

画像情報を利用した降雨強度推定手法の提案

PROPOSAL OF A RAINFALL INTENSITY ESTIMATION METHOD USING IMAGE INFORMATION

金澤 瑛¹・吉村 暢也²・張 成美²・中谷 洋明³

Akito KANAZAWA, Nobuya YOSHIMURA, Songmi CHANG and Hiroaki NAKAYA

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

E-mail: kanazawa-a925b@mlit.go.jp

²株式会社コルバック (〒110-0015 東京都台東区東上野六丁目 1 番地 4 号イワツキビル 2 階)

³一般財団法人砂防・地すべり技術センター (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5 砂防会館)

Key Words: rainfall intensity estimation, image information, weather condition identification

1. はじめに

土砂災害に対する効果的な警戒避難体制を構築するためには、土砂移動現象の発生場である山地流域における降雨の状況を、高い時空間分解能で把握することが重要である。雨量観測体制について、現在日本では、主として転倒ます型雨量計を用いた地上雨量観測と面的な降雨量分布を評価するレーダー雨量計による雨量観測が実施されている。地上雨量観測の雨量データは、気象レーダーに関する研究や現業において信頼性の高いデータとして利用されており、観測地点は気象庁の観測局をはじめ全国で 9,000 箇所を超えている¹⁾。しかし、地上雨量計のみで山岳、湖沼等を含む日本全国を空間的に高密度で観測するためには、膨大な設置個所数が必要になり、観測コスト等の問題のため現実的ではない。一方で、レーダー雨量計は、即時性や空間的な網羅性に関して雨量の時空間的な把握を容易にする特長を有しており²⁾、現在最も高い分解能では 250m メッシュで雨量情報が提供されている³⁾。ただし、レーダー雨量計は、数百 m から数 km 程度上空にある雨滴を計測対象としていることから、土砂移動現象の直接的な誘因となる地上に到達する直前の雨量の推定精度は、地上雨量計に劣る^{1)・4)}。このように、日本の山

地流域の雨量観測において、地上雨量観測には空間的な分解能に課題があり、またレーダー雨量計による観測では地上到達時点の雨量の推定精度に課題が残る。

このような背景から、これまでに筆者らは、山地流域における雨量観測の空間分解能の向上を目指し、監視カメラや安価なインターバルカメラの画像を利用して土砂移動を引き起こしうる山地流域の降雨の状況を簡易に把握する方法について検討を進めてきた。これまでの検討では、金澤らは、山地流域に設置された監視カメラの画像を用いて画像解析を実施した結果、降雨強度の増加に伴って画像の画素値が増加することを示した⁵⁾。また、金澤らや木下らは、室内人工降雨実験によって、昼間あるいは夜間に撮影された画像において降雨強度を特徴づける画像情報の指標について検討した。その結果、昼間においては画像の霞みの程度を表す透過率が、夜間においては画像に写る雨の線の方向を表す輝度パワースペクトルが、それぞれ降雨強度を特徴づける指標となりうることを示した⁶⁾⁷⁾。さらに、金澤らは、画像によって気象条件を判別する手法を提案し⁸⁾、張らは、屋外で撮影された画像に対して、金澤らにより提案された指標である透過率⁶⁾を適用することで、降雨強度を推定する手法を提案した⁹⁾。

このように、これまでのところ降雨強度を特徴づける画像情報の指標やその指標を用いた降雨強度推定手法について個別に検討は進められているものの、山地流域の降雨の状況を簡易に把握する方法として先行研究の検討結果をどのように統合して適用するのかという検討はなされていない。

そこで本研究では、金澤らにより提案された画像によって気象条件を判別する手法⁸⁾と張らにより提案された透過率によって降雨強度を推定する手法⁹⁾を統合し改良することで、画像情報を利用して簡易に降雨強度を推定する手法（以降、画像降雨強度推定法という）として提案する。また、提案する手法を屋外で撮影した画像に適用して降雨強度の推定を試行したのでその結果を報告する。

