

加悦天神山における表層力学特性調査

Investigation on the Mechanical Characteristics of Ground Surface in Mt. Tenjin, Kaya

平岡伸隆¹・石田優子¹・岩森一貴²・酒匂一成³・深川良一⁴

Nobutaka Hiraoka, Yuko Ishida, Kazuki Iwamori, Kazunari Sako and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Doctoral Program, Ritsumeikan University, Dept. of Science and Engineering

²立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Ritsumeikan University, Dept. of Science and Engineering

³鹿児島大学大学院助教 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

Assistant Professor, Kagoshima University, Dept. of Ocean Civil Engineering

⁴立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Kaya was designated as “an area of important preservation district groups of traditional buildings” in 2005. We have found that several slope of Mt. Tenjin, in Kaya have a risk of slope failure. A way to set a proper countermeasure against slope failure, to protect traditional building, is well predicted by analysis on slope stability. The rainfall status and mechanical characteristics of ground surface are needed for this analysis. To collect these data, we have conducted site investigation, validation on the data of rainfall monitoring, and cone penetration test.

Keywords : Rainfall gauging, slope failure, monitoring system

1. はじめに

与謝野町では、文化庁や京都府教育委員会の助言に基づき、「与謝野町加悦伝統的建造物群保存地区防災計画策定事業」を平成21年度から3カ年計画で実施しており、本研究は、その事業における土砂災害に関する調査の一環として行われた。京都府北部に位置する与謝郡与謝野町加悦は丹後ちりめん栄えた製織町として平成17年7月22日に京都府で第7番目となる「重要伝統的建造物群保存地区」（以下、伝建地区）に選定された¹⁾。加悦の位置を図1に示す。加悦伝建地区内の南側にそびえる天神山は、頂に天満宮を、山麓に實相寺、宝厳寺、吉祥寺の3つの寺を抱え、いずれの寺も伝統的建造物に指定されている。この天神山の東斜面一帯は急傾斜地法により「急傾斜地崩壊危険区域」に指定されており、既往の研究の現地踏査より、地震時や降雨時の崩壊の危険性が指摘されている²⁾。天神山において土砂崩壊が発生した場合、山周辺に広がる文化財やそこに訪れる観光客および住人に被害がでることが想定される。これを防ぐためには、当該斜面の安定解析を実施することにより、崩壊発生規模や挙動を予測し、その結果に適した土砂災害対策を施す必要がある。そこで本論文では、安定解析に必要となる天神山における降雨状況の把握、および斜面表層における力学特性の把握を目的として、これまで観測してきた降雨モニタリングデータの検証、現地踏査および土質試験結果より斜面表層力学特性の検証を実施する。



図1 加悦位置図

2. 現地踏査

既往の研究より、2010年2月および2011年7月に現地踏査が実施され、天神山のいたるところに崩壊跡や、擁壁のクラック、また危険箇所が発見されている²⁾。さらに前回までに明らかになった危険箇所や、山頂にある貯水槽周辺に重点を置き現地踏査を実施した。現地踏査は2012年3月に実施し、この写真の撮影位置を図2に、写真を写真1,2に示す。天神山山頂、南奥の神社の裏、下り勾配の崖に貯水槽が石積み擁壁で3方向を囲われ、地中に埋まっている。加悦地区では新たに貯水槽を設ける計画があり、現存の貯水槽を大地震時などの非常時の際に防火水槽として活用できる可能性がある。この貯水槽を防火水槽として使用するにあたり、貯水槽や擁壁、および周辺地盤の安全性を、大地震を想定して検討する必要がある。貯水槽の概略図を図3に示す。石積み擁壁は北から南に向かって約0.7m～3.7mと高くなっていく。石積みの目地の間からは草木が生えており、特に木は成長しながら目地の開きを助長している。さらに石積み擁壁の東側と南側の面にはクラックがあり、南西角のクラックは約3cmの開きがある。南側下り斜面の勾配は約34°ときつく、足元は柔らかい腐植土で覆われ、地盤は緩い。以上の結果から、貯水槽を支える擁壁には経年劣化が確認され、また周辺斜面は、勾配が急で表層部が緩いことが確認された。貯水槽を設計施工した時のボーリング調査結果や石積み擁壁の設計図、貯水槽の形状などは記録が残っておらず、この貯水槽や擁壁、地盤の詳細な安定性を調査するには追加試験が必要と考えられる。

