

無人航空機 (UAV) の空撮画像を利用したチャノミドリヒメヨコバイ によるチャ新芽被害の推定および被害分布図の作成^{†1}

小澤朗人^{1)a}・内山 徹²⁾・亀山阿由子^{3)a}・古屋 聡²⁾・大石哲也²⁾

¹⁾農林環境専門職大学, ²⁾農林技術研究所茶業研究センター, ³⁾中遠農林事務所

Estimating of the Rate of New Shoots Damaged by Tea Green Leafhopper *Empoasca onukii* Matsuda, and the Distribution Mapping of Damaged Shoots Using Aerial Image Data Obtained by an Unmanned Aerial Vehicle

Akihito Ozawa^{1)a}, Toru Uchiyama²⁾, Ayuko Kameyama^{3)a}, So Furuya²⁾ and Tetsuya Oishi²⁾

¹⁾Shizuoka Professional Univ. of Agri., ²⁾ Tea Research Center / Shizuoka Res. Inst. of Agri. and For., ³⁾Shizuoka Pref. Chuen Office of Agri. and For.

Abstract

Various insecticides were sprayed during the second and third tea seasons, and 12 to 24 plots (approximately 10 m² / plot) were set up in which the density of the tea green leafhopper *Empoasca onukii* Matsuda was adjusted. The visual images of these tea fields were photographed using an unmanned aerial vehicle before the plucking season. The mean values of RGB colors were extracted from the image of each treated section and various arithmetic expressions were constructed by combining them differently. The correlation between these values of the formulas (x) and the rate of damaged shoots by the insects (y) was analyzed. According to the result, in the second tea season, a significant high correlation was recognized between many calculation formulas (x) and the damage rate (y) by the insects. However, in the third tea season, a significant correlation was found only with a few of equations. Moreover, the contribution rate was low. When the data regarding the second season for 2016 and 2017 were compiled, some estimation formulas were obtained for estimating the percentage of damaged shoots (y : angular conversion value) by *E. onukii*, i.e., $y = 0.0205R - 1.54$ ($n = 36$, $R^2 = 0.645$, $p < 0.01$), and $y = 0.00945(R+G) - 1.76$ ($n = 36$, $R^2 = 0.602$, $p < 0.01$), where R and G are the mean values of red and green respectively. Additionally, the distribution map according to the degree of damage by applying an estimation formula ($x = R+G$) reflected the difference in the degree of damage appropriately.

キーワード : チャ, チャノミドリヒメヨコバイ, ドローン, 被害推定, リモートセンシング, UAV

I 緒 言

近年, 急速な技術革新が進む小型無人航空機 (以下,

UAV) は, 測量や土木建築分野はもとより, 農業分野においても農作物生態情報のリモートセンシング⁴⁾や上空からの農薬散布利用への技術開発^{9,10)}が進み, いわゆるスマート農業への導入が始まっている¹⁵⁾. 例えば, 水稻における UAV のマルチスペクトル画像を用いた葉面積変化

^{†1} 本研究の一部は, 日本茶業学会研究発表会(2018年11月, 島田市)において発表した。

^a研究実施時: 農林技術研究所茶業研究センター

の検出³⁾、熱赤外カメラ搭載の UAV を用いたトウモロコシの虫害検出¹³⁾、マルチスペクトルカメラ搭載 UAV によるバレイショの生育診断²³⁾、さらには 3 次元の合成画像の活用した植物 1 個体ごと形質推定²⁴⁾など、UAV を活用した様々な技術が開発されつつある。一方、チャ分野においては、UAV によるマルチスペクトル画像を利用した摘採取量の推定技術²⁵⁾などが開発されつつあるが、筆者らは、チャを加害する病害虫に着目し、UAV によるチャ園の空撮画像を利用した病害虫の被害診断技術の開発に取り組んできた^{17,21)}。

草姿が立体的で上空から全体像が把握しにくい果樹や野菜に比べると、チャ樹は撮影対象となる植物体(摘採面)が平面的に広がり、植物体のセンシングに不必要な土壌表面の映り込みも少ないため、UAV からのリモートセンシングを比較的適用しやすい農作物と考えられる¹⁹⁾。筆者らは、チャ病害虫の中でも、特に摘採面上から見ると発病が面的に拡大するチャ炭疽病を対象に、UAV が空撮した発病ほ場の可視画像から抽出した RGB 三原色の色データを用いて単位面積当たりの発病葉数を推定する手法の開発に取り組んできた^{17,19)}。その結果、RGB 三原色の色データを組み合わせた演算式により得られた数値を説明変数に、発病葉数を従属変数とする直線回帰式により発病葉数を推定することが可能であることを示すとともに、推定式に基づいた発病程度別の発生分布図を作成した^{20,21)}。

本研究では、主なチャ病害虫の中で、被害が進むと摘採面上の新芽が面的に黄化するなど色彩の変化が経験的に知られているチャノミドリヒメヨコバイ *Empoasca onukii* Matsuda を対象として、UAV が空撮したチャ園の可視画像から、新芽被害の程度を定量推定する方法を開発するとともに、被害程度を可視化するためのマッピングを試みた。本稿では、その結果を報告する。

II 材料及び方法

1 試験ほ場

菊川市倉沢の茶業研究センター内において、様々な殺虫剤を用いてチャノミドリヒメヨコバイ(以下、ヨコバイ)の防除効果を比較する試験を実施しているほ場を本研究の空撮に供試した。当該ほ場においては、二番茶または三番茶の萌芽～開葉期に様々な殺虫剤の散布により人為的にヨコバイの発生密度が異なる区画を複数設定した(2016年:計24区画,2017年:計12区画)。

2016年6月20日(二番茶摘採期)および8月15日(三番茶摘採期)の撮影では同じ圃場(面積約8.5a, 処

理別の区画面積約10m²)を供試し、2017年6月27,29,および7月3日(二番茶摘採期)の撮影では2016年とは別のほ場(面積約8a, 区画面積約10m²)を供試した。

