

ドローンステレオ写真による湿原の群落高
と地表面標高と植生分布の関係評価の有用性

日本大学大学院生物資源科学研究科生物環境科学専攻
博士後期課程

内藤 義樹

2024

目 次

第 1 章	諸 言		
1-1	研究の背景	・ ・ ・	1
1-2	写真測量	・ ・ ・	2
第 2 章	方 法	・ ・ ・	6
第 3 章	結 果	・ ・ ・	9
第 4 章	考 察	・ ・ ・	26
第 5 章	結 論	・ ・ ・	29
	謝 辞	・ ・ ・	33

第 1 章 諸言

1-1 背景

ドローン（Unmanned Aerial Vehicle; UAV; 無人航空機）による 3 次元測量は、地域の環境の解析に用いられる。UAV へのデジタルカメラの搭載による、森林研究^{1、2、3、4}、農業栽培管理研究⁵、植生研究⁶、海岸研究⁷、地形研究^{8、9}が実施されている。環境保全対策のために、吉野ら¹⁰は UAV からの写真により標津湿原の植生図を作成し、小熊ら¹¹は UAV により絶滅危惧植物の花の自動検出手法を開発した。UAV による 3 次元地形測量とその精度評価^{12、13、14}や小型化されたレーザー測距装置を大型 UAV に搭載する UAV-LiDAR 技術も進んでいる。

湿原では地形に応じて水が停滞したり地下水位を変えたりする。地形は湿原植生の分布を規定する要因である。地下水の栄養塩類濃度によっても湿原の植生分布が規定される。山形ら¹⁵は湿原で微細標高と植物種を把握した。同じ植物種であっても、地形や地下水水質によって群落高が異なることもある。しかしながら既往の研究では、湿原の植生の群落高の空間分布と地形や地下水水質や植生分布との関係については、ほとんど扱われなかった。

本研究では、食虫植物が育つ砂質、貧栄養の湿原である成東・東金食虫植物群落を対象として、UAV ステレオ写真測量で、植物群落の群落高の空間分布、地表面標高の分布を得る。こうした空間分布と地下水水質、湿生植物であるノハナショウブ、オミナエシ、抽水植物であるヨシの植生分布との対応を調べる。

1-2 写真測量

ドローンによるステレオ写真測量の実施手順について、以下のように示す(図1)。ステレオ写真測量は、写真画像(通常はカメラにより撮影される)を用いて被写体の3次元測量を行う技術である。具体的には、異なる2か所以上から撮影された写真、すなわちステレオ写真を用い、これらの写真から物体の3次元地形を計測するプロセスが写真測量とされる。このプロセスでは、まず異なる位置から撮影された写真を使用し、地上基準点から各写真の位置と傾きを算出する標定計算が行われる。高精度の3次元地形情報が必要な場合、通常のドローンの位置情報に加えて、数センチメートル単位の精度を持つ地上基準点が利用される。次に、画像処理技術を用いて2枚の写真上の対応点を特定し、これにより3次元座標が計算される。このプロセスは複数の写真に適用され、場合によっては3000枚以上の写真が処理されることがある。これにより、地表面の地形情報などを高精度に獲得することが可能なる。

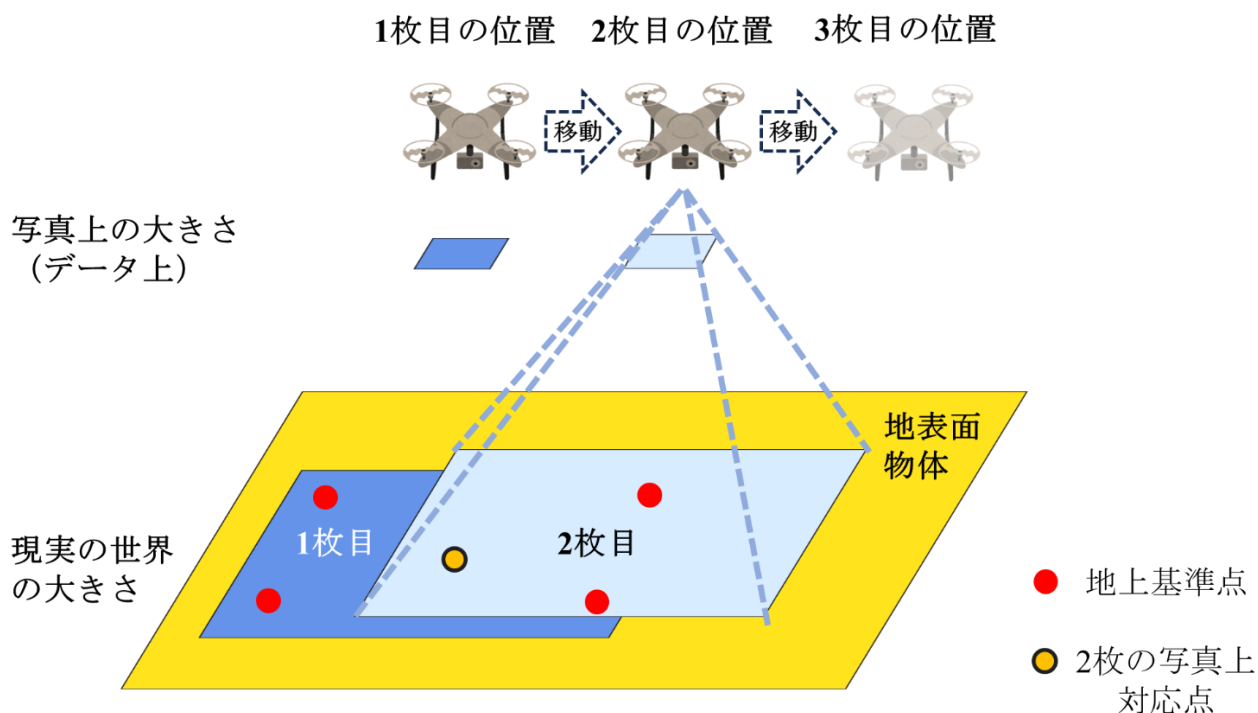


図1 ドローンステレオ写真測量の原理

ドローンを用いて取得された画像データの自動解析では、近年、SfM (Structure from Motion) という写真測量ソフトウェアが広く採用されている。しかし、このソフトウェアの多くは、解析アルゴリズムが非公開となっている。とはいえ、写真測量に関する専門的な知識がない者でも、ドローンで取得した画像をインポートし、自動的に点群データを生成することが可能である。

ドローンのデジタルカメラは、写真測量専用に設計されていない。このため、高精度な写真測量を行うためには、低い ISO 設定 (通常は 100-200)、ブレ防止のシャッタースピード、広範囲の被写界深度を確保するための F 値、およびオーバーラップ率 (通常は 60-80%) などを考慮した撮影設定が要求される。

写真測量の前処理において、カメラのキャブリエーションは重要な要素である。キャブリエーションとは、カメラのレンズの歪み (ディストーション) を調整するプロセスである。これには、カメラの焦点距離、主点位置、レンズディストーションを精確に計測することが含まれる。ただし、デジタルカメラのキャブリエーションは、撮影環境によるカメラの状態を調整し、Image Master Calib などのソフトウェアを使用して、定期的に校正を行った上で、写真測量を実施する必要がある。

焦点距離は以下の式 (2-1) から計算できるが、デジタルカメラにはズームレンズや単焦点レンズなどがあり、ズームレンズの場合は焦点距離が撮影ごとに変化するため、単焦点レンズを使用することが写真測量の品質向上と安定性に寄与すると考えられる。

デジタルカメラのピント (F 値) は、以下の式 (2-1) から求められる。

$$F = f / D \quad (2-1)$$

ここで、F: F 値、f: レンズの焦点距離 (mm)、D: レンズの開口部の直径 (mm) とする。

デジタルカメラの F 値は、開口の直径と焦点距離の比として定義され、明るさを制御する指標となる。F 値が小さい場合、開口部が広く、センサーに多くの光が届く。一方、F 値が大きい場合は、開口部が狭くなり、センサーに到達する光量は少なくなるため、明るい環境に適していることとなる。しかし、この F 値は、被写界深度、すなわち F 値が低いとわずかな誤差で被写体がぼやけることがある。このことから、被写体全体を鮮明に捉えたい場面では、明るさを維持しつつ、可能な限り高い F 値を選択するのが望ましい。また、風や飛行速度に応じて高速シャッタースピード（1/500 秒以上）を選択し、ドローンから生じるブレを最小限に抑える必要がある。

同様に、オーバーラップ率の計算には稼働時間などの制約条件の考慮が欠かせず、最適な飛行時間と必要な写真枚数を算出することが求められる。オーバーラップ率とは、異なる位置から撮影された 2 枚の写真で、同じ被写体の部分がどれだけ重なっているかを示すパーセンテージである。例えば、オーバーラップ率が 80% であれば、2 枚の写真のうち 80% の部分が重なっていることを意味する。このオーバーラップ率は、3 次元モデリングの精度を高めるために非常に重要である。