2. 画像降雨強度推定法

(1) 画像降雨強度推定法の提案

本研究で提案する画像降雨強度推定法のフローチャートを図-1に示す。画像降雨強度推定法は、二つのステップを経て降雨強度を推定する。

一つ目のステップでは、入力された画像に対して、

金澤らにより提案された手法⁸⁾を参考にして「気象条件の判別」を行う。本ステップにおける処理の詳細は、(2)で説明する。このステップにおいて、気象条件が雨であると判定されれば、次の二つ目のステップに移行し、気象条件が雨以外と判定されれば、その時点で計算は終了する。

二つ目のステップでは、入力された画像に対して、張らにより提案された手法⁹⁾を参考にして「降雨強度の推定」を行う。本ステップにおける処理の詳細は、(3)で説明する。本ステップの処理が終了すると、入力した画像から推定した降雨強度が示される。

(2) 画像による気象条件の判別

a) 気象条件判別指標値の閾値の設定

画像から気象条件を判別するため、初めに気象条件を判別するための判別指標値の閾値を以下の流れで設定する。

- ① 4種類（快晴，晴れ，曇り，雨）の気象条件の画像を気象条件ごとに30枚程度以上収集する。気象条件の分類は、気象庁が発表する天気区分や雨量，画像に写る雲量を参考に行う。なお、金澤らは、雨の画像を「(通常の)雨」と「豪雨」

