

室内人工降雨実験によるカメラ画像から 雨量強度を推定する手法の検討

STUDY ON ESTIMATION METHODS OF THE RAINFALL INTENSITY BASED ON CAMERA IMAGES BY THE ARTIFICIAL RAINFALL EXPERIMENTS

木下 篤彦¹・海原 荘一²・井深 真治³・北本 楽⁴・中谷 洋明⁵・金澤 瑛⁵
Atsuhiko KINOSHITA, Soichi KAIHARA, Shinji IBUKA, Gaku KITAMOTO, Hiroaki NAKAYA
and Akito KANAZAWA

¹国土交通省国土技術政策総合研究所(近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター)
(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6号)

²株式会社エイト日本技術開発(〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3丁目1番21号)

³株式会社ブレインズ(〒158-0094 東京都世田谷区玉川2丁目27番8号)

⁴国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6号)

⁵国土交通省国土技術政策総合研究所(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

Key Words: rainfall intensity, image analysis, artificial rainfall, luminance, fast Fourier transform

1. はじめに

2011年台風第12号により、紀伊半島では土砂災害により大きな被害が発生した。災害復旧工事実施箇所では、再度発生する斜面崩壊や土石流により、工事従事者に被害が出るおそれもある。また、工事を実施していない夜間でも、崩壊や土砂流出が発生すると下流域の住民に被害が発生するおそれもある。このため、水位計や監視カメラ等の監視・観測体制を強化するとともに¹⁾、これらのデータを周辺自治体や住民に広く周知し、土砂移動発生時に速やかな避難を促す必要がある。

監視・観測技術のうち、近年比較的安価かつ簡便な手法として、監視カメラを活用した画像解析技術の進歩がめざましい²⁾⁵⁾。例えば、カメラを活用した土砂移動を検知するシステムとして、輝度の変化から検知する方法²⁾³⁾と色調の変化から検知する方法⁴⁾等が提案されている。その他、金澤ら⁵⁾は、砂防が対象とするような山地流域において CCTV (監視カメラ)の画像を用いて、降雨強度を推定する手法を提

案しており、降雨強度が大きくなるにつれ輝度も大きくなることが示された。また、精度向上のポイントとして、背景の輝度が小さい(暗い)こと、カメラから背景までの距離が長いこと、解析領域の設定サイズを大きくしすぎないこと、の3点を挙げている。なお、画像による雨量推定は、降雪や火山噴火により地上雨量計による雨量観測が困難な場合に、代替手段とできる可能性がある。また、CCTVカメラのネットワークにより、降雨現象の映像の連続的な取得が可能となることも利点である。

一方で、夜間の映像に対する研究事例が少ない。これは、夜間は照明を照射しても監視対象物の視認性が低いこと等が理由として挙げられる。しかし、過去の土砂災害の多くは夜間に発生しており、夜間の監視・観測技術の研究が求められている。降雨強度は雨滴径分布とその落下速度の総積和であり、現象解明には少なくともこの2つの面を検出できる測器が必要となる。本研究では、夜間を対象に、CCTVの解像度と感光特性の制約の下で、見え方(視程)の特性から、降雨現象の結果として得られる地上の降

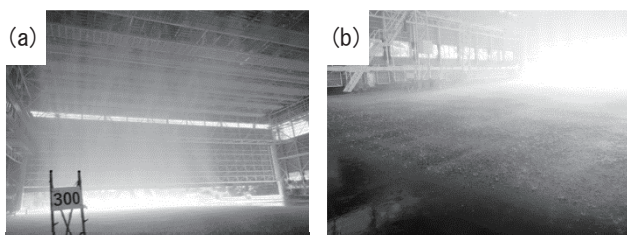


写真-1 予備実験（昼間）の際（300mm/h）の実験施設での降雨の様子。(a)施設内の全景、(b)路面の様子。

雨強度を推定する手法について検討した。

本研究では、夜間に室内で降雨強度と照明の個数や位置・強さを変化させた人工降雨実験を行い、その映像を撮影した。画像の輝度から求まる2指標について、指標値と降雨強度との関係を分析した。指標値と降雨強度の相関性から、今後の夜間の降雨強度の推定精度を高めるための照明条件や最適な指標について提案する。

