

レーダー雨量計資料を用いた崩壊地発生要因の 分析と流域生産土砂量の推定について

RADAR RAIN GAUGE DATA BASED ANALYSIS OF SLOPE FAILURE FACTOR AND ESTIMATION OF SEDIMENT YIELD ON SARU RIVER BASIN

村上泰啓¹・中津川誠²
Yasuhiro MURAKAMI, Makoto NAKATSUGAWA

¹ 正会員 北海道開発土木研究所 環境研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

² 正会員 工博 北海道開発土木研究所 環境研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

The engineering objective of this research is to find the outline process of slope failure occurrences. In the past several years, torrential rainfall has triggered serious slope failures and caused large socio-economic damage due to loss of life and property Japanese nationwide. In recent years, the growing availability of digital topographic data and increased reliability of radar rain gauge data suggest modeling efforts to predict the timing and location of slope failure in mountainous areas in order to reduce risk to human life and property.

To address this concern, this paper has tried to reveal a relationship between slope failure ratio and rainfall/topographic factor on Saru river basin using grid based model. Finally we found the followings: 1) slope failure ratio could be estimated using geographic/topographic and radar rain gauge data. 2) The amount of slope failure in the Saru river basin triggered by August 2003 disaster totaled 19 million cubic meters, and 10% of the total amount of sediment produced was flushed out from the river basin as suspended solid.

Key Words: Rader rain gauge, slope failure, sediment yield.

1. はじめに

豪雨による斜面崩壊に伴う土砂災害が近年頻発している。豪雨に伴う土砂災害の予測は人的被害を最小限に抑えるためのソフト対策として必要不可欠といえ、こうした背景から、スネーク曲線¹⁾、土壌雨量指数²⁾に代表される防災指標が開発され、土砂災害の警戒避難基準として活用が進められてきた。また、近年の国土数値情報に代表されるDEMやレーダー雨量計の整備が進捗し、50mメッシュの標高データ、レーダーアメダス解析雨量、分布型流出モデル、斜面安定解析を組み合わせた表層崩壊危険度指標の試み³⁾も報告されているが、個々のメッシュ単位での土砂災害の予測は未だに困難といえる。筆者らは、50mメッシュ単位ではなく、1kmメッシュ解像度での崩壊地面積率と地形因子・降雨因子の関連性を見出すことを試みた。教師データとして、2003年8月に北海道太平洋沿岸にもたらされた豪雨により発生した額平川流域の斜面崩壊GIS資料、50mメッシュ国土数値地図、レーダー雨量計・地上雨量計資料を用い、1kmメッシュ単位の崩壊地面積率の推定式を導いた。この推定式を用いることで崩壊地判読が未実施だった二風谷ダム流域全体の崩壊土砂量・流木発生量と収支の推定を行なった。

また、本推定式は降雨指標を与えることで崩壊地面積率の推定を簡易に行うことが可能であり、本イベントで異音が確認された時間帯で、崩壊地面積率がどのように変化したかについても参考まで評価を行なった。

