

リアルタイム崖崩壊予測システムに関する研究開発

横浜国立大学大学院環境情報研究院 佐土原聡

1. はじめに

大雨による土砂災害が毎年のように発生している。急傾斜地の崩壊そのものを減らすためには防護工事などのハード対策が必要であるが、宅地開発により新たに指定された急傾斜地崩壊危険箇所が、防護工事完了箇所以上に増加する傾向にある。そのような中、2001年4月に土砂災害防止法が施行された。この法律では、国の指針を受けて都道府県が基礎調査、土砂災害警戒区域の指定を行い、市町村が警戒避難体制の整備を行うことになっている。現在、広島県をはじめ15県で警戒区域が指定されている(2005年3月31日現在)¹⁾が、他の自治体では基礎調査を行っている段階であり、区域指定から警戒避難体制整備までの一連の具体的な手法は確立されていない。

そこで全国自治体の土砂災害対応業務の支援を目的として、日常は管理業務を効率的に支援し、緊急時には崩壊危険の高い崖およびその被災危険区域・建物をリアルタイムで予測する、以下の汎用性の高い手法、システムの開発を横浜市を対象に行った。

- 自治体の崖業務の把握と研究の必要性の調査
- 空間情報技術等を用いた崖および被災危険区域の抽出手法
- 崖崩壊予測精度の向上に関する研究開発
- 崖管理・崖崩壊予測システムの構築

2. 研究開発組織

「横浜市崖崩壊予測システム研究」協議会を構成し、5回の協議会を開催し、研究開発を進めた。協議会のメンバーは以下の通りである。

- ・横浜国立大学大学院教授・佐土原聡、他3名
- ・株式会社アカサカテック代表取締役社長・加瀬順一、他2名
- ・研究協力：横浜市関係部局、(財)横浜産業振興公社

3. 自治体の業務の把握と研究の必要性

神奈川県、および横浜市の崖担当部局・関連部局へのヒアリングによって、表1のような業務課題が明らかになった。本研究成果の活用によって、これらの課題の多くを改善することができる。システムで入力・編集を行い、デジタルデータを共有することにより、必要な情報を検索・閲覧できるようになれば、日常業務において防災関係機関相互の業務の重複を解消できること、崖地の所有者への防災指導や崖工事設計、資

料作成の際に、調査表や災害報告等の情報の参照が容易になることなどが挙げられる。災害時業務については、警戒避難の目安となる情報の発信、情報のやり取りの迅速化、共有化された情報による区・市・県での業務連携等を支援できる。

表1 自治体の崖に関する業務の課題

日常業務	データの共有化が必要(行政間の連携が十分でない)
	業務の重複がある(県と市それぞれで崖台帳を作成など)
	業務時に参照できる情報が不足している
	住民へ伝える情報が不足している
	データの更新頻度が低い
災害時業務	崖整備の優先順位づけがむずかしい
	連絡効率がよくない
	対応順番の判断がむずかしい
	避難勧告・指示が出にくい
データ	市町村単位の崩壊危険情報では対応が取りにくい
	紙データ: 必要な情報を見るのに時間がかかる
	デジタルデータ: 作業量や時期により書式が異なる データ間や地図とのリンクがはられていない

4. 空間情報技術等を用いた崖および被災危険区域・建物の抽出手法

本手法は、現地での地上測量以外の手法で効率的に急傾斜地およびその被災危険区域を抽出する手法として、1) 航空機搭載型レーザスキャナにより計測した三次元空間データ(レーザープロファイラ・データ、以下、LPデータとする)と数値標高モデル(DEMデータ)を用いた急傾斜地の抽出手法、2) 過去の崩壊履歴(災害報告)の資料から、急傾斜地が崩壊した際の土砂流出距離を統計的に算出し、被災危険区域を地図化する手法である。LPデータの分解能(データ取得間隔)は約2m、位置精度: ±30cm、高さ精度: ±15cmである。

(1) 空間情報技術等を用いた崖の抽出

これまでLPデータを利用した急傾斜地抽出の試みは行われているが、地表面に植生、樹木が生えているところが多いことから、実用に耐える精度で抽出することはむずかしいと考えられている。本研究では、データの分散状況の違いに着目して、斜面上に存在しているLPデータ内の各ポイントの近隣データとの分散(標準偏差)の特性を判別分析に組み込んで抽出しようと試みた。

