

地熱発電所における UAV を用いた樹木モニタリング調査手法ガイドライン

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）の委託業務「地熱発電技術研究開発/発電所の環境保全対策技術開発/冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発」事業の結果として得られたものです。

2021年12月



国立研究開発法人

新エネルギー・産業技術総合開発機構



東北緑化環境保全株式会社



一般財団法人

電力中央研究所



学校法人東京農業大学

東京情報大学

まえがき

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向け温室効果ガスの8割以上を占めるエネルギー分野の取組が特に重要であり、再生可能エネルギーのさらなる導入拡大が望まれています。

日本は世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有しており、再生可能エネルギーの一つとして地熱発電へ大きな期待がかかっています。地熱発電は時間や天候に左右されず安定したエネルギー出力が得られるため、ベースロード電源を担うエネルギー源と位置づけられており、「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」（令和3年、経済産業省）において2030年度の野心的水準として約150万kWの設備容量の導入が掲げられています。

一方で、地熱に関する環境アセスメントの手続きは通常3～4年程度かかり、導入拡大に向けて環境アセスメントの円滑化が課題になっています。現在、地熱発電の環境アセスメントの実績は少なく、その知見の蓄積がないため（特に地熱発電特有の項目など）、信頼性のある予測・評価の手法の確立が喫緊の課題となっています。また、国内の地熱資源の約8割は国立・国定公園内に存在しており、国立・国定公園内での地熱開発を今後推進していくためには、自然環境との調和を図ることが重要となります。

このような背景の中で、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、地熱発電所の環境保全対策技術開発の一環として、地熱発電に係る環境アセスメントの科学的知見に基づく最適化を図るため、2019年5月から2021年5月にかけて「冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発」を実施しました。冷却塔から排出される硫化水素および蒸気に関する事項については、地熱発電事業に特有の影響要因であり、調査、予測・評価の手法が確立されていない項目や最適化を図る余地がある項目を対象として、より適切な調査、予測・評価の手法を確立するための知見を得ることを目的としたものです。

本ガイドラインは、その研究開発の成果の一つとして作成したものであり、冷却塔から排出される硫化水素（ H_2S ）による植生への影響について、UAV（Unoccupied aerial vehicle: 無人航空機、ドローン）で撮影した画像から確認する調査方法を紹介しております。より多くの地熱発電事業に係わる方々に、本ガイドラインを活用していただくことで、事業特性に応じた効果的な環境配慮の取り組みを進めていただきたいと考えております。なお、冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響については、未だ研究開発途上にあり、引き続き知見の充実が図られ、よりの確な環境配慮に向けた取り組みが進むことを期待します。

最後に、本ガイドラインの作成にあたっては、有識者から構成される「冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発 技術検討委員会」を設置して指導・助言を頂きました。委員の皆様、そして、オブザーバーとして参加していただいた経済産業省商務情報政策局産業保安グループ電力安全課および環境省大臣官房環境影響評価課には深く御礼を申し上げます。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

新エネルギー部

冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発技術検討委員会

委員長 市川 陽一（龍谷大学名誉教授）

委員 河野 吉久（（一財）電力中央研究所名誉研究アドバイザー）

小野寺 亨（東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 火力部地熱統括センター 所長）

※前任：石崎 潤一（上記同センター 前所長）

（2021年12月時点）

オブザーバー

経済産業省 商務情報政策局 産業保安グループ 電力安全課

環境省 大臣官房 環境影響評価課 環境影響審査室

目次

第1章 総論.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 背景.....	1
1.3 これまでのモニタリング調査手法.....	2
1.4 UAV を活用した植生指数によるモニタリング調査手法.....	3
第2章 硫化水素による植物への影響について.....	6
2.1 葉の可視障害発現におよぼす影響.....	6
2.2 成長におよぼす影響.....	7
第3章 UAV を活用した植生指数によるモニタリング調査方法.....	8
3.1 使用機材.....	8
3.2 撮影範囲.....	10
3.3 撮影時期.....	11
3.4 植生指数の算出.....	12
3.5 植生指数による評価の考え方.....	14
3.6 その他の留意点.....	16

第1章 総論

1.1 目的

本ガイドラインは、地熱発電所の冷却塔から排出される硫化水素（ H_2S ）による植生への影響について、より効率的・客観的にモニタリングする手法として、UAV（Unoccupied aerial vehicle: 無人航空機、ドローン）を用いて植生指数を把握することによる手法の考え方、具体的な作業手順・分析方法を取りまとめたものである。

1.2 背景

地熱発電所による環境影響のうち冷却塔から排出される硫化水素による活力低下の影響を懸念する意見があり、環境保全の観点から発電所周辺の樹木について、活力に関してのモニタリング調査が長期的に実施している事例がある。ところが、現在の主要な評価手法は、目視による定性的な判断によるものであり、調査者の熟練度によって評価に差異が生じる恐れがあること、さらに調査木もサンプリングした数本に限定されてしまうこと等の短所がある。

一方で、地熱発電所の新設に係る環境影響評価手続きにおいて、経済産業大臣勧告などにより、冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響に関する事後調査などが求められた事案もあり、今後、モニタリング調査の必要性が増す可能性もある。

近年、UAVを用いたリモートセンシングは、時間・空間・スペクトル分解能を選択できること、詳細な植生高や多方向からの観測結果が得られることから、農業分野における細やかな栽培（精密農業）に向けたセンシングにおける利用が広まりつつあり、この手法を地熱発電所におけるモニタリング調査に活用することで、より効率的・客観的に実施することが期待できる。

1.3 これまでのモニタリング調査手法

これまで、地熱発電所における植物に関するモニタリング調査手法としては、樹木の活力の測定を用いている事例がある。この手法は、本来は、道路緑化や管理の分野で用いられてきた手法で、多くの場合、主に目視により樹木の形状等について評価基準を設けて行われてきた。主な調査項目およびその評価基準を表 1 に示す。

樹木の活力の評価には、「活力度」という指標が用いられている。活力度は、旧科学技術庁資源調査会において「複数の項目を持つランク評価法によるランク値の合計値または平均値」としている（科学技術庁調査会 1973; 井上・古関 1987）。この活力度という指標は、1970 年代初期の公害問題が生じたころから顕在化し、特に大きな比重を占めた大気汚染問題の中で、大気汚染が植物に与える影響すなわち被害度を調査測定することから転じて使用されるようになった（小澤ら 2002）。

定性的な形状の変化をもって評価する活力度は、熟練者が 2 人以上で検討しながらランク付けをして評価を行う必要がある。しかし、機器類を必要とせず簡単に行えることから、活力度調査法（ランク法）として、道路緑化の分野では、調査だけでなく、工事や維持管理作業の現場に広く使用されてきた（千葉ら 1991）。

一方で、熟練者を中心としたランク評価の平均値は、バラつきが小さく、信頼性も高い長所があるものの、主観が入りやすい方法であるため個人差が避けられないという短所も有している。

表 1 樹木活力度の調査項目および評価基準

調査項目		評価基準			
		1	2	3	4
全容	樹勢	旺盛な生育	やや異常	異常が明らか	衰退が進み回復見込なし
	樹形	正常	やや異常	異常が明らか	樹形崩壊
樹幹・枝	枝の枯損状況	全くなし	若干枯損あり	枯損はかなり進行	枯損部突出太枝が枯死
	枝葉の密度	正常・枝と葉のバランスがとれている	やや疎	葉つきがかなり疎	枯枝多く着葉量少ない
	枝の伸長	正常	やや異常	伸長悪く短く細枝となる	枝の伸長がほとんどない
葉	葉の形態	正常	すこし歪みあり	変形やや多い	変形が著しい
	葉の大きさ	正常	やや小さい	かなり小さい	著しく小さい
	葉色	正常	やや異常(クロロシス ^{注1} 有)	かなり異常(クロロシス有)	著しく異常
	ネクロシス ^{注2}	全くなし	わずかにある	かなり多い	褐変著しく多い
	粉塵付着	全くなし	わずかにある	かなり多い	著しく多い

