

草本植生による法面保護工に対する
可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムの開発
Development of a quality and maintenance control system
using RGB image analysis for slope revegetation
by seeding works with herbaceous plants

2023年6月

昌本 拓也

Development of a quality and maintenance control system using RGB image analysis for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants

June 2023

Takuya MASAMOTO

Summary of Doctoral Dissertation

The recent trend of increase in heavy rainfall has resulted in damage to road embankments due to water overflowing from channel network. To mitigate this kind of damage, slope revegetation by seeding works with herbaceous plants is widely employed owing to its environmental friendliness and cost effectiveness. The Percentage of Vegetational Cover (*PVC*), the ratio of the vertical projected area of vegetation to total ground area, is an indicator of the quality evaluation of the seeding works. However, the *PVC* is usually measured manually through visual inspection. Therefore, the measurement results of the same subject might not be constant, especially when measured by different inspectors. To overcome this situation, this study proposes the use of RGB image analysis technique.

The objective of this study is to develop a quality and maintenance control system using RGB image analysis for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants.

This dissertation has following 6 chapters.

In chapter 1, the background and the objective of this study was clarified.

In chapter 2, the role of the slope protection by seeding works with herbaceous plants for entire road embankment structure was summarized and the challenges of its current maintenance system to be resolved were clarified. Specifically, the seeding works are crucial for maintaining the standard gradient of the embankment to keep its stability. However, the *PVC*, an indicator of the quality evaluation of the seeding works, is usually measure manually. In addition, the quantitative relationship between the *PVC* and the sediment erosion from slope is not currently reflected in the design and maintenance method of road embankment.

In chapter 3, calculation methods to measure the *PVC* by image analysis techniques were organized based on previous studies, and issues need to be addressed for the inspection of slope revegetation with herbaceous plants were summarized. Specifically, the camera settings to minimize variations in the *PVC* measurement results and the impacts of natural sunlight were investigated using a consumer grade digital camera.

Following three conclusions were obtained in this chapter.

- 3-1) The camera set as minimum ISO with fixed white balance was preferable to measure the *PVC* when the equipment has program automatic exposure.
- 3-2) Four vegetation indices, namely, ExG, NGRDI, MGRVI and RGBVI were introduced to measure the *PVC*. The range of variation in the *PVC* measurement results with ExG was narrower than that with the other vegetation indices. Therefore, ExG was adopted as the optimum vegetation index for measuring the *PVC* in this study.
- 3-3) The variations in the *PVC* measurement results with ExG was found to be approximately $\pm 8 \sim 10\%$ (95% prediction intervals) under varying natural sunlight conditions, including different solar altitude and/or weather.

In chapter 4, laboratory flume experiments were conducted to investigate the capability of the *PVC* obtained by the measuring method described in chapter 3 to predict decrease in the sediment erosion from a slope due to herbaceous plants (hereafter, “slope protection effect”). The experiments were carried out with two types of soil samples, repeatedly used soil and not-repeatedly used soil.

Following three conclusions were obtained in this chapter.

- 4-1) Regardless of the types of soil samples, significant regression equations were obtained, which is indicating that the sediment erosion decreased as the *PVC* increased. This suggests that the *PVC* measured by the method of this study is available to explain the slope protection effect by herbaceous plants
- 4-2) In the experiments conducted using soil samples that were repeatedly used, it was found that the rates of variability between the *PVC* and the relative soil loss, soil loss of vegetative soil samples under certain *PVC* compared to that of bare soil, of fine fraction and coarse fraction were similar. Therefore, the slope protection effect due to herbaceous plants could equally exerted on both fine fraction and coarse fraction. However, soil samples might be influenced of soil particle fragmentation due to repeated use of the soil.
- 4-3) In the experiments conducted using soil samples that were not repeatedly used, based on the absence of any influence from soil particle fragmentation, more comprehensive examination for the detached soil particles was carried out. Consequently, it was found that the slope protection effect due to herbaceous plants could equally exerted on each geomaterials (medium gravel, fine gravel, coarse sand, medium sand, fine sand).

In chapter 5, a quality and maintenance control system using RGB image analysis for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants was proposed based on the results of chapter 3 and 4 to improve the current management system as stated in chapter 2. Specifically, a method of determine the control value of the *PVC* was proposed, taking into consideration the sediment accumulation in drainage channels.

Following two conclusions were obtained in this chapter.

- 5-1) A new design flow for drainage channels that takes into account for the effect of the seeding works, which is not currently considered in the existing design flow, was proposed. Specifically, an equation to calculate the relationship between the *PVC* and the height of sediment deposition in the drainage channels was derived. In addition, the initial deposition coefficient as the height of sediment deposition in the drainage channels before erosion event was defined, and this information was incorporated into the calculation flow of the drainage capacity of the channels.
- 5-2) Assuming the model slope which designed for typical Shirasu road embankment, the method to set the control value of the *PVC* for the seeding works was proposed to prevent water overflowing from the channel network.

In chapter 6, the findings of this study were concluded, and future prospects were summarized.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景と目的.....	1
1.2 本論文の構成.....	2
<参考文献>.....	4
第2章 道路法面における草本植生による法面保護工の管理手法の現状と課題.....	5
2.1 本章の目的.....	5
2.2 道路土工構造物の設計や維持管理手法.....	5
2.2.1 標準勾配.....	5
2.2.2 表面排水施設.....	5
2.2.3 法面保護施設.....	7
2.3 道路土工構造物の法面における植被率の計測手法とその課題.....	8
2.4 本章のまとめ.....	9
<参考文献>.....	10
第3章 可視光画像解析による植被率の計測.....	11
3.1 本章の背景と目的.....	11
3.2 撮影機器の設定方法に関する検討.....	14
3.2.1 露光条件に関する設定.....	15
3.2.2 ISO 感度に関する設定.....	15
3.2.3 ホワイトバランスに関する設定.....	16
3.3 光源の変化を抑えた環境における植生の撮影.....	18
3.3.1 被写体と撮影条件.....	18
3.3.2 植被率の計測方法.....	19
3.3.3 植被率の計測結果.....	26
3.4 自然光源下における植生の撮影.....	26
3.4.1 撮影時刻、天気の影響に関する考察.....	26
3.4.2 撮影環境の明暗の影響に関する考察.....	35
3.5 実法面における植被率の計測事例.....	37
3.5.1 計測現場の概要.....	37
3.5.2 調査対象法面における植被率の計測事例.....	37
3.5.3 UAVによる空撮画像を用いた植被率計測の実現に向けた基礎的な検討.....	41
3.6 本章のまとめ.....	42
<参考文献>.....	43
第4章 室内侵食実験による植生の法面保護効果に関する検討.....	46
4.1 本章の背景と目的.....	46
4.2 土試料を繰り返し使用した場合の実験.....	47
4.2.1 供試体の作製条件.....	47
4.2.2 可視光画像解析による植被率の計測.....	48
4.2.3 模型法面を用いた侵食実験の方法.....	49

4.2.4 実験結果・考察.....	50
4.3 土試料を繰り返さず使用した場合の実験.....	54
4.3.1 供試体の作製条件.....	54
4.3.2 可視光画像解析による植被率の計測.....	55
4.3.3 模型法面を用いた侵食実験の方法.....	56
4.3.4 実験結果・考察.....	56
4.4 本章のまとめ.....	59
<参考文献>.....	60
第5章 草本植生による法面保護工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムの開発.....	62
5.1 はじめに.....	62
5.2 草本植生による法面保護工に対する法面排水溝の土砂堆積量を考慮した管理値の設定方法の提案.....	62
5.2.1 現状の法面排水溝の設計について.....	62
5.2.2 本研究の成果を踏まえた植被率の管理値の設定方法の提案.....	66
5.3 本章のまとめ.....	73
<参考文献>.....	75
第6章 結論.....	76
6.1 本研究のまとめ.....	76
6.2 今後の展望.....	77
謝辞.....	78

図表・写真目次

図 1-1	法面保護工の分類と本研究で対象とする工種	1
図 1-2	本研究で開発を試みる草地型播種工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システム	2
図 2-1	盛土高・勾配の定義 ²⁾	6
図 2-2	切土高・勾配の定義 ^{3)に加筆}	6
図 3-1	ISO 感度と輝度差分値の関係 (青バンド)	15
図 3-2	各 ISO 感度における輝度差分値の標準偏差	16
図 3-3	各バンドの画像内平均輝度値の時系列変化	17
図 3-4	ExG の画像内平均値の時系列変化	17
図 3-5	NGRDI の画像内平均値の時系列変化	17
図 3-6	MGRVI の画像内平均値の時系列変化	17
図 3-7	RGBVI の画像内平均値の時系列変化	17
図 3-8	可視光画像から植被率を算出するフロー	19
図 3-9	各植生指数の頻度分布の検査領域 (TB46)	20
図 3-10	各植生指数の頻度分布の検査領域 (WC31)	20
図 3-11	ExG の頻度分布 (TB46)	21
図 3-12	ExG の頻度分布 (WC31)	21
図 3-13	NGRDI の頻度分布 (TB46)	21
図 3-14	NGRDI の頻度分布 (WC31)	22
図 3-15	NGRDI の頻度分布 (TB46)	22
図 3-16	MGRVI の頻度分布 (WC31)	22
図 3-17	RGBVI の頻度分布 (TB46)	23
図 3-18	RGBVI の頻度分布 (WC31)	23
図 3-19	閾値と正確度の関係 (TB46)	24
図 3-20	閾値と正確度の関係 (WC31)	24
図 3-21	各閾値 t における解析結果 (植生指数: ExG, 被写体: TB46, 二値画像の白部分が植生域)	24
図 3-22	各閾値 t における解析結果 (植生指数: ExG, 被写体: WC31, 二値画像の白部分が植生域)	24
図 3-23	各閾値 t における解析結果 (植生指数: NGRDI, 被写体: TB46, 二値画像の白部分が植生域)	24
図 3-24	各閾値 t における解析結果 (植生指数: NGRDI, 被写体: WC31, 二値画像の白部分が植生域)	24
図 3-25	各閾値 t における解析結果 (植生指数: MGRVI, 被写体: TB46, 二値画像の白部分が植生域)	25
図 3-26	各閾値 t における解析結果 (植生指数: MGRVI, 被写体: WC31, 二値画像の白部分が植生域)	25
図 3-27	各閾値 t における解析結果 (植生指数: RGBVI, 被写体: TB46, 二値画像の白部分が植生域)	25
図 3-28	各閾値 t における解析結果 (植生指数: RGBVI, 被写体: WC31, 二値画像の白部分が植生域)	25
図 3-29	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: TB, 植生指数: ExG)	30
図 3-30	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: WC, 植生指数: ExG)	30
図 3-31	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: TB, 植生指数: NGRDI)	30
図 3-32	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: WC, 植生指数: NGRDI)	30

図 3-33	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : TB, 植生指数 : MGRVI)	31
図 3-34	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : WC, 植生指数 : MGRVI)	31
図 3-35	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : TB, 植生指数 : RGBVI)	31
図 3-36	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : WC, 植生指数 : RGBVI)	31
図 3-37	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : TB, 植生指数 : ExG, 分類 : 天気)	34
図 3-38	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : WC, 植生指数 : ExG, 分類 : 天気)	34
図 3-39	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : TB, 植生指数 : ExG, 分類 : 撮影時刻)	34
図 3-40	室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種 : WC, 植生指数 : ExG, 分類 : 撮影時刻)	34
図 3-41	TB53 の解析結果の例	35
図 3-42	WC28b の解析結果の例	36
図 3-43	植被率と照度の時系列変化 (TB53)	37
図 3-44	植被率と照度の時系列変化 (WC28b)	37
図 3-45	調査対象法面の撮影位置 A における画像解析結果の例 (二値画像の白部分が植生域)	39
図 3-46	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : A)	40
図 3-47	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : B)	40
図 3-48	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : C)	40
図 3-49	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : D)	40
図 3-50	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : E)	40
図 3-51	調査対象法面における植被率の時系列変化 (撮影位置 : E)	40
図 4-1	串良川堤体土の粒径加積曲線 ²¹⁾	47
図 4-2	串良川堤体土の締固め曲線 ²¹⁾ に加筆	47
図 4-3	供試体の断面のイメージ	48
図 4-4	模型法面の概略図	49
図 4-5	裸地供試体における育成期間と侵食量の関係 (土試料 : 串良川堤体土)	50
図 4-6	可視光画像解析による植被率の計測結果の例 (土試料 : 串良川堤体土)	51
図 4-7	育成期間と植被率の関係 (土試料 : 串良川堤体土)	51
図 4-8	植被率と侵食量の関係 (土試料 : 串良川堤体土)	51
図 4-9	侵食量と流出した土砂の細粒分含有率の関係	52
図 4-10	植被率と粒径区分毎の侵食量の関係	52
図 4-11	裸地供試体における育成期間と粒径区分毎の侵食量の関係	53
図 4-12	植被率と粒径区分毎の侵食量比の関係	53
図 4-13	繰り返し使用前後の粒径加積曲線の比較	54
図 4-14	繰り返し使用前後の締固め曲線の比較	54
図 4-15	郡山しらすの粒径加積曲線	55
図 4-16	郡山しらすの締固め曲線	55
図 4-17	閾値と正確度の関係 (TB53)	56
図 4-18	閾値と正確度の関係 (WC32)	56
図 4-19	裸地供試体における育成期間と侵食量の関係 (土試料 : 郡山しらす)	57
図 4-20	可視光画像解析による植被率の計測結果の例 (土試料 : 郡山しらす)	57

図 4-21	育成期間と植被率の関係（土試料：郡山しらす）	57
図 4-22	植被率と侵食量の関係（土試料：郡山しらす）	57
図 4-23	植被率と比流出比の関係（植生種：TB）	58
図 4-24	植被率と比流出比の関係（植生種：WC）	58
図 5-1	排水溝の設計フロー	62
図 5-2	標準降雨強度図 ²⁾	63
図 5-3	日本産業規格（JIS A 5372）による U 形排水溝の断面形状 ⁴⁾	65
図 5-4	本研究の成果を踏まえた植被率の管理値の設定方法の案	66
図 5-5	モデル法面と着目する排水溝の位置	67
図 5-6	排水溝と堆積土砂の断面のイメージ	68
図 5-7	串良川堤体土の堆積密度を算出するための実験	69
図 5-8	串良川堤体土の乾燥質量と堆積密度の関係	69
図 5-9	植被率と堆積高さの関係（排水溝：300B）	71
図 5-10	植被率と排水能力の関係（排水溝：300B）	71
図 5-11	植被率と堆積高さの関係（排水溝：300C）	72
図 5-12	植被率と排水能力の関係（排水溝：300C）	72
図 5-13	植被率と堆積高さの関係（排水溝：360A）	72
図 5-14	植被率と排水能力の関係（排水溝：360A）	72
図 5-15	植被率と堆積高さの関係（排水溝：360B）	73
図 5-16	植被率と排水能力の関係（排水溝：360B）	73
図 5-17	植被率と堆積高さの関係（排水溝：450）	73
図 5-18	植被率と排水能力の関係（排水溝：450）	73
表 2-1	道路盛土法面における標準勾配 ²⁾⁴⁾	6
表 2-2	道路切土法面における標準勾配 ³⁾⁴⁾	6
表 2-3	植生工の主な工程と目的 ³⁾	7
表 2-4	草地型播種工の成績判定の目安 ³⁾	8
表 2-5	植生管理における点検の着眼点と作業例 ³⁾	8
表 3-1	近赤外画像及び可視光画像から得られる植生指数の例とその定義式	12
表 3-2	画像解析により法面や自然斜面の植被率を計測した既往研究例	13
表 3-3	本研究で使用するデジタルカメラの仕様	14
表 3-4	各バンドの輝度値・各植生指数の平均値と標準偏差	17
表 3-5	本研究で採用するデジタルカメラの機器設定	18
表 3-6	室内光源下における各被写体の育成期間	18
表 3-7	ExG で植生域を抽出するために設定された閾値の例	19
表 3-8	各植生指数において植生域を抽出するための閾値（串良川堤体土）	25
表 3-9	室内光源下における各植生指数を用いて得られた各被写体の植被率の計測結果	26
表 3-10	各育成期間における被写体の個数	28

表 3-11	各被写体の屋外撮影日, 育成期間, 撮影時の天気 ⁶²⁾	28
表 3-12	屋外の自然光源下における被写体の撮影回数.....	28
表 3-13	PVC_m の回帰式に対する 95%予測区間幅[%] (TB).....	32
表 3-14	PVC_m の回帰式に対する 95%予測区間幅[%] (WC).....	32
表 3-15	各被写体の撮影日の天気 ⁵³⁾ と日の出/日の入時刻 ⁵⁴⁾	35
表 3-16	自然侵入促進工施工後の植生管理における点検の着眼点と作業例 ⁵⁵⁾	38
表 4-1	植被率と侵食量の関係を調査した既往研究例.....	46
表 4-2	各供試体種の個数 (串良川堤体土).....	48
表 4-3	繰り返し前後の堤体土の物性値の比較.....	54
表 4-4	各供試体種の個数 (郡山しらす).....	55
表 4-5	土粒子の粒径の考察に用いた各種供試体数.....	58
表 5-1	地表面の工種別基礎流出係数 ¹⁵⁾	64
表 5-2	日本産業規格 (JIS A 5372) による U 形排水溝の断面寸法 ⁴⁾	65
表 5-3	マンシングの粗度係数 n の例 ¹⁾	66
表 5-4	串良川堤体土の堆積密度の算出結果.....	69
写真 1-1	法面緑化工が施された法面.....	2
写真 1-2	構造物工が施された法面.....	2
写真 2-1	目視による植被率の計測状況 ¹⁵⁾	8
写真 2-2	ポイントカウンティング法による植被率の計測状況 ¹⁸⁾	8
写真 3-1	植生法面の定点撮影状況.....	16
写真 3-2	屋外撮影時の被写体の設置状況.....	27
写真 3-3	被写体と照度計の設置状況.....	35
写真 3-4	寺山炭窯跡付近の自然侵入促進工が施工された法面.....	37
写真 3-5	調査対象法面における植被率を計測するための画像の撮影位置.....	38
写真 3-6	調査対象法面におけるデジタルカメラによる画像の撮影状況.....	39
写真 3-7	UAV による調査対象法面の空撮画像.....	41
写真 4-1	供試体作製の例 (植生 : TB).....	48
写真 4-2	屋白色 LED ライト下における TB の育成状況.....	48
写真 4-3	紫色 LED ライト下における WC の育成状況.....	48
写真 4-4	模型法面の越水部.....	49
写真 4-5	模型法面の斜面部と供試体設置状況.....	49

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

近年、気温の上昇や大雨の頻度増加が世界各地で進行している。日本国内においても1時間降水量が50mm以上、または80mm以上の短時間強雨の年間発生回数は増加しており¹⁾、このような気候変動に伴い、各地で災害が発生している。例えば令和2年7月豪雨では、鹿児島県鹿屋市において1時間降水量が100mmを超える等、九州の各地で記録的な大雨となった²⁾。道路盛土のような土工構造物の被害に着目すると、排水溝から溢れた水が法面を流下・侵食し、やがて崩壊に至る事例が多数報告されている³⁾。

このような崩壊形態（以下、地表流による法面侵食）に対し、盛土や切土法面の侵食を防ぐための工法として法面保護工があり、土工構造物の防災対策として有効な技術の一つであると考えられる。図1-1に示すように、法面保護工は大きく3種類、即ち、構造物により法面を保護する構造物工（写真1-1）、植生により法面を保護する法面緑化工（写真1-2）、両者の組み合わせによる工法に分けられる。これらの内、本研究では法面緑化工に着目する。法面緑化工とは、草本植生や木本植生を裸地法面に生育させて地表面を覆うことで、雨水や風による侵食を防止する工法であり、自然環境保護、美観・景観性能の向上、及び改善、環境負荷の低減効果も期待できる。法面緑化工は更に、植生の生育基盤の安定を保つための緑化基礎工、法面に植生を導入する工法の総称である植生工、導入した植生の遷移が正常に進行するように行う維持管理工に分類される⁴⁾。以上のように法面緑化工には様々な種類があるが、本研究では、草本植生を用いた植生工の内の播種工（以下、草地型播種工）を対象とする。草地型播種工は、法面に草本植生の種子を散布し植生を導入する工法であり、低価格⁵⁾で施工性が良い⁶⁾ことから、様々な現場で適用されている。

一般に我が国では、草地型播種工の成績判定や維持管理工における点検を実施する際の定量的指標として、植被率が用いられる⁷⁾（詳細は第2章）。植被率とは、植生が地表面を被覆している割合で、地表面に対する植生の水平投影面積を百分率で示した数値である⁸⁾。現状、植被率の計測は発注者検査員により⁹⁾目視で行われており⁴⁾、その結果は個人差が大きいことが従来指摘されている¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。従って、草地型播種工の成績判定の精度向上や、法面の品質を維持管理するためには、客観的な植被率の評価手法が必要であると考えられることから、画像解析技術を利用した植被率の計測手法に着目した。

土木工学分野において、画像解析を用いて法面の植被率を計測した研究事例では、画像の中でも近赤外域の反射光を含む画像が用いられる場合が多く¹¹⁾¹³⁾（詳細は第3章）、さらには実務への適用事例¹⁴⁾も見られる。従って、近赤

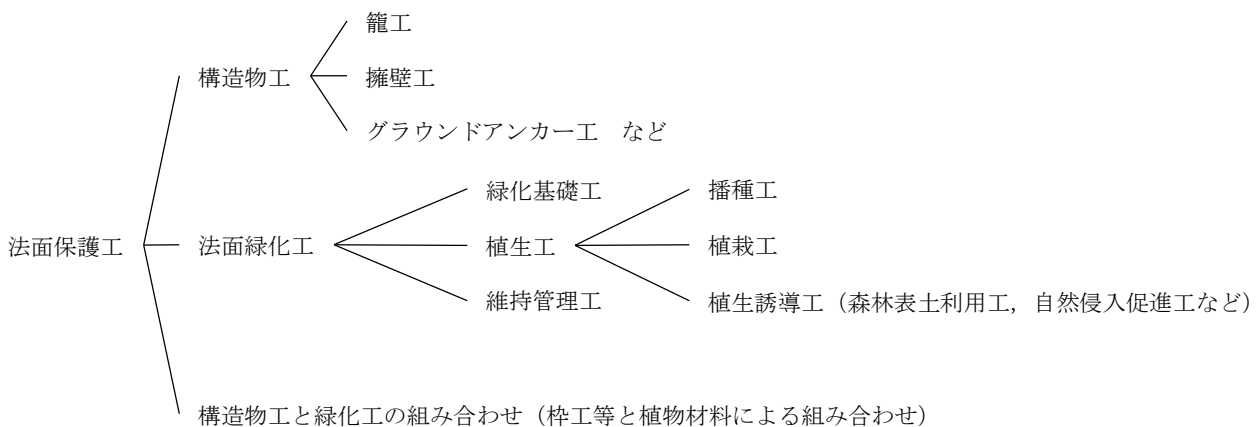


図1-1 法面保護工の分類と本研究で対象とする工種



写真1-1 法面緑化工が施された法面



写真1-2 構造物工が施された法面



【これまでの管理方法：主観的】

- ・法面が緑に見える
- ・植被率が70~80%

出典：道路土工-切土・斜面安定工指針⁷⁾

- ・目視による植被率検査
- ・植被率と侵食量の関係が不明
- ・経験的な管理

【本提案システムによる管理方法：客観的】

- ・法面の侵食を考慮
- ・再施工等の段取りの必要性

- ・画像解析による植被率検査
- ・客観的な品質管理の下、意思決定
- ・データの蓄積による植生の経年変化を追跡可能

図1-2 本研究で開発を試みる草地型播種工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システム

外面画像解析技術が目視計測に代わる新たな植被率計測手法として期待されていると考えられる。しかし、近赤外面像を撮影するための機器は高価であり、安価な機器を用いる場合でもフィルターの装着等の特殊な改造を要する¹⁵⁾という課題が挙げられる。

そこで本研究では、一般に広く普及しているデジタルカメラ等の機器による、可視光画像（デジタル写真データ）解析技術を用いた植被率の計測手法¹⁶⁾¹⁷⁾に着目し、草地型播種工の客観的な品質・維持管理への適用可能性について検討した。本研究の目的は、草地型播種工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムを開発することである。図1-2に、本研究で開発を試みるシステムの概要と、本システムにより改善が期待できる点を示す。

1.2 本論文の構成

本論文は、以下の6章から構成される。

第1章では、本研究の背景や目的を明確にするとともに、本論文の構成を示す。

第2章では、道路土工構造物全体に対する法面保護工の位置付けについて述べるとともに、草地型播種工の管理手

法の現状と課題について示す。

第3章では、画像解析による植被率の計測手法の概要や既往研究について整理し、草地型播種工の品質・維持管理手法として画像解析技術を導入するための課題について述べる。そして、植被率の計測結果のばらつきを抑えるための撮影機器の設定方法と、自然光源の変化が植被率の計測結果に与える影響について、商用デジタルカメラを用いて検討する。

第4章では、第3章で述べる計測技術によって得られた植被率が、法面の侵食量の説明に寄与するかについて明らかにすることを目的に、模型法面を用いた室内侵食実験を実施する。

第5章では、第2章で示した草地型播種工の現状の管理手法を高度化するために、第3章、第4章の結果に基づき、草地型播種工に対する可視光画像解析技術を利用した新たな品質・維持管理システムを提案する。

第6章では、各章で得られた結果をまとめ、結論を示すとともに、本研究の今後の展望について述べる。

<参考文献>

- 1) 気象庁：日本の気候変動2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書（詳細版），263p., 2020.
- 2) 内閣府：令和2年7月豪雨による被害状況などについて（令和3年1月7日14:00現在），入手先<https://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/pdf/r20703_ooame_40.pdf>（参照 2023.4.12）
- 3) 公益社団法人地盤工学会令和2年7月九州豪雨地盤災害調査団：令和2年7月九州豪雨による地盤災害調査報告書，pp.149-194，2021.
- 4) 一般社団法人全国特定法面保護協会：のり面緑化工の手引き，148p., 2006.
- 5) 一般社団法人経済調査会：季刊土木施工単価 '22・冬号，pp.102-113，2022.
- 6) 公益財団法人高速道路調査会：高速道路の土工技術史，pp.4-2-4-5，2019.
- 7) 公益社団法人日本道路協会：道路土工切土・斜面安定工指針（平成21年度版），丸善出版，pp.191-275，2009.
- 8) 日本緑化工学会 編：緑化技術用語事典，山海堂，p.101，1990.
- 9) 西澤睦博：各都道府県における植生工の検査基準の現状について，日本緑化工学会誌，Vol.34，No.3，pp.452-458，2009.
- 10) 有光一登，笹賀一郎，武田博清，谷本丈夫，生原喜久雄，服部重昭，山本進一，八木久義 監修，森林立地調査委員会 編：森林立地調査法，博友社，pp.45-46，1999.
- 11) 井谷雅司，佐藤嘉昭，谷瀬敦：画像解析による河川堤防の植被率判定手法の基礎的検討-NDVIによる植被率判定手法の提案-，土木学会北海道支部平成30年度論文報告集，Vol.75，G-01，2019.
- 12) 昌本拓也，酒匂一成，伊藤真一：草本植生を用いた播種工の施工初期に着目した地表流に対する法面保護効果に関する一考察，第11回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.137-142，2022.
- 13) 金宗煥：オンサイト・リモートセンシングの実利用に関する研究，長崎大学博士論文，pp.66-99，2009.
- 14) 板川暢，藤崎勝利，山口毅志，高山晴夫，阿子島学，野口泰謙，土屋賢太郎，原科幸爾，山田晋：土木工事におけるのり面緑化工の品質管理の高度化-UAV 空撮画像を用いたのり面緑化成績の定量評価の試行-，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，VI-83，2022.
- 15) 尾崎敬二：小型無人航空機搭載デジタルカメラによる単一空撮可視光画像から推定する植生指標，日本画像学会誌，Vol.57，No.3，pp.302-307，2018.
- 16) Hamuda, E., Glavin, M., Jones, E.: A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.125, pp.184-199, 2016.
- 17) Wang, A., Zhang, W., Wei, X.: A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.158, pp.226-240, 2019.

第2章 道路法面における草本植生による法面保護工の管理手法の 現状と課題

2.1 本章の目的

本章では、道路土工構造物全体に対する法面保護工の位置付けについて述べるとともに、草地型播種工の管理手法の現状と課題について示す。そして、草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するための課題を整理する。

2.2 道路土工構造物の設計や維持管理手法

2.2.1 標準勾配

一般に、道路土工構造物の設計は、理論的で妥当性を有する方法や、実験等による検証がなされた方法、これまでの経験・実績から妥当と見なせる方法等、適切な知見に基づき行われる。ただし、道路土工構造物の安定性を調査、試験、工学的計算の結果に基づいて定量的に評価し得る場合は多くなく、道路土工構造物の設計においては個々の土工構造物の特性に応じた経験的技術が重視される。その一例として、盛土や切土法面の標準勾配が挙げられる。標準勾配とは、基礎地盤の支持力が十分に有り、基礎地盤からの浸透の恐れが無い場合で、かつ適切な排水施設の設置と適切な施工等を前提に、我が国の自然環境の下で交通に大きな支障となる被害が避けられる構造を、これまでの実績に照らして設定されたものである¹⁾。表2-1、表2-2に盛土、切土のそれぞれの法面における標準勾配²⁾³⁾⁴⁾を示す。また、図2-1、図2-2に盛土高及び切土高、勾配の考え方を示す。

標準勾配を適用するための条件として、法面の安定性を確保するための形状及び十分な強度を保持する構造である必要がある。そのための手法の例として、地表流による法面侵食対策が挙げられる。具体的には、法面を流下する雨水を少なくするための表面排水施設（法肩排水、小段排水、縦排水等）や、地表流による法面の侵食（軽微な表層崩壊）を防ぐための法面保護施設を適切に設計・施工、維持管理する必要がある¹⁾。

2.2.2 表面排水施設

まず、表面排水施設について述べる。一般に、法面の表面排水施設は、三年確率降雨強度から要求される排水溝断面（具体的な設計方法は第5章で述べる）に対して、土砂等の堆積による通水断面の縮小を考慮して、水深に対して少なくとも20%程度余裕を持った断面となるように設計される⁵⁾。ただし、豪雨の際に多量の土砂が流出する恐れのある法面や、供用中の点検・清掃が困難な箇所、しらすやまさ土等の侵食に弱い法面における排水溝では、さらに十分な余裕を持った断面とすることが推奨される²⁾。また、表面排水施設の維持管理では、定期的に点検を実施し、崩土、落石、雑草等の除去を行い、排水溝に集中した水が縦排水溝以外に流れ出さないように維持する必要がある⁵⁾とされる。特に、縦排水溝と小段排水溝の交点のような水流の変化点では溢水が発生しやすいため、表面排水施設の機能が流末まで確保されていることに留意する必要がある⁶⁾。

表2-1 道路盛土法面における標準勾配²⁾

盛土材料 (アルファベットは地盤工学会基準を示す。)	盛土高	勾配
粒度の良い砂 (S), 礫及び細粒混じり礫 (G)	5m以下	1:1.5~1:1.8
	5~15m	1:1.8~1:2.0
粒度の悪い砂 (SG)	10m以下	1:1.8~1:2.0
岩塊 (ずりを含む)	10m以下	1:1.5~1:1.8
	10~20m	1:1.8~1:2.0
砂質土 (SF), 硬い粘質土, 硬い粘土 (沖積層の硬い粘質土, 粘土, 関東ローム等)	5m以下	1:1.5~1:1.8
	5~10m	1:1.8~1:2.0
火山灰質粘性土 (V)	5m以下	1:1.8~1:2.0
しらす		1:1.8 (ただし, 盛土高5m以下では1:1.5としてよい)

表2-2 道路切土法面における標準勾配³⁾

地山の土質		切土高	勾配
硬岩			1:0.3~1:0.8
軟岩			1:0.5~1:1.2
砂	密実でない粒度分布の悪いもの		1:1.5~
砂質土	密実なもの	5m以下	1:0.8~1:1.0
	密実でないもの	5~10m	1:1.0~1:1.2
砂利または岩塊混じり砂質土	密実なもの, または粒度分布のよいもの	10m以下	1:0.8~1:1.0
	密実なもの, または粒度分布の悪いもの	10~15m	1:1.2~1:1.5
粘性土		10m以下	1:0.8~1:1.2
岩塊または玉石混じりの粘性土		5m以下	1:1.0~1:1.2
		5~10m	1:1.2~1:1.5
しらす	硬質しらす, 中硬質しらす, 軟質しらす		1:0.8~1:1.2
	極軟質しらす		1:1.0~1:1.5

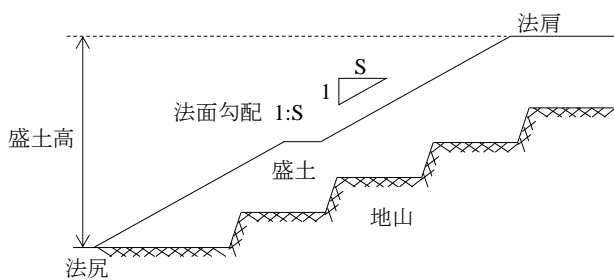


図2-1 盛土高・勾配の定義²⁾

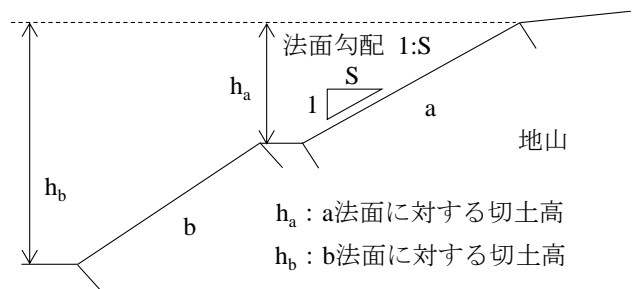


図2-2 切土高・勾配の定義^{3)に加筆}

表2-3 植生工の主な工種と目的³⁾

工種		目的
播種工	種子散布工 客土吹付工 植生基材吹付工 (厚層基材吹付工) 植生シート工 植生マット工	侵食防止, 凍上崩落抑制, 植生による早期の全面被覆
	植生筋工	盛土で植生を筋状に成立させることによる侵食防止, 植物の侵入・定着の促進
	植生基材注入工	植生基盤の設置による植物の早期生育, 厚い生育基盤の長期間安定を確保
植栽工	張芝工	芝の全面張り付けによる侵食防止, 凍上崩落抑制, 早期全面被覆
	筋芝工	盛土で芝の筋状張り付けによる侵食防止, 植物の侵入・定着の促進
	植栽工	樹木や草花による良好な景観の形成
苗木設置吹付工		早期全面被覆と樹木などの生育による良好な景観の形成

2.2.3 法面保護施設

次に、法面保護施設について述べる。第1章でも述べたように、一般に法面保護施設を施工するための工法である法面保護工は、使用する材料の観点から、構造物工、法面緑化工、それらの組み合わせの3種類に分けられる（図1-1）が、本研究では法面緑化工に着目する。法面緑化工は、法面に植物を繁茂させることで、雨水による侵食の防止、地表面の温度変化の緩和、寒冷地での法面の凍上による表層崩壊の抑制を図る工法である。さらに、周辺の自然環境と調和の取れた植生を成立させることによる自然環境の保全や、植物による修景、生物多様性の保全を目的に行われる¹⁾。法面緑化工は更に、植生の生育基盤の安定を保つための緑化基礎工、法面に植生を導入する方法の総称である植生工、導入した植生の遷移が正常に進行するように行う維持管理工に分類される⁷⁾（図1-1）が、本研究では植生工に着目する。表2-3に、植生工の主な工種とその目的³⁾を示す。植生工は、種子から植生の導入を図る播種工、苗から植生の導入を図る植栽工、それらの組み合わせである苗木設置吹付工に分けられるが、第1章でも述べたように、本研究では草本植生を用いた播種工（以下、草地型播種工）を対象とする。草地型播種工は、ハイドロシーダ等の施工機械を用いることができるため、低価格⁸⁾で施工性が良い⁹⁾ことから、様々な現場で適用されている。

一般に、草地型播種工の成績判定（表2-4）や維持管理工における点検（表2-5）を実施する際の定量的指標として、植被率が用いられる³⁾。植被率とは、植生が地表面を被覆している割合で、地表面に対する植生の水平投影面積を百分率で示した数値である¹⁰⁾。植被率が草地型播種工の成績判定等に用いられる理由は、植被率が大きくなるほど法面（斜面）の侵食量が減少する^{例えば11)12)}と言われているためであると考えられる。ただし、植被率と法面の侵食量との定量的関係は示されておらず、現状の道路土工構造遺物の設計や維持管理手法に対して、草地型播種工の効果は反映されていない。

表2-4 草地型播種工の成績判定の目安³⁾

評価	施工3カ月後の植生の状態
可	のり面から10m離れると、のり面全体が「緑」に見え、植被率が70～80%以上である。
判定保留	1m ² あたり10本程度の発芽はあるが、生育が遅い。また植被率が50～70%程度である。
不可	生育基盤が流亡して、植物の成立の見込みがない。植被率が50%以下である。

表2-5 植生管理における点検の着眼点と作業例⁹⁾

植生の状態	原因, 留意事項	維持管理方法
裸地が多い。	施工時期が悪く、温度不足による。	温度条件の良くなる時期まで様子を見て、植被率が上がらなければ追播または再施工する。
	乾燥状態が続いたことによる。	降雨条件の良くなる時期まで様子を見て、植被率が上がらなければ追播または再施工する。

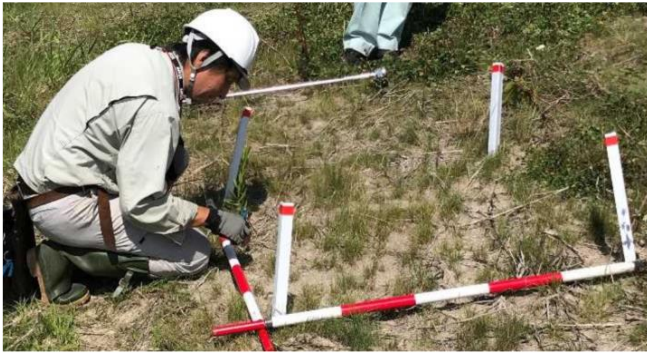


写真2-1 目視による植被率の計測状況¹⁵⁾



写真2-2 ポイントカウンティング法による植被率の計測状況¹⁸⁾

2.3 道路土工構造物の法面における植被率の計測手法とその課題

本節では、2.2.3項で述べた道路土工構造物の法面における植被率の計測手法について述べ、草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するための課題を整理する。

一般に、植被率は発注者検査員により¹³⁾、コドラート（検査枠）を用いた目視による計測（写真2-1）が行われる⁷⁾が、その結果は個人差が大きいことが従来指摘されている¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。より客観的な植被率の計測手法として、ポイントカウンティング法¹⁷⁾¹⁸⁾が挙げられる。この手法は、方形枠に張られたメッシュ（写真2-2）の交点における地表の構成要素に基づき、植被率（林床被覆率¹⁷⁾）を算出する手法であり、目視に比べて客観的に植被率を計測することが可能であると推察するが、広域の植被率計測やデータの管理に課題が残ると考えられる。従って、客観的で広域の計測が可能、かつデータの利用率が高い植被率の評価手法が必要である。また、2.2.3項で述べたように、現状の道路土工構造物の設計や維持管理手法には、草地型播種工の効果が反映されていない。よって、草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するためには、客観的な計測技術により得られる植被率と法面の侵食量との定量的関係を把握し、植被率の管理値を設定することが望ましいと考えられる。また、その際には、2.2.2項で示した表面排水施設の機能を考慮して、地表流による法面侵食を防ぐ管理手法とする必要があると考えられる。

2.4 本章のまとめ

本章では、道路土工構造物全体に対する法面保護工の位置付けについて述べるとともに、草地型播種工の管理手法の現状と課題について示した。以下に、本章のまとめを示す。

- (1) 道路土工構造物の法面は、経験的技術に基づいた標準勾配が採用されることが一般的であり、法面を安定させる状態を維持するためには、地表流による法面侵食対策が重要であることから、表面排水施設や法面保護施設が設置される。
- (2) 表面排水施設は、その排水能力（通水断面積）を維持するために、堆積した土砂を除去する必要がある。また、法面保護施設は法面の侵食を抑制することを目的の一つとして設置される。中でも、草地型播種工は低価格で施工性が良く、様々な現場で適用される。
- (3) 草地型播種工の管理値には植被率が用いられるが、目視による計測が行われることが一般的であり、その結果は個人差が大きいことが従来指摘されている。また、植被率と法面の侵食量との定量的関係は示されておらず、現状の道路土工構造物の設計や維持管理手法には、草地型播種工の効果は反映されていない。

そこで本研究では、草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するための検討を行う。第3章では、客観的に植被率を計測するために、画像解析技術による植被率の計測手法の導入を試みる。第4章では、画像解析技術を用いて計測された植被率が、草本植生による法面侵食の抑制の説明に寄与するかを検討するために、室内侵食実験を実施する。第5章では、本章で示した草地型播種工の現状の管理手法を高度化するために、第3章、第4章の結果に基づき、草地型播種工の新たな品質・維持管理システムの提案を試みる。

<参考文献>

- 1) 公益社団法人日本道路協会：道路土工構造物技術基準・同解説，丸善出版，100p.，2017.
- 2) 公益社団法人日本道路協会：道路土工盛土工指針（平成22年度版），丸善出版，310p.，2010.
- 3) 公益社団法人日本道路協会：道路土工切土・斜面安定工指針（平成21年度版），丸善出版，pp.191-275，2009.
- 4) 国土交通省九州地方整備局：しらす地帯の河川・道路土工指針（案），pp.共-参1-52-共-参1-78，2017.
- 5) 公益社団法人日本道路協会：道路土工要綱（平成21年度版），丸善出版，pp.100-193，2009.
- 6) 公益社団法人日本道路協会：道路土工構造物点検必携 令和2年版，丸善出版，p.180，2020.
- 7) 一般社団法人全国特定法面保護協会：のり面緑化工の手引き，148p.，2006.
- 8) 一般社団法人経済調査会：季刊土木施工単価 '22・冬号，pp.102-113，2022.
- 9) 公益財団法人高速道路調査会：高速道路の土工技術史，pp.4-2-4-5，2019.
- 10) 日本緑化工学会 編：緑化技術用語事典，山海堂，p.101，1990.
- 11) 服部重昭，小林忠一：植生回復に伴うはげ山からの侵食土砂の経年変化，水利科学，Vol.35，No.3，pp.1-36，1991.
- 12) 北原曜，真島征夫，清水晃：林道切取法面からの侵食量について（Ⅲ）-過去4年間の比較-，日本林学会北海道支部論文集，Vol.36，pp.176-178，1988.
- 13) 西澤睦博：各都道府県における植生工の検査基準の現状について，日本緑化工学会誌，Vol.34，No.3，pp.452-458，2009.
- 14) 有光一登，笹賀一郎，武田博清，谷本丈夫，生原喜久雄，服部重昭，山本進一，八木久義 監修，森林立地調査委員会 編：森林立地調査法，博友社，pp.45-46，1999.
- 15) 井谷雅司，佐藤嘉昭，谷瀬敦：画像解析による河川堤防の植被率判定手法の基礎的検討-NDVIによる植被率判定手法の提案-，土木学会北海道支部平成30年度論文報告集，Vol.75，G-01，2019.
- 16) 昌本拓也，酒匂一成，伊藤真一：草本植生を用いた播種工の施工初期に着目した地表流に対する法面保護効果に関する一考察，第11回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.137-142，2022.
- 17) 三浦覚：表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価，日本林學會誌，Vol.82，No.2，pp.132-140，2000.
- 18) 加藤徹，伊藤愛，錦野好則，近藤晃：スギ・ヒノキ過密人工林における強度の間伐が地表土砂移動量へ及ぼす影響，静岡県農林技術研究所研究報告，Vol.10，pp.85-90，2017.