急傾斜地の抽出手法の概要を図1に、使用したデータの一覧を表2に示す。LPデータの散布状況とDEMを用いた教師付き分類による判別を行っている。検証は、航空写真画像から判断して、確実に急傾斜地と判断できる区域が本手法によりどの程度正確に抽出されているかによって行った。対象区域は、横浜市中心市街地を一部含む1.5km×2.5kmの区域である。航空写真画像

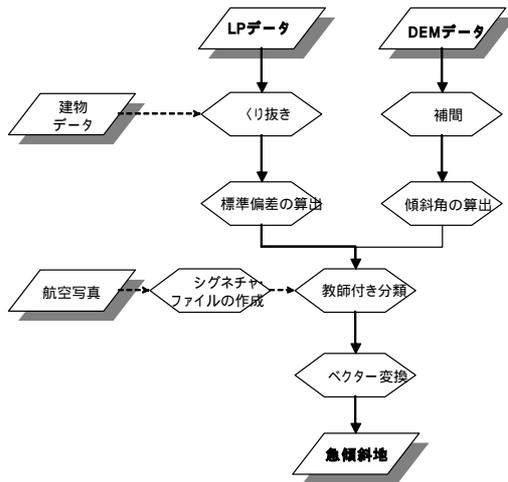


図1 急傾斜地の抽出手法の概要

表2 急傾斜地の抽出に使用した空間データ

	製品名・データ提供社	解像度(縮尺)
LPデータ	(株)国際航業ラムゼデータ (レベル1)	2m
DEMデータ	横浜市	25m
建物データ	横浜市	1/2500
航空写真	(株)パスコ2003年航空写真データ	15cm

表3 急傾斜地の抽出手法の検証結果

	検証ポリゴン		過剰面積 (%)
	充足面積 (%)	不足面積 (%)	
DEM + LPデータ散布度	23,231㎡ (87%)	3,416㎡ (13%)	6,974㎡ (26%)
DEMのみ	20,434㎡ (77%)	6,216㎡ (23%)	8,317㎡ (31%)

をもとに、当該区域内で確実に急傾斜地と判断できる14箇所を手動で描画し、検証のためのポリゴンデータを作成し、本手法で抽出した急傾斜地ポリゴンとの重ね合わせ解析を行った。結果が表3である。検証ポリゴン内での充足割合について+10%、検証ポリゴン外に過剰に抽出した割合について+5%、DEMだけを用いた場合よりも改善が見られた。なお、LPデータの、あるポイントにおける標準偏差を求めるために、そのポイントの周辺セルを拾って計算しているが、その範囲をセル数2から4まで距離を変えて行い、セル数3の距離を拾った場合が最も精度が高い結果となった。

これらの急傾斜地ポリゴンデータに対して、DEMデータから“高さ”、“傾斜角度”、“傾斜方向”の属性データを付け加えることで、より具体的な急傾斜地の形状情報を得ることが可能になる²⁾。

(2) 被災危険区域の算出とGIS上での展開

土砂災害警戒区域等を設定するためには、前章で抽出した急傾斜地ポリゴンが崩壊した際の土砂流出区域(被災危険区域)を考える必要がある。そこで、過去の急傾斜地崩壊の記録資料をもとに、“高さ”と“傾斜角度”に応じた土砂流出距離を算出することで、実践的な被災危険区域を設定する。

表4 重回帰分析の結果

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関	単相関
崩壊高(m)	0.503	0.859	0.884	0.873
勾配(度)	-0.033	-0.181	-0.370	-0.250
定数項	1.953	-	-	-

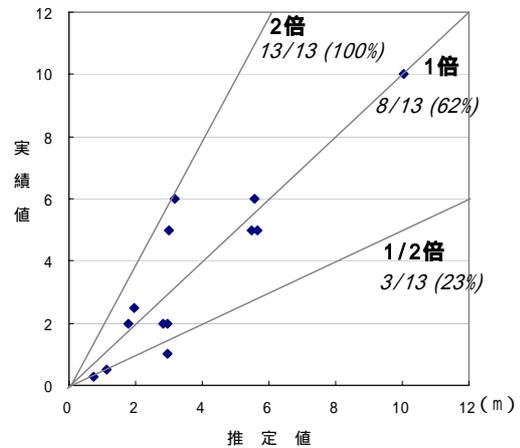


図2 実際の崩土の到達距離と重回帰分析による推定値の関係

崩壊履歴として、「神奈川県災害報告」のデータを分析した。H13~16年度の401件の災害報告のうち、崩土の到達距離に関して何らかの記載があるものは169件であった。その中で、調査員による崩壊した急傾斜地の横断図(描画)をもとに、崩土の流出に関する分類を行った結果、崩土が障害物などでせき止められていない“正確な崩土の到達距離がわかるもの”は13件にとどまった。この13件に対する重回帰分析を行い、急傾斜地の属性(崩壊高さ)と勾配から、崩土の到達距離を分析した。その結果、以下の式が得られ(表4)、決定係数は0.795であった。

$$\text{崩土の到達距離(m)} = 0.503 \times \text{崩壊高(m)} + (-0.033) \times \text{勾配(度)} + 1.953 \cdot \text{式}$$

