原著論文 ORIGINAL PAPER

丘陵地の谷底における水田雑草群落の種組成の空間パターンに水流のつながりが与える影響

根本 真理¹⁾・星野 義延²⁾

1) 東京農工大学大学院連合農学研究科

2) 東京農工大学大学院共生科学技術研究院

Mari NEMOTO¹⁾, Yoshinobu HOSHINO²⁾: Effects of water flow connection on spatial patterns of species composition in weed communities in terraced paddy field. *Ecol. Civil Eng.* 10(2), 163-174, 2007.

1) United Graduate School of agricultural science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

2) Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

Abstract: The spatial pattern of species composition in weed communities and the effects of water flow connection were studied in paddy fields on the bottom of the small valley, in Tochigi Prefecture, central Japan. In fall, the species composition and water content were investigated a series of 4-m² quadrat in 47 paddy fields. Eighty-six quadrats divided into two clusters and 13 subclusters from species composition using the cluster analysis. By using the results of cluster analysis of the species composition, 86 quadrats were divided into 2 clusters and 13 subclusters. The 2 clusters corresponded to the difference in water content. Paddy fields integrated into the same subcluster were observed to hold together spatially. The combination of all paddy fields showed a negative correlation between the similarity index and the horizontal distance. The correlation coefficient values, which were calculated for the similarity index and 3 types of distances (horizontal distance, 3-dimensional distance, and 3-dimensional distance along the path of water flow) in the quadrat at the lowest elevation, were the highest for the distance along the path of water flow. The similarity index between two adjacent paddy fields with a water inlet was significantly higher than that of adjacent paddy fields without one. Six species had a significantly higher presence in a quadrat that was connected by a water inlet to a field at a higher elevation. It was suggested that factors related to irrigation such as the distance of water flow or a water inlet between paddy fields affected the spatial patterns of species composition in weed communities due to seed dispersal by water.

Key words: distance decay of similarity, irrigation across paddy fields, seed dispersal by water, spatial autocorrelation, terraced paddy field.

はじめに

伝統的な耕作様式で保たれている水田は、様々な分類群の生物にとって生物多様性保全上重要なビオトープと

して注目されている (守山 1997, 1998). 水田では稲を栽培するにあたり、水の導入・排出といった水管理がおこなわれている. 圃場整備がおこなわれていない水田で多くとられている水管理方法である田越し灌漑型 (田淵 2000) では、水は水田を介して上部の水田から下流部の水田へと順に送られる. 田越し灌漑のもとで生き物の水

2006 年 8 月 13 日受付, 2006 年 12 月 20 日受理

1) e-mail: nemoma@cc.tuat.ac.jp

田間の田越し移動が容易であった(守山 1998; 富田 2000) ことから, こういった水流のつながりが水田生態系における生物群集の分布パターンに影響することが示唆される. 実際に, 灌漑方法の違いによって種類相及び個体数の違いが生じることが魚類について指摘されている(片野ほか 2001).

水田に成立する植生については, Miyawaki (1960) などにより植物社会学的観点から, 水田雑草群落の種組成による分類・体系化がおこなわれており, 広域的スケールで種組成の空間パターンが記述されている. 種組成の異なる群落の成立要因に関しては, 春先の耕起の時期や, 水分状態から説明されてきた(宮脇 1977). 下田 (2000) は, 稲作にともなう水分状態の変化に対応して水田に成立する群落が季節毎に変化すること, 湿田・乾田といった水田の水分状態の違いに対応して成立する植物群集が異なることなどをまとめて示している. このように, 水田雑草群落の種組成は管理に伴う攪乱や水分状態から説明されてきた一方で, 局所的な水田雑草群落の種組成の空間パターンを検討した研究はみられず, 水流のつながりが与える影響については全くわかっていない. また, 用水路と排水路を独立させる水田の圃場整備や耕作の放棄によって水田生態系における水流のつながりが稀薄になってきている. こうした状況下において局所的な水田雑草群落の空間パターンや, それに水流のつながりが与える影響を検討することは, 伝統的な水田耕作手法である田越し灌漑の水田雑草群落の種組成の維持に果たす役割を評価するうえで重要であり, 水田生態系の保全に役

立つ知見を提供するものとなる.