以上を踏まえて、次に示す式に基づいて詳細な計算が行われる。(2-2) 式は写真縮尺の計算、(2-3) 式は 1 枚あたりの写真（短辺）範囲距離(m)の計算、(2-4) 式は写真主点間隔(m)の計算、(2-5) 式は 1 枚あたりの撮影（長辺）範囲距離(m)の計算、(2-6) 式は、撮影基線間隔距離(m)の計算、(2-7) 式は、進行方向（オーバーラップ）の枚数、(2-8) 式は隣合うコース（サイドラップ）の枚数によって算出する。

具体的には、500m×300m のエリアで地上解像度 1cm を達成し、オーバーラップ 80%、サイドラップ 60%を確保するため、センササイズに応じて異なる撮影高度と撮影枚数が必要である。CMOS 1/2.3 型センサ（1200MP）では撮影高度 130m で 1615 枚、CMOS 4/3 型センサ（2000MP）では撮影高度 45.52m で 960 枚、35mm フルサイズセンサ（4500MP）では撮影高度 79.87m で 460 枚がそれぞれ要求される。このことから、センササイズの増加は、航空撮影における必要な撮影枚数の減少と相関していることがわかる。一方で、地上解

像度 2cm を確保するためには、CMOS 1/2.3 型センサ（1200MP）では撮影高度 259.32m で 430 枚、CMOS 4/3 型センサ（2000MP）では撮影高度 91.04m で 256 枚、35mm フルサイズセンサ（4500MP）では撮影高度 159.73m で 115 枚がそれぞれ要求される。したがって、効率的な航空撮影を目指す場合、センササイズの選択が重要な要素となる。

$$M = \frac{G \times R_l}{S_l} \quad (2-2)$$

$$Range_{short} = S_s \times M \quad (2-3)$$

$$Interval_{main} = Range_{short} \times \left(1 - \frac{OL}{100}\right) \quad (2-4)$$

$$Range_{long} = S_l \times M \quad (2-5)$$

$$Interval_{baseline} = Range_{long} \times \left(1 - \frac{SL}{100}\right) \quad (2-6)$$

$$Count_{direction} = \frac{Total_{long}}{Interval_{main}} \quad (2-7)$$

$$Count_{adjacent} = \frac{Total_{short}}{Interval_{baseline}} \quad (2-8)$$

ここで、P：カメラ 1 画素あたりのサイズ計算、S_l：センサの長辺サイズ（mm）、R_l：画素記録数の長辺、H：撮影標高（基準面からの高度）、G：地上画素寸法（m）、f：焦点距離（m）、M：写真縮尺（相当縮尺）、S_s：センサの短辺サイズ、OL：オーバーラップ、SL：サイドラップとする。

第 2 章 方法

本湿原では、食虫植物群落を保持するために湿原全体が灌漑され、また毎年 1 月末に湿原全体の野焼きが行われている。野焼きが行われた直後の 2 月の裸地状態において、UAV 搭載デジタルカメラによるステレオ写真で 3 次元地形計測を行う。2 月には植生がなく、地表面がむき出しになっている。ノハナショウブ、オミナエシそれぞれが開花する 6 月と 9 月にも、UAV で湿原全体の植物群落の 3 次元計測を行う。これら植物群落の 3 次元計測と野焼き直後の裸地状態での 3 次元地形計測から、6 月と 9 月それぞれの植物群落の群落高の空間分布を得る。つまり、2 月、6 月、9 月の 3 次元計測結果をオーバーレイし、6 月と 2 月の表面標高の差分を 6 月の群落高として、9 月と 2 月の表面標高の差分を 9 月の群落高として求める。ノハナショウブ、ヨシの植生分布は 6 月の写真の目視判読により得る。オミナエシの植生分布は 9 月の航空写真の目視判読により得る。地上解像度は 15mm とした。

本湿原は、千葉県山武市島と千葉県東金市上武射田にまたがり、九十九里平野のほぼ中央に位置する国指定天然記念物である。面積は約 3.2ha であり、地表面標高は 3m から 5m である。土壌は砂質であり、有機物や腐植や植物の栄養となる窒素やリンが乏しい。貧栄養のため貴重な食虫植物が多く生育する。地上の葉の粘毛で虫を捕えるモウセンゴケ、コモウセンゴケ、イシモチソウ、シロバナナガバノイシモチソウや地中の捕虫囊で虫を捕らえるミミカキグサ、ムラサキミミカキグサ、ホザキノミミカキグサ、水中の茎や葉に捕虫囊をつけ微生物を捕らえるイヌタヌキモが生育する。地形によって作られる養分や水分の偏在が湿原植物の生育環境に大きな影響を及ぼす。イヌタヌキモは消滅したと思われたが復元試験により再生した¹⁶⁾。ノハナショウブ、オミナエシ、ヨシも分布する。図 2 に対象地域の地図を示す。湿原の周囲は作田川や農地や道路に囲まれている。3 月から 8 月にかけて、作田川のポンプ場（図 2）が稼働することで中央水路の西端の標高が高い地点から湿原に灌漑がされている。湿原は中央水路により、北区、南区、追加指定区の 3 つに分けられる。湿原内の地下水位（相対水位）は地表面下 0.5m から 1.2m

である。湿原周囲の圃場整備に伴う湿原の乾燥化、農地排水の流入による富栄養化、ヨシの侵入により、湿原環境が危機に瀕している。湿原の保全対策として、隣接する作田川からの揚水による湿原内への涵養、地表面の土壌剥ぎ取り、年に一度の野焼きなどが行われてきた。土壌の剥ぎ取りによってミミカキグサの生育範囲が広がった（能勢、2003）。今後も保全対策が求められている。UAV（DJI社製 Inspire1 ver1.0）は、飛行管制ソフトウェア Dronedeploy（Dronedeploy社製、アメリカ）により設定したコースを線上に飛行し、連続的に直下視で12MP（1200万画素）静止画を撮影した。ステレオ写真は、フロントオーバーラップ約80%、サイドオーバーラップ約70%とした¹⁷⁾。内蔵センサでUAVの傾きを感知することでジンバルのモーターがカメラの傾きを補正する。全面積を4区分に分け、1区分当たり約15分の撮影を行った。飛行範囲の機体GNSSで計測した緯度経度情報の記録では、設定飛行高度のおおむね±3m以内であった。ピッチは平均1.0 deg/secであり、ロールは平均2.2 deg/secであった。標定では、空中写真が撮影された位置と3軸方向におけるカメラの回転角を求める。ゆがみ補正のキャリブレーションは予め行った。ステレオ写真上の像点、対応する地上の点と投影中心点が一直線上にあるという共線条件を利用し、直線が交会する地上の点を立体計測する。ステレオマッチングにより3次元地形データを作成するのには、ソフトウェア Photoscan Pro（Agisoft社製、ロシア）を使用した^{18、19、20)}

撮影写真と対象を表1に示す。2月は野焼きが行われた直後である。6月はノハナショウブ群落の花を付け、このほかに同系色の花が存在しない。9月はオミナエシ群落の花を付け、このほかに同系色の花が存在しない。ヨシ群落の繁茂状況も取得できる。6月と9月のこれらの花と葉の撮影を図3に示す。写真はPhotoshopCC（Adobe社製）を用いて、ノハナショウブとオミナエシの個々の花の分布およびヨシを、図4に赤色で示すように目視判読した。

野焼きが行われた直後の裸地状態の3次元地形計測は、検証点での地上GNSS（Global Navigation Satellite System; 衛星測位システム）測量により精度を検証した。地上基準点（Ground Control Point; GCP）は9点設置し、検証点はA-A'ラインに9m間隔で26地点設置した。地上基準点および検証点で

は、GNSS (Nikon Trimble 社製 R4) によるリアルタイムキネマティック (RTK) 測量で座標値を特定した。位置は図 2 に示す。検証点は、地下水面観測孔のある場所の地表面に設置した。地上基準点には、対空標識を設置しステレオ写真上で位置を同定した、検証点の UAV ステレオ写真測量の標高値の算出では国土地理院の手法を用いた (国土地理院、2017)。

地下水水質測定は、非灌漑期の中でも地下水位が高い時期に行った。非灌漑期は、灌漑用水による希釈効果が少なく、農業の影響が最小限となる時期である。2018 年 10 月 25 日に、湿原内の 16 地点 (図 2) にて地下水面観測孔を用いて採水した。作田川のポンプ場入口でも同様に採水した。対象地の灌漑期間は、作田川上流部から農業由来の化学肥料分をポンプ場により汲み上げる影響で湿原内の地下水水質の変動が大きい。冷蔵庫で保管後、数日以内に孔径 $0.45 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過処理し、イオンクロマトグラフ分析システム (島津製作所製 CDD-6A、CTO-10A、SCL-10AVP、SIL-10DVP、LC-10AD、DGU-12A) で Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 NH_4^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 NO_2^{-} 、 Cl^{-} 、 PO_4^{3-} のそれぞれの濃度を測定した。採水時に簡易計で水素イオン指数 (pH)、電気伝導度 (EC) を測定した。