第3章 可視光画像解析による植被率の計測

3.1 本章の背景と目的

農業分野では、画像解析で植生の繁茂状況等を計測する際に、植生指数 (Vegetation Indices) と呼ばれる指標が用いられる場合が多い¹⁾。一般に、画像データから得られる植生指数は、植生の持つ光の反射特性に関連する2つ以上のバンドから得られる画像のデジタル値 (以下、輝度値) により算出される演算値で定義され²⁾、主に精密農業分野において、雑草管理³⁾や作物の生育診断⁴⁾を目的に利用される。植生指数の算出に利用される画像は、近赤外域の反射光を含む画像 (以下、近赤外画像) と可視光域のみの反射光による画像 (以下、可視光画像) の2つに分けられ、それぞれの画像の種類に対して、様々な植生指数が提案されている⁵⁾。その例を表3-1に示す。なお、植生指数名は、植生指数に関する既往研究⁶⁾を参考に、より一般的な呼称であると考えられるものを示した。これらの植生指数は多くの場合 (表3-1に示す内ではExR⁸⁾を除き)、植生域である画素ほど大きくなるように設計されており、任意の閾値を設定し二値化することで、植生域の抽出が可能となる。

まず、近赤外画像を用いた植生指数の算出手法について述べる。この手法は、植生は可視波長域 (400~700nm) 付近で反射率が小さく、近赤外波長域 (800~1,300nm) 付近で反射率が大きくなるという特徴を用いている。近赤外画像から得られる植生指数の中でも、Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)¹⁷⁾¹⁸⁾は、計算式が単純で理解しやすく、広く使用される指標である⁹⁾。一方で、近赤外画像を撮影するための機器は高価であるか、フィルターの装着等の特殊な改造を必要とする¹⁰⁾という課題が挙げられる。

次に、可視光画像を用いた植生指数の算出手法について述べる。可視光画像とは、赤、緑、青の各バンドから得られる輝度値の組み合わせにより、各画素の色が定まる画像である。可視光画像の利点として、デジタルカメラやスマートフォン付属カメラ等、比較的安価で一般に普及している機器により取得可能であることが挙げられる。また、このような機器は取り扱いに特別な技能を必要とせず、植生指数の算出根拠をデータとして記録することが可能であるため、法面に施された植生の管理不足が発生するような事態¹¹⁾を改善することが期待できる。一般に、植生は土等の非植生域に比べ緑色の光の反射率が高い⁹⁾。従って、表3-1に示すように、赤、青バンドの輝度値に対する緑バンドの輝度値の相対的な大きさを表すように設計された例が多く見られる。可視光画像から得られる植生指数の中でも、Excess Green Index (ExG)²²⁾は植物の活動周期 (植物フェノロジー) をモニタリングする有効な指標として注目されており¹²⁾¹³⁾、農業・森林管理分野で広く一般的に利用されている¹²⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。一方で、可視光画像を用いる場合の課題として、取得される輝度値は光源条件や撮影機器の設定によって変化する¹⁶⁾ため、算出される植生指数はこれらの影響を受ける可能性があることが挙げられる。

表3-1に示される可視光画像から得られる植生指数を定義式の特徴で整理すると、単一の植生指数で定義されるもの (NDI, ExG, ExR, CIVE, VEG, NGRDI, MGRVI, RGBVI) と、複数の植生指数の組み合わせで定義されるもの (ExGR, COM1, COM2) の、大きく二つに分けることができる。また、それぞれにおいて、係数の調整を要するもの (CIVE, VEG, COM1, COM2) と、そうでないもの (NDI, ExG, ExR, NGRDI, MGRVI, RGBVI) に区別される。更には、植生指数の算出に必要な輝度値が赤、緑の2バンドのみである場合 (NDI, ExR, NGRDI, MGRDI) と、赤、緑、青の3バンドを用いる場合 (ExG, CIVE, VEG, RGBVI, ExGR, COM1, COM2) に分けることができる。

表3-1 近赤外画像及び可視光画像から得られる植生指数の例とその定義式

画像の種類	植生指数名	定義式
近赤外画像	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ¹⁷⁾¹⁸⁾	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$
	RVI (Ratio Vegetation Index) ¹⁹⁾	$RVI = \frac{NIR}{R}$
	PVI (Perpendicular Vegetation Index) ²⁰⁾	$PVI = \frac{NIR - \alpha R - \beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}, \alpha, \beta : \text{係数}$
可視光画像	NDI (Normalized Difference Index) ²¹⁾	$NDI = 128 \times \left(\left(\frac{G - R}{G + R} \right) + 1 \right)$
	ExG (Excess Green Index) ²²⁾	$ExG = 2g - r - b$
	ExR (Excess Red Index) ⁸⁾	$ExR = 1.3R - G$
	CIVE (Colour Index of Vegetation Extraction) ²³⁾	$CIVE = 0.441R - 0.811G + 0.385B + 18.78745$
	NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index) ²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾	$NGRDI = \frac{G - R}{G + R}$
	VEG (Vegetative Index) ²⁷⁾	$VEG = \frac{G}{R^a B^{(1-a)}}, a : \text{係数} (a=0.667) \quad 27)$
	MGRVI (Modified Green-Red Vegetation Index) ²⁸⁾	$MGRVI = \frac{G^2 - R^2}{G^2 + R^2}$
	RGBVI (Red-Green-Blue Vegetation Index) ²⁸⁾	$RGBVI = \frac{G^2 - R \times B}{G^2 + R \times B}$
	ExGR (Excess Green minus Excess Red) ²⁹⁾	$ExGR = ExG - ExR$
	COM1 (Combined Indices 1) ³⁰⁾	$COM1 = w_1 ExG + w_2 CIVE + w_3 ExGR + w_4 VEG$ $w_1, w_2, w_3, w_4 : \text{係数}$
COM2 (Combined Indices 2) ³¹⁾	$COM2 = w_1 ExG + w_2 CIVE + w_3 VEG$ $w_1, w_2, w_3 : \text{係数}$	

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

R, G, B, NIRはそれぞれ、赤、緑、青、近赤外バンドの輝度値

表3-2 画像解析により法面や自然斜面の植被率を計測した既往研究例

画像の種類	撮影対象	植被率を計測するための条件	各手法の課題
近赤外画像	道路法面 ³⁵⁾	画像解析対象内の各画素のNDVIの平均値と目視による植被率計測結果を比較。NDVIにより植被率を推定 ($R^2=0.87$)。	近赤外画像を取得するための機器が高価であるか、フィルターの差替え等の特殊な改造を要する ¹⁰⁾ 。
	河川堤防法面 ³⁴⁾	NDVI>0となる画素を植生域と定義して二値化し、植被率を計測。	近赤外画像を取得するための機器が高価であるか、フィルターの差替え等の特殊な改造を要する ¹⁰⁾ 。
可視光画像	BSC工法の試験施工法面 ³⁷⁾	画像内における緑色の部分を抽出。	数値的基準が示されておらず、計測者の判断によって結果が異なる可能性が考えられる。
	模型法面の植生 ³²⁾	画像内における緑色の部分を抽出	数値的基準が示されておらず、計測者の判断によって結果が異なる可能性が考えられる。
	自然斜面の林床植生 ³⁸⁾	画像解析ソフト (Photoshop) の「自動選択」ツールにより任意の植生の色調を取得。同色調の画素を植生域と定義して二値化。	解析アルゴリズムは不透明であり、解析ソフトによって結果が異なる可能性が考えられる。
	林道法面 ³⁹⁾	リモートセンシングソフト (ERDAS IMAGINE) の Supervised Multispectral Classification処理により植生域を抽出。	解析アルゴリズムは不透明であり、解析ソフトによって結果が異なる可能性が考えられる。
	河川堤防法面 ³⁴⁾	可視光画像の輝度値をHSV変換 ³³⁾ し、植生である画素を緑相 (Hueにおいて60° から180°) と定義して二値化。	著者ら ³⁴⁾ によると、本手法では影部における植生の抽出が難しいと指摘されている。

BSC工法：Biological Soil Crust工法

HSV：Hue (色相), Saturation (彩度), Value (明度)³³⁾

表3-2に、土木工学分野において画像解析を用いて法面や自然斜面の植被率を計測した研究事例を示す。植生指数を用いて植被率を計測した研究も見られるが、それ以外の指標を用いている研究も見られる。近赤外画像を用いた研究³⁴⁾³⁵⁾ではNDVIが導入され、さらには実務への適用事例³⁶⁾も見られることから、NDVIが目視計測に代わる新たな植被率計測手法として期待されていると考えられる。しかし、先述の通り、高価で特殊な撮影機器が必要であるという課題が残る。可視光画像を用いた研究³²⁾³⁴⁾³⁷⁾³⁸⁾³⁹⁾では、植生指数以外の指標が用いられていることが多く、各手法とも再現性に関する課題を抱えていると考えられる。そこで本章では、可視光画像から得られる植生指数を利用して法面の植被率を計測し、草地型播種工の成績判定や法面の植生の維持管理工に導入するための基礎的検討を行う。

先述の通り、可視光画像の輝度値は光源の違いにより変化することから、可視光画像から得られる植生指数を用いた植被率の計測結果は光源の変化の影響を受けることが考えられる。例えばExGを用いる場合、Bai et al.¹⁶⁾によれば、植生域の抽出精度は天気の違いにより異なるとされる。また、Yu et al.⁴⁰⁾は、撮影環境が明るい、もしくは暗い場合、植生域の抽出精度は下がると指摘している。従って、草地型播種工の成績判定や法面の植生の維持管理工に対し、可視光画像から得られる植生指数を導入する場合、植被率の計測結果のばらつきを考慮し、そのばらつきをできるだけ小さくする植生指数を用いる必要があると考えられる。

可視光画像から得られる複数の植生指数を比較した研究例はいくつか見られるが¹⁶⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾、これらの研究は、ある一度の撮影結果における植生域の抽出精度に着目しており、植被率の計測結果がどの程度確からしいか、即ち、天気等の光源条件の違いによる植被率の計測結果のばらつきについては定量的に議論されていない。また、可視光画像の輝度値やノイズの発生傾向は撮影機器の設定により変化する⁴²⁾ため、植被率の計測結果のばらつきが小さくなるような機器設定を採用することが望ましいと考えられる。しかし、既往の研究では様々な機器設定が採用されており、植被率の計測結果のばらつきを考慮して撮影機器の設定方法を体系的に整理した研究例は、筆者の調査では見られなかった。

そこで本研究では、植生の繁茂状況を示す指標となる植被率の計測手法として、可視光画像から得られる植生指数を用いるものとした。本章の目的は、可視光画像解析による植被率の計測結果のばらつきを抑えるための機器設定の検討と、光源条件の違いが植被率の計測結果に与える影響について定量的に明らかにし、本研究で採用する植生指数を決定することとした。まず、可視光画像の輝度値の変化を抑える撮影機器の設定方法について検討する。次に、光源の変化を抑えた撮影環境において植生を撮影し、撮影機器自体が原因となる植被率の計測結果のばらつきについて考察する。更に、屋外で植生を撮影し、撮影時刻（太陽高度）や天気の違いによる植被率の計測結果のばらつきについて明らかにし、本研究で採用する植生指数を決定する。ただし本研究では、表3-1に示される可視光画像から得られる植生指数の内、計算が容易で実務に導入し易いと考えられる、単一の植生指数で係数の調整を要さず、かつ植生域である程植生指数の値が大きくなるもの、即ちNDI, ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVIについて検討する。ただし、NDIとNGRDIは定義域を正規化すれば同一の式で示すことができるため、本研究ではNGRDIの定義式に統一して検討することとする。

3.2 撮影機器の設定方法に関する検討

自然光源下で撮影された可視光画像（以下、画像）の輝度値は、撮影時刻（太陽高度）や天気により変化すると言われている。また、同一光源下で同一被写体を撮影する場合でも、撮影に用いる機器の設定により画像の輝度値は様々に変化する⁴²⁾。従って、植被率の計測を実施する際には、画像の輝度値の変化や、それに伴う植生指数の値の変化を考慮し、それらの変化をできるだけ抑える機器設定を採用することが望ましいと考えられる。しかし、植生指数を用いて植生域の抽出を実施した既往の研究では、撮影に用いられる機器の設定は様々であり、明記されていない文献⁴³⁾も見られる。オート設定を利用した例²⁹⁾も見られるが、一般に屋外の複雑な光源条件下において、撮影機器は人間の眼に比べ、被写体の色を正確に復元することはできない¹⁶⁾ことから、常に正しく輝度値の補正が行われているとは限らない。そこで本節では、植被率の計測結果のばらつきを小さくするために、輝度値の変化を抑えるような撮影機器の設定方法について検討を行う。中でも、画像の輝度値に影響を与える主な設定は、露光条件（絞り、シャッタースピード）、ISO感度、ホワイトバランス¹⁶⁾⁴⁴⁾であることを踏まえ、これらの設定方法に関して検討する。

本章では、画像を撮影するためにデジタルカメラ（FinePix XP130、富士フィルム株式会社、以下、本機種）を用いた。本機種を選定した理由は、実務において一般的に携行され则认为られるデジタルカメラの最低画素数（1,200×900～2,000×1,500程度）や記録方式（JPEGやTIFF等）⁴⁵⁾を満たし、かつ、防水・防塵機能が備わっており⁴⁶⁾、屋外での使用性が良いためである。本機種の仕様を表3-3に示す。ただし、本研究では撮影される画像のサイズを最大記録画素数とし、画質設定をnormalとした。また、画像解析にはオープンソースの画像処理ライブラリであるOpenCVを用いた。

表3-3 本研究で使用するデジタルカメラの仕様

FinePix XP130	
撮像素子	CMOS 1/2.3
絞り	プログラムAE
最大記録画素数	4608×3456
記録方式	JPEG

3.2.1 露光条件に関する設定

露光条件を変化させることで、画像の明暗を調整することができる⁴²⁾。本機種にはプログラムAE (Automatic Exposure) が採用されており、撮影環境の明るさに合わせてシャッタースピードと絞りの組み合わせが自動的に決定される。絞りに対しては、-2から+2まで13段階の補正の設定が可能であるが、シャッタースピードの調整は行うことができない仕様となっている。よって、不適切な露出補正を設定して撮影を行った場合、取得される画像に白飛びや黒つぶれが発生し、色のコントラストが取得できず、植生指数が適切に算出されない恐れが考えられた。そこで、露出補正は±0 (工場出荷状態) とし、露光条件に関する設定はプログラムAEを採用することとした。なお、プログラムAEは、本機種の後続機⁴⁷⁾を含む様々な機種^{例えば48)49)}に採用されており、一般的な機能であると考えられる。

3.2.2 ISO感度に関する設定

画像には、様々な要因によりランダムにノイズが発生する。中でも、フォトンの揺らぎによって発生する光ショットノイズは最も支配的なノイズである⁵⁰⁾。光ショットノイズは、撮影時に取り込まれる光の量が少ないほど発生しやすいことから、ISO感度の設定に依存することが知られている。ISO感度とは、光を電荷に変換する際、電荷を増幅する度合いを示す数値である。ISO感度の数値が小さいほど電荷の増幅量は小さく、多くの光を取り込むため、ノイズが少ない滑らかな画像を取得することができる。一方で、ISO感度の数値が大きいと電荷の増幅量は大きくなり、取り込む光の量は少なく済むため、シャッタースピードを速くし、動きの激しい被写体においてもブレなく撮影することができるが、ノイズが目立ちやすくとされる⁴²⁾。

本機種におけるISO感度とノイズの関係を把握するために、灰色無地の紙片であるグレーカード (シルクグレーカードver.2, 反射率18%, 銀一株式会社) の撮影を実施した。まず、室内のLED光源 (LEEM-40523N-01, 東芝ライテック株式会社) 下において、グレーカードが画像全体に写るような位置にデジタルカメラを設置した。その後、本機種で設定が可能なISO感度100, 200, 400, 800, 1600, 3200のそれぞれの設定において、各5枚の画像を取得した。このとき、前節を踏まえ露出補正を±0とした。また、ホワイトバランスは「晴れ」モードに固定して撮影を行った。そして、各ISO感度の設定で撮影された画像の各組み合わせ (sC₂通り) において、式(3-1)、式(3-2)に示すように各バンドの輝度差分値 ΔDN を取得し、その頻度を確認することで、ノイズの評価を試みた。

$$\Delta DN = X(DN_{i,j}) - Y(DN_{i,j}) \quad (3-1)$$

$$DN = (R, G, B) \quad (3-2)$$

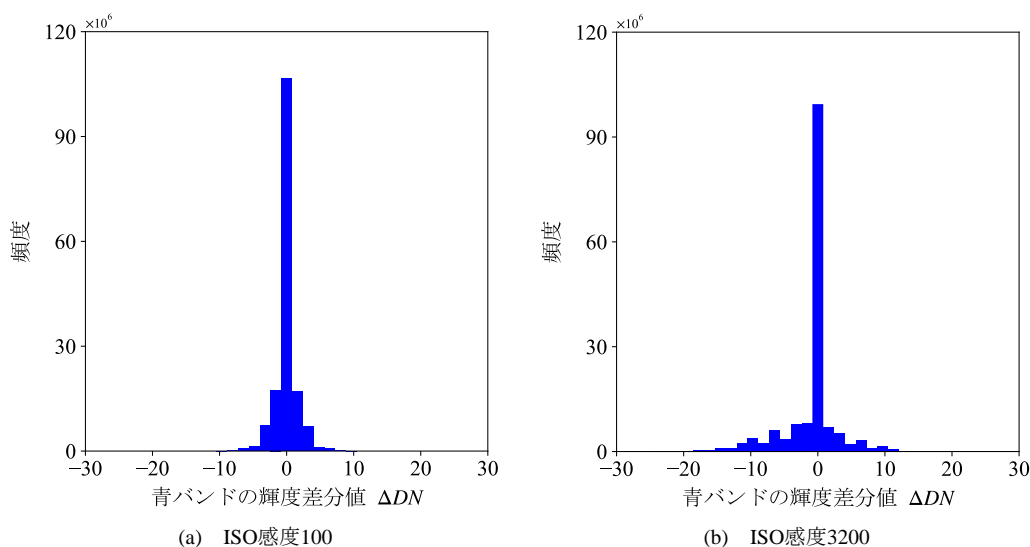


図3-1 ISO感度と輝度差分値の関係 (青バンド)

ここに、 X, Y :輝度差分値を計算する二枚の画像の組み合わせ、 i, j :各画像における画素位置、 DN :赤、緑、青の各バンドの輝度値。

図3-1に、ISO感度100, 3200としたときの、青バンドの輝度差分値の頻度分布を例として示す。図3-1より、各バンドにおいて、ISO感度が小さい程、 ΔDN は0付近に集中することが確認された。また、図3-2に各ISO感度における輝度差分値の不偏標準偏差（以下、標準偏差）を示す。ISO感度が小さい程、 ΔDN の平均値に対する標準偏差も小さくなることが分かった。従って、本研究では、ISO感度を100に固定することで、ノイズの影響をできるだけ抑えることとした。

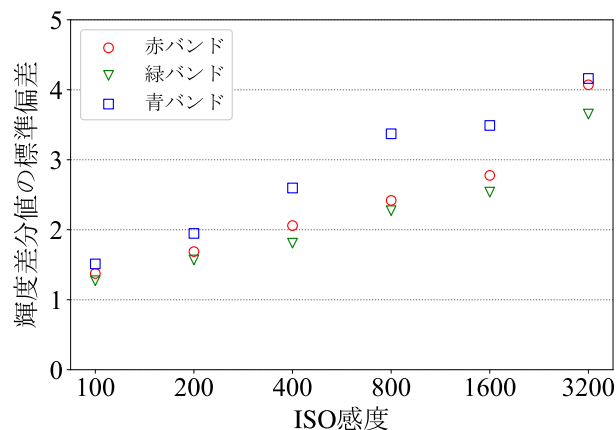


図3-2 各ISO感度における輝度差分値の標準偏差

3.2.3 ホワイトバランスに関する設定

自然光源は、天気や太陽高度の違いにより光の色味が様々に変化する。一般に、この色味は色温度[K]を用いて数値化される。色温度の数値が小さいほど赤系の色を帯びた光となり、数値が大きくなるにつれ白色、青系の色へと変化する。例えば、夕景時は3,500K程度、日中の晴天時は5,000K、曇天時では7,000K程度である。ホワイトバランス（以下、WB）とは、このような色温度の変化に対し、白い被写体を白く写すために画像を補正する機能である⁴²⁾。本機種ではオートWBモードに加え、6種のプリセットWBモード（「晴れ」、「日陰」、「蛍光灯1」、「蛍光灯2」、「蛍光灯3」、「電球」、「水中」）を任意に設定できる。オートWBモードを用いるとカメラが自動的に光源の色温度を認識し、色補正を行う。しかし、その確度は被写体の無彩色部分の有無によって異なる⁵¹⁾とされる。また、Richardson et al.⁵²⁾は、植生の画像を経時的に取得したとき、オートWBモードを用いた場合はプリセットWBモードを用いた場合に比べて輝度値のばらつきが大きくなること、それは青バンドにおいて特に顕著であることを示している。よって、オートWBによる色補正を用いたとしても、土、植生、その他構造物等から成る法面の構成要素によっては色補正が正しく行われず、輝度値の変化がプリセットWBモードに固定したときに比べて大きくなる可能性が考えられる。

本機種において、植生の画像の輝度値の変化をできるだけ抑えるWBの設定を把握するために、自然光源下にて植生の定点撮影を実施した。撮影場所は鹿児島大学郡元キャンパス内に位置する、北西向き、傾斜約35度の法面である（写真3-1）。デジタルカメラは、法面の前方真正面、法面の法線上、地表面からの距離1mの位置にレンズが位置するよう、三脚に固定した。撮影は2021年8月28日の6:00から18:00まで一時間ごとに、遠隔シャッター機能を用いて実施した。このとき、WBはオートWBモードとプリセットWBモード（本研究では、屋外の撮影であることを踏まえ、「晴れ」モードとした。）の2パターンとした。その他の設定は前節までの結果を踏まえ、露出補正±0、ISO感度100とした。なお、撮影当日の天気は薄曇り⁵³⁾、日の出時刻は5:50、日の入時刻は18:49⁵⁴⁾であった。その後、撮影された各々の画像において、各バンドの輝度値 R, G, B の平均値と、植生指数ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVIの平均値を算出した。なお、植生指数については、表3-1に示す定義式に従い算出した。

（以降、各定義式で算出される植生指数は、イタリック表記



写真3-1 植生法面の定点撮影状況

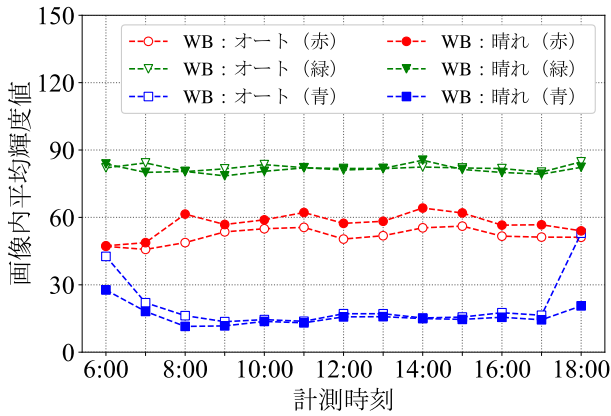


図3-3 各バンドの画像内平均輝度値の時系列変化

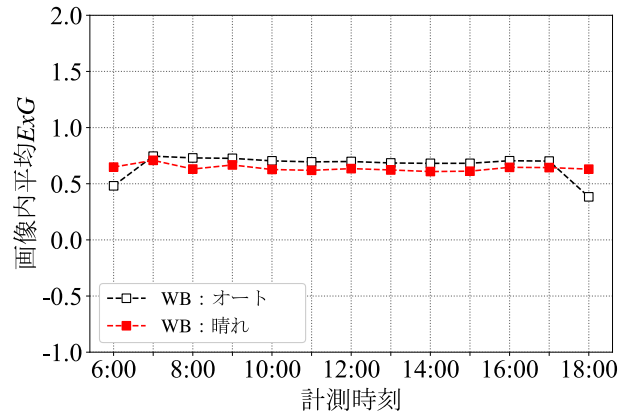


図3-4 ExGの画像内平均値の時系列変化

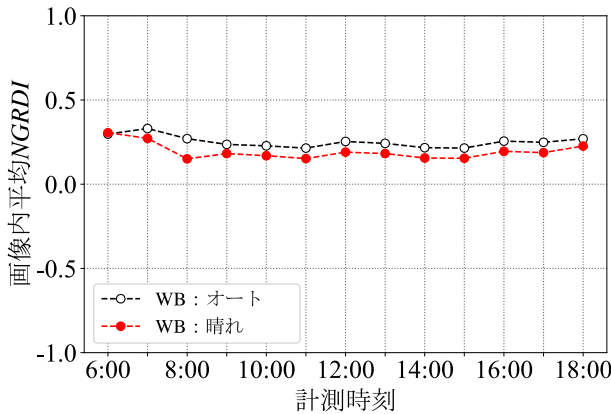


図3-5 NGRDIの画像内平均値の時系列変化

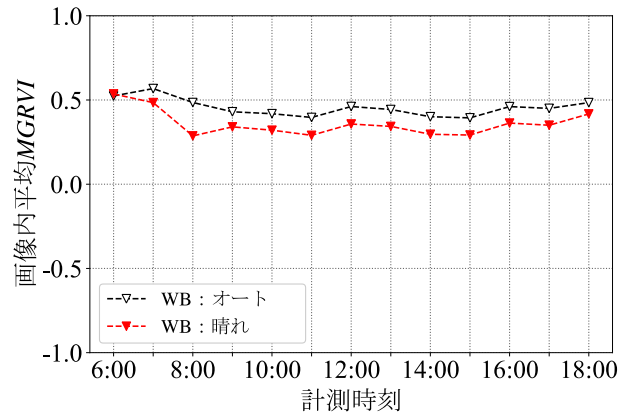


図3-6 MGRVIの画像内平均値の時系列変化

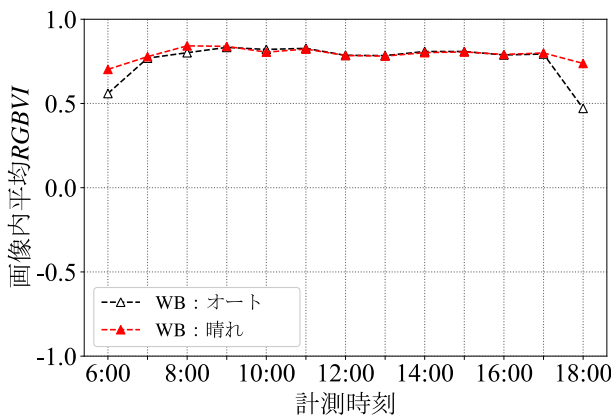


図3-7 RGBVIの画像内平均値の時系列変化

表3-4 各バンドの輝度値・各植生指数の平均値と標準偏差

	オートWB		プリセットWB (晴れ)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
赤バンド	51.81	±3.28	57.28	±4.98
緑バンド	82.15	±1.36	81.34	±1.88
青バンド	21.14	±12.21	15.95	±4.29
ExG	0.66	±0.11	0.64	±0.03
NGRDI	0.25	±0.03	0.19	±0.05
MGRVI	0.46	±0.05	0.36	±0.08
RGBVI	0.76	±0.11	0.79	±0.04

(ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVI) で示す。) ただし, $R=G=B=0$ となる画素については, 各植生指数は0として処理した。

図3-3に各バンドの輝度値の画像内平均値の時系列変化, 図3-4～図3-7に各植生指数の画像内平均値の時系列変化

を示す。また、表3-4には、図3-4～図3-7に示す各WBモードの、各バンドにおける輝度値と各植生指数の画像内平均値の全ての計測時刻における平均値とその標準偏差を示す。表3-4より、オートWBモードではプリセットWBモードに比べて、赤、緑バンドにおける輝度値の標準偏差は小さく、色の補正が自動的に行われたものと考えられる。

これにより、赤、緑バンドの輝度値により算出される植生指数であるNGRDI、MGRVIでは、それらの画像内平均値に対する標準偏差が、オートWBモードではプリセットWBモードに比べ、若干小さくなっている。一方で、オートWBモードの青バンドの輝度値の標準偏差が、他の場合に比べて大きい。これは、太陽高度の小さい時刻（6時から8時、17時から18時）における変化（図3-3）によるものと考えられる。また、この時間帯では青バンドの輝度値が相対的に大きくなることで、図3-4、図3-7に示すように、青バンドの輝度値を用いて算出する植生指数であるExGとRGBVIでは、それらの画像内平均値は、オートWBモードではプリセットWBモードに比べ小さくなっている。オートWBモードのアルゴリズムは一般には公開されていない⁵¹⁾ため、なぜこのような結果となるかについては不明であるが、本研究においても既往の報告⁵²⁾と同様に、青バンドの輝度値が大きくばらつく傾向が得られたことから、オートWBモードが必ずしも輝度値を安定させられる設定ではないと推察される。

植被率の計測を様々な光源下で行う可能性があることを考慮すると、植生指数のばらつきをできるだけ小さくするような設定が望ましい。ExGとRGBVIでは、プリセットWBモードとした方がばらつきは小さくなるが、NGRDIとMGRVIではオートWBモードとした方がばらつきは小さくなるような結果が得られた（表3-4）。従って、採用する植生指数によってWBモードを切り替えることが適切であると考えられる。ただし、オートWBモードとプリセットWBモードにおけるNGRDIとMGRVIのばらつきの違いは、ExGとRGBVIのばらつきの違いに比べ軽微であること（表3-4）を踏まえ、本研究ではプリセットWBモード「晴れ」として固定することとした。

よって次節以降は、表3-5に示す機器設定に固定した上で、画像の撮影を行うこととした。なお、本節で得られた結果は、本研究で用いたデジタルカメラ固有の特性によるものであるが、露出補正、ISO感度、ホワイトバランスは一般的なカメラの設定指標であり、各指標が判定結果に与える影響等については、その他の機器でもその傾向は大きく変わらないものと思われる。しかし、機種毎でその基本設定等が異なる場合もあるため、本手法を用いる際には、今回の成果を参考に、使用するカメラ毎に最適な設定を決定した上で、撮影を実施することが望ましい。

3.3 光源の変化を抑えた環境における植生の撮影

3.2節では、輝度値の変化をできるだけ小さくするような機器設定を検討したが、画像のノイズが完全に無くなることはない。そこで本節では、光源の変化を抑えた撮影環境（詳細は後述）にて、表3-5の機器設定としたデジタルカメラを用いて植生の撮影を行い、撮影機器自体が原因となる植被率の計測結果のばらつきについて定量的に評価する。

3.3.1 被写体と撮影条件

被写体となる植生は、技術指針類⁵⁵⁾⁵⁶⁾を参考にイネ科のセンチピードグラス（*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.）のティフブレア種（以下、TB）と、マメ科のホワイトクローバー（*Trifolium repens* L., 以下WC）とした。これらの植生の種子を、育苗箱内に用意した土試料に、1.5cm間隔で格子状に播種した。育苗箱

表3-5 本研究で採用するデジタルカメラの機器設定

各種機能	本研究で採用する設定
露出補正	±0（工場出荷状態）
ISO感度	100（設定可能な最小値）
ホワイトバランス	「晴れ」（プリセットモード）

表3-6 室内光源下における各被写体の育成期間

被写体	育成期間
TB46	2022/2/24～4/11
TB55	2022/4/19～6/13
TB64	2022/2/23～4/28
WC28a	2022/5/9～6/6
WC31	2022/2/23～3/26
WC45	2022/2/23～4/9

の外寸は、縦26.5cm×横18.3cm×高さ7.7cm、容積は2,200cm³である。なお、土試料には串良川の堤体で採取された、しらす混じりの土（以下、串良川堤体土）を使用した。植生は室内で育成し、植生の育成期間はTBで46, 55, 64日間、WCで28, 31, 45日間として、計6個の被写体を用意した。ここで、それぞれの被写体について、TB46, TB55, TB64, WC28a, WC31, WC45と付番する。表3-6には、それぞれの被写体の育成期間を示す。そして、各育成期間が経過した後、各被写体を机上に設置し、デジタルカメラを被写体の真上、真正面から撮影する向きに、育苗箱中心部の法線上、高さ23cmの位置にレンズが位置するように据えた。撮影は、遠隔シャッター機能により、5分間隔で繰り返し行い、それぞれの被写体で各90枚の画像を取得した。そして、取得された画像から地表部以外の部分について、育苗箱四隅の孔部を目印にトリミングして除外し、解析に供した。ここで、トリミングされた画像をJPEG形式で保存すると、非可逆圧縮の過程で元画像の輝度値を失ってしまう。そのため、トリミングされた画像は可逆圧縮方式であるPNG形式で保存し、元画像の輝度値を保持するようにした⁵⁷⁾。このときの解像度は1画素あたり約0.07mmである。また、撮影時の光源は、室内のLEDライト（LEEM-40523N-01、東芝ライテック株式会社）下、カメラフラッシュ機能を有効にし、光源の変化をできるだけ抑えるような条件とした。