本研究は, 丘陵地の谷間に成立する田越し灌漑が行われている水田において, 水田雑草群落の種組成の空間パターンを明らかにすることを目的とした. 群落組成の空間パターンを定量的に記述する方法の一つに, 距離と種組成の類似性の関係から取り組む方法があり, これまでいくつかのフィールドで研究がなされてきている(Nekola & White 1999; Mistral et al. 2000; Balvanera et al. 2002; Valencia et al. 2004). 本研究においても, 主に距離と類似性の関係から種組成の空間パターンを記述し, 水流のつながりが与える効果に注目して解析をおこなった.

方 法

調査地

栃木県茂木町牧野の丘陵地の谷間に連続して配置されている 47 枚の耕作水田を対象に調査をおこなった (Fig. 1).

調査地のある茂木町は標高約 90 m ~ 250 m の小起伏状山地と丘陵地が町域の多くを占める丘陵地帯であり, その谷間に開かれた水田が多く残る地域である. 調査地には面積が 20 ~ 650 m² 程度の小さい水田が連なって存在し, 水田間の水路を通して水が供給される田越し灌漑が行われている. 茂木町の年平均降水量は 1403.6 mm, 年平均気温は 13.4℃である(茂木町史編さん委員会 1996).

本調査地は茂木町の北部に位置し(北緯 36° 34' 37",

Fig. 1. (a) The location of the study site (b) An aerial photograph of terraced paddy fields at Magino. [Realism image information (color aerial photograph taken in 1974) photograph provided by the Land, Infrastructure and Transportation Ministry of Japan] (c) The land use map around the study site.

図 1. (a) 調査地位置図 (b) 牧野の棚田, 国土画像情報(カラー空中写真; 1974年撮影) 国土交通省を使用. (c) 調査地周辺の土地利用図

東経 140° 12' 11"), この牧野の水田は、栃木県により「残したい栃木の棚田 21」の一つに選定されている。また、調査地の北東側に位置する谷には、棚田 100 選(1999 年 7 月 26 日農林水産省認定地区)の一つに指定される石畑の棚田がある。棚田の定量的定義は傾斜 1/20 以上の斜面にある水田(中島 1999)とされることもあるが、調査対象とした範囲の水田はそこまでの傾斜はない場所のほうが多い。むしろ千葉県や茨城県南部で台地の谷底にみられる水田を呼ぶ名称である谷津田や、東京都や神奈川県丘陵地・台地の谷底にみられる谷戸田に類似する景観である。

谷津田や谷戸田、棚田は、個々の水田が小規模で比高差が大きいため、大型耕作機械が使用できないなど作業効率が悪く、耕作放棄されやすい。そのため、現在ではまともな水田耕作が行われている場所は非常に限られている。しかしながら、本調査地では耕作水田が空間的に連続して配置している。何カ所かに暗渠排水のための調節機がみられ、小規模な土地改良工事が行われているものの、大規模な圃場整備は行われていない。また、周囲の丘陵部の斜面においても、大規模な地形改変は行われていない。現地での聞き取りでは、農業をほとんど使わずに稲作を行っており、水田間の短水路は年中使用しているとのことである。また年数回の観察の限りでは、調査対象とした水田間において、耕作法やその時期について目立った違いはみられなかった。

調査方法

2002 年 10 月 27~28 日に、稲の刈り取り後の水田内に成立している雑草群落を対象として植生調査をおこなった。比較的均質な広がり植分において調査可能で、かつ構成種をできるだけ多く把握できる、できるだけ広い面積サイズを検討した結果、スタンドの面積を 2 m × 2 m とした。調査地内の多くの水田には、比較的乾いた立地と排水が悪く湿った状態もしくは浸水した状態の立地という水分状態の異なる立地が、一枚の水田中に同時にみられ、それぞれの立地に異なる植生タイプが成立していた。その場合はそれぞれの植生タイプにスタンドを設置した。その結果、調査対象とした 47 枚の水田のうち、39 枚の水田において 2 スタンドが設置され、8 枚の水田には 1 スタンドが設置された。各スタンドの水分状態を 5 段階(やや乾、適、湿、過湿、浸水状態)で判定し記録した。