2 被害および害虫密度調査

前述1のほ場において、2016年は、二番茶生育期にヨコバイのみ、三番茶生育期にはヨコバイおよびチャノキイロアザミウマ(以下、アザミウマ) *Scirtothrips dorsalis* Hood の密度調査を、日本植物防疫協会の新農薬実用化試験調査法¹⁴⁾に従って区画ごとに実施した。2017年二番茶では虫の密度調査は行わなかった。

2016年のヨコバイまたはアザミウマの密度調査では、薬剤散布後一定の期間を過ぎた時点から期間を開けて複数回、チャ樹肩部の25×30cm粘着板への叩き落とし調査を実施し、1区画当たり4カ所の落下成虫合計値を算出して解析に用いた。

次に、ヨコバイまたはアザミウマ(アザミウマは2016年三番茶のみ)による新芽被害の調査は、2016年は摘採適期(概ね4~5葉期,出開き度70~90%)に行った。UAVの空撮直後に各区画3カ所の20×20cm枠を用いた枠摘みを行い、ヨコバイでは葉脈褐変等を、アザミウマでは筋状の加害痕が認められる新芽数を数えて被害芽率を算出した。2017年は、摘採適期の6月27日(概ね4~5葉期,出開き度70~90%)に20×20cm枠を摘採面に各区画3カ所置いて、枠内の約60芽をランダムに摘み、これらのヨコバイ被害芽率を調べた。

3 供試した UAV と撮影方法

空撮には、デジタルカメラ(1/2.3インチCMOS,静止画像最大1200万画素)を搭載した市販 UAV (DJI社製ファントム4)を用い、動画(2016年二番茶)または静止画像(2016年三番茶および2017年二番茶)を自動露出により撮影した。いずれの撮影も太陽の高度の高い正午前後の時間帯に行い、天候は薄曇りまたは晴天であった。UAVの撮影時の飛行高度は約15mとし、画像データ補正のための標準反射板等は使用しなかった。

4 画像解析方法

UAVが空撮したほ場全体の画像から、区画ごとにうね摘採面の画像を切り出し、市販の画像編集ソフトのPhotoshopElements13により三原色の色分布データを表示して三原色(RGB)および輝度(Y:赤成分×0.21+緑成分×0.72+青成分×0.07)の画素平均値(256階調:0~255=8bit)を抽出した。RGBは、さらに小野ら¹⁶⁾による正規化値(NR, NG, NB:RGB相加平均で除した

値) も算出した。解析には、2016 年二番茶期では動画から取り出した 1545×1030 ピクセルの静止画像、同年三番茶期と 2017 年二番茶期の画像は 4000×3000 ピクセルの静止撮影画像を使った。

次に、小澤ら¹⁷⁾でのチャ炭疽病の画像解析手法を参考に、RGB 値などを任意に組み合わせた複数の演算式を考案して、演算式で得られた数値を説明変数 (x)、虫数 (2016 年のみ) または被害芽率 (相関解析には角変換値を使用) を目的変数 (y) として、両パラメータ間の相関係数 r と寄与率 R^2 を算出した。相関係数の計算には、マイクロソフトエクセル 2010 に標準搭載のデータ分析ツールを使用した。なお、2016 年の虫数は、小澤ら²²⁾に準じて、述べ 2 回または 3 回の調査による数値の合計値を用いた。

5 被害芽率のマッピング

2016 年二番茶期の画像をもとに、前述の解析で得られたいくつかの演算式による数値を説明変数とした推定式 (直線回帰式) により推定したヨコバイの被害芽率に基づいて、被害芽率の程度別色分け分布図を作成した。分布図の作成は、小澤ら²⁰²⁰⁾のチャ炭疽病の発生程度別分布図と同様に、GIS ソフトの QGIS (Ver.2.81) を用いた。まず、元となる画像データ (2016 年二番茶、1545×1030 ピクセル) を読み込み、10 ピクセル単位 (実距離: 約 14cm) で RGB の各数値を格子状に格納したベクタグリッドを作成し、RGB ごとに設定領域内の平均値を算出し、前述の解析で得られた推定式に組み込んでヨコバイの被害芽率の推定値を算出した。その後、被害芽率を 5%未満、5~10%、10~30%、30~60%、60%超の 5 段階に分けて同色の濃淡でパターンを設定し、段階別分布画像を作成した。色データの管理と推定式の計算にはオープンソースソフトの LibreOffice (Version 6.0.6.2) の Calc を用いた。

なお、分布図の作成に使用した推定式は、後述する相関の高い式の中から、比較的単純な以下の式を適用した。

ヨコバイによる被害芽率(y)の推定式

$$\arcsin\sqrt{y} = 0.010(R+G) - 1.91$$

ただし、R、G および B は、赤 (波長 700nm)、緑 (波長 546.1nm) および青 (波長 435.8nm) の分画領域内画素平均値を示す。

Ⅲ 結果及び考察

1 害虫密度と被害芽率との関係

2016 年二番茶芽における摘採前 7 日と 0 日におけるヨコバイの密度合計値と被害芽率との関係を Fig.1 に示す。密度は 4~40 頭 (1/4 カ所の落下成功幼虫合計値) と区間

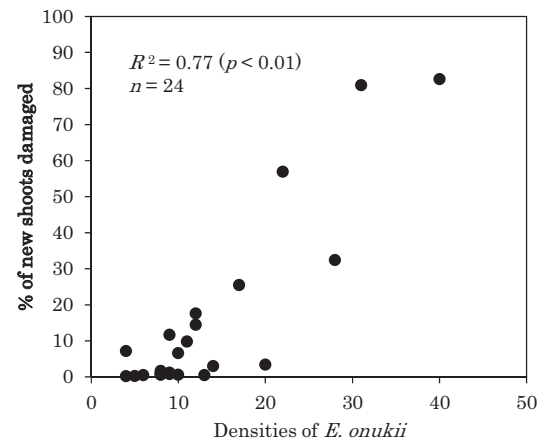


Fig.1. Relationship between the densities of *E. onukii* and the rates of new shoots of second flush damaged by the insects, in 2016. The densities of *E. onukii* indicate the sum of the insects captured by the beating method on each 7 and 0 days before the day on the investigating the damage