また前回の現地踏査で崩壊跡が確認された實相寺裏手の斜面（図2赤丸）の2010年2月に撮影した写真を写真3に、2012年3月に撮影した写真を写真4に示す。2010年2月と2012年3月に撮影した斜面を比較すると、形状の変化が目視で確認できる。この形状変化がいつ発生したかは不明であるが、2つの写真を撮影した間の降雨による影響と考えられる。實相寺裏手斜面は比高約3mと小規模な斜面ではあるが、今後、崩壊の可能性が高く、この斜面で安定解析モデルを構築できれば、そのモデルを天神山の大規模斜面に適応し、安定性が評価できると考えられる。そこで、實相寺裏手の斜面の安定性評価のために、まず天神山山頂に設置した降雨モニタリングシステムより、これまでの降雨履歴からどの程度の雨量が観測されたのか調べ、また實相寺裏手の斜面の力学特性を把握するために土質試験を実施した。



図2 過去と今回の踏査位置



写真1 貯水槽



写真2 貯水槽南側擁壁

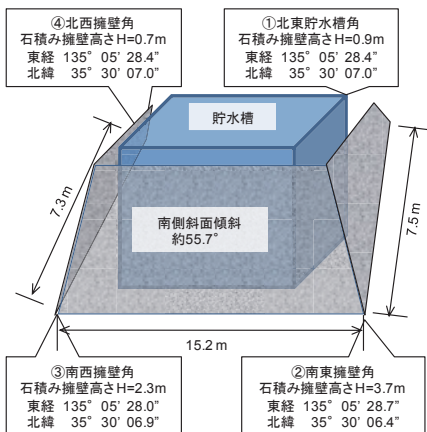


図3 貯水槽概略図



写真3 實相寺裏斜面
2010年2月撮影²⁾



写真4 實相寺裏斜面
2012年3月撮影

3. 降雨モニタリングシステム

(1) 現地降雨計測の概要

気象庁より発表されている加悦付近の雨量データは無く、加悦から近い雨量観測所は峰山、宮津、三岳の3カ所が挙げられるが、いずれも約13 km、約14 km、約16 kmも離れており、さらにそれぞれの観測所と加悦の間に多くの山を挟んでいる。そのため、これら3カ所の観測所の雨量データから加悦の雨量を推定することは、精度も低く、また近年増加傾向にある局所的な集中豪雨を補足できないと考えられる。そこで既往の研究²⁾より、天神山での降雨量を正確に捉えるため、モニタリングシステムを設置している。

加悦における降雨モニタリングユニットを図4に、降雨モニタリングシステムの概要を図5に示す。モニタリングユニットは天神山山頂の広場隅に設置した。ユニットは転倒ます型雨量計とデータロガー、さらに取得したデータをワイヤレス通信でPCに送信するための無線機、ソーラー電源で構成される。モニタリングによって得られたデータは、加悦庁舎に設置した無線機からパソコンに受信管理する。取得したデータはリアルタイムで連続雨量、実効雨量、土壌雨量指数等を計算し、降水短時間予報と組み合わせて、あらかじめ設定した警戒基準値を超える予測結果が出た際に、管理者へアラーム通報される仕組みになっている。またPC内部のデータは、インターネットを通じてパスワード管理により関係者がいつでも確認できるシステムとなっており、これを加悦Web監視防災システムと呼ぶ。



図4 天神山気象ユニット



図5 モニタリングシステム概要図

(2) 降雨計測結果

天神山に2010年11月に降雨モニタリングユニットを設置して以来、雨量計測を実施している。特に降雨の多かった2011年8月から9月の降雨データを時間雨量、連続雨量、土壌雨量指数の雨量指標を用いて、図6に示した。ここで用いた土壌雨量指数はIshihara & Kobatake(1979)の直列3段タンクモデルを用いた³⁾。この指数は総務省が定めた約1km四方の地域メッシュ毎に、大雨注意報(土砂災害)または大雨警報(土砂災害)を発令する基準値が設定されており、加悦伝建地区はメッシュコード53352007にあたり注意報基準値は95、警報基準値は119である⁴⁾。なお、降雨モニタリングは10分間隔で計測しており、図6でまとめた時間雨量は、10分間雨量を1時間分累積して算出している。

