

# UAV を活用したのり面緑化成績判定の定量評価技術

鹿島建設(株) 正会員 ○板川 暢 藤崎 勝利  
山口 毅志 高山 晴夫  
(株)ジェピコ 野口 泰謙 土屋 賢太郎  
岩手大学 原科 幸爾 東京農業大学 山田 晋

## 1. はじめに

現状の土木工事におけるのり面緑化工（植生工）の成績判定は、「のり面から 10m 離れると、のり面全体が緑に見え、植被率（単位面積当たりの植物で覆われている割合）が 70～80%以上である」<sup>1)</sup>等の数値基準があるものの（表－1）、定量的な植被率の算出方法は定められていない。目視で判定した植被率は、定性的で個人差を多く含むため、評価・成績判定の結果や発注者・施工者の認識にズレが生じる可能性がある。特に、植生高や優占種によって、目視判定では個人差の少ない植被率を算出することは困難である。

また、現行手法では局所の抜き取り箇所での方形区調査による植被率の計測、もしくは株数・本数の計数が行われているが、検査の基準や方法が統一されておらず、工事によって検査方法が異なっている<sup>2),3)</sup>。このような現行手法では、広範囲の調査での多大な労力、植被率の確認や検査箇所の限定から、定量的かつ面的な評価が困難であるため、品質の確保に課題がある。さらに、検査時に高所の移動に伴う転倒・転落等の災害リスクの高さが問題点として挙げられる。

こうした課題解決の一助として、のり面緑化工の品質管理の高度化を図るために、無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle; UAV）を活用したのり面緑化工の成績判定の基準となる植被率を定量的に評価する技術（以下、本技術）を開発した<sup>4)</sup>。本技術は、土木工事における緑化のり面の調査効率を大幅に改善し、調査・点検に要する時間や労力の軽減が期待される。また、定量的な評価結果に基づいた緑化のり面の遠隔臨場の実現、品質管理および検査の高度化を図ることができる。

本技術は、2021 年度の国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に採択され、施工中の緑化のり面（写真－1）で試行した。本稿では、試行を通して測定した植被率の面的な分布精度や作業の簡便性等について確認を行い、目視を主体とした現行検査に代わる新たな検査方法、および本技術によるのり面緑化工の新たな品質管理方法について報告する。



写真－1 技術試行の対象のり面

## 2. 技術概要

本技術は、マルチスペクトルセンサカメラを搭載した UAV の空撮画像（マルチスペクトル画像）から求める植物の光反射特性で表現される指数に基づいて、緑化のり面の植被率を定量的に測定するとともに、これを用いてのり面緑化工の品質管理を行うものである。植物は可視光である赤色の光を吸収する一方、近赤外光は反射している。NDVI（Normalized Difference Vegetation Index：正規化植生指標）<sup>5)</sup>は、この特性を加味した植生の活性度の指標のひとつであり、リモートセンシング分野・農業分野で広く用いられている<sup>6)</sup>。本技術はこうした手法を土木分野のキーワード：植被率，UAV，リモートセンシング，マルチスペクトルセンサカメラ，NDVI，遠隔臨場

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

り面緑化工の品質管理に適用したもので、のり面緑化工の品質管理の高度化が期待される。

のり面緑化状況の評価手順は大きく、「現地計測」、空撮画像取得後の「データ処理」、出力結果に基づいた「評価」と「検査」の段階がある（図-1）。まず、マルチスペクトルセンサカメラを搭載した UAV で対象のり面の空撮画像（マルチバンド画像）を取得する。その後、空撮画像を合成したオルソ画像（幾何補正画像）から、緑化のり面の NDVI の分布図を作成する。本技術では、植生工の成績判定や植生調査で一般的な基準となる 1m メッシュあたりの NDVI の集計値を求める。この NDVI の 1m メッシュの集計値を、独自の植被率評価モデルに入力することで、測定対象範囲の植被率を面的に評価する。この植被率の評価結果に基づいて、のり面緑化状況の定量評価ならびに可視化を行う。

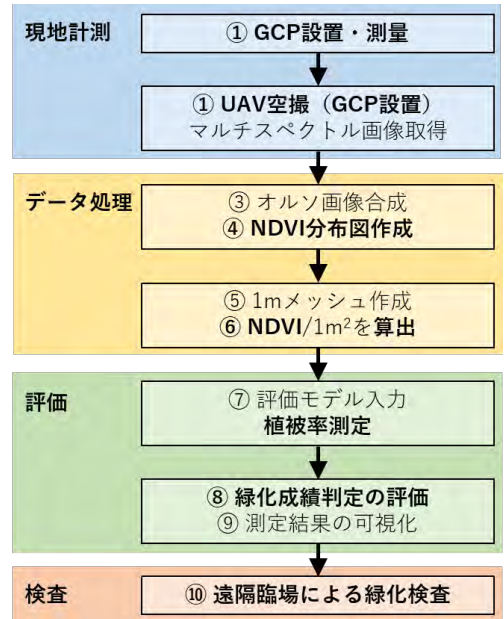


図-1 本技術のフロー



写真-2 使用した空撮機材

RedEdge を搭載した ACSL PF2 (上)