注 1：クロロシスとは、葉の黄化症状のこと。

注 2：ネクロシスとは、葉の褐変壊死のこと。

出典：「環境庁委託調査 自然環境保全調査（改変状況調査手法検討調査）報告書 生物を中心とした環境諸性質の定期的継続調査について」（株式会社プレック研究所，1977 年）

1.4 UAV を活用した植生指数によるモニタリング調査手法

新たな調査手法として、「植生指数」を用いた調査手法がある。植生指数は、上空からの撮影画像の解析から求めるもので、表 2 に示す種類（NDVI、GNDVI、NDRE）があるが、地熱発電所におけるモニタリングでは、葉群の厚い植生での検出に向いている NDRE（正規化レッドエッジ指数）を用いた分析が相対的に有効である。それは、国内の多くの地熱発電所が立地する樹林環境は、葉群が垂直的に厚く重なり合っているためである。

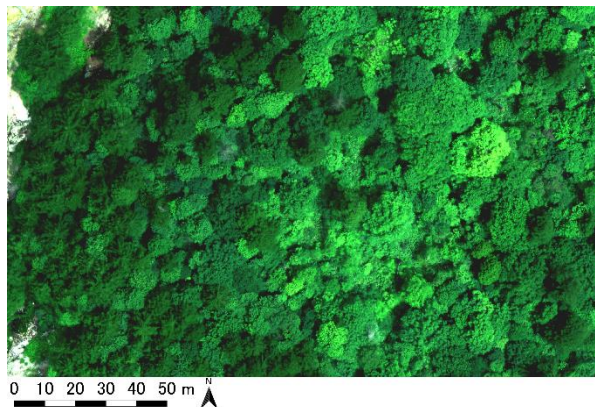
マルチスペクトルカメラを搭載した UAV を使用することにより、NDRE などの植生指数によるモニタリング調査に適したデータ（撮影画像）を取得することができる（図 1）。

表 2 植生指数

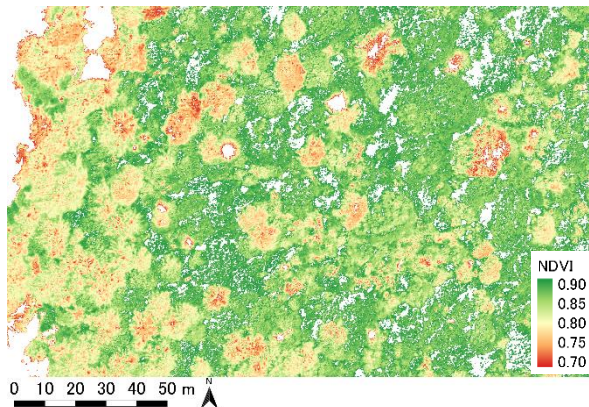
指数名	概要	式
NDVI（正規化植生指数） Normalized Difference Vegetation Index	植生とその活力度の検出に用いられる一般的な指数。クロロフィル量や葉量の指標として古くから使われるが、これらの増加に対して早い段階で指数値が飽和する傾向がある。	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
GNDVI（緑正規化植生指数） Green Normalized Difference Vegetation Index	NDVI の赤を緑に変更した指数。クロロフィル量や葉量の指標。NDVI に比べて指数値の飽和の程度が少ない。	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$
NDRE（正規化レッドエッジ指数） Normalized Difference Red Edge Index	NDVI の赤をレッドエッジ（赤と近赤外の推移帯）に変更した指数。クロロフィル量や葉量の指標。GNDVI よりさらに飽和の程度が少なく、クロロフィル量や葉量に対して指数値が線形に増加する傾向がある。NDVI に比べると、樹冠や成熟したトウモロコシ畑のような厚い葉群の植生における活性度の差の検出に向く。	$\frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$

※NIR : Near InfraRed（近赤外）

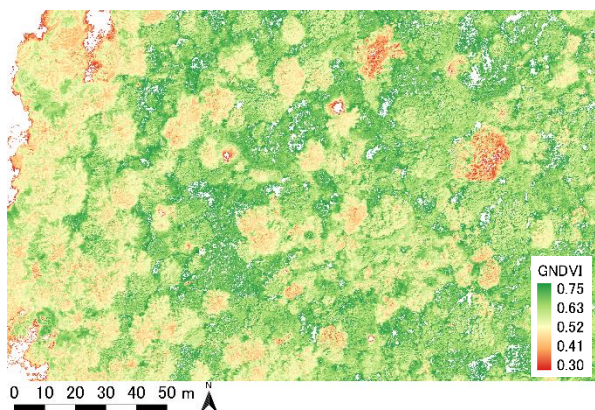
a. オルソトゥルーカラー



b. NDVI



c. GNDVI



d. NDRE

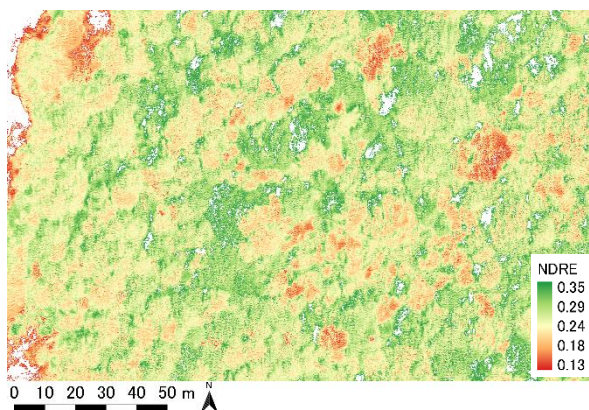


図 1 UAV による撮影画像（7 月撮影）と植生指数画像の例

【コラム：リモートセンシングによる植生指数について】

◆衛星リモートセンシングを用いた方法

衛星データを活用したリモートセンシング技術による植物の活力等を評価する研究は、穀物の収穫量予測への利用に着目したものや、森林の健全性評価手法に関するものが行われてきている。これらの研究は、植物による光の反射の特徴を生かし、簡易な計算式で植生の状況を表す、植生指数を評価方法として利用したものが多く、植生指数は、植物の量や活力の指標とされており、代表的なものに NDVI（正規化植生指数）がある。

しかし、衛星データを用いたリモートセンシングによる方法は、広域かつ定量的に行えるといった利点はあるものの、雲に覆われた場合、画像データが得られないことや、一般に 1 ピクセルの大きさが数メートル～数百メートル程度のため、狭い範囲での細かい情報を捉えられないという欠点がある。

◆UAV によるリモートセンシング技術を活用した方法

UAV を用いた植生の評価は、農業分野において、圃場に生育する作物の施肥のタイミングや収穫の時期を把握する目的で実施されてきている。圃場は、一般に開けた平坦地であることから、

撮影は容易で、近年では病虫害のモニタリングや防除などに関する利用が進んできている。

一方、樹林を対象とした UAV を活用した事例は見られない。

硫化水素による植生への影響の把握を目的に、火山性ガスの自然噴気孔の周辺（宮城県大崎市）において樹林を対象として実施した研究（2019～2020 年度の NEDO 研究事業）では、硫化水素の濃度勾配に応じて植生指数（NDVI 等）に差が生じる可能性があることを把握した。また、植生指数を NDVI だけでなく、GNDVI（緑正規化植生指数）、NDRE も含めて分析し、比較した結果、NDRE による解析結果が最もよく傾向を示しており、葉群の厚い樹林を対象とした場合、従来広く用いられてきた NDVI よりも NDRE が有効であることが明らかとなった。