2. 室内での人工降雨実験の概要

輝度による夜間での雨量推定手法を確立すること、照明条件の違いによる推定精度への影響確認を目的として、室内での人工降雨実験を行った。実験は2021年10月4～7日（4日間）にて、国立研究開発法人防災科学技術研究所の大型降雨実験施設で行った。実験では約20mの高さから径の異なる4種類のノズルを使って雨を降らせ、目標とする降雨強度を15, 75, 135, 300mm/hの4条件とした。降雨強度については、実験施設の能力により設定した。実験中は10秒に1回ディストロメータにより降雨強度をチェックした。

写真-1に予備実験として昼間に実施した約300mm/hの時の実験施設の様子を示す。照明については、照明の位置や強度、角度等を様々に変化させた24ケース（図-1～24）を行い、CCTVと同等の諸元のHD-SDIカメラを用いて、1ケース1降雨強度当たり約2分間の映像データを取得した。図-1～24では、カメラ・照明の配置と約300mm/h（実際の各ケースの雨量は図中に記載）の時の画像を示す。

24ケースについて、Case 0は街灯がある状況下でカメラの照明を使用していない状況を、Case 1は、カメラに付属の照明を使用した状況を再現した実験である。Case 2～7は、Case 1のカメラに追加で照明の位置や方向、照明の色の種類などの条件を変えて追加照明を設置した実験である。Case 8～10は照明台数を変えた実験である。Case 11・12は着色したフィルム（赤・青）を照明に付けて照明の光の波長を変

えた実験である。Case 13～15は照明の照射角度を、Case 16・17は光源の台数を、Case 18～20は照明の照射方向を変化させた実験である。Case 21～23は背景が黒一色になるよう背景の黒いカーテン部分を拡大（ズーム）して撮影を行った実験である。

3. 降雨強度推定のための指標

夜間に雨の中、照明を当てると雨は線状の映像となり、雨量が増えるほど光が反射して明るい画像となる。また、降雨は鉛直に近い方向を主体とする方向性をもって降っていると考えられる。このため、画像の輝度値を周波数解析とフィルタにより、方向ごとに輝度のパワースペクトルを計算することで降雨強度を推定する。

図-25に、降雨映り込み映像の例と2次元周波数解析の結果を示す。ほぼ鉛直下方向に降る雨は周波数解析によってほぼ水平に近い強いスペクトルとなる。一方、虫の飛来は鉛直方向に移動するとは限らないため、水平以外の方向の弱いスペクトルとなる。

図-26に方向性ヒストグラムの算定フローを示す。具体的には映像の2次元周波数解析の結果を180個の1度ごとの方向性フィルタで処理し、角度1度ごとの輝度値のヒストグラム（方向性ヒストグラム）を求める。また、背景の構造材の影響等を低減するため、1枚の映像に対し、ガウジアンフィルタでぼかす処理を行った映像のヒストグラムとの差分を求め、そこから降雨特徴量を算定した。本研究では、降雨量推定指標として、特徴量1（ヒストグラムピーク値/半値全幅）と、特徴量2（方向性ヒストグラムの $\Sigma 90^{\circ} \pm 20^{\circ}$ ）を提案する。特徴量1は、ヒストグラムの集中度を示す指標である。雨が強くなるほどある方向に降雨角度が集中し、スペクトルのピークが大きく、幅も狭くなる可能性があると考えた（図-27）。特徴量2は、予備的に実施した各ケースの方向性ヒストグラムから、雨粒の降下が鉛直方向 $\pm 20^{\circ}$ 程度に収まると考えて提案した指標である（図-28）。

4. 指標とした特徴値と降雨強度との相関性

各ケースについて、特徴量1・2と降雨強度との関係を整理した。なお、関係性を整理する上で、背景の影響を受けると考え、図-29のようにROI (Region of Interest) 1～4を設定し、それぞれについて関係性を整理するとともに、画像全体との相関性についても合わせて整理した。

表-1に、降雨強度と特徴量1・2との相関性に関

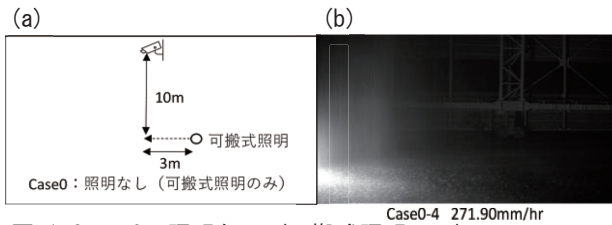


図-1 Case 0 : 照明なし (可搬式照明のみ).