DJI P4Multispectral (下)

### 3. 試行概要

試行では、岡山県倉敷市の小田川付替え南山掘削他工事（国土交通省中国地方整備局 高梁川・小田川緊急治水対策河川事務所）の緑化のり面（厚層基材吹付，写真-1）を対象に本技術を適用し、本技術が緑化のり面の品質管理の高度化や検査の省力化・効率化に資することを確認した。併せて、各工程で取得・作成した各種データをデータプラットフォーム（DPF）で共有し、のり面緑化の現行検査に代わって、定量評価結果に基づいた遠隔臨場による緑化工の検査を試行した。UAV 空撮・植生調査は、一回目を 2021/10/18-19，二回目を 2021/11/18-19 に実施した。

#### (1) 現地計測

##### a) UAV 空撮

マルチバンドオルソ（正射変換）画像，NDVI 等の分布図を作成するために、マルチスペクトルセンサカメラを搭載した UAV を用いて空撮画像を取得した。空撮機材は、ACSL 社 PF2（MicaSense 社 RedEdge-MX 搭載），および DJI 社 P4 Multispectral（写真-2）を使用した。

最適な空撮・飛行設定の検討，天候や日射角度の差異による影響の排除のために、空撮機材や条件を変えて複数回の空撮を実施し、それぞれで空撮から評価までの一連の工程が完了できることを確認した。

対象のり面全域を網羅するように空撮範囲を設定し、フロントラップ率 90%以上・サイドラップ率 90%以上，飛行速度 2~5m/s，撮影頻度 2 秒間隔で航路を作成した（図-2）。のり面の下部から水平高度を一定に飛行，もしくは相対高度を一定に飛行（のり面に沿って斜めに飛行）させて，カメラ角度俯角 90 度（鉛直）もしくは俯角 45 度（のり面に対して垂直）でマルチスペクトルセンサ画像を取得した。空撮時の天候条件は弱い風向の晴天もしくは薄曇り，撮影時間帯は太陽光が対象のり面に入射する時間に実施した。なお，一回目は計 10 回，二回目は計 13 回の空撮を行った。対象のり面（約 11,000m<sup>2</sup>）の 1 回の空撮に要した時間は 10~25 分程度であった。

##### b) GCP (Ground Control Point ; 地上基準点) の設置・測量

オルソ画像の位置精度を確保するために、『UAV を用いた公共測量マニュアル（案）：平成 29 年 3 月』<sup>7)</sup>に基づき，対象のり面の周囲・内部に GCP として対空標識を設置し，各 GCP の位置情報（公共測量座標系）をネットワーク型 RTK-GNSS 受信機（Laica 社 GS18）の VRS（Virtual Reference Station，仮想基準点）方式<sup>8)</sup>で測量した。

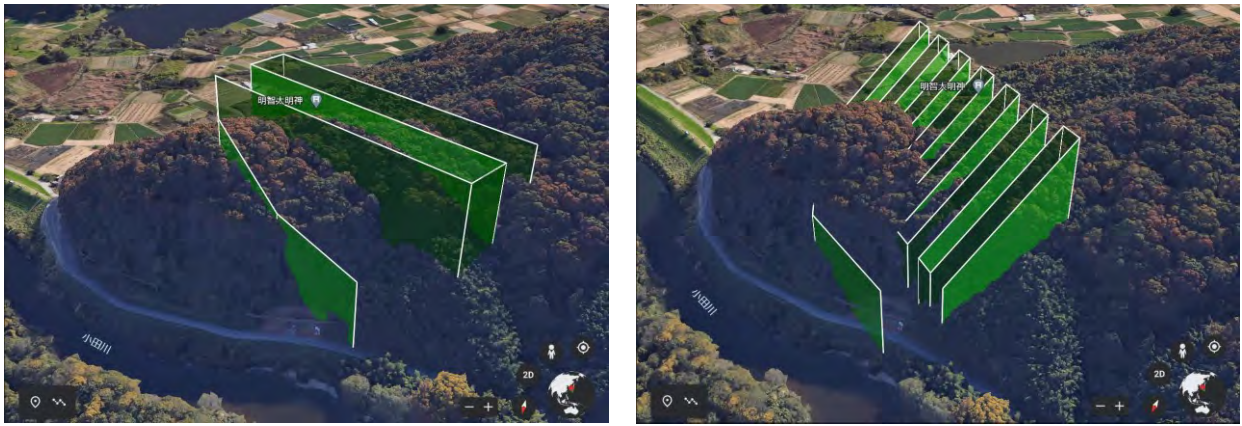


図-2 UAV 飛行ルートの設定例 (左: 水平高度を一定, 右: 相対高度を一定)