崩土到達距離の実績値と重回帰分析による推定値の関係を図2に示す。崩壊履歴データ全13件に対して、推定値の1/2倍に含まれるものは3件(23%)、1倍に含まれるものは8件(62%)、そして、推定値の2倍には全ての履歴データが含まれていた。これらの関係性から、式の結果に対して、1/2倍~2倍などの幅を持たせて、被災危険区域を設定することは有効であると考えられる。

GIS上への展開として、前章にて抽出した急傾斜地ポリゴンに対して、“高さ”、“傾斜角度”、“傾斜方向”の属性データを与えることが可能である²⁾。これらの属性を持った急傾斜地ポリゴンに対して、式を用いることで、各急傾斜地ポリゴン土砂流出距離が推定でき、その結果をバッファとしてGIS上へ展開できる(図3)。本解析はサンプル数が少なく試行的な検討であるが、急傾斜地の属性である崩壊高と勾配から、崩土の到達



図3 被災危険区域ポリゴン

距離を推測する可能性を示唆することができる。

5. 崖崩壊予測精度の向上に関する研究開発

図4のように自治体が所有している既存データ・資料や既設の雨量観測網により取得された雨量データを有効活用し、崖の属性を記した台帳と過去の崩壊事例をもとに、崖の属性（素因）の崩壊影響分析を行い、危険度の評価を行う。さらに、降雨（誘因）の崩壊影響分析を行って、リアルタイムでの予測に役立てるものである。なお、研究計画では崖の属性による危険度の評価得点と雨量とを関連づけた予測を行う方向で分析を進めたが、今回の結果からは両者に明確な関係を認めることができなかったため、両者の結果を独立にシステムに反映することとした。

(1) 崖の属性（素因）の崩壊影響分析

崖崩壊に関する危険度評価と要因分析は、従来からの地盤工学分野の成果である斜面安定解析モデルを取り入れた解析的手法と、過去の崩壊事例に基づく経験的手法に大別できる。前者は対象斜面における崩壊危険度を精度よく評価することが可能だが、地域・斜面により適用できるモデルが異なるため、対象となる全斜面に対して行政が詳細な地形・地盤データの整備およびモデルの検討を行うことは、費用面などから現実的でない。経験的手法に関しては、衛星データなどのデジタルデータから、過去に崩壊した箇所と同様の属性を持つ箇所を抽出するものがあるが、メッシュ単位などで扱っており、個々の斜面の評価には適さない。沖村ら³⁾が現地調査のデータから統計解析を行うことで、豪雨による六甲山系での崩壊要因とその影響の大きさを明らかにしている。当時、沖村らが得たデータは研究者が自ら現地調査を行うことによって得たもので、市町村全体を把握するにはさらに広範囲なデータを集める必要があった。本研究は、行政が持っているデータを有効活用して経験的手法による危険度評価を行うこととし、横浜市を対象に急傾斜地崩壊危険箇所点検調査票を活用し、崖属性による崩壊影響要因分析を行う。本調査は「急傾斜崩壊危険箇所等点検要領」

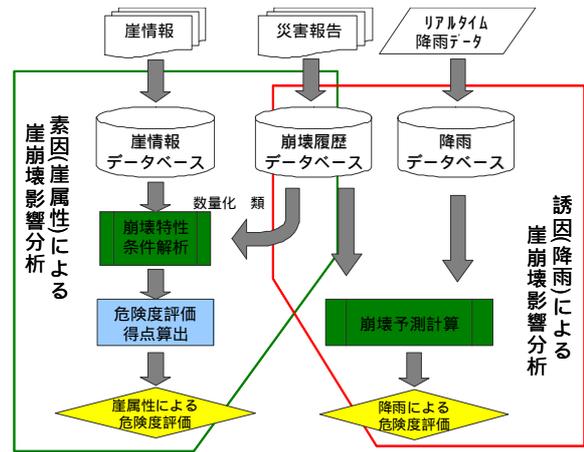


図4 崩壊予測のための解析フロー

に基づき5年毎に各都道府県において実施されるもので、最近では平成11～14年度に全国で実施されている。神奈川県では本調査対象が、土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域設定のための基礎調査の対象となっている。従って、本調査結果を活用することで、既存情報の活用が可能となり、汎用性の高い崩壊予測手法を提案することが可能となる。