ただし、植生指数で活力の低下を確認した場合でも、病虫害等による影響を受けている可能性もあり、活力低下の原因の判断には注意が必要である。

第2章 硫化水素による植物への影響について

2.1 葉の可視障害発現におよぼす影響

1950年代までは、高濃度(20~1000 ppm) 硫化水素の数時間程度の暴露実験が行われた(Benedict & Breen 1955, McCallan et al. 1936, McCallan & Setterstrom 1940, 森 1938, Thornton & Setterstrom 1940)が、欧米に生育する種々の樹木や草本を対象とした、葉の可視障害発現を指標とした硫化水素に対する相対的感受性の評価に留まっていた。

1970年代以降に、日本あるいは欧米に生育する植物を対象に、地熱発電所の周辺の大気中に含まれる程度の硫化水素(0.03~5 ppm)を一定濃度で暴露し、葉の可視障害発現におよぼす影響が調べられている(新エネルギー財団 1981・1983ab, De Kok et al. 1983, Krause 1979, Steubing 1979, Taylor & Selvidge 1984, Thompson & Kats 1978, Thompson et al. 1979・1982, Wonisch et al. 1999)。硫化水素暴露によって可視障害があらわれた植物は、供試された計44種(樹木23種[ササ類1種含む]、草本21種)のうち29種(樹木15種、草本14種)であった。可視障害が発現した濃度は樹木で0.05~5 ppm、草本で0.05~3 ppmと大きな幅があった。特に、針葉樹2種(カラマツ、ゴヨウマツ)と落葉広葉樹(ブナ)および草本のナスでは、0.05 ppmの硫化水素を3~4か月間連続で暴露すると葉に可視障害が発現した(図2)。このことから、葉の可視障害発現を指標とした場合、3樹種(カラマツ、ゴヨウマツ、ブナ)と草本のナスは硫化水素に対する感受性が高く、可視障害が発現する硫化水素の閾値濃度は0.05 ppmより低いことがわかった。

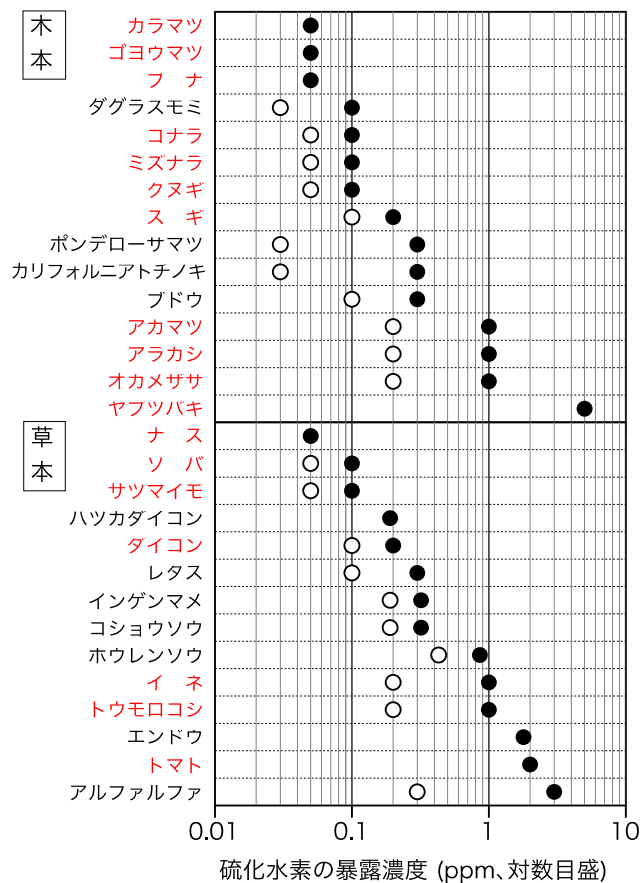


図2 植物の葉に可視障害が発現した硫化水素の暴露濃度

- 可視障害が発現した暴露濃度の下限値、○可視障害がみられなかった暴露濃度の上限値
- 植物名：赤：日本の樹種あるいは日本で供試された植物
- 黒：欧米の樹種あるいは欧米で供試された植物

2.2 成長におよぼす影響

1970年代以降、欧米では、成長におよぼす影響を調べるため、低濃度（0.03～1 ppm）の硫化水素を一定濃度で植物に暴露する実験が行われた（Ausma et al. 2017, Bennett et al. 1980, Birke et al. 2015, Coyne & Bingham 1978, De Kok et al. 1983・1989・2009, Durenkamp & De Kok 2002, Durenkamp et al. 2005・2007, Herschach et al. 2000, Krause 1979, Maas et al. 1985・1987ab・1988, Shinn et al. 1976, Steubing 1979, Stuiver & De Kok 2001, Thompson & Kats 1978, Thompson et al. 1979・1982, Westerman et al. 2000, Wonisch et al. 1999）。供試された計 21 種（樹木 6 種、草本 15 種）のうち、硫化水素暴露による有意な成長低下がみられた植物は 14 種（樹木 2 種、草本 12 種）あり、成長低下がみられた硫化水素の濃度は 2 種の樹木で 0.1～0.3 ppm であったが、草本では 0.19～0.8 ppm とやや幅があった（図 3）。特にブドウでは、0.1 ppm の硫化水素を 5 か月間暴露すると枝の成長量が対照区に比べて有意に低下したが、0.03 ppm の暴露区では対照区との有意な差はなかった。このことから、ブドウは成長低下を指標とした硫化水素に対する感受性が高く、成長を低下させる硫化水素の閾値濃度は 0.03 ppm と 0.1 ppm の間にあると考えられた。また、植物種によっては、硫化水素による葉の可視障害があらわれなくても、成長が低下する場合があることもわかった。

一方、日本国内において硫化水素の植物の成長への影響を調べた事例はなかった。

日本に自生する植物に対する硫化水素の影響に関する知見は 1980 年代以降も極めて乏しいことがわかった。

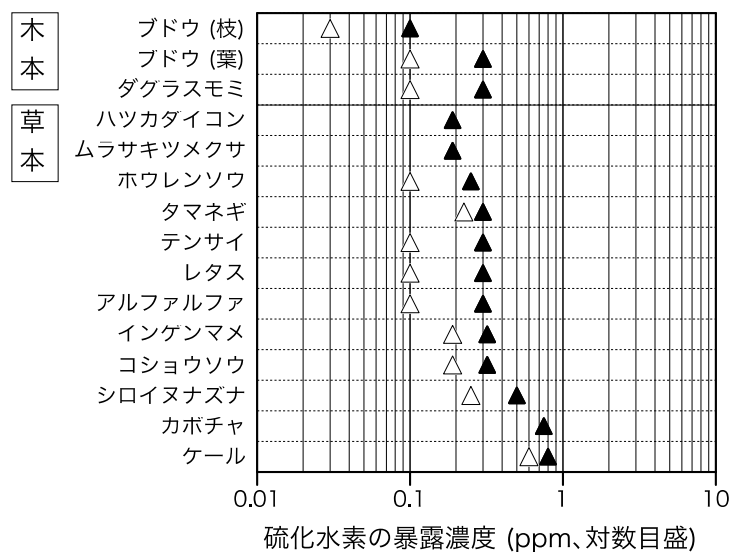


図 3 木本・草本各種に成長低下を引き起こす硫化水素の暴露濃度

▲成長低下があらわれた暴露濃度の下限値、△成長低下があらわれなかった暴露濃度の上限値。

植物はいずれも欧米で供試された種。

成長低下した植物器官：ダグラスモミは文献に記載なし

ハツカダイコンは葉と根

その他の草本はいずれも地上部全体

第3章 UAV を活用した植生指数によるモニタリング調査方法

3.1 使用機材

マルチスペクトルカメラを搭載する UAV を使用する。

- ✓ 撮影画像から植生指数を算出するので、マルチスペクトルカメラを搭載している UAV を利用する。マルチスペクトルカメラとは、青色 (B)、緑色 (G)、赤色 (R) の光のほか、人間の目に見えない近赤外等の波長帯の光も観測・撮影できるカメラである。対応できる UAV の機種は複数あるが、扱いやすい機種の一つとして P4 Multispectral (DJI 社) があり、この機種のマルチスペクトルカメラの観測波長帯は 5 帯である (表 3、図 4)。