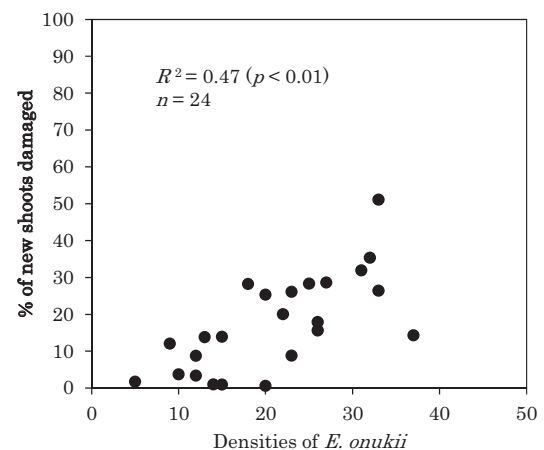


Fig.2. Relationship between the densities of *E. onukii* and the rates of new shoots of third flush damaged by the insects, in 2016. The densities of *E. onukii* indicate the sum of the insects captured by the beating method on each 10 and 3 days before the day on the investigating the damage

で幅があり、被害芽率は最大約 82.6%であった。ヨコバイ密度と角変換した被害芽率の間には高い正の相関関係が認められた ($R^2=0.77$, $p<0.01$)。

2016 年三番茶芽における摘採前 10 日と 3 日におけるヨコバイの密度合計値と被害芽率との関係を Fig.2 に示す。密度は 5~37 頭と区間で幅があり、被害芽率は最大約 51.1%であった。両者の相関 (被害芽率は角変換値を使用) には正の相関関係が認められた ($R^2=0.47$, $p<0.01$)。

2016年三番茶芽における摘採前10日と3日におけるアザミウマの密度合計値と被害芽率との関係では、密度は435~936頭と全体的に多発傾向であったが少発生区画は認められず、区画間の幅はやや狭かった。一方、被害芽率は最大約19.1%と低く、両者の相関（被害芽率は角変換値を使用）では、 $R^2 = 0.0058$ ($p > 0.05$)と有意な相関関係は認められなかった（データ省略）。

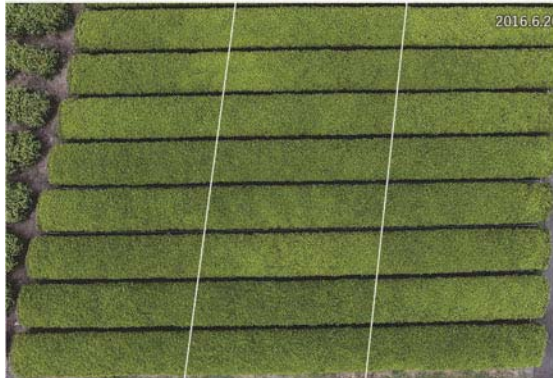


Fig.3. A photograph of a tea field with new shoots of second flush infested by tea green leafhopper, *E. onukii* on 20 June in 2016, taken by UAV. Lines show boundary of the various treatment area. Photographing date was around optimum plucking time.



Fig.4. A photograph of a tea field with new shoots of third flush infested by tea green leafhopper, *E. onukii* on 15 August in 2016, taken by UAV. Lines show boundary of the various treatment area. Photographing date was around optimum plucking time.

2 空撮画像の色データと害虫密度または被害芽率との関係

(1) 2016年の二番茶芽および三番茶芽



Fig.5. A photograph of a tea field with new shoots of second flush infested by tea green leafhopper, *E. onukii* on 27 June, 29 June and 3 July in 2017, taken by UAV. Lines show boundary of the various treatment area. Photographing date was around optimum plucking time.

Fig.3に画像解析に用いた2016年二番茶芽の画像を示す。当該ほ場は、種々の薬剤処理により計24区画（3分割×8うね）に分かれているが、カラーの可視画像の目視では、区画ごとの緑色の濃淡の差異が比較的明瞭に認められた（Fig.3）。

そこで、各区画の画像のRGB平均値を様々に組み合わせた演算式による数値(x)と、ヨコバイの密度(y)または被害芽率の角変換値(y)との相関関係を解析し、寄与率 R^2 を求めた（Table 1）。被害芽率との関係では、R（赤）単独でも $R^2 = 0.41$ ($p < 0.01$)と有意な相関関係を示し、同様にR+Gでは $R^2 = 0.41$ 、R-Bでは $R^2 = 0.42$ であった。比較的高い有意な相関関係 ($p < 0.01$)を示す演算式は、計19種であった。また、RGB値のそれぞれを独立変数とした重回帰式の寄与率は $R^2 = 0.42$ であり、前述の演算式の場合と同程度であった。今回作成した演算式の中では、 $R^2 = 0.41$ 以上を示す演算式はRやR+Gなど6種が認められた。ヨコバイ密度との関係では、被害芽率とほぼ同様の傾向が認められ、7日前と0日目の合計に対しては、R単独は $R^2 = 0.56$ ($p < 0.01$)、R+Gで $R^2 = 0.56$ 、R-Bで $R^2 = 0.55$ であった（Table 1）。なお、NRなど正規化補正値を組み込んだ演算式では、寄与率はむしろ低くなる傾向がみられた。

次に、同年三番茶芽におけるほ場画像を Fig.4 に示す。目視では区画間で若干の濃淡が認められるものの、二番茶芽 (Fig.3) に比べると区画間の差異は不明確であった。各区画の画像の RGB 平均値を様々に組み合わせた演算式による数値 (x) と、ヨコバイの密度(y)および被害芽率の角変換値 (y) との間の寄与率 R^2 を Table 2 に示す。被害芽率との関係では、 $p < 0.01$ の有意な相関関係が認められた演算式は B など 4 種のみ (Table 2) となり、ほとんどの演算式で有意な相関関係は認められなかった。また、RGB 値のそれぞれを独立したパラメータとした重回帰式においても、 $R^2 = 0.34$ ($p < 0.05$) と二番茶芽に比べると寄与率は高くなかった。ヨコバイ密度との関係では、ほぼすべての演算式で、有意な相関関係は認められなかった (Table 2)。