(a) 配置図, (b) 271.90mm/h の時の画像.

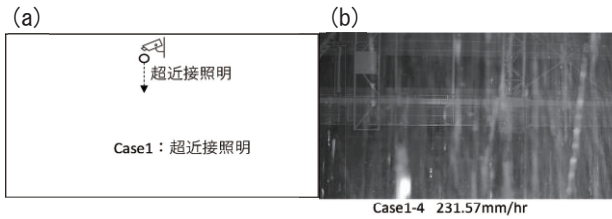


図-2 Case 1 : 超近接照明. (a) 配置図,

(b) 231.57mm/h の時の画像の時の画像.

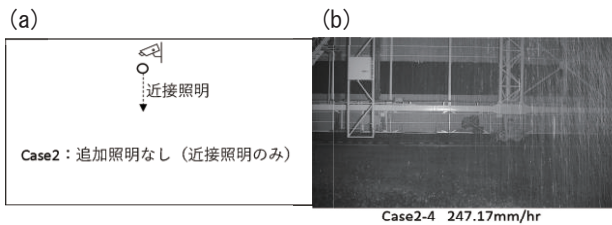


図-3 Case 2 : 追加照明なし (近接照明のみ).

(a) 配置図, (b) 247.17mm/h の時の画像の時の画像.

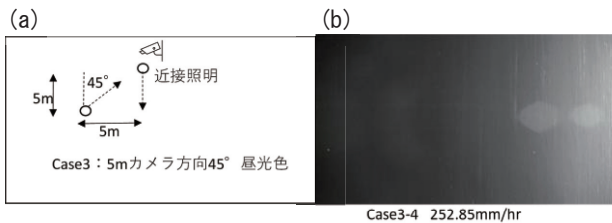


図-4 Case 3 : 5m カメラ方向45° (昼光色).

(a) 配置図, (b) 252.85mm/h の時の画像の時の画像.

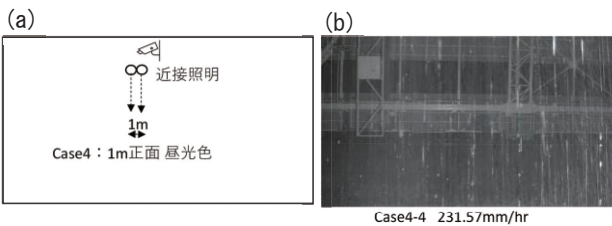


図-5 Case 4 : 1m 正面 (昼光色). (a) 配置図,

(b) 231.57mm/h の時の画像の時の画像.

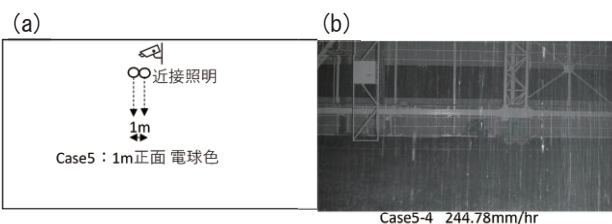


図-6 Case 5 : 1m 正面 (電球色). (a) 配置図,

(b) 244.78mm/h の時の画像の時の画像.

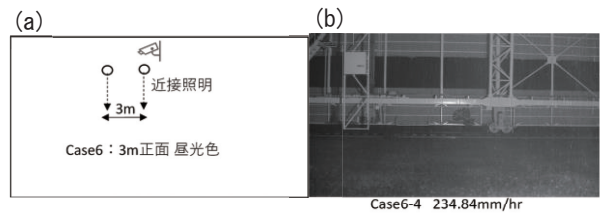


図-7 Case 6 : 3m 正面 (昼光色). (a) 配置図,

(b) 234.84mm/h の時の画像.

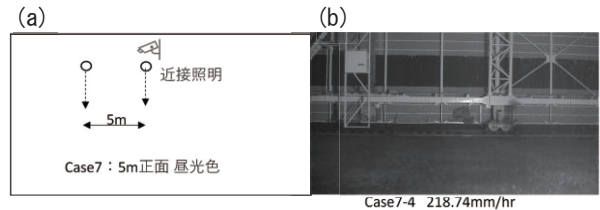


図-8 Case 7 : 5m 正面 (昼光色). (a) 配置図,

(b) 218.74mm/h の時の画像.