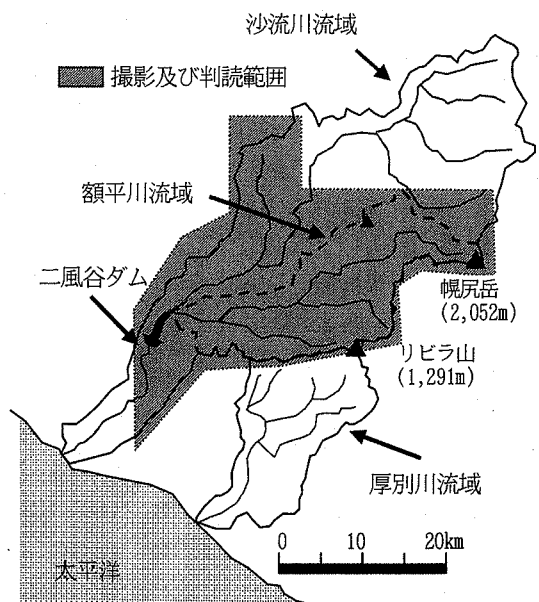


図-1 2003年8月豪雨後の航空写真撮影範囲

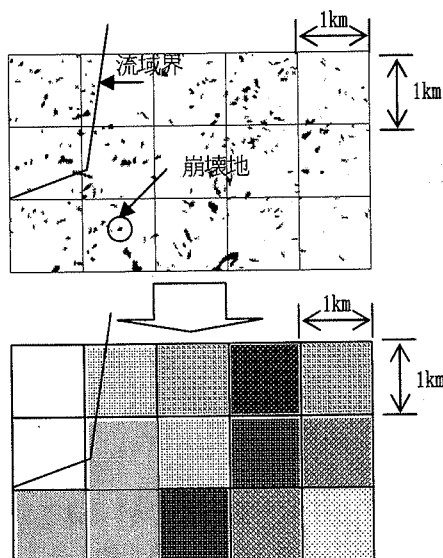


図-2 崩壊地分布のメッシュ化（上段メッシュ：実際の崩壊地分布，下段メッシュ：崩壊地面積率）

2. 崩壊地と降雨・地形因子の関係

額平川流域（流域面積 384km²）では，新規に発生した崩壊地が4,000箇所を超え，崩壊土砂量は800万m³に達した⁴⁾．崩壊地発生要因を箇所毎に調査するのは現実的ではないため，筆者らは以下の手順でメッシュの各々の因子を求めた．

(1) 教師エリアの崩壊地データのメッシュ化

本イベント後に撮影された航空写真範囲（図-1に示す範囲）で崩壊地判読を行なった結果⁴⁾を用い，豪雨前後の比較で新規の崩壊地が把握されている額平川流域を教師エリアとした．図-2に示す様に，レーダー雨量計のメッシュデータと同じ範囲（1km×1km）でメッシュ内の崩壊地面積率を求め，面積で除すことで崩壊地面積率を求めた．教師エリアである額平川流域における崩壊地面積率の分布を図-3に示す．

(2) 降雨因子（レーダー雨量計及び地上雨量計）

国土交通省では全国26箇所にレーダー雨雪量計を整備しており，北海道においても道北（函岳），道東（霧裏山），道央（ピンネシリ），道南（乙部岳）の4レーダーが整備・運用されている．レーダー雨量計の解像度は，現在，国土数値情報三次メッシュに相当する1km×1kmであり，今後，地上雨量との整合性を計ったオンライン合成値が配信されれば，防災面での利用価値は飛躍的に高まるものと期待される．

現段階では，全国26基のレーダー雨量計の観測データを地上雨量計データと合成し，防災情報提供センター（<http://www.bosai.joho.go.jp/>）において，10分間隔で全国の雨量強度・分布域の画像情報が公開されている．北海道開発局では2003年における主要な降雨10ケース（本イベント含む）に着目し，国土交通省のレーダー雨