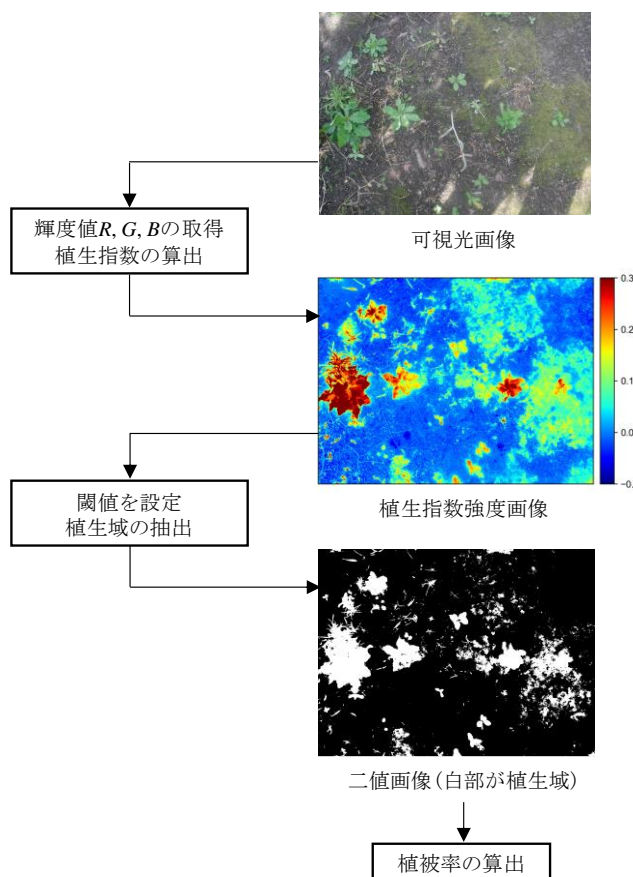


図3-8 可視光画像から植被率を算出するフロー

3.3.2 植被率の計測方法

次に、植被率の計測方法について述べる。図3-8に示すように、本研究の検討対象とした植生指数（ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVI）は各画素の輝度値を用いて算出され（表3-1）、植生らしい画素であるほど大きくなる。従って、植生指数について任意の閾値を設定し二値化することで、植被率の計測が可能となる。閾値の設定には、可変値を用いる手法と固定値を用いる手法の2種類が挙げられる。可変値を閾値とする場合、Otsu⁵⁸⁾の二値手法（判別分析法）が一般的に用いられ⁷⁾、植生域/非植生域に分離する最適な閾値を、光源条件の変化に追従し可変的に設定することができる。しかし、画像内の植被率が極端に大きい、もしくは小さい場合、即ち植生指数の頻度分布に二峰性が見られない場合は、卓越する画素の種類内で二値分離される可能性がある⁵⁹⁾ため、植生域の抽出精度が下がることが考えられる。閾値に固定値を用いる場合は、計算は単純であり、植生指数の頻度分布に二峰性が見られない場合でも適用された例⁷⁾も見られる。しかし、閾値が固定されることにより、光源の変化の影響を受けて植生域の抽出精度が下がる可能性がある¹⁷⁾。草地型播種工の施工初期において植被率は非常に小さく、成績判定時に法面全体が緑に見える（表2-4）場合は植被率が非常に大きくなることを想定すると、法面の植生を撮影した画像の

表3-7 ExGで植生域を抽出するために設定された閾値の例

文献	植生域となる画素の条件
Ashapure et al. ⁷⁾	ExG \geq 0.2
Kutugata et al. ⁶⁰⁾	ExG \geq 0.1
Li et al. ⁶¹⁾	ExG $>$ 0.03

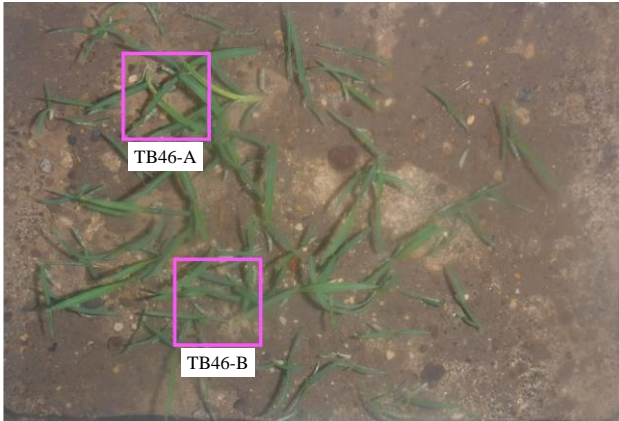


図3-9 各植生指数の頻度分布の検査領域 (TB46)

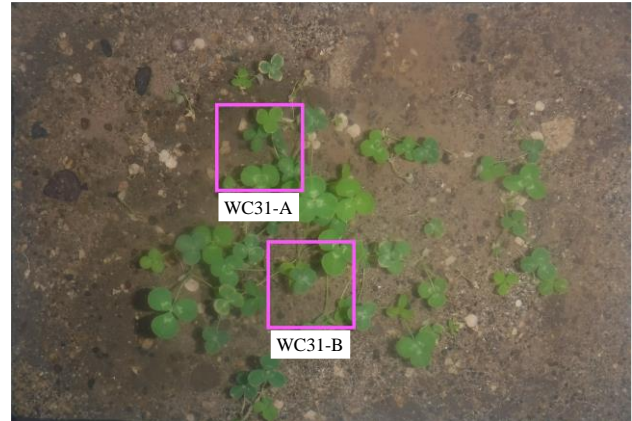


図3-10 各植生指数の頻度分布の検査領域 (WC31)

植生指数の頻度分布は、必ずしも二峰性を持つとは限らないと考えられる。そこで本研究では、閾値に固定値を用いることとした。

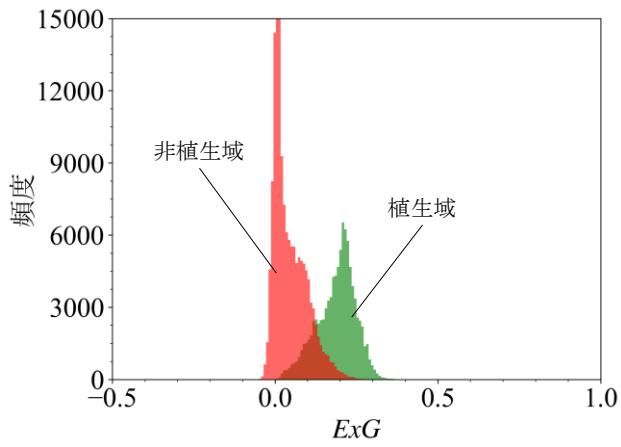
植生指数を用いて植生域を抽出した既往の研究では、様々な固定値が閾値として用いられている。その例として、表3-7にExGを用いて植生域を抽出した既往研究⁷⁾⁶⁰⁾⁶¹⁾において設定された閾値を示す。表3-7から、適切な閾値は、被写体や撮影条件等によって異なると推察される。本研究で用いる閾値を決定するために、まず、TB46、WC31を撮影した画像の90枚の内、それぞれ二回目に撮影された画像を用いて、図3-9、図3-10に示すような500×500画素の領域を、それぞれ二か所ずつ抜き出した。ここで、各領域をTB46-A、TB46-B、WC31-A、WC-31Bと付番する。そして、目視により植生域/非植生域を分離し、各領域における各植生指数の頻度分布を確認した。

その結果を、図3-11～図3-18に示す。各植生指数、両被写体とも各領域において、植生域である画素の植生指数は、非植生域である画素の植生指数に比べ大きくなる傾向が確認された。また、ExG、RGBVIにおいては、植生指数が0.1付近から、NGRDI、MGRVIにおいては植生指数が0.0付近から、植生域である画素の発生頻度が増加している。

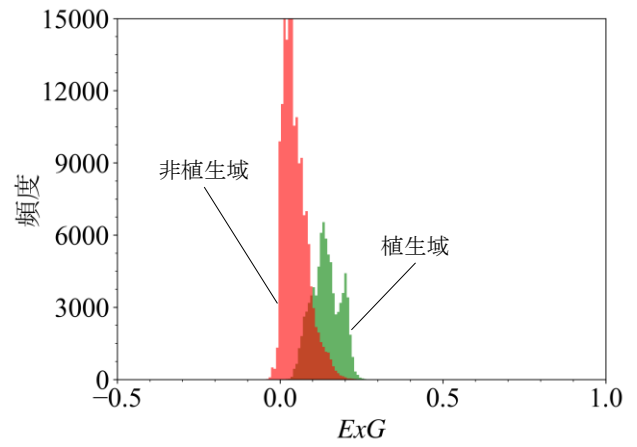
次に、閾値を t とし、 t を-0.20から0.50まで0.01ずつ変化させ、各植生指数が t 以上となる画素を植生域とすることで、TB46、WC31の二値画像を作成した。併せて、各閾値 t における植生域の抽出精度を確認するために、目視により植生域/非植生域に二値化した画像も作成し、画像解析による二値分類の正確度⁶²⁾を、式(3-3)を用いて算出した。ただし、比較にはTB46、WC31のそれぞれの画像において、解析対象全画素数の約14% (1,250,000画素)を用い、任意の位置から抜き出すことにより実施した。

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN} \quad (3-3)$$

ここに、 Acc ：正確度 (0から1の値を取り、解析結果が目視判断通りに分類されているほど1に近づく。)、 TP ：解析結果、目視判断ともに植生域となった画素数、 TN ：解析結果、目視判断ともに非植生域となった画素数、 FN ：目視では植生域となり、解析では非植生域となった画素数、 FP ：目視では非植生域となり、解析では植生域となった画素数。

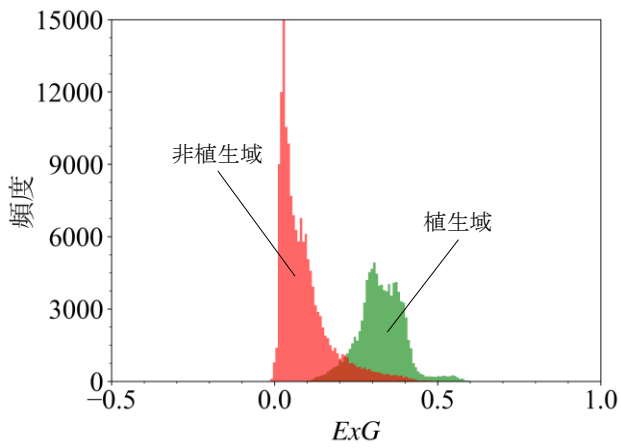


(a) TB46-A

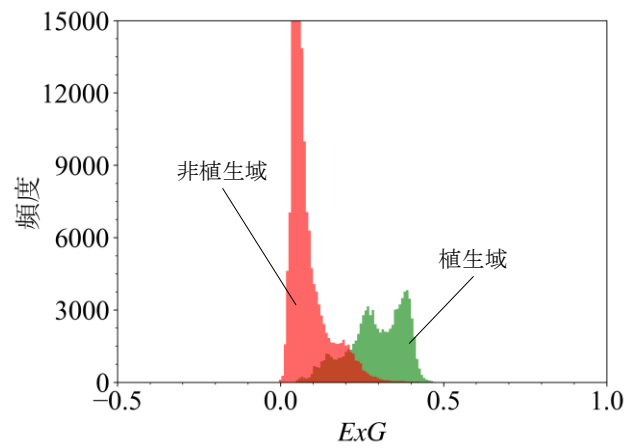


(b) TB46-B

図3-11 *ExG*の頻度分布 (TB46)

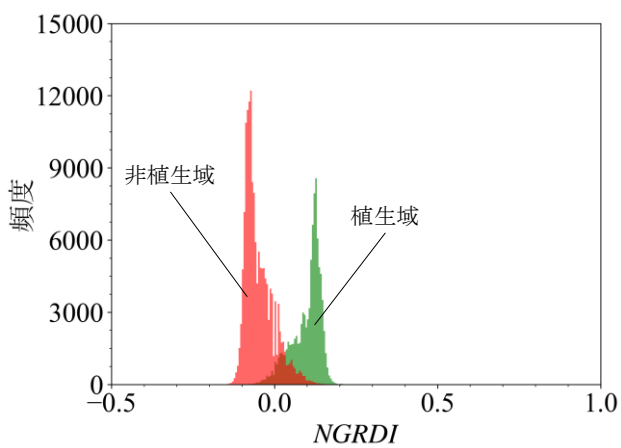


(a) WC31-A

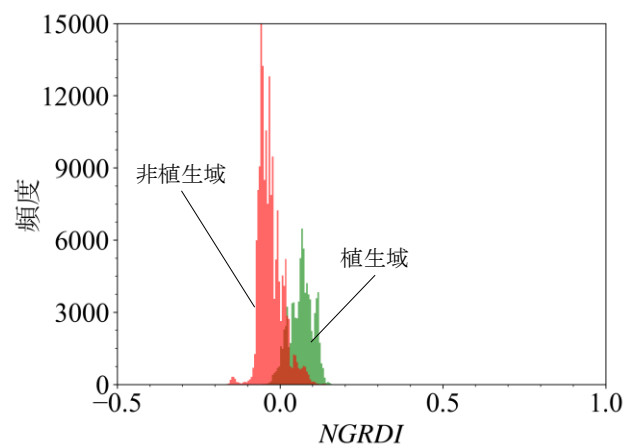


(b) WC31-B

図3-12 *ExG*の頻度分布 (WC31)



(a) TB46-A



(b) TB46-B

図3-13 *NGRDI*の頻度分布 (TB46)

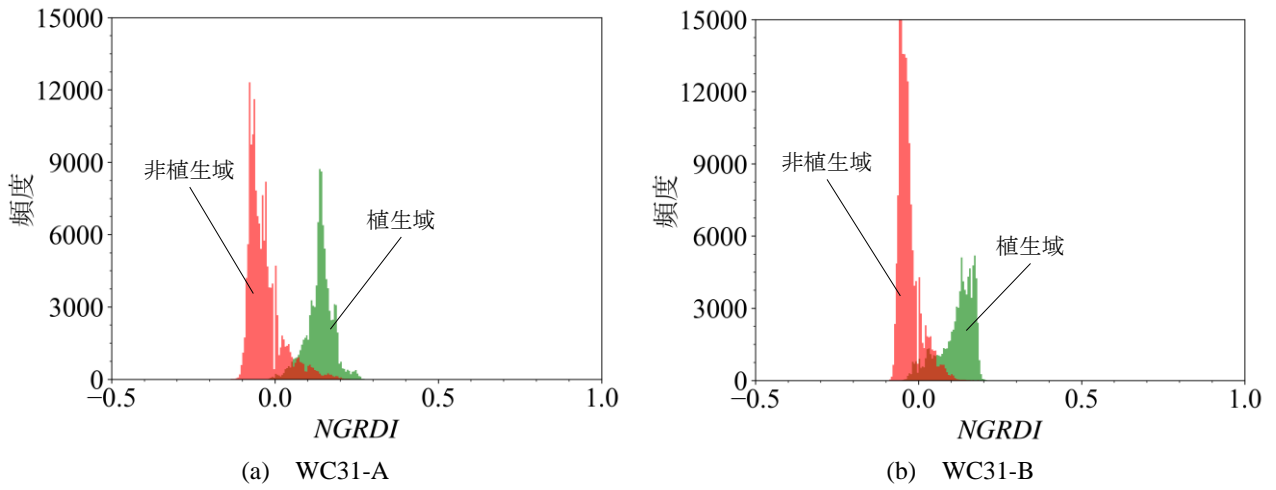


図3-14 NGRDIの頻度分布 (WC31)

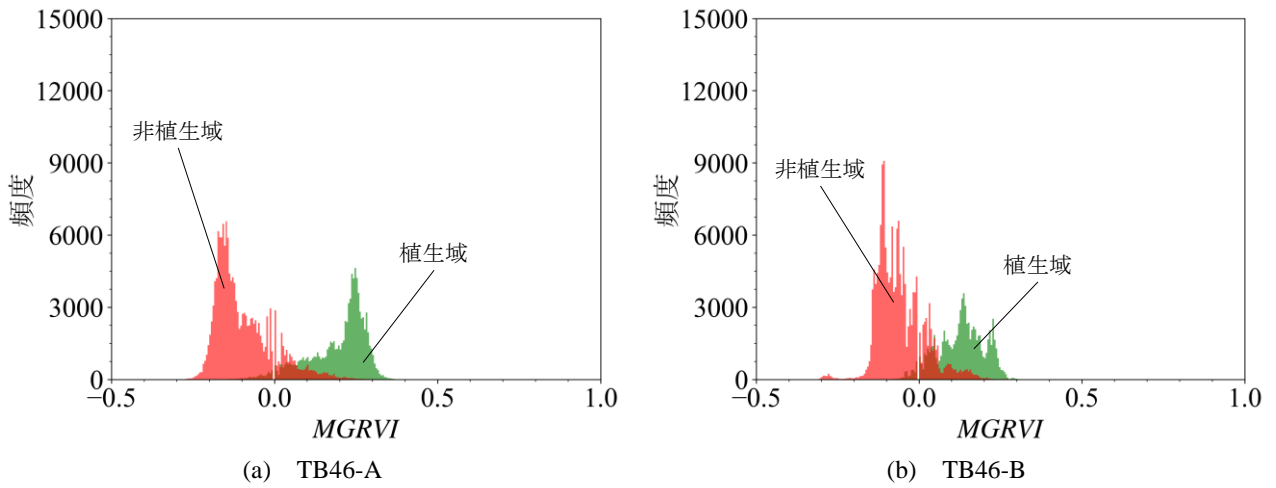


図3-15 MGRVIの頻度分布 (TB46)

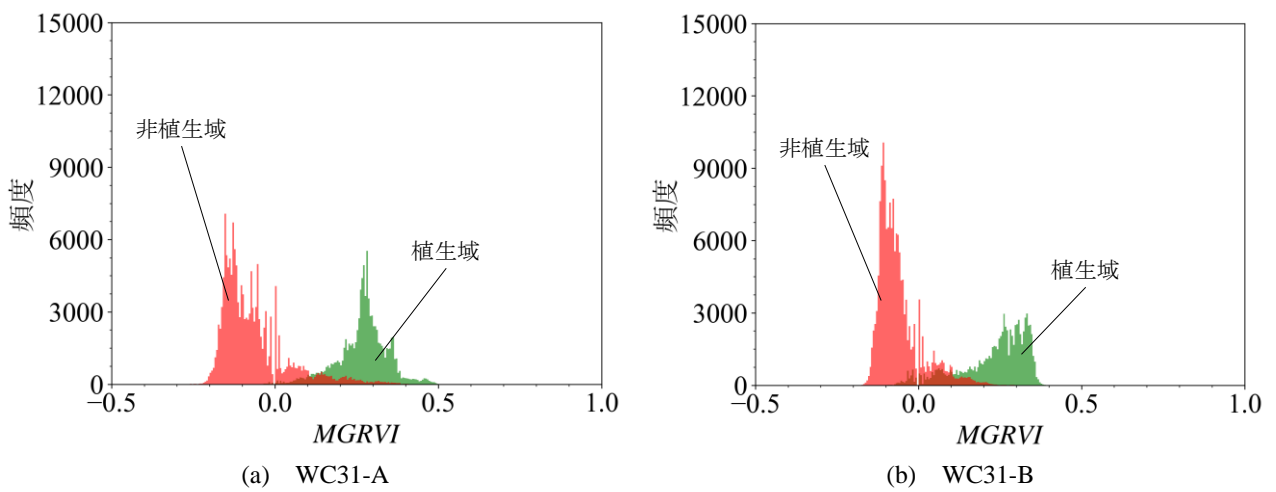


図3-16 MGRVIの頻度分布 (WC31)

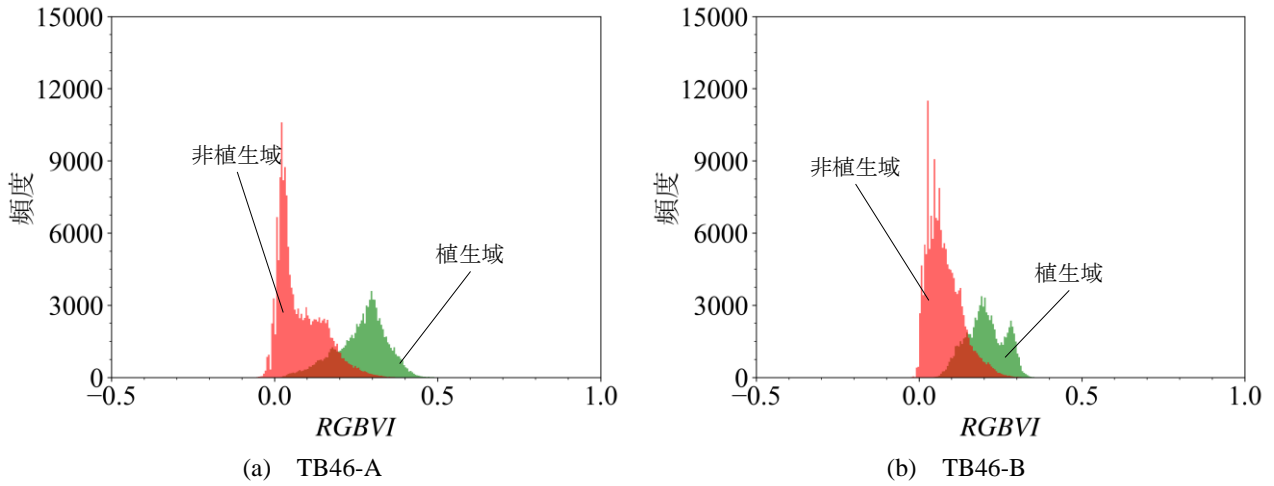


図3-17 RGBVIの頻度分布 (TB46)

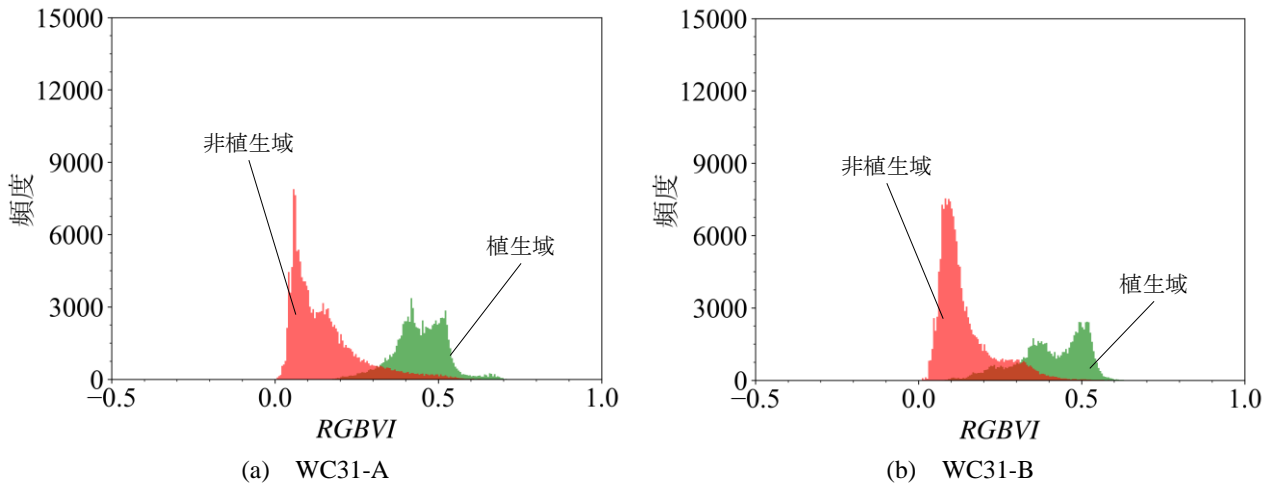


図3-18 RGBVIの頻度分布 (WC31)

図3-19, 図3-20に, TB46, WC31のそれぞれの被写体における, 各植生指数に対する閾値 t と正確度 Acc の関係を示す。また, 図3-21～図3-28には, 各植生指数を用いたTB46, WC31の解析結果の例 (ExG, RGBVIでは閾値を $t=0.00, 0.10, 0.20, 0.30$, NGRDI, MGRVIでは閾値を $t=-0.10, 0.00, 0.10, 0.20$ に設定) を示す。図3-19, 図3-20より, 各植生指数とも両被写体において, t が大きくなるにつれ Acc が増加し, やがてピークに達した。これは, FP が小さくなり, 植生域の抽出が精度良く行われたためであると考えられる (図3-21～図3-28)。その後, t の増加と共に Acc は減少し, 各植生指数とも両被写体において $Acc \approx 0.70$ 付近に収束した。 Acc の値が収束した理由は, t がある値を超えると, 解析結果が植生域となる画素が現れず (図3-21～図3-28), TP, FP が常に0になったためであると考えられる。以上の結果から, 本研究において植生域となる画素の条件として, TB, WCのそれぞれの植生種で, Acc を最も大きくするような t を, 植生域/非植生域に分離するための閾値として採用することとした。具体的には, 各植生指数において表3-8に示すような閾値を採用することとした。

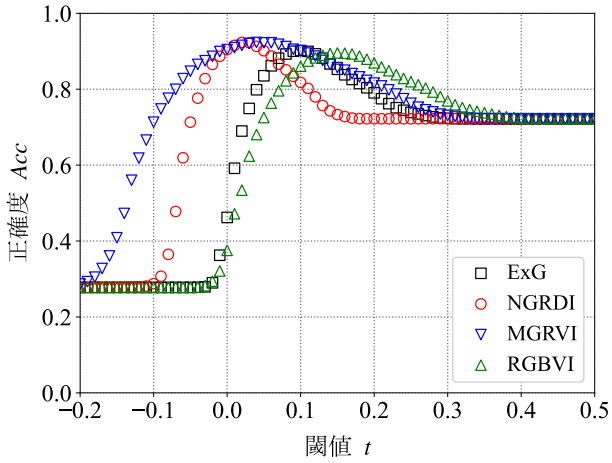


図3-19 閾値と正確度の関係 (TB46)

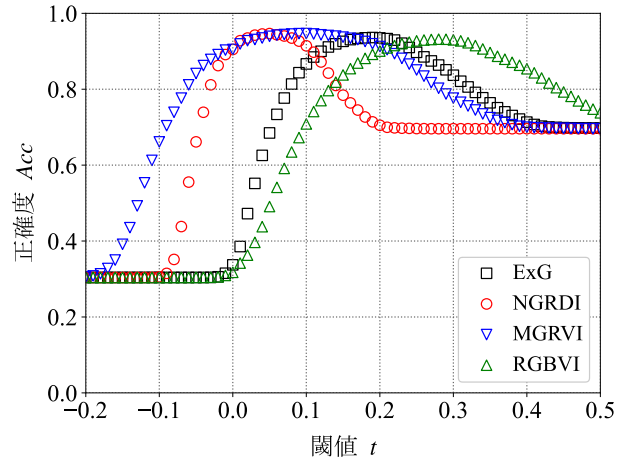


図3-20 閾値と正確度の関係 (WC31)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=0.00$) (c) 二値画像 ($t=0.10$) (d) 二値画像 ($t=0.20$) (e) 二値画像 ($t=0.30$)

図3-21 各閾値 t における解析結果 (植生指数: ExG, 被写体: TB46, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=0.00$) (c) 二値画像 ($t=0.10$) (d) 二値画像 ($t=0.20$) (e) 二値画像 ($t=0.30$)

図3-22 各閾値 t における解析結果 (植生指数: ExG, 被写体: WC31, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=-0.10$) (c) 二値画像 ($t=0.00$) (d) 二値画像 ($t=0.10$) (e) 二値画像 ($t=0.20$)

図3-23 各閾値 t における解析結果 (植生指数: NGRDI, 被写体: TB46, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=-0.10$) (c) 二値画像 ($t=0.00$) (d) 二値画像 ($t=0.10$) (e) 二値画像 ($t=0.20$)

図3-24 各閾値 t における解析結果 (植生指数: NGRDI, 被写体: WC31, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=-0.10$) (c) 二値画像 ($t=0.00$) (d) 二値画像 ($t=0.10$) (e) 二値画像 ($t=0.20$)

図3-25 各閾値 t における解析結果 (植生指数: MGRVI, 被写体: TB46, 二値画像の白部が植生域)



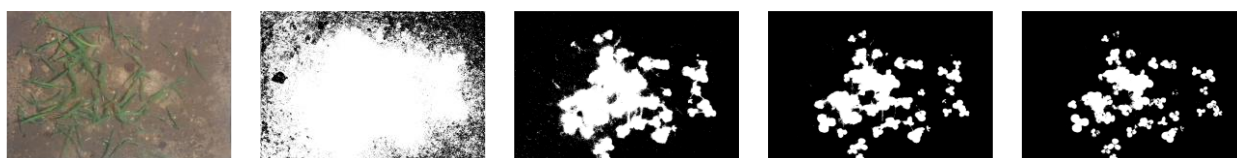
(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=-0.10$) (c) 二値画像 ($t=0.00$) (d) 二値画像 ($t=0.10$) (e) 二値画像 ($t=0.20$)

図3-26 各閾値 t における解析結果 (植生指数: MGRVI, 被写体: WC31, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=0.00$) (c) 二値画像 ($t=0.10$) (d) 二値画像 ($t=0.20$) (e) 二値画像 ($t=0.30$)

図3-27 各閾値 t における解析結果 (植生指数: RGBVI, 被写体: TB46, 二値画像の白部が植生域)



(a) 可視光画像 (b) 二値画像 ($t=0.00$) (c) 二値画像 ($t=0.10$) (d) 二値画像 ($t=0.20$) (e) 二値画像 ($t=0.30$)

図3-28 各閾値 t における解析結果 (植生指数: RGBVI, 被写体: WC31, 二値画像の白部が植生域)

表3-8 各植生指数において植生域を抽出するための閾値 (串良川堤体土)

	TB	WC
ExG	$ExG \geq 0.10$	$ExG \geq 0.19$
NGRDI	$NGRDI \geq 0.02$	$NGRDI \geq 0.05$
MGRVI	$MGRVI \geq 0.04$	$MGRVI \geq 0.10$
RGBVI	$RGBVI \geq 0.15$	$RGBVI \geq 0.28$

植被率は、先述の通り、地表面に対する植生の水平投影面積を百分率で示した値である⁶³⁾ことから、式(3-4)により算出した。

$$PVC = \frac{Pix_{plant}}{Pix_{all}} \times 100 \quad (3-4)$$

ここに、 PVC : 植被率 (Percentage of Vegetational Cover⁶³⁾) [%], Pix_{plant} : 植生と判定された画素数[-], Pix_{all} : 解析対

表3-9 室内光源下における各植生指数を用いて得られた各被写体の植被率の計測結果

	ExG			NGRDI			MGRVI			RGBVI		
	μ [%]	σ [%]	CV [-]	μ [%]	σ [%]	CV [-]	μ [%]	σ [%]	CV [-]	μ [%]	σ [%]	CV [-]
TB46	10.92	±0.77	0.07	11.13	±0.70	0.06	11.12	±0.70	0.06	11.19	±0.84	0.07
TB55	96.13	±0.87	0.01	94.70	±1.06	0.01	94.70	±1.07	0.01	96.51	±0.80	0.01
TB64	62.93	±1.21	0.02	57.73	±0.71	0.01	57.70	±0.70	0.01	64.84	±1.49	0.02
WC28a	80.58	±2.35	0.03	77.68	±2.58	0.03	77.63	±2.58	0.03	81.64	±2.27	0.03
WC31	11.49	±0.74	0.06	12.05	±0.34	0.03	12.03	±0.34	0.03	11.48	±0.88	0.08
WC45	95.86	±0.67	0.01	96.00	±0.60	0.01	95.99	±0.60	0.01	95.87	±0.68	0.01

象域となる画像の全画素数[-]。

3.3.3 植被率の計測結果

繰り返し撮影された画像（各90枚）を用いて、計測される植被率のばらつきに関する検討を行う。それぞれの被写体における、各植生指数から得られた植被率の平均値 μ [%]とその標準偏差 σ [%]、および変動係数 CV ($=|\sigma/\mu|$) [-]を表3-9に示す。植生指数や被写体によって若干の違いは見られるが、 μ が小さい被写体程、 CV は大きくなるような傾向が見られたことから、植被率が小さい被写体程、計測結果はばらつき可能性が考えられる。植生指数毎の特徴として、 σ の大小関係はExG、RGBVIとNGRDI、MGRVIの2つの群に分けて考えることができる。例えば、TB46の σ は、ExG、RGBVIを用いた場合に比べ、NGRDI、MGRVIを用いた場合の方が小さくなった。一方で、TB55の σ ではその逆となり、ExG、RGBVIを用いた場合に比べ、NGRDI、MGRVIを用いた場合の方が大きくなった。このように二群に分けて考えることができる要因として、それぞれの植生指数の定義式に対する青バンドの輝度値の有無（表3-1）が考えられるが、詳細については今後検討する必要がある。

ばらつきが発生した原因として、本研究で用いた撮影機器によるノイズが挙げられる。また、撮影時間中に、被写体の葉の微小な変位が観察されたことから、このような植生の微動も植被率の計測結果のばらつきの原因になると考えられる。ただし、 σ は最大でも±2.58%程度（被写体：WC28a、植生指数：MGRVI）であった（表3-9）ことから、本研究における室内光源条件下で得られた画像から計測される植被率のばらつきは軽微であると推察される。

また、TB64、WC31はそれぞれ、TB55、WC28aに比べ植生の育成期間が長いにも関わらず、 μ が小さくなった。これは、TB64、WC31の育成期間（表3-6）が原因であると考えられる。それぞれの植生種に対して好ましい育成期間は、TBで4～7月（鹿児島県）⁶⁴、WCで3～6月、及び9～10月⁵⁵とされるが、TB64、WC31は2月や3月に育成され、室内であっても夏季に比べ気温が低くなりやすいため、植生の成長が芳しくなかった可能性が考えられる。

3.4 自然光源下における植生の撮影

3.3節では、光源の変化を抑えた撮影環境において、植被率の計測結果のばらつきは軽微であることを示した。しかし、実法面の現場は屋外であり、自然光源は時刻（太陽高度）、天気によって明暗や色温度が変化する¹⁶。よって、自然光源下で撮影された画像から算出される植被率は、これら光源の変化の影響を受けてばらつき可能性が考えられる。そこで本節では、それら光源条件の違いが植被率の計測結果に与える影響について明らかにすることを試みる。

3.4.1 撮影時刻、天気の影響に関する考察

本項では、様々な撮影時刻、天気の下で撮影された画像から計測される植被率が、どの程度確からしいかについて

て明らかにする。具体的には、自然光源下及び室内光源下において植生の画像を撮影し、それぞれの画像から得られる植被率の比較を行い、光源の変化の影響について考察する。

まず、被写体について述べる。被写体の植生種や作製条件は、3.3.1項と同様にTBとWCの種子をそれぞれ育苗箱に播種した。ただし、様々な繁茂状況を考慮するために、育成期間の異なる被写体を、TBで19個、WCで17個用意した。表3-10に、各被写体の育成期間と個数を示す。また、表3-11に、各被写体の付番、撮影日、撮影時刻における天気を示す。撮影時刻は、室内光源下で10:00頃、自然光源下では9:30頃、13:30頃、16:30頃の



写真3-2 屋外撮影時の被写体の設置状況

3時刻とした。ただし、WC被写体のNo.12、13（表3-11）における室内撮影は14:00頃とした。また、天気は3時間毎に公開されている⁵³⁾ため、それぞれ9時、12時、15時を参照した。それぞれの植生種における屋外撮影の回数は、表3-12に示す通りである。室内での撮影は、3.3.1項と同様の条件（デジタルカメラと被写体の相対位置関係、光源）の元で実施した。自然光源下での撮影は、屋外（鹿児島大学海洋土木工学プログラム棟2階バルコニー）に用意した治具の上に被写体を設置して実施した（写真3-2）。このとき、影の長さ、向きの変化を考慮できるように、被写体を南向きに傾斜させた。なお、傾斜角度はしらす道路盛土の標準勾配である1:1.8⁵⁶⁾とした。デジタルカメラは被写体の前方に三脚を用いて固定し、その他のデジタルカメラと被写体の相対位置関係を室内での撮影条件と同様とすることで、両光源下で撮影された画像の解像度が等しくなるようにした。また、撮影時のフラッシュは無効とし、撮影には遠隔シャッター機能を用いた。植被率を計測するための画像解析条件は3.3.2項と同様である。即ち、表3-8に示す閾値を各植生指数に適用し、式(3-4)により植被率を算出した。また、 $R=G=B=0$ となる画素については、各植生指数を0として処理した。また、デジタルカメラは表3-5に示す機器設定に固定して撮影を実施した。

表3-10 各育成期間における被写体の個数

	育成期間[日]								
	7	13	18	20	27	30	41	53	55
TB	1	3	2	-	4	1	2	-	6
WC	3	2	-	2	4	-	2	2	2

表3-11 各被写体の屋外撮影日，育成期間，撮影時の天気⁶²⁾

植生	被写体 No.	撮影日	育成 期間 [日]	天気			植生	被写体 No.	撮影日	育成 期間 [日]	天気		
				9:30頃	13:30頃	16:30頃					9:30頃	13:30頃	16:30頃
TB	1	2022/9/1	7	晴	曇	薄曇	WC	1	2021/11/10	7	雨	雨	晴
	2	2021/12/1	13	晴	曇	晴		2	2021/11/10	7	雨	雨	晴
	3	2021/12/1	13	晴	曇	晴		3	2022/5/4	7	薄曇	薄曇	晴
	4	2022/5/9	13	-	曇	曇		4	2021/12/2	13	快晴	快晴	晴
	5	2021/11/19	18	晴	晴	晴		5	2021/12/2	13	快晴	快晴	晴
	6	2021/11/19	18	晴	晴	晴		6	2022/9/7	20	薄曇	-	薄曇
	7	2021/11/16	27	晴	晴	曇		7	2022/9/7	20	薄曇	-	薄曇
	8	2021/11/28	27	晴	快晴	快晴		8	2021/12/6	27	晴	晴	晴
	9	2021/11/28	27	晴	快晴	快晴		9	2022/4/24	27	-	曇	曇
	10	2022/7/29	27	晴	曇	曇		10	2022/4/24	27	-	曇	曇
	11	2022/7/29	30	晴	曇	曇		11	2022/7/28	27	晴	晴	晴
	12	2022/8/8	41	晴	晴	晴		12	2022/10/20	41	快晴	快晴	快晴
	13	2022/8/9	41	晴	-	-		13	2022/10/20	41	快晴	快晴	快晴
	14	2021/12/8	55	快晴	快晴	快晴		14	2021/12/3	53	曇	-	快晴
	15	2021/12/8	55	快晴	快晴	快晴		15	2021/12/3	53	曇	-	快晴
	16	2021/12/14	55	快晴	-	晴		16	2022/9/12	55	晴	晴	晴
	17	2022/4/20	55	晴	薄曇	薄曇		17	2022/9/12	55	晴	晴	晴
	18	2022/4/20	55	晴	薄曇	薄曇							
	19	2022/7/6	55	-	曇	曇							