第 3 章 結果

野焼き直後の UAV ステレオ写真測量で得られたオルソモザイクを図 5 に、地表面標高図 (DEM) を図 6 に示す。南西の元来田畑であった地形 (図 5 の 2H、3H、3G に囲まれた場所)、ため池の法肩とため池の湛水面との高低差 0.6m、遊歩道と湿原との高低差などの地形が再現された。中央水路より北部に標高が低く湛水する区域 (北区; 図 2 の A-A' ライン 1 から 12 を含む区域)、中央水路より南部にしばしば湛水する区域 (南区; 図 2 の A-A' ライン 13 から 26 を含む区域)、中央南西部に標高が高く湛水しない区域 (追加指定区; 図 2 の 4F、3G、2H、3H を含む区域) が存在する。これらは地表面標高図 (図 6) によって区分できた。9 点の GCP における標定計算の残差を表 2 に示す。残差の平均値は、X 方向 6 mm、Y 方向 6 mm、Z 方向 50 mm であった。図 7 に 26 点の検証点 (A-A' ライン) における UAV ステレオ写真測量による標高値と GNSS 測量による標高値の比較を示す。これらの差の 2 乗平均平方根 (Root Mean Square Error; RMSE) は、Z 軸方向 (鉛直方向) で 33mm であった。26 点の検証点では、UAV による標高値が GNSS による標高値より概ね 20mm 小さいという系統的な誤差があった。この系統的な誤差を除いた A-A' ラインの地形の起伏の形状は、鉛直方向に 10mm~20mm の誤差で再現できていた。

地下水水質測定地点の標高とその点での地下水水質 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} それぞれの濃度、pH、EC) の関係を図 8 に示す。採水地点の地表面の標高値は GNSS 測量によるものと UAV ステレオ写真測量によるそれぞれのものを示す。pH の範囲は、5.06 から 7.10 であり、EC の範囲は、 $8.08 \mu\text{S/m}$ から $23.90 \mu\text{S/m}$ であった。作田川のポンプ場入口では、カリウム濃度が 3.8 mg L^{-1} で、ナトリウム濃度が 11.19 mg L^{-1} 、カルシウム濃度が 20.76 mg L^{-1} 、マグネシウム濃度が 8.27 mg L^{-1} 、塩素濃度が 18.86 mg L^{-1} 、硝酸濃度が 3.89 mg L^{-1} 、硫酸濃度が 14.92 mg L^{-1} 、pH が 8.69、EC が $26.7 \mu\text{S/m}$ であった。これら作田川のポンプ場入口で観測されたイオン濃度および pH、EC の数値は、カリウム濃度を除いて、湿原内の各測定地点で観測されたものより大きい。湿原内のカリウム濃度については、作田川のポンプ場入口で観

測されたカリウム濃度より大きい地点と小さい地点があった。湿原内の各測定地点およびポンプ場入口では、アンモニウム、リン酸、亜硝酸は観測されなかった。予備調査の作田川のポンプ場入口では、ナトリウム濃度が 13.54mg L^{-1} 、カルシウム濃度が 14.31mg L^{-1} 、マグネシウム濃度が 4.37mg L^{-1} 、塩素濃度が 29.27mg L^{-1} 、硝酸濃度が 65.55mg L^{-1} 、硫酸濃度が 80.34mg L^{-1} 、pH が 8.21、EC が $30.7\mu\text{S/m}$ であった。カリウム、アンモニウム、リン酸、亜硝酸は観測されなかった。中央水路より農地に隣接する地点では、カリウム濃度が 4.89mg L^{-1} 、ナトリウム濃度が 29.43mg L^{-1} 、カルシウム濃度が 28.14mg L^{-1} 、マグネシウム濃度が 5.53mg L^{-1} 、塩素濃度が 35.95mg L^{-1} 、硝酸濃度が 3.14mg L^{-1} 、硫酸濃度が 24.90mg L^{-1} 、アンモニウム濃度 0.44mg L^{-1} 、pH が 7.33、EC が $53.1\mu\text{S/m}$ であった。リン酸、亜硝酸は観測されなかった。GNSS 測量および UAV ステレオ写真測量による地表面の標高値はそれぞれ、ナトリウム濃度と相関係数 -0.55 (p 値 <0.05)、 -0.57 (p 値 <0.05) の負の相関があった。GNSS 測量および UAV ステレオ写真測量による地表面の標高値はそれぞれ、カリウム濃度と相関係数 0.46 (p 値 $=0.07$)、 0.54 (p 値 <0.05) の正の相関があった。地表面の標高値とこれ以外の地下水水質とは 5% の水準で有意な相関はなかった。

図 9 にノハナショウブ、オミナエシ、ヨシの植生図を示す。湛水する区域では、湿生植物のノハナショウブ群落は優占していた。オミナエシ群落は、南部のしばしば湛水する区域に優占していた。ヨシ群落は、湿原の東側に固まって存在した。ポンプ場から中央水路にかけての場所、中央水路から北区のため池、南区の水域にかけての場所で優占していた。

図 10 に 6 月 27 日の群落高の空間分布、図 11 に 9 月 25 日の群落高の空間分布を示す。ヨシ、ノハナショウブについては、6 月は生育最盛期のため、6 月の群落高は 9 月に比べて高かった。オミナエシについては、9 月が生育最盛期のため、6 月の群落高は 9 月に比べて低かった。図 12 に 6 月のノハナショウブ、9 月のオミナエシ、6 月のヨシのそれぞれの群落高と地表面標高との関係を示す。ノハナショウブとオミナエシは標高 4.2m から 4.5m の特定の標高に存在した。ノハナショウブとオミナエシそれぞれの群落高は、標高と

の明確な対応は認められなかった。ヨシは標高 3.7m から 4.7m と比較的幅広い標高の範囲に存在した。ヨシ群落の分布域の中央部の区域は標高が低い(図 6)。この区域では 6 月の群落高(図 10)も 9 月の群落高(図 11)も高い。

図 10、図 11 では、この区域内および区域外でのヨシの群落高の空間分布が得られた。この空間分布は、地上での目視で得たヨシの群落高の空間分布の特徴と合っていた。6 月のノハナショウブと 9 月のオミナエシのそれぞれの単位面積あたり花の密度(幅 10m×長さ 10m 毎の個体数)とそのコドラー卜の中心の標高の関係を図 13 に示す。UAV ステレオ写真測量による地表面の標高値は、オミナエシの植生密度と相関係数 0.7 (p 値<0.05)の正の相関があった。標高値はノハナショウブの植生密度と 5%の水準で有意な相関はなかった。