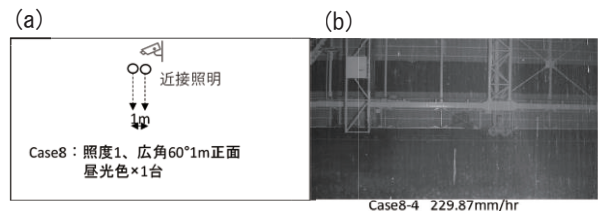


図-9 Case 8 : 照度1, 広角60° 1m 正面 昼光色 × 1 台.

(a) 配置図, (b) 229.87mm/h の時の画像.

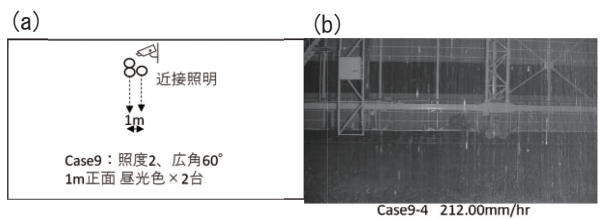


図-10 Case 9 : 照度2, 広角60° 1m 正面 昼光色 × 2 台.

(a) 配置図, (b) 212.00mm/h の時の画像.

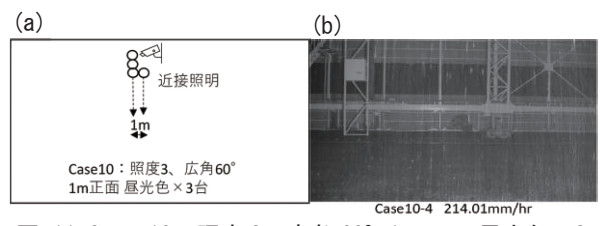


図-11 Case 10 : 照度3, 広角60° 1m 正面 昼光色 × 3 台.

(a) 配置図, (b) 214.01mm/h の時の画像.

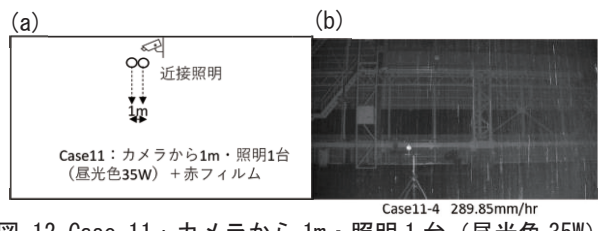


図-12 Case 11 : カメラから1m・照明1台 (昼光色35W)

+赤フィルム. (a) 配置図, (b) 289.85mm/h の時の画像.

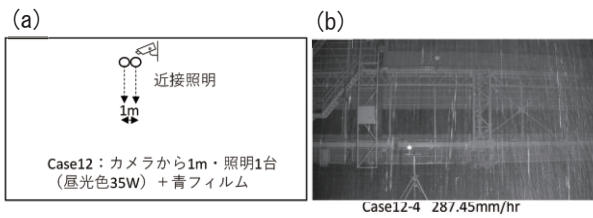


図-13 Case 12 : カメラから 1m・照明 1 台 (昼光色 35W) + 青フィルム. (a) 配置図, (b) 287. 45mm/h の時の画像.

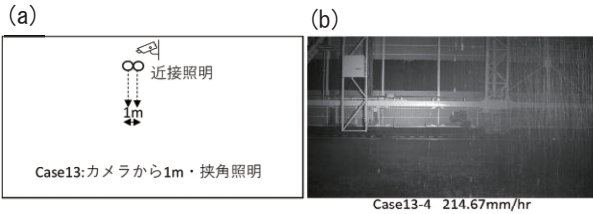


図-14 Case 13 : カメラから 1m・挟角 (28°) 照明. (a) 配置図, (b) 214. 67mm/h の時の画像.

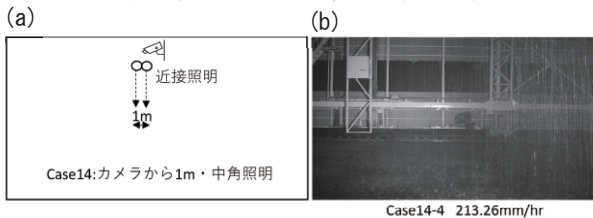


図-15 Case 14 : カメラから 1m・中角 (48°) 照明. (a) 配置図, (b) 213. 26mm/h の時の画像.