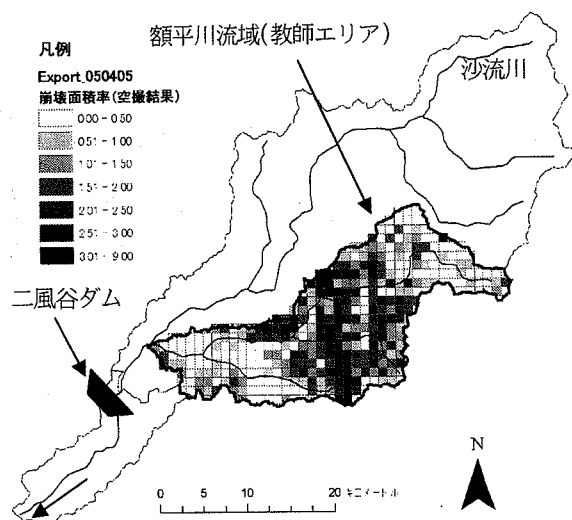


図-3 崩壊地判読範囲の崩壊地面積率のグリッド化（沙流川上流域は空撮未実施のため崩壊地面積率が不明）

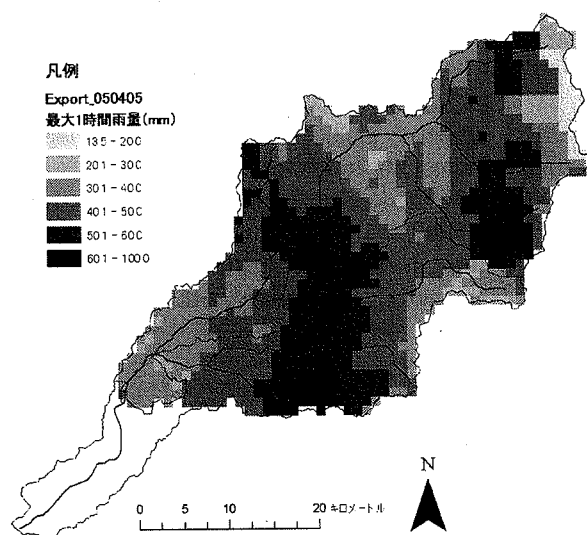


図-4 最大1時間雨量（レーダー雨量計）の分布

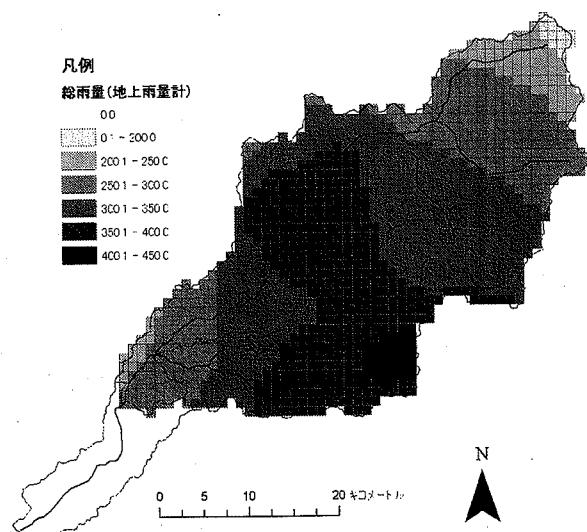


図-5 総雨量（地上雨量計）の分布．八田⁴⁾により作成された総雨量分布図をメッシュ単位に再加工．

量計全国合成手法⁶⁾を踏まえ、レーダー雨量計データ(5分)と地上雨量計データ(10分, 60分)を用いたオフライン合成を行った⁷⁾。オフライン合成値とは、レーダー雨量計受信電力値, 地上雨量計資料等を用いて1kmメッシュ各々における雨量値の再解析を行った結果である。図-4に各メッシュの最大1時間雨量値をプロットした。

総雨量は全道276地点の地上雨量観測所のデータを用い、八田⁴⁾が作成した総雨量の等雨量線図をメッシュ単位に加工し、図-5に示した。これらの資料を最大一時間雨量と総雨量の降雨因子として使用した。

(3)地形因子

国土地理院による50mメッシュ標高データ(DEM)の整備により、日本全国の地形評価が可能になった。ここでは、対象流域範囲の1kmメッシュ毎の地形特性を表-1に示す内容で整理した。ここで、メッシュ内の斜面勾配の平均値、起伏量は1kmメッシュを500m×500mに4分割し、それぞれのメッシュで最高、最小標高の差を起伏量として求め、4つの起伏量の最大値を該当メッシュの起伏量とした。

ここで用いた縦断曲率⁵⁾という指標は、を採用した。地形を1kmメッシュ内の起伏量で平均化すると、地形の特長(例えば谷地形・尾根地形の分布量)が表現されない可能性が高い。このため、崩壊地発生に寄与すると考えられる谷地形の形状を縦断曲率(Profile Curvature)と呼ばれる指標で客観的に評価することで、1kmメッシュという粗さでも斜面災害ポテンシャルを表現できるものと考えた。

まず、1kmメッシュ内の50mメッシュ毎の標高値に着目し、3×3の移動枠を以下(Z₁~Z₉)のように設定するとき、この9メッシュにおける縦断曲率⁵⁾は(1)式で計算できる。

Z₁

Z₂

Z₃

Z₄

Z₅

Z₆

Z₇

Z₈

Z₉

表-2 カテゴリ区分

分類	最大時間雨量	総雨量	縦断曲率 平均値	地質	起伏量
1	35mm 以下	300mm 以下	0.2以下	段丘, 崖錘, 沖積層	130m 以下
2	35-45mm	300-350 mm	0.2-0.6	蝦夷層群, 函淵層群	130-190m
3	45-55mm	350-400 mm	0.6-1.3	中生代~古 第三紀堆積 岩類	190-250m
4	55mm 以上	400mm 以上	1.3-2.2	日高変成岩 類, カムイ コタン	251-310m
5			2.2以上	新第三紀堆 積岩類	310m 以上
6				蛇紋岩	