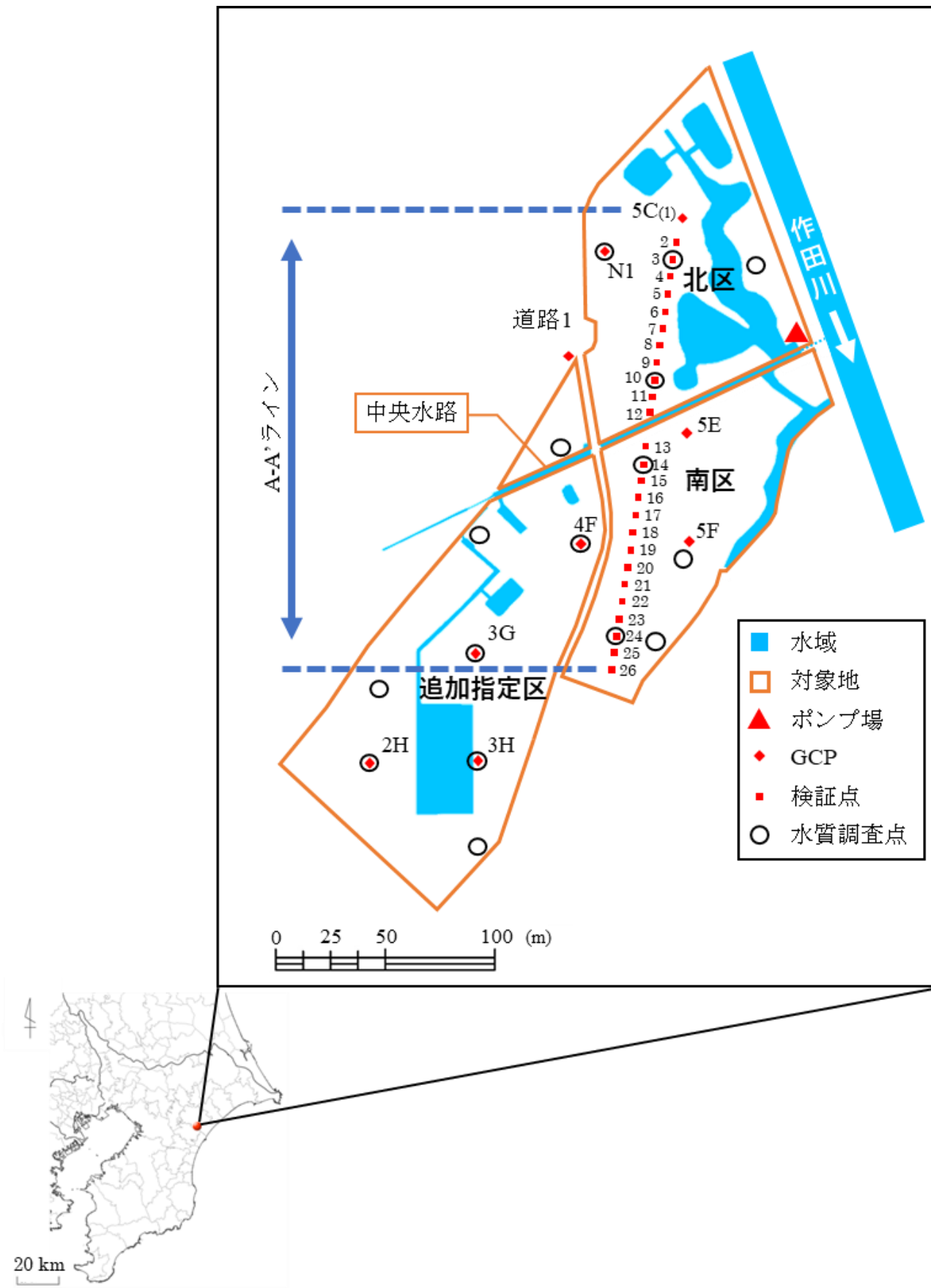


図 2 対象地域の地図

(1)ノハナショウブ



(2)オミナエシ



(3)ヨシ



図 3 (1)ノハナショウブと(2)オミナエシと(3)ヨシの地上写真

(1)ノハナショウブ



(2)オミナエシ



(3)ヨシ



(4)ノハナショウブの抽出



(5)オミナエシの抽出



(6)ヨシの抽出



60cm

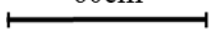


図 4 (1)ノハナショウブ、(2)オミナエシ、(3)ヨシ、それぞれの目視判読による
(4)ノハナショウブの抽出と(5)オミナエシの抽出と(6)ヨシの抽出

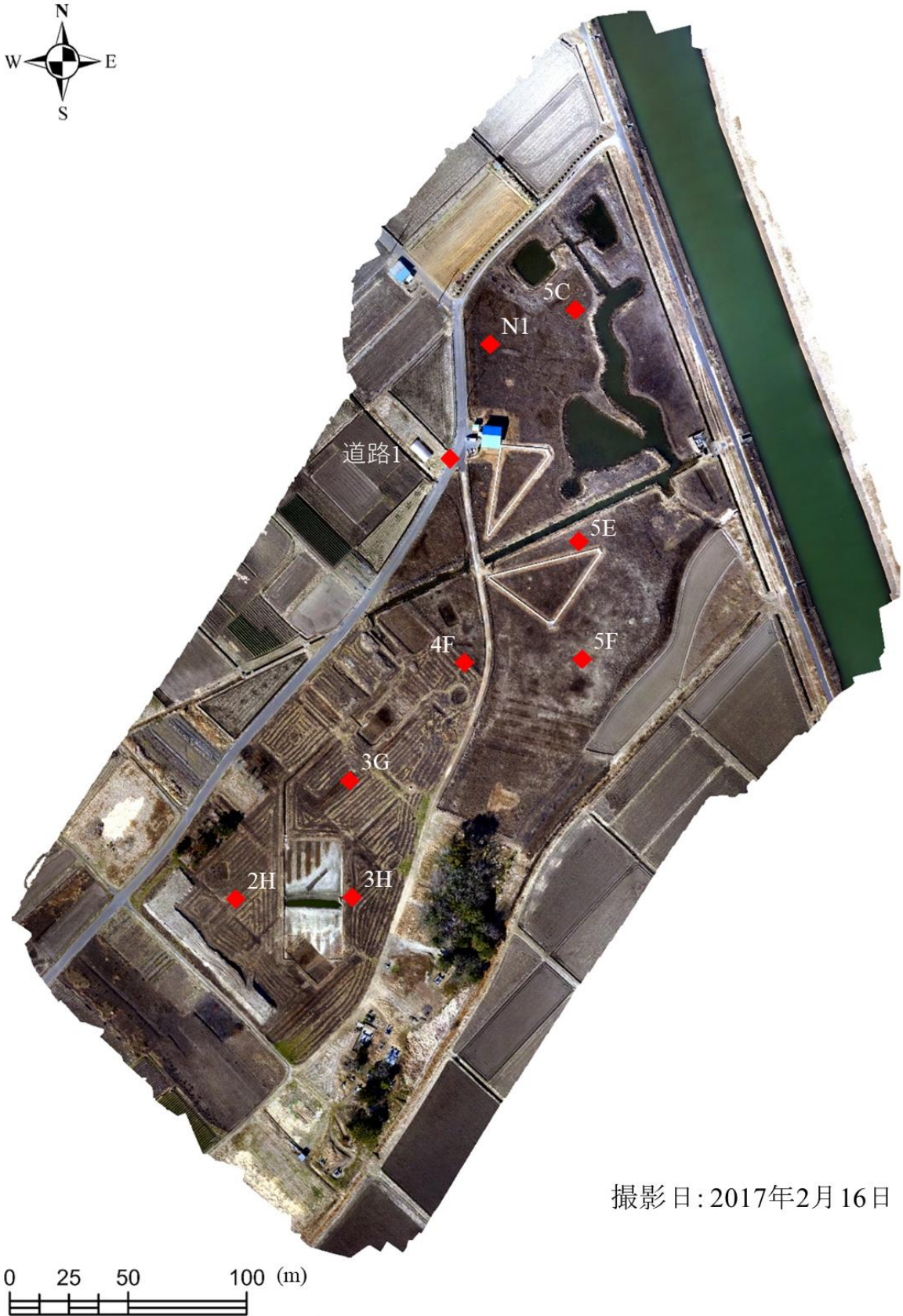


図 5 野焼き直後のオルソ写真（赤い点は GCP）



図 6 地表面標高図 (野焼き直後)