### c) 植生調査

試行現場の緑化植物の枯れが想定よりも進行していたことから、試行時期にあたる秋季中盤および終盤の植生状況に合わせた植被率評価モデルを構築するために、現地植生調査を並行して実施した(写真-3)。対象のり面の緑化施工時期、のり面段数、植生成立状況、優占植物種、植被状況を加味して、21箇所の調査地点を選定した。調査地点の選定に際しては、優占種、植生種構成、被度、位置等のタイプ・傾度がばらつくように考慮した。

植生調査は、各調査地点に1m四方の方形区を設置し、1m<sup>2</sup>あたりの植被率、優占種、植生高を記録・計測した。なお、10月時点で既に枯れの進行が著しかったため、植生工の浸食防止、景観保全機能の観点から、枯死体を含む植被率および緑色の植物(未だ枯れていない個体)のみの植被率をそれぞれ記録した。調査は、UAV空撮と並行して10月および11月の計2回、同一箇所を実施した。



写真-3 植生調査の実施

### (2) データ処理

#### a) オルソ画像合成およびNDVI分布図作成

2回の現地計測で取得した空撮画像を用いて、SfM (Structure from Motion) でオルソ画像の合成、近赤外域と可視赤域の反射率に基づいたNDVIの算出およびNDVI分布図の作成を行った。PF2に搭載したRedEdgeで取得したマルチスペクトルセンサ画像にはAgisoft社Metashape Pro, P4 Multispectralで取得した画像にはPix4D社Pix4Dmapperを使用して、SfM処理により幾何補正された各バンドのオルソ画像を合成した(図-3)。合成した可視赤域の波長帯の反射率(R)および近赤外域の波長帯の反射率(NIR)が格納されたオルソ画像を用いて、NDVIの算出(式-1)<sup>5)</sup>、およびNDVIの分布図ラスタを作成した(図-4)。

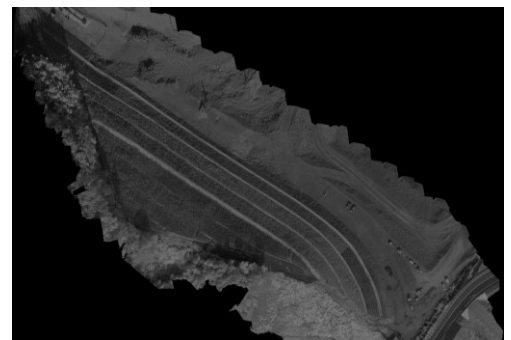


図-3 オルソ画像例(近赤外域)

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (式-1)$$

NDVI分布図は数cmの解像度でNDVI値が格納された指数値ラスタである。これを、GISを用いて対象のり面をXY座標平面上で1m四方に分割したメッシュで集計し、1mメッシュ毎のNDVIの平均値、最大値、最小値およびレンジ値(最大値-最小値の差分)を算出した。なお、1m四方でNDVI値を集計するのは、従来検査で1m方形区内の植被率等の測定が採用されているためである。NDVI値の集計および1mメッシュ分布図(図-5)の作成には、ESRI社ArcGIS Desktopを使用した。

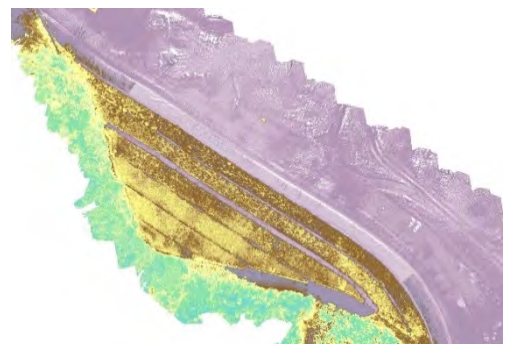


図-4 NDVI分布図例(10月試行時)