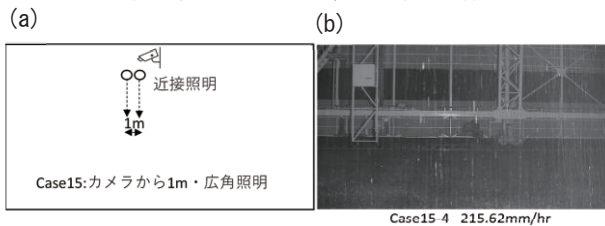


図-16 Case 15 : カメラから 1m・広角 (104°) 照明. (a) 配置図, (b) 215. 62mm/h の時の画像.

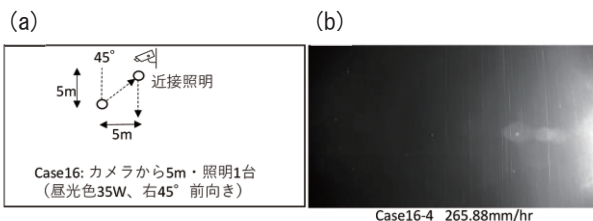


図-17 Case 16 : 光源 1 台 (昼光色 35W, 右 45° 前向き). (a) 配置図, (b) 265. 88mm/h の時の画像.

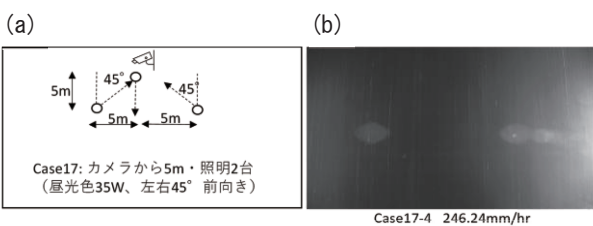


図-18 Case 17 : 光源 2 台 (昼光色 35W, 左右 45° 前向き). (a) 配置図, (b) 246. 24mm/h の時の画像.

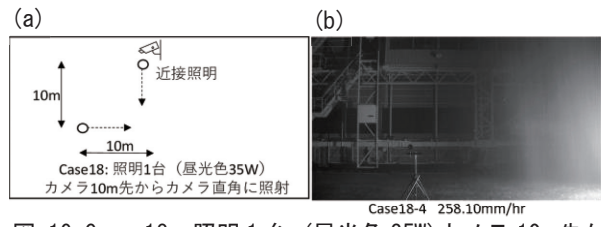


図-19 Case 18 : 照明 1 台 (昼光色 35W) カメラ 10m 先からカメラ直角に照射. (a) 配置図, (b) 258. 10mm/h の時の画像.

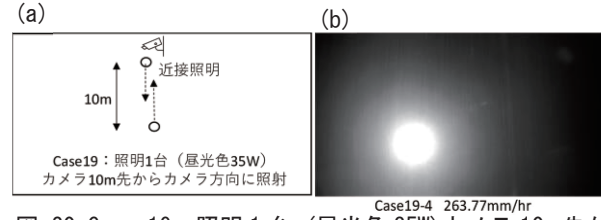


図-20 Case 19 : 照明 1 台 (昼光色 35W) カメラ 10m 先からカメラ方向に照射. (a) 配置図, (b) 263. 77mm/h の時の画像.

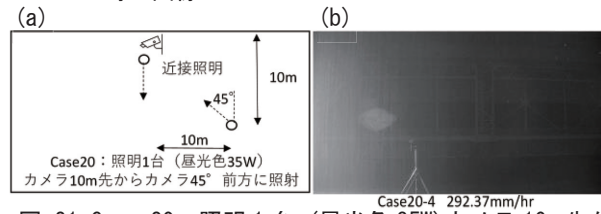


図-21 Case 20 : 照明 1 台 (昼光色 35W) カメラ 10m 先からカメラ 45° 前方に照射. (a) 配置図, (b) 292. 37mm/h の時の画像.