「-」の欄は，天候不良等で撮影不可であったことを示す。

天気は3時間毎に公開されている⁵³⁾ため，それぞれ9時，12時，15時を参照した。

表3-12 屋外の自然光源下における被写体の撮影回数

	撮影時刻			
	9:30頃	13:30頃	16:30頃	計
TB	17	17	17	51
WC	15	13	17	45

各植生指数を用いて、それぞれの植生種に対し、室内光源下と自然光源下で撮影された画像から得られたそれぞれの画像から計測された植被率の比較結果を図3-29～図3-36に示す。ここで、 PVC_m は室内で撮影された画像から計測された植被率[%]、 PVC_{out} は屋外で撮影された画像から計測された植被率[%]を意味している。図3-29～図3-36の実線は、ある PVC_{out} に対する PVC_m が正規分布に従いばらつくと仮定し、最小二乗法を用いて作成した回帰式であり、 R^2 は各回帰式における寄与率（決定係数）を意味している。また、図3-29～図3-36の破線は、それぞれの回帰式における95%予測区間を示している。さらに、表3-13、表3-14には、図3-29～図3-36における PVC_{out} が0, 20, 40, 60, 80, 100%であるときの95%予測区間幅を示す。ここで、95%予測区間とは、将来の観測値の内の95%程度が入る区間であり⁶⁵⁾、式(3-5)の开区間で表される⁶⁶⁾。

$$\left(\hat{\mu}_0 - t(\phi_e, 0.05) \sqrt{\left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\} V_e}, \hat{\mu}_0 + t(\phi_e, 0.05) \sqrt{\left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\} V_e} \right) \quad (3-5)$$

ここに、 x_0 : 新たに得る説明変数（ここでは PVC_{out} ）、 \bar{x} : 説明変数の平均値、 S_{xx} : 説明変数の平方和、 $\hat{\mu}_0$: 説明変数 x_0 における被説明変数（ここでは PVC_m ）の点予測値、 n : データ数、 ϕ_e : 残差の自由度（即ち $n-2$ ）、 $t(\phi_e, 0.05)$: 自由度 ϕ_e における t 分布の両側5%点、 V_e : 残差の平均平方。

植生指数の結果において、TB、WCの両植生種とも PVC_m と PVC_{out} は概ね一致するような傾向が見られた（図3-29～図3-36）。各植生指数の結果の特徴は、3.3.3項と同様に各植生指数の定義式に対する青バンドの輝度値の有無（表3-1）により、ExGとRGBVI、NGRDIとMGRVIの二つの群に分けて考えることができる。ExG、RGBVIでは、TBの方がWCに比べ95%予測区間幅は小さくなった。具体的には、ExGにおける95%予測区間幅は、TBで±10%程度、WCで±8%程度であり、RGBVIにおける95%予測区間幅は、TBで±13%程度、WCで8%程度であった（表3-13、表3-14）。一方で、NGRDI、MGRVIにおける95%予測区間幅は、TBで±11%程度、WCで±16%程度であった（表3-13、表3-14）。以上から、TB、WCの両植生種に対して自然光源の変化の影響によるばらつきを抑えることができる植生指数はExGであると考えられるため、本研究において植被率の計測に用いる植生指数としてExGを採用することとした。

植生指数毎に植被率の計測結果のばらつきの発生傾向が異なる原因については、今後検討する必要がある。また、植生種によって95%予測区間幅の違いが発生した理由として、植生が光源を吸収、反射する際に、その特性に違いがあると言われている⁶⁷⁾ため、デジタルカメラに入射する光の変化の傾向がTBとWCで異なった可能性も考えられるが、詳細な分析には更なるデータの蓄積や、撮影環境の光環境（色温度等）の計測が必要であると考えられる。

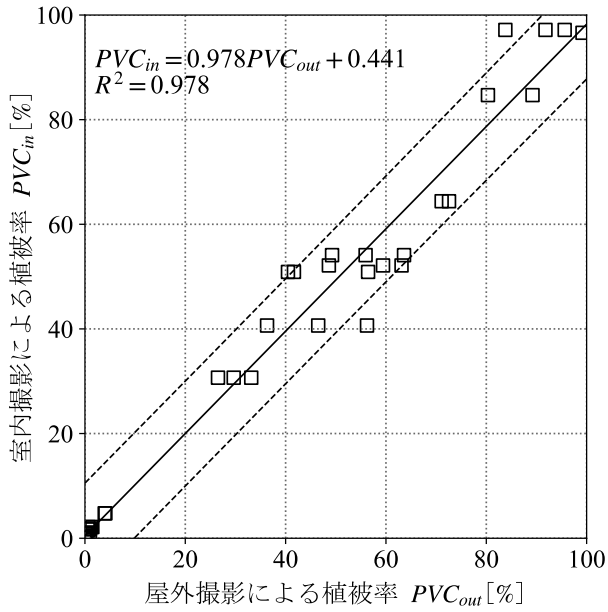


図3-29 室内/屋外撮影による植被率の比較
(植生種：TB, 植生指数：ExG)

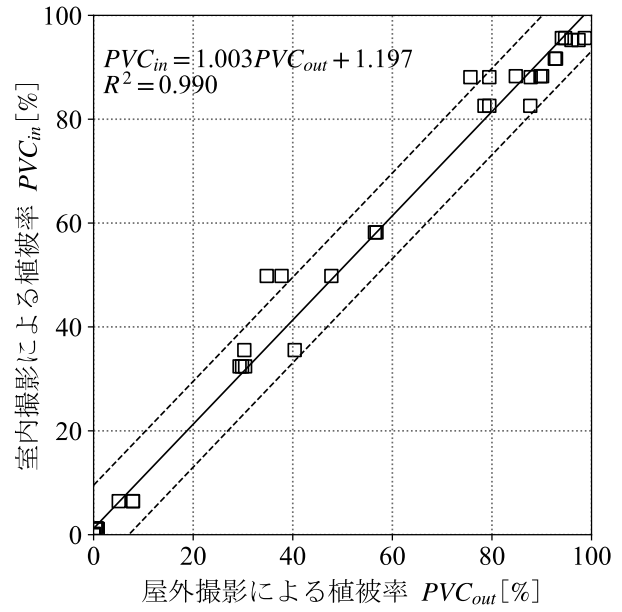


図3-30 室内/屋外撮影による植被率の比較
(植生種：WC, 植生指数：ExG)

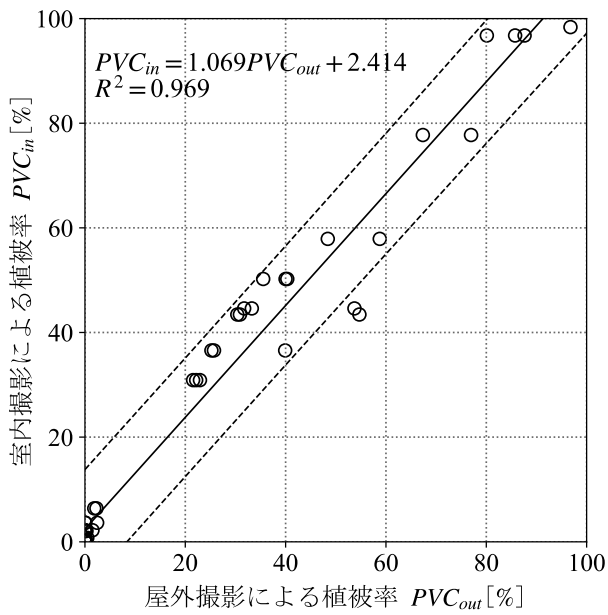


図3-31 室内/屋外撮影による植被率の比較
(植生種：TB, 植生指数：NGRDI)

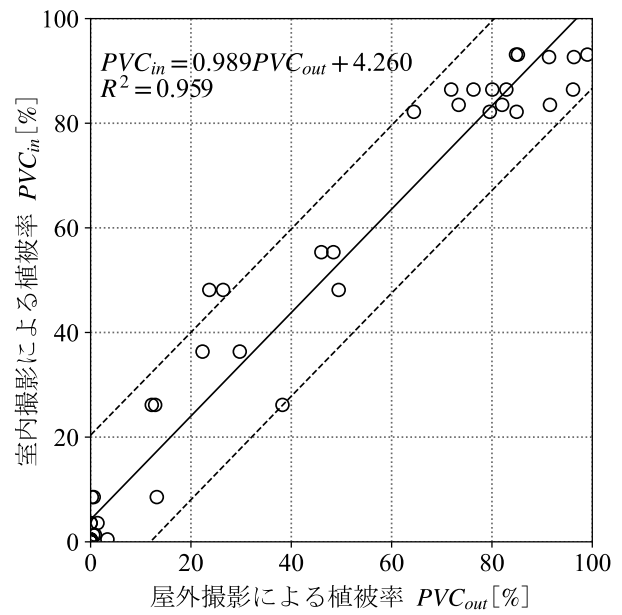


図3-32 室内/屋外撮影による植被率の比較
(植生種：WC, 植生指数：NGRDI)

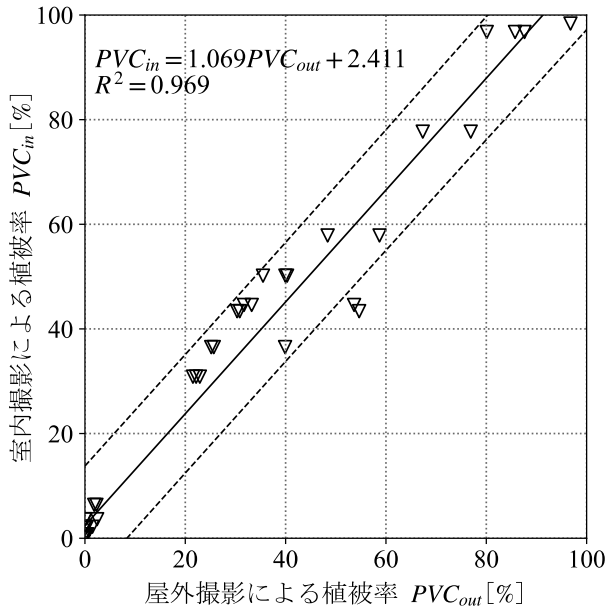


図3-33 室内/屋外撮影による植被率の比較
 (植生種 : TB, 植生指数 : MGRVI)

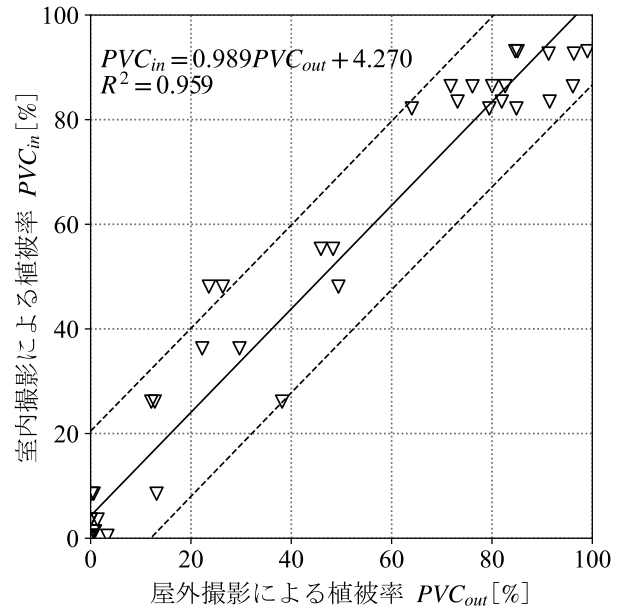


図3-34 室内/屋外撮影による植被率の比較
 (植生種 : WC, 植生指数 : MGRVI)

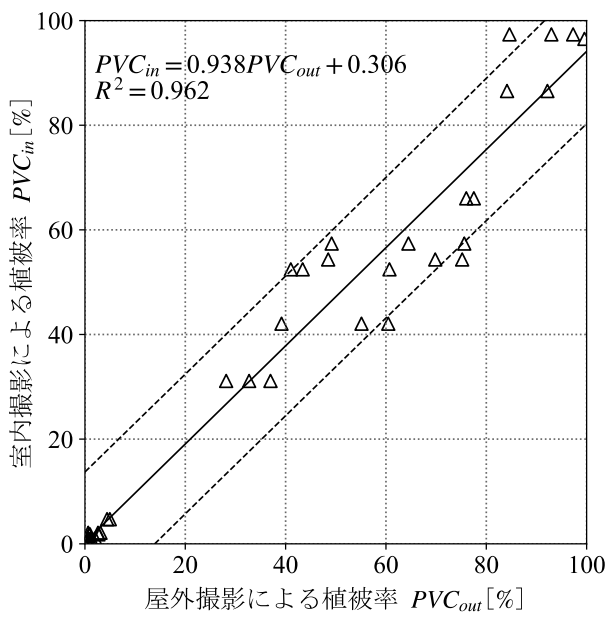


図3-35 室内/屋外撮影による植被率の比較
 (植生種 : TB, 植生指数 : RGBVI)

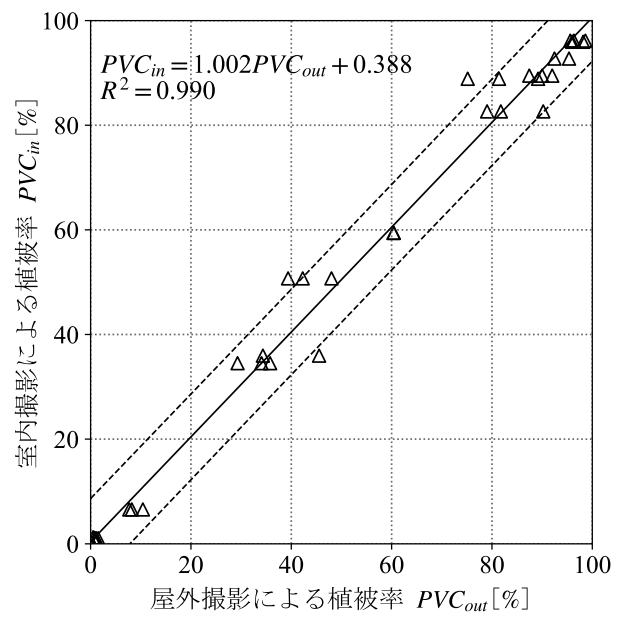


図3-36 室内/屋外撮影による植被率の比較
 (植生種 : WC, 植生指数 : RGBVI)

表3-13 PVC_{in} の回帰式に対する95%予測区間幅[%] (TB)

	PVC_{out} [%]					
	0	20	40	60	80	100
ExG	±10.08	±10.02	±10.03	±10.11	±10.25	±10.47
NGRDI	±11.40	±11.33	±11.38	±11.53	±11.78	±12.13
MGRVI	±11.39	±11.32	±11.37	±11.51	±11.77	±12.11
RGBVI	±13.42	±13.34	±13.34	±13.43	±13.60	±13.85

表3-14 PVC_{in} の回帰式に対する95%予測区間幅[%] (WC)

	PVC_{out} [%]					
	0	20	40	60	80	100
ExG	±8.33	±8.25	±8.23	±8.25	±8.32	±8.43
NGRDI	±16.13	±16.00	±15.96	±16.03	±16.19	±16.45
MGRVI	±16.20	±16.06	±16.03	±16.09	±16.26	±16.51
RGBVI	±8.26	±8.19	±8.16	±8.18	±8.24	±8.35

次に、本研究で採用することとした植生指数であるExGを用いた場合の植被率の計測結果のばらつきに関して、更なる検討を行う。一般に、太陽高度が小さい程照度が小さく、太陽高度が大きい程照度も大きい。また、晴れの日の照度（光で照らされている面の明るさを意味し、単位は[lx]⁶⁸⁾は曇りや雨の日の照度に比べ、大きく変動する⁶⁹⁾とされている。そこで、天気や撮影時刻の違いが、植生指数ExGによる植被率の計測結果（図3-29、図3-30）に対して影響を与えるかについて考察する。

まず、天気の違いに関して述べる。図3-37、図3-38に、図3-29、図3-30の結果を撮影時の天気毎に分類し、再度整理して得られた植被率の比較結果とその回帰式を示す。なお、図3-37、図3-38の天気良は、表3-11における快晴、晴を意味し、天気悪は、表3-11における薄曇、曇、雨を示している。そして、それぞれの天気の条件で得られた回帰式に対し、共分散分析を実施し、天気の違いが植被率の計測結果に影響を与えるか考察した。ここで、共分散分析とは、二つ（及びそれ以上）の回帰直線が同一と見なせるか、具体的には回帰直線の傾き、切片に有意な違いがあるかを分析する手法である⁷⁰⁾。具体的には、平行性（傾き）の検定を実施して二つ（及びそれ以上）の回帰直線が平行であると見なせれば、切片の違いの検定を行い、二つ（及びそれ以上）の回帰直線に違いがあると言えるかを検討する。平行性の検定においては、帰無仮説 H_0 、対立仮説 H_1 はそれぞれ以下の通りである。

H_0 ：二つ（及びそれ以上）の回帰直線の傾きは異なるとは言えない。（等しいと考える。）

H_1 ：二つ（及びそれ以上）の回帰直線の傾きは異なる。

また、切片の違いの検定についての帰無仮説 H_0 、対立仮説 H_1 はそれぞれ以下の通りである。

H_0 ：二つ（及びそれ以上）の回帰直線の切片は異なるとは言えない。（等しいと考える。）

H_1 ：二つ（及びそれ以上）の回帰直線の切片は異なる。

共分散分析の結果、両植生種とも、平行性の検定、切片の違いの検定で帰無仮説 H_0 が採用された（ $p>0.05$ ）。従って、天気の違いによる有意な差は見られず、ExGにより計測される植被率は、天気の違いによる影響を受けるとは言えないことが示された。ただし、ここで示した天気は、先述した様に、撮影時刻と同一の時刻で得られたものではないことから、今後はより詳細な分析が必要であると考えられる。

次に、撮影時刻の違いに関して述べる。図3-39、図3-40に、図3-29、図3-30の結果を撮影時刻毎に分類し、再度整理して得られた植被率の比較結果とその回帰式を示す。先と同様に、各撮影時刻が植生指数ExGにより得られる植被率の計測結果に影響を与えるか検討するために、共分散分析を実施した。その結果、TBにおいては、平行性の検定、切片の違いの検定ともに帰無仮説 H_0 が採用された。一方でWCにおいては、平行性の検定では帰無仮説 H_0 が採用され、切片の違いの検定では対立仮説 H_1 が採用された。従って、WCでは撮影時刻の違いが植被率の計測結果に影響を与えたと考えられる。図3-40において、撮影時刻16:30頃で得られた回帰式の切片は、9:30頃、13:30頃の撮影で得られた回帰式の切片に比べて小さいことから、 PVC_{in} に対して PVC_{out} が過大評価される傾向があると考えられる。一方で、撮影時刻9:30頃で得られた回帰式の切片は、13:30頃、16:30頃の撮影で得られた回帰式の切片に比べて大きいことから、 PVC_{in} に対して PVC_{out} が過小評価される可能性があると考えられる。このような結果となった理由は、自然光源の色温度の違いが画像の輝度値に影響を与え、植生指数ExGの算出結果が大きく（小さく）なり、その結果式(3-4)で必要となる Pix_{plant} （植生と判断された画素数）の増減に繋がったと考えられるが、詳細な分析のためには撮影時の局所的な光環境の計測を行う必要があると考えられる。

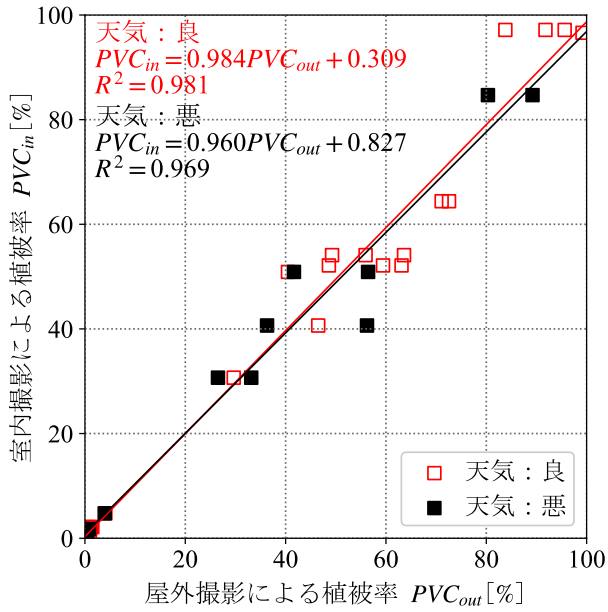


図3-37 室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: TB, 植生指数: ExG, 分類: 天気)

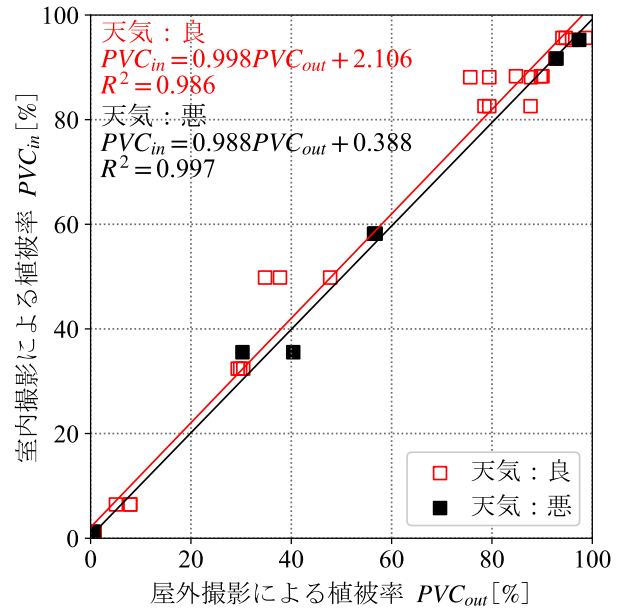


図3-38 室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: WC, 植生指数: ExG, 分類: 天気)

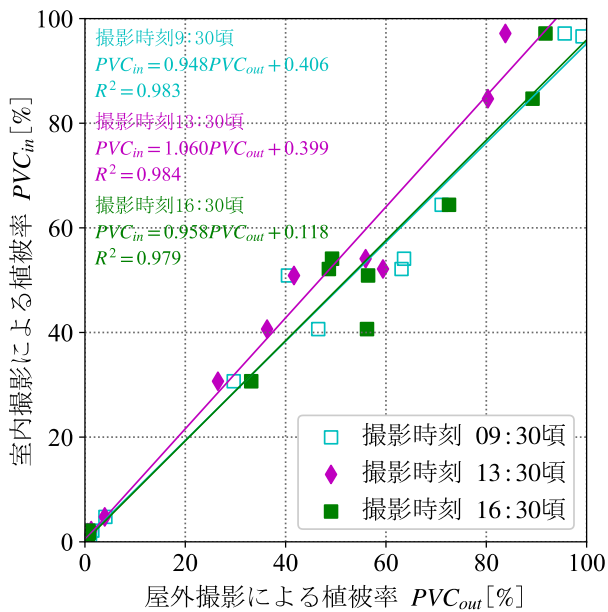


図3-39 室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: TB, 植生指数: ExG, 分類: 撮影時刻)

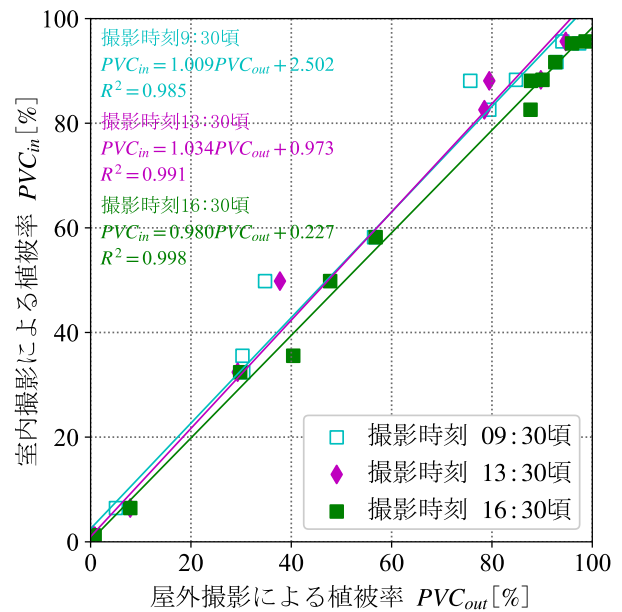


図3-40 室内/屋外撮影による植被率の比較 (植生種: WC, 植生指数: ExG, 分類: 撮影時刻)

3.4.2 撮影環境の明暗の影響に関する考察

3.4.1項では、午前、正午付近、午後の限られた3時刻において、天気や太陽高度の違いが植生指数ExGによる植生率の計測結果に与える影響について示した。本項では、さらに範囲の広い時刻で植生の撮影を行い、同日中の撮影における植生率の計測結果のばらつきに関して考察を行う。Yu et al.⁴⁰⁾によれば、撮影環境が明るい、もしくは暗い場合、ExGによる植生域の抽出精度は下がるとされるが、光源の明暗について数値的指標は示されていない。そこで、どの程度の明るさであれば植生率の計測に供する画像の撮影に好ましいか定量的に評価するために、画像撮影時に照度を併せて計測し、植生率の計測結果との関係を考察する。

被写体となる植生種や作製条件は3.4.1項までと同様に、TBとWCの種子をそれぞれ育苗箱に播種した。被写体の数はそれぞれの植生種に対し1個ずつ用意した。育成期間はTBで53日（以下、TB53）、WCで28日（以下、WC28b）である。次に撮影条件について述べる。表3-15に示すように、撮影日、撮影時間はそれぞれ、TB53において2022年4月18日の5:00頃から16:30頃、WC28bにおいて2022年3月24日の5:00頃から18:30頃であり、当日の天気は一日を通して変化しなかった。被写体とデジタルカメラの設置場所、設置方法は3.4.1項の屋外撮影時と同様である（写真3-2）。ただし、照度を計測するために、被写体付近に照度計（FT3242、日置電機株式会社）と照度のデータを記録するためのノートパソコンを設置した（写真3-3）。このとき、照度の計測値が被写体やデジタルカメラの影の影響を受けないように、照度計を午前には被写体の東側、午後は西側に設置した。撮影は5分毎に、遠隔シャッター機能を用いて行った。植生率を計測するための画像解析条件に関しては、3.4.1項までと同様に、表3-8よりTB53で $ExG \geq 0.1$ 、WC28bで $ExG \geq 0.19$ となる画素を植生域と定義し、 $R=G=B=0$ となる画素については $ExG=0$ として処理を行った。デジタルカメラは表3-5に示す機器設定に固定して撮影を行った。

図3-41、図3-42にそれぞれの被写体の解析結果の例を示す。TB53の撮影日は曇りであったため、影は目立たない。一方で、WC28bの撮影日は快晴であったため、太陽高度に従い影の向きや長さが変化していることが分かる。WC28b

表3-15 各被写体の撮影日の天気⁵³⁾と日の出/日の入時刻⁵⁴⁾

被写体	撮影日	終日の天気	日の出時刻	日の入時刻
TB53	2022/4/18	曇	5:47	18:48
WC28b	2022/3/24	快晴	6:17	18:32



写真3-3 被写体と照度計の設置状況

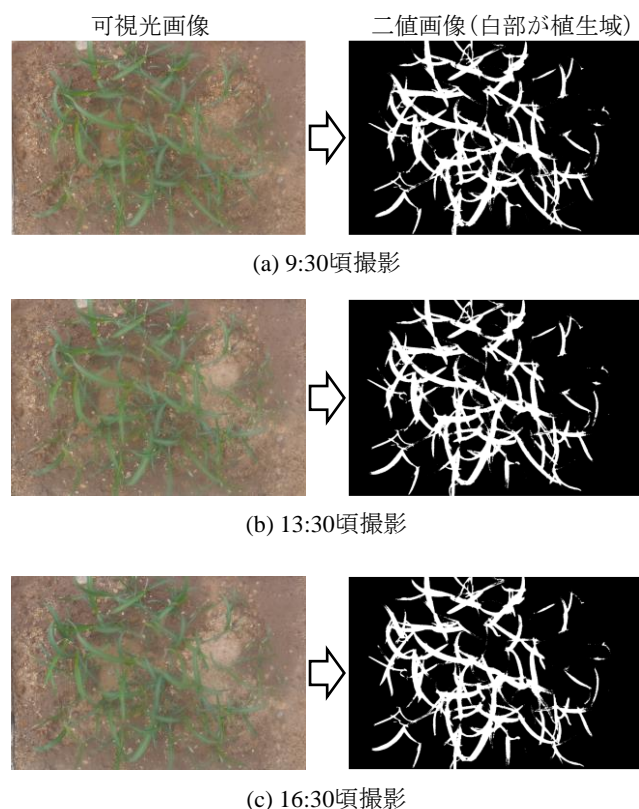


図3-41 TB53の解析結果の例

で12:30頃に撮影された可視光画像(図3-42)を見ると、デジタルカメラの影が植生部を覆うように発生しているが、二値画像ではその部分においても植生域を抽出できているように思われる。また、TB53の撮影日の天気は曇りであったため、快晴時に撮影されたWC28bの撮影結果に比べて、色温度が青色系であることが観察される。次に、植被率と照度の時系列変化を図3-43、図3-44に示す。また、WC28bにおいては、屋外撮影と同日の11:00頃、15:00頃に室内撮影(撮影条件は3.3.1項に同じ。)を実施したため、それらの画像から計測された植被率を図3-44に併せて示す。ただし、デジタルカメラとノートパソコンの充電を要したため、一部データに欠損がある。植被率と照度の関係は、まずTB53では5:00頃から5:20頃にかけて、WC28bでは5:00頃から5:50頃にかけて全ての画素で黒($R=G=B=0$)となり、植被率は0%となった。このとき、照度はTB53にて0.15lxから0.83lx、WC28にて0.13lxから1.26lxであった。よって、この程度の照度の場合、撮影された画像は色を表現することができず、ExGを用いて植被率を計測することは不可能であることが考えられる。その後、TB53では5:30頃に植被率が約7%、WC28bでは6:00頃に植被率が約2%と算出された。このとき、照度はTB53において25.5lx、WC28において16.18lxであった。その後、さらに照度が大きくなるにつれて植被率が上昇し、やがてTB53では植被率18%付近、WC28bでは植被率5%付近で変動するようになった。ここで、Upendar et al.⁷¹⁾によれば、ExGの分子項(表3-1)の値は、緑色系と黄土色系の間に明瞭な差があるとされている。そこで、89.04lx以上の照度となったときに計測された植被率において、平均値 μ とその標準偏差 σ を算出した。

その結果、TB53で $\mu = 17.81\%$ 、 $\sigma = \pm 0.77\%$ 、WC28bで $\mu = 4.80\%$ 、 $\sigma = \pm 1.79\%$ となった。よって、本研究の撮影条件下では、天気の変化しない日における屋外での撮影において、一定程度の照度(ここでは89.04lx以上)を確保することで、標準偏差 $\pm 1.79\%$ 程度で植被率の計測が可能であると考えられる。一方で、本研究では撮影時に求められる照度の上限となり得るような値は計測されなかったと考えられる。また、図3-44に示すように、WC28bの室内で撮影された画像から得られた植被率は、11:00頃の撮影で5.24%、15:00頃の撮影で3.12%であった。ここで、屋外で撮影された植被率 PVC_{out} の平均値 $\mu = 4.80\%$ から、図3-30で得られた回帰式により PVC_{in} を算出すると6.01%となる。よって、 PVC_{out} の平均値 μ から得られる PVC_{in} は、95%予測区間幅である $\pm 8\%$ 程度の範囲に収まっていることも確認された。

WC28bの植被率の計測結果のばらつきがTB53に比べ大きくなった原因は、天気の違いによって光源の変化の傾向が異なったためと考えられる。即ち、快晴の日は曇りの日に比べ照度が大きく変動するため(図3-43、図3-44)、画像の輝度値に影響を与えた可能性が考えられる。また、WC28bは太陽の向きに反応して微動することや、正午付近において葉が閉じることが目視において確認された。これら植生自体の微小な変位についても、植被率の計測結果がばらついた原因になると考えられるが、より詳細な分析のためには、TBにおける快晴の日の撮影、WCにおける曇りの日の撮影等、更なるデータの蓄積が必要である

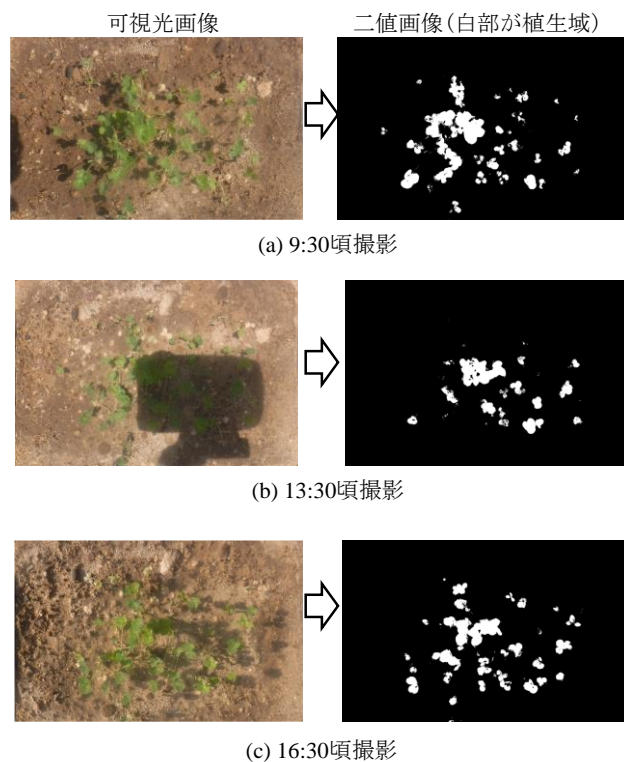


図3-42 WC28bの解析結果の例

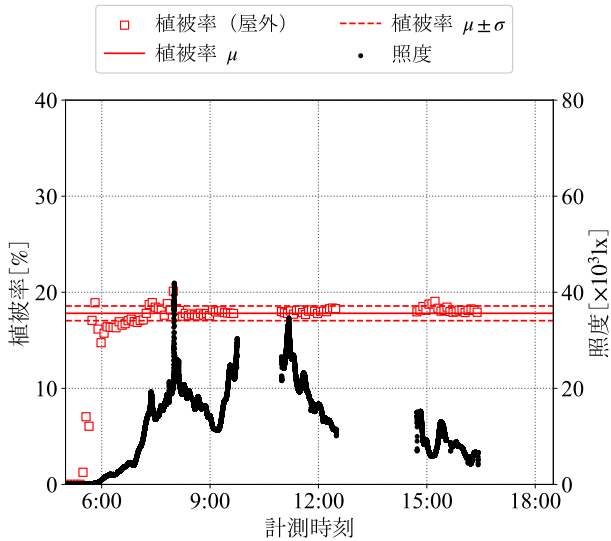


図3-43 植被率と照度の時系列変化 (TB53)

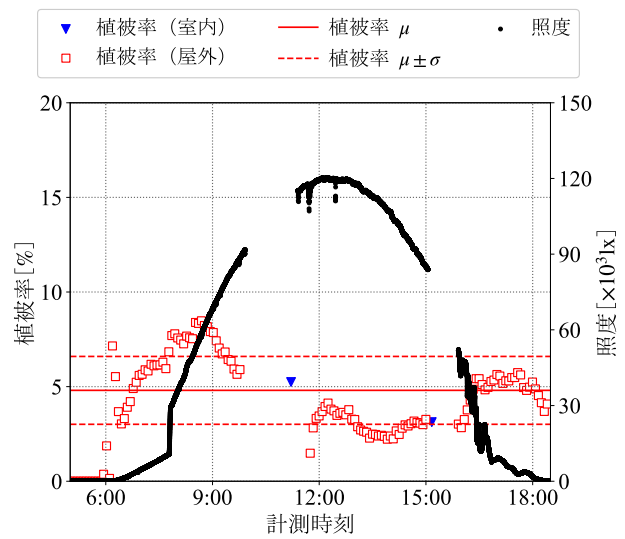


図3-44 植被率と照度の時系列変化 (WC28b)

3.5 実法面における植被率の計測事例

本節では、屋外の実法面において植被率の計測を行った事例を示すとともに、Unmanned Aerial Vehicle (UAV) による空撮画像を利用した計測に向け、計測結果に基づいた課題整理を行う。

3.5.1 計測現場の概要

本節の調査対象となる屋外の実法面（以下、調査対象法面）について述べる。鹿児島県鹿児島市吉野町に位置する世界文化遺産「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」の構成資産である寺山炭窯跡では、2019年7月1日に発生した土砂崩れの被害に対する復旧作業が行われている。土砂崩れが発生した斜面地は、再度の崩壊を防ぐために、安定勾配へ切り直した法面が施工された。この法面を、本節における調査対象法面とする。調査対象法面では、法面保護工の一種である自然侵入促進工が実施された（写真3-4）⁷²⁾。自然侵入促進工とは、周辺植生から法面に飛来する種子等で法面を緑化する技術である⁵⁵⁾ため、原位置の植生のみで構成される法面（斜面）が文化財周辺の歴史的景観の重要な要素となっている場合にも適用される⁷³⁾。従って、自然侵入促進工の品質を適切に管理し、植生の回復状況をモニタリングすることは、文化財に対する防災対策や歴史的景観の保全状況を後世に伝承する上で、重要であると考えられる。

自然侵入促進工においても草地型播種工と同様に、植生管理における点検を実施する際の定量的な指標として、植被率が用いられる（表3-16）。そこで本節では、可視光画像解析技術と植生指数ExGを用いて、調査対象法面の植被率を経時的に計測した事例を示す。また、Unmanned Aerial Vehicle (UAV) による空撮画像を利用した計測に向け、計測結果に基づいた課題整理を行う。