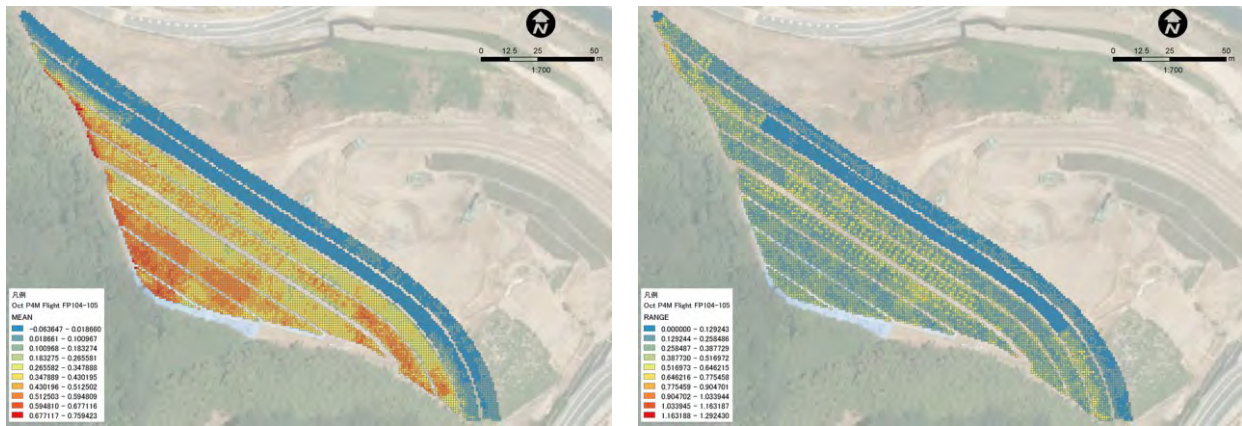


図-5 1mメッシュNDVI布図例 (左：平均値，右：レンジ値)

## b) 植被率評価モデルの構築

緑化成績判定の基準となる植被率を評価・測定するために、植生調査で記録した植被率と空撮画像から算出したNDVI値の対応関係に基づき、秋季中盤および終盤の植生状況に合わせた植被率評価モデルを構築した。なお、試行現場の植生の枯れ状況等を鑑み、枯れた植物を含む植被率（モデルA）、および緑色の植物のみによる植被率（モデルB）を推定する2つのモデルを構築した。前述の21箇所の植生調査地点、および小段やモルタル吹付のり面等の非植被地から選定した20箇所の対照地点を中心に0.5mバッファ（1mメッシュに近似）を発生させ、バッファに内包されるNDVI分布図ラスタのピクセル値の平均値、最大値、最小値、レンジ値（最大値－最小値の差分）を算出した。これらのNDVI値を植被率評価モデルの構築に使用した。算出に使用したNDVI分布図は、2回の現地計測でP4 Multispectralの空撮画像から作成した10月試行の4計測分、11月試行の8計測分を対象とした。

植生調査で記録した1m<sup>2</sup>あたりの枯死体を含む植被率、およびに緑色の植物のみの植被率を、各モデルの目的変数とした。対照地点については、植被が認められない地点を選定しているため、植被率は0%として扱った。NDVI値を説明変数、植生調査で記録した植被率を目的変数に設定し、二項分布を仮定したGLMMで分析し、モデル化した。ランダム効果として、データを取得した月を切片、方形区内の優占種および算出基データの違いを係数と切片に組み込んだ。採用した変数の総組み合わせでAIC（赤池情報量規準）、逸脱度の比較によるモデル選択を行った結果、モデルAおよびモデルBともに、NDVIの平均値とレンジ値を組み込んだモデルが最も説明力が高かったことから、植被率評価モデルに採用した（式-2、モデルAとモデルBで各パラメータの数値は異なる）。

算出した1mメッシュ当たりのNDVI値を、上記の植被率評価モデルAおよびBに入力して、1mメッシュ毎の枯れを含む植被率および緑色のみの植物による植被率を算出・計測した。植被率算出に際して、回帰係数については固定効果のみで計算し、切片については固定効果とデータを取得した月によるランダム効果を用いて計算した。すなわち、各メッシュの優占種および算出基データの違いは未知の情報、データを取得した月は既知の情報とした。なお、試行においては、NDVI値の算出基データによるランダム効果を加味することも可能であるが、他事例に適用する場合を想定して、未知の情報として扱った。

$$f(x_j) = \sum_{i=0}^2 \alpha_i x_1 + \sum_{i=0}^2 \beta_i x_2 + \sum_{i=0}^3 \gamma_i \quad p = \frac{1}{1 + e^{f(x_j)}} \quad (\text{式-2})$$

$p$  : 植被率

$x_1$  : 0.5m バッファ（≒1mメッシュ）あたりのNDVIの平均値

$x_2$  : 0.5m バッファ（≒1mメッシュ）あたりのNDVIのレンジ値

$\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  : 補正後の回帰係数および切片の固定効果

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  : 優占する植物種によって補正される回帰係数および切片値のランダム効果

$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  : NDVI値の算出基データによって補正される回帰係数および切片値のランダム効果