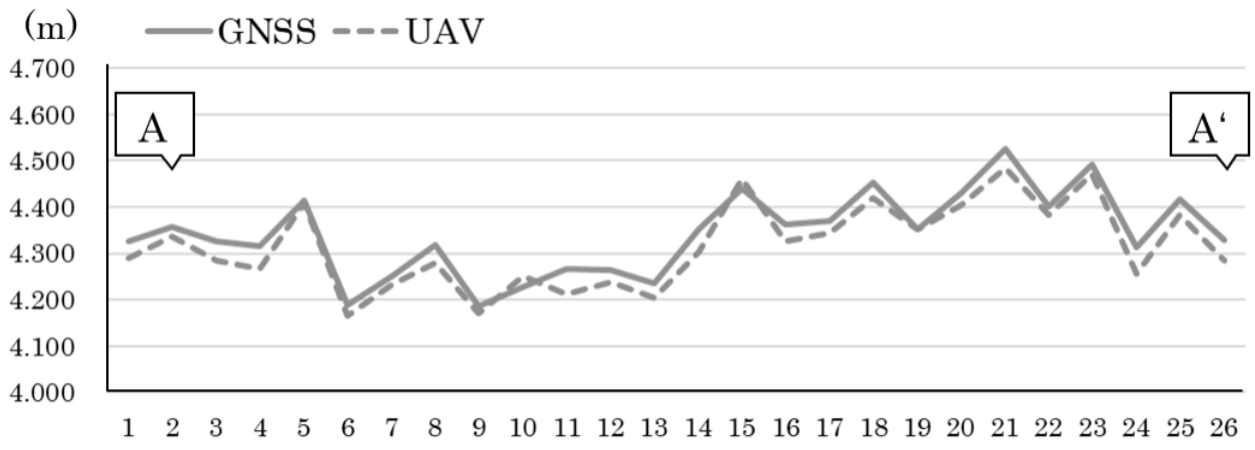


図 7 検証点における GNSS 測量と UAV による標高値

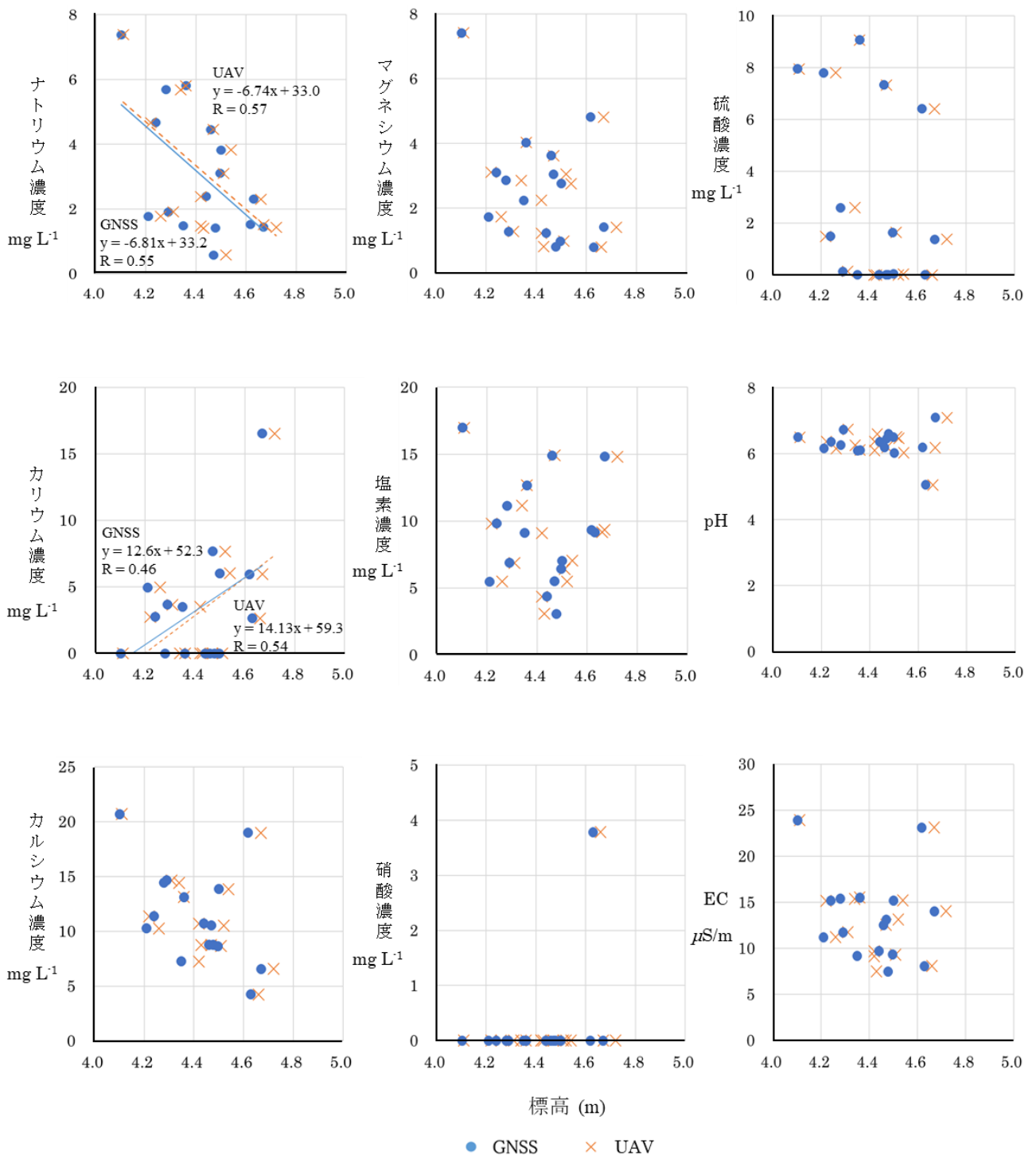


図 8 地表面の標高と水質の関係

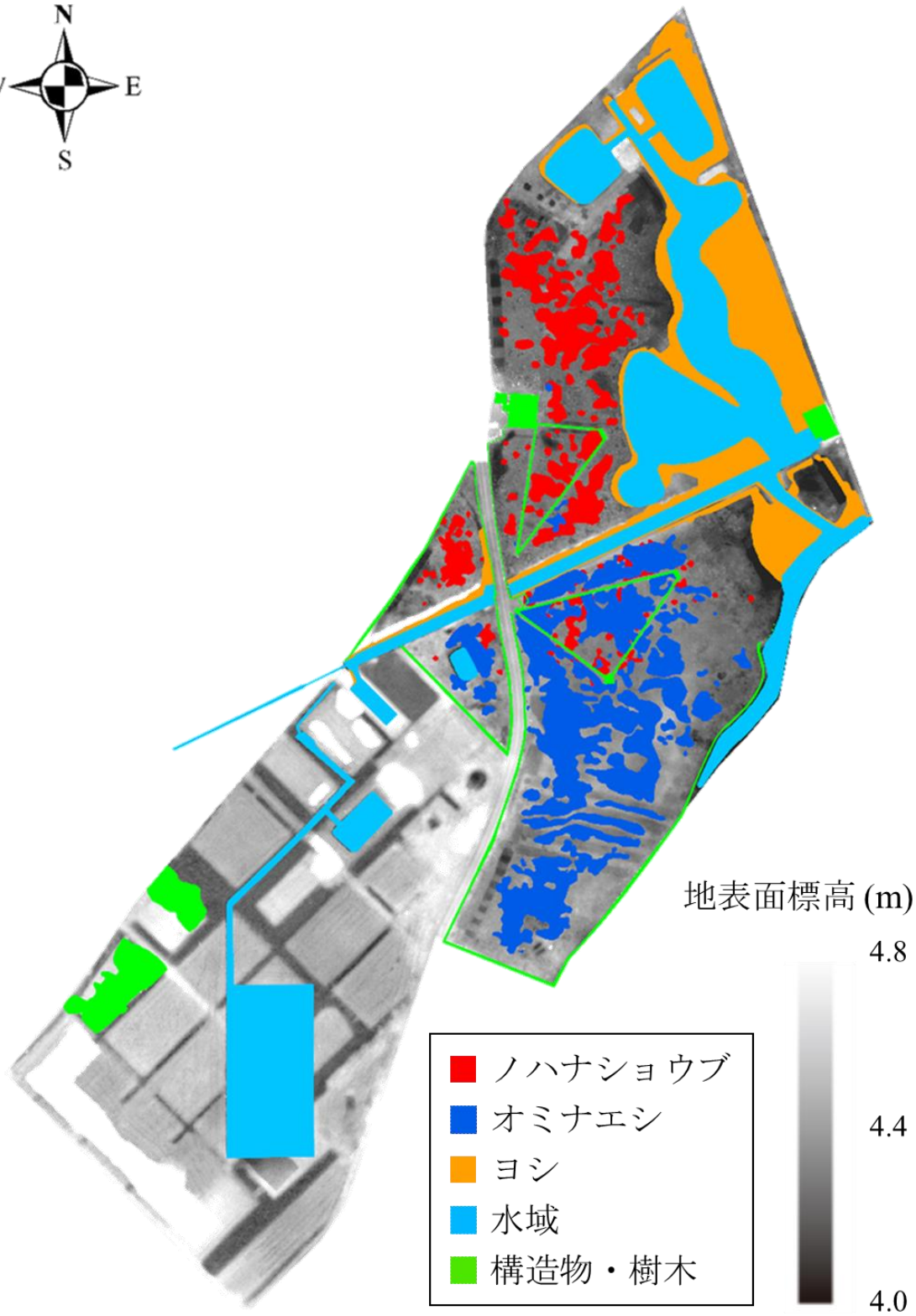