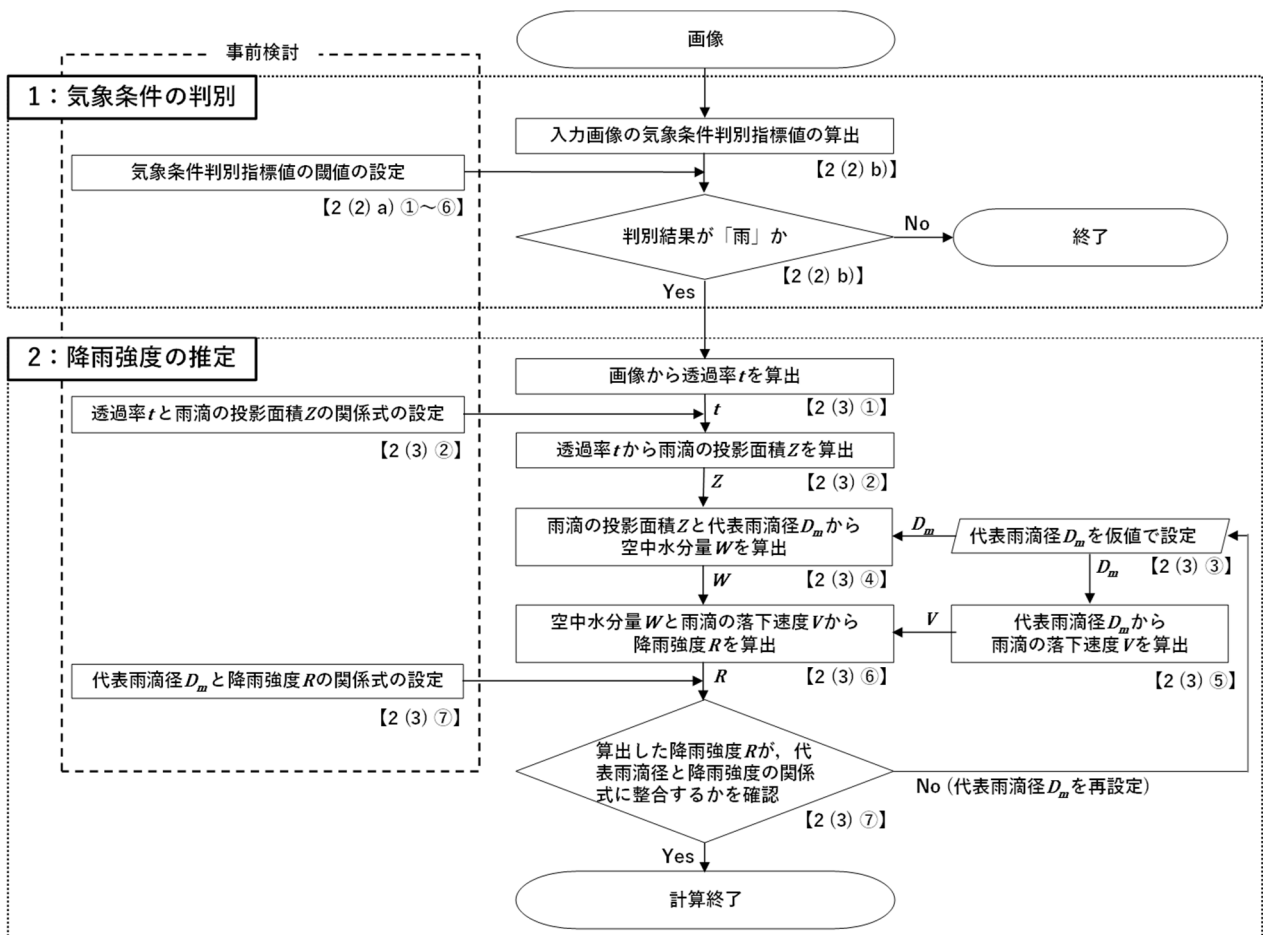


図-1 画像降雨強度推定法のフローチャート（【】内に本論文の見出し番号を表記）

に分類して、5種類（快晴、晴れ、曇り、雨、豪雨）の気象条件で検討した⁸⁾が、結果として「雨」と「豪雨」の判別が難しく、「雨」と他の気象条件であれば判別できる可能性があることが示された。したがって、本研究では、快晴、晴れ、曇り、雨の4種類の気象条件を採用することとした。

- ② 収集した画像を縦横に分割し、それぞれの分割領域の平均輝度を算出する。縦横方向の分割数は任意であるが、分割画像が正方形に近くなるように設定する。図-2には、3(1)b)の画像降雨強度推定法の試行で作成した分割画像と分割領域の平均輝度の例を示した。本試行における画像の分割数は、縦方向に6分割、横方向に8分割とし、分割した画像領域に左上から右下にかけて通し番号を付した。
- ③ 快晴と雨の分割画像の輝度によって、クラスター分析を実施し、画像の領域全体を数個程度のクラスターに分類する。図-3には、3(1)b)の試行において、分割画像を4つのクラスターに分類した例を示した。
- ④ 区分したクラスターの内、雨の気象条件で輝度の差が大きくなる二つのクラスター（クラスター1、クラスター2）を選定する（図-3）。
- ⑤ 下記の式(1)によって各気象条件における二つのクラスターの輝度の標準化得点の差 z_d （以降、

気象条件判別指標値という）を求める。

$$z_d = \frac{X_1 - \mu_1}{\sigma_1} - \frac{X_2 - \mu_2}{\sigma_2} \quad (1)$$

ここで、 X は各画像の対象クラスターにおける輝度、 μ は快晴の全画像における対象クラスターの輝度の平均値、 σ は快晴の全画像における対象クラスターの輝度の標準偏差、各記号の添え字はクラスターの番号を表す。

- ⑥ 各気象条件における気象条件判別指標値の分布に関する基本統計量（25%値、75%値等）を参考に気象条件ごとの判別指標値の閾値を設定する。図-4には、気象条件判別指標値の閾値設定の例を示した。

b) 気象条件の判別

気象条件を判別する画像（入力画像）に対して、式(1)によって判別指標値を算出し、判別指標値がa)で設定した各気象条件の閾値の間どの気象条件の区間に位置するかを判定する。気象条件が雨と判定されれば二つ目のステップに移行し、雨以外（快晴、晴れ、曇り）と判定されれば、その時点で計算は終了し、雨以外の気象条件が示される。

(3) 画像による降雨強度の推定

雨と判定された画像に対して、降雨強度の推定を行う。降雨強度推定の流れは、以下のとおりである。

- ① 降雨時の画像では、降雨強度の増加に伴い雨滴の写り込みが多くなるため、画像全体に色やコントラストが変化し、背景が霧状に白く霞んだ画像となる。He et al.は、霞みの程度を透過率として定量化し、事前学習無しに画像から透過率を算出する手法を提案した¹⁰⁾。本研究ではその手法を用いて、入力された画像に対して透過率 t を算出する。具体的な透過率 t の算出手順についてはHe et al.の文献を参照されたい。透過率は、大気中の光の透過の程度を表す指標であり、背景が霞むことなく見える状態が1であり、背景が霞んで全く見えない状態が0である。なお、透過率 t は画素ごとに算出されるが、画像のノイズ等を考慮すると、ある程度の広さの領

