性体とし、入力地震動は、振動台で観測された固有周波数 5 Hz の正弦波 (波数: 20) を採用した。盛土材料については、同じ種類のまさ土による既往の土質試験結果を参考に設定した。まさ土の内部摩擦角 ϕ' は飽和度 S_r にあまり依存しないが、粘着力 c' は飽和度 S_r の増加に伴い減少することが報告されており、本検討ではその関係を考慮した。具体的には、間隙比 $e=0.75$ 時における飽和度 S_r と粘着力 c' の関係を図-3 に示すが、ここで示されている直線の傾き (飽和度上昇による粘着力低下の程度) に着目した。表-1 は降雨有のケースにおける含水比 w 、飽和度 S_r 、単位体積重量 γ_t 、粘着力 c' に関する一覧表である。粘着力 c' は降雨なしの時の値である 8 kPa に対して、図-3 に基づき飽和度 1% の増加により粘着力が 0.18 kPa 低下するとして粘着力を計算した。なお、内部摩擦角 ϕ' については、降雨有ならびに降雨無のケースともに 31 deg. で一定値とした。

図-4 に有限要素解析モデルを降雨有のケースについて示す。降雨の影響の有無によるメッシュ構成に差異はない。また、降雨有のケースでは、含水比に応じて単位体積重量および粘着力を変化させている。具体的には、降雨有のケースでは、図-2 で示した実験終了後の盛土内の含水比分布を参考にゾーニングを行い、各エリアの含水比 w に対応する単位体積重量 γ_t および粘着力 c' をそれぞれ割り付けた (表-1 参照)。

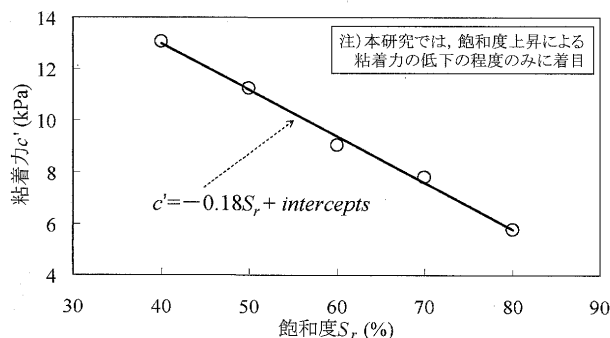


図-3 飽和度と粘着力の関係⁵⁾

表-1 降雨有のケースにおける解析パラメータ⁵⁾

含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 c' (kPa)
9	32.0	15.7	8.0
11	39.1	16.0	6.7
12	42.7	16.1	6.1
13	46.2	16.3	5.4
14	49.8	16.4	4.8
15	53.3	16.5	4.1
16	56.9	16.7	3.5
17	60.4	16.8	2.9

注) 基準粘着力 $c'=8$ kPa に対して、飽和度 $S_r=1\%$ の増加により、粘着力 c' が 0.18 kPa 低下するとして計算

2.3 実験結果との比較

図-5 は法肩における応答変位の時刻歴について振動台実験結果と FLIP による計算結果を比較したものである。この図のように、降雨の有無による差違が実験および解析の双方に非常に顕著に表れており、残留変形量にしてワンオーダー程度の差異がある。そして実験結果と解析結果は、ほぼ一致しており、地下水位が形成されるほどの降雨でなくても降雨が盛土の耐震性を低下させること、さらにその耐震性低下を FLIP による動的解析により再現できたことがわかる。

2.4 耐震性低下の要因分析

図-6 は、粘着力の低下による変形量の増加に関してモール・クーロンの破壊基準と応力-ひずみ関係から考察を加えたものである。例えば斜面内の平均的な土被り圧 4.8 kPa (土被り 0.3 m 相当) 作用時を想定すれば、降雨により飽和度 S_r が基準値の 32.0% から 46.2% に低下 (含水比 w が 9% から 13% に増加) した場合、約 24% のせん断強度の低下につながる。双曲線型モデルに基づけば、静止土圧状態においても、約 38% のせん断ひずみの増加が発生することがわかる。また、このひずみの増加程度はせん断応力が増加すると拡大する。よって発生ひずみの累積である変形量についても増加することが予想される。この結果を踏まえれば、実験結果において降雨を考慮した盛土の変形量が増加したことの主要因は、降雨水によるサクシオン等の変化などに伴う粘着力の低下である可能性が高いと考えられる。