土壌条件と種組成の関係をより詳細に検討するため、2003 年の 11 月 1~2 日に、2002 年に調査した水田の中から 17 枚を選出して、同様な植生調査を実施し、同時に

スタンド内の土壌の体積水分率と pH を測定した。体積水分率は、TDR 式水分センサー(CAMPEBELL SCIENTIFIC 社製, Hydrosense, 12 cm ロッド使用)を用いて野外にて記録した。pH は、土壌を持ち帰り、ガラス電極式 pH 計(電気化学計器株式会社, PHL-20 型)を用いて室内にて測定した。

調査対象とした水田の位置関係を把握するために、地形図(1:2500)(林班図縮尺 1:5000 を 2 倍に拡大して使用)上に水田の位置と形、水田間の水路の有無及び位置を記録した(Fig. 2)。また、各水田の垂直方向での位置を把握するために、各水田間の比高を測定した。なお、Fig. 2 上で、図の上から下に向かって水が流れている。

学名は大井(1992)、中池(1992)に従った。

種組成によるスタンドの分類

各水田に成立する植生を類型化するため、2002 年の調査で得られた植生調査資料をクラスター解析によりグループ化した。その際、類似度には Jaccard の共通係数を、結合法には可変法($\beta = -0.25$)を用いた。2003 年の調査で得られた植生調査資料も同様の手法によりグループ化し、グルーピングされたクラスター間でスタンドの土壌水分と pH を比較した。クラスター解析には PC-ORD 第 4 版(McCune & Mefford 1999)を使用した。

また、得られた植生データからフロラリストを作成し、各種の生活型と散布型を沼田・吉沢(1971)及び千葉県史料研究財団(2003)を用いて判定した。

本研究において、類似度指数はすべて Jaccard の共通係数(C)を用いて算出した。Jaccard の共通係数は以下の式によって表される。

$$C = a / (a + b + c)$$

このとき、 a は両スタンドに共通する種数、 b と c はそれぞれのスタンドにのみ出現する種数である。

距離と種組成の類似性の関係

水田間の距離と種組成の類似性の関係を検討するため、すべてのスタンド間の組み合わせについて類似度と距離(水平方向の直線距離)を算出し、相関関係について randomization (Monte Carlo) 検定をおこなった。解析には 2002 年のデータのみを使用し、解析ソフトには PC-ORD 第 4 版(McCune & Mefford 1999)を使用した。

また、実際の水の流れに沿った距離の効果を評価するために、最下流に位置する水田と他の水田との間で以下に示す 3 つの距離を算出し、各距離と種組成の類似度との関係を比較した。

Fig. 2. The position of water inlets connecting the paddy fields and the details of distances between the paddy fields. The direction of water flow is top to down. Distance A (solid line) is a horizontal distance and Distance B (dotted line) is the distance along the path of water flow that connects fields at a lower elevation to the fields at a higher elevation.

図 2. 水田をつないでいる小水路の位置と使用した水田間の距離を表す図. 図上で上から下方向に水が流れている. 最下部の水田と最上部の水田間の, 距離 A (実線) は水平距離, 距離 B (点線) は水の流れに沿った距離を表す.

Distance A; 水平距離, 2次元のユークリッド距離

Distance A'; 斜距離, 3次元のユークリッド距離 (垂直方向の位置も考慮したもの)

Distance B; 谷の向きの転換点 (Fig. 2 参照) を通る直線により近似した, 水の流れに沿った斜距離

距離の計算には, 水田の重心と比高による各水田の 3次元の座標を用いた. 水田の重心の座標は, GIS ソフト (PC-mapping) を用いて算出した.

水田をつなぐ短水路の有無による類似性の違い

水田間の水路の有無が種組成に与える影響を検討するため以下の解析をおこなった. 隣り合う水田のスタンド間の類似度を算出し, 短水路でつながっている場合とつながっていない場合の値を比較し, U 検定をおこなった. さらに, 隣り合う水田のすべての組み合わせにおいて, 上方の水田のスタンドに出現する種が下方の水田のスタンドにも出現する比率が, 水田間の短水路の有無で異なるかどうか Fisher の正確確率検定を用いて検定した. 検定には R (ver. 2.0.1) を用いた.