2012年5月1日現在、計測された最大連続雨量は2011年9月19日から23日までの降雨で記録した232.5 mm、最大時間雨量は2011年8月25日から26日までの降雨で記録した31 mm/hである。また19日からの降雨では土壌雨量指数126を記録しており、これは警報基準値の119を上回っている。實相寺裏の斜面形状の変化もこの一連の降雨の影響を受けた可能性が高いと考えられる。

また、計測を開始した2010年11月から崩壊を確認した2012年3月までの降雨モニタリングデータを降雨イベントごとに分け、最大時間雨量を気象庁の予報用語別⁵⁾に回数をまとめた結果を表1に示す。表1での降雨イベントは加悦Web監視防災システムに合わせ、3時間無降雨状態を前後に挟む降雨を一連の降雨とした。加悦地区ではこれまで20 mm以上30 mm未満の「強い雨」が3回、30 mm以上50 mm未満の「激しい雨」が1回記録されている。IPCCの第4次報告書⁶⁾では、極端な大雨の頻度の増加や、熱帯低気圧の強度が増加することが予想されており、このことから計測期間内に起きた「激しい雨」と同等の降雨や、さらに高強度の降雨が今後も想定される。

今回の踏査結果およびこれまでの計測結果より、天神山において大規模崩壊は確認されていないものの、警報基準を上回る降雨イベントは計測されており、さらに今後、同強度またはさらに強度の増した降雨が想定される。各降雨イベントをスネーク曲線で表した結果を図7に示す。このスネークグラフは横軸に土壌雨量指数、縦軸に60分間積算雨量をとったものであり、土砂災害警戒情報を発令する基準に使用されているものである。今後、図中に示したA~Dのような頂点を持つ降雨イベントが計測され、Aの降雨イベント時に崩壊が発生すれば、図中赤線のような土砂災害発生基準を設定することができ、この基準線を超える降雨イベントが崩壊を引き起こす可能性が高いことを示せる。非崩壊時の降雨イベントでも、データを蓄積することにより、図7のB~Dのような点を集積し、基準線を予測することが可能である。そのため引き続き降雨モニタリングを実施することで、小規模でも崩壊発生時の降雨特性を記録できれば、安定解析時に入力する降雨特性に大いに役立つと期待できる。また、降雨モニタリング中に崩壊を捉えられれば、どのような降雨特性が、天神山において崩壊を誘発するのかが解明できる。

今後の課題として、これまでの降雨モニタリング計測では、データ欠損が発生する現象が確認されており、これは天神山と加悦庁舎の距離が500 m近くあり、ワイヤレス通信が不安定になっているためと考えられる。これについては中継局を増設するなどの対策を検討中である。