3.5.2 調査対象法面における植被率の計測事例

調査対象法面は、写真3-5に示すように、3段の法面であり、中央の階段を境にして東西に分けられる。植被



写真3-4 寺山炭窯跡付近の自然侵入促進工が施工された法面 (2022年9月22日 著者撮影)

表3-16 自然侵入促進工施工後の植生管理における点検の着眼点と作業例⁵⁾

植生の状態	原因, 留意事項	管理方法
施工5年後の植被率が50%未満 (1:0.8より急勾配の場合は25%未満) である。	乾燥が長時間続いた。	ネット張り付け型の場合は肥料袋を再設置して3年ほど様子を見る。植生基材吹付型の場合はそのまま3年ほど様子を見る。
	工法が不適切であった。	硬岩で侵食の恐れがなく、緑化の必要性が低い場合には、そのまま放置するかネット等を撤去する。緑化の必要性を再検討し、必要な場合は別の工法で再施工する。

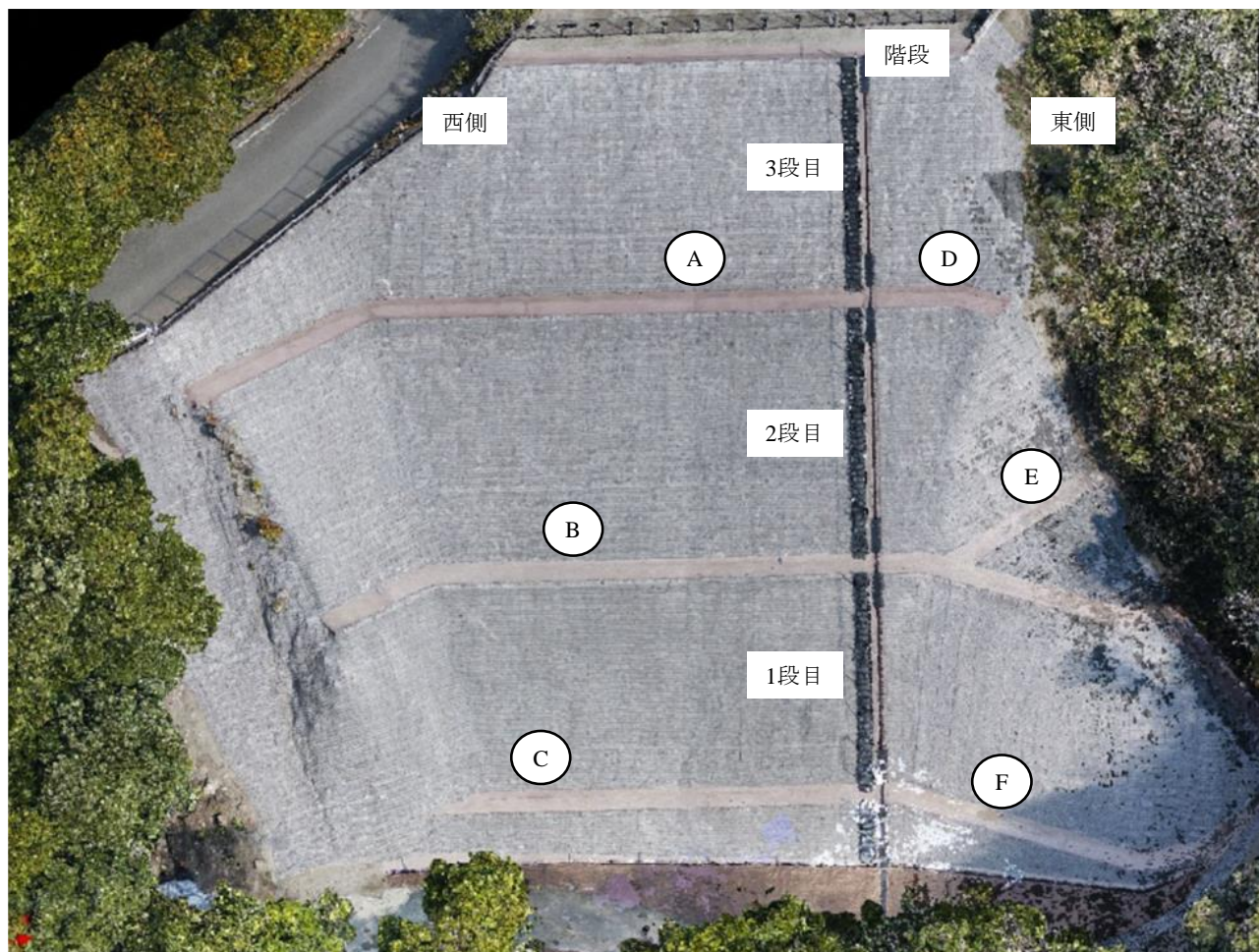


写真3-5 調査対象法面における植被率を計測するための画像の撮影位置

率を計測する位置は、写真3-5のA～Fであり、東西の格段において一カ所ずつとした。

画像の撮影条件と植被率の計測条件について述べる。撮影は、写真3-6に示すように、本章でこれまで用いたデジタルカメラを法面の前方真正面、法面の法線上、地表面からの距離約1mの位置にレンズが位置するように、三脚に固定して実施した。撮影は、2022年6月2日から2023年1月20日まで、概ね月に1回程度の頻度で行った。撮影時刻は、3.4.2項に示した照度を確保するために、13時から16時の間で行うようにし、遠隔シャッター機能を用いて撮影した。

植被率の計測条件として、ここでは $ExG \geq 0.1$ となる画素を植生域と定義し、式(3-4)により植被率を算出した。ただし、 $R=G=B=0$ となる画素については $ExG=0$ として処理した。

図3-45に、調査対象法面のAの位置 (写真3-5) における解析結果の例を示す。また、図3-46～図3-51に、調査対象



写真3-6 調査対象法面におけるデジタルカメラによる画像の撮影状況

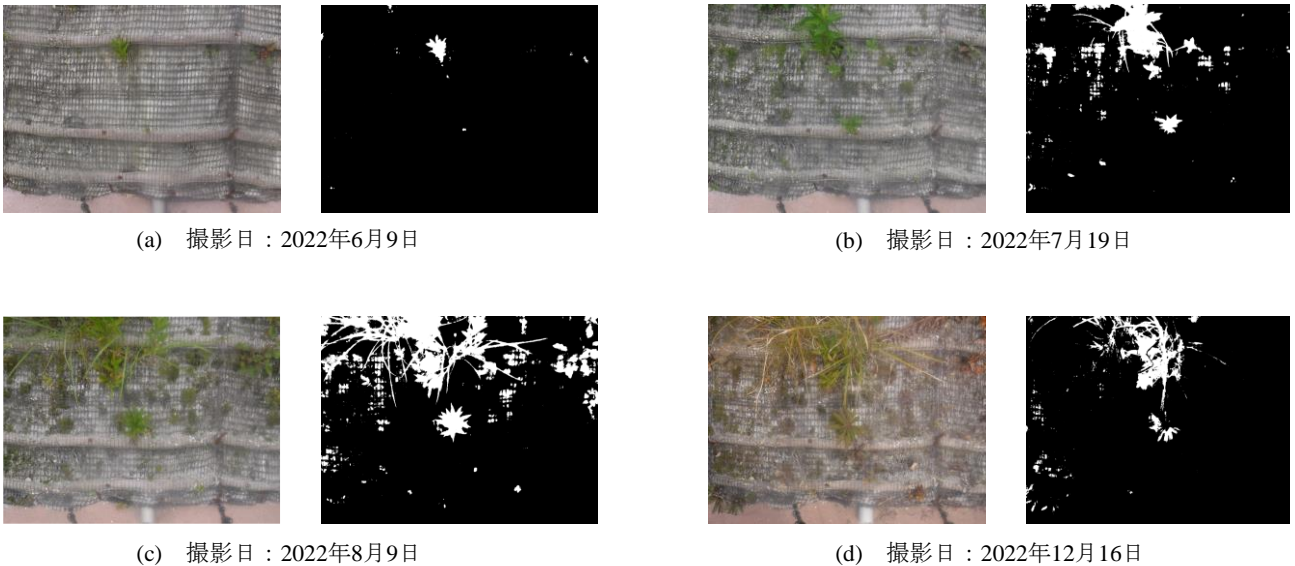


図3-45 調査対象法面の撮影位置Aにおける画像解析結果の例（二値画像の白部が植生域）

法面の各撮影位置（A～F）における植被率の計測結果の時系列変化を示す。図3-45より，春季から夏季にかけて気温が高くなるにつれ植生が成長し，冬季にかけて気温が低くなるにつれ植生が枯れていることが分かる。また，夏季の二値画像（図3-45(a), (b), (c)）を見てみると，植生域が良好に抽出できているように思われるが，冬季の二値画像（図3-45(d)）では枯れた植物体の植生域においては抽出ができていないように見える。これは，植生が枯れることで緑色の光を反射することができなくなったため，その領域における画素のExGが小さくなり，非植生域と判別されたことによると推察する。このような傾向は，撮影位置A, Fにおける植被率の時系列変化（図3-46, 図3-51）からも確認できる。ただし，図3-47～図3-50に示すように，他の撮影位置（B, C, D, E）では，植生の生育が芳しくなく，植被率の増減はあまり見られないため，今後はモニタリングを継続し，植被率の計測や法面の健全性の調査が必要であると考えられる。

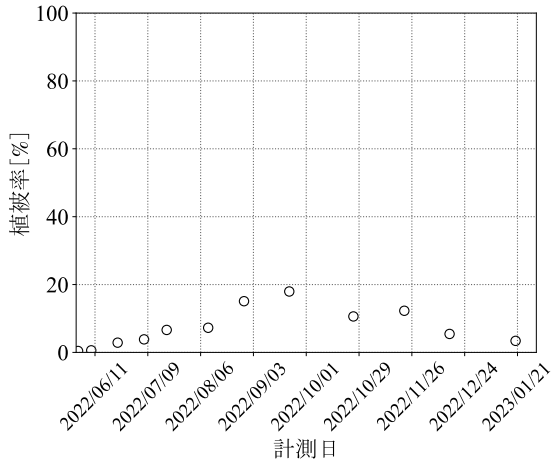


図3-46 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : A)

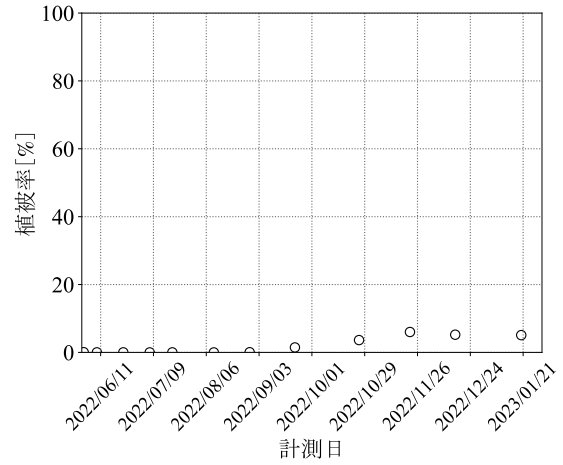


図3-47 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : B)

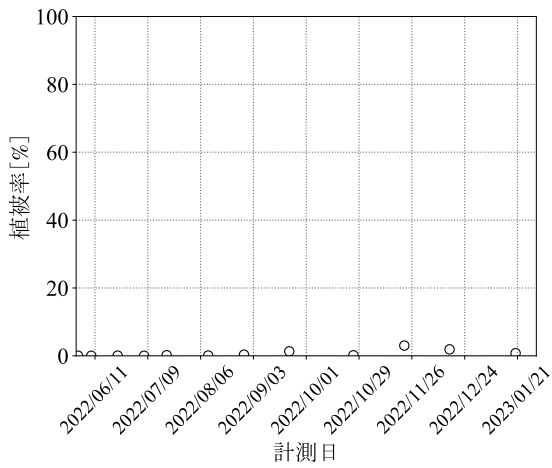


図3-48 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : C)

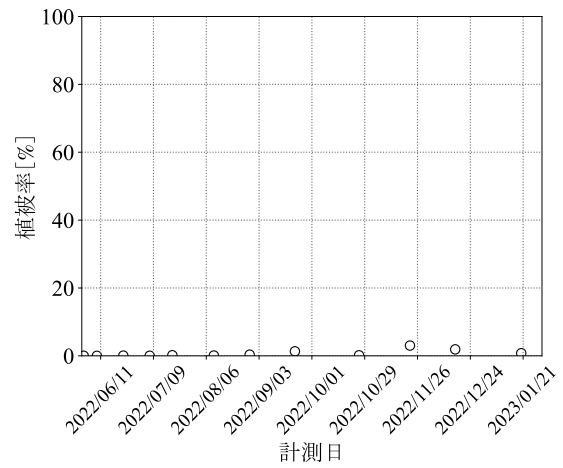


図3-49 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : D)

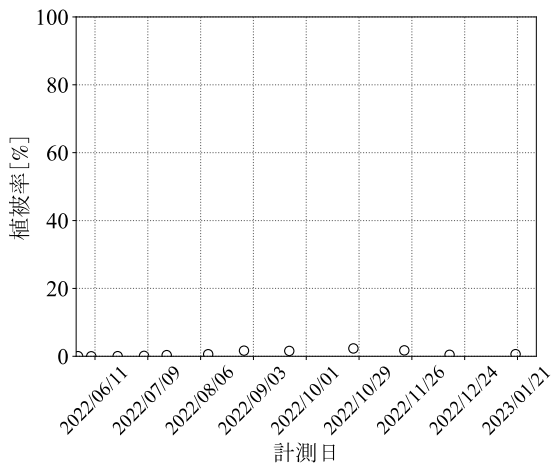


図3-50 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : E)

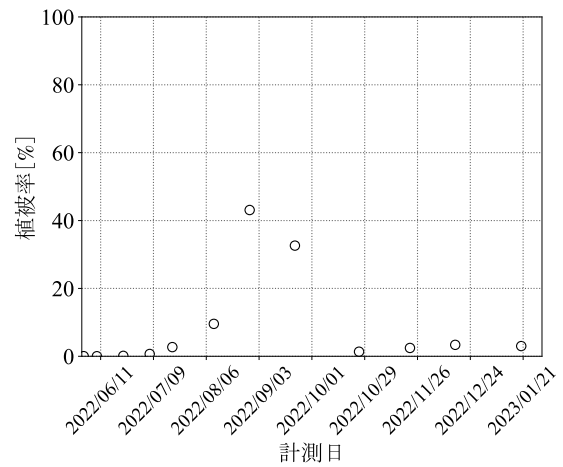


図3-51 調査対象法面における植被率の時系列変化
(撮影位置 : E)



写真3-7 UAVによる調査対象法面の空撮画像

3.5.3 UAVによる空撮画像を用いた植被率計測の実現に向けた基礎的な検討

3.5.2節では、デジタルカメラを用いて地上から撮影された画像により植被率の計測を行った。しかし、法面全体をデジタルカメラで撮影するためには、撮影方法の改善が必要である。そこで本節では、Unmanned Aerial Vehicle (UAV)による空撮画像を用いた植被率計測の実現に向けた検討を行う。本研究では、基礎的な検討として、UAVによる空撮画像から得られる植被率と、デジタルカメラを用いて地上から撮影された画像から計測される植被率を比較し、考察を行うこととした。

まず、UAVによる空撮方法について述べる。UAVはDJI社のMavicシリーズを用いて、2022年11月24日に撮影を実施した。撮影は、調査対象法面全体が写るように実施した。写真3-7に、その空撮画像を示す。次に、写真3-7から、写真3-5における撮影位置Aの画像をトリミングして取得した。このとき、デジタルカメラで撮影される画角となるべく同じになるようにした。そして、UAVによる空撮画像から得られる植被率と、デジタルカメラで地上から撮影された植被率比較した。なお、デジタルカメラによる撮影は、2022年11月22日に実施した。また、植被率を計測するための画像解析条件は3.5.2節と同様である。

植被率の解析結果は、UAVによる空撮画像では4.95%、デジタルカメラによる画像では12.27%となった。このように植被率が一致しなかった理由として、撮影対象までの距離や画像の解像度、機器の違い等が考えられる。従って、今後UAVによる効率的な植被率の計測を実現するためには、様々な検討が必要であると考えられる。例えば、3.2節で実施したような撮影機器の設定方法に関する検討、様々な飛行方法（高度、速度等）や撮影環境条件（風、気温、天気等）下での空撮、及び植被率の計測、3.4節で実施したような植被率のばらつき等の検討等が必要であると考えられる。

3.6 本章のまとめ

可視光画像から得られる植生指数を利用して法面の植被率を計測し、草地型播種工の成績判定や法面の植生の維持管理工に導入するための基礎的検討を行った。具体的には、可視光画像解析による植被率の計測結果のばらつきを抑えるための機器設定の検討と、光源条件の違いが植被率の計測結果に与える影響について定量的に明らかにし、本研究で採用する植生指数を決定した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 計測される植被率のばらつきを抑えるための機器設定を検討した。その結果、プログラムAEが採用されている機器の場合、ISO感度を最小にし、ホワイトバランスをプリセットモードに固定することが望ましいと考えられた。このような機器設定の下、光源の変化を抑えた撮影環境であれば、標準偏差は最大でも±2.58%程度で植被率の計測が可能であることが確認された。
- (2) 可視光画像から得られる複数の植生指数 (ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVI) の内、植被率の計測結果のばらつきを最も小さくする植生指数を明らかにするために、室内光源下、及び自然光源下で撮影された可視光画像から計測される植被率を比較し、そのばらつきの大きさを95%予測区間により定量的に示した。その結果、ExGでは他の植生指数に比べ、TB, WCともにばらつきを抑えられると考えられた (95%予測区間幅は8~10%程度) ため、本研究では植被率を客観的に計測するためにExGを採用することとした。
- (3) ExGにより計測される植被率は、画像の撮影時間によって過大/過小評価される可能性が考えられた。また、天気が変わらない同日中においては、照度が89.04lx以上であれば、標準偏差±1.79%程度で植被率の計測が可能であることが確認された。

本章に関する今後の課題としては、更なるデータの蓄積や、様々な植生種、土質について、同様の解析手法が適用可能であるか、検討することが挙げられる。また、本研究では扱わなかった植生指数 (表3-1やその他の調査⁵⁶⁾⁷⁴⁾に関する検討を行い、それらによる植被率の計測結果のばらつきについて、同様に検討する必要があると考えられる。さらに、本研究では二値画像を取得するための閾値に固定値を採用したが、より客観的な植被率の計測のためには更なる工夫が必要であると考えられる。そのためには、閾値を自動的に求める手法の導入、具体的にはOtsu⁵⁸⁾の二値手法や、K-means法を用いた二値分離の適用⁷⁵⁾が考えられる。ただしそれらを適切に用いるためには、先述したように、植生指数の頻度分布が二峰性を持つか、事前に確認できるようなアルゴリズム⁷⁶⁾が必要であると考えられる。

また、UAVによる効率的な植被率の計測を実現するためには、UAVを用いた場合における撮影機器の設定方法に関する検討、様々な飛行方法 (高度, 速度等) や撮影環境条件 (風, 気温, 天気等) 下での空撮、及び植被率の計測、植被率のばらつきの検討等が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 1) Tehrany, M., S., Kumar, L., Drielsma, M., J.: Review of native vegetation condition assessment concepts, methods and future trends, *Journal of Nature Conservation*, Vol.40, pp.12-23, 2017.
- 2) Huete, A., Justice, C., van Leeuwen, W.: Modis vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document version 3, 120p., 1999.
- 3) Rosle, R., Che'Ya, N., N., Ang, Y., Rahmat, F., Wayayok, A., Berahim, Z., Fazlil Ilahi, W., F., Ismal, M., R., Omar, M., H.: Weed detection in rice fields using remote sensing technique: A review, *Applied Science*, Vol.11, No.22, 10701, 2021.
- 4) 濱侃, 田中圭, 望月篤, 新井弘幸, 平田俊之, 八幡竜也, 鶴岡康夫, 近藤昭彦: UAVリモートセンシングおよび日射量を用いた水稻の草丈と収量の推定, *水文・水資源学会誌*, Vol.31, No.2, pp.68-82, 2018.
- 5) Xue, J., Su, B.: Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications, *Journal of Sensors*, Vol.2017, 17p., 2017.
- 6) Hamuda, E., Glavin, M., Jones, E.: A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.125, pp.184-199, 2016.
- 7) Ashapure, A., Jung, J., Chang, A., Oh, S., Maeda, M., Landivar, J.: A comparative study of RGB and multispectral sensor-based cotton canopy cover modelling using multi-temporal UAS data, *Remote Sensing*, Vol.11, No.23, 2757, 2019.
- 8) Meyer, G., E., Hindman, T. W., Lakshmi, K.: Machine vision detection parameters for plant species identification, *Precision Agriculture and Biological Quality, Proceedings of SPIE*, Vol.3543, pp.327-335, 1998.
- 9) 大政謙次, 竹内俊郎, 木部勢至朗, 北宅善昭, 船田良 監修, 生態工学会出版企画委員会 編: 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック, アドスリー, pp.379-385, 2015.
- 10) 尾崎敬二: 小型無人航空機搭載デジタルカメラによる単一空撮可視光画像から推定する植生指標, *日本画像学会誌*, Vol.57, No.3, pp.302-307, 2018.
- 11) 会計検査院: 平成18年度決算検査報告, 入手先<<https://report.jbaudit.go.jp/org/h18/2006-h18-0320-0.htm>> (参照2023.4.12)
- 12) Ide, R., Oguma, H.: Use of digital cameras for phenological observations, *Ecological Informatics*, Vol.5, No.5, pp.339-347, 2010.
- 13) 田中圭, 近藤昭彦: 小型マルチコプターを用いた近接リモートセンシングによる水稻生育マップの作成, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.36, No.4, pp.373-387, 2016.
- 14) Gee, C., Denimal, E.: RGB image derived indicators for spatial assessment of the impact of broadleaf weeds on wheat biomass, *Remote Sensing*, Vol.12, No.18, 2982, 2020.
- 15) Pranga, J., Borra-Serrano, I., Aper, J., Sweaf, T. D., Ghesquiere, A., Quataert, P., Roldan-Ruiz, I., Janssens, I. A., Ruyschaert, G., Lootens, P.: Improving accuracy of herbage yield predictions in perennial rygrass with UAV-based structural and spectral data fusion and machine learning, *Remote Sensing*, Vol.13, No.17, 3459, 2021.
- 16) Bai, X. D., Cao, Z. G., Wang, Y. Yu, Z. H., Zhang, X. F., Li, C. N.: Crop segmentation from images by morphology modeling in the CIE L*a*b* color space, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.99, pp.21-34, 2013.
- 17) Rouse, Jr. J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering D. W.: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, pp.309-317, 1973.
- 18) Rouse, Jr., J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering D. W., Harlan, J. C.: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *NASA/GSFC Type-III Final Report*, 164p., 1974.
- 19) Carneggie, D. M., DeGloria, S., D., Colwell, R. N.: Usefulness of Landsat data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland, *Proceedings of the NASA Earth Resources Survey Symposium*, pp.19-41, 1975
- 20) Richardson, A. J., Wiegand C. L.: Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.43, No.12, pp.1541-1552, 1977.
- 21) Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., Mortensen, D. A.: Plant species identification, size, and enumeration using machine vision techniques on near-binary images, *Optics in Agriculture and Forestry, SPIE*, Vol.1834, pp.208-219, 1992.
- 22) Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., Mortensen, D. A.: Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol.38, pp.259-269, 1995.
- 23) Kataoka, T., Kaneko, T., Okamoto, H., Hata, S.: Crop growth estimation system using machine vision, *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics (AIM 2003)*, Vol.2, pp.b1079-b1083, 2003.
- 24) Tucker, C., J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.8, No.2, pp.127-150, 1979.
- 25) Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., Rundquist, D.: Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, Vol.80, No.1, pp.76-87, 2002.
- 26) Hunt, Jr. E. R., Gavigelli, M., Daughtry, C. S. T., McMurtrey III, J., Walthall, C., L.: Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status, *Precision Agriculture*, Vol.6, No.4, 2005.
- 27) Hague, T., Tillet, N. D., Wheeler H.: Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals, *Precision Agriculture*,

- Vol.7, pp.21-32, 2006.
- 28) Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L., Bareth, G.: Combining UAV-based plant height from crop crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.39, pp.79-87, 2015.
 - 29) Meyer, G. E., Neto, J. C.: Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications, *Computers and electronics in Agriculture*, Vol.63, pp.282, 293, 2008.
 - 30) Guijarro, M., Pajares, G., Riomoros, I., Herrera, P. J., Burgos-Artizzu, X. P., Ribeiro, A.: Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.75, No.1, pp.75-83, 2011.
 - 31) Guerrero, J. M., Pajares, G., Montalvo, M., Romeo, J., Guijarro, M.: Support vector machine for crop/weeds identification in maize fields, *Expert System with Applications*, Vol.39, No.12, pp.11149-11155, 2012.
 - 32) 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 乾勇二, 宗岡寿美: 植生工を模擬した砂質土からなる模型盛土斜面の降雨浸透特性, *日本緑化工学会誌*, Vol.47, No.1, pp.51-56, 2021.
 - 33) 白鳥則郎 監修, 大町真一郎, 陳謙, 大町方子, 宮田高道, 長谷川為春, 早川吉彦, 加瀬澤正, 塩入諭: 未来へつなぐデジタルシリーズ28 画像処理, 共立出版, p.14, 2014.
 - 34) 井谷雅司, 佐藤嘉昭, 谷瀬敦: 画像解析による河川堤防の植被率判定手法の基礎的検討-NDVIによる植被率判定手法の提案-, *土木学会北海道支部平成30年度論文報告集*, Vol.75, G-01, 2019.
 - 35) 金宗煥: オンサイト・リモートセンシングの実利用に関する研究, 長崎大学博士論文, pp.66-99, 2009.
 - 36) 板川暢, 藤崎勝利, 山口毅志, 高山晴夫, 阿子島学, 野口泰謙, 土屋賢太郎, 原科幸爾, 山田晋: 土木工事におけるのり面緑化工の品質管理の高度化-UAV空撮画像を用いたのり面緑化成績の定量評価の試行-, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-83, 2022.
 - 37) 新田壮馬, 矢部和弘, 今富裕樹, 江口文陽, 徳永冠哉: 微細藻類を用いたのり面保護工の機能評価, *森林利用学会誌*, Vol.35, No.2, pp.97-101, 2020.
 - 38) 初磊, 石川芳治, 白木克繁, 若原妙子, 内山佳実: 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における林床合計被覆率と土壤侵食量の関係, *日本森林学会誌*, Vol.95, No.5, pp.261-268, 2010.
 - 39) Bold, K. C., Wood, F., Edwards, P. J., Williard, K. W. J., Schoonover, J. E.: Using photographic image analysis to assess ground cover: a case study of forest road cutbanks, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.163, pp.685-698, 2010.
 - 40) Yu, Z., Cao, Z., Wu, X., Bai, X., Qin, Y., Zhou, W., Xiao, Y., Zhang, X., Xue, H.: Automatic image-based detection technology for two critical growth stages of maize: Emergence and three-leaf stage, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.174-175, pp.63-84, 2013.
 - 41) Torezz-Sanchez, J., Pena, J. M., de Castro, A., I., Lopez-Granados, F.: Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.103, pp.104-113, 2014.
 - 42) 神崎洋治, 西井美鷹: 体系的に学ぶデジタルカメラのしくみ 第4版, 日経BP社, 415p., 2017.
 - 43) Lee, K. J., Lee, B.W.: Estimating canopy cover from color digital camera image of rice field, *Journal of Crop Science and Biotechnology*, Vol.14, No.2, pp.151-155, 2011.
 - 44) Molada-Tebar, A., Marques-Mateu, A., Lerma, J., L.: Correct use of color for cultural heritage documentation, *The International Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.IV-2/W6, pp.107-113, 2019.
 - 45) 国土交通省: デジタル写真管理情報基準, 8p., 2020.
 - 46) 富士フィルム株式会社: DIGITAL CAMERA FINEPIX XP130シリーズ使用説明書/ソフトウェア取扱ガイド, 155p., 2018.
 - 47) 富士フィルム株式会社: DIGITAL CAMERA FINEPIX XP140シリーズ使用説明書, 158p., 2019.
 - 48) キヤノン株式会社: Power Shot D30カメラユーザーガイド, 153p., 2014.
 - 49) Nikon Corporation: Digital Camera COOLPIX AW120 Reference Manual, Technical Notes and Index, 34p., 2014.
 - 50) 角博文, 奈良部忠邦, 齊藤信一郎: CMOSイメージセンサの高画質化, *電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review*, Vol.3, No.3, pp.44-51, 2010.
 - 51) 河田一規: 図解デジタルカメラの仕組み, 朝日新聞出版, p.16, 2014.
 - 52) Richardson A. D., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Jenkins, J. P., Ollinger, S. V.: Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology, *Ecological Applications*, No.19, Vol.6, pp.1417-1428, 2009.
 - 53) 気象庁: 鹿児島気象台各種データ・資料, 入手先<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=88&block_no=47827&year=&month=&day=&view=> (参照 2023.4.13)
 - 54) 国立天文台: 鹿児島(鹿児島県)のこよみ, 入手先<<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/dni47.html>> (参照 2023.4.13)
 - 55) 公益社団法人日本道路協会: 道路土工切土・斜面安定工指針(平成21年度版), 丸善出版, pp.191-275, 2009.
 - 56) 国土交通省九州地方整備局: しらす地帯の河川・道路土工指針(案), p.共-参1-36, 2017.

- 57) 松縄正登：フォトコラージュと知的財産法制-フォトコラージュの課題と展望-, 日本感性工学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.1035-1044, 2009.
- 58) Otsu, N.: A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.9, No.1, pp.62-66, 1979.
- 59) Behnamian, A., Banks, S., White, L., Brisco, B., Millard, K., Pasher, J., Chen, Z., Duffe, J., Bougreau-Chavez, L., Battaglia, M.: Semi-automated surface water detection with synthetic aperture radar data: a wetland case study, Remote Sensing, Vol.9, No.12, 1209, 2017.
- 60) Kutugata, M., Hu, C., Sapkota, B., Bagavathiannan, B.: Seed rain potential in late-season weed escapes can be estimated using remote sensing, Weed Science, Vol.69, No.6, pp.653-659, 2021.
- 61) Li, Z., Ding, J., Zhang, H., Feng, Y.: Classifying individual shrub species in UAV images – a case study of the Gobi region of Northwest China, Vol.13, No.24, 2021.
- 62) 平井有三：はじめてのパターン認識, 森北出版, pp.30-31, 2012.
- 63) 日本緑化学会 編：緑化技術用語事典, 山海堂, p.101, 1990.
- 64) タキイ種苗株式会社：ティフブレア 栽培地帯と播種適期・播種量, 入手先<<https://www.takii.co.jp/green/recommend/tif03.html>> (参照 2023.5.15)
- 65) 清水啓太, 山田正, 山田朋人：確立限界法検定に基づく信頼区間・予測区間を導入した水文頻度解析手法および当該区間の構成プログラムの提案, 中央大学理工学研究所論文集, Vol.25, pp.21-40, 2019.
- 66) 永田靖：入門 統計解析法, 日科技連出版社, 276p., 1992.
- 67) 須藤賢司, 井出保行, 林治雄, 小田日出夫：分光反射特性の利用による草地の現存量推定と植生判別の可能性, 草地試験場報告書, Vol.46, pp.49-60, 1992.
- 68) 加藤俊二：ポピュラーサイエンス 身の回りの光と色, 裳華房, p.31, 1993.
- 69) 中村重虎, 是枝賢一, 宮路広：学校教室内の昼光照度測定に関する研究 (第1報) -小, 中学校教室について-, 鹿児島大学教育学部研究紀要 自然科学編, Vol.13, pp.37-53, 1961.
- 70) スネデカー, コ克蘭 著, 畑村又好, 奥野忠一, 津村善郎 訳：統計的方法 原書第6版, 岩波書店, pp.394-410, 1972.
- 71) Upendar, K., Agrawal, K., N., Chandel, N., S., Singh, K.: Greenness identification using visible spectral colour indices for site specific weed management, Plant Physiology Reports, Vol.26, No.1, pp.179-187, 2021.
- 72) 日本国内閣官房：保全状況報告書 明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業 (日本) (ID : 1484), pp.329-342, 2022.
- 73) 宇次原雅之, 深川良一, 山田守, 堀江直樹, 梶間義弘, 長谷部聖志：重要文化財周辺斜面における斜面災害復旧対策, 歴史都市防災論文集, Vol.10, pp.39-46, 2016.
- 74) Wang, A., Zhang, W., Wei, X.: A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.158, pp.226-240, 2019.
- 75) Santos, J. F. B., Dias Junior, J., D., Backes, A., R., Escarpinati, M., C.: Segmentation of agricultural images using vegetation indices, Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision. Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2021), Vol.4, pp.506-511, 2021.
- 76) Coy, A., Rankine, D., Taylor, M., Nielsen, D., C., Cohen, J.: Increasing the accuracy and automation of fractional vegetation cover estimation from digital photographs, Remote Sensing, Vol.8, No7, 474, 2016.