表-1 地形因子の設定

項目	小項目	地形データの作成方法
斜面 勾配, 曲率	1kmメッシュ内の起伏量	1kmメッシュ内にある4つの500mメッシュの最高・最低標高値の差を各々算出し、最大値を起伏量とした。
	1kmメッシュ内平均曲率 profile curvature	計算対象セルを中心とした周囲3×3セルから縦断曲率(PR)を算出。このうち、1km内の凹セルのみ対象として、平均値を算出した。
地質	1kmメッシュ内の代表地質(占有面積が最も大きいもので代表)	蝦夷層群・函淵層群, 中生代-古第三紀堆積岩類, カムイ変成岩類・日高変成岩類, 蛇紋岩, 新第三紀堆積岩類, 段丘崖錘沖積層の6つに大別した。

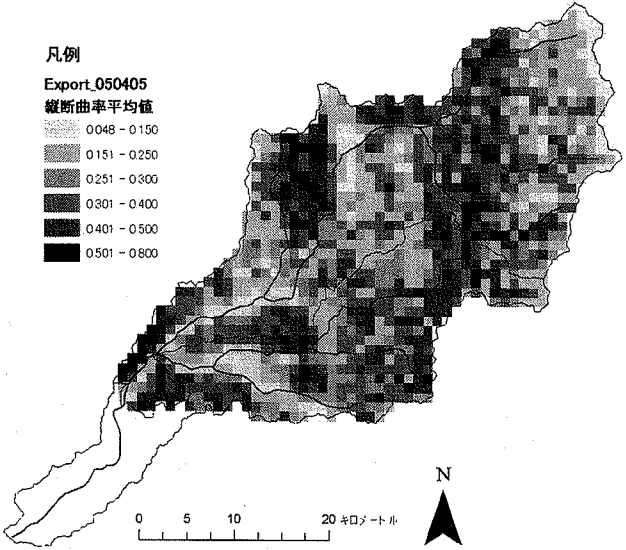


図-6 沙流川流域の縦断曲率(平均値)分布

$$PR=2(DG^2+EH^2+FGH)/(G^2+H^2)$$

(1)

$$PL=-2(DH^2+EG^2-FGH)/(G^2+H^2)$$

(2)

ここで、 $D=[(Z_4+Z_6)/2-Z_5]/L^2$, $E=[(Z_2+Z_8)/2-Z_5]/L^2$, $F=(-Z_1+Z_3+Z_7-Z_9)/4L^2$, $G=(-Z_4+Z_6)/2L$, $H=(Z_2-Z_8)/2L$, L :メッシュの格子間隔, PL は横断曲率。

縦断曲率は上に凸の地形では負の値, 上に凹の地形では正の値を示すため、高橋ら⁵⁾によれば、縦断曲率と横断曲率は負の相関性を示す場合が多い。このため、ここでは、谷地形が雨水を集め易く、崩壊地発生に影響する

表-3 数量化理論Ⅰ類によるカテゴリスコア

分類	最大時間雨量	総雨量	縦断曲率 の平均値	地質	起伏量
1	-0.63	0.08	-0.63	-0.17	-0.33
2	-0.35	-0.27	-0.39	-0.21	0.17
3	0.11	0.13	0.09	0.15	0.31
4	0.57	0.28	0.44	0.19	0.26
5			0.32	-0.22	-0.18
6				0.10	

表-4 二風谷ダム流域の地質別崩壊面積及び生産土砂量推定結果

流域名	地質区分	メッシュ数 (1km ²)	崩壊地面積 a (推定) : km ²	崩壊地面積 (実測) : km ²	平均崩壊深 ⁴⁾ b (m) ※	崩壊発生土砂量 = a×b (推定値 : 10 ³ 千 m ³)
額平川流域	段丘, 崖錘	21	0.13	0.05	2.00	260
	函淵層群	11	0.13	0.16	2.41	310
	中生代～古第三紀堆積岩類	195	2.96	3.01	1.36	4,026
	蝦夷層群	87	1.11	1.16	2.41	2,675
	カムイコタン変成岩類	1	0.02	0.07	0.75	15
	新第三紀堆積岩類	37	0.23	0.24	1.93	444
	蛇紋岩	21	0.25	0.28	1.36	340
	日高変成岩類	9	0.04	0.04	0.75	30
	沖積層	10	0.02	0.05	1.00	20
	小計	392	4.89	5.06	-	8,120
(額平川流域を除く)	段丘, 崖錘	15	0.04	-	2.00	80
	函淵層群	8	0.03	-	2.41	72
	中生代～古第三紀堆積岩類	249	3.74	-	1.36	5,086
	蝦夷層群	82	0.65	-	2.41	1,567
	カムイコタン変成岩類	62	0.89	-	0.75	666
	新第三紀堆積岩類	84	0.43	-	1.93	830
	蛇紋岩	85	0.88	-	1.36	1,197
	日高変成岩類	218	2.64	-	0.75	1,980
	沖積層	22	0.02	-	1.00	20
	小計	825	9.32	-	-	11,498
二風谷ダム流域合計		1,217	14.21	-	-	19,618