数量化 類を用いて解析を行った。説明変数には、急傾斜地崩壊危険箇所点検調査票の地形要因、地質・土質要因、環境要因の主なものをとりあげた。目的変数は、崩壊の有無とし、平成10～16年度神奈川県災害報告、平成13～16年度横浜市災害報告の崖崩れ発生箇所を含む急傾斜地を「崩壊あり」、点検調査票で崩壊履歴なく、災害報告の崖崩れ発生箇所も含まない急傾斜地を「崩壊なし」とした。横浜市の崖崩れは Slump型（円弧すべり）、Slide型（表層すべり / 上部だけが崩れる）、Fall型（風化・落下）、Slide型（表層すべり / 基盤上の表層がすべる）の4パターンに分類できると言われている⁴⁾が、雨による崩壊が直接の要因になりにくいと考えられる Fall型が、危険度評価解析においてもアイテムごとのカテゴリーの重み係数が理論と整合しない傾向が強かったため、最終的には Fall型を除いた3パターンをまとめて解析した。その結果が表5である。解析対象となった崖は521サンプル、そのうち崩壊ありのがけは55サンプルであった。レンジはアイテムごとに重み係数の最大値と最小値の差であり、どのアイテムが崩壊に効いているかを判断する目安になるが、「対策工の有無」が最も大きく影響していることがわかる。なお、崩壊あり、なしのカテゴリースコアの頻度分布は図5の実線で示されており、判別率は73.5%であった。

解析結果を検証する目的で、平成16年度10月の台風22号、23号で崩壊した崖が今回の解析でどのようなスコアになっているかを算出した（図6点線）。比較的高いスコアの崖と判断されたものが崩壊して

表5 数量化 類による解析結果

アイテム	カテゴリ	重み係数	レンジ	サンプル数		
				崩壊あり	崩壊なし	計
傾斜度	4.0度未満	-0.622	0.769	4	81	85
	4.0度以上5.5度未満	0.147		34	238	272
	5.5度以上	0.079		17	147	164
横断形状	オーロ・ノリあり	-0.789	0.956	2	18	20
	凹凸あり	0.167		32	227	259
	平坦	-0.113		21	221	242
遷急線	明瞭	0.040	0.154	40	344	384
	不明瞭	-0.113		15	122	137
表土の厚さ	5.0cm未満	0.055	0.076	13	134	147
	5.0cm以上	-0.022		42	332	374
開口亀裂	あり	0.503	0.691	23	119	142
	なし	-0.188		32	347	379
植生の種類	裸地、草地	-0.200	0.484	6	63	69
	竹林	0.284		12	67	79
	針葉樹、広葉樹	-0.023		37	336	373
樹木の樹齢	4.0年未満	0.179	0.950	52	371	423
	4.0年以上	-0.771		3	95	98
湧水	常時あり	0.166	0.224	10	66	76
	降雨時あり、常時じめじめ	0.063		12	97	109
	乾燥	-0.058		33	303	336
土地利用状況	道路、家	0.061	0.118	24	227	251
	それ以外	-0.057		31	239	270
対策上[報告書優先]	なし	1.017	1.736	43	173	216
	あり	-0.720		12	293	305
				55	466	521
				判別的中率		73.5%

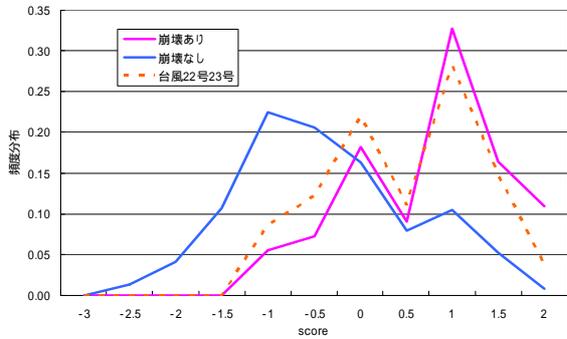


図5 崖のスコア頻度分布

おり、本解析結果の有用性が確認できた。

(2) 降雨 (誘因) の崩壊影響分析

本研究では、現在、実用的に利用されている指標である「がけ崩れ発生限界雨量線：CL」で一般的に用いられる雨量指標 (長期雨量指標 72 時間半減期実効雨量、短期雨量指標 1.5 時間半減期実効雨量) を用いることとする (式)。一般的に CL を求める際は、地域 (観測所) 毎に検討を行うが、本研究では崩壊時の正確な降雨量に近い値を得るため、過去の降雨にさかのぼることのできる代表的な観測点のみではなく、複数の観測データを用い近傍の観測点の雨量を採用した。降雨の前後に24時間無降雨のある期間を一連の降雨とした。