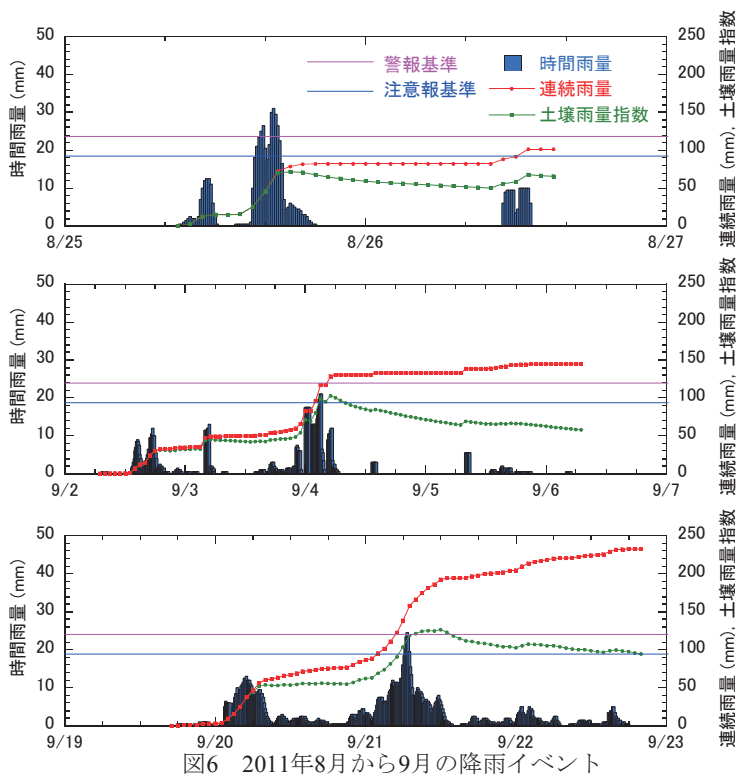


図6 2011年8月から9月の降雨イベント

表1 各降雨イベントの最大時間雨量の分布

1時間雨量	予報用語	回数
10mm未満	雨	173
10mm以上 20mm未満	やや強い雨	28
20mm以上 30mm未満	強い雨	3
30mm以上 50mm未満	激しい雨	1
50mm以上 80mm未満	非常に激しい雨	0
80mm以上	猛烈な雨	0

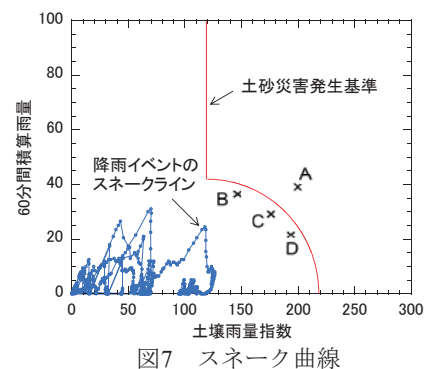


図7 スネーク曲線

4. 斜面表層力学特性

(1) 試験概要と方法

斜面の安定性について評価するには斜面の力学特性を把握することが必要となる。これまで、天神山周辺の平地ではボーリング調査が実施されているものの⁷⁾、天神山斜面における土質調査結果は残されていない。そこで、崩壊跡が確認された實相寺裏手の斜面および崩壊の危険性が懸念される2カ所について、それぞれの斜面表層の力学特性を把握するため、簡易動的コーン貫入試験を実施した。

簡易動的コーン貫入試験は貫入先端をつけたロッドをドライブハンマーの打撃によって地盤に打ち込み、貫入量と打撃回数の関係から地盤の硬軟・締まり具合を調べる試験である⁸⁾。打撃エネルギーが小さいため、地盤表層部から3m程度しか適用できないが、試験器具が小型軽量で作業条件の悪い場所でも短時間に多点の調査ができることから、今回の調査で採用した。簡易動的コーン貫入試験の実施箇所を図8、調査地点を写真5~7、GPS-CS3K (SONY製)によって計測した調査地点の位置座標を表2に示す。

(2) 試験結果

簡易動的コーン貫入試験の結果を図9に示す。各点の土層は N_d 値をもとに3つの層に区分した。表層付近は N_d 値が概ね10未満で深さ方向の変動が小さい層が存在し、これをI層とよぶ。また、I層の下には、 N_d 値が10～50で深くなるほど徐々に N_d 値が上昇する層や、 N_d 値の小さい層が間に入る層が存在し、これをII層とよぶ。また簡易動的コーン貫入試験では測定が不可能な N_d 値50以上の層をIII層とよぶ。

調査地点No.1、No.2（宝厳寺後背斜面）では、特に表層から1mまでが緩く、斜面上部のNo.1ではGL-1.8m程度まで、斜面下部のNo.2ではGL-2.7m程度まで緩い層が確認された。調査地点No.3（實相寺駐車場崖）では、GL-2.38mで玉石か何かに当たったために試験を中止したが、GL-0.7m程度から同程度の抵抗の緩い層が連続しており、GL-2.4m以深も同様な緩い層が連続している可能性が考えられる。調査地点No.4（實相寺墓地横空地）ではGL-0.7m程度までが非常に緩く、その後、徐々に地盤が締まっていく傾向が見られ、GL-2.62mまで緩い層が確認された。調査は崖から3.0m山側の地点で行ったが、崖に近いところは風化の進行が顕著で、踏査の際に沈下が確認され、試験の衝撃による崩落や安全確保が懸念されたため、試験の実施を断念した。調査地下部の崖の崩落も多く、調査地上部からの崩積土、岩塊の崩落も確認されており、崖に近い箇所ではさらに緩い層が厚く堆積している可能性が考えられる。