結 果

出現した植物の特徴

2002 年の調査で, 計 86 のスタンドにおいて植生調査資料が得られた. 全スタンドの総出現種数は 99 種であった. この中には, ミズニラ (*Isoetes japonica*), ミズマツバ (*Rotala pusilla*) といった国レベルでの絶滅危惧種に指定される種が含まれていた (いずれも絶滅危惧 II 類). 出現種の内訳を散布型でみると, 最も多いのは重力散布型の種で 35% であり, ついで水流散布型の種が 32%, 風散布型の種が 24%, その他の散布型の種が 12% であった. 生活型では, 一年草が 57%, 多年草が 29% であった. スタンドの出現種数は 2 ~ 27 種であり, 平均 12.4 (SD ± 6.4) 種であった. 構成種は, スズメノテッポウ (*Alopecurus aequalis*), タネツケバナ (*Cardamine flexuosa*), ノミノフスマ (*Stellaria alsine* var. *undulata*) といった, 冬緑性の春季の水田雑草, コナギ (*Monochoria vaginalis* var. *plantaginea*), アゼナ (*Lindernia procumbens*) といった夏

季の水田雑草，チョウジタデ (*Ludwigia epilobioides*)，ヤナギタデ (*Polygonum hydropiper*) といった秋季の水田雑草から成り立っていた。

種組成によるスタンドの分類

2002 年の調査で得られたスタンドの種組成を用いてクラスター解析をおこなった結果，大きく 2 つのクラスターに分類された。クラスター I のスタンドは，スズメノテッポウ，スカシタゴボウ (*Rorippa islandica*)，ノミノフスマ，メヒシバ (*Digitaria adscendens*) といった種が高頻度で出現し，主として水分状態がやや乾，適，湿のスタンドで構成されていた。クラスター II のスタンドには，コナギ，イヌホタルイ (*Scirpus juncooides* var. *ohwianus*)，ミゾソバ (*Polygonum thunbergii*) といった種が高頻度で出現し，主として水分状態が過湿，浸水状態のスタンドで構成されていた。平均出現種数は，クラスター I で 18.1 種，クラスター II では平均 7.4 種であった。同一水田内の水分状態が異なる立地から得られた 2 つの植生調査資料は，4 枚の水田から得られたものを除き，それぞれ異なるクラスターに分類された。デンドログラムを information remaining=37.5% で区切ると，クラスター I は 7 つのサブクラスター，クラスター II は 6 つのサブクラスターに下位区分できた (Table 1, Fig. 3)。

各サブクラスターの種組成の特徴を以下に示す。

サブクラスター I A: コナギ，タウコギ (*Bidens tripartita*)，イボクサ (*Aneilema keisak*) が高頻度で出現する一方，クラスター I を特徴づけるメヒシバ，ナズナ (*Capsella bursa-pastoris*)，コオニタビラコ (*Lapsana apogonoides*) の出現頻度は低い。

I B: 全体的には I A と同様な種組成をもつが，I A に高頻度で出現するイボクサ，タウコギを欠く。

I C: ミズハコベ (*Callitriche verna*) が特徴的にみられ，ニッポンイヌノヒゲ (*Eriocaulon hondoense*)，イヌホタルイが高頻度で出現した。

I D: アメリカアゼナ (*Lindernia dubia*)，ベニバナボロギク (*Crassocephalum crepidioides*) といった外来種が特徴的にみられた。

I E: I D での外来種に加え，ミミナグサ (*Cerastium holosteoides* var. *angustifolium*) が特徴的にみられ，ハハコグサ (*Gnaphalium affine*) が高頻度で出現した。

I F: ケキツネノボタン (*Ranunculus cantoniensis*)，トキンソウ (*Centipeda minima*) などの種が高頻度で出現した。