2016 年三番茶芽については、前述のヨコバイと同様に、アザミウマについても色データによる演算式と被害芽率および密度との関係を解析した。その結果、すべての演算式と被害芽率およびアザミウマ密度との間に、有意な相関関係は認められなかった ($p > 0.05$)。また、RGB を独立変数とした重回帰式についても、有意性は認められなかった ($p > 0.05$) (データ省略)。

(2) 2017 年の二番茶芽

2017 年二番茶芽摘採期に撮影したほ場画像を Fig.5 に、撮影日ごとに色データによる演算式による数値とヨコバイ被害芽率との相関係数および寄与率を Table 3 に示す。ここで選択した演算式は、前年の二番茶での解析で比較的高い相関 (Table 1) が認められた式を選んだ。多くの演算式で有意な相関関係が認められ、R 単独が $R^2 = 0.70$

Table 1. Contribution rates (R^2) on the relationships between calculation formula combining each RGB band value (x) and the rates of new shoots of second flush damaged by *E. onukii*(y) or the densities of the insects (y). Data in 2016 were used

Calculation formula (x)	Dependent variables (y)		
	Densities of <i>E. onukii</i> ¹⁾		Rates of new shoots damaged ²⁾
	12+7+0	7+0	
R (red)	0.5496 ** ³⁾	0.5606 **	0.4118 **
G (green)	0.5510 **	0.5591 **	0.4095 **
B (blue)	0.4297 **	0.4654 **	0.3068 **
R+G	0.5516 **	0.5613 **	0.4118 **
R+G+B	0.5420 **	0.5568 **	0.4019 **
R+B	0.5309 **	0.5497 **	0.3932 **
R-B	0.5531 **	0.5478 **	0.4240 **
R / B	0.0614 ns	0.0805 ns	0.0224 ns
(R-B)/(R+B)	0.0700 ns	0.0922 ns	0.0303 ns
R+G-B	0.5572 **	0.5593 **	0.4199 **
(R+G)/B	0.1850 *	0.2095 *	0.0998 ns
G-R	0.4180 **	0.4379 **	0.3264 **
G / R	0.4736 **	0.4757 **	0.3533 **
Y (luminance)	0.5491 **	0.5597 **	0.4084 **
Y+R	0.5498 **	0.5607 **	0.4106 **
Y+G+R	0.5508 **	0.5609 **	0.4108 **
(G-R)/(G+R)	0.4893 **	0.4938 **	0.3662 **
(G-B)/(G+B)	0.2741 **	0.3071 **	0.1765 *
NR (normalized red)	0.4740 **	0.4611 **	0.3704 **
NG (normalized green)	0.4456 **	0.4624 **	0.3183 **
NB (normalized blue)	0.2027 *	0.2348 ns	0.1223 ns
NG+NR	0.2027 *	0.2348 ns	0.1223 ns
NG-NR	0.4824 **	0.4882 **	0.3570 **
NR+NB	0.4456 **	0.4624 **	0.3183 **
NR-NB	0.1013 ns	0.0767 ns	0.1061 ns
NR+NG-NB	0.2027 *	0.2348 **	0.1223 ns
Y/((R+G+B)/3)	0.4015 **	0.4258 **	0.2789 **
0.035R-0.0088G-0.026B-1.11 ⁴⁾	-	-	0.4249 **

1) "12+7+0" means sum of the densities captured by the beating method on each 12, 7, and 0 days before the day of photographing by UAV

2) Angular transformation values was used for the analysis of relationships

3) **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$

4) Multiple regression equation with each RGB as three variables instead of explanatory variables

~0.90, R+G では $R^2 = 0.58 \sim 0.89$, Y+R では $R^2 = 0.62 \sim 0.89$ と、いくつかの演算式では高い寄与率を示した。

撮影日ごとの比較では、6月29日撮影の画像で全般に寄与率が高くなる傾向があり、6月29日ではすべての演算式で有意な相関関係($p < 0.05$)が認められ、 $p < 0.01$ と特に高い相関は 18 種の演算式で認められた。

(3) 2016 年および 2017 年を合わせた解析

最後に、演算式による数値とヨコバイ被害芽率との間に有意な相関関係が認められた二番茶芽を対象に、2016 年と 2017 年の 2 年間のデータ (2017 年は 6 月 29 日撮影

のデータ)を用いて、前述と同様の解析を行った。ここでは、2016年と2017年ともに比較的高い有意な相関 ($p < 0.01$) が認められた演算式4種 (Table 1, 3) を選んで適用し、相関関係を解析した。

その結果、説明変数 (x) が R 単独で $R^2 = 0.64$, R+G で $R^2 = 0.60$, R+G-B で $R^2 = 0.58$, (G-R) / (G+R) で $R^2 = 0.42$ となり、いずれも有意な相関関係 ($p < 0.01$) が認められるとともに、年次の違いによるデータの偏りの程度は小さかった (Fig.6)。

3 被害芽率の推定値に基づくマッピング

2016年二番茶芽の空撮画像を元に、R+Gを説明変数とした推定式によるヨコバイ被害芽率の程度別分布図を Fig.7 に示す。Fig.7 は、可視画像 (Fig.3) に比べると、色の濃淡により区画ごとの被害程度の差異がはるかに明瞭になった。被害分布では、画像最上部のうねで被害の進んだ新芽が多く、その中でも特に右端の区画で被害芽率60%以上の部分が広範囲となり、被害の多い場所であることが読み取れる。なお、相関の高い別の説明変数 ($x = R - B$) を用いた推定式を用いた場合でも被害の分布は似た傾向を示した²⁰ (データ省略)。

IV 考察

チャノミドリヒメヨコバイは、チャの新芽を吸汁加害するチャの重要害虫であり¹¹、加害が進むと収量⁷⁸や品質に悪影響をもたらす。本県では、近年、二番茶芽と秋芽での被害が特に目立つ。新芽への加害が著しい場合には、新芽全体が萎縮、硬化して発育が停止して褐変し¹¹、赤葉枯病を誘発して枯死することもある。その前段階では、摘採面の新芽が徐々に黄化することが経験的に知られているものの、そうした被害に伴う摘採面の色彩変化を定量的に解析した先行研究はない。また、ヨコバイは