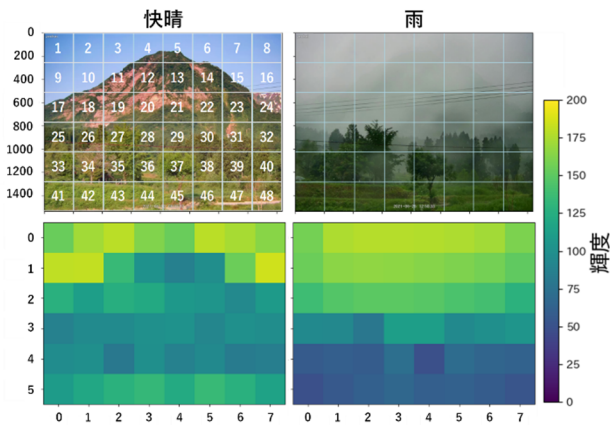


図-2 分割画像と分割領域の平均輝度の例

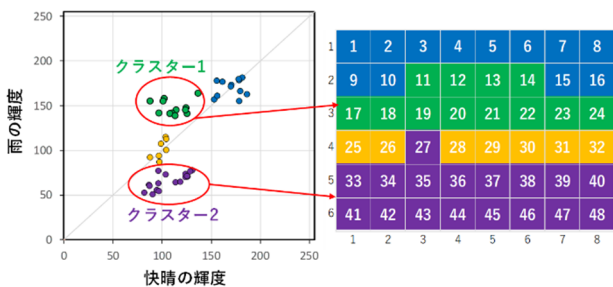


図-3 分割画像のクラスター分類の例

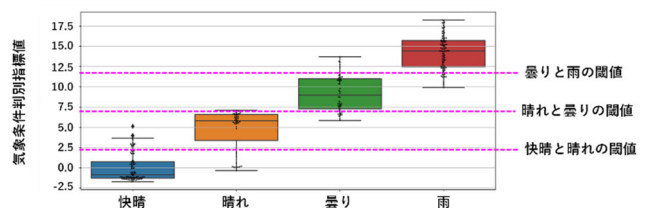


図-4 気象条件判別指標値の閾値設定の例

域の平均値等を用いることが望ましい。

- ② 算出した透過率 t を用いて、下記の式(2)から雨滴の投影面積 Z を算出する。雨滴の投影面積 Z とは、単位体積あたりに占める背景からカメラへの光路方向の雨滴の表面積であり、単位は mm^2/m^3 である。なお、式(2)は、3(1)で用いる画像が撮影された新潟県糸魚川市柵口においてディストロメータを用いて観測したデータから算出した近似式である(図-5)。大気における放射伝達理論を参考にすると、透過率 t と雨滴の投影面積 Z は指数関数の関係性が想定されたため、本検討では指数関数の近似式を採用した。

$$Z = \frac{1}{1.86 \cdot 10^{-5}} \ln \frac{t}{0.835} \quad (2)$$

- ③ 代表雨滴径 D_m を仮の値(例えば 1.5 等)で設定する。 D_m の単位は mm である。
- ④ 算出した雨滴の投影面積 Z と設定した代表雨滴径 D_m を用いて、下記の式(3)から空中水分量 W を算出する。空中水分量 W とは、単位体積の大気中に存在する雨滴の体積であり、単位は mm^3/m^3 である。係数である $2/3$ は、雨滴が球形だと仮定した場合の換算係数である。

$$W = \frac{2}{3} \cdot D_m \cdot Z \quad (3)$$

- ⑤ 代表雨滴径 D_m を用いて、Atlas et al.により提案された雨滴径と雨滴の落下速度の関係式¹¹⁾(下記の式(4))から、雨滴の落下速度 V を算出する。雨滴の落下速度 V の単位は m/s である。