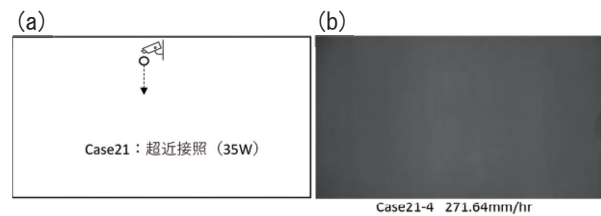


図-22 Case 21 : Case 1 (超近接照明) の背景のカーテンアップ. (a) 配置図, (b) 271. 64mm/h の時の画像.

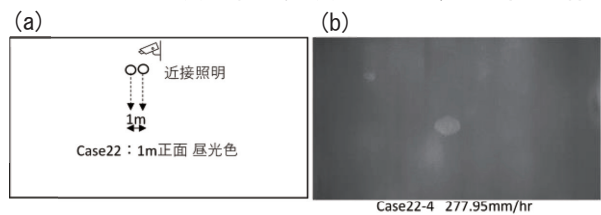


図-23 Case 22 : Case 4 (1m 正面 昼光色) の背景のカーテンアップ. (a) 配置図, (b) 277. 95mm/h の時の画像.

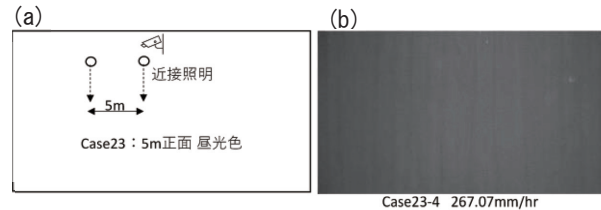


図-24 Case 23 : Case 7 (5m 正面 昼光色) の背景のカーテンアップ. (a) 配置図, (b) 267. 07mm/h の時の画像.

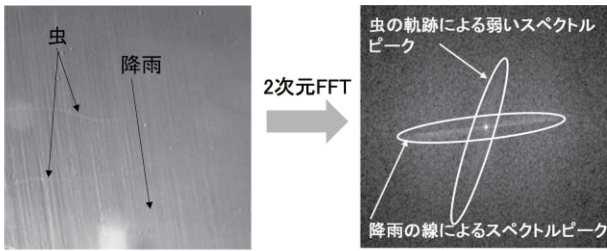


図-25 降雨映り込み映像の2次元周波数解析の結果

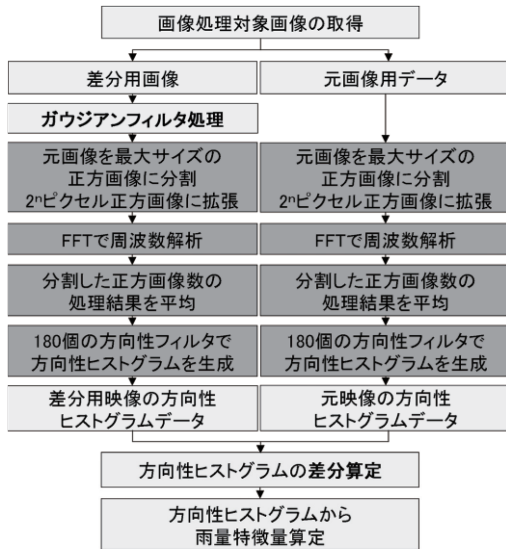


図-26 方向性ヒストグラムの算定フロー

する結果を示す。なお、「正の相関性あり」の定義は、寄与度で $r \geq 0.5$ (相関係数 ≥ 0.7) のものを示しており、定義に合致する ROI もしくは画角全体を表示している。定義に合致する ROI (画角全体) の無い Case は、「相関性なし」と表示している。

- Case 8~10 のように照明の台数を変化させても、特徴量と降雨強度の関係性の傾向に変化はないが、特徴量の値自体は変化した。
- カメラ側に向けて照明を照射した Case 16・17・19・20 でも特徴量と降雨強度の関係に、一部の特徴量・ROI に正の相関性が見られたが、監視対象となる背景は見えづらくなった。
- 青色や赤色のように照明の光の波長を変化させた Case 11・12 では、特徴量と降雨強度との関係は大きな変化はなかった。
- 全体的に特徴量 1 よりも特徴量 2 の方が、降雨強度との相関が高かった。
- 映像全体よりも背景が黒い (暗い) ROI (ROI 2・4) の方が相関性は高かった。
- 背景に水平・斜め方向の構造部材の多い ROI 1 では、多くの Case で特徴量 1・2 とともに降雨強度との相関性が低かった。原因としては、ガウジアンフィルタ画像との差分映像では十分背景の影響が除去できなかったことが影響している可能性がある。