表 3 調査に用いたマルチスペクトルカメラの観測波長帯 (nm)

UAV の名称	青	緑	赤	レッドエッジ	近赤外	RGB
P4 Multispectral	450±16	560±16	650±16	730±16	840±26	○

RGB：可視光センサの有無を表す。

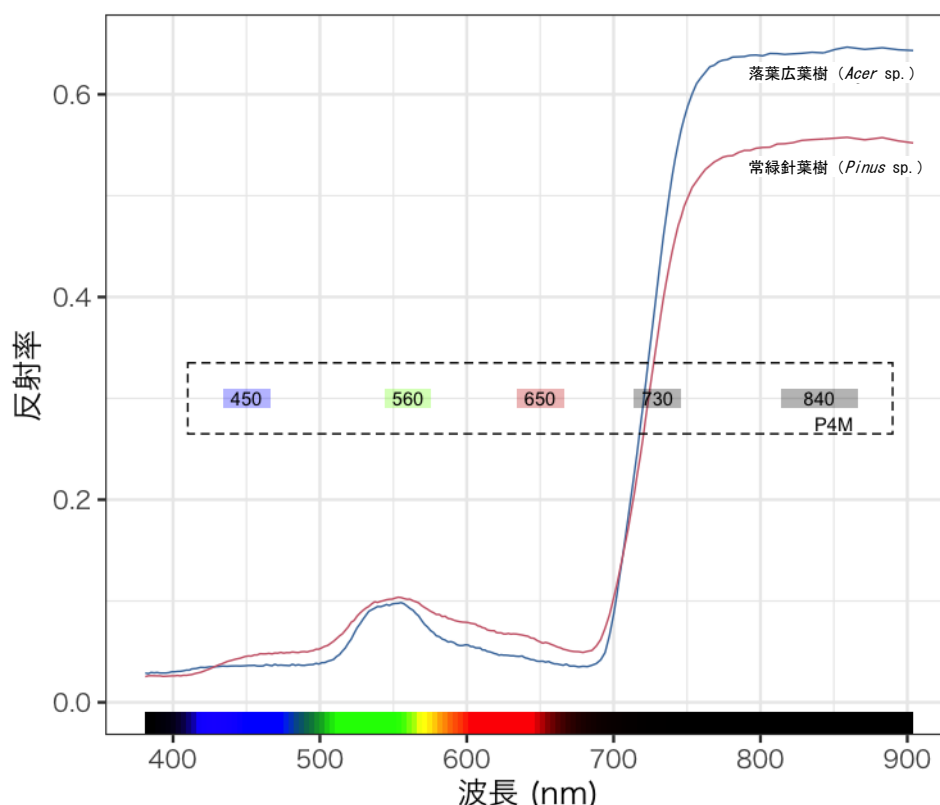


図 4 P4 Multispectral マルチスペクトルカメラの観測波長帯と落葉広葉樹と常緑針葉樹の反射特性

観測波長帯：点線矩形内の色付き矩形、P4M：P4 Multispectral の略。

反射特性：青線が落葉広葉樹 (*Acer sp.*)、赤線が常緑針葉樹 (*Pinus sp.*) を示す。

Acer sp. と *Pinus sp.* の反射率は Kokaly et al. (2017) による。



P4 Multispectral

【コラム：観測波長帯と植生指数について】

P4 Multispectral のカメラは、レッドエッジの波長帯は1帯のみであるが、複数の波長帯を観測できるマルチスペクトルカメラもある。その一例として、RedEdge・MX Dual Camera Imaging System (MicaSense 社製のマルチスペクトルカメラ) があり、この機種を用いた場合の NDRE を図 5 に示す。この機種を用いると、NDRE は近赤外：842 nm と、レッドエッジ：705 nm、717 nm、740 nm のそれぞれの組み合わせを算出することができる。自然噴気孔周辺において生育するキタゴヨウを対象に観測した結果では、計算に用いたレッドエッジの観測波長帯が赤に近い (705nm) より近赤外域に近い (740nm) ほど相関係数が高くなっている。このように、近赤外域に近いレッドエッジの観測波長帯を観測できるマルチスペクトルカメラを用いると、植生指数の変化を感度よく観測することができる。

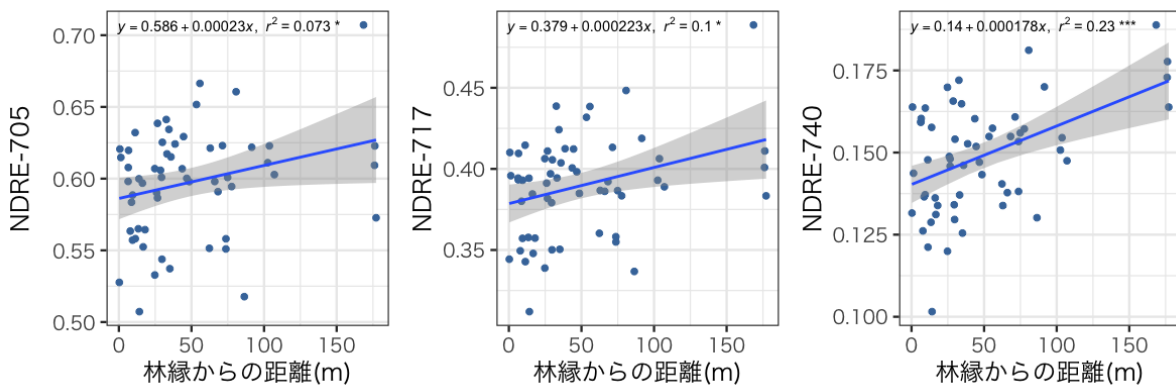


図 5 キタゴヨウにおける林縁からの距離に対する植生指数の傾向

RedEdge・MX Dual Camera Imaging System によって得られた異なる観測波長帯を用いて計算した NDRE を示す。縦軸ラベルの、植生指数のハイフンに続く数字は、植生指数の計算に用いられた波長。灰色は 95%信頼区間。

3.2 撮影範囲

撮影範囲は基本的に冷却塔の主風向の風下方向の樹林環境とする。その際、撮影範囲に偏りなく分布している種について影響の有無を確認することが望ましい。

- ✓ モニタリング調査の目的が、冷却塔から排出される硫化水素による影響の確認であることから、撮影範囲は基本的に冷却塔の主風向の風下方向の樹林環境とする。UAV による撮影は、短時間で広域に行えることから、方向を限定しないで、発電所の周囲全体で行うことも可能であるが、撮影範囲が広くなるにつれて、必要となる予備バッテリー数が多くなることや、画像解析に係る時間が膨大になる懸念もあることも留意する。なお、飛行設定にもよるが、200m×150m の範囲を P4 Multispectral で 1 回撮影した場合の実績として、飛行所要時間が約 40 分、消費バッテリー数が 2 本であった。
- ✓ 撮影範囲は、想定される硫化水素の拡散範囲よりも広めとする。硫化水素による植生への影響が生じる可能性は、発電所近隣で高く、離れるにしたがって低くなると想定されることから、発電所から離れた場所を対照区と設定して、影響の検証ができるようにすることが重要である。その際、現地において、発電所近隣および離れた場所での硫化水素の濃度を把握しておくのが良い。
- ✓ 樹種によっても植生指数が異なることから、樹種の分布も考慮して設定することが必要である。樹種の確認は、現地踏査により実施することが必要である。
- ✓ 硫化水素に対する感受性は、樹木ごとに異なることから、影響有無の確認にあたっては、同一の樹種で比較する。影響の把握には、感受性の高い樹種を選定するのが望ましいが、現時点で硫化水素への感受性に関する樹種間の差について、知見が少ない。そのため、複数の樹種を選定して、検証するのが良い。なお、既存文献によれば、ゴヨウマツ（ヒメコマツもしくはキタゴヨウ）とブナは、硫化水素に対する感受性が比較的高い樹種であることが報告されている。
- ✓ なお、地形による水分条件等の違いによって植生指数に影響が出てくる可能性もあるため、範囲設定の際は、可能な限り平坦な場所を選択し、それが困難な場合は尾根や沢等の地形を把握した上で設定するのが良い。