$$V = 9.65 - 10.3e^{-0.6 \cdot D_m} \quad (4)$$

- ⑥ 算出した空中水分量 W と雨滴の落下速度 V を

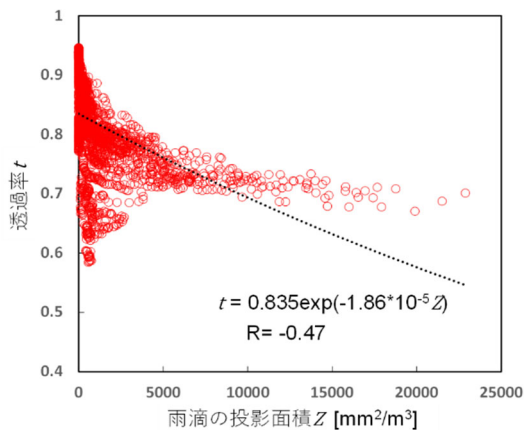


図-5 雨滴の投影面積 Z と透過率 t の関係

用いて、下記の式(5)から降雨強度 R を算出する。降雨強度 R の単位は mm/hr である。

$$R = 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot W \cdot V \quad (5)$$

- ⑦ 算出した降雨強度 R が、代表雨滴径 D_m と降雨強度 R の関係を表す下記の式(6)に概ね整合するかを確認する。式(6)から大幅に外れるような降雨強度が算出された場合は、算出された降雨強度から代表雨滴径を逆算することで代表雨滴径を再設定し、④以降を繰り返し計算する。関係式と概ね整合するようであれば計算を終了し、算出した降雨強度を降雨強度推定値として出力する。なお、式(6)は、②と同様に新潟県糸魚川市柵口で観測したデータから算出した近似式である(図-6)。

$$D_m = 0.962 \cdot R^{0.127} \quad (6)$$

3. 画像降雨強度推定法の試行

(1) 試行方法

a) 試行に用いた画像と雨量データ

画像降雨強度推定法の試行では、2021年6月から10月に、新潟県糸魚川市柵口の屋外に設置したカメラで撮影した画像を用いた。収集した各気象条件の画像は、快晴47枚、晴れ60枚、曇り60枚、雨90枚の合計257枚である。試行にあたっては、収集した画像のうち、概ね半数の画像を閾値の設定用に、残りを判別用に用いることとした。また、カメラから5m程度離れた位置に設置された転倒ます型雨量計によって観測された雨量データ(10分積算雨量)も収集した。

b) 収集した画像における気象条件判別指標値の閾値の設定

気象条件の判別において、初めに気象条件判別指

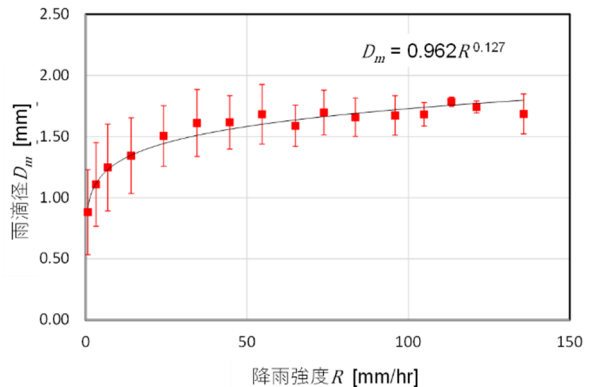


図-6 降雨強度 R と雨滴径 D_m の関係

標値の閾値を設定した。閾値の設定は、閾値設定用の画像を用いて、2 (2) a) に示した流れで実施した。気象条件間の閾値は、一方の気象条件の 75% 値ともう一方の気象条件の 25% 値の平均値とした。なお、本試行でこの方法によって閾値を設定したところ、快晴と晴れの閾値が晴れと曇りの閾値よりも大きな値となったことから、快晴と晴れの閾値は晴れの 25% 値とした。

c) 入力画像の気象条件の判別

判別用の画像に対して気象条件判別指標値を算出し、各画像の気象条件を判別した。本検討では画像から「雨」を判別することを主な目的としていることから、判別結果の整理においては「雨」と「他の気象条件」を判別できたかという視点で、正解率、適合率、適合率をそれぞれ算出した。ここで、正解率とは、全判別数に対する、実際の気象条件が「雨」の場合に「雨」と判別できた数と実際の気象条件が「雨」以外の場合に「雨」以外と判別できた数の和の割合を意味する。また、適合率は、「雨」と判別された結果のうち実際の気象条件が「雨」である割合を意味し、再現率は、実際の気象条件が「雨」の場合に正しく「雨」と判別できた割合を意味する。