図 9 ノハナショウブ、オミナエシ、ヨシの植生図

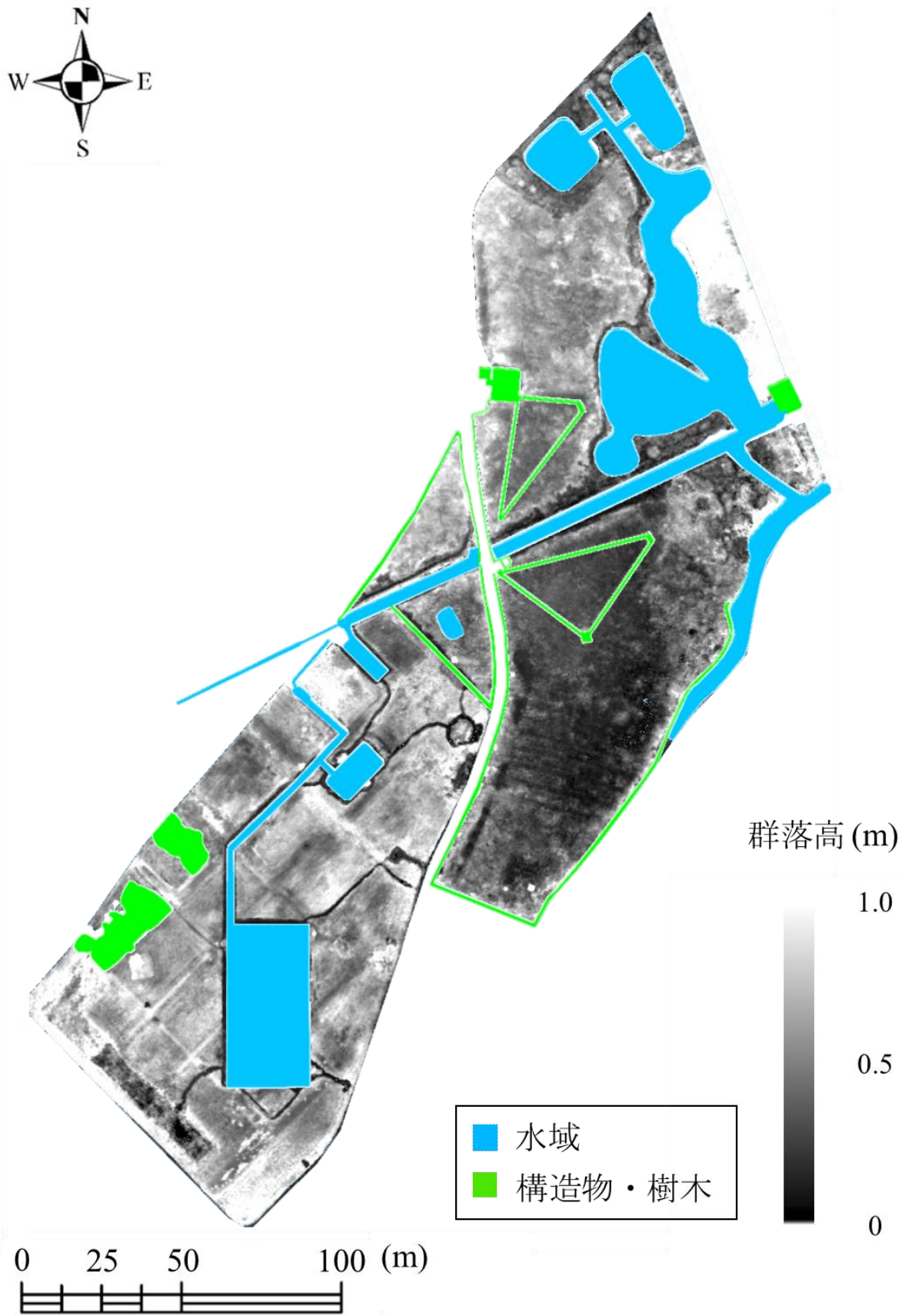


図 10 群落高の空間分布 (6月27日)

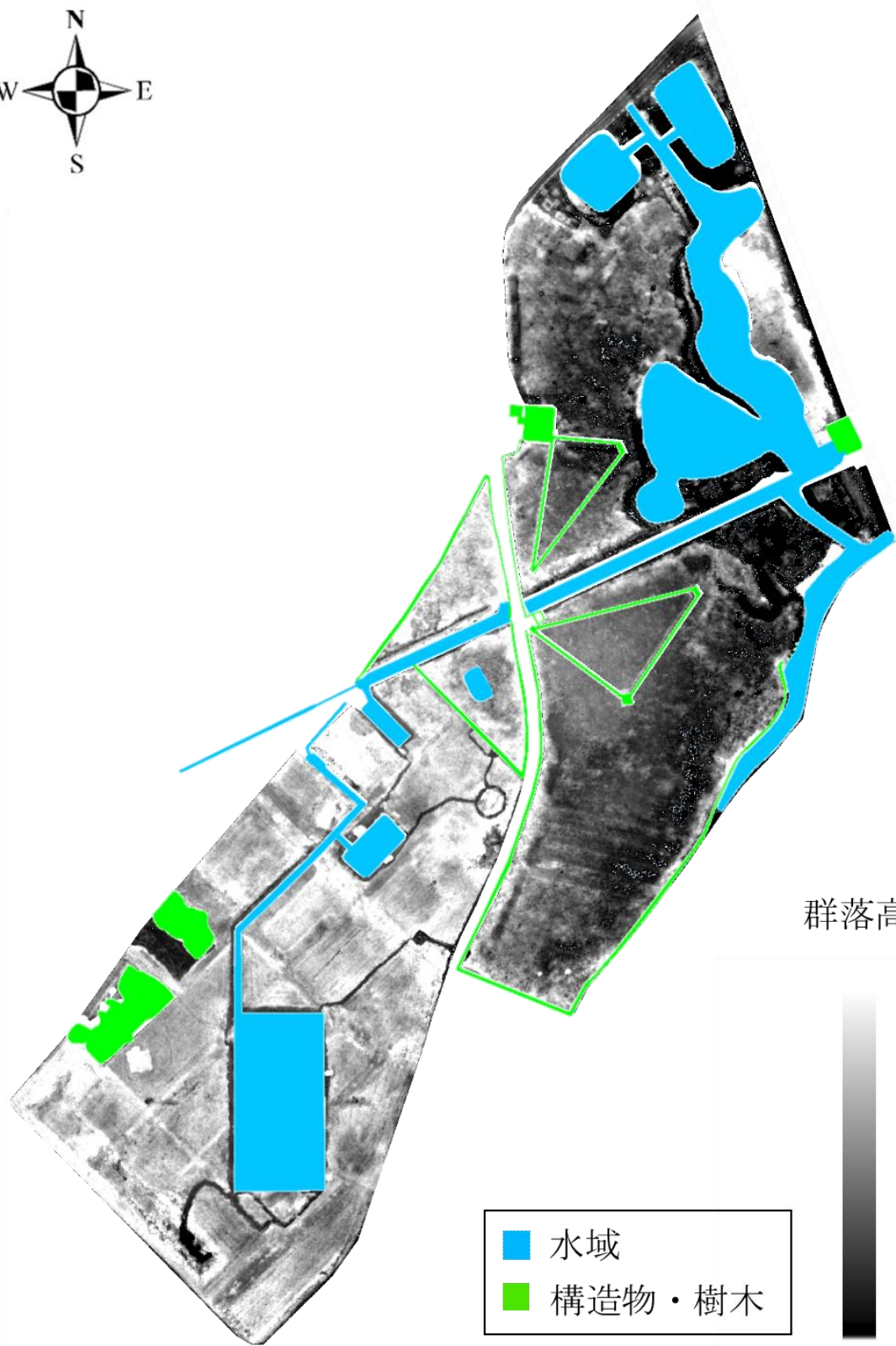


図 11 群落高の空間分布 (9月25日)