Table 2. Contribution rates (R^2) on the relationships between calculation formula combining each RGB band value (x) and the rates of new shoots of third flush damaged by *E. onukii* (y) or the densities of the insects (y). Data in 2016 were used

Calculation formula (x)	Dependent variables (y)			
	Densities of <i>E. onukii</i> ¹⁾		Rates of new shoots damaged ²⁾	
	14+10+3	10+3		
R (red)	0.0501 ns ³⁾	0.0409 ns	0.0631 ns	
G (green)	0.0359 ns	0.0279 ns	0.0455 ns	
B (blue)	0.1523 ns	0.1033 ns	0.3370 **	
R+G	0.0431 ns	0.0344 ns	0.0544 ns	
R+G+B	0.0562 ns	0.0437 ns	0.0793 ns	
R+B	0.0747 ns	0.0580 ns	0.1117 ns	
R-B	0.0235 ns	0.0213 ns	0.0189 ns	
R / B	0.0041 ns	0.0012 ns	0.0411 ns	
(R-B)/(R+B)	0.0076 ns	0.0040 ns	0.0465 ns	
R+G-B	0.0297 ns	0.0247 ns	0.0312 ns	
(R+G)/B	0.0212 ns	0.0116 ns	0.0969 ns	
G-R	0.1524 ns	0.1474 ns	0.1875 *	
G / R	0.0697 ns	0.0557 ns	0.0888 ns	
(G-R)/Y	0.0758 ns	0.0617 ns	0.0976 ns	
(G-R)*Y	0.0029 ns	0.0008 ns	0.0052 ns	
(G-B)/(G+B)	0.0546 ns	0.0360 ns	0.1647 *	
Y (luminance)	0.0436 ns	0.0342 ns	0.0571 ns	
Y+R	0.0471 ns	0.0377 ns	0.0603 ns	
Y+G+R	0.0433 ns	0.0343 ns	0.0552 ns	
(G-R)/(G+R)	0.0721 ns	0.0585 ns	0.0911 ns	
Y*R	0.0504 ns	0.0423 ns	0.0644 ns	
log(Y*R)	0.0442 ns	0.0337 ns	0.0565 ns	
Y+G-R	0.0275 ns	0.0200 ns	0.0368 ns	
NR (normalized red)	0.0258 ns	0.0230 ns	0.0184 ns	
NG (normalized green)	0.1619 ns	0.1239 ns	0.2876 **	
NB (normalized blue)	0.0293 ns	0.0185 ns	0.1057 ns	
NG+NR	0.0293 ns	0.0185 ns	0.1057 ns	
NG-NR	0.0864 ns	0.0698 ns	0.1167 ns	
NR+NB	0.1619 ns	0.1239 ns	0.2876 **	
NR-NB	0.0002 ns	0.0006 ns	0.0059 ns	
NR+NG-NB	0.0293 ns	0.0185 ns	0.1057 ns	
Y/((R+G+B)/3)	0.1647 *	0.1222 ns	0.3438 **	
0.0089R - 0.011G + 0.055B - 0.49 ⁴⁾	-	-	0.3434 *	

1-4) See table 1

黄色トラップにもよく捕獲されること¹²から、摘採面上での移動性も高いと考えられ、被害様相は局所的ではなく、面的に拡大する。これらの被害特性から、摘採面の達観により被害をある程度把握しやすく、茶園上空から俯瞰的にその実態把握が容易となることが推察された。すなわち、チャ病害虫の中では、チャ炭疽病¹⁷と同様、UAVによるほ場の空撮画像を、被害実態の定量的把握法として利用することが可能と考える。本研究では、農家レベルでの普及が容易な一般向け UAV に搭載されたデジタルカメラによる可視画像を供試することとした。

まず、二番茶芽においてヨコバイ密度と被害との関係を解析したところ、過去複数年の三番茶芽でのデータを用いた解析²⁰でも判明しているように、ヨコバイ密度に

有意に依存して被害芽率が上昇した (Fig.1) . 三番茶芽でも同様であった (Fig.2) . このことから, 被害芽率はヨコバイの密度を正確に反映しており, ヨコバイによる加害との因果関係が確認された. 一方, アザミウマについては, 虫密度と被害芽率との間に相関関係が認められず, アザミウマによる被害芽率も全体に低かった. 両者に相関関係が認められなかった原因は不明であるが, ヨコバイの加害がアザミウマによる被害をマスクした可能性はある. アザミウマの被害解析については今後の課題である.

摘採期に撮影したほ場全体の画像 (Fig.3-5) をみると, 区画によって緑色の濃淡があ

Table 3. Relationships between calculation formula combining each RGB band value (x) and the rates of new shoots damaged of second flush by *E. onukii* (y). Data in 2017 were used