(3) 考察

今回、目視によって崩壊の進行を確認したNo.3は、 N_d 値の低いI層部分が他点より薄いものの、II層の N_d 値が他点に比べ低いことがわかる。またNo.1,2,4のII層は深さ方向に従って強度が増しているのに対し、No.3はこの傾向が確認できない。これは元々強度のあった地盤が風化してしまったためと考えられる。このように崩壊の進行が確認された實相寺裏手の斜面は、他の斜面と比較しても特に地盤が緩く、降雨モニタリングによって得られたのと同様、もしくはさらに強度の強い降雨によって、他地点より早く崩壊が進行する可能性が考えられる。しかし、No.3は隣接しているエリアが駐車場ということもあり、近づかなければ実害の危険性は低い。一方で、宝厳寺裏の斜面、調査地点No.1、No.2の斜面は地盤の緩いI層がGL-1.0mまであり、これは表層崩壊が発生するといわれているGL-0.5～-2.0程度内である⁹⁾。またこの地点は傾斜がきつく崖が高いため、崩壊が起きた際には多量の土砂が崩れる可能性がある。さらに崖と建物の離隔が小さいため、崩壊流出土砂の範囲内に建物が入る可能性がある。

そこで、より崩壊の起きやすいNo.3における崩壊挙動と、その誘因となった降雨イベントを捉えることで、実測値を基に斜面安定解析モデルを構築し、これを他地点に適用できれば、天神山における安定性評価に有効な手段と成り得る。なお他の地点への適用する際には、土質試験で土の物性調査や地下水調査を行い、適宜モデルの修正が必要である。また、今回簡易動的コーン貫入試験を実施した2カ所以外の地点や、特に風化が進んでいる可能性が高いNo.3、および宝厳寺裏の斜面において追加調査をする必要があると考えられる。



図8 天神山調査地点



写真5 調査地点No.1およびNo.2



写真6 調査地点No.3



写真7 調査地点No.4

表2 調査地点の東経と北緯

計測位置	東経	北緯	備考
No.1	135° 05' 31.3"	35° 30' 09.3"	宝厳寺裏山。階段上から54段目
No.2	135° 05' 31.3"	35° 30' 09.1"	宝厳寺裏山。階段上から76段目
No.3	135° 05' 27.3"	35° 30' 11.6"	崖から3.0m、墓地から20.5m
No.4	135° 05' 28.9"	35° 30' 12.0"	崖から3.0m、崖に向かって右手山から4.6m