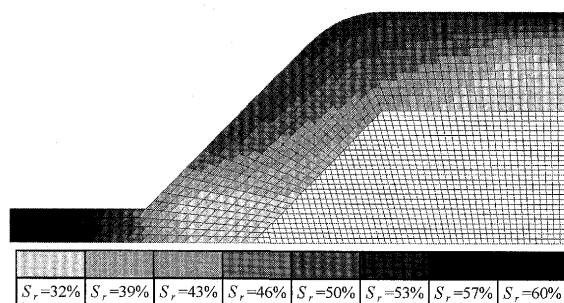


図-4 有限要素解析モデル (降雨有のケース)

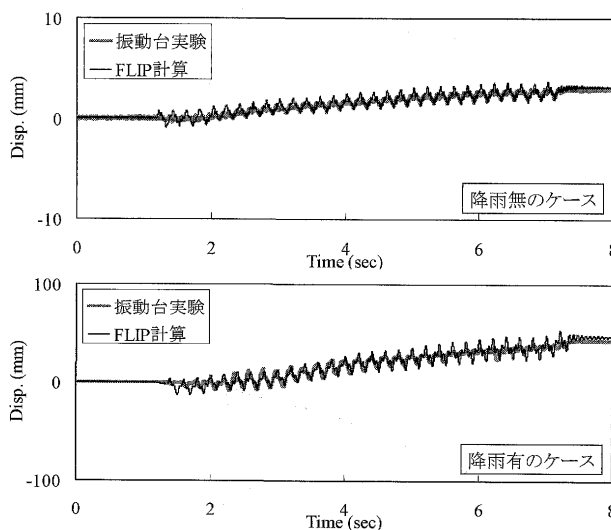


図-5 法肩における変位応答時刻歴の比較

報告

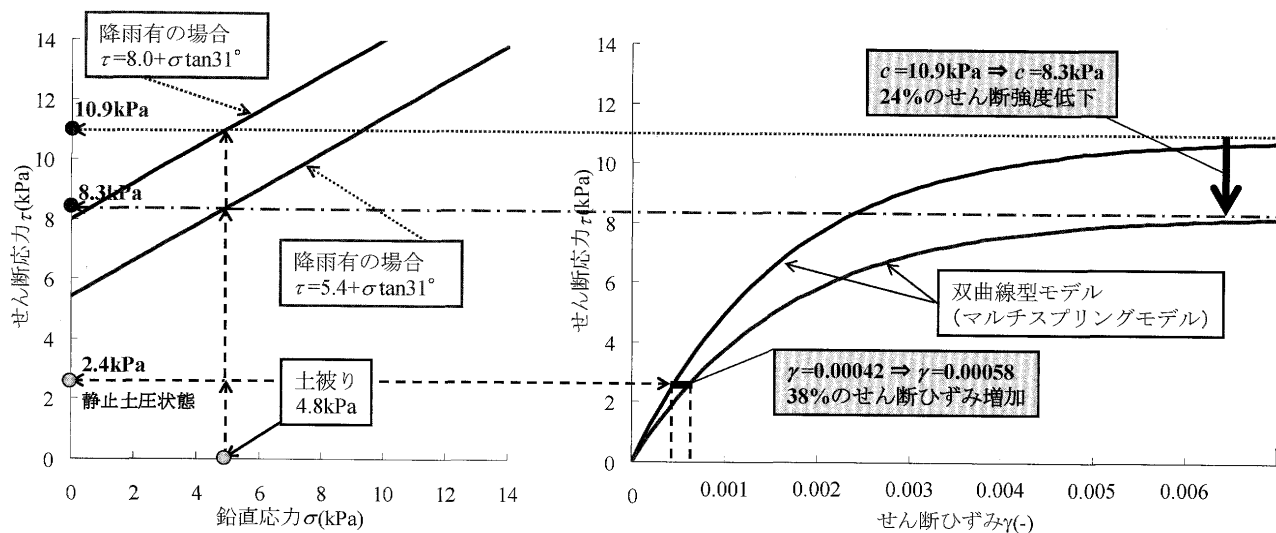


図-6 降雨による耐震性低下の要因分析 (破壊基準と応力-ひずみ関係)