3.3 撮影時期

撮影時期は、優占する樹種が落葉樹か針葉樹かの違いに関わらず、生育最盛期の7月に設定する。

- ✓ 植生指数の値は、展葉から落葉までの期間における葉の量や活性の変化に伴い変化するため、撮影時期は、優占する樹種が落葉樹か針葉樹かの違いに関わらず、生育最盛期の7月に設定する。
- ✓ 影響は、発電所からの距離による植生指数の変化により判断する。一方で、モニタリング調査では経年変化を追跡することも想定される。その場合、季節変化による影響を避け撮影時期を揃えることで、検証が可能になる。

3.4 植生指数の算出

撮影したマルチスペクトル画像をもとに植生指数（NDRE）を計算する。NDRE の評価は、個体単位とし、樹冠全体を対象とする。

- ✓ UAV での撮影画像は、Pix4Dmapper (Pix4D 社) による解析ソフトでオルソモザイク化を行う。なお、オルソモザイクは、放射照度による反射率変換後の観測波長帯ごとの画像から構成されるマルチスペクトル画像である。
- ✓ オルソモザイク化したマルチスペクトル画像をもとに NDRE を計算する。目的に応じて、NDRE 画像の地上解像度は、マルチスペクトル画像と同等に、あるいは、より低く設定する。
- ✓ NDRE の評価の単位は、排出される蒸気の影響が樹冠のどの部分に生じるのか想定できないため、個体レベルとし、樹冠全体を対象とする。個体ごとに NDRE を求めるために、樹冠の範囲を可視画像でトレースする。なお、樹冠の辺縁は隣接する樹冠と重なっている場合もあり、樹冠の抽出には注意が必要である。評価対象とする個体は、広い樹冠を持つ個体に絞り込むと、効率的である。
- ✓ 画像に雲などの明らかな影が生じた範囲は、除去する等の対応を行い、NDRE の解析や解釈から除く。

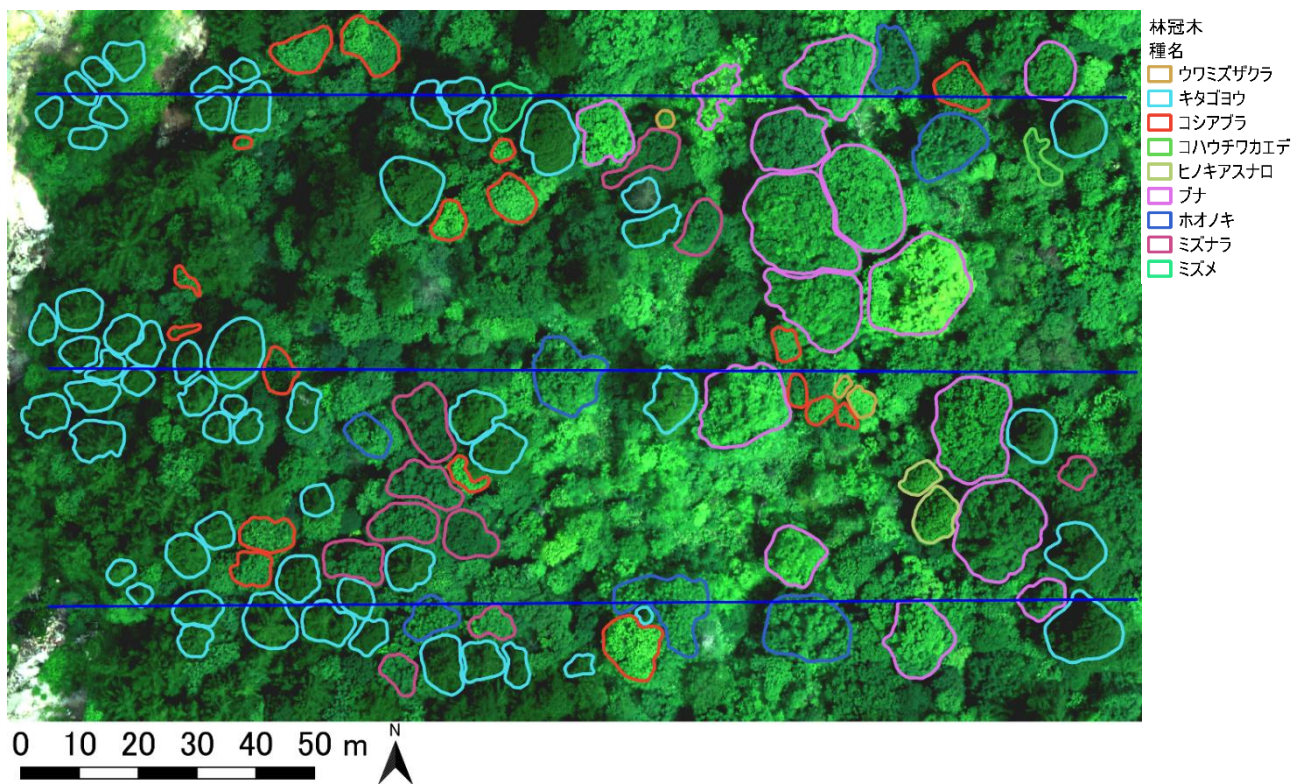


図 6 UAV による撮影画像と樹冠トレースの例 (7 月撮影)