第4章 室内侵食実験による植生の法面保護効果に関する検討

4.1 本章の背景と目的

一般に、植生が斜面の安定化に寄与する機能は大きく3つに分けて考えることができる。即ち、①機械的、もしくは根による補強、②水文学的補強、③遮蔽機能の3点であり、これらの機能は、植生の根と、茎/葉の両者により発揮される。各機能の例として、①では土に対する引張強度の動員^{例えは1)2)3)4)5)}、②では蒸散による土中の水の排除^{例えは6)}、③では土の侵食を抑制する効果^{例えは7)8)9)10)11)}が挙げられる¹²⁾。これらの植生の機能の内、本研究では③の機能により得られる植生の侵食抑制に着目する。

植生が法面（自然斜面）の侵食を抑制する効果（以下、法面保護効果）は、落葉層による効果も含めて、以下の5つに大別されると言われている¹⁷⁾。即ち、i) 雨滴に対しては植生地上部や落葉層によるエネルギー減殺機能、ii) 地表流の流速に対しては茎や落葉層による流速減殺機能、iii) 地表流の流量に対しては土壌の浸透能改善による流量減少機能、iv) 地表流の掃流力に対しては根系による土粒子緊縛機能、v) 凍上融解侵食に対しては落葉層による保温機能の5つであり、これらが複雑に絡み合うことで、植生の法面保護効果が発揮されると考えられている。このような植生の法面保護効果は、植被率で間接的に説明できることが広く知られている¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾。

表4-1に、植被率と侵食量の関係を実験式として示した既往研究例を示す。表4-1より、各既往研究において、植被率（林床合計被覆率）が大きくなるほど侵食量が減少するような傾向が確認されていることが分かる。ただし、植被率の計測手法に着目すると、その詳細が示されていない場合¹³⁾¹⁴⁾が見られる。画像解析を利用して植被率を計測した例¹⁵⁾¹⁶⁾も見られるが、表3-2にも示したように、画像解析ソフトを用いていることから解析アルゴリズムは不透明であり、解析ソフトによって結果が異なる可能性が考えられる。従って、より客観的な植被率の計測手法を用いた植

表4-1 植被率と侵食量の関係を調査した既往研究例

文献	調査対象	手法	植被率と侵食量*の関係を示す実験式	植被率の計測手法
Quinton et al. ¹³⁾	放棄された農地	降雨装置を用いた実験	$E = 104.52e^{-0.038PVC}$	記載無し。
Snelder et al. ¹⁴⁾	放牧地	降雨装置による実験	$E = e^{(2.35-0.03PVC)}$ $E = e^{(3.53-0.03PVC)}$	記載無し。
初ら ¹⁵⁾	自然斜面	3年間のモニタリング	$E = 65e^{(-0.0615F)}$	画像解析ソフト (Photoshop) の「自動選択」ツールにより任意の植生の色調を取得。同色調の画素を植生域と定義して二値化。
岩崎ら ¹⁶⁾	供試体	降雨装置による実験	$E = -0.53PVC + 36.74$	画像解析ソフト (ImageJ) の Color Threshold ツールを用いて、供試体の画像を植生/非植生に二値化。

E : 侵食量, PVC : 植被率[%], F : 林床合計被覆率 (=林床植生による被覆とリターの被覆の和を植生域とした地表面の被覆割合)。

*各既往研究における侵食量の定義は、それぞれの文献を参照されたい。

生の法面保護効果の検討が必要であると考えられる。また、地表流による法面侵食を想定した研究例は見られない。

そこで本章では、第3章で示した可視光画像解析技術により計測された植被率が、地表流に対する植生の法面保護効果の説明に寄与するか明らかにすることを目的に、2つの条件の土試料（繰り返し使用/非繰り返し使用）において、模型法面を用いた室内侵食実験を実施した。

4.2 土試料を繰り返し使用した場合の実験

4.2.1 供試体の作製条件

本研究で用いる模型法面（詳細は4.2.3項に後述）に、実験毎に実験毎に供試体を交換して設置可能とするために、プラスチック製の育苗箱（6型、アップルウェア株式会社、外寸：縦26.5cm×横18.3cm×深さ7.7cm、内寸：縦（天端）24.8cm×横（天端）16.8cm×深さ7.0cm、容積2,200cm³）を用意した。育苗箱の底面には孔があるため、土試料が抜け落ちることを防ぐために、育苗箱用透水紙（育苗箱用敷紙、株式会社シンセイ）を敷き、土試料の締固めを行うこととした。土試料として、串良川の堤体で採取されたしらす混じりの土（土粒子密度 $\rho_s=2.48\text{Mg/m}^3$ 、以下、串良川堤体土）²¹⁾を用意した。串良川堤体土の粒径加積曲線を図4-1に、締固め

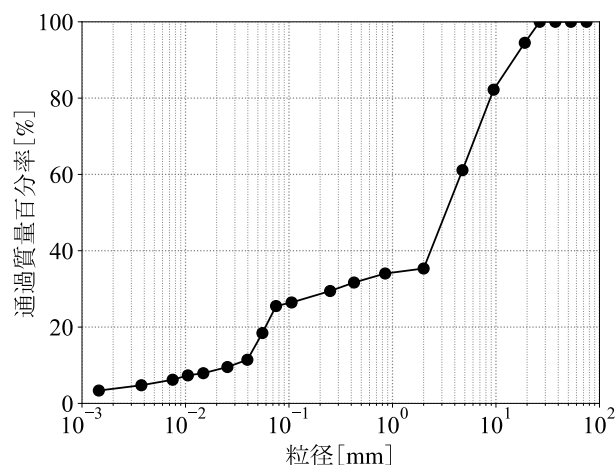


図4-1 串良川堤体土の粒径加積曲線²¹⁾

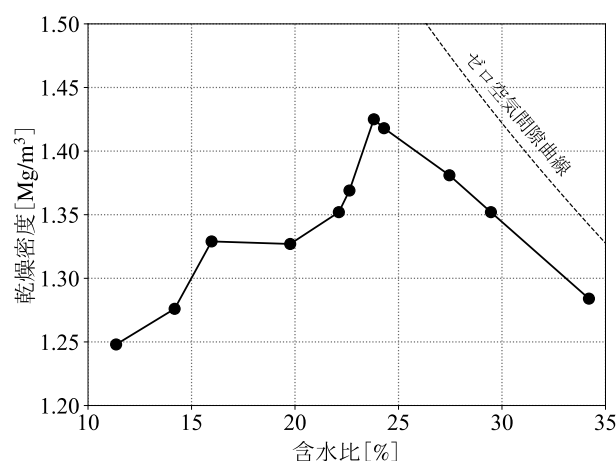


図4-2 串良川堤体土の締固め曲線²¹⁾に加筆

曲線を図4-2に示す。図4-1より、串良川堤体土は、細粒分含有率が25.5%程度であり、工学的分類は砂まじり火山灰質礫 (GV-S) であることが分かる。供試体の作製条件は、しらす道路盛土での締固め度は85~90%以上と規定される²²⁾ことから、締固め度90%を目安に、間隙比を0.93、含水比を最適含水比である23.8%とし、5層に分けて締め固めた。ただし、供試体を締め固める際に、図4-3に示すように、4層目と5層目の間に植生の種子を1.5cm間隔で格子状に手播きした。なお、本実験で用いた植生種は、第3章で用いた植生と同様に、イネ科のセンチピードグラスのティフブレア種（以下、TB）と、マメ科のホワイトクローバー（以下、WB）とした。植生の育成期間は、8、14、21、28、42、56日間とし、実験の当日まで室内のLEDライト（昼白色：LDA7D-GE17-G4105-2P、朝日電器株式会社、LDA6D-G-E17IH22、株式会社オーム電機、紫色：APL-75RBUI-40W、FUZHOU TDRFORCE TECHNOLOGY CO., LTD）下に設置し、散水、施肥を行い、植生を育成した（写真4-1）。このとき、TBは昼白色LEDライト下で育成した（写真4-2）が、WBは昼白色LEDライト下では生育が不良であったことから、植生の育成に好ましいとされる赤、青色波長の光²³⁾を照射可能な紫色LEDライト（写真4-3）を下で育成した。散水は、供試体の表面をできるだけ乱さないように、噴霧状にした水を与えることにより実施した。散水頻度と量は、実験の前日まで毎日、それぞれの供試体に10時頃と18時頃に約100mlずつ与えることとした。ただし、実験の前日においては、これらの散水に加え、実験の約24時間前に水を与えた後、実験開始まで自然乾燥させた。また、施肥頻度と量は、供試体作成日から起算して一週毎に、約28mlの化成肥料（窒素 (N) :リン (P) :カリウム (K)

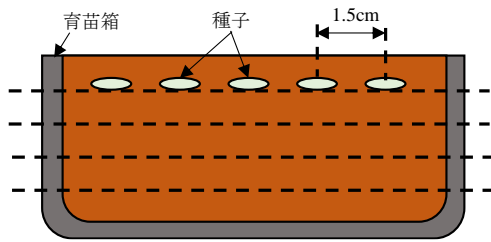


図4-3 供試体の断面のイメージ

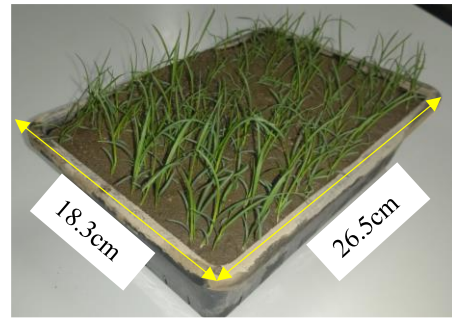


写真4-1 供試体作製の例（植生：TB）



写真4-2 昼白色LEDライト下におけるTBの育成状況



写真4-3 紫色LEDライト下におけるWCの育成状況

=1:2:1, エードそのまま液15号, 住友化学園芸株式会社) を与えることとした。ただし, 施肥日が実験日と重なる場合には, 施肥は実施しないこととした。

併せて, 植生の法面保護効果を定量的に議論するために, 種子を播種しない裸地供試体を, 種子を播種した供試体 (以下, 植生供試体) と同様の条件で作製し, 散水, 施肥, 光源についても同様の条件の下, 養生した。なお, 裸地供試体の養生期間については, 植生供試体の育成期間に対応させた (以下, 養生期間も育成期間と記す)。表4-2に, それぞれの供試体種の個数を示す。

表4-2 各供試体種の個数 (串良川堤体土)

	育成期間[日]					
	8	14	21	28	42	56
TB	5	3	5	4	3	7
WC	5	2	4	5	3	6
裸地	6	5	5	6	5	5

4.2.2 可視光画像解析による植被率の計測

各植生供試体の可視光画像 (以下, 画像) の撮影は, 各供試体の実験日において, 侵食実験を行う前に, 3.3節と同様の条件で実施した。即ち, 表3-5の設定に固定したデジタルカメラ (FinePix XP130, 富士フィルム株式会社) を用いて, 室内のLEDライト (LEEM-40523N-01, 東芝ライテック株式会社) 下で植生供試体の撮影を行った。その他の条件については, 3.3節を参照されたい。

植被率の計測は, 植生指数ExGを用いて, 第3章と同様の条件で行った。即ち, 表3-1に示すExGの定義式を用いて, 式(3-4)により植被率を算出した。このとき, TBで $ExG \geq 0.10$, WCで $ExG \geq 0.19$ となる画素を植生域と定義した。ただし, $R=G=B=0$ となる画素では $ExG=0$ として処理した。その他の詳細は, 第3章を参照されたい。

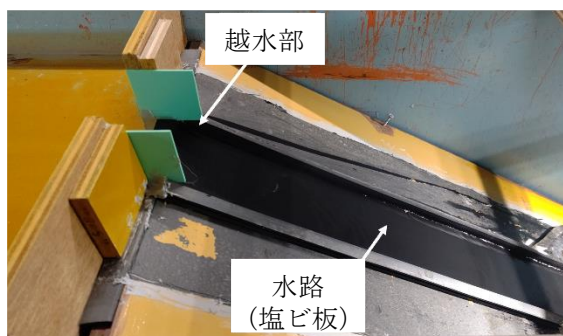


写真4-4 模型法面の越水部

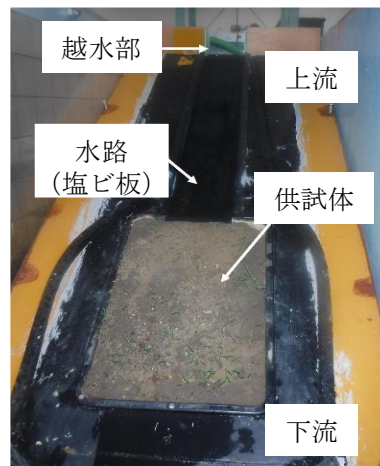
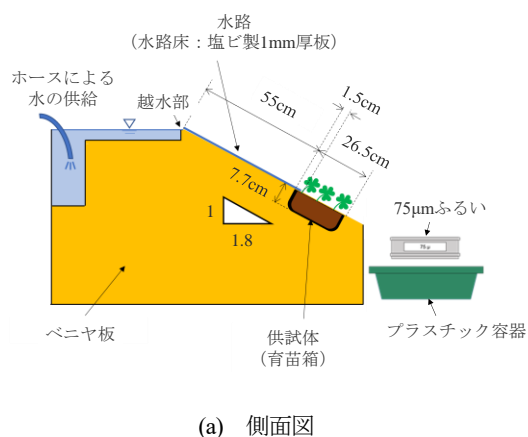
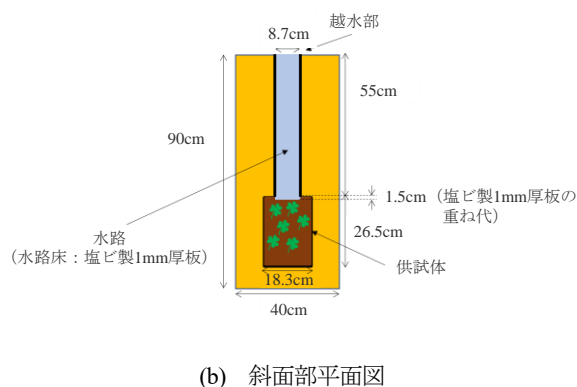


写真4-5 模型法面の斜面部と供試体設置状況



(a) 側面図



(b) 斜面部平面図

図4-4 模型法面の概略図

4.2.3 模型法面を用いた侵食実験の方法

侵食実験は、排水溝から越流する地表流を想定し、写真4-4、写真4-5、図4-4に示す模型法面を用いて実施した。斜面部の傾斜はしらす道路盛土の標準勾配である1:1.8²²⁾とし、水路の下流には供試体を設置するための開口部を設け、供試体の地表面と水路底部が同じ高さとなるようにした。また、供試体上流部の際部で局所的な洗堀が発生することを防ぐために、水路床に1mm厚の低発砲塩ビ樹脂製の板 (FOREX, アクリサンデー株式会社) を、供試体に1.5cm重ねるように設置した。供試体上に流れる流水は、水路上流の水槽部にホースで水を供給し、水槽の水位を一定に保ちながら越水させることにより発生させた。供試体上に流れる流水は、水路上流の水槽部にホースで水を供給し、水槽の水位を一定に保ちながら越水させることにより発生させた。この時の流量は、約247ml/sであった。

次に、侵食実験の手順について述べる。まず、模型法面に供試体を設置し、整流のために水を7秒間流下させた。その後、水を1分間継続して流下させ、流出した土砂を75μmふるいで回収し、ふるいを通過した土砂はプラスチック容器に流下させた。回収した土砂は、乾燥炉によって110°Cで24時間乾燥させ、ふるいとプラスチック容器の両方から得られた乾燥質量の和を、各供試体の侵食量と定め、植被率と侵食量との関係について考察した。

なお、本節の実験に用いた土試料である串良川堤体土は、その量に限りがあったため、回収した土砂は植物体を丁寧に取り除いた後、供試体作製のために再利用した。

4.2.4 実験結果・考察

4.2.4.a 裸地供試体

まず、裸地供試体について考える。図4-5に、裸地供試体の育成期間と侵食量の関係を示す。ここで、裸地供試体における各育成期間の侵食量は、それぞれ正規分布に従いばらつくと仮定し、データに外れ値が発生しているかを確認するために、Smirnov-Grubbs検定を実施した。Smirnov-Grubbs検定とは、一群の測定値が正規分布に従うと仮定したとき、ある値が他とかけ離れた場合、それを棄却すべきかどうかを客観的に判断する手法である²⁴⁾。帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は、最大の偏差を持った値を x_n としたとき、以下の様に記述することができる。

H_0 : x_n は正規分布からかけ離れた値とは言えない。

(正規分布からの値の一つと見なす。)

H_1 : x_n は正規分布からかけ離れた値である。

(外れ値と見なす。)

その結果、育成期間56日における侵食量の一つで対立仮説 H_1 が採択され、外れ値が確認された ($p < 0.05$, 図4-5)。従って、以降はこの外れ値を除外して考えることとする。なお、本研究においては、この外れ値が発生した理由を明らかにすることはできなかった。

裸地供試体における各育成期間の侵食量の母平均に差があるかについて考える。まず、各育成期間における侵食量の母分散に違いがあるかを確認するために、Bartlett検定を行った。Bartlett検定とは、多群間の等分散性を検定する手法であり²⁴⁾、帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は以下の様に記述することができる。

H_0 : 各群の母分散は異なるとは言えない。(等しいと考える。)

H_1 : 各群の母分散のいずれかが異なる。

その結果、帰無仮説 H_0 が採択された ($p > 0.05$) ことから、裸地供試体では育成期間の違いに寄らず、侵食量の母分散は等しいと考えることとした。次に、各育成期間における侵食量について、一元配置分散分析を行った。一元配置分散分析とは、ある水準(ここでは育成期間)の違いにより多群間の母平均が有意に異なるかを検定する手法であり、各群間の母分散が等しいと考えられる場合に適用できる²⁵⁾。帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は以下の様に記述することができる。

H_0 : 各群の母平均は異なるとは言えない。(等しいと考える。)

H_1 : 各群の母平均のいずれかが異なる。

その結果、帰無仮説 H_0 が採択された ($p > 0.05$) ことから、本実験において植生を考慮しない場合、各育成期間における侵食量の母平均は等しいと考えることとした。図4-5に、外れ値以外の全ての裸地供試体の結果に対する侵食量の平均値 (657.37g) を示す。

4.2.4.b 植生供試体

次に、植生供試体の結果について述べる。図4-6に、TB、WCの両植生種における、画像解析による植被率の計測例を示す。また、図4-7には、育成期間と植被率の関係を示す。育成期間と植被率との間に有意な相関があるかを確認するために、無相関の検定を行った。無相関の検定とは、2変数(ここでは育成期間と植被率)から得られるピアソンの積率相関係数(以下、相関係数)における母相関係数が0ではないか(有意な相関があるか)を確認する手法

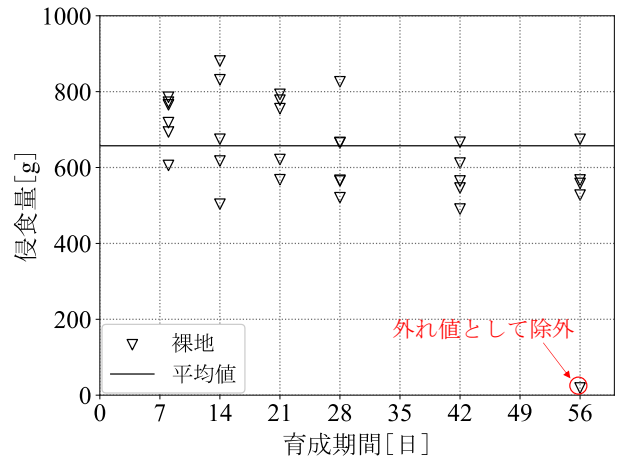


図4-5 裸地供試体における育成期間と侵食量の関係
(土試料：串良川堤体土)

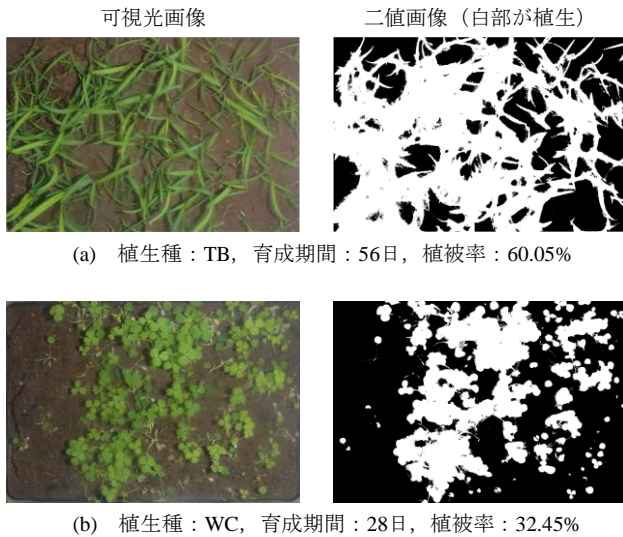


図4-6 可視光画像解析による植被率の計測結果の例
(土試料：串良川堤体土)

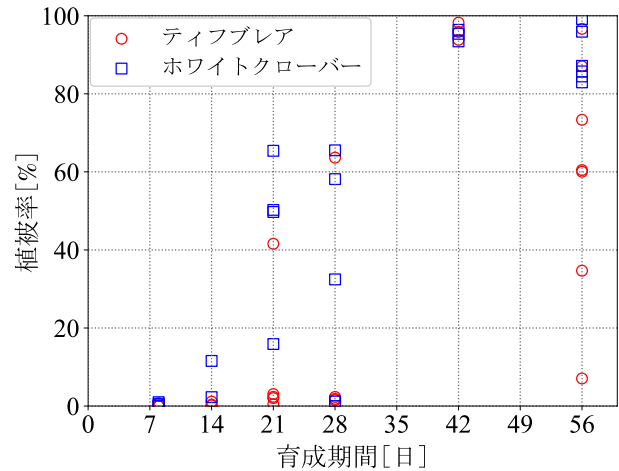


図4-7 育成期間と植被率の関係 (土試料：串良川堤体土)

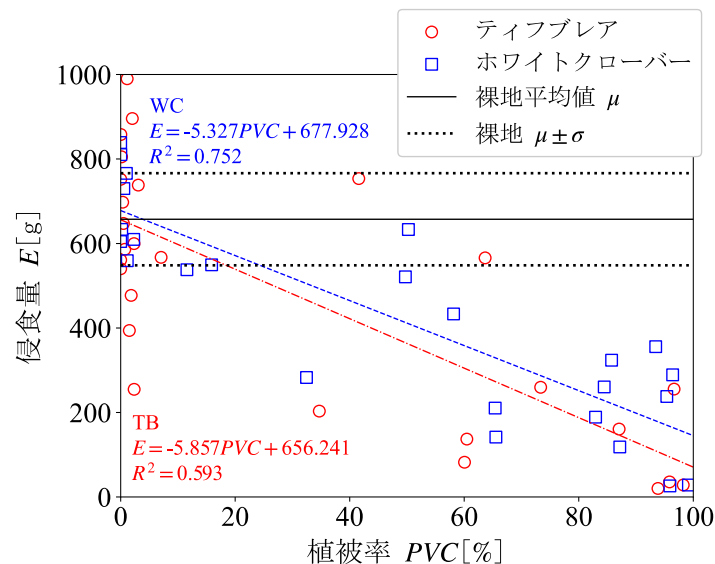


図4-8 植被率と侵食量の関係 (土試料：串良川堤体土)

である²⁵⁾。帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は以下の様に記述できる。

H_0 : 母相関係数は0ではないとは言えない。(無相関である。)

H_1 : 母相関係数は0ではない。(有意な相関がある。)

その結果、両植生種とも育成期間と植被率の間には有意な正の相関が確認された ($p < 0.01$)。これは、育成期間を経るに従い、植生が成長したためと考えられる。次に、植被率と侵食量との関係について述べる。図4-8に、植被率と侵食量の関係、裸地侵食量の平均値 μ と標準偏差の幅 $\pm\sigma$ を示す。表2-4の評価方法を参考に、成績が可となる植被率が70%以上のとき、植生供試体の侵食量は裸地供試体の侵食量の半分程度となった。一方で、成績が不可となる植被率が50%以下の場合、植生供試体の侵食量は裸地供試体の侵食量と同程度、もしくは大きくなる場合も見られた(図4-8)。次に、単回帰分析により有意な母回帰係数(回帰式の傾き)が得られているか²⁵⁾を確認する。単回帰分析における帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は、以下の様に記述できる。

H_0 : 母回帰係数は0ではないとは言えない。(有意な回帰式ではない。)

H_1 : 母回帰係数は0ではない。(有意な回帰式である。)

その結果、TB、WCの両植生種とも、植被率PVCが増加するほど侵食量Eが減少するような有意な回帰式 ($p < 0.01$) が得られたことから、第3章で提案した可視光画像解析技術は、草本植生による法面保護効果を客観的に評価できる可能性があると考えられる。植被率が大きくなるほど植生供試体の侵食量が減少する理由として、茎による水の流速減殺や、根系による土粒子の緊縛効果等¹⁷⁾により、供試体に作用する流体力が減少したためと推察する。可視光画像解析技術により計測された植被率は、このような植生の効果を間接的に説明していると考えられる。

4.2.4.c 植生の法面保護効果と土の粒径との関係

本節では、植生による法面保護効果と流出した土砂の特性との関係を把握するために、各植生供試体の流出土砂における細粒分含有率に着目した。ただし、細粒分含有率は式(4-1)により算出した。

$$Fc = \frac{M}{E} \times 100 \quad (4-1)$$

ここに、 Fc : 細粒分含有率[%], E : 各供試体の侵食量[g], M : 各供試体の侵食量の内、75 μ mふるいを通過しプラスチック容器から回収された侵食量[g]。

図4-9に、植生供試体における侵食量と流出した土砂の細粒分含有率の関係を示す。侵食量と細粒分含有率との間には、有意な負の相関(無相関の検定; 両植生種とも $p < 0.01$)が確認されたことから、侵食量が減少するほど、細粒分含有率が大きくなることが考えられた。また、図4-10には植被率と粒径区分毎の侵食量の関係を示す。図4-10の実線及び破線はそれぞれ、細粒分、粗粒分の侵食量に対する植被率による回帰式を示している。両植生種とも、細粒分では粗粒分に対比、植被率に対する侵食量の変化率は小さいことが伺える。以上から、植生の法面保護効果は主に粗粒分に対して発揮され、細粒分にはその効果が発揮されづらい可能性が考えられた。

そこで、植生の法面保護効果と流出した土の粒径との関係について、さらに考察を行う。ここで、植生の法面保護効果を検討し易くするために、式(4-2)に示す侵食量比 (Relative Soil Loss, 裸地条件におけるある侵食量に対する、植生が有る場合のある植被率における侵食量の比¹⁹⁾)を導入する。ただし、侵食量比は細粒分と粗粒分のそれぞれで算出する。

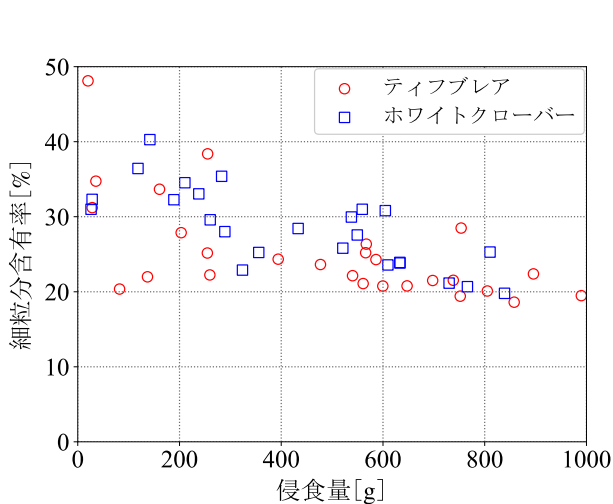


図4-9 侵食量と流出した土砂の細粒分含有率の関係

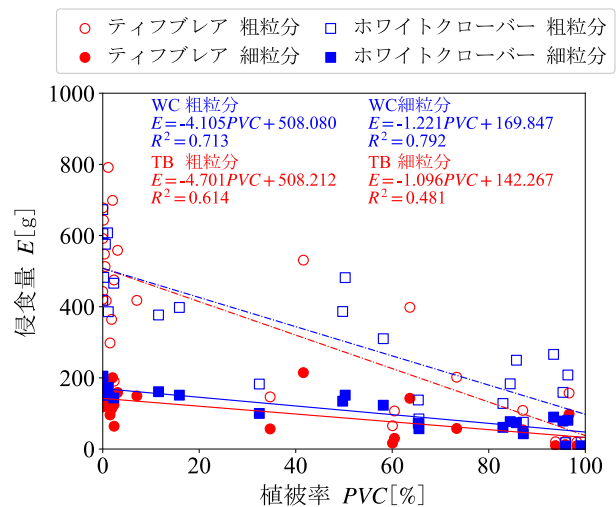


図4-10 植被率と粒径区分毎の侵食量の関係

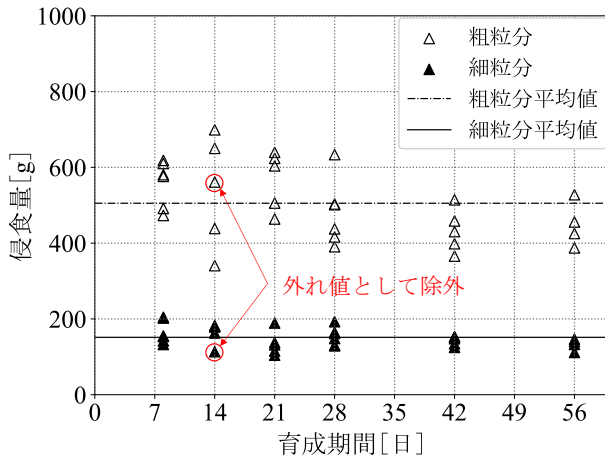


図4-11 裸地供試体における育成期間と粒径区分毎の侵食量の関係

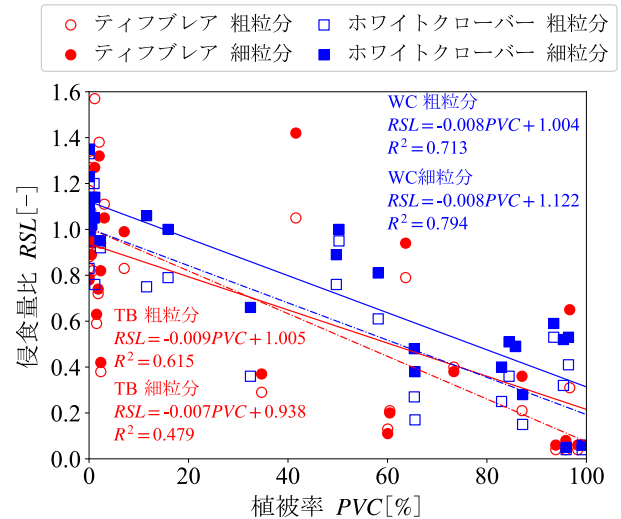


図4-12 植被率と粒径区分毎の侵食量比の関係

$$RSL = \frac{E_{Veg}}{E_{Bar}} \quad (4-2)$$

ここに、 RSL ：侵食量比[-]、 E_{Veg} ：植生供試体の侵食量[g]、 E_{Bar} ：裸地供試体の侵食量の代表値（詳細は後述）。

まず、式(4-2)における裸地供試体の侵食量の代表値 E_{Bar} を定めるための検討を行う。図4-11に、裸地供試体における育成期間と粒径区分毎の侵食量との関係を示す。ここで、裸地供試体における各育成期間の細粒分、及び粗粒分の侵食量は、それぞれ正規分布に従いばらつくことと仮定すると、育成期間14日の供試体の細粒分の侵食量の一つが外れ値と見なせた（Smirnov-Grubbs検定； $p < 0.05$ ）。よって、以降はこの供試体のデータを粗粒分と併せて除外（図4-11）して考えることとした。次に、各育成期間における粒径区分毎の侵食量の母平均に差があるか検討した結果、有意な差は認められなかった（細粒分侵食量、粗粒分侵食量とも、Bartlett検定； $p > 0.05$ 、一元配置分散分析； $p > 0.05$ ）。従って、式(4-2)における裸地供試体の侵食量の代表値 E_{Bar} には、外れ値を除外して得られたすべての供試体の平均値（図4-11）を用いることとした。

図4-12に、植被率と粒径区分毎の侵食量比との関係を示す。また、図4-12の実線及び破線はそれぞれ、細粒分、粗粒分の侵食量比に対する植被率による回帰式を示している。粒径区分によって植生の法面保護効果が異なるかを検討するために、それぞれの植生種における回帰式に対して共分散分析における平行性の検定（詳細は3.4.1項）を実施した。その結果、両植生種とも帰無仮説が採択された（ $p > 0.05$ ）ため、各植生種の細粒分と粗粒分の回帰式は平行であり、傾きは等しいと考えることとした。即ち、両植生種とも、植被率に対する粒径区分毎の侵食量比の変化率は同程度であると考えられる。よって、図4-9に示すような侵食量が減少するほど細粒分含有率が増加する関係が得られた理由として、土粒子の粒径に寄らず土粒子密度が等しいと仮定すると、粗粒分の方が細粒分に比べ土粒子一個当たりの質量が大きいことから、全体の侵食量に与える影響が著しいためであると考えられる。

4.2.4.d 土試料を繰り返し用いた影響について

一般に、しらすを繰り返し締め固めると、粒子破碎の影響を受け、締め固め特性が変化するとされている²⁶⁾²⁷⁾。そこで、繰り返し使用した後の土試料を用いて、土粒子密度試験、粒度試験、突き固め試験（A-a法）を行い、実験前のデータと比較した。

その結果を表4-3、図4-13、図4-14に示す。ただし、繰り返し使用前のデータは、図4-1、図4-2の再掲である。図4-13より、繰り返し使用した後の土試料は、繰り返し使用前に比べ、土粒子の粒径が小さくなっていることが確認できる。また、その影響により、細粒分含有率が増加していることが伺える。また、図4-14より、土試料の締め固め特性

表4-3 繰り返し前後の堤体土の物性値の比較

	繰り返し使用前	繰り返し使用后
土粒子密度[Mg/m ³]	2.48	2.54
地盤工学的分類	砂まじり火山灰質礫 (GV-S)	火山灰質砂 (SV)
最適含水比[%]	23.8	17.5
最大乾燥密度[Mg/m ³]	1.43	1.53

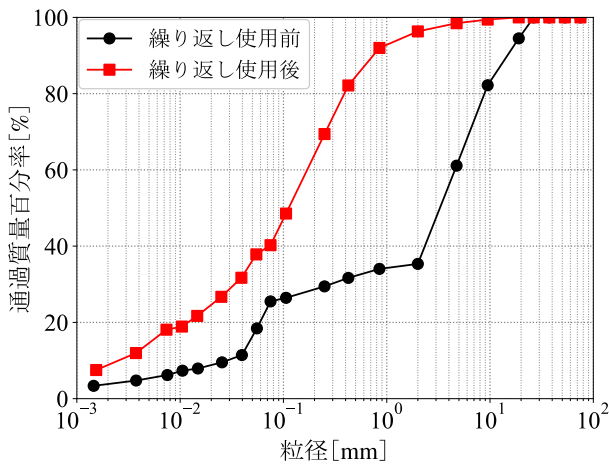


図4-13 繰り返し使用前後の粒径加積曲線の比較

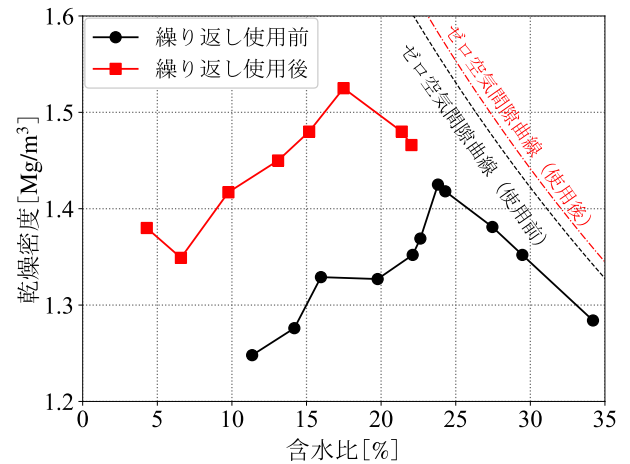


図4-14 繰り返し使用前後の締固め曲線の比較

は繰り返し使用前と繰り返し使用后で異なっていることが分かる。具体的には、供試体を作製する際の締固め条件は、繰り返し使用前の締固め曲線における最適含水比で締固め度90%を目安としていたことから、繰り返し使用後の土試料を用いて供試体を作成した際には、最適含水比よりも湿潤側の含水比であり、締固め度は90%を満たされていなかった可能性が考えられる。よって、土試料を繰り返し使用する程、供試体の締固め状態に違いが生じ、実験結果のばらつきに繋がった可能性が考えられる。そこで、次節では、土試料を繰り返さず使用し、土粒子破碎の影響を受けない実験条件で行うこととした。

4.3 土試料を繰り返さず使用した場合の実験

4.2.2節では、土試料の量に限りがあったため、土試料を繰り返し用いて供試体を作製した。従って、土粒子の粒子破碎により供試体の締固め状態に違いが生じ、実験結果に影響を与えた可能性が考えられた。そこで本節では、土試料を繰り返さず用いることで、粒子破碎の影響を受けないような実験条件の下、同様の室内侵食実験を実施した。

4.3.1 供試体の作製条件

本節においても、図4-4に示す模型法面に実験毎に供試体を交換して設置可能とするために、育苗箱(外寸:縦26.5cm×横18.3cm×高さ7.7cm, 容積2,200cm³)を用意した。土試料として、鹿児島県鹿児島市郡山町で採取された、しらす(土粒子密度2.42Mg/m³, 以下, 郡山しらす)を用いた。図4-15に、この土試料の粒径加積曲線を示す。図4-15より、郡山しらすは細粒分含有率が17.9%程度であり、工学的分類は火山灰質礫質砂 (SVG) であることが分かる。また、図4-16には、突き固め試験 (A-b法) により得られた締固め曲線を示す。一般に、しらすの締固め曲線は明瞭な最大乾燥密度 (最適含水比) を示さない場合が多い(例えば²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾。この土試料においてもそのような傾向を示しているが、最適含水比が26.3%程度、最大乾燥密度は1.23Mg/m³程度とみなされる。

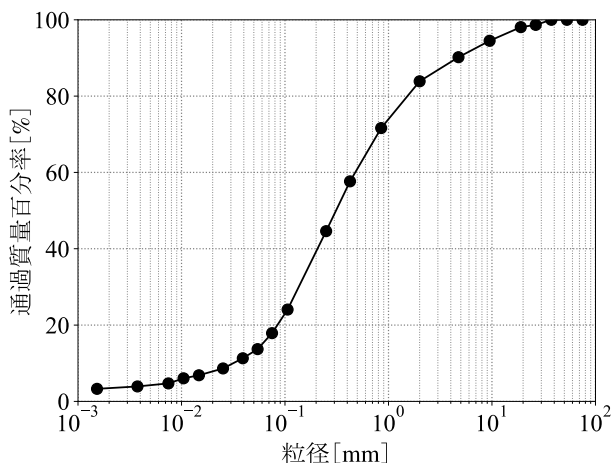


図4-15 郡山しらすの粒径加積曲線

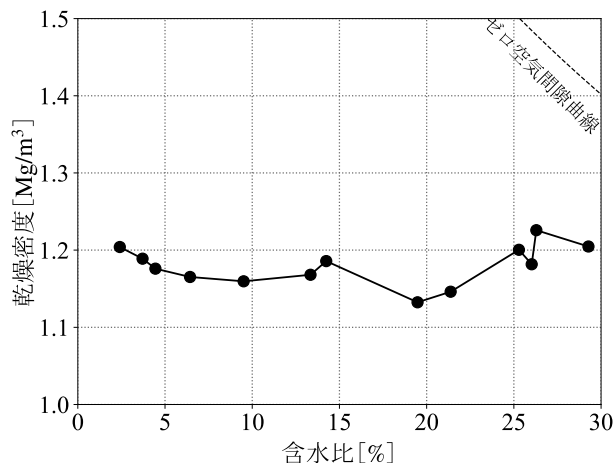


図4-16 郡山しらすの締めめ曲線

供試体の作製条件は、締めめ度90%を目安に、含水比を最適含水比である26.3%、間隙比を1.19と設定し、5層に分けて締め固めた。ただし、供試体を締め固める際に、4層目と5層目の間に、植生の種子を1.5cm間隔で格子状に手播きした。実験に用いた植生種は4.2節と同様に、TBとWCとした。植生の育成期間は8, 14, 28, 42, 56日とし、4.2.1項に示した条件と同様に植生を育成した。併せて、植生の法面保護効果を定量的に考察するために、種子を播種しない裸地供試体を、同様の条件で作製した。それぞれの供試体種の個数は、表4-4に示す通りである。

4.3.2 可視光画像解析による植被率の計測

各供試体の植被率の計測は、4.2.2項と同様の手法により行う。ただし、土試料に違いがあることから、植生域を抽出する(図3-8)ための閾値については、再度検討を行うこととした。具体的には、3.3.2項を参考に、土試料に郡山しらすを用いて、TBで育成期間を53日とした被写体(以下、TB53)を1つ、WCで育成期間を32

日とした被写体(以下、WC32)を1つ用意した。まず、TB53、WC32の画像を、3.3.1項に示す撮影条件下にて撮影し、ExGを算出した。次に、閾値を t とし、 t を-0.20から0.50まで0.01ずつ変化させ、ExGが t 以上となる画素を植生域とすることで、TB53、WC32の二値画像を作成した。併せて、各閾値 t における植生域の抽出精度を確認するために、目視により植生域/非植生域に二値化した画像も作成し、画像解析による二値分類の正確度を、3.3.2項に示す式(3-3)を用いて算出した。ただし、比較にはTB53、WC32のそれぞれの画像において、解析対象全画素数の約14% (1,250,000)画素を用い、任意の位置から抜き出すことにより実施した。

図4-17、図4-18に、TB53、WC32のそれぞれの被写体における、ExGに対する閾値 t と正確度 Acc の関係を示す。図4-17、図4-18より、それぞれの被写体における Acc が最大となる閾値は、TB53で $t=0.17$ 、WC32で $t=0.19$ となった。従って、土試料に郡山しらすを用いた供試体の植被率を計測する際、TBで $ExG \geq 0.17$ 、WCで $ExG \geq 0.19$ となる画素を植生域とすることとし、式(3-4)により植被率を算出した。ただし、 $R=G=B=0$ となる画素では $ExG=0$ として処理した。

表4-4 各供試体種の個数(郡山しらす)

	育成期間[日]				
	8	14	28	42	56
TB	2	2	3	3	2
WC	2	2	4	2	2
裸地	5	5	5	6	6

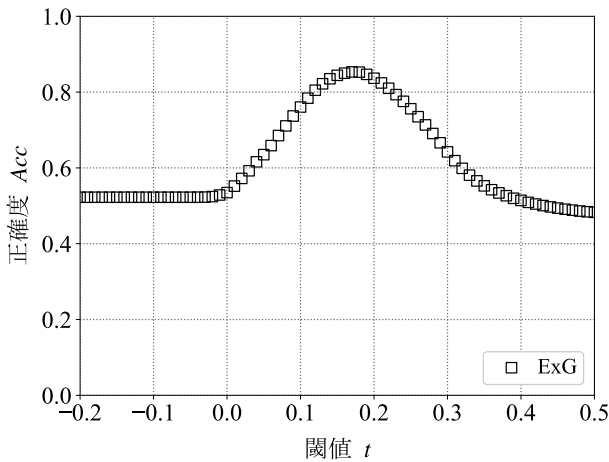


図4-17 閾値と正確度の関係 (TB53)