$\gamma_3$  : データを取得した月によって補正される切片値のランダム効果

### (3) 評価

NDVI 値を植被率評価モデル（式-2）に入力して、1m メッシュ毎の植被率を評価した。定量評価結果を GIS を用いて可視化し、対象のり面全域の植被率分布図（図-7, 9）および緑化成績判定図（図-8, 10）を全評価分で作成した。成績判定図では 1m メッシュ毎の植被率 80%以上（図中の凡例色：緑）、および植被率 70%以上～80%未満（黄緑）を「可」判定し、植被率 50%以上～70%未満（黄）を「判定保留」し、植被率 10%以上～50%未満（赤）を「不可」し、植被率 10%以下を人工物や地面等にあたる「非植被地」とした。

10 月の例示した計測では、未施工面・コンクリート吹付け面を除いた箇所の平均植被率（枯れ含む）は 94.4%（図-7）、植被率が 70%以上で「可」判定となるメッシュの割合は 93.5%となり（図-8）、現地の植生状況（図-6）が反映された結果となった。一方、植物の枯れが進んだ 11 月では、枯れきってしまった箇所もしくは枯れた植物で上部を覆われてしまった箇所が「不可」もしくは「非植被地」に判定され、「保留」および「不可」判定箇所が増加した（図-10）。試行は秋季～晩秋に行ったため、枯れが著しい場合には光合成を殆どしていないため適切な判定が難しかった。一方で、植物の光合成が旺盛な時期であれば、枯れ等の異常を検出できることになる。