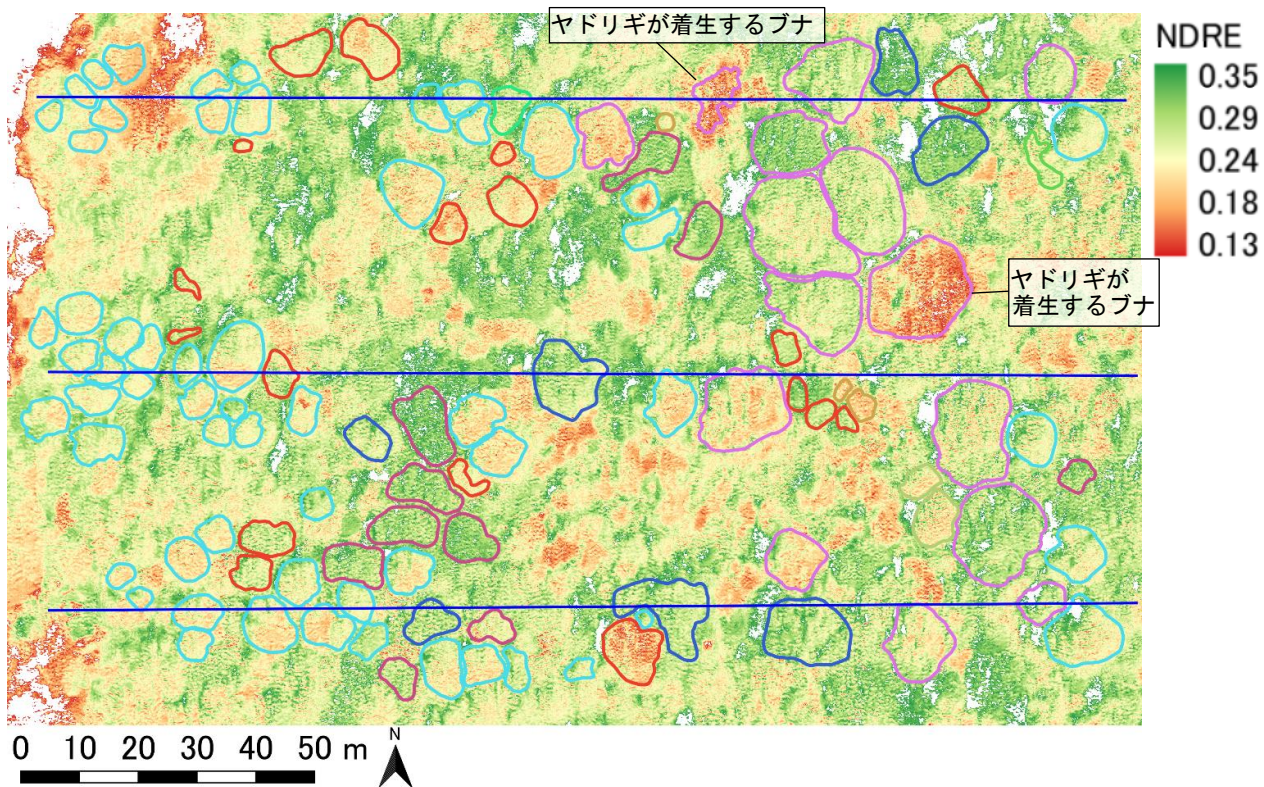


図 7 UAV 撮影画像から求めた NDRE 画像 (7 月撮影)

3.5 植生指数による評価の考え方

硫化水素による影響は、植生指数（NDRE）の低下の度合いを樹種別に判断する。

- ✓ 影響は、発電所からの距離による NDRE の低下の度合いを樹種別に判断する。
- ✓ NDRE の経年的な値の変化を見ることで、影響の有無を確認することもできる。前年との値の差分による比較により、極端に NDRE の値が低くなった場所が抽出できる。
- ✓ NDRE の値が低い個体が解析によって確認された場合でも、その原因については画像からは判断できない。そのため、NDRE が低い原因について、現地で確認する必要がある。ブナやミズナラなどの場合、ヤドリギが着生して枝が枯れるなどにより、NDRE が低下することがあるが、その場合、NDRE の低下は単木的である。蒸気や硫化水素等のガスによる影響の場合、複数個体が同所的に NDRE を低下させるものと考えられる。

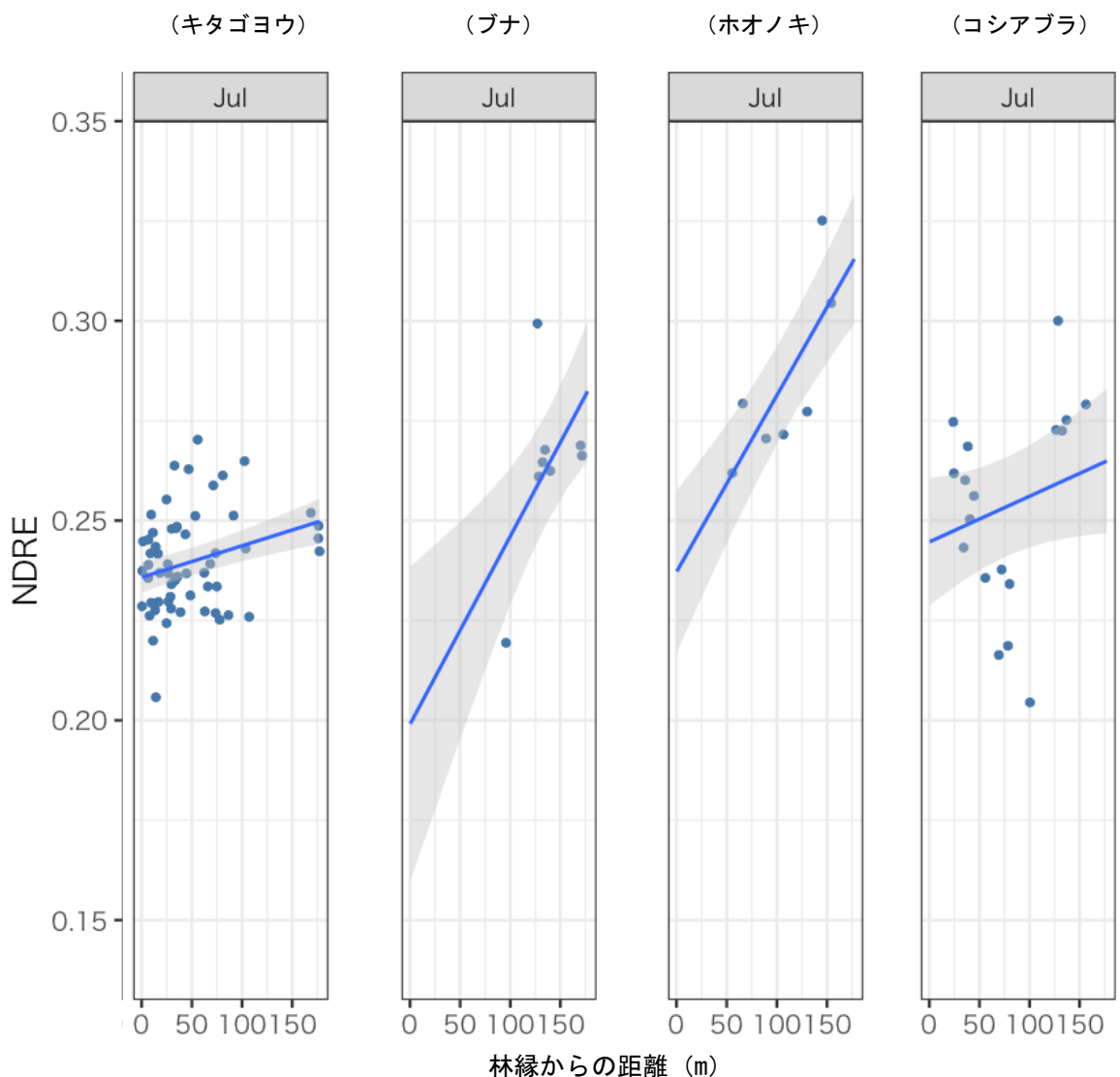


図 8 樹種による植生指数（NDRE）の相違

3.6 硫化水素の分布状況の把握

硫化水素による影響を検討するため、硫化水素の分布状況を把握する。

- ✓ NDRE の変化の有無と硫化水素による影響を考察するため、調査範囲における環境条件として、硫化水素の分布状況を把握する必要がある。
- ✓ 測定地点は、冷却塔からの距離減衰が把握できるように、複数の地点を設置することが望ましい。
- ✓ 硫化水素の濃度は、可能であれば、一定期間を通して連続的に測定することが望ましい。連続測定が難しい場合には、季節的な変動を把握できるように定期的に観測をする。
- ✓ 硫化水素の測定精度は、ブナなどについては、0.05ppm の硫化水素を2～3 か月間連続曝露させることにより可視障害が発現したとの報告があることから、測定濃度の測定下限値が0.01ppm 程度を上回る精度であると望ましい。

3.7 その他の留意点

UAV 飛行を計画する際の留意点について、以下に整理した。なお、UAV やアプリケーションの動作手順等については各マニュアルを参照されたい。

(1) 許認可

森林をフィールドとした UAV の飛行は、目視外になる場合が多い。また、オルソモザイク化する画像取得を目的とした飛行においては、自動飛行プログラムによるものとなるので、目視外が前提となる可能性が高い。それらの飛行には、地方航空局長の承認が必要となる。

必要な許認可については、国土交通省が運営する「ドローン情報基盤システム (DIPS)」より申請を行うことができる。

また、国有林で行う場合は、入林許可申請が必要である。

(2) 飛行計画

飛行計画は「GSP (DJI GS Pro)」アプリを使用し、以下の設定を行う。

- アプリの地図写真を参照しながらの飛行範囲の設定
- 飛行高度やオーバーラップ率、サイドラップ率、カメラ設定など、各種パラメータの設定

なお、飛行計画の設定は、送信機と接続していない状態でも可能である。森林域では、インターネットの接続が難しくなるので、事前に、インターネットと確実に接続可能な場所で行っておく。