※ 平均崩壊深のうち、サンプル数の関係で函淵層群は蝦夷層群と同じ値、日高変成岩類はカムイコタン変成岩類と同じ値を採用している。

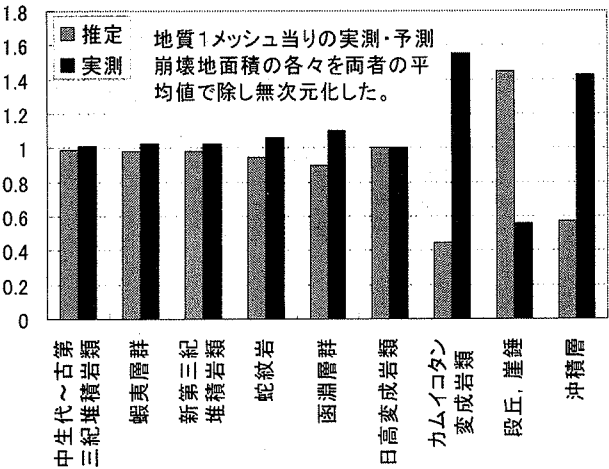


図-7 地質1メッシュ当り崩壊地面積の実測値と推定値の比較(額平川流域)。数値が1に近いほど、予測値が実測値に近いことを示す。

可能性が高いという仮定の下、縦断曲率の正值のみを1kmメッシュ内で集計して平均した。二風谷ダム流域の縦断曲率(平均値)を1kmメッシュ毎に平均した結果を図-6に示す。これによれば、縦断曲率値の高いメッシュ(谷地形が多いと考えられるメッシュ)は上流部よりもむしろ中流域に多いという特徴が明らかになった。

3. 崩壊地面積率推定モデル

沙流川流域で出水前後の比較から新規に発生した崩壊地の情報が得られているのは支川額平川流域(流域面積384km²)のみである。このため、ここでは教師エリアとして額平川流域を選定し、当該流域内の崩壊地面積率、降雨因子、地形因子の関連性を評価してみる。ここで、目的関数を崩壊地面積率とし、説明変数を表-2に示すカテゴリで表した。これらの関係を数量化理論Ⅰ類で分析

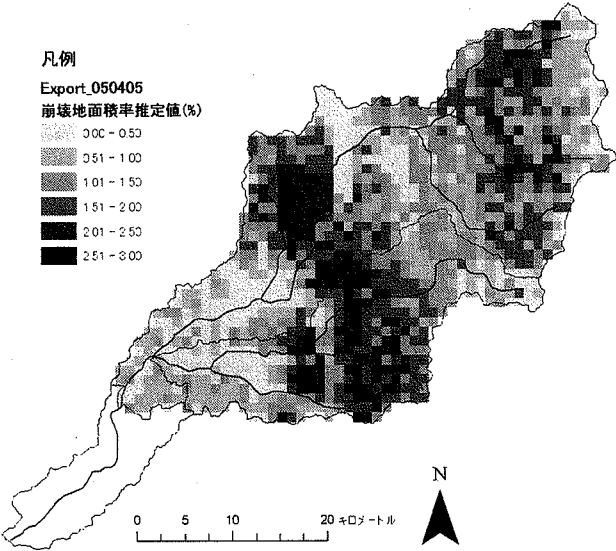
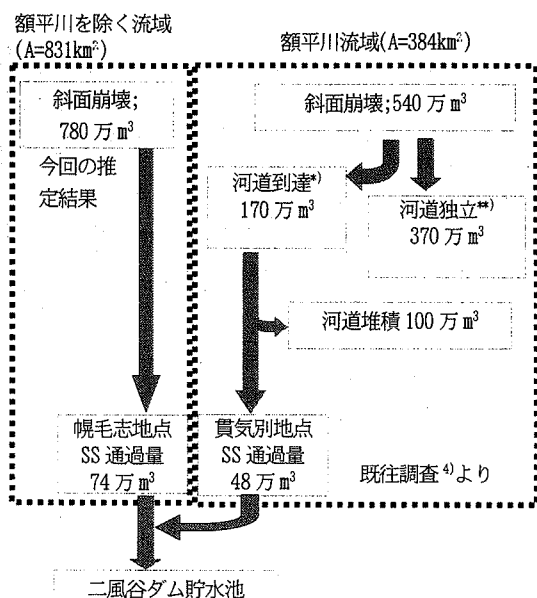