雨量解析では、前節で数量化 類解析の対象とした急傾斜地崩壊危険区域 (521 箇所) 内の崩壊記録のうち、災害報告に崩壊時刻が記載されている横浜市内の30件を対象とした。雨量データは、旧横浜治水事務所等の合計 16 観測点で観測された 1 時間値を用いた。検証には H16 年 10 月の台風 22・23 号災害記録を用い、県と市の災害報告書に崩壊時刻の記載がある 27 件を対象とし、雨量データは、横浜市消防局 99 消防署所で観測さ

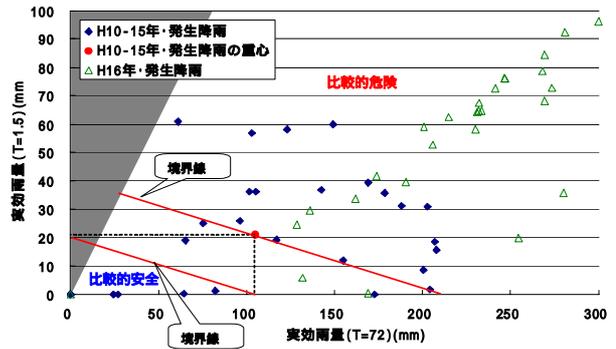


図6 平成 10～15 年実績に基づく危険ランク境界線の提案

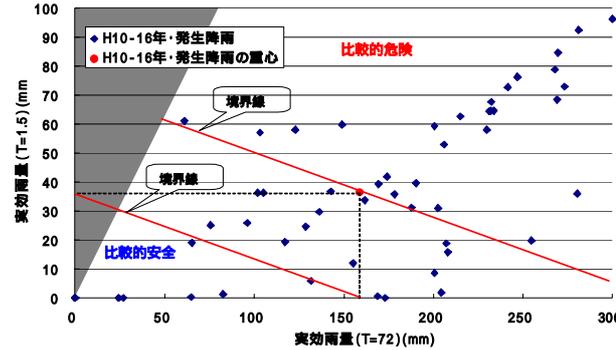


図7 平成 10～16 年実績に基づく危険ランク境界線の提案

$$R_t = r_t + (1 \cdot r_{t-1} + 2 \cdot r_{t-2} + \dots + x \cdot r_{t-x}) = \sum_{n=1}^x n \cdot r_{t-n}$$

$$n = 0.5^n T = (0.5^{1/T})^n \dots \text{式}$$

れている 1 時間値を利用した。

本研究では崩壊発生降雨に基づく危険ランク境界線を提案する。X 軸 (実効雨量 72 時間半減期)、Y 軸 (実効雨量 1.5 時間半減期) に崩壊発生降雨をプロットし、全発生降雨の代表点として重心を取る。重心から X 軸、Y 軸に垂線を引き、各交点を結び境界線 を設定する。この傾きで重心を通る直線をレベル 2 とレベル 3 の境界線 とする。境界線 は、これまでの大半の崩壊が発生している降雨を意味する。また、原点と境界線との間に位置する境界線 も危険降雨の目安として利用する。いずれの境界線も、(ラインを超える) = (危険度が高くなる) と考える。図 6 は、平成 10～15 年度の崩壊実績に基づいて境界線を引いたものである。平成 16 年度の発生降雨のうち 93.8% が境界線 を超えるエリアに位置していることが確認できた。

平成 16 年 10 月の横浜市におけるがけ崩れ災害は全域で災害報告件数約 400 件に上る大災害となった。一度崩壊した崖は崩れにくくなる性質 (免疫性) があるため、市全域に同じインパクトが与えられたとすると、次回の災害では、今回以上の降雨があったときに崩壊の危険性が高い。空振り率を下げ、空振り時間を短縮し、実効性の高い基準を設定するためには危険度ランク境界線を見直す (引き上げる) 必要がある。図 7 は平成 16 年 10 月の発生降雨を加え、境界線を引き直し