(3) 撮影範囲

地形図により、ホームポイント、撮影範囲およびその周辺の地形を事前に把握するとともに、現地でも十分に確認する。特に、飛行計画の段階で、ホームポイントから飛行目的地の高度差を認識しておくことが必要不可欠である。

また、品質の良いオルソ画像を得るには、歪みの少ない写真の中心付近を使うため、撮影範囲は解析対象範囲よりも大きくとる必要がある。できれば広めに、少なくとも解析対象範囲の境界直上を UAV が通過しておくことが望ましい。

(4) 撮影時の気象条件

雨天、霧の中では飛行できない。また、風には注意が必要である。

撮影後の解析精度をあげるために、高曇り、あるいは、晴天時の正午頃に撮影することが望ましい。

また、地形に起伏のある場所での撮影の場合、時間帯によっては、撮影画像に陰影が強く出てしまい解析に誤差がでる可能性があるため、注意が必要である。

(5) 撮影時期

落葉広葉樹、常緑針葉樹に関わらず、葉の撮影は生育最盛期の夏季 (7月) に実施することが望ましい。年一度のモニタリングを複数年にわたり継続する場合、撮影後の解析精度の低下が懸念されるので、展葉・落葉期を避ける。

(6) 飛行高度

モニタリングに必要な解析対象範囲とオルソモザイク化する画像の地上解像度を決定したうえで、飛行高度を確定する。その際、ホームポイントから 150m までが飛行可能な高度であることから、飛行目的地との高度差を考慮する必要がある。

(7) オーバーラップ率・サイドラップ率の設定

国土交通省の現在の推奨基準（UAV を用いた公共測量マニュアル（案） 第 57 条 運用基準）は、オーバーラップ率 80%、サイドラップ率 60%である。しかし、森林を対象とする場合は、撮影対象である林冠層の凹凸や風による樹冠形状の変化が大きいため、オルソモザイク化する画像の作成のみを目的としていても、90%等、可能な限り高めのオーバーラップ率、サイドラップ率とすることを推奨する。

山地では撮影コースを斜面に沿って設定することが多く、コースの高低差も考慮して余裕を持った設定をすることが望ましい。

(8) マージン

より良いオルソモザイク化画像を得るためには、解析対象範囲の外側もある程度含んだ飛行範囲が必要である。そのため、そもそもの撮影範囲をある程度広くとることも勿論であるが、このマージン機能を使えば 30m 程度までは一律に設定することができる。

(9) ホバリング設定

撮影後の画像合成精度を高めるために、無風～弱風の場合は「ホバリング」設定を推奨する。ただし、飛行時間との兼ね合いで、オフにして撮影することも可能である。

(10) 機体との通信

機体との通信に使われている 2.4GHz 帯の周波数は、無線 LAN や Bluetooth などの小型端末でも多く利用しており、混線によって操作できなくなるリスクがある。また、山の中にある高压電線からの電磁波の影響も無視できない場合があり、注意が必要である。

(11) バッテリー

空撮設定条件により飛行時間は大きく変化するため、予備バッテリーの用意は必須である。特に、飛行高度・飛行速度・オーバーラップ率・ホバリング設定等の設定を変更した時に飛行時間（バッテリー消費）は大きく変化する。

また、風が強い条件下での飛行もバッテリー消費が大きくなる。空撮設定条件と 1 回の飛行に必要なバッテリー数を事前に確認し、トラブルが生じた際の対応のために予備バッテリーを十分に用意しておく必要がある。

(12) 安全に飛行するための留意点

以下に、森林域において UAV を安全に飛行するための留意点について整理する。

- 森林における UAV 飛行に当たっては、UAV 本体が目視外になるケースが多く、航空法改正により無人航空機の飛行の許可・承認が必要な場合がある。
- 森林外からの UAV の離発着は極力避けるのが良いが、民地の多い区域において公道等を利用する場合は、道路管理者等からの承諾等が必要になる。
- 許可・承認の手続きを行った場合は、必ず許認可書等を現地に携帯する。
- 安全監視員を必ず同行させる。
- このほか、一般的な飛行ルールも含めて、以下が参考となる。
 - ・ UAV を用いた公共測量マニュアル（案）（平成 29 年 3 月改正）
UAV を用いた測量手法のマニュアル
 - ・ 無人航空機飛行マニュアル（国土交通省空局標準マニュアル（2020 年 12 月 25 日版））
航空法に基づく許可および承認を受けて飛行させる際に必要な手順等が記載
 - ・ 小型無人機等飛行禁止法関係
警察庁のウェブページ。平成 28 年 3 月 18 日に公布され、4 月 7 日から施行。
 - ・ 測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き
一般社団法人日本写真測量学会が取りまとめた安全運航のための手引き。
 - ・ 地理院地図（人口集中地区地区 平成 27 年 総務省統計局）
国土地理院が提供する地図サービス（地理院地図）で、DID の範囲を表示可能。
 - ・ 地理院地図（空港等の周辺の空域）
国土地理院が提供する地図サービス（地理院地図）で、国土交通省航空局による「空港等の周辺の空域」の範囲を表示可能

引用文献

- 井上忠義, 古関堅治 (1987) 緑化の計測. 土木施工 28(10): 80-93.
- 科学技術庁資源調査会 (科学技術庁資源調査所) (1973) 環境指標としての生物指標. 高密度地域における資源利用と環境保全の調和, 和達清夫, 大蔵省印刷局, 東京, 192pp.
- Ausma, T., S. Parmar, M.J. Hawkesford, and L.J. De Kok. 2017. Impact of Atmospheric H₂S, Salinity and Anoxia on Sulfur Metabolism in *Zea mays*. In: L.J. De Kok et al. (eds.), Sulfur Metabolism in Higher Plants - Fundamental, Environmental and Agricultural Aspects, Proceedings of the International Plant Sulfur Workshop, DOI 10.1007/978-3-319-56526-2_9, Springer International Publishing AG, pp.93-101.
- Benedict, H.M., and W.H. Breen. 1955. The Use of Weeds as a Means of Evaluating Vegetation Damage Caused by Air Pollution. Proc. 3rd National Air Pollution Symp., Pasadena, Calif., April 18- 20, 1955., 177- 190. (蓑原・小林 1978、Minor 1969、戸塚 1981 より)
- Benedict, H.M., D.D. Davis and A.S. Heagle. 1974. Dose Responses of Vegetation to minor air pollutants. Presentaion at the 67th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Denver Colorado, June 9-13, 1974.
- Bennett, J.P., K. Barnes and J.H. Shinn. 1980. Interactive effects of H₂S and O₃ on the yield of snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 20: 107-114.
- Birke, H., L.J. De Kok, M. Wirtz and R. Hell. 2015. The Role of Compartment-Specific Cysteine Synthesis for Sulfur Homeostasis During H₂S Exposure in Arabidopsis. *Plant Cell Physiology*, 56: 358-367, <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu166>
- Coyne, P.I., and G.E. Bingham. 1978. Photosynthesis and stomatal light responses in snap beans exposed to hydrogen sulfide and ozone. *Journal of Air Pollution Control Association*, 28: 1119-1123.
- De Kok, L.J. 1989. Responses of Sulfur Metabolism in Plants to Atmospheric Hydrogen Sulfide. *Phyton* (Austria), 29 (2): 189-201.
- De Kok, L.J., C.R. Thompson, J.B. Mudd and G. Kats. 1983. Effect of H₂S Fumigation on Water-soluble Sulfhydryl Compounds in Shoots of Crop Plants. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 111: 85-89.
- De Kok, L.J., K. Stahl and H. Rennenberg. 1989. Fluxes of atmospheric hydrogen sulphide to plant shoots. *New Phytologist*, 112: 533-542.
- De Kok, L.J., E.E. Stuiver and I. Stulen. 1998. Impact of Atmospheric H₂S on Plants. In: L.J. De Kok and I. Stulen (editors), Responses of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change, Backhuys Publishers, Leiden, pp.51-63.
- De Kok, L.J., C.E.E. Stuiver, S. Westerman and I. Stulen. 2002. Elevated Levels of Hydrogen Sulfide in the Plant Environment: Nutrient or Toxin. In: K. Omasa, et al. (editors), Air Pollution and Plant Biotechnology, Springer-Verlag, Tokyo, pp.201-219.
- De Kok, L.J., L. Yang, C.E.E. Stuiver and I. Stulen. 2009. Negative vs. Positive Functional Plant Responses to Air Pollution: A Study Establishing Cause-Effect Relationships of SO₂ and H₂S. In: A.H. Legge (editor), Air Quality and Ecological Impacts, Development in Environmental Science, Volume 9, Elsevier, pp.121-135.
- Durenkamp, M., and L.J. De Kok. 2002. Impact of atmospheric H₂S on growth and sulphur metabolism of *Allium cepa* L. *Phyton* (Austria), 42 (3): 55-63.
- Durenkamp, M., L.J. De Kok and S. Kopriva. 2007. Adenosine 5'-phosphosulphate reductase is regulated differently in *Allium cepa* L. and *Brassica oleracea* L. upon exposure to H₂S. *Journal of Experimental Botany*, 58: 1571-1579, <https://doi.org/10.1093/jxb/erm031>
- Durenkamp, M., F.S. Posthumus, C.E.E. Stuiver and L.J. De Kok. 2005. Metabolism of atmospheric sulfur gases in onion. In: K. Omasa, I. Nouchi and L.J. De Kok (editors), Plant Responses to Air Pollution