d) 入力画像の降雨強度の推定

c) において気象条件が雨と判別された画像に対して、2 (3) に示した流れで降雨強度を推定した。本検討の透過率 t の算出では、事前の試行錯誤の検討において最も降雨強度との相関が認められた領域 33 から領域 40 の透過率 t の平均値を、降雨強度を推定するための透過率 t として採用した。また、初めに代表雨滴径 D_m を 1.5 mm として計算を開始し、算出した降雨強度 R が代表雨滴径と降雨強度の関係式 (図-6) に概ね整合するまで 4 回の繰り返し計算を行った。

(2) 試行結果

a) 気象条件の判別結果

表-1 に気象条件の判別結果を示す。表-1 によると、実際の気象条件が「快晴・晴れ・曇り」の場合の判別結果には多少ばらつきがあるものの、実際に「雨」である場合に「雨」と判別された画像は多い。

表-1 気象条件の判別結果

判別結果 実際の気象条件	判別結果				合計
	快晴	晴れ	曇り	雨	
快晴	1	1	21	0	23
晴れ	3	10	17	0	30
曇り	5	0	19	6	30
雨	0	0	1	44	45
合計	9	11	58	50	128

また、実際に「雨」であるのに「快晴」や「晴れ」と判別された画像や、実際に「快晴」や「晴れ」であるのに「雨」と判別された画像は無かった。「雨」と「他の気象条件」の判別における正解率、適合率、再現率は、それぞれ 94.5%、88.0%、97.8%であった。したがって、「快晴・晴れ・曇り」の判別精度にはやや課題が残るものの、「雨」と「他の気象条件」については精度よく判別できることが示唆された。

b) 降雨強度の推定結果

図-7 に転倒ます型雨量計で観測した降雨強度と画像から推定した降雨強度の関係を示す。転倒ます型雨量計で観測した降雨強度は 10 分積算雨量を 1 時間降雨強度に換算した値であり、画像から推定した降雨強度はある瞬間の画像から推定した 1 時間降雨強度である。そのため、推定降雨強度と観測降雨強度は必ずしも一致しない可能性はあるものの、強雨の時間帯における推定降雨強度のおおよその傾向を把握するために観測降雨強度と推定降雨強度を比較した。図-7 に示すように、現段階ではかなりばらつきがあるが 10 mm/hr 以下の雨と 20 mm/hr 程度を超えるような強度の雨との区別はできていることが確認された。ただし、観測降雨強度と推定降雨強度の差が大きいプロットも多く、推定結果には誤差が生じていることが確認された。このような推定結果の誤差の要因は、以下が考えられる。

- ・入力画像の特性による透過率の変化

屋外で撮影した画像は、同じ背景であっても、季節、時間帯、天候などの撮影時の条件や撮影するカメラの設定条件によって、想定した透過率とはならない可能性がある。例えば、霧や逆光によって画像が白みを帯びることで、雨と誤認されることなどが考えられる。したがって、今後はカメラの補正機能で逆光などのノイズを補正した後の画像を用いるなど撮影時の条件や撮影するカメラの設定条件に依ら

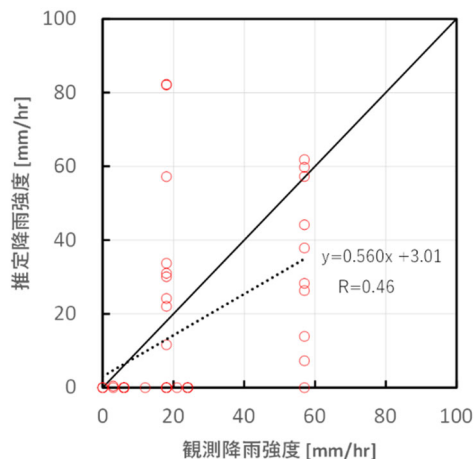


図-7 観測降雨強度と推定降雨強度の関係

ずに一定の精度で透過率を算出する手法の検討が必要である。また、透過率を算出する際に選定する画像領域によっても透過率が変わり、推定結果にも影響を及ぼすことが考えられる。本検討では事前の試行錯誤の検討によって領域を選定したが、本来は一意的に領域を決める方法が必要であるため、領域の選定方法の検討が今後の課題である。