表-2 既往の地震による検討対象斜面の被害の概要

地震名	最大加速度	地震前降雨	被災
1968年 十勝沖	183 gal (八戸港 EW)	有り(3日間で 160mm)	あり
1994年 三陸はるか	523 gal (八戸港 EW)	なし	なし

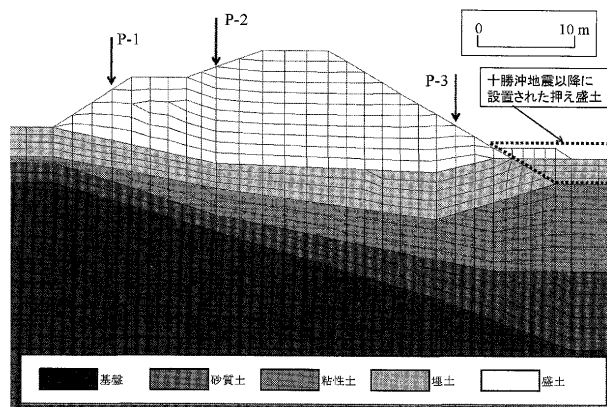


図-8 浸透流解析におけるFEM解析モデル

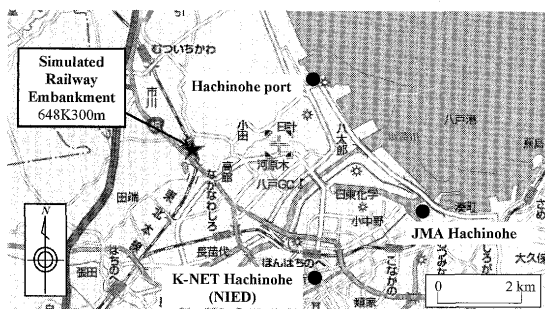


図-7 検討対象盛土周辺の強震観測点

3. 被災盛土の再現解析

3.1 検討対象盛土

検討対象盛土は、口絵写真-4 および図-7 に示すとおり青森県八戸市簗子渡にある JR 東北本線八戸貨物駅～陸奥市川駅間の648 K 300 m 地点の鉄道盛土である。表-2 に示すように当盛土は、総雨量160 mm の豪雨後の1968年十勝沖地震により、斜面崩壊が発生した。一方で、1994年三陸はるか沖地震では、地震加速度が大きいものの、地震前の降雨はなく、斜面崩壊も確認されていない。そのため、地震前の先行降雨の影響が指摘されている。

3.2 浸透流解析

図-8 に検討対象斜面のFEM解析モデルを示す。検討対象地点では、図-9 に示すように三陸はるか沖地震の後、300日間の地下水位観測 (P-1, P-2, P-3) が行われている。そこで、八戸気象台における雨量データを入力とした飽和・不飽和浸透流解析⁶⁾により、地下水位観