- and Global Change, Springer-Verlag, Tokyo, pp.3-11.
- Herschbach, C., E. van der Zalm, A. Schneider, L. Jouanin, L.J. De Kok, and H. Rennenberg. 2000. Regulation of Sulfur Nutrition in Wild-Type and Transgenic Poplar Over-Expressing γ -Glutamylcysteine Synthetase in the Cytosol as Affected by Atmospheric H₂S. *Plant Physiology*, 124: 461-473.
- Krause, G.H.M. 1979. Relative Phytotoxizität von Schwefelwasserstoff. *Staub - Reinhaltung der Luft*, 39 (5): 165-167.
- Maas, F.M., L.J. de Kok and P.J.C. Kuiper. 1985. The Effect of H₂S Fumigation on Various Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Cultivars. Relation between growth inhibition and accumulation of sulphur compounds in the plant. *Journal of Plant Physiology*, 119: 219-226.
- Maas, F.M., L.J. de Kok, J.L. Peters and P.J.C. Kuiper. 1987a. A Comparative Study on the Effects of H₂S and SO₂ Fumigation on the Growth and Accumulation of Sulphate and Sulphydryl Compounds in *Trifolium pratense* L., *Glycine max* Merr. and *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Experimental Botany*, 38: 1459-1469.
- Maas, F.M., E.N. van Loo and P.R. van Hasselt. 1988. Effect of long-term H₂S fumigation on photosynthesis in spinach. Correlation between CO₂ fixation and chlorophyll a fluorescence. *Physiologia Plantarum*, 72: 77-83.
- Maas, F.M., L.J. de Kok, I. Hoffmann and P.J.C. Kuiper. 1987b. Plant responses to H₂S and SO₂ fumigation. I. Effects on growth, transpiration and sulfur content of spinach. *Physiologia Plantarum*, 70: 713-721.
- McCallan, S.E.A., A. Hartzell and F. Wilcoxon. 1936. Hydrogen sulfide injury to plants. *Contributions from Boyce Thompson Institute*, 8: 189-197. (蓑原 1985、蓑原・小林 1978 より)
- McCallan, S.E.A., and C. Setterstrom. 1940. Toxicity of ammonia, chlorine, hydrogen cyanide, hydrogen sulphide, and sulfur dioxide gases. I. General methods and correlations. *Contributions from Boyce Thompson Institute*, 11: 325-330. (蓑原 1985、蓑原・小林 1978、戸塚 1981 より)
- 蓑原 善和. 1985. 地熱発電と植物影響. 地熱, 22 (3) (Ser.88): 234-248.
- 蓑原 善和, 小林 俊光. 1978. 硫化水素の植物影響. 地熱エネルギー, 3 (2): 12-22.
- 森 隆也. 1938. 硫化水素瓦斯の植物に及ぼす毒作用. 生態学研究, 4 (4): 315-331.
- 新エネルギー財団. 1981. 昭和 55 年度 硫化水素ガスが植物に及ぼす影響調査報告書.
- 新エネルギー財団. 1983a. 昭和 57 年度 硫化水素ガスが植物に及ぼす影響調査報告書.
- 新エネルギー財団. 1983b. 通商産業省委託調査 硫化水素ガスが植物に及ぼす影響調査報告書 (要約).
- Shinn, J.H., B.R. Clegg, M.L. Stuart and S.E. Thompson. 1976. Exposures of field-grown lettuce to geothermal air pollution - photosynthetic and stomatal responses. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 11 (10/11): 603-612.
- Steubing, L. 1979. Wirkung von Schwefelwasserstoff auf höhere Pflanzen. *Staub - Reinhaltung der Luft*, 39 (5): 161-164.
- Stuiver, C.E.E., and L.J. De Kok. 2001. Atmospheric H₂S as sulfur source for *Brassica oleracea*: kinetics of H₂S uptake and activity of O-acetylserine (thiol)lyase as affected by sulfur nutrition. *Environmental and Experimental Botany*, 46: 29-36.
- Taylor, G.E., Jr., and W.J. Selvidge. 1984. Phytotoxicity in Bush Bean of Five Sulfur-Containing Gases Released from Advanced Fossil Energy Technologies. *Journal of Environmental Quality*, 13: 224-230.
- Temple, P.J., J. En-Jang Sun and G.H.M. Krause. 1998. Peroxyacyl Nitrate (PANs) and Other Minor Pollutants. In: R.B. Flagler (ed.), Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation, 2nd Edition, Air & Waste Management Association, pp.6-1-6-21.

- Thompson, C.R., and G. Kats. 1978. Effects of continuous hydrogen sulfide on crops and forest plants. *Environmental Science and Technology*, 12: 550-553.
- Thompson, C.R., G. Kats and P.J. Dawson. 1982. Low-level effects of H₂S and SO₂ on grapevines, pear, and walnut trees. *HortScience*, 17: 233-235.
- Thompson, C.R., G. Kats and R.W. Lennox. 1979. Effects of fumigating crops with hydrogen sulfide or sulfur dioxide. *California Agriculture*, 33 (3): 9-10.
- Thornton, N.C., and C. Setterstrom. 1940. Toxicity of ammonia, chlorine, hydrogen cyanide, hydrogen sulphide, and sulphur dioxide gases. III. Green plants. *Contributions from Boyce Thompson Institute*, 11: 343-356.
- 戸塚 績. 1981. 硫黄酸化物及び硫化水素. 大気汚染の植物影響に係る環境影響評価マニュアル (案), 日本公衆衛生協会, pp.3-127.
- Westerman, S., L.J. De Kok, C.E.E. Stuiver and I. Stulen. 2000. Interaction between metabolism of atmospheric H₂S in the shoot and sulfate uptake by the roots of curly kale (*Brassica oleracea*). *Physiologia Plantarum*, 109: 443-449.
- Wonisch, A., M. Tausz, M. Müller, W. Weidner, L.J. De Kok and D. Grill. 1999. Treatment of Young Spruce Shoots with SO₂ and H₂S: Effects on Fine Root Chromosomes in Relation to Changes in the Thiol Content and Redox State. *Water Air and Soil Pollution*, 116: 423-428.