・降雨強度推定に用いる関係式の影響

本研究で用いた式(2)、式(3)、式(4)、式(6)は、いずれも近似的な関係を示した式であり、実際の観測結果とは必ずしも一致しない。特に式(2)においては、図-5に示すように、雨滴の投影面積 Z が $5000 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ 程度までの範囲では透過率 t にばらつきがあり、また $10000 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ を超える範囲では近似式と観測値が離れる傾向がある。図-5は様々な降雨イベントをまとめてプロットしたものであるが、 $5000 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ 程度までの範囲で透過率 t の値が小さいデータは霧のような細粒の降雨イベントのデータである。金澤らの報告⁶⁾において細粒が多く含まれる降雨の場合に透過率の低下幅が拡大する傾向が示されていることから、雨滴の粒径分布の違いによって透過率 t にばらつきが生じていることが考えられる。また、 $10000 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ を超える範囲で近似式と観測値が離れる傾向については、投影面積 Z が $5000 \text{ mm}^2/\text{m}^3$ 未満のデータが全データの93%を占めることから、それらのデータに強く影響を受けた近似となっているためであると考えられる。したがって、雨滴の粒径分布や投影面積 Z の範囲に応じた近似式の検討や近似式の妥当性の評価が今後の課題である。

これらの結果から、降雨強度の推定について、透過率 t を用いる本手法によって画像から降雨強度の違いを概ね把握できる可能性が示唆された。一方で、現時点では推定結果には誤差が生じていることから、誤差の要因を分析し、誤差を低減する手法を検討する必要がある。今後、背景や撮影条件など透過率に影響を及ぼす因子の把握、画像の分析領域の選定方法や近似式の妥当性の評価について詳細な分析が必要である。

4. おわりに

本研究では、画像から気象条件を判別する手法と透過率によって降雨強度を推定する手法を統合し、画像情報を利用して簡易に降雨強度を推定する手法を提案した。また、屋外で撮影した画像に本手法を適用して降雨強度の推定を試行した。その結果、気象条件の判別では、画像から「雨」を十分に判別で

きることが示され、降雨強度の推定では、画像から降雨強度の違いを概ね把握できる可能性が示された。したがって、全体として本提案手法が、画像情報を利用して簡易に降雨強度を推定する手法として利用できる可能性があることが示唆された。ただし、本手法で推定した降雨強度には誤差が含まれることから、今後は誤差の要因を分析し、誤差を低減する手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 牧原康隆：気象学ライブラリー 1 気象防災の知識と実践，株式会社朝倉書店，p. 73，2020.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編，第2章第2節—8，2014.
- 3) 木川誠一郎：高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について，測候時報，Vol. 81，pp. 55-76，2015.
- 4) 気象庁予報部予報課：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度，測候時報，Vol. 62，No. 6，pp. 279-339，1995.
- 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.
- 6) 金澤瑛，中谷洋明，吉村暢也，張成美：画像を用いた降雨強度推定手法開発のための降雨撮影実験，第71回令和4年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 391-392，2022.
- 7) 木下篤彦，海原荘一，井深真治，北本楽，中谷洋明，金澤瑛：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，第11回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 191-196，2022.
- 8) 金澤瑛，中谷洋明，吉村暢也，張成美：画像による豪雨検知手法の検討，第72回令和5年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 347-348，2023.
- 9) 張成美，吉村暢也，遠藤哲雄，鶴田謙次，中谷洋明，金澤瑛：画像を用いた降雨強度推定手法の開発，第72回令和5年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 719-720，2023.
- 10) He, K., Sun, J. and Tan, X.: Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 33, pp. 2341-2353, 2011.
- 11) Atlas, D., Srivastava, R. C. and Sekhon, R. S.: Doppler Radar Characteristics of Precipitation at Vertical Incidence, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 11, No. 1, pp. 1-35, 1973.

(2024. 5. 31 受付)