

# 論文の内容の要旨

氏名：内藤 義樹

博士の専攻分野の名称：博士（生物資源科学）

論文題名：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

## 第1章 研究の背景と目的

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。森林研究、農業栽培管理研究、植生研究、海岸研究、地形研究が実施されている。環境保全対策のために、絶滅危惧植物の花の自動検出手法を開発した研究が実施されている。UAVによる3次元地形測量とその精度評価やUAV-LiDAR技術も進んでいる。

湿原では地形に応じて水が停滞や地下水位を変えることにより、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。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。

## 第2章 方法

本湿原では、食虫植物群落を保持するために灌漑され、また毎年1月末に野焼きが行われている。野焼き直後の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。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。各植生分布は、目視判読により得る。地上解像度は15mmとした。

本湿原は、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。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。UAV（DJI社製Inspire1）は、飛行管制ソフトウェアDronedeploy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1200万画素の静止画を撮影した。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。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。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には、ソフトウェアPhotoscan Proを使用した。

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。写真はPhotoshopCC(Adobe社製)を用いて、目視判読した。

2月の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、検証点は直線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。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。検証点の算出では国土地理院の手法を用いた。

非灌漑期ではあるが地下水位が比較的高い 2018 年 10 月 25 日に、作田川のポンプ場入口と湿原内の 16 地点にて地下水観測孔を用いて採水した。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。イオンクロマトグラフ分析システム(島津製作所製 CDD-6A)で測定した。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

地表面標高図(DEM)を図1に示す。南西の元来田畑であった地形、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、中央水路より南部にしばしば湛水する区域、中央南西部に標高が高く湛水しない区域が存在する。9点のGCPにおける標定計算の残差の平均値は、X方向6mm、Y方向6mm、Z方向50mmであった。26点の検証点における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した。これらの差の平均平方二乗誤差は、Z軸方向(鉛直方向)で33mmであった。UAVによる標高値がGNSSによる標高値より概ね20mm小さく、この系統的な誤差を除くと鉛直方向に10mm~20mmの誤差で再現できていた。



図1. 地表面標高図(野焼き直後)



図2. 群落高の空間分布(6月27日)

地下水水質とその点での標高関係を求めた。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ものとした。pHの範囲は、5.06から7.10であり、ECの範囲は、 $8.08 \mu\text{S}/\text{m}$ から $23.90 \mu\text{S}/\text{m}$ であった。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、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。

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、湿原東側のため池や水域に存在した。

図2に6月27日の群落高の空間分布を示す。ヨシとノハナショウブが6月に生育最盛期のため、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。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1)。この区域では6月と9月ともに群落高が高い。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。植生密度(幅10m×長さ10m毎の個体数)とそのコドラートの中心の標高の関係では、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。

#### 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、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。カリウムは、化学肥料が周辺の農地に投入時に含まれる。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、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)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。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)に分布していた。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(幅10m×長さ10m毎の個体数)は大きくなった。UAVステレオ写真測量による地表面の標高計測の誤差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、南区の水域に分布していた。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。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。これらのことにより、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2)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。

#### 第5章 結論

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。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。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。

#### 研究業績

<論文発表>

内藤義樹, 串田圭司, 吉井清二, 笹田勝寛(2022) 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と地下水質の関係の評価. 日本写真測量学会誌, 「写真測量とリモートセンシング」61(6): 358-367.

<学会発表>

内藤義樹, 笹田勝寛, 串田圭司, 對馬孝治(2017) 湿原環境把握における小型UAV導入の評価. 農業農村工学会H29年度大会講演会, 10-30:768-769.