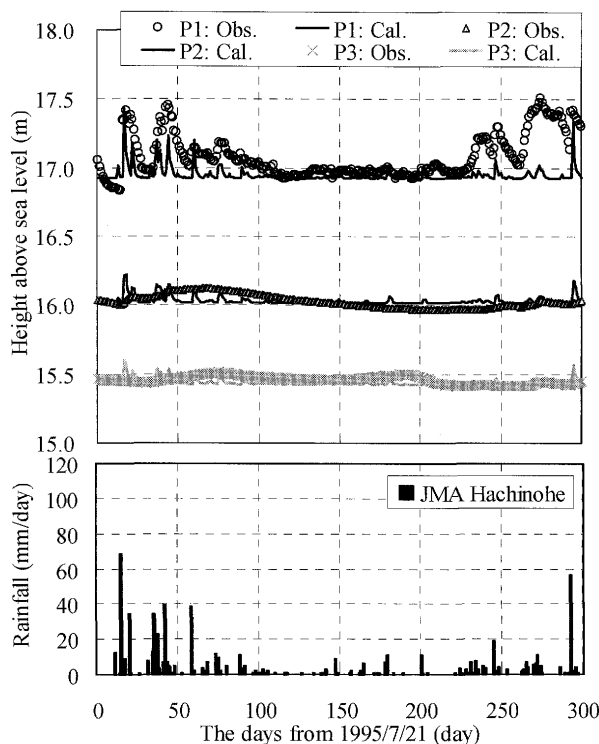
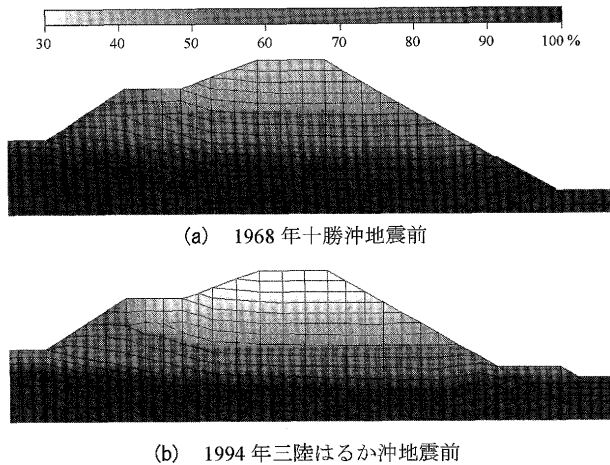
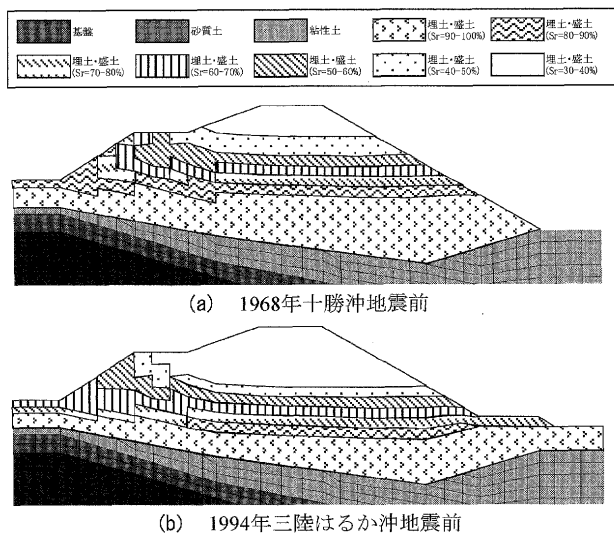