Calculation formula (x)	Photographing date								
	2017/6/27		2017/6/29		2017/7/3				
	r	R^2	r	R^2	r	R^2			
R (red)	0.922	0.850	** ¹⁾	0.951	0.905	**	0.838	0.703	**
G (green)	0.846	0.716	**	0.916	0.839	**	0.637	0.406	**
B (blue)	0.697	0.486	*	0.817	0.668	**	0.758	0.575	**
R+G	0.895	0.800	**	0.941	0.886	**	0.761	0.579	**
R+G+B	0.913	0.833	**	0.933	0.871	**	0.788	0.621	**
R+B	0.909	0.827	**	0.921	0.848	**	0.845	0.715	**
R-B	0.756	0.572	**	0.866	0.750	**	0.767	0.588	**
R / B	-0.361	0.130	ns	-0.600	0.360	*	-0.165	0.027	ns
(R-B)/(R+B)	-0.421	0.178	ns	-0.618	0.382	*	-0.138	0.019	ns
R+G-B	0.818	0.669	**	0.914	0.835	**	0.706	0.499	*
(R+G)/B	-0.454	0.207	ns	-0.660	0.436	*	-0.434	0.188	ns
G-R	-0.650	0.422	*	-0.763	0.582	**	-0.824	0.680	**
G / R	-0.900	0.810	**	-0.916	0.840	**	-0.926	0.858	**
Y (luminance)	0.892	0.796	**	0.937	0.877	**	0.717	0.514	**
Y+R	0.910	0.829	**	0.946	0.895	**	0.791	0.625	**
Y+G+R	0.894	0.799	**	0.940	0.883	**	0.748	0.560	**
(G-R)/(G+R)	-0.904	0.817	**	-0.919	0.845	**	-0.926	0.858	**
NR (normalized red)	0.839	0.703	**	0.944	0.891	**	0.919	0.844	**
NG (normalized green)	-0.772	0.596	**	-0.831	0.691	**	-0.851	0.724	**
NG-NR	-0.883	0.779	**	-0.901	0.812	**	-0.918	0.843	**
NR+NB	0.772	0.596	**	0.831	0.691	**	0.851	0.724	**

1) **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$

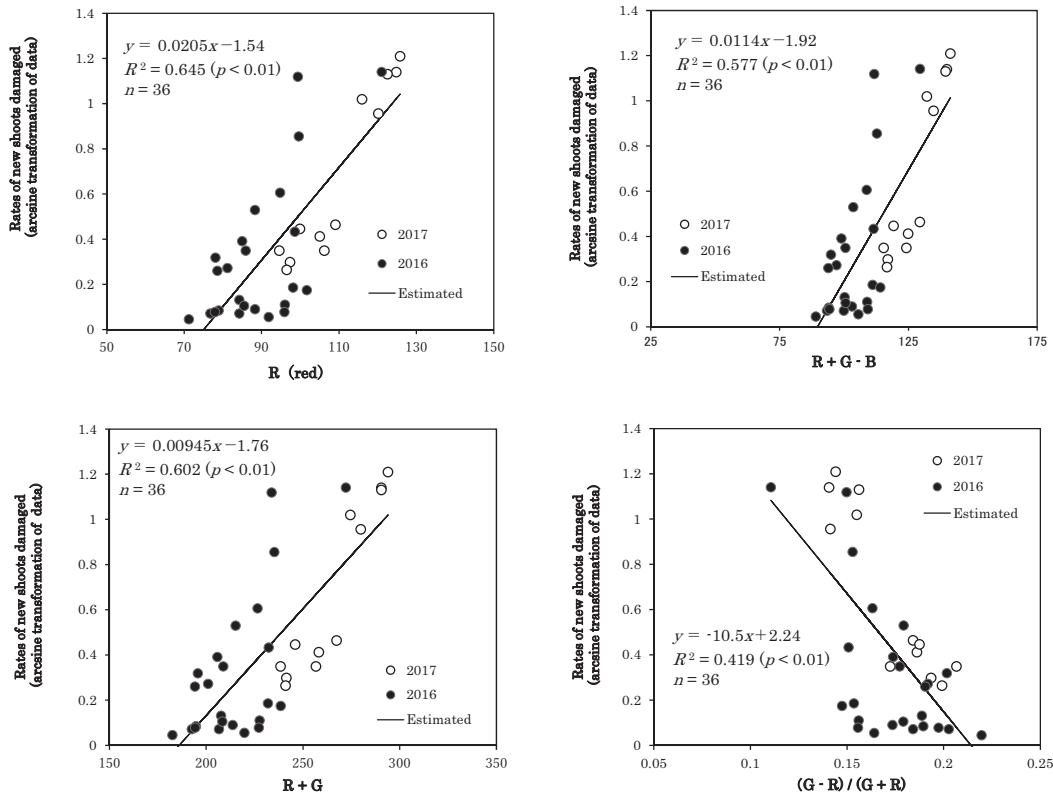


Fig.6. Relationships between some calculation formula combining each RGB band value (x) and the rates of new shoots of second flush damaged by *E. onukii* (y). Data in both 2016 and 2017 were used.

ることは認められたものの、視覚的に被害程度を正確に判断することはできなかった。そこで、本研究では、チャ炭疽病での画像解析手法¹⁷⁾に則り、区画ごとの画像から抽出した RGB 値を使った種々の演算式の値を説明変数としてヨコバイによる被害芽率の推定を試みた (Table 1-3)。その結果、被害推定式の説明変数の候補として作成した複数の演算式で有意性が認められ、特に二番茶芽での解析で有意な演算式が多かった。しかし、三番茶芽では有意性が認められる演算式がごく限られ、寄与率も低い傾向であった。さらに、二番茶芽に関しては、ほ場と年次を変えても、有意な高い相関関係が認められる共通の演算式として、R 単独や R+G など複数の演算式が認められた (Table 1,3)。2年分のデータを合わせた場合でも、年次によるデータの偏りは小さい傾向がみられ (Fig.6)、今回開発した被害推定手法の現場への適合性も高いと推察される。今後さらにデータを追加して再現性を検証する必要はあるものの、二番茶芽におけるヨコバイ被害については、今回見いだした演算式をヨコバイの被害推定式の説明変数として使い、被害芽率 (y : 角変換値) の推定には Fig.6 で示した回帰式、例えば最も単純な推定式である $y = 0.0205R - 1.54$ 、R は赤色、が適用できると考えられる。なお、RGB それぞれを独立パラメータとした重回帰式 (Table 1-3) は、計算上の寄与率はやや高いものの、RGB 間で多重共線性の問題や適用ごとに変化するパラメータ (各係数) 数が多くなってしまい、現場への適用を考慮すると頑健性は低くなると考える。

二番茶芽において、ヨコバイによる被害の画像解析に好適な撮影時期に関しては、今回は 2017 年に実施した計 3 日の比較 (Table 4) のみとなるが、6月29日の画像データがその前後 (6月27日、7月3日) よりも総じて被害との相関は高かった。観察によると、摘採適期を過ぎて時間が経過すると、新芽は硬化して全体に濃緑化が進む一方、ヨコバイの被害は摘採期が近づくと急激に進む傾向があるので、空撮画像による色彩の差異を最大限に把握するには、ある程度好適な時期・芽のステージがあると考えられる。摘採前の何日前から画像データによる被害推定が可能になるかは不明であり、画像データと被