図-6 対象のり面の植生状況（RGB オルソ画像 左：10 月試行時，右：11 月試行時）

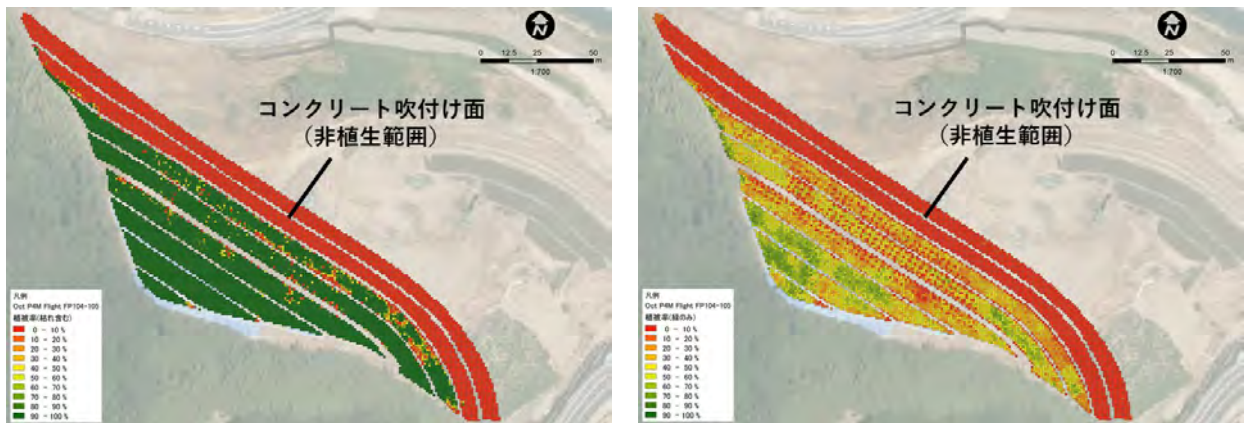


図-7 10 月試行時の植被率分布図例（左：枯れ含む，右：緑色のみ）

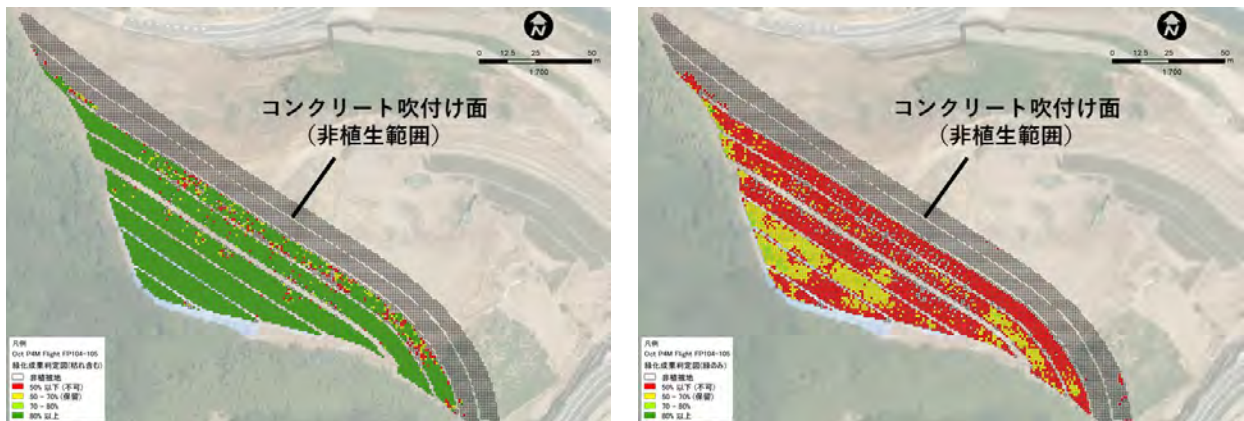


図-8 10 月試行時の緑化成績判定図例（左：枯れ含む，右：緑色のみ）

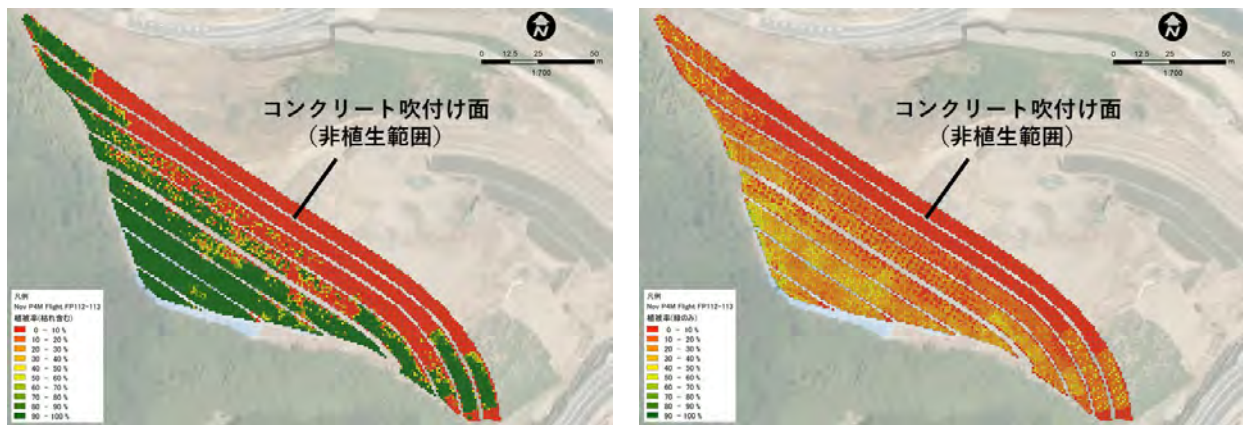


図-9 11月試行時の植被率分布図例 (左: 枯れ含む, 右: 緑色のみ)

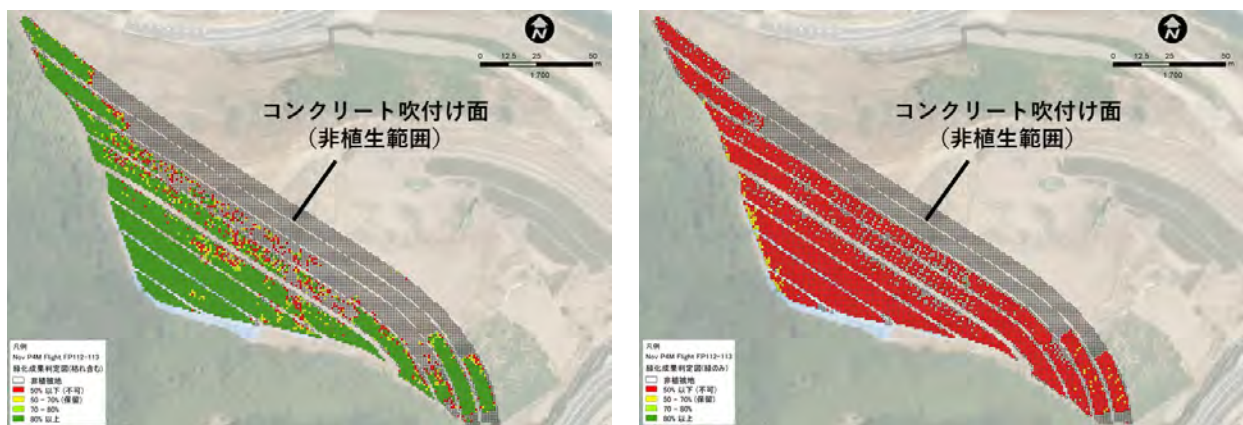


図-10 11月試行時の緑化成績判定図例 (左: 枯れ含む, 右: 緑色のみ)

#### (4) 検査

##### a) データプラットフォームによる試行結果の共有

現地計測で取得した空撮画像, GCP 情報, 植生調査結果, 合成したオルソ画像, NDVI 分布図, 植被率分布図, 成績判定結果等の各種データを, クラウドサーバーで関係者と共有した. 試行では, 一般に普及しており導入が容易なサービスである Dropbox Business Advanced (Dropbox 社) を使用した. 指定したアカウントのみに対してのみデータの公開が可能であり, 同時にデータの秘匿性に応じたセキュリティ, 必要に応じた容量設定, 大容量のデータを保管・共有ができる.