図-9 降雨による地下水位変動の再現解析結果と降水量分布



図一10 地震前の盛土斜面内の飽和度の分布

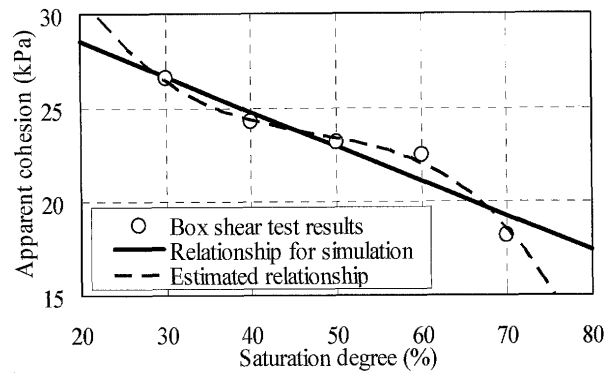


図一11 動的解析における物性値の分布

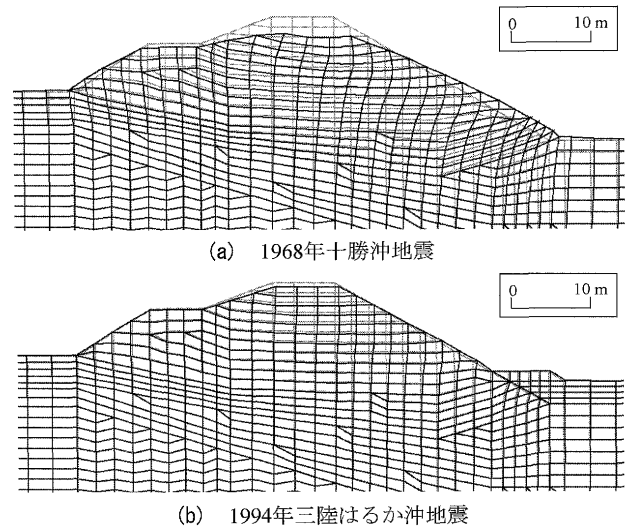
測結果の再現解析を行った。ここでは、試行錯誤により、図一9に示すように観測結果が良好に再現できる透水特性を算定した。さらに、算定した透水特性を用いて、1968年十勝沖地震前、1994年三陸はるか沖地震前の降雨データを入力した解析を実施した。図一10に地震前の盛土内の飽和度分布の算定結果を示す。

3.3 地震応答解析

図一11にFEM解析モデルを示す。メッシュ構成は、図一8で示した浸透流解析と同じである。動的解析⁶⁾は、FLIPによる全応力解析とした。基盤は弾性体モデル、それ以外の土層はすべてマルチスプリングモデルでモデル化した。地盤入力パラメータについては、既往の検討結果や土質試験結果などを参考に設定した。ただし、埋土・盛土層については、浸透流解析による飽和度の分布(図一10参照)に基づいて、図一11に示すように飽和度10%ごとにゾーニングを行い、ゾーン毎に湿潤密度を設定した。さらに、一面せん断試験の結果(図一12参照)に基づき、飽和度10%の増加に対し、粘着力が1.9 kPa低下するとして、ゾーン毎に降雨の影響を考慮した。ただし、内部摩擦角は一定($\phi=34$ deg.)である。入力地震動は、当該地点における推定地震動の基盤相当2E



図一12 飽和度と見かけの粘着力の関係



図一13 被災盛土の再現解析結果【等倍の残留変形状況】

波⁶⁾を使用した。図一13に等倍スケールによる残留変形図を示す。この図より、1968年十勝沖地震のケースでは、非常に大きな変形が生じているのに対し、1994年三陸はるか沖地震のケースでは、残留変形がほとんど発生しておらず、定性的には実現現象を再現できている。

参考文献

- 1) 秦 吉弥・一井康二・加納誠二・土田 孝・今村孝志：盛土の耐震診断に基づく高速道路の通行機能の耐震性評価，土木学会論文集F, Vol. 65, No. 1, pp. 50~58, 2009.
- 2) 秦 吉弥・一井康二・加納誠二・土田 孝・柴尾 享・今村孝志：常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討，土木学会論文集F, Vol. 65, No. 4, pp. 529~541, 2009.
- 3) 一井康二・秦 吉弥：耐震性検討のための地盤調査と調査結果の解釈についての課題，土木学会論文集C, Vol. 65, No. 2, pp. 456~466, 2009.
- 4) 一井康二：降雨による盛土の耐震性低下に関する実験的研究，土木学会地震工学論文集, Vol. 28, No. 188, 2005.
- 5) 秦 吉弥・一井康二・土田 孝・加納誠二：降雨による盛土の耐震性低下に関する一考察，土木学会論文集C, Vol. 65, No. 2, pp. 401~411, 2009.
- 6) 秦 吉弥・一井康二・柴尾 享・牧野孝久：1968年十勝沖地震および1994年三陸はるか沖地震による被災盛土の再現解析，降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会, pp. 333~336, 2009.

(原稿受理 2009.10.14)