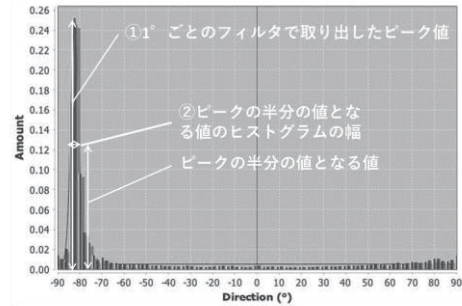


図-27 特徴量 1 (ヒストグラムピーク値/半値全幅)

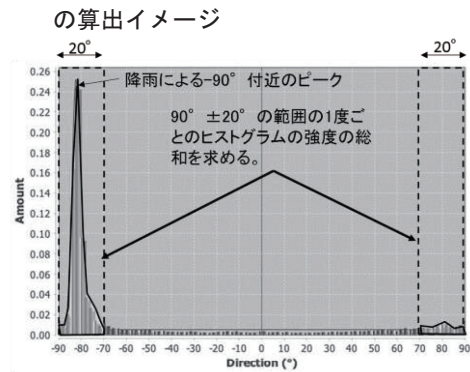


図-28 特徴量 2 (方向性ヒストグラムの $\Sigma 90^\circ \pm 20^\circ$)

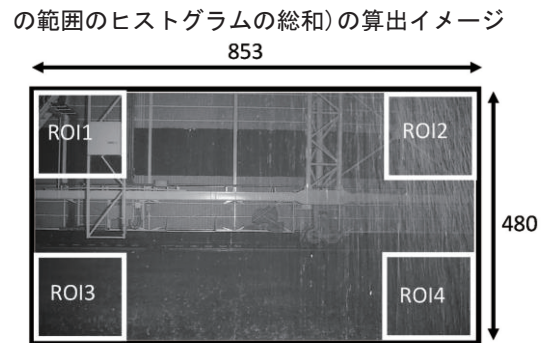


図-29 背景のパターンとする 4 ケースの関心領域 (ROI)。なお、数字の単位はピクセル。

- 特徴量と降雨強度の関係性が最も線形に近く、かつ特徴量が降雨強度によって大きく増加するのは、特徴量 2 を指標とした場合の Case 1 (超近接照明) であった (図-30)。これが最適であると判断される。

5. おわりに

実際の降雨は、風や地形条件によって、ある程度の角度をもって降る。今後は、屋外で、豪雨時のカメラ画像を取得し、降雨の角度に関するデータを増やす。これにより、特徴量 2 の妥当性を検証するとともに、降雨強度推定技術の精度を向上させる。また、降雨の有無判定に与える日照、明暗度等の条件を整理し、強度推定の信頼性を高める。さらに、降雨強度だけでなく、土砂移動検知技術も含めた、一石二鳥となるような画像解析技術の確立を図る。