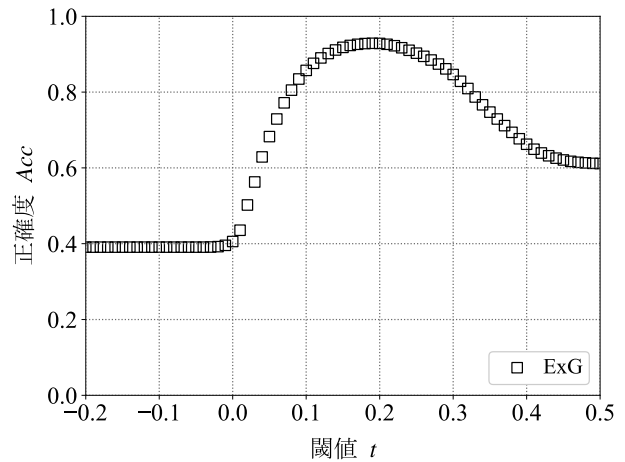


図4-18 閾値と正確度の関係 (WC32)

4.3.3 模型法面を用いた侵食実験の方法

室内侵食実験の手法は、4.2.3項に示した手法と同様である。ただし、郡山しらすの土粒子密度 (2.42Mg/m^3) は串良川堤体土の土粒子密度 (2.48Mg/m^3) に比べて小さいことを鑑み、供試体表面を流れる水の流量の目安を 32ml/s とした。この流量は、ある流域 350m^2 あたりに降雨強度 1.0mm/h の雨が降った場合に、下方の斜面に流れ込む流量を想定したものである²⁹⁾。

4.3.4 実験結果・考察

4.3.4.a 裸地供試体

図4-19に、裸地供試体の育成期間と侵食量の関係を示す。ここで、裸地供試体における各育成期間の侵食量は、それぞれ正規分布に従いばらつくことと仮定すると、育成期間14日における結果の1つに外れ値が確認された (Smirnov-Grubbs検定 ; $p < 0.01$, 図4-19) 従って、以降はこの外れ値を除外して考えることとする。なお、本研究においては、この外れ値が発生した理由を明らかにすることはできなかった。

裸地供試体における各育成期間の侵食量の母平均が、育成期間の違いによって変化するか考えるために、育成期間と侵食量との間で無相関の検定を行った。その結果、帰無仮説が採択された ($p > 0.05$) ことから、本実験において植生を考慮しない場合、各育成期間における侵食量の母平均は変化しないと考えることとした。図4-19に、外れ値以外の全ての裸地供試体の結果に対する侵食量の平均値 (392.79g) を示す。

4.3.4.b 植生供試体

まず、植被率の計測結果について述べる。図4-20に、TB、WCの両植生種における、画像解析による植被率の計測例を示す。また、図4-21には、育成期間と植被率の関係を示す。両植生種とも、育成期間と侵食量との間には、有意な正の相関 ($p < 0.01$) が確認された。これは、育成期間を経るに従い、植生が成長したためと考えられる。

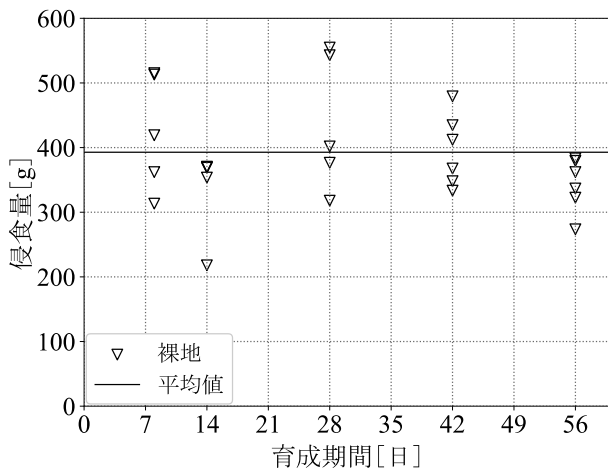
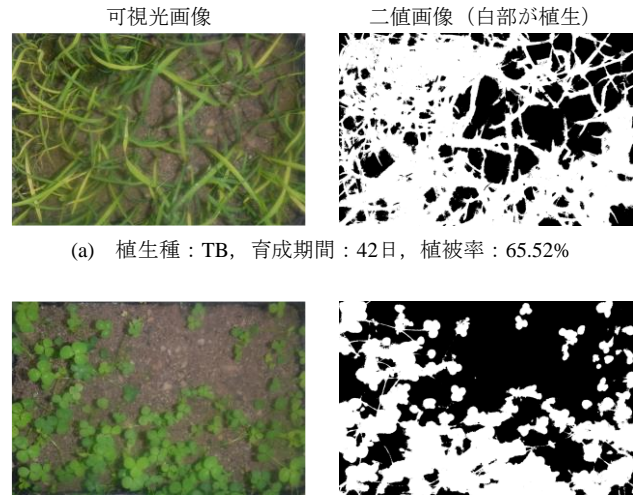


図4-19 裸地供試体における育成期間と侵食量の関係
(土試料：郡山しらす)



(a) 植生種：TB，育成期間：42日，植被率：65.52%

(b) 植生種：WC，育成期間：28日，植被率：43.14%

図4-20 可視光画像解析による植被率の計測結果の例
(土試料：郡山しらす)

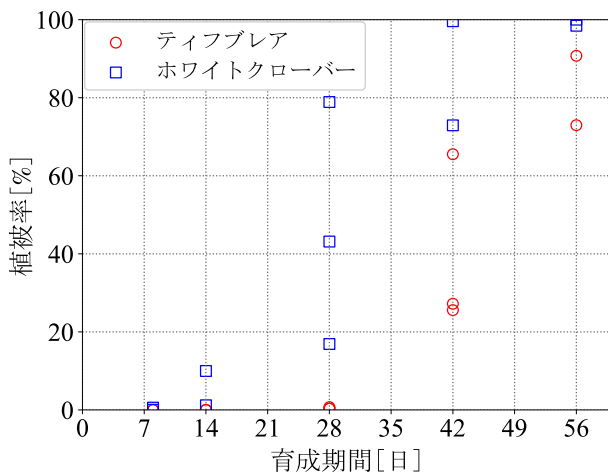


図4-21 育成期間と植被率の関係 (土試料：郡山しらす)

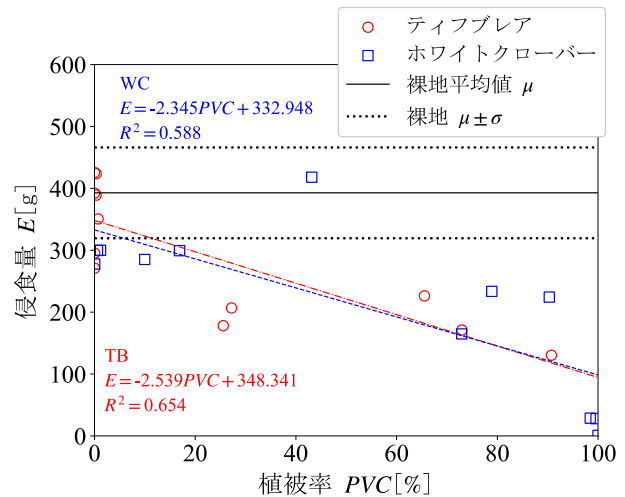


図4-22 植被率と侵食量の関係 (土試料：郡山しらす)

次に、植被率と侵食量との関係について述べる。図4-22に、植被率と侵食量の関係、及び最小二乗法により得られたそれらの回帰式、裸地供試体の侵食量の平均値 μ と標準偏差の幅 $\pm\sigma$ を示す。表2-4の評価方法を参考に、成績が可となる植被率が70%以上のとき、植生供試体の侵食量は裸地供試体の侵食量の半分程度となった。一方で、成績が不可となる植被率が50%以下の場合、植生供試体の侵食量は裸地供試体の侵食量と同程度となる場合も見られた(図4-22)。また、本節の実験においても4.2節と同様に、TB、WCの両植生種とも、植被率が増加するほど侵食量が減少するような、有意な回帰式が得られたことから、第3章で提案した可視光画像解析技術は、草本植生による法面保護効果を客観的に評価できる可能性があると考えられる。ただし、回帰式の寄与率 R^2 はTBで0.65、WCで0.59程度であり、ばらつきが目立つことから、土粒子の粒径に着目し、より詳細な検討を行うこととした。

4.3.4.c 植生の法面保護効果と土粒子の粒径との関係

4.2節では、流出した土砂の細粒分含有率に着目し、考察を行った。しかし、土試料を繰り返し用いたことから、実験結果は土粒子の破砕の影響を受けた可能性が考えられた。一方で、本節では土試料を繰り返し用いていないため、本節の実験結果は土粒子の破砕の影響を受けていないと考えられることから、植生による法面保護効果と流出

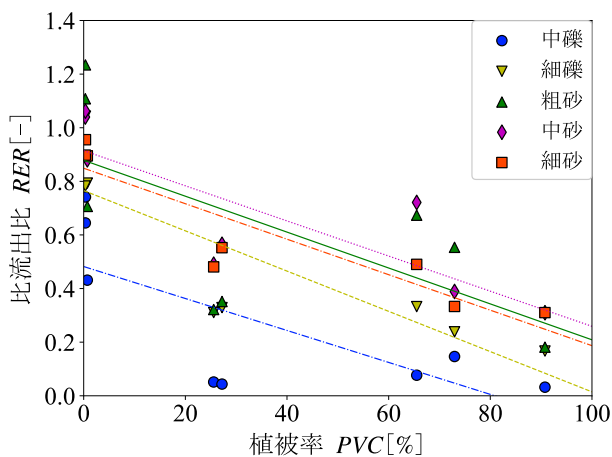


図4-23 植被率と比流出比の関係（植生種：TB）

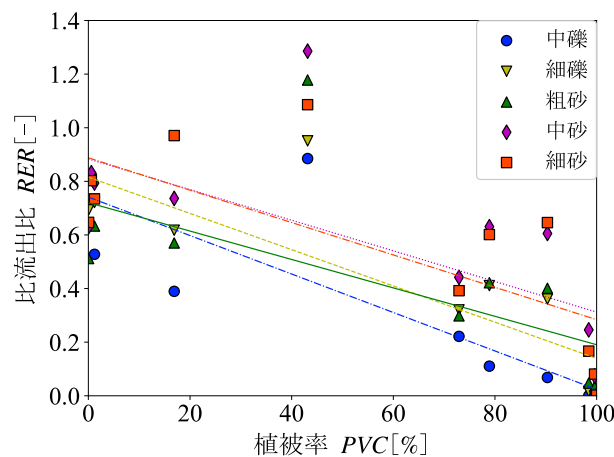


図4-24 植被率と比流出比の関係（植生種：WC）

した土砂との特性を更に詳しく把握するために、各実験における流出土砂、及び残留土砂の粒度に着目し考察を行う。ただしここでは、表4-4に示す供試体数の内、表4-5に示す供試体数のみを分析の対象とした。

まず、各供試体の流出土砂と残留土砂の粗粒分の粒度を、ふるい分析により把握した。そして、式(4-3)を用いて粒径区分（粗礫、中礫、細礫、粗砂、中砂、細砂）毎の流出比を算出した。

$$ER = \frac{E_{each}}{M_{each}} \quad (4-3)$$

ここに、 ER ：粒径区分毎の流出比[-]、 E_{each} ：粒度分布から算出した粒径区分毎の流出土砂量[g]、 M_{each} ：粒度分布から算出した粒径区分毎の残留土砂量[g]。

次に、各粒径区分の土粒子に対する植生の法面保護効果を検討するために、式(4-4)に示す比流出比を算出した。

$$RER = \frac{ER_{plant}}{ER_{bare}} \quad (4-4)$$

ここに、 RER ：粒径区分毎の比流出比[-]、 ER_{plant} ：植生供試体における粒径区分毎の流出比[-]、 $\overline{ER_{bare}}$ ：裸地供試体における粒径区分毎の流出比の平均値[-]。

図4-23、図4-24に、TB、WCの各植生種における植被率と比流出比の関係を示す。また、図4-23、図4-24中の直線は、各粒径区分の比流出比に対する植被率による回帰式を示している。ただし、裸地、植生供試体共に流出土砂中に粗礫が確認されなかったことから、粗礫については図4-23、図4-24中に示していない。その他の粒径区分では、植被率が大きくなるにつれ、比流出比が小さくなる傾向が見られることから、各粒径区分の土粒子に対して植生の法面保護効果が発揮されたと考えられる。次に、粒径区分によって植生の法面保護効果の発揮傾向が異なるかを検討するために、それぞれの植生種における回帰式（図4-23、図4-24）に対して共分散分析における平行性の検定を実施した。その結果、両植生種とも帰無仮説が採択された（ $p > 0.05$ ）ため、各粒径区分の回帰式は平行であり、傾きは等しいと考えることとした。即ち、両植生種とも、植被率に対する粒径区分毎の比流出比の変化率は同程度であり、植生の法面保護効果は土粒子の粒径区分（中礫、細礫、粗砂、中砂、細砂）に寄らず、同様に発揮されると推察される。ただし、図4-23、図4-24はそれぞれ、図4-22の結果を分析して得られているため、ばらつき

表 4-5 土粒子の粒径の考察に用いた各種供試体数

	育成期間[日]				
	8	14	28	42	56
TB	0	0	3	3	2
WC	2	1	4	2	2
裸地	2	0	5	6	6

が目立つ。従って、今後はデータ数を増やす等、詳細な検討を行う必要があると考える。

4.4 本章のまとめ

本章では、第3章で提案した、可視光画像解析と植生指数ExGを用いて計測された植被率が、草本植生による法面保護効果の説明に寄与するかを明らかにするために、模型法面を用いた室内侵食実験を実施した。以下に、本章で得られた知見を示す。

- (1) 土試料を繰り返し用いた場合（4.2節）、土試料を繰り返さず用いた場合（4.3節）に寄らず、TB、WCの両植生種において、植被率が增加するほど侵食量が減少するような有意な回帰式が得られたことから、可視光画像解析技術を用いて計測される植被率は、植生の法面保護効果の説明に寄与していると考えられた。
- (2) 4.2節では、植被率に対する粒径区分（細粒分と粗粒分）毎の侵食量比の変化率は、TB、WCの両植生種において同程度であったため、土粒子の粒径に寄らず土粒子密度が等しいと仮定すると、侵食量が減少するほど流出する土砂の細粒分含有率が増加する可能性が考えられた。
- (3) 4.3節では、植被率に対する各粒径区分（中礫、細礫、粗砂、中砂、細砂）における比流出比の変化率は、TB、WCの両植生種において同程度であったため、植生の法面保護効果は土粒子の粒径区分に寄らず、同様に発揮されることが推察された。

今後の課題として、本章で得られた実験結果のばらつきは大きいことから、さらなるデータを蓄積や、様々な土質、植生種で同様の実験を行い、より詳細な検討を行うことが挙げられる。また、供試体作製時から実験開始までの養生期間において、蒸発散の影響等で含水状態が異なった可能性も考えられることから、より詳細な検討のためには、計測するパラメータを増やす等、実験手法の改善が必要であると考えられる。さらには、室内で育成された植生と屋外で育成された植生の形質は異なると言われている³⁰⁾。即ち、屋外で育成された植生は室内で育成された植生に比べ、たんぱく質の一種であるリグニンが多く含まれるため、低く太く（stockier）育つ¹⁸⁾ことから、本章の実験と実法面では、植生の法面保護効果の発揮傾向が異なる可能性が考えられる。また、実法面では植被率と侵食量の関係は指数関数で表せることが多い（表4-1）が、本章の実験では一次関数式で評価された（図4-8、図4-22）。従って、今後は実法面モニタリングを行い、実現象に近い実験条件（水の流下時間や流量の調整等）に向けた改善が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 川内谷勇真, 宋白楊, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 山下聡: 凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究, 日本緑化工学会誌, Vol.43, No.1, pp.144-149, 2017.
- 2) 中村大, 宗岡寿美, 川口貴之, 川尻峻三, 山口滉平, 米村和城: 飽和度の違いが草本植物根系を含む土のせん断強度特性に及ぼす影響, 日本緑化工学会誌, Vol.47, No.1, pp.45-50, 2021.
- 3) 宇高優介, 中村大, 川口貴之, 三浦直己, 宗岡寿美, 川尻峻三: 緑化のり面極表層土被り厚を模擬した低鉛直応力下における草本植物根系の地盤補強効果, 日本緑化工学会誌, Vol.38, No.1, pp.21-26, 2022.
- 4) 宗岡寿美, 新田祥吾, 山崎由理, 木村賢人, 辻修: 10種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性に関する経年評価, 日本緑化工学会誌, Vol.48, No.1, pp.33-38, 2022.
- 5) 三浦直己, 中村大, 川口貴之, 宗岡寿美, 川尻峻三: 植物根系が層構造を有する土供試体のせん断強度特性に与える影響, 日本緑化工学会誌, Vol.48, No.1, pp.86-91, 2022.
- 6) Widiastuti, S.: Infiltration, evaporation and evapotranspiration behaviours of unsaturated Shirasu soils, Kagoshima University, Doctoral Dissertation, 2011.
- 7) 関根正人, 大前謙友, 松島貴之: 植生の根系が斜面の表面浸食に及ぼす影響に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.52, pp.559-564, 2008.
- 8) 中陳美咲希, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 原田道幸: 植生シートの侵食抑制効果に関する評価手法の検討, ジオシンセティクス論文集, Vol.34, pp.101-106, 2019.
- 9) 五郎部生成, 中村大, 川尻峻三, 川口貴之, 中陳美咲希, 宗岡寿美: 植生工の雨滴に対する侵食防止効果の新たな評価手法の検討, 日本緑化工学会誌, Vol.47, No.1, pp.57-62, 2021.
- 10) 五郎部生成, 中村大, 川尻峻三, 川口貴之, 中陳美咲希, 宗岡寿美, 菖蒲哲也: クサヨシ (*Phalaris arundinacea* L.) を利用した植生工の雨滴に対する侵食防止効果の評価, 日本緑化工学会誌, Vol.48, No.1, pp.15-20, 2022.
- 11) 鍛冶元雅史, 中村大, 川口貴之, 川尻峻三, 宗岡寿美: SfM (Structure from Motion) 写真測量を活用した侵食試験方法の開発, 日本緑化工学会誌, Vol.48, No.1, pp.27-32, 2022.
- 12) Bordoloi, S., Ng, C. W. W.: The effects of vegetation traits and their ability functions in bio-engineered slopes: A perspective review, *Engineering Geology*, Vol.275, 105742, 2020.
- 13) Quinton J. N., Edwards, G. M., Morgan, R. P. C.: The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion: results from a rainfall simulation study in south east Spain, *Soil Use and Management*, Vol.13, No.3, pp.143-148, 1997.
- 14) Snelder, D. J., Bryan, R. B.: The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya, *Catena*, Vol.25, No.1-4, pp.105-116, 1995.
- 15) 初磊, 石川芳治, 白木克繁, 若原妙子, 内山佳実: 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における林床合計被覆率と土壤侵食量の関係, 日本森林学会誌, Vol.95, No.5, pp.261-268, 2010.
- 16) 岩崎貴大, 篠原慶規, 大谷荘平, 久保田哲也: 森林表土を用いた緑化における表土採取場所よる土壤侵食量の違い, 九州大学農学部演習林報告, Vol.94, pp.18-22, 2013.
- 17) 北原曜: 森林が表面侵食を防ぐ, 森林科学, Vol.22, pp.16-22, 1998.
- 18) Gyssels, G., Possen, J., Bochet, E., Li, Y.: Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review, *Progress in Physical Geography*, Vol.29, No.2, pp.189-217, 2005.
- 19) Zuazo, V. H. D. and Pleguezuelo, C. R. R.: Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, No.28, Vol.1, pp.65-86, 2008.
- 20) Igwe, P. U., Ezeukwu, J. C., Edoke, N. E., Ejie, O. C., Ifi, G. I.: A review of vegetation cover as a natural factor to soil erosion, *International Journal of Rural Development, Environment and Health Research (IJREH)*, Vol.1, No.4, pp.21-28, 2017.
- 21) 酒匂一成, 齋田倫範: シラス堤防の浸透および越水に対する安定性に関する検討, 河川砂防技術開発公募報告書, 188p., 2018.
- 22) 国土交通省九州地方整備局: しらす地帯の河川・道路土工指針 (案), 179p, 2017.
- 23) 高辻正基, 森康裕: LED 植物工場, 日刊工業新聞社, pp.42-85, 2011.
- 24) 市原清志: バイオサイエンスの統計学-正しく活用するための実線理論-, 南江堂, 378p, 1990.
- 25) 永田靖: 入門統計解析法, 日科技連, 276p., 1992.
- 26) 春山元寿: えびの・吉松地域に分布するシラスのせん断特性について, 土と基礎, Vol.20, No.2, pp.41-47, 1972.
- 27) 公益社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]-二分冊の 2- 訂正第 2 刷, 丸善出版, p.1140, 2021.
- 28) 北村良介, 酒匂一成, 加藤俊二, 水島俊基, 今西肇: 降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.149-168, 2007.
- 29) 木原早紀, 久保田哲也, 水野秀明: 土壌硬度や根量が法面の表面浸蝕に与える影響, 九州森林研究, No.72,

pp.25-28, 2019.

- 30) Jaffe, M. J., Forbes, S.: Thigmomorphogenesis: the effect of mechanical perturbation on plants, *Plant Growth Regulation*, Vol.12, pp.313-324, 1993.

第5章 草本植生による法面保護工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムの開発

5.1 はじめに

本章では、第3章で示した可視光画像解析技術による植被率の計測手法、第4章で示した模型法面を用いた侵食実験の結果を運用し、道路法面に施された草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するための検討を行う。

第2章でも述べたように、道路法面における法面保護工（草地型播種工）の主な目的は、法面の侵食を防止することである。そして、法面保護工による侵食防止対策が不良であるとき、法面から流出した土砂が排水溝に堆積し、排水溝の通水断面（排水能力）を減少させることが考えられ、その場合には排水溝から溢水した水が法面を流下し、土工構造物の崩壊につながる可能性がある。そこで本章では、このような崩壊形態を防ぐために十分な植被率はどの程度か検討し、その植被率を草地型播種工の管理値とするようなシステムの提案を行う。具体的には、現状の排水溝の設計手法を踏襲することを基本としつつ、第4章で得られた結果に基づき、法面排水溝の土砂堆積量を考慮した植被率の管理値の設定方法について提案を行う。

5.2 草本植生による法面保護工に対する法面排水溝の土砂堆積量を考慮した管理値の設定方法の提案

5.2.1 現状の法面排水溝の設計について

2.2.2項では表面排水施設の設計や維持管理手法の概要について述べたが、本項では、表面排水施設における法面排水溝の設計方法の詳細について述べる。図5-1は、道路土工要綱（平成21年度版）¹⁾に基づいて作成した法面排水溝の設計フローであり、以降はこの設計フローに従って述べる。

まず、法面の排水施設の能力を定めるためには、その排水施設で処理しなければならない流量（雨水流出量）を算出する必要がある（図5-1）。雨水流出量の算定には、式(5-1)に示す合理式（ラショナル式）が用いられる。

$$Q_{in} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times C \times I \times s \tag{5-1}$$

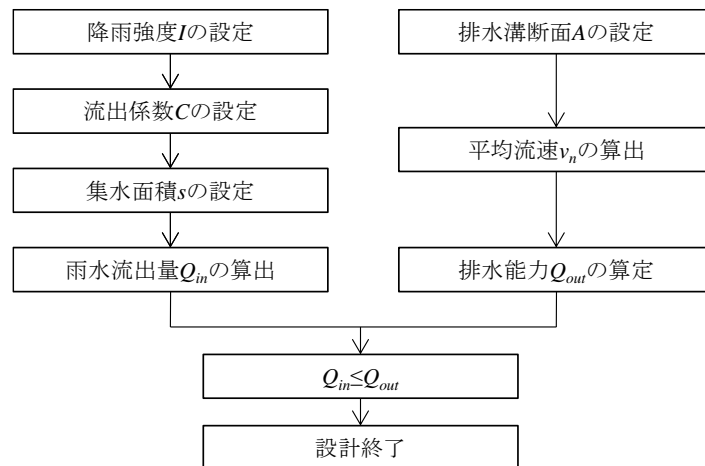


図5-1 排水溝の設計フロー

標準降雨強度図
(1961-2008年気象官署データに基づく3年確率10分間降雨強度)

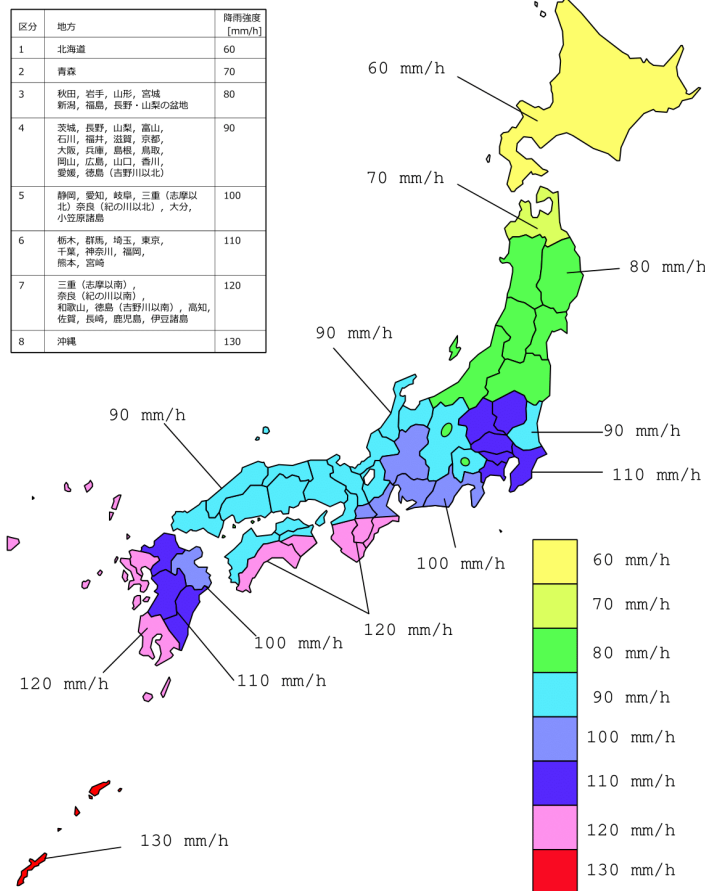


図5-2 標準降雨強度図²⁾

ここに、 Q_m : 雨水流出量[m³/s], C : 流出係数[-], I : 降雨強度[mm/h], s : 集水面積[m²]

合理式に用いられる各係数について述べる。まず、降雨強度 I とは、供用期間中に通常想定される降雨に基づく作用を決定するために定める値であり、法面等の一般的な表面排水施設においては、3年程度の降雨強度を設定するのが良いとされる。具体的には、図5-2に示す標準降雨強度図²⁾を用いて法面の排水溝の設計が行われることが多い。標準降雨強度図とは、3年確率10分間降雨強度全国図として作成されたものである。

集水面積 a とは、着目する表面排水施設が受け持つ面積である。ただし、隣接地から排出する水が下水道に直接排水されていない場合には、集水面積はそれらの全部と考える必要がある。

流出係数 C とは、地表に降った雨量の内、地中に浸透せず地表流となる割合を示す係数であると理解できる。流出係数は、降雨及び流域の特性等に応じて異なるものであり、一義的には決めにくいので、各機関で色々な値が用いられる。表5-1に、流出係数の例¹⁾を示す。

表5-1 地表面の工種別基礎流出係数¹⁾⁵⁾

地表面の種類		流出係数
路面	舗装	0.70～0.95
	砂利道	0.30～0.70
路肩, 法面等	細粒土	0.40～0.65
	粗粒土	0.10～0.30
	硬岩	0.70～0.85
	軟岩	0.50～0.75
	しらす	0.50～0.75
砂質土の芝生	勾配0～2%	0.05～0.10
	勾配2～7%	0.10～0.15
	勾配7%以上	0.15～0.20
粘性土の芝生	勾配0～2%	0.13～0.17
	勾配2～7%	0.18～0.22
	勾配7%以上	0.25～0.35
屋根		0.75～0.95
間地		0.20～0.40
芝, 樹林の多い公園		0.10～0.25
勾配の緩い山地		0.20～0.40
勾配の急な山地		0.40～0.60
田, 水面		0.70～0.80
畑		0.10～0.30

次に、排水溝断面の設計方法（図5-1）について述べる。一般に、排水溝の材料の種類は、石積み、アスファルト混合物、コンクリート等が挙げられるが、我が国においてはコンクリートを材料とした排水溝が最も広く用いられている。コンクリートを材料とした排水溝の断面形状には、L形、U形、半円形、円形等がある¹⁾が、盛土法面の小段排水溝においてはU形断面が広く用いられる³⁾と推察される。U形排水溝は、図5-3、表5-2に示すように、日本産業規格（JIS A 5372）⁴⁾に形状寸法が定められている。

排水溝の排水能力を算出するためには、まず、式(5-2)に示すマニング式により、断面平均流速を算出する必要がある。

$$v_n = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times i^{\frac{1}{2}} \quad (5-2)$$

ここに、 v_n ：マニング式による断面平均流速[m/s]、 n ：マニングの粗度係数（表5-3）[s/m^{1/3}]、 R ：水理学的径深[m]（ $=A/P$ 、 A ：通水断面積[m²]、 P ：潤辺[m]）、 i ：排水勾配[%]。

次に、式(5-3)に示す連続式により、排水溝の排水能力を算出する。

$$Q_{out} = A \times v_n \quad (5-3)$$

ここに、 Q_{out} ：排水溝の排水能力[m³/s]、 A ：排水溝の通水断面積[m²]

なお、U形排水溝の通水断面は、長方形断面として近似し、式(5-4)により算出する。

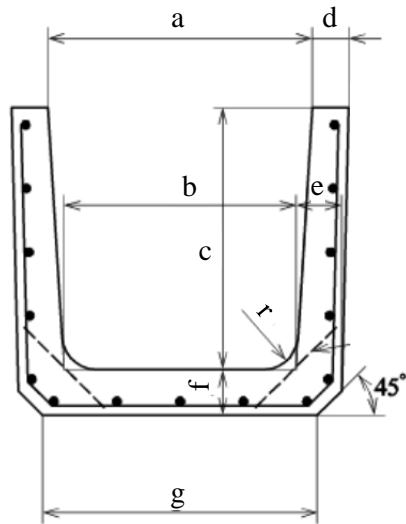


図5-3 日本産業規格 (JIS A 5372) によるU形排水溝の断面形状⁴⁾

表5-2 日本産業規格 (JIS A 5372) によるU形排水溝の断面寸法⁴⁾

呼び	寸法[mm]						
	a	b	c	d	e	f	g
150	150	140	150	30	35	35	160
180	180	170	180	35	40	40	190
240	240	220	240	45	50	50	240
300A	300	260	240	50	60	60	300
300B	300	260	300	50	60	60	300
300C	300	260	360	50	60	65	300
360A	360	310	300	50	65	65	360
360B	360	310	360	50	65	65	360
450	450	400	450	55	70	70	430
600	600	540	600	70	80	80	600

$$A = a \times c \quad (5-4)$$

ここに、 a 、 c はそれぞれ、図5-3、表5-2の通り。

そして、式(5-5)に示すように、排水能力が雨水流出量以上となれば、設計終了となる。

$$Q_{in} \leq Q_{out} \quad (5-5)$$

表5-3 マニングの粗度係数 n の例¹⁾

水路の形式	水路の状況	n の範囲	n の標準値
カルバート	塩化ビニル管		0.010
	コンクリート二次製品		0.013
ライニングした水路	モルタル	0.011~0.015	0.013
	コンクリート, コテ仕上げ	0.011~0.015	0.015
	コンクリート, 底面砂利	0.015~0.020	0.017
	石積み, モルタル目地	0.017~0.030	0.025
	アスファルト, 平滑	0.013	0.013
ライニングなし水路	土, 直線, 等断面水路	0.016~0.025	0.022
	土, 直線水路, 雑草あり	0.022~0.033	0.027
	砂利, 直線水路	0.022~0.030	0.025
	岩盤直線水路	0.025~0.033	0.030
自然水路	整正断面水路	0.025~0.033	0.030
	非常に不整正な断面, 雑草立木多し	0.075~0.150	0.100

5.2.2 本研究の成果を踏まえた植被率の管理値の設定方法の提案

本項では、第3章で示した可視光画像解析技術による植被率の計測手法、第4章で示した模型法面を用いた室内侵食実験の結果に基づき、道路法面に施された草地型播種工の植被率の管理値の設定方法に関する提案を行う。5.2.1節で示した現行の排水設計フロー（図5-1）においては、2.2.2節で述べたように、排水溝に堆積した土砂による通水断面積の欠損については、排水溝の深さに対して少なくとも20%程度の余裕を見込む必要があるとされる。しかし、法面保護工の定量的な効果については言及されていないことから、草地型播種工が施工された法面において、植被率の変化に伴う法面の侵食量の増減の影響は考慮されていない。

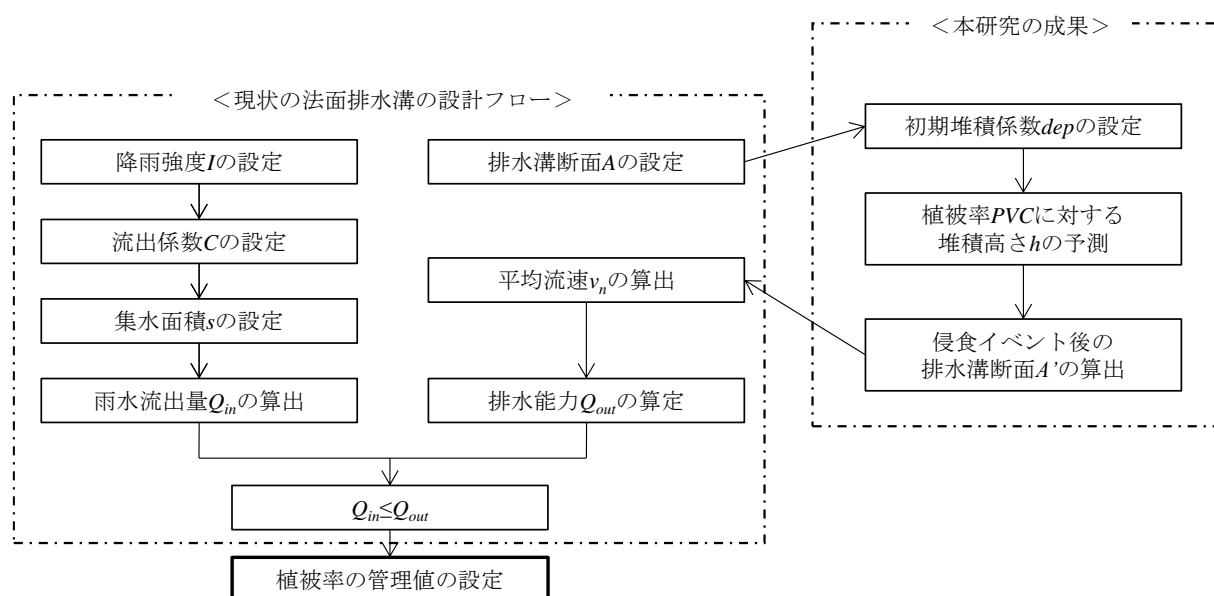


図5-4 本研究の成果を踏まえた植被率の管理値の設定方法の案

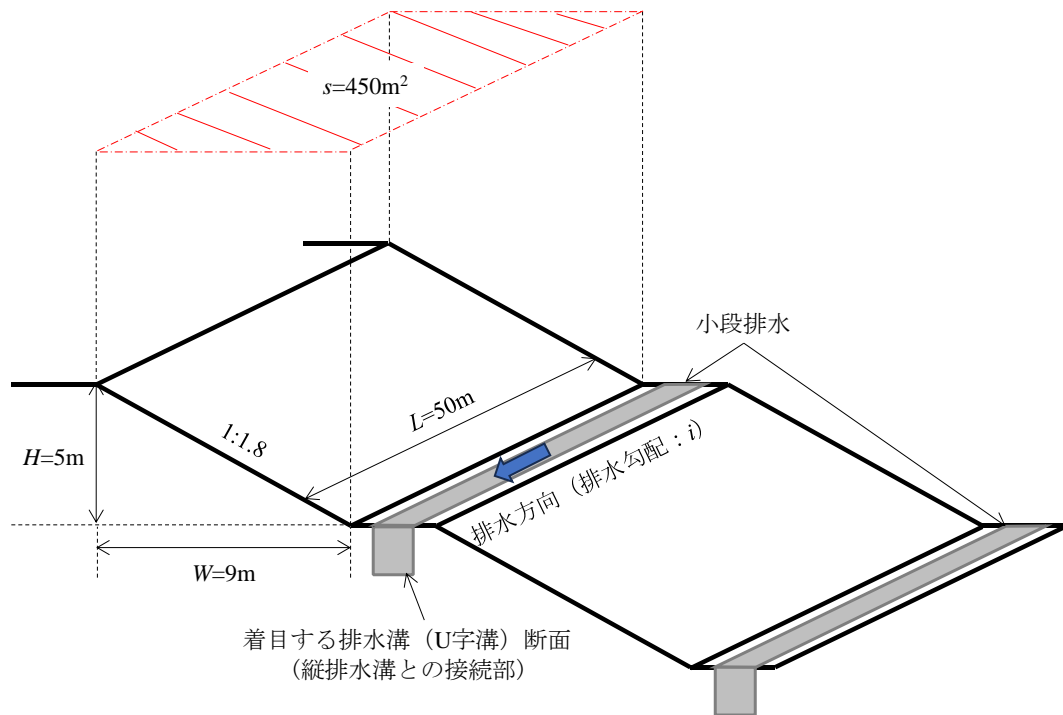


図5-5 モデル法面と着目する排水溝の位置

そこで本項では、本研究の成果を踏まえ、植生による法面保護効果を反映した排水溝の設計手法を提案する。そして、排水溝の土砂堆積状況を考慮した排水能力を踏まえた、草地型播種工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムの開発に向けた検討を行う。具体的には、現状の排水設計手法を踏襲することを基本としつつ、第4章で得られた結果に基づき、法面排水溝の土砂堆積量を考慮した植被率の管理値の設定方法について提案を行う。