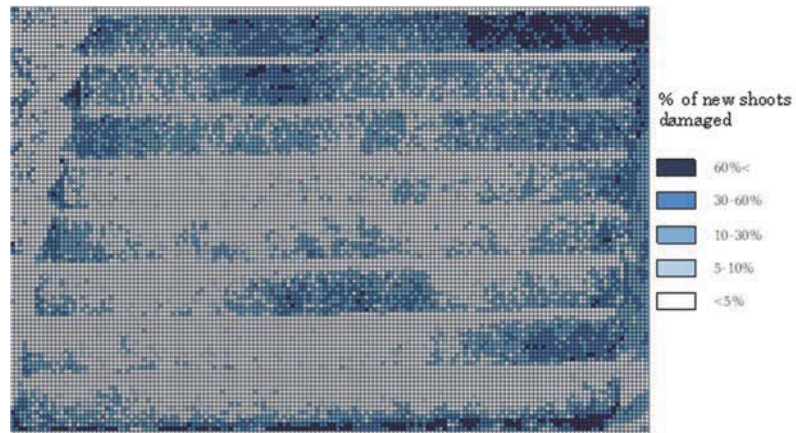


Fig.7. The distribution mapping of the damaging on new shoots of second flush by tea green leafhopper, *E. onukii* based on Fig. 3 in 2016. Damage rates were calculated based on the equation: $\arcsin\sqrt{y} = 0.010(R+G) - 1.91$, y : rates of damaged shoots, G : means of green band, R : means of red band.

害程度との関係性の時系列変化の把握は、今後の検討課題である。

ところで、ほ場内でのヨコバイによる被害や虫密度の分布および特性が空撮画像解析により具体的に把握できれば、手間と経験を要する新芽の被害調査を実施しなくても、定量的に被害実態を推定できることや、薬剤防除の効果判定などにも利用できる。さらに、生育初期の段階で被害の兆候を画像により捕捉可能となれば、防除の要否にも活用可能となろう。被害推定式の次の展開としては、被害芽率や虫密度のほ場内もしくは、ほ場間の分布とその程度を把握するためのマッピングが有益である。そこで本研究では、チャ炭疽病での発病葉数の色分け分布図の手法²⁰⁾に準じて、二番茶芽におけるヨコバイの被害分布図を作成した (Fig.7)。今回は、人為的に区画を分けて虫の発生をコントロールしているので、自然発生とは条件が異なるが、区画ごとの被害芽率の変動を検出できた (Fig.7)。また、各区画内は必ずしも均一ではなく、チャうねの端にヨコバイの被害が集中しやすい傾向のあることが示唆された。今後、ヨコバイが自然発生したチャ園で同様の分布図を作成し、自然発生条件下での被害の分布特性を明らかにしたい。

人工衛星によるリモートセンシングでは、しばしば近赤外光などの測定値を組み込んだ植生指数²¹⁾が利用されている²¹⁾。近年は、UAVでも近赤外光を測定するセンサーを搭載したマルチスペクトルカメラを搭載した機種が販売されるようになり、正規化植生指数 (NDVI) などのパラメータを用いて農業の様々な場面での利活用が進んでいる。病害虫診断の場面でも、ブロッコリーにおけるタマナギンウワバの発生分布予測に UAV が取得した

NDVI の活用が試みられている²⁴⁾。ただし、ブロッコリーでは、害虫のタマナギンウワバ以外に病害の発生についても NDVI が関与する (渡邊, 私信) とされているので, NDVI を病害虫の診断に利用する場合には, 別途, 病害虫を識別する技術を開発して併用する必要はあろう。また, チャ栽培の分野では, NDVI や NDRE (正規化レッドエッジ指数) などを収量予測などに活用する技術の開発がすすめられている⁶⁾。今後は, 生育や収量などチャ樹の生態情報に加えて, 病害虫の診断や発生予測の場面でもマルチスペクトルカメラによる NDVI などの指数を活用した手法の開発が期待される。特に, 今回の研究で空撮画像と被害程度との間に相関関係が認められなかったアザミウマなどの害虫や, 明確な病徴が現れる前段階での病害の予測などに, 通常の可視画像では得られない情報の取得に NDVI などが活用できる可能性はある。ただし, マルチスペクトルカメラ搭載の特殊な UAV は現在でも高価であり, 高性能 PC や特殊なソフトウェアなども必要となるので, 市販の UAV と単純な可視画像のみを解析に利用する本研究とは異なり, 現場への導入に当たっての利便性・普及性は今後の課題であろう。

V 摘 要

二番茶または三番茶の萌芽～開葉期に処理する薬剤を変えることで, 区画ごとにチャノミドリヒメヨコバイの密度を調整した 12~24 区 (約 10 m² / 区) を設定した後, 摘採直前に無人航空機 (UAV) に搭載されたデジタルカメラにより, ほ場全体の可視画像を空撮した。画像から, 区画ごとに RGB 三原色の画素平均値を抽出し, これらを組み合わせた複数の演算式を構築した。これらの式の値を説明変数(x), ヨコバイによる新芽の被害芽率を従属変数(y)として, 相互の関係を相関分析した。その結果, 二番茶芽では, 多くの演算式で被害芽率との間に有意な高い相関関係が認められた。しかし, 三番茶芽では有意な相関関係が認められた演算式は限られ, 寄与率も低かった。2016 年と 2017 年の二番茶の両データを用いて, ヨコバイ被害芽率 (y: 角変換値) を推定するための推定式として, $y=0.0205R-1.54$ ($n=36, R^2=0.645, p<0.01$), $y=0.00945(R+G)-1.76$ ($n=36, R^2=0.602, p<0.01$), ただし, R は赤成分平均値, G は緑成分平均値, などの推定式を得た。さらに, 被害芽率との相関の高い演算式 (R + G) を説明変数とする推定式を適用して, 2016 年二番茶における被害芽率の段階別色分け分布図を作成した結果, 区画ごとの被害程度の差異が反映された被害分布図となった。