表-1 Case ごとの特徴量 1 (ヒストグラムピーク値/半値全幅 (FWHM : 最大値の半分の値となるスペクトル幅))・

特徴量 2 (方向性ヒストグラムの $\Sigma 90^\circ \pm 20^\circ$ の範囲のヒストグラムの総和)と降雨強度との相関関係の結果

Case	特徴量 1	特徴量 2
Case 0 : 照明なし (可搬式照明のみ)	相関性なし	相関性なし
Case 1 : 超近接照明	相関性なし	ROI 2~4 で正の相関性あり
Case 2 : 追加照明なし (近接照明のみ)	相関性なし	ROI 3 で正の相関性あり
Case 3 : 5m カメラ方向 45° (昼光色)	ROI 2・4 で正の相関性あり	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 4 : 1m 正面 (昼光色)	相関性なし	ROI 2~4 で正の相関性あり
Case 5 : 1m 正面 (電球色)	ROI 4 で正の相関性あり	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 6 : 3m 正面 (昼光色)	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 7 : 5m 正面 (昼光色)	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 8 : 照度 1, 広角 60° 1m 正面 昼光色 $\times 1$ 台	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 9 : 照度 2, 広角 60° 1m 正面 昼光色 $\times 2$ 台	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 10 : 照度 3, 広角 60° 1m 正面 昼光色 $\times 3$ 台	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 11 : カメラから 1m・照明 1 台 (昼光色 35W) +赤フィルム	相関性なし	ROI 1~4・画角全体で正の相関性あり
Case 12 : カメラから 1m・照明 1 台 (昼光色 35W) +青フィルム	相関性なし	ROI 1~4・画角全体で正の相関性あり
Case 13 : カメラから 1m・狭角 (28°)照明	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 14 : カメラから 1m・中角 (48°)照明	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 15 : カメラから 1m・広角 (104°)照明	相関性なし	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 16 : 光源 1 台 (昼光色 35W, 右 45° 前向き)	ROI 2・4 で正の相関性あり	ROI 2・4 で正の相関性あり
Case 17 : 光源 2 台 (昼光色 35W, 左右 45° 前向き)	ROI 1~4・画角全体で正の相関性あり	ROI 1~4・画角全体で正の相関性あり
Case 18 : 照明 1 台 (昼光色 35W) カメラ 10m 先からカメラ直角に照射	相関性なし	相関性なし
Case 19 : 照明 1 台 (昼光色 35W) カメラ 10m 先からカメラ方向に照射	相関性なし	ROI 1・3・4 で正の相関性あり
Case 20 : 照明 1 台 (昼光色 35W)カメラ 10m 先からカメラ 45° 前方に照射	相関性なし	ROI 1・3 で正の相関性あり
Case 21 : Case 1 (超近接照明)の背景のカーテンアップ	相関性なし	相関性なし
Case 22 : Case 4 (1m 正面 昼光色)の背景のカーテンアップ	相関性なし	相関性なし
Case 23 : Case 7 (5m 正面 昼光色)の背景のカーテンアップ	相関性なし	相関性なし

参考文献

- 1) 木下篤彦, 北本 楽, 山越隆雄, 中谷洋明, 海原荘一, 荒木義則 : 2011 年紀伊半島大水害で深層崩壊により発生した河道閉塞箇所の監視・観測手法, 環境システム計測制御学会誌, 26 巻, 4 号, pp.60-66, 2022.
- 2) 柴田 俊, 小竹利明, 山田 拓, 木下篤彦, 中谷洋明, 金澤瑛, 海原荘一, 井深真治 : 輝度の差分映像による斜面崩壊・土石流の検知と降雨・夜間の監視映像の鮮明化, 第 10 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.79-84, 2020.
- 3) 木下篤彦, 海原荘一, 井深真治, 北本 楽, 中谷洋明, 金澤瑛, 山越隆雄 : CCTV 画像の平均輝度差分値に基づく災害検知システムの開発, 河川技術論文集, 28 巻, pp.13-18, 2022.
- 4) 五十嵐和秀, 水谷 佑, 木下篤彦, 井深真治, 肥後明豪, 池島剛, 秋田寛己, 水野秀明 : 画像の RGB 空間における濁水の立体分布と 3 次元ベクトル空間モデルを用いた流況変化検知手法の基礎的検討, 砂防学会誌, 71

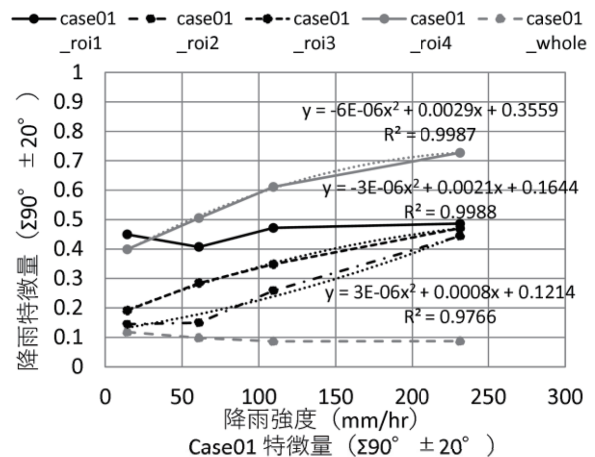


図-30 Case 1 (超近接照明)の降雨強度と特徴量 2 との関係

- 5) 金澤 瑛, 内田太郎, 中谷洋明 : 監視カメラ画像の画素値を用いた降雨強度の推定, 砂防学会誌, 74 巻, 3 号, pp.37-48, 2021.

(2022.5.30 受付)