たものである。

非線形CL設定モデルに比べると単純ではあるが、理解しやすく、全サンプルの代表点である基準点と境界線を提示することができる。また、容易に再設定でき、最新の履歴情報を踏まえた基準の設定が可能となると考えられる。本システムでは、この境界線を元に安全側から、危険度ランク「1」「2」「3」を設定し、危険度評価得点の高い崖を対象にリアルタイム雨量データを用いて崩壊予測を行うこととする。

6. 崖管理・崖崩壊予測システムの構築

本研究開発の目的は、災害報告、雨量等のリアルタイムデータをシステム上で収集し、崖台帳のデータベースとあわせ一元管理することで、崖崩壊の予測を自動的に行うシステムを構築することである。崖崩壊の予測結果はWeb-GISシステムとして利用可能とし、地図上に視覚的に危険度を提示するだけでなく、県・市の防災担当者や建設事務所間で情報共有ができるようにする。以上の要件に基づき、これまでの成果も組み込んで、図8に示すようなシステムをモデル的に構築した。具体的な内容は以下のとおりである。

- 1) 神奈川県崖台帳、災害報告をベースに、崖台帳、災害報告をデータベース化し、システム上で利用可能な環境を構築した。
- 2) 実運用を想定し、Web型の崖台帳、災害報告、解析結果利用、設定等のユーザインタフェースを構築した。
- 3) フィールドスタッフの利用を想定して、携帯電話上で災害報告を可能とするアプリケーションを構築した。
- 4) 本研究により考案した解析アルゴリズムを実装し、実際に収集したデータから解析結果の出力までの一連のサイクルを構築した。

図9は本システムの初期画面である。対象地域の地図とともに、日常業務、災害時業務のメニューが現れる。日常業務として崖台帳、および災害報告の作成、検索ができる。地図上には崩壊危険区域、災害報告にある過去の崩壊箇所が表示されている。また、降雨時には、崩壊危険区域の危険ランクが色によって表示されるようになっていく。緊急時業務のメニューには、各崖の崩壊による影響範囲の表示、雨量データの閲覧、降雨にともなう崩壊危険の評価に関するデータの閲覧ができるようになっていく。

さらに、フィールドスタッフが、崖の崩壊現場にて、

日常業務
・崖台帳検索
・崖台帳新規作成
・災害報告検索
・災害報告新規作成

緊急時業務
・崩壊影響範囲検索
・雨量データ検索
・崩壊危険度パラメータ設定

携帯端末により災害報告の第一報情報を入力し、システムに送信し登録できる機能、現地調査時等に崖情報を検索する機能が付いている。

7. まとめ

本研究開発では自治体が保有しているデータをデジタル化し、GIS等の空間情報技術を活用して、日常の崖の管理、災害時の崖崩壊危険、その影響範囲等をリアルタイムで把握して、警戒避難に役立てるための解析手法の検討とプロトタイプシステムの開発を行った。今後の課題として、崩壊履歴を蓄積することによりサンプル数を増やして解析精度を向上させること、高密度雨量データや予測値を利用した、本格的なリアルタイム予測システムへの展開などが挙げられる。

参考文献

- 1) 全国治水砂防協会HP : <http://www.sabo.or.jp/>
- 2) 川崎昭如, 吉田聡, 佐土原聡: 統計的手法による横浜市の崖崩壊の要因分析-行政の防災対策業務支援のための既存情報の活用-, 日本建築学会計画系論文集, No.569, pp.125-130, 2003.7
- 3) 沖村孝, 杉本博: 統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文報告集 No.290, pp.89-97, 1972.10
- 4) 横浜市がけ危険度評価委員会: 横浜市がけ危険度評価報告書, 2000.3

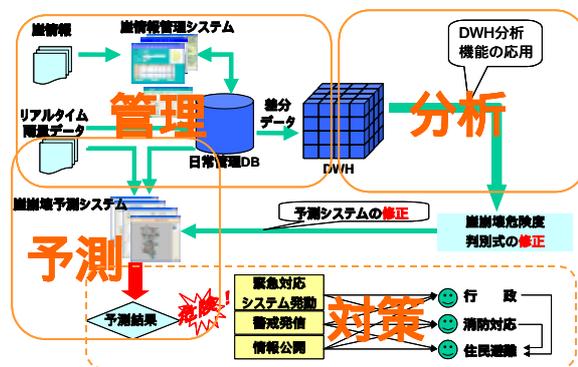


図8 システムの機能・構成



図9 リアルタイム崖崩壊予測システムの初期画面