謝 辞

ヨコバイの被害程度別色分け分布図の作成に使用したソフトウェア QGIS の使用方法に関して御指導を賜った国立沼津工業高等専門学校 of 鈴木静男博士, および諏訪尚也氏に深謝する。本研究は, 静岡県経済産業部の新成長戦略研究「無人航空機を活用した樹園地の超省力・精密化管理システムの開発 (2016 年~2018 年)」により実施した。

引用文献

- 1) 秋山 侃 (1996): 第 1 章 リモートセンシングと農業. 秋山 侃・福原道一・斎藤元也・深山一弥・編著「農業リモートセンシング—環境と資源の定量的解析—」, 養賢堂, pp.1~12.
- 2) 地球温暖化事務局用語集 <http://occo.nies.go.jp/yougo/list.html#sagyo> (2021 年 7 月アクセス)
- 3) 橋本直之・齋藤裕樹・山本修平・牧 雅康・本間香貴 (2021): 農家水稲圃場における UAV によるマルチスペクトル空撮画像を用いた追肥に伴う葉面積変化の検出. 日作紀, 90(2), 211~221.
- 4) 井上吉雄・横山正樹 (2017): ドローンリモートセンシングによる作物・農地診断情報計測とそのスマート農業への応用. 日本リモートセンシング学会誌 37, 224~235.
- 5) Guo Wei・Y. Fukano・K. Noshita・S. Ninomiya (2020): Field-based individual plant phenotyping of herbaceous species by unmanned aerial vehicle. Ecol. Evol., 10(21), 12318~12326.
- 6) 亀山阿由子 (2020): 無人航空機 (ドローン) の空撮画像を利用した茶収量の推定. 茶研報 129, 27~31.
- 7) 河合 章 (1997): チャノキイロアザミウマ, チャノミドリヒメヨコバイの密度と茶新芽の被害. 農研機構・野菜茶業研究所成果情報 <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/1997/vegetea97-031.html> (2020 年 12 月アクセス)
- 8) 小杉由紀夫 (2000): チャノミドリヒメヨコバイの加害とチャ新葉の被害との関係. 茶研報, 88, 1~8.
- 9) 増井伸一・山根 俊・土田祐大・村田裕行・加藤光弘 (2020): 無人航空機を用いた少量散布によるカンキツ樹冠内の液滴の付着特性. 関東病虫研報, 67, 87~89.

- 10) 増井伸一・村田裕行・土田祐大・加藤光弘・小林泉・猪俣敏一 (2021) : マルチローター式無人航空機による薬剤散布時の飛行経路と散布粒径がカンキツ樹冠内における液滴の付着性に及ぼす影響. 関西病虫研報, 63, 27~32.
- 11) 南川仁博・刑部 勝 (1979) : 茶樹の害虫. 日本植物防疫協会, 東京. 322pp.
- 12) 望月雅俊 (1994) : 茶園におけるチャノミドリヒメヨコバイの捕獲消長調査に有用な黄色平板粘着トラップ. 野菜・茶業試験場研究報告 B 茶業 (7), 29~37.
- 13) 中村航太・本間香貴・叶戎玲・牧 雅康・本郷千春 (2021) : 熱赤外カメラ搭載 UAV を用いた虫害検出の検討. 日本作物学会第 251 回講要, p64.
- 14) 日本植物防疫協会 (2021) : 新農薬実用化試験調査法 <http://www.jppa.or.jp/test/shiken.html> (2021 年 7 月アクセス)
- 15) 野波健蔵 (2016) : 世界のドローン開発動向と農業応用からみた課題と展望. 計測と制御 55, 780~787.
- 16) 小野朗子・藤原 昇・小野厚夫 (2002) : Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形 効果と大気効果の抑制. 日本リモートセンシング学会誌, 22(3), 318~327.
- 17) 小澤朗人・内山 徹・大石哲也 (2017) : マルチ回転翼型無人航空機 (ドローン) の空撮によるチャ炭疽病の被害推定の試み. 茶研報 124, 9~16.
- 18) 小澤朗人・内山 徹・亀山阿由子 (2018) : 茶園におけるマルチ回転翼型無人航空機 (ドローン) からの空撮画像に基づいた新梢枯死症およびハマキガ類による巻葉の密度推定. 関西病虫研報 60, 113~116.
- 19) 小澤朗人・内山 徹・大石哲也 (2018) : 小型無人航空機 (ドローン) の空撮によるチャ炭疽病の被害推定. 植物防疫, 72(10), 9~15.
- 20) 小澤朗人・内山 徹・亀山阿由子・大石哲也・諏訪尚也・鈴木静男 (2018) : ドローン (マルチ回転翼型無人航空機) の空撮によるチャ病害虫被害の実態把握の試み—第 3 報 発生程度別マッピング画像の作成—. 茶研報 126 (別), p15.
- 21) 小澤朗人・内山 徹・亀山阿由子・大石哲也・諏訪尚也・鈴木静男 (2021) : 無人航空機 (UAV) の空撮画像に基づくチャ炭疽病の発生分布図の作成. 静岡農林研報, 14, 31~34.
- 22) 小澤朗人・内山 徹・木下朋美 (2021) : チャ園におけるチャノミドリヒメヨコバイの発生密度と新芽における被害との関係. 関西病虫研報, 63, 127~130.
- 23) 田邊 大・中坪あゆみ・片平 光彦 (2018) : UAV (無人航空機) を利用した農作物の生育診断~マルチスペクトルカメラを用いたばれいしょ圃場のセンシング~. 月報 砂糖類・でん粉情報 2018.7, 67~73.
- 24) 渡邊照之・小出良平・松田絵里子・川上郷子・安達直人 (2021) : マルチスペクトルカメラ搭載のドローンをういたタマナギンウワバの発生分布予測の検討. 第 65 回応動昆虫大会講要, p64.