図-8 崩壊地面積率の推定結果(二風谷ダム上流域)

した結果、表-3に示すカテゴリスコアが得られた。このカテゴリスコアを用いることで、任意の1kmメッシュにおける崩壊地面積率を推定できる。すなわち、メッシュにおける降雨因子、地形因子は前述までの作業で明らかになっているので、表-2、表-3からカテゴリスコアC_{si}を決定すると、メッシュ毎の崩壊地面積率SR_iは(3)式で推定できる。

$$SR_i = \sum_{s=1}^n C_{si} + SRR_{mean} \quad (3)$$

ここで、i:メッシュ番号,SR_i:メッシュiにおける崩壊地面積率,C_{si}:メッシュiにおけるカテゴリスコア,SRR_{mean}:教師エリアの崩壊地面積率の平均値,A_i:メッシュiにおける流域面積,n:カテゴリ数。



土砂体積 V は空隙無しの実質体積 V_s に換算 ($V_s = V * 1.82.65$)
 *) : 崩壊地の内、河道に到達したと見なされる崩壊地。
 **) : 崩壊地の内、河道に到達していないと見なされる崩壊地。
 SSデータ集計期間 : 2003/08/09 01:00~2003/08/12 00:00

図-10 二風谷ダム流域の土砂動態 (推定)

(3)式の信頼性を検証するため、表-4 に示した教師エリアの地質別崩壊地面積率の実測値と予測値 ((3)式による推定値) を地質 1 メッシュあたりで無次元量に換算した結果を比較し、図-7 に示した。サンプル数の少ない地質での(3)式による推定値の適合度は低いものの、流域で占有率の高い地質での崩壊地面積の適合性は実用上十分であると考えられる。以上の関係を用いることで、二風谷ダム流域で崩壊地判読が未実施だったエリアの崩壊地面積率の推定を行なった。流域各メッシュに降雨因子、地形因子を与え、(3)式から崩壊地面積率を求め、結果を図-8 に示した。図-3 に示す教師エリア (額平川流域) の中流域で崩壊地面積率が高い傾向は概ね再現できたものと考えられる。また、各々のメッシュには代表地質の属性も持たせてあり、既往報告⁴⁾で得られた地質別の崩壊深を乗じることで、地質別の崩壊土砂量も求め、結果を表-4 に示した。額平川流域で新規に発生した崩壊地面積は既往報告⁴⁾で約 5.1km²と見積もられており、今回の推定結果の約 4.9km²は極めて近い値といえる。また、崩壊土砂量は既往報告⁴⁾で約 800 万 m³と見積もられており、今回の推定値もほぼ同様の値となった。

4. 2003 年 8 月豪雨における土砂収支

本イベント直後、二風谷ダム貯水池には約 5 万 m³ に及ぶ流木と約 240 万 m³ の土砂が堆積した。北海道ではこれまで、流域で数千箇所にと及ぶ崩壊地が発生し、ぼう大な土砂・流木がダム貯水池に流入した今回のような事例は過去に例がなかったため、大きな社会的関心を呼んだ。