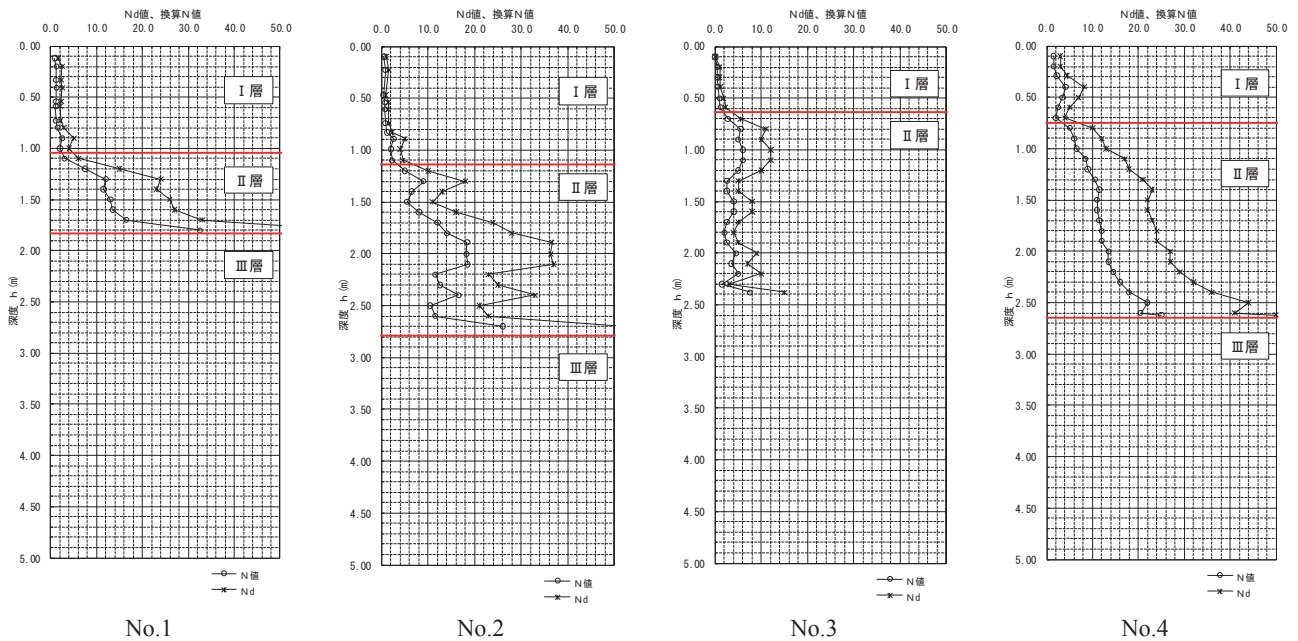


図9 簡易動的コーン貫入試験 試験結果

5. まとめ

本論文では、加悦重要伝統的建造物群保存地区、天神山の降雨による斜面崩壊の危険性について考察した。2010年2月と2012年3月に実施した現地踏査を比較した結果、實相寺裏手の斜面において斜面形状の変化が目視によって確認された。天神山山頂に2010年11月に設置した降雨モニタリングシステムにより得られたこの期間の雨量データを分析し、2011年の8月から9月の豪雨によって斜面変状が引き起こされた可能性を確認した。今後も降雨データを蓄積することで、崩壊の誘因となる雨量の基準線を予測できると考える。

また、力学特性を明らかにするために簡易動的コーン貫入試験を実施した結果、表層崩壊の危険性が高い表層厚を確認した。實相寺裏手の斜面については、簡易動的コーン貫入試験の結果から、特に風化が進行している可能性が高く、今後崩壊の原因になりそうな亀裂も確認できるため、警戒が必要である。宝厳寺裏の斜面においては、表層が緩く、崩壊が発生した際の土砂量も多いことが考えられ、建物と崖の離隔が小さいため、土砂流出範囲に建物が重なる可能性が考えられ、さらなる検討を必要とする。

小規模ながらも崩壊の危険性の高い實相寺裏手斜面において、斜面安定解析モデルを構築できれば、他の大規模斜面においても、正確な解析モデルの構築が期待できる。また安定解析には地表面形状が必要となるため、3Dレーザースキャナを用いた地表面形状の計測を実施したいと考えている。

謝辞： 降雨モニタリングシステムの設置にあたり、与謝野町教委、下川賢司氏および(株)演算工房にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 京都府与謝郡加悦町：「加悦町加悦 伝統的建造物群保存対策調査報告書」， pp.42-44, 口絵3, 2005.3.
- 2) 石田優子・深川良一・酒匂一成・吉原大貴：加悦重要伝統的建造物群保存地区における斜面防災モニタリング，歴史都市防災論文集，Vol.5, pp.255-262, 2011.
- 3) Ishihara, Y. and S. Kobatake: Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, pp.27-43, 1979.
- 4) 気象庁HP：警報・注意発表基準一覧表，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/kyoto.html>, (2012/5/6現在).
- 5) 気象庁HP：雨と風の表，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/amehyo.html, (2012/5/6現在).
- 6) IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約（翻訳版），p.8, 2007.
- 7) 与謝野町役場：「加悦町史 資料編 第一巻」， pp.33-37, 2007.3.28.
- 8) 地盤工学会：「地盤調査 基本と手引き」， pp.113-116, 2005.4.
- 9) 土木研究所資料：「表層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」， p.1, 2008.11.