× (1)ノハナショウブ □ (2)オミナエシ ○ (3)ヨシ

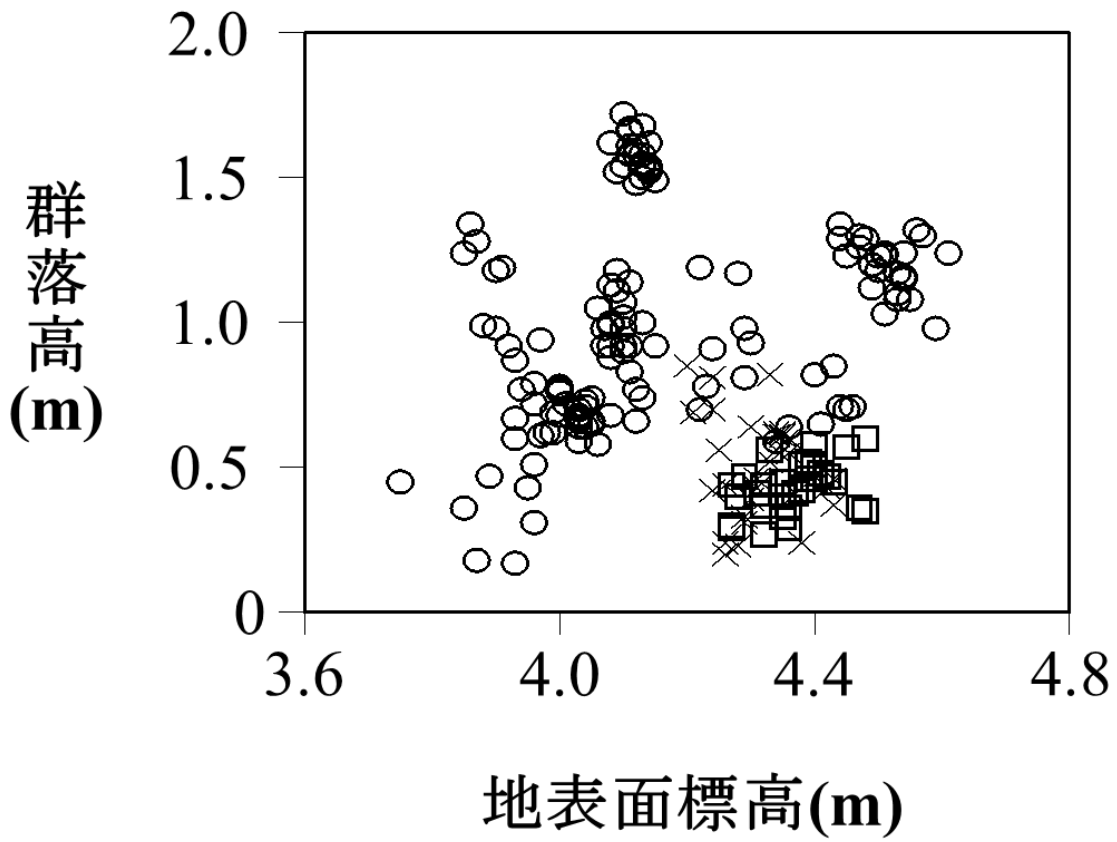


図 12 (1)ノハナショウブ (6月) と(2)オミナエシ (9月) と(3)ヨシ (6月) の群落高と地表面標高の関係

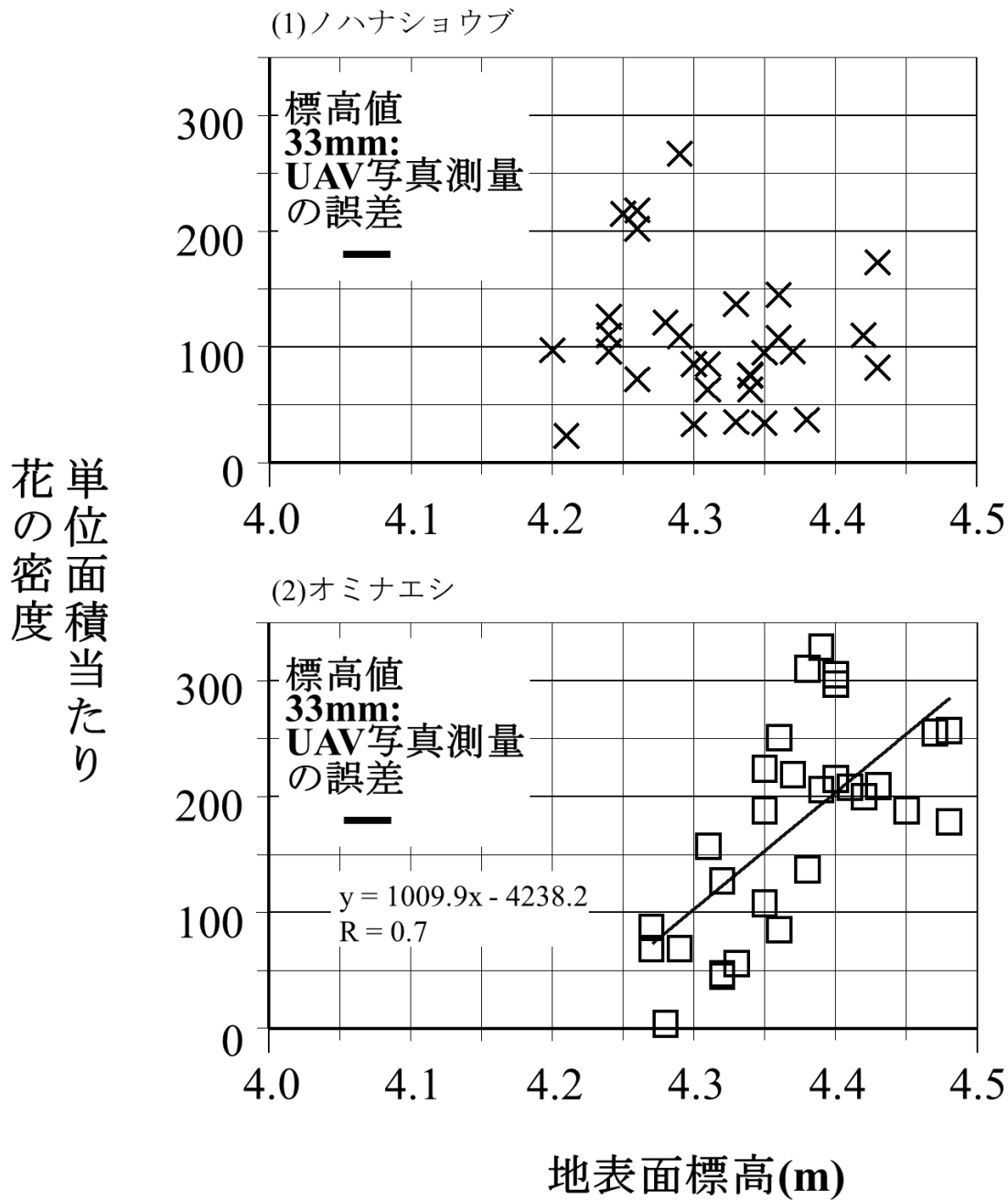


図 13 (1)ノハナショウブ (6月) と(2)オミナエシ (9月) の単位面積あたり花の密度 (幅 10m×長さ 10m 毎の個体数) と地表面標高の関係

表 1 撮影日、諸元と撮影対象

観測日	2017年2月16日	2017年6月27日	2017年9月25日
対地高度 (m)	40	40	30
地上分解能 (mm/pix)	14.5	14.5	12.9
撮影枚数	890	1194	2038
総画素数 (Pix)	26017×36109	19843×22322	31701×43629
対象	地表面の標高 野焼き直後の 状況	群落高 ノハナショウ ブ・ヨシの分布	群落高 オミナエシ の分布

表 2 GCP における標定計算の残差

地上基準点	X 軸方向 (mm)	Y 軸方向 (mm)	Z 軸方向 (mm)
N1	-2	-3	12
5C	3	0	1
5F	6	-8	-67
道路 1	-11	-3	-39
5E	9	-3	-39
4F	-3	14	6
3G	-3	-3	2
2H	2	-3	30
3H	-2	9	117
2 乗平均 平方根	6	6	50

第 4 章 考察

GNSS 測量および UAV ステレオ写真測量それぞれによる地表面の標高値と、本測定時には、地下水のナトリウム濃度の間には負の相関（P 値<0.05）があり、カリウム濃度の間には正の相関（P 値<0.05）があった。対象地域における 2017 年と 2018 年の 10 月では、灌漑期から非灌漑期への移行に伴って、地下水位が 4 メートルから 3 メートル程度まで低下する²¹⁾。地下水位の顕著な年ごとの変動は確認されなかった。10 月以外の時期に同様の観測を行った場合、地表面標高と水質の関係は、異なる関係になるかも知れない。

GNSS 測量と UAV ステレオ写真測量による標高値がともに、観測した地下水水質項目と同様の対応をしていることから、標高と地下水水質の関係を見る際に、UAV ステレオ写真測量が有効であることが明らかになった。

これは作田川による灌漑用水が湿原に流れ込む前に、農業などの人間活動による影響を受けている。また、農地に隣接する中央水路の地点では、特にナトリウム、カルシウム、マグネシウム、塩素などのイオン濃度が高く、農業活動からの流出や肥料の影響を反映している。非灌漑期間は、人間活動の影響を受けにくい状態を捉える。

カリウムは、化学肥料が周辺の農地に投入されるときに含まれる。湿原内には、作田川のポンプ場入口で観測されたカリウム濃度より大きい地点が主として標高の高いところにある。標高が高いところの野焼きで植物体中のカリウムが溶出することにより、カリウム濃度が増加すると考えられる。標高の低い区域では、ヨシやノハナショウブの吸収によりカリウム濃度が低下していると考えられる。ヨシは、湖沼の富栄養化に関わる窒素、リンの吸収能が高いことが知られているが、植物体中のカリウム含有量も高く²²⁾、カリウム吸収能も高いと考えられる。

ノハナショウブは湛水する区域（北区）の標高 4.2m から 4.5m のところに分布していた。ノハナショウブは、冠水条件や乾燥条件が繰り返されることによる乾湿環境を好む²³⁾。地表面の標高値とノハナショウブの密度には、有意な相関が認められなかった。オミナエシは、しばしば湛水する区域（南区）

の標高 4.2m から 4.5m のところに分布していた。オミナエシの出現地点は、微地形の中でも比較的標高の高い乾燥した環境になっていた（図 12）。地表面の標高値と、オミナエシの植生密度の間には相関係数 0.7 の正の相関があった。標高が 100mm 高くなると植生密度は 100 (10m×10m あたりの個数) 大きくなった（図 13）。UAV ステレオ写真測量による地表面の標高計測の平均二乗誤差 33mm を考慮しても、地表面の標高値とオミナエシの植生密度の有意な相関関係は維持される。

ヨシは、中央水路や北区のため池、南区の水域の標高 3.7m から 4.7m のところに分布していた。湿原の東側に固まっているヨシ群落の分布域（図 9）の中でも中央部の区域は地表面標高が低い（図 6）。この区域では 6 月の群落高（図 10）、9 月の群落高（図 11）ともに高い。水質の季節の変化が引き起こしたか他の生育要因によるかは本結果からは特定できない。ヨシ群落は、**標高 4.0m のところに群落高 0.6m、標高 4.1m のところに群落高 1.6m、標高 4.4m のところに群落高 0.3m の集団が見受けられた。**ノハナショウブおよびオミナエシは**標高 4.2m から 4.5m に群落高 0.5m 程度の集団が見受けられた。**この区域は周囲より標高が低いため、水に溶けた栄養塩類が集まりやすく、同時にヨシの生育に適した高い土壌水分量が保たれている。これらにより、この区域でヨシの群落高が高くなっていると考えられる。この区域内および区域外でのヨシの群落高の空間分布（図 10、図 11）は、このような栄養塩類や土壌水分状態の違いを反映していると考えられる。

一般に、湿原における植生分布は、栄養塩類や土壌水分状態や日照条件などの相互環境の下によって影響されることで、多様な環境は豊かな種多様性をもたらす。一方で、食虫植物の生育条件として、標高の低い方から高い方へ、タヌキモ、ミミカキグサ、ムラサキミミカキグサ、ナガバノイシモチソウ、ホザキノミミカキグサ、モウセンゴケ、コモウセンゴケ、イシモチソウと移り変わる²⁴⁾。このため、オミナエシ群落、ノハナショウブ群落、食虫植物は、立地環境に応じて生息地を住み分けている。実際、群落の剥ぎ取りや大型草本類の掘り取りを行うことにより、ミミカキグサの生育範囲が広がる²⁴⁾ことが報告され、人為的な保全管理についての有効性を指摘している²⁴⁾。こ