既往報告⁴⁾では額平川流域に限定して崩壊土砂量・流木生産量を推定したが、今回、額平川流域を除く二風谷

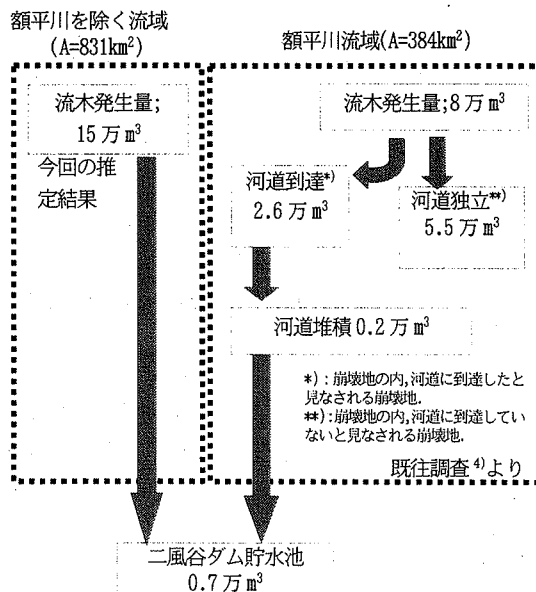


図-11 二風谷ダム流域の山地性新規流木の動態 (推定)

ダム流域の崩壊土砂量の推定を行ない、収支を整理した結果を図-10 に示す。ここでは、SS 体積と比較を行う為、崩壊土砂量を実質体積量に換算している。これによれば、全崩壊土砂量 (約 1,320 万 m³) の概ね 1 割に相当する量 (約 120 万 m³) が SS としてダム貯水池に流入したことになる。しかしながら、二風谷ダム直上流の観測所、幌毛志、貫気別地点における SS は表面採水の分析結果であり、河床付近の掃流砂の移動量までは把握していない。したがって、実際に河川を流下した河床材料の体積は SS の通過分を超えるものと推察され、こうした量を推定するためには今後、数値計算などで掃流砂量を推定し、ダム貯水池に堆積した土砂の粒度組成などから土砂移動量の量と質の検証をしていく必要がある。

参考まで、額平川を除く流域で発生した流木量と収支の推定を行なった。流木量は崩壊地面積に樹種別の国有林材積資料を乗じて求め、額平川流域の流木収支と併せ、図-11 に示した。これによれば、二風谷ダムに堆積した流木 5 万 m³ の内、山地性で新規に生産された流木の体積は約 0.7 万 m³ であることが既往調査⁴⁾から明らかになっている。流木発生量は両流域の合計で約 23 万 m³ であるから、これらを全て山地性樹木であると仮定すると、崩壊地からダム貯水池まで流出した流木量は全体の 3% 程度ということになる。これは土砂に比べ流木が流域外に流出しづらい事を示唆しているものと考えられる。

5. 防災指標としての可能性

前述の崩壊地面積率の推定式(3)を用いることで、各メッシュの崩壊地面積率を時系列的に計算する事が可能となる。ここで、地形要因は固定できるため、メッシュ毎に降雨因子を与えるのみでよい。レーダー雨量計及び地上雨量計で求められる要因を各メッシュに時系列で与えた場合の崩壊地面積率の時間的変遷の一部を図-12

に示す。これによれば、崩壊地面積率が2%を超えたメッシュが2003年8月9日21時から22時にかけて急激に増えたことが読み取れる。山田⁴⁾らが実施した額平川流域の南端に接する厚別川流域で行なった住民からの聞き取り調査により、同時間帯に「山から雷のような音」、「木の裂ける音」、「裏山からゴォーという音」が発生したと報告されている。今回提案した手法では崩壊地発生タイミングまでは説明が困難であるが、例えば図-12に示す様に、特定のメッシュにおいて、崩壊地面積率が一定の値を超えるタイミングであれば、評価が可能であるといえる。しかしながら、この指標を警戒避難などに応用するためには、崩壊地面積率がどの時点で危険なレベルに達するかなど、今後事例を収集していく必要がある。

6. おわりに

豪雨により数百～千数百km²に及ぶ広域な範囲で災害が発生した場合、現状把握のために航空写真や衛星画像を用いる場合がほとんどである。航空写真は高解像度であり、わが国では戦後に米軍が撮影したものを含め、半世紀以上のライブラリがあるというメリットがある一方、撮影、判読、オルソ化、判読結果のGIS化など手間がかかる面がある。一方、高解像度衛星画像は広域を短時間に撮影し、高高度からの撮影のため光学的な歪みが少なく、マルチセンサ画像があれば地被判読の半自動化やGIS化なども容易である一方、過去ライブラリは現段階では豊富とは言えず、また価格も高額となるデメリットがある。国土交通省の報告⁸⁾によれば、1,000km²を超える範囲では高解像度衛星画像と航空写真による災害調査のコストは等価であるとしている。世界的に地震災害、豪雨災害が頻発する昨今、低コストで災害調査を行うためのリモートセンシング技術の進展が望まれる。