閲覧・確認の簡便化および遠隔臨場による検査の効率化を図るために, 緑化工事の検査の根拠となる植被率の計測結果および成績判定結果に関連するデータを, Web-GIS アプリケーションによる共有を行った. 試行では, ArcGIS Online (ESRI ジャパン社) の Web-GIS アプリケーションである ArcGIS Web AppBuilder を使用した. 複数のデータレイヤーを選択して表示でき, 任意メッシュのデータ参照が可能である (図-11). スワイプ機能による複数データレイヤーの簡便な比較, インフォグラフィック機能による10月および11月試行時の各のり面の NDVI 平均値・植被率 (図-12), および対象のり面全域の緑化成績割合の表示を取り入れた.



図-11 WebGIS アプリケーション閲覧例①  
任意メッシュのデータ参照

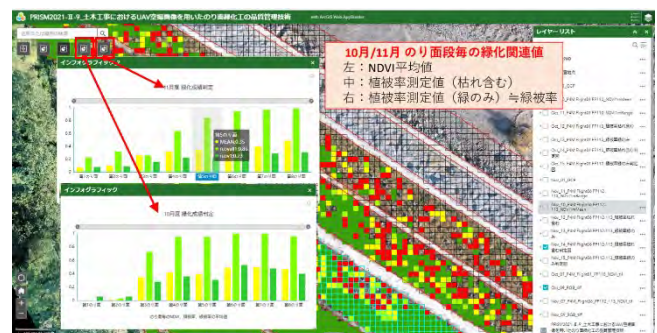


図-12 WebGIS アプリケーション閲覧例②  
集計機能による段毎の植被率等の状況比較

## b) 遠隔臨場によるのり面緑化工検査の試行

遠隔臨場は、Web 会議システム等を利用して映像や音声を共有し、段階確認、材料確認、立会を行うもので、導入により移動のコストと時間の削減が可能で、建設現場の生産性向上につながる<sup>9)</sup>。

試行で得られた計測結果とデータプラットフォームに基づいて、遠隔臨場



図-1-3 遠隔臨場によるのり面緑化工の検査の試行概要

によるのり面緑化工の検査を検討・試行した。遠隔臨場の手順として、現地計測のデモンストレーション、試行で取得・計測・作成したデータの共有・確認、現地の緑化状況のリアルタイム中継を行った(図-1-3)。遠隔臨場の試行はWeb 会議システム(Teams)を使用した。クラウドシステムおよびWebGISアプリケーションを用いて、試行で取得したデータや計測結果、データプラットフォームの構成等についての説明し、格納されたデータを検査官を想定した参加者が閲覧した。

UAVおよびウェアラブルカメラによる中継・録画映像により、検査官による緑化のり面の現況確認を行った。試行では、計測データおよびデータプラットフォームの閲覧・参照結果に基づいて、検査官から指定される箇所を確認することを想定した。高所・急傾斜地は、UAV(ACSL PF2)を対象箇所に安全な距離で接近させた上で、搭載したカメラ(UMC-R10C)でズームした映像をリアルタイムに中継・共有した(写真-4)。施工者等が安全にアクセスが可能な箇所は、ウェアラブルカメラを用いて緑化のり面の近接映像を事前に録画し、遠隔臨場試行時に共有した(写真-4)。これらにより、緑化のり面の詳細な状況を参加者が確認・把握することができた。

本技術で測定された植被率と緑化成績判定、その結果を可視化したことで、定量的な評価に基づいた検査を行うことができた。試行では、補助的にのり面緑化状況のリアルタイム中継等を実施したが、実際に運用していく上では、検査の前に取得した写真や映像で代替することで、さらなる検査の短縮や労力の低減を図ることができる。

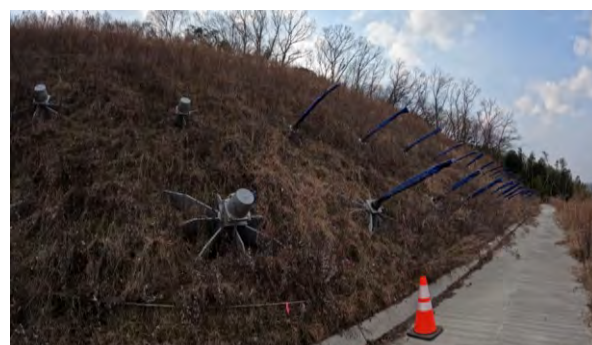


写真-4 遠隔臨場時の緑化のり面の中継・共有 (左: UAV, 右: ウェアラブルカメラ)