れは、オミナエシの分布域を人為的に刈り取り管理することで、下層部の日照条件改善と刈取り後の窪みが保水性を高めることにより、食虫植物が生育したと考えられる。食虫植物についても本研究を基礎として、地表面標高の変化とそれに伴う栄養塩類や土壌水分状態から生育環境を評価できれば、保全対策につながる。本研究の手法を用いると湿原内の細かな起伏が鉛直方向に 10mm～20mm の誤差で再現できるため、食虫植物生育に関連する環境を細かく評価することができる。以上の結果から、本研究により得られたデータは、オミナエシ群落、ノハナシヨウブ群落、食虫植物などの生息地パターンが立地環境に応じて変化した。本研究は特定の時期に限定されている。本研究を踏まえてさらなる時系列データの収集と分析を通じて検討する必要がある。これらの生態系における植物群落の分布パターンは、標高と地下水の水質との間に見られる相関関係を通じて、理解を深めることができる。本研究の成果は、草地の管理保全への応用可能性を示唆している。群落高と地表面が草地などの植物群落の種類や生育状況に関わっていることを示した。これらの知見は、湿原の多様な環境と植物群落の維持に向けた今後の保全対策への基盤になる。

第 5 章 結論

本研究では、成東・東金食虫植物群落を対象として、3 時期の UAV ステレオ写真測量で、湿原全体の 6 月と 9 月の群落高の空間分布、地表面標高の分布を得た。こうした空間分布と地下水水質、ノハナショウブ、オミナエシ、ヨシの植生分布との対応を明らかにした。ヨシの群落高の空間分布と地表面標高、土壌中の水や栄養塩類の状態との対応が見られた。検証点での評価の結果、地表面の標高値を 33mm の誤差の範囲で求めることができた。GNSS 測量および UAV ステレオ写真測量それぞれによる地表面の標高値と、同一地点の地下水のナトリウム濃度の間には負の相関があり、カリウム濃度の間には正の相関があった。地表面の標高値と、オミナエシの植生密度の間には正の相関があった。地表面標高と地下水水質の関係や地表面標高と植物種ごとの密度を見る際に、点ごとの GNSS 測量は、面的に地表面標高を与える UAV ステレオ写真測量に変えられることを示した。

引用文献

- 1) 朝香智仁、青山定敬、岩下圭之、工藤勝輝、藤井壽生：小型 UAV が観測した空中写真による海岸クロマツ林の樹高推定、海岸林学会誌、9(2)、pp.91-96(2010)
- 2) 古家直行、高橋正義、中根貴雄、小玉哲大：デジタル空中写真三次元計測による樹高測定の作業効率、北方森林研究、61、pp.115-116(2013)
- 3) 大澤啓志、泉岳樹、七海絵里香、石川幹子：UAVによる高解像度画像を用いた津波被災海岸林の実態把握、日緑工誌、41(1)、pp.157-162(2015)
- 4) 早坂寿人、大野裕幸、大塚力、関谷洋史、瀧繁幸：UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証、国土地理院時報、127、pp.107-116(2015)
- 5) 濱侃、早崎有香、望月篤、鶴岡康夫、田中圭、近藤昭彦：小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング、水文・水資源学会誌、29(1)、pp.44-54(2016)
- 6) Gini, R., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G. : Use of Unmanned Aerial Systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), pp.251-269(2014)
- 7) 小花和宏之、早川裕弼、ゴメスクリストファー：UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング、地形、35(3)、pp.283-294(2014)
- 8) 長井正彦、柴崎亮介：2.センサ統合による UAV 搭載型マッピングシステム、写真測量とリモートセンシング、48(5)、pp.260-265(2009)
- 9) 内山庄一郎、中田高、井上公、熊原康博、杉田暁、井筒潤、後藤秀昭、福井弘道、鈴木比奈子、谷口薫：小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試み-根尾谷断層水鳥断層崖を例に-、活断層研究、40、pp.35-42(2014)
- 10) 吉野邦彦、川口小百合、神田房行：ドローン・カラー空中写真を用いた北海道東部標津湿原の植生図の作成、写真測量とリモートセンシング 57(5)、pp.188-197(2018)

- 11) 小熊宏之、井手玲子、井鷲裕司：UAV 観測画像を用いた絶滅危惧植物の花の自動検出手法。日本リモートセンシング学会誌、36(2)、pp.72-80(2016)
- 12) 渡辺豊、河原能久：UAV を利用した空中写真の河川地形計測への適応性。土木学会論文集、72(4)、pp.I1105-I1110(2016)
- 13) 丹羽英之：UAV による多時期撮影画像を用いた水平方向の位置精度検証。応用生態工学、19(1)、pp.47-53(2016)
- 14) Zhou, Z., Yang, Y., Chen, B. : Estimating *Spartina alterniflora* fractional vegetation cover and aboveground biomass in a coastal wetland using SPOT6 satellite and UAV data. Aquatic Botany、144、pp.38-45(2018)
- 15) 山形与志樹、安岡善文、岩熊敏夫：casi 画像と微細標高データの重ね合わせ解析による湿原モニタリング、日本リモートセンシング学会誌、16(4)、pp.347-354(1996)
- 16) 岩瀬政広：国指定天然記念物「成東・東金食虫植物群落」-天然記念物指定 99 年の歩みと今後の課題-。食虫植物研究会々誌、70(4)、pp.59-68(2019)
- 17) 国土地理院：UAV を用いた公共測量マニュアル（案）、<https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf>.(2017)（2019 年 3 月 2 日確認）
- 18) 弓場憲生：無人機によるオルソモザイク画像の位置精度の検証、広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告、58、pp.26-28(2015)
- 19) 櫻井淳、田中成典、中村健二、窪田諭、今井龍一、重高浩一：UAV の空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案、土木学会論文集、72(2)、pp.73-81(2016)
- 20) 上治雄介、山川陽祐：UAV による空中写真測量技術を用いた河床形状測量における精度検証-東河内沢本川における事例-、筑波大農林技研、5、pp.9-19(2017)
- 21) 笹田勝寛：成東・東金食虫植物群落（地下水位・水質）調査報告。日本大学生物資源科学部生物環境科学科、(2017)

22) Hocking, P. J. : Seasonal dynamics of production, and nutrient accumulation and cycling by *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Stuedel in a nutrient-enriched swamp in Inland Australia. II. Individual Shoots. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 40, pp.421-444(1989)

23) 星透、藤井克己、倉島栄一 : 湿生植物群生地の水収支と土壤水分動態。農業土木学会誌、74(7)、pp.583-586(2006)

24) 能勢正代 : I -2.維管束植物分布。国指定天然記念物「成東・東金食虫植物群落」保護増殖調査(2000-2003)。成東町・東金市教育委員会、pp.23-52(2003)

謝辞

本論文の主査として、日本大学生物資源科学部の串田圭司教授には学問の深遠さを賜りながら、緻密なご指導をいただきました。先生の豊富な経験と広い視野からのご指導、私の研究を大きく深化させるものとなりました。この場を借りて、先生への深い感謝と敬意を表明いたします。

副査として日本大学生物資源科学部のロイキンシュック教授、長坂貞郎教授、笹田勝寛准教授には、それぞれの専門分野における詳細かつ的確なご指導を賜りました。特に、ロイキンシュック教授からは多様な研究アプローチの手法に関する貴重なご教示をいただきました。長坂貞郎教授の深い知見に基づく水質に関する指導は、私の研究をより深化する方向となりました。また、笹田勝寛准教授からは、異なる研究室の立場から、土壌物理に関する有益なご教示をいただきました。先生への深い感謝の意を表します。

串田先生の下、研究室にて私をサポートして下さった宮坂加理助教には、データ分析の際に具体的なアドバイスや技術的支持を頂きました。専門的なご支援により研究の進行に大きな支えとなりました。心より感謝申し上げます。

日本大学生物資源科学部の野口章教授には研究の過程で温かいご指導とお力添えを賜り、深く御礼申し上げます。

調査研究に際しては、山武市教育委員会生涯学習課の平山誠一さん、稲見英輔さん、そして、成東・東金食虫植物群落を守る会の岩瀬政広さん、能勢正一代さんら多くの方々から宝贵なご指摘やアドバイスを賜った。これらのご教示は今後の研究活動に大いに役立つと考えており、その内容を反映させて参りたい。

本研究において未熟な点も多くございますが、今後とも各方面からのご指導を謙虚に受け入れ、研究活動を続けて参りたいと存じます。

末筆であるが、本論文の完成は多くの方々のご支援、ご援助、そしてご協力の賜物であります。それぞれの助言や援助が私の学びを一層深化させるものとなりました。関係者各位に心より感謝申し上げます。