本研究では、撮影が未実施だった沙流川上流域の崩壊土砂・流量量を推定するため、降雨因子、地形因子を用いて崩壊地面積率を1kmメッシュ単位で推定する手法を提案した。この手法で推定した崩壊地面積は教師エリアである額平川流域で実際に判読された地質別に集計した崩壊地面積率に近い値となった。また、前述の崩壊地面積率推定式にレーダー雨量計の時刻データを条件として与えた場合、崩壊地面積率が2%を超えるメッシュ急増のタイミングは山田ら⁴⁾が報告している異音の時刻付近と概ね一致している。今後、レーダー雨量計オンライン合成値を用いた土砂災害予測手法として、他の災害事例や既往の警戒避難インデックスとの比較・検証を通じ、実用的なモデルとして精度向上を図っていきたい。

なお、本報告は国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行った。また、北海道開発局、室蘭開発建設部より貴重なデータの提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

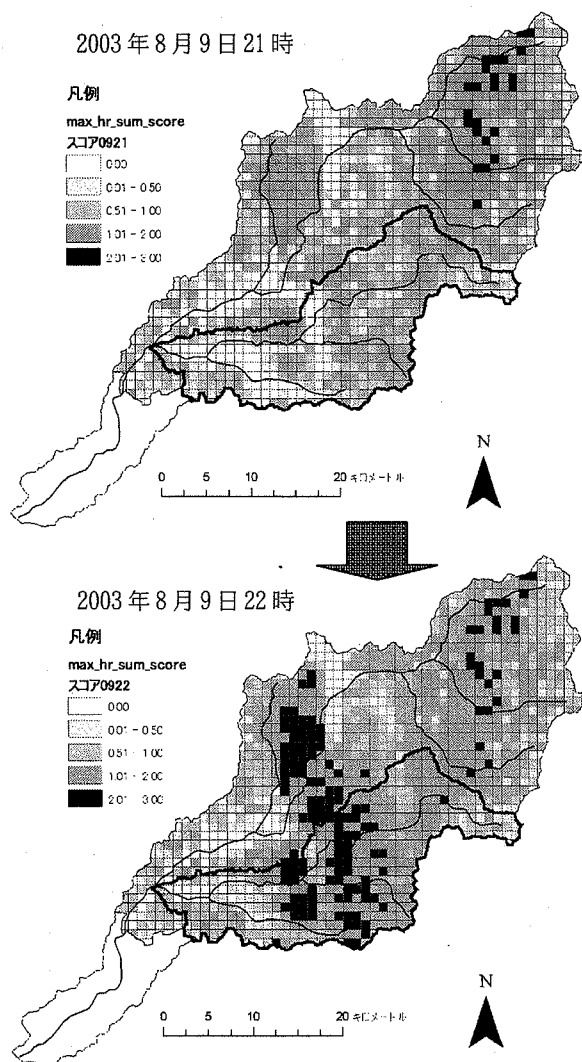


図-12 2003年8月9日21時～22時にかけての崩壊地面積率の分布

参考文献

- 1) 寺田秀樹, 中谷洋明: 土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料 N0.5, Sep. 2001.
- 2) 岡田憲治: 雨観測の不確実性と土壌雨指数, 第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp47-52, 2004. 8.
- 3) 三隅良平, 小口高, 真木雅之, 岩波越: 分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測, 自然災害科学, 23-3, pp415-432, 2004.
- 4) 土木学会 2003年8月台風10号豪雨災害北海道胆振・日高地方災害調査団最終報告, 1. 降雨特性, 八田茂実, 2004. 3
- 5) 高橋昭子, 小口高, 杉盛啓明: ラスター型DEMの解像度と地形表現力, 地理学評論, 76-11, pp800-819, 2003.
- 6) レーダー雨量計全国合成システム運用監視指針(案), 財団法人河川情報センター, 2004. 3.
- 7) 流域河川情報の検索機能検討業務(合成レーダー雨量の精度評価検討編), 北海道開発局防災・技術センター, 2004. 3.
- 8) 災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究総合報告書, 国土交通省総合技術開発プロジェクト, 2004. 1.

(2005. 4. 7 受付)