図5-4に、本項で提案する植被率の管理値の設定フローを示す。以下、このフローに従って詳細を述べる。また、図5-4に示す植被率の管理値の設定フローについて具体的な数値を用いて考え易くするために、図5-5に示すモデル法面を想定する。本モデル法面は、表2-1に示す標準勾配で設計された、しらすによる道路盛土法面を想定した。具体的には、法面勾配が1:1.8、直高 H が5mの二段の法面をとした。着目する排水溝は、上段と下段の法面の間に位置する小段排水溝であり、着目する断面の位置は小段排水溝の最下流である縦排水工との接続位置とし、断面はU形（図5-3、表5-2）とする。集水面積 s は上段の法面における投影面積である 450m^2 とし、小段の面積は無視して考える。排水延長 L は、しらす盛土法面における一般的な排水延長である 50m^9 とし、排水勾配を $i[\%]$ と置く。また、本モデル法面は鹿児島県本土に位置するものと想定する。

5.2.2.a 雨水流出量の算出

本モデル法面で着目する排水溝（図5-5）における雨水流出量 $Q_m[\text{m}^3/\text{s}]$ を、式(5-1)に示す合理式に基づいて算出する。まず、降雨強度 I は、鹿児島県における標準降雨強度である 120mm/h （図5-2）とする。次に、流出係数 C は、しらす法面で一般的に用いられる値である 0.5^9 とする。集水面積 s は、図5-5より 450m^2 である。よって、着目する排水溝（図5-5）における雨水流出量は、式(5-6)の通りである。

$$\begin{aligned}
 Q_m &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times C \times I \times s \\
 &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 0.5 \times 120 \times 450 \\
 &= 0.075
 \end{aligned}
 \tag{5-6}$$

従って、着目する排水溝の排水能力 Q_{out} が $0.075\text{m}^3/\text{s}$ 以上となるように、排水工の設計や植被率の管理を行う必要がある。

5.2.2.b 植被率と堆積高さの関係の取得

着目する排水溝（図5-5）における排水能力の算出を行う。ここで、本研究の成果を反映するために、排水溝に堆積する土砂について考える。図5-6に、着目する排水溝と堆積する土砂を表した断面を示す。ただし、着目する排水溝において、延長方向に一樣に定義できる（即ち、土砂は排水溝の延長方向に高さ一定で堆積する）ものと仮定する。図5-6の a 、 c はそれぞれ、排水溝の幅、深さであり、図5-3、表5-2に示す排水溝の寸法と同様である。 dep 、 h は、本研究の成果を反映するために導入する、排水溝に堆積する土砂の高さの情報を示す係数であり、それぞれ、初期堆積係数[-]、侵食イベント後の堆積高さ[m/m]（詳細は後述）を意味する。

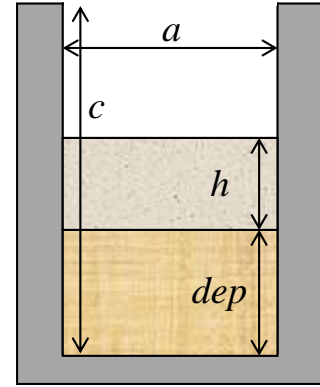


図 5-6 排水溝と堆積土砂の断面のイメージ

まず、初期堆積係数 dep の定義について述べる。初期堆積係数 dep は、排水溝の深さ c を1としたときに、5.2.2.aで述べた降雨イベントが発生する前に、既に堆積していた土砂の高さを示す係数とし、定義域を $0 \leq dep \leq 1$ とする。また、単位は無次元[-]である。例えば $dep=0.2$ であれば、排水溝の深さ方向に対して2割の高さの土砂が堆積している状況であると考えられる。

次に、侵食イベント後の堆積高さ h の定義について述べる。ここで、侵食イベントとは、4.2.3節に示した室内侵食実験で発生させた流水（流量約 247ml/s ）が、モデル法面（図5-5）の上段の法肩から流下したことにより引き起こされる法面侵食であると考えられる。そして、その侵食イベントによって排水溝の単位延長当たり堆積する土砂の堆積高さを h とし、単位は[m/m]である。堆積高さ h の具体的な算出方法について、4.2.4.bの図4-8におけるホワイトクローバーの結果に基づいて述べる。まず、式(5-7)を用いて、図4-8の侵食量（即ち、乾燥質量）を、体積侵食量に置換する。

$$VE = \frac{E}{\rho \times 10^6}
 \tag{5-7}$$

ここに、 VE ：体積侵食量 $[\text{m}^3]$ 、 E ：図4-8におけるホワイトクローバーの侵食量[g]、 PVC ：植被率[%]、 ρ ：堆積密度（詳細は後述） $[\text{Mg}/\text{m}^3]$ 。

堆積密度 ρ について述べる。堆積密度 ρ は、上述した侵食イベントに伴って土砂が排水溝に堆積する密度であると定義する。図4-8に示した侵食量は、流水により流出した土砂の乾燥質量であるから、排水溝に堆積する土砂の高さを算出するためには、堆積密度を知る必要がある。

そこで、4.2節で使用した土試料である串良川堤体土を用いて、図5-7に示すような実験を行った。具体的には、まず、蒸留水を入れたメスシリンダーに、乾燥質量 m_s の串良川堤体土を投入し、かき混ぜる。そして24時間静置した後、沈殿した土試料の堆積高さを測定する。このとき、24時間経過後も沈殿しない土粒子については無視することとした。また、堆積高さはメスシリンダーの側面から3カ所測定し、その平均値を採用することとした。そして、式(5-8)により、串良川堤体土の堆積密度を算出した。なお、実験は、メスシリンダーに投入する土試料の乾燥質量を変化させて、計5回行った。

$$\rho = \frac{m_s}{S \times D}
 \tag{5-8}$$

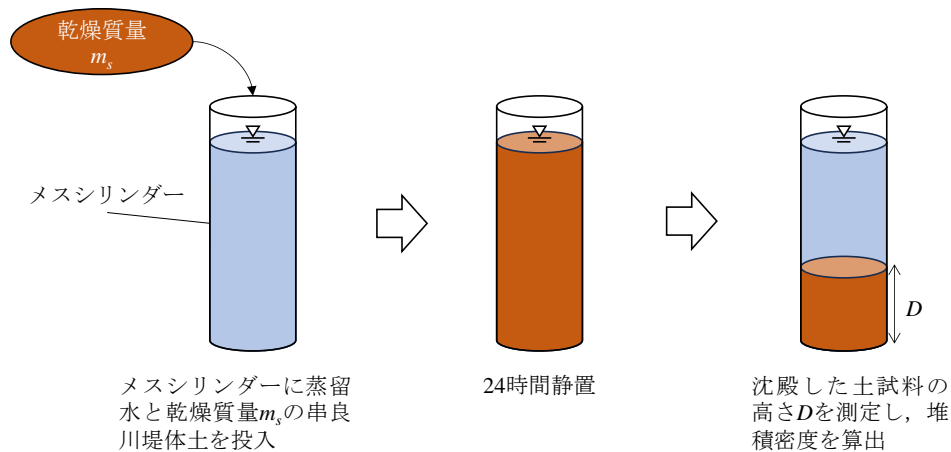


図5-7 串良川堤体土の堆積密度を算出するための実験

表5-4 串良川堤体土の堆積密度の算出結果

	メスシリンダーNo.				
	1	2	3	4	5
乾燥質量 m_s [Mg]	98.21	192.83	297.01	395.17	494.00
断面積 S [m ²]	0.0033	0.0033	0.0033	0.0029	0.0030
堆積高さ D [m]	0.037	0.059	0.090	0.127	0.154
堆積密度 ρ [Mg/m ³]	0.8	1	1.0	1.1	1.1

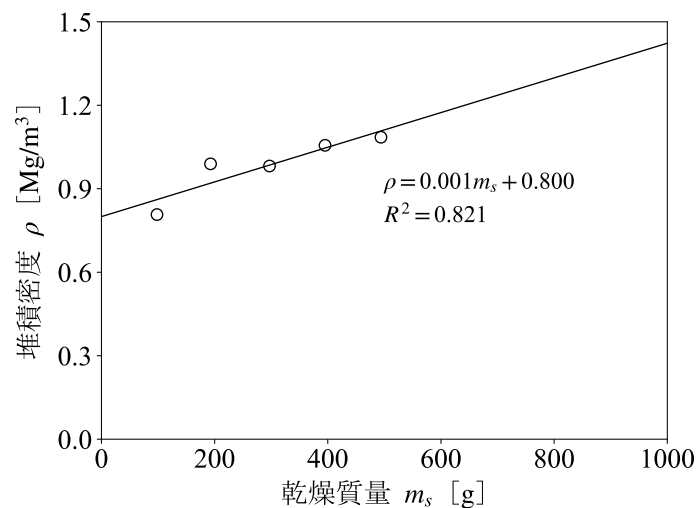


図5-8 串良川堤体土の乾燥質量と堆積密度の関係

ここに、 m_s :メスシリンダーに投入した土試料の乾燥質量[Mg], S :メスシリンダーの内径から算出した断面積[m²], 土試料の堆積高さ[m]。

表5-4に、この実験(図5-7)の結果を示す。また、図5-8には投入した土試料の乾燥質量と式(5-8)により算出した堆積密度の関係を示す。図5-8より、乾燥質量が大きい程、堆積密度が大きくなるような有意な正の相関 ($p < 0.05$) が確認された。これは、メスシリンダーに投入した土試料の乾燥質量が大きい程、堆積の過程で自重による圧縮が発生したためであると推察する。そこで、式(5-7)における堆積密度は、乾燥質量による回帰式(図5-8)から算出され

る値を用いることとした。ただし、式(5-7)における侵食量 E は乾燥質量 m_s と同義である。

従って、式(5-7)は式(5-9)として表すことができる。

$$VE = \frac{E}{(0.001E + 0.800) \times 10^6} \quad (5-9)$$

次に、式(5-10)を用いて、式(5-9)に示された体積侵食量 VE を、モデル法面（図5-5）の法長における排水溝の単位延長当たりの体積侵食量 VE_{unit} に変換する。

$$VE_{unit} = \frac{E}{(0.001E + 0.800) \times 10^6} \times \frac{1}{Box_w} \times \frac{\sqrt{W^2 + H^2}}{Box_l} \quad (5-10)$$

ここに、 Box_w 、 Box_l はそれぞれ、4.2.1節で示した育苗箱の内寸幅（0.168m）、内寸長さ（0.248m）、 W 、 H はそれぞれモデル法面における奥行き（9m）、直高（5m）。

そして、排水溝の単位延長当たりに堆積する土砂の高さを、式(5-11)から算出する。

$$\begin{aligned} h &= \frac{VE_{unit}}{a \times 1} \\ &= \frac{1}{a \times 1} \times \frac{E}{(0.001E + 0.800) \times 10^6} \times \frac{1}{Box_w} \times \frac{\sqrt{W^2 + H^2}}{Box_l} \end{aligned} \quad (5-11)$$

ここに、 a ：図5-3、表5-2に示す排水溝の幅の寸法[m]。

以上より、図4-8の侵食量を、図5-6に示す侵食イベント後の堆積高さ h に変換することが可能となる。そして、 h と植被率 PVC の関係から、式(5-12)に示すように、 h を植被率 PVC で回帰することにより、 h と PVC の関数を得る。

$$h = h(PVC) \quad (5-12)$$

以上により、植被率 PVC の法面において侵食イベントが発生した後の、排水溝断面に堆積する土砂の高さを算出することが可能となる。

5.2.2.c 侵食イベント後の排水能力の算定方法

図5-6に示すように、初期堆積係数 dep 、侵食イベント後の堆積高さ h を考慮した排水溝の排水能力の算定方法を示す。まず、式(5-2)に示すマニング式に対し、図5-6の断面に示すように土砂が高さ一様で堆積した場合を考える。土砂が堆積した面積は通水不能であると仮定すると、このときの断面平均流速 v_n は、式(5-13)のように整理できる。

$$\begin{aligned} v_n &= \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{n} \left(\frac{A}{P} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{n} \left(\frac{(c(1-dep) - h(PVC)) \times a}{a + 2 \times (c(1-dep) - h(PVC))} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5-13)$$

ここに、 c ：図5-3、表5-2に示す排水溝の深さの寸法[m]。

従って、初期堆積係数 dep 、侵食イベント後の堆積高さ h を考慮した排水溝の排水能力 Q_{out} は、式(5-14)のように示せる。

$$Q_{out} = Av_n$$

$$= \left((c(1-dep) - h(PVC)) \times a \right) \times \frac{1}{n} \left(\frac{(c(1-dep) - h(PVC)) \times a}{a + 2 \times (c(1-dep) - h(PVC))} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (5-14)$$

従って、モデル法面で着目した小段排水溝（図5-5）の排水能力が雨水流出量以上となり、図5-4に示す排水溝の設計が終了するための条件は、式(5-15)で表される。

$$Q_{in} \leq Q_{out}$$

$$0.075 \leq \left((c(1-dep) - h(PVC)) \times a \right) \times \frac{1}{n} \left(\frac{(c(1-dep) - h(PVC)) \times a}{a + 2 \times (c(1-dep) - h(PVC))} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (5-15)$$

最後に、式(5-15)の右辺を見ると、 Q_{out} はある dep における PVC の関数であることが分かる。従って、初期堆積係数が既知の、ある排水溝において、式(5-15)の不等式を満たすような法面の植被率であるとき、侵食イベント後も十分な排水能力を確保することが可能であると理解できる。従って、このときの植被率を草地型播種工の管理値とすれば、法面の侵食災害を防ぐことが期待できると考える。

5.2.2.d 植被率の管理値の設定例

モデル法面（図5-5）における植被率の管理値の設定例を示す。まず、モデル法面で着目する排水溝について述べる。一般に、しらす法面におけるU形排水溝は、Pu（プレキャストコンクリート）の300B（表5-2）が用いられる⁹⁾ことから、モデル法面で着目する排水溝の寸法（幅 a 、深さ c ）は、300Bの値とする。ただし、マンシングの底係数 n は、排水溝の表面は土砂の付着を考慮し、ライニング無し水路（土、直線水路、雑草あり）の標準値である $n=0.027$ とする。排水勾配 i は0.5%と想定した。

図5-9に、植被率 PVC と、図4-8のホワイトクローバーの結果に対して式(5-11)を用いて算出された排水溝の単位延長当たりの堆積高さ h との関係を示す。ここで、図5-9に示した回帰式は式(5-12)により得たため、式(5-14)を用いて植被率 PVC と排水溝の排水能力 Q_{out} の関係が得られる。図5-10に、初期堆積係数 dep を0.0, 0.2, 0.4としたときの、植被率と排水溝の排水能力の関係を示す。また、図5-10の Q_{in} は、式(5-6)で算出した雨水流出量であり、式(5-15)から、 Q_{in} より大きな Q_{out} が得られたとき、侵食イベント後においても排水溝の排水能力は雨水流出量を上回り、水が排水溝から溢水することを防ぐことができる。図5-10より、そのような排水能力が得られる植被率は、初期堆積係数が0.0、即ち排水溝に土砂堆積物が存在しない場合、90%程度必要であると考えられる。従って、モデル法面において小段排水溝

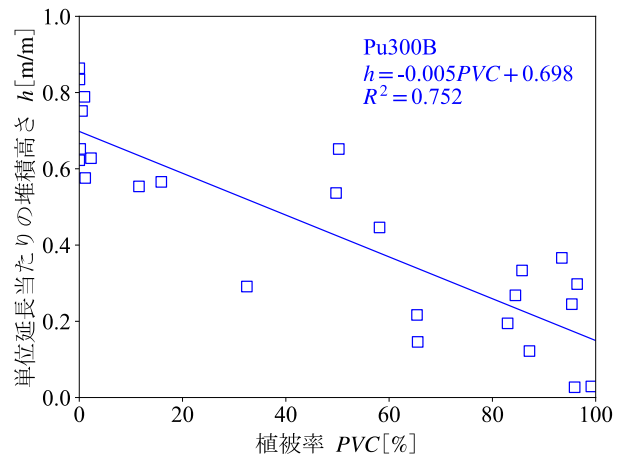


図5-9 植被率と堆積高さの関係（排水溝：300B）

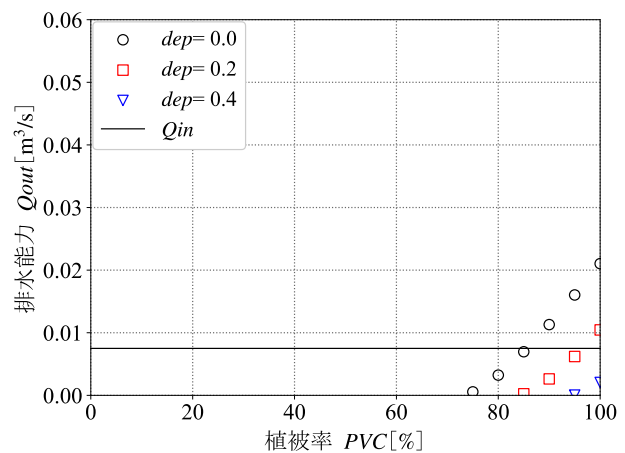


図5-10 植被率と排水能力の関係（排水溝：300B）

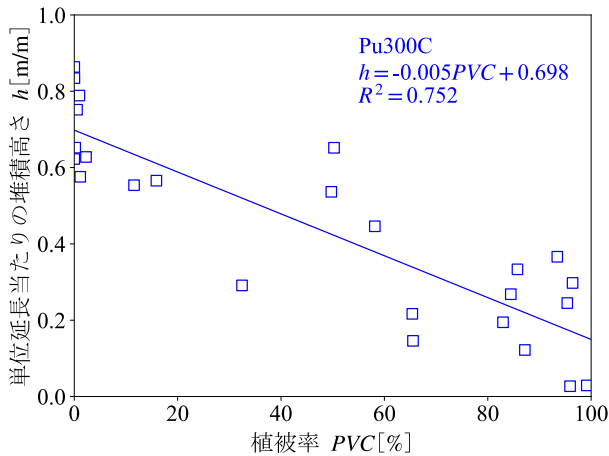


図5-11 植被率と堆積高さの関係（排水溝：300C）

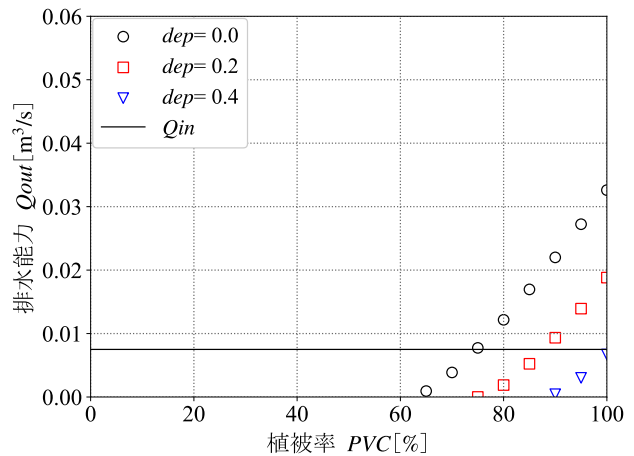


図5-12 植被率と排水能力の関係（排水溝：300C）

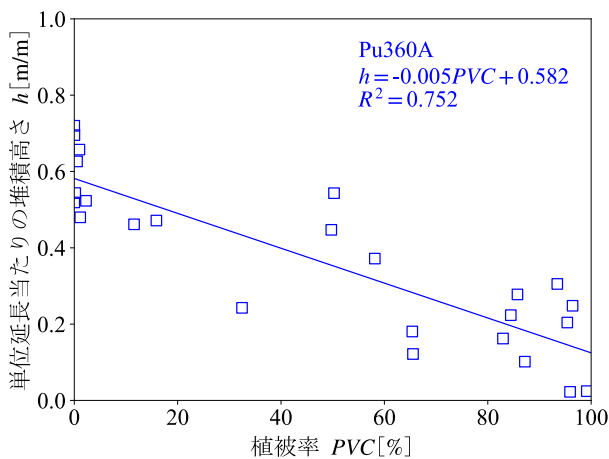


図5-13 植被率と堆積高さの関係（排水溝：360A）

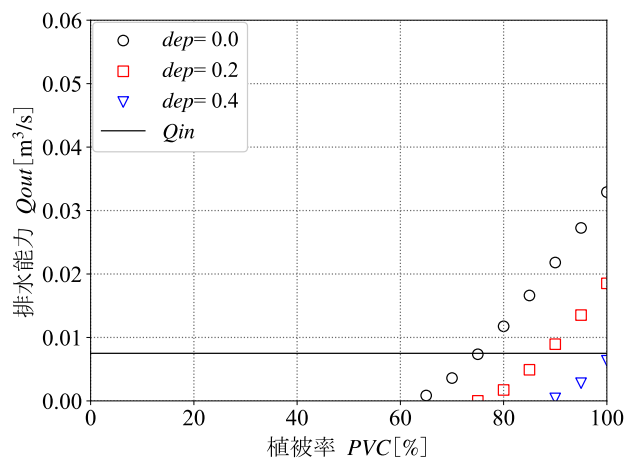


図5-14 植被率と排水能力の関係（排水溝：360A）

にPu300Bが設置される場合、地表流による法面侵食の被害を防ぐための植被率の管理値として、90%程度が求められると考えることができる。また、初期堆積係数が0.2のときには、植被率が100%を達成することで、排水能力は雨水流出量を上回る（図5-10）。

次に、排水溝の断面を変更した場合を示す。具体的には、表5-2に示す300Bよりも大きい断面である、300C、360A、360B、450について、先と同様に植被率と、堆積高さ、排水能力との関係を、式(5-11)、式(5-14)により算出した。

それらの結果を、図5-11～図5-18に示す。図5-11～図5-18より、排水溝の断面が大きくなるにつれ、排水能力も大きくなるのが分かる。また、雨水排出量を上回るような排水能力を得るための植被率の管理値は、300C（図5-12）や360A（図5-14）では、初期堆積係数0.0のとき植被率80%程度、初期堆積係数0.2のとき植被率90%程度が妥当であると考えられる。排水溝の断面を450としたとき（図5-18）には、初期堆積係数0.0では植被率20%程度、初期堆積係数0.4においても、植被率が70%程度あれば、雨水排出量を上回るような排水能力を確保できると考えられる。

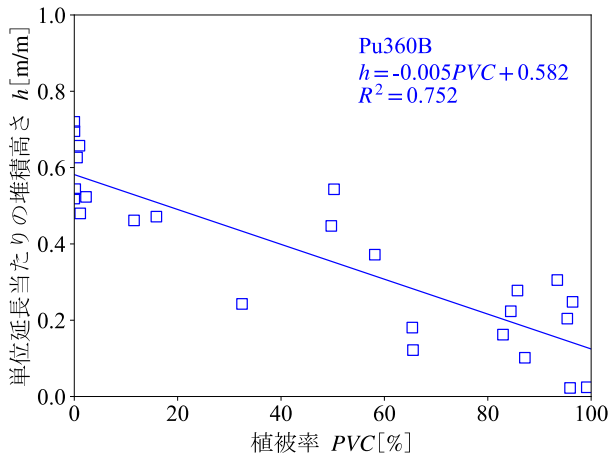


図5-15 植被率と堆積高さの関係（排水溝：360B）

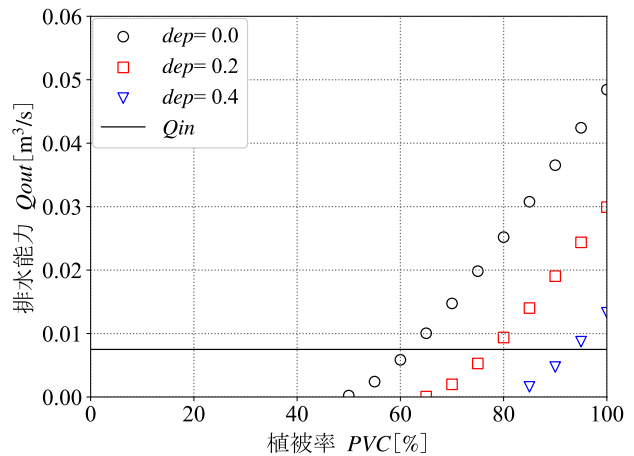


図5-16 植被率と排水能力の関係（排水溝：360B）

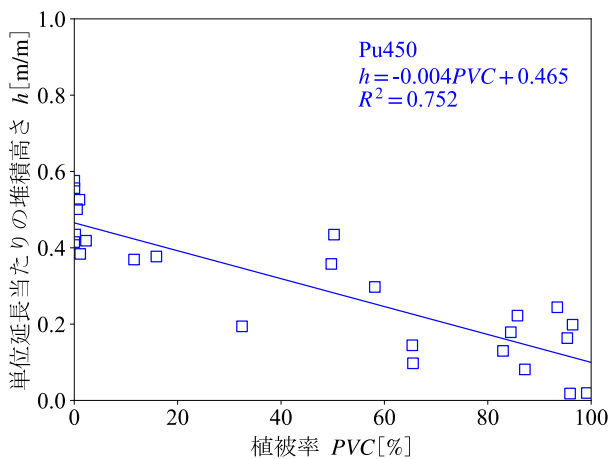


図5-17 植被率と堆積高さの関係（排水溝：450）

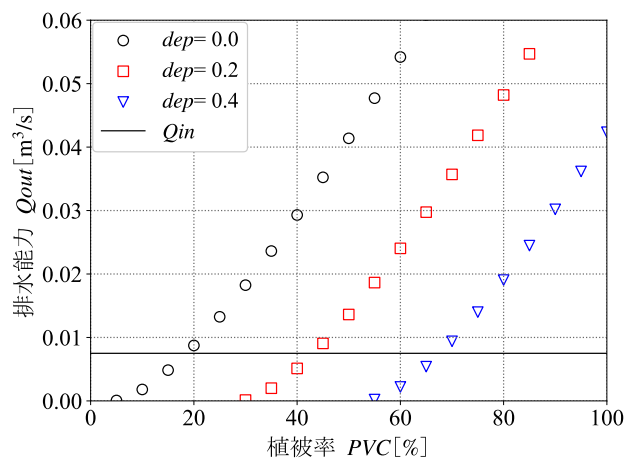


図5-18 植被率と排水能力の関係（排水溝：450）

5.3 本章のまとめ

本章では、第3章で示した可視光画像解析技術による植被率の計測手法、第4章で示したモデル法面を用いた侵食実験の結果を運用し、道路法面に施された草地型播種工の品質・維持管理手法を高度化するための検討を行った。具体的には、現状の排水設計手法を踏襲することを基本としつつ、第4章で得られた結果に基づき、法面排水溝の土砂堆積量を考慮した、草地型播種工における植被率の管理値の設定方法について提案を行った。以下に、本章で得られた知見を示す。

- (1) 現状の排水溝設計で考慮されていない草地型播種工の法面保護効果と、排水溝の土砂堆積量の関係を反映させた、排水溝の設計フローを提案した。具体的には、植被率を用いて排水溝に流入する土砂の堆積高さを推定する式を提案し、侵食イベント前に排水溝に堆積している土砂の高さ（初期堆積係数）を考慮した排水溝の排水能力算出式を導出することで、新たな排水溝の設計フローを提案した。
- (2) 一般的なしらす法面を想定したモデル法面の小段排水溝において、本章で提案した排水溝の設計フローに基づき、排水溝からの溢水を防ぐことができると考えられる植被率を、草地型播種工の管理値とする案を示した。具体的には、しらす法面の排水溝で一般的に用いられる断面であるPu300Bにおいては、排水溝に土砂堆積物が存在しない場合、90%程度の植被率が求められることを示した。排水溝の断面を450としたときには、初期堆積

係数0.0では植被率20%程度，初期堆積係数0.4においても，植被率が70%程度あれば，雨水排出量を上回るような排水能力を確保できると考えられた。

今後の課題として，まず，第4章の実験と実法面で発生する現象の整合性を確認するために，実法面モニタリングを行い，法面で発生する地表流の流況や，植被率と侵食量や土砂堆積高さの関係，排水溝に堆積する土砂の密度や雨水の流下状況等を調査する必要があると考えられる。また，Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を用いた空撮画像を利用し法面の植被率を効率良く計測することができれば，草地型播種工や植生工の品質・維持管理手法をより高度化することが期待できると考える。

<参考文献>

- 1) 公益社団法人日本道路協会：道路土工要綱（平成 21 年度版），丸善出版，pp.100-193，2009.
- 2) 公益社団法人日本道路協会：路面排水工などに用いる標準降雨強度（3 年確率 10 分間降雨強度），入手先<https://www.road.or.jp/books/pdf/image_01.pdf>（参照 2023.6.19）
- 3) 公益社団法人日本道路協会：道路土工盛土工指針（平成 22 年度版），丸善出版，310p.，2010.
- 4) 日本工業規格 JIS A 5372：プレキャスト鉄筋コンクリート製品，入手先<<https://kikakurui.com/a5/A5372-2016-01.html>>（参照 2023.6.19）
- 5) 国土交通省九州地方整備局：しらす地帯の河川・道路土工指針（案），179p，2017.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では、草地型播種工（以下、本工種）に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムを開発することを目的として、一般に広く普及しているデジタルカメラ等の機器による、可視光画像（デジタル写真データ）解析技術を用いた植被率の計測手法に着目し、様々な検討を行った。以下に、本論文のまとめを示す。

第1章では、本研究の背景や目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第2章では、道路土工構造物全体に対する法面保護工の位置付けについて述べるとともに、本工種の管理手法の現状と課題についてまとめた。具体的には、本工種は法面の標準勾配を保つために重要であり、排水溝の機能を阻害することが無いように管理する必要があるが、本工種の管理における指標である植被率の計測手法は一般に目視であること、植被率と法面の侵食量との定量的関係や本工種による効果は、現状の道路土工構造物の設計や維持管理手法に反映されていないことを示した。

第3章では、画像解析による植被率の計測手法の概要や既往研究について整理し、本工種の品質・維持管理手法として画像解析技術を導入するための課題について述べた。そして、植被率の計測結果のばらつきを抑えるための撮影機器の設定方法と、自然光源の変化が植被率の計測結果に与える影響について、商用デジタルカメラを用いて検討した。その結果、以下3点の結論が得られた。

- 3-1) 撮影機器の設定方法については、プログラムAEが採用されている機器の場合、ホワイトバランスをプリセットモードに固定し、ISO感度を最小にする設定が最適であると考えられた。
- 3-2) 様々な植生指数 (ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVI)を用いて植被率を計測した結果、ExGを用いた場合、他の植生指数に比べて最も植被率の計測結果のばらつきが小さくなり、自然光源の変化の影響を受けづらいことが考えられた。よって、本研究において植被率を計測する際には、植生指数ExGを採用することとした。
- 3-3) 植生指数ExGを用いた場合、自然光源の変化によって植被率の計測結果は、撮影時刻や天気の違いにより±8～10% (95%予測区間) の影響を受けること、天気が変わらない同日中の撮影では、照度89lx程度が確保できる撮影条件下において、標準偏差±1.8%程度で植被率の計測が可能であると考えられた。

第4章では、第3章で示した可視光画像解析技術によって計測される植被率が、植生による法面侵食の抑制（以下、法面保護効果）の説明に寄与するか明らかにすることを目的に、2つの条件の土試料（繰り返し使用/非繰り返し使用）において、模型法面を用いた室内侵食実験を実施した。その結果、以下3点の結論が得られた。

- 4-1) 土試料の条件に寄らず、植被率が増加するほど侵食量が減少するような有意な回帰式が得られたことから、可視光画像解析技術を用いて計測される植被率は、植生の法面保護効果の説明に利用可能であることを示した。
- 4-2) 土試料を繰り返し用いた条件における実験では、植被率に対する粒径区分（細粒分と粗粒分）毎の侵食量比（裸地供試体に対する植生供試体の侵食量）の変化率は同程度であったため、植生による法面保護効果は細粒分・粗粒分に対して、同程度に発揮される可能性があることを示した。ただし、土試料を繰り返し用いたことで、土粒子の破碎の影響を受けて供試体にばらつきが発生し、実験結果に影響した可能性が考えられた。
- 4-3) 土試料を繰り返し用いない条件における実験では、土粒子の破碎の影響を受けないことから、植生の法面保護効果と土粒子の粒径との関係について、より詳細な検討を行った。その結果、植生の法面保護効果は土粒子の粒径区分（粗粒分における細区分である中礫、細礫、粗砂、中砂、細砂）に寄らず、同程度に発揮される可能性が考えられた。

第5章では、第2章で示した本工種の現状の管理手法を高度化するために、第3章、第4章の結果に基づき、本工種に関する新たな品質・維持管理システムの提案を行った。具体的には、排水溝の土砂堆積量を考慮した植被率の管理値の設定方法を検討した。その結果、以下2点の結論が得られた。

- 5-1) 現状の排水溝設計で考慮されていない本工種の効果と、排水溝の土砂堆積量の関係を反映させた、排水溝の設計フローを提案した。具体的には、植被率から排水溝に流入する土砂の堆積高さを推定する式を提案し、侵食イベント前に排水溝に堆積している土砂の高さ（初期堆積係数と定義）を考慮した排水溝の排水能力算出式を導出することで、新たな排水溝の設計フローを提案した。
- 5-2) 一般的なしらす道路法面を想定したモデル法面の小段排水溝において、本章で提案した排水溝の設計フローに基づき、排水溝からの溢水を防ぐことができると考えられる植被率を、草地型播種工の管理値とする案を示した。

6.2 今後の展望

今後の展望として、まず、第3章で述べた可視光画像による植被率の計測においては、更なるデータの蓄積や、様々な植生種、土質について、同様の解析手法が適用可能であるか、検討することが挙げられる。また、本研究では扱わなかった植生指数に関する検討を行い、それらによる植被率の計測結果のばらつきについて、同様に検討する必要があると考えられる。さらに、本研究では二値画像を取得するための閾値に固定値を採用したが、より客観的な植被率の計測のためには更なる工夫が必要であると考えられる。また、UAVによる効率的な植被率の計測を実現するために、UAVを用いた場合における撮影機器の設定方法に関する検討、様々な飛行方法（高度、速度等）や撮影環境条件（風、気温、天気等）下での空撮、及び植被率の計測、植被率のばらつきの検討等が必要であると考えられる。

第4章で述べた模型法面を用いた室内侵食実験においては、さらなるデータを蓄積や、様々な土質、植生種で同様の実験を行い、より詳細な検討を行うことが挙げられる。また、供試体作製時から実験開始までの養生期間において、蒸発散の影響等で含水状態が異なった可能性も考えられることから、より詳細な検討のためには、計測するパラメータを増やす等、実験手法の改善が必要であると考えられる。

第5章で述べた草本植生による法面保護工に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムの提案においては、第4章の実験と実法面で発生する現象の整合性を確認するために、実法面モニタリングを行い、法面で発生する地表流の流況や、植被率と侵食量の関係、排水溝に堆積する土砂の密度や雨水の流下状況等を調査する必要があると考えられる。また、Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を用いた空撮画像を利用し法面の植被率を効率良く計測することができれば、草地型播種工や植生工の品質・維持管理手法をより高度化することが期待できると考える。

謝辞

本論分は、鹿児島大学学術研究院の酒匂一成先生の3年間に渡るご指導の下行った研究の成果をまとめたものです。本論文を作成するに当たり、多くの方からのお力添えを賜りました。ここに記して謝意を表します。

鹿児島大学学術研究院教授の酒匂一成先生には、他分野・他大学出身である著者の大学院博士課程進学に際し、大学院入学以前から懇切丁寧なご助言、ご指導を頂き、本研究を遂行するための快適な環境を整えて頂きました。また、学会参加、論文投稿、研究資金の獲得等、様々な研究活動へ触れる機会を多数与えて頂きました。ここに、酒匂先生のご指導に対し、深く感謝の意を表します。

鹿児島大学学術研究院准教授の審良善和先生、同准教授の木村至伸先生には、本研究の副査をお引き受け頂き、研究を遂行する上で重要なアドバイス、研究の進捗管理に対するご指摘等、様々なご指導を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

鹿児島大学名誉教授の北村良介先生には、研究室に入室された際や地盤工学会九州支部鹿児島地区の「土の勉強会」等で、本研究に関するご助言や、著者の進路に対するアドバイスを頂きました。心よりお礼申し上げます。

立命館大学理工学部講師で元鹿児島大学学術研究院助教の伊藤真一先生にも、酒匂先生と同様、著者が大学院に入学する以前からご助言、ご指導を頂きました。また、伊藤先生の定期的な叱咤激励により、一貫して研究活動を楽しむことができました。ここに、深く感謝の意を表します。

元鹿児島大学技官の城本一義氏には、第4章で用いた模型法面の製作にご指導、ご協力いただきました。ここに、感謝の意を表します。

鹿児島市教育委員会文化財課の末吉広海氏、藤井大祐氏、株式会社島津建設の盛重晃氏、株式会社国土技術コンサルタントの安永信一郎氏、鶴木友宏氏、鹿児島大学技官の種田哲也氏には、3.5節の実法面における撮影のためのご助言、ご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。著者の力不足により、本論文に成果を十分に反映させることができなかつたことは非常に残念ではありますが、今後も継続して調査・研究を実施する予定です。

鹿児島大学地盤工学研究室の学生、卒業生、修了生の皆様には、著者の研究活動に限らず、様々な面でサポート頂きました。皆様のご協力が無ければ本論文の完成は困難であったと考えます。ここに、深く感謝の意を表します。

鹿児島大学大学院係、鹿児島大学海洋土木事務室の職員の皆様には、事務手続きに関する多くのご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

また、本研究テーマの着想は、著者の前職での上司であった守田正一氏の熱心なご指導があったからこそであることを、ここに強調して記します。氏には、土木工事・造成工事の技術をゼロからご指導頂き、法面保護工の重要性を常に説いて頂きました。更には、社会人生活における力の入れ所と抜き所を教えて頂き、大変重要な財産となりました。ここに、深い感謝の意を表します。

本研究は、一般社団法人地域づくり協会令和二年度追加分、及び令和五年度の調査研究助成事業の支援を受けて実施されました。ここに謝意を表します。

最後に、会社を退職し、鹿児島に帰って博士課程に入学するという突拍子も無い挑戦を常に応援してくれた家族に感謝し、本論文の謝辞とさせていただきます。

2023年6月23日

昌本 拓也