カラーコーンを指定箇所と想定して緑化状況の中継

## 4. 試行のまとめ

試行を通して、定性的で局所的な評価しかできなかった従来手法に比べ、本技術では一度に広範囲の成績判定を定量的に行うことが可能となり、効率的かつ高度な品質管理に貢献できる(図-1-4)。現行の検査基準は、目視による曖昧かつ主観を伴うのに対し、緑化の成立状況を定量的に測定・評価ができる。個人の見解の相違を排除し、熟練検査員が不在でも適切な判定ができるため、データに基づいた遠隔地での検査が可能となる。

また、一度に大面積の緑化状況の把握、可否判定が可能となるため、調査・検査・点検にかかるコスト（労力・工期）を低減できる。検査のための事前調査が省略され、UAV 空撮（GCP の設置・測量含む）のみになり、現場での作業時間が大幅に短縮されるほか、遠隔臨場により、現場への移動時間（発注者）や検査時の場内移動・検査地点間の移動が短縮される。

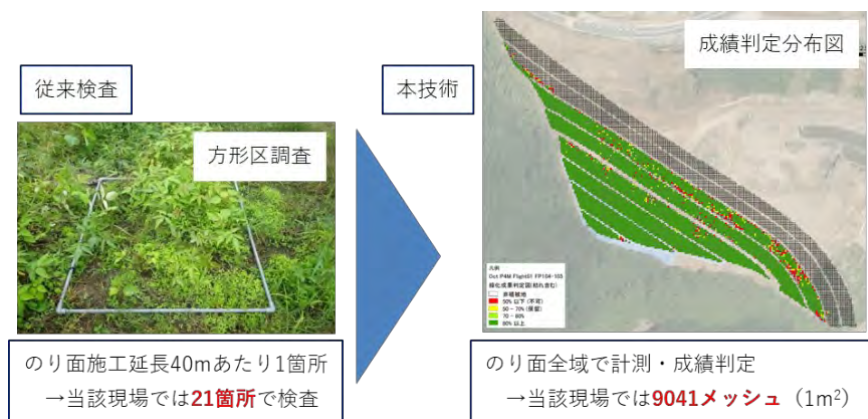


図-14 本技術による品質の確保・向上に関する効果

現行の調査・検査立会に比べて、のり面小段等の高所・傾斜地等の危険個所に立ち入る頻度・時間が縮減されるため、転落防止等の安全性向上が図れる。また、施工後養生期間中も状態の把握が簡便に行えるため、緑化成立が遅れている部分等事前に確認し、集中的な養生管理により、手直し工事等を低減できる。工事完了後には、本技術での緑化状況モニタリングや生育不良地の抽出等も可能のため、維持管理段階においても適用・展開が、副次的な効果としても期待できる。

## 5. おわりに

UAV を活用し、法面の植被率の定量的な評価成績判定の推定ができる本技術は、調査・点検に労力を要するような長大なおり面でも簡易に適用でき、基準の曖昧さの排除、調査効率の大幅な改善等に貢献する。一方で、適用時期や天候条件が限定されることや機材等によって評価結果に差異が生じることが明確になった。試行の結果を踏まえ、今後も汎用性と精度等の向上を図り、問題点の是正や運用方法の改善を目指す。緑化工における手直し工事の低減、竣工時の発注者・施工者ともに共通の認識の上で判定できるシステムとして標準化し、本技術の普及・社会実装に努めていく。

## 謝辞

国土交通省、小田川付替え南山掘削他工事の関係者の皆様には、本技術を試行する貴重な機会を頂戴した。記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成 21 年度版）. pp.521, 2009.
- 2) 吉田寛: 播種工による法面緑化とモニタリング手法. 日本緑化工学会誌, 30(3), 532-540, 2005.
- 3) 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, 34(3), 452-458, 2009.
- 4) 板川暢ほか: UAV 空撮画像を用いた法面緑化成立状況の定量評価技術, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, VII-9, 2021.
- 5) 国土交通省国土地理院: 植生指標データについて. <https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/ndvi.html>
- 6) 原科幸爾ほか: ドローン搭載のマルチスペクトルセンサを用いた津波被災水田の直播栽培におけるイネの生育モニタリング. 農業農村工学会誌, 87(2), 121-126, 2019.
- 7) 国土交通省国土地理院: UAV を用いた公共測量マニュアル（案）. pp.521, 2017.
- 8) 国土交通省国土地理院: ネットワーク型 RTK-GPS を利用する公共測量作業マニュアル(案). 国土地理院技術資料 A1-No.302, 2005.
- 9) 国土交通省大臣官房技術調査課: 建設現場の遠隔臨場に関する試行要領（案）. pp.13, 2021.