I G: ヌメリグサ (*Sacciolepis indica* var. *oryztorum*)，ヒナガヤツリ (*Cyperus flaccidus*)，ヒデリコ (*Fimbristylis mili-*

acea) といった矮小の一年草の種が特徴的にみられた。

II A, II B, II C は互いに共通性が高く，いずれもコナギが高頻度で出現した。

II A: サヤヌカグサ (*Leersia sayanuka*) が特徴的かつ高頻度で出現し，オモダカを欠く。

II B: 特徴を欠くが，クログワイ (*Eleocharis kuroguwai*) の出現頻度が最も高い。

II C: クラスター II のなかでは，チョウジタデ，スズメノテッポウが高頻度で出現した。

II D: クラスター II のなかでは，ヤナギタデ，タウコギが高頻度で出現した。

II E: ホシクサ (*Eriocaulon sieboldianum*)，ハリイ (*Eleocharis congesta*) が高頻度で出現した。ミズニラが特徴的にみられた。

II F: マツバイ (*Eleocharis acicularis* var. *longiseta*)，ニッポンイヌノヒゲが高頻度で出現した。

クラスター毎に水田の位置との対応をみると，同じサブクラスターに分類されたスタンドは，互いに近接する水田に分布する傾向がみられ，その傾向はクラスター I で顕著であった (Fig. 3)。クラスター II では，[A, B, C] と [D, F] と [F] という 3 つのサブクラスター群と配置との対応をみると，同じサブクラスター群に分類されたスタンドは互いに近接する水田に分布する傾向があった (Fig. 3)。

2003 年の調査から得られたスタンドの種組成を用いてクラスター解析をおこなった結果，2002 年の場合と同様に，大きく 2 つのクラスターに分類された。スタンドの土壤水分率はクラスター II の方が有意に大きかった (Fig. 4a; $p < 0.01$, U 検定)。pH はクラスター間で有意な差はなかった (Fig. 4b)。

上記の結果から，同一水田内に認められる 2 つの異なる植生タイプは水分条件の違いを反映し，それぞれ異なるクラスターに分類された。そのため，以下の解析はクラスター毎にスタンド群をまとめておこない，クラスター I，クラスター II に属するスタンド群をそれぞれクラスター I，クラスター II と呼ぶ。

種組成の類似性と距離の関係

スタンド間の類似度とスタンドの位置する水田間の直線距離の関係について randomization 検定をおこなった結果，相関係数は，クラスター I，II でそれぞれ， -0.155 ， -0.153 であった (いずれも $p < 0.01$)。この結果から，距離と種組成の類似度の間には弱いながらも負の相関関係があることが示唆された。

最下流に位置する水田と他の水田間の類似度と 3 タイ

表 1. サブクラスター別の主要種と出現頻度. いずれかのサブクラスターにおいて, 頻度が30%以上となる種を対象として表示した. 出現頻度クラス; I: -20%, II: 20.1-40%, III: 40.1-60%, IV: 60.1-80%, V: 80.1-100%. 各サブクラスターの調査区数が5未満の場合には, 出現スタンド数を示した.

Species name	Cluster Subcluster	I							II					
		A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F
		Stand number	10	7	2	10	7	7	5	4	9	7	9	3
Number of total species	49	37	27	43	38	50	41	10	15	14	23	21	15	
Average species number	17	15	19	18	17	20	23	6	6	7	9	12	7	
<i>Oryza sativa</i>	イネ	V	V	2	V	V	V	V	4	V	V	V	3	V
<i>Cardamine flexuosa</i>	タネツケバナ	V	V	2	V	V	V	V	2	I	V	IV	2	II
<i>Ludwigia epilobioides</i>	チョウジタデ	II	V	1	V	IV	V	II	1	II	V	II	·	I
<i>Monochoria vaginalis</i> var. <i>plantaginea</i>	コナギ	V	III	1	I	I	II	·	4	V	IV	III	3	V
<i>Oenanthe javanica</i>	セリ	I	III	2	·	II	III	II	2	IV	II	IV	2	V
<i>Sagittaria trifolia</i>	オモダカ	III	V	·	I	III	III	·	·	V	V	III	2	·
<i>Rorippa islandica</i>	スカシタゴボウ	V	V	2	V	V	V	V	1	I	II	I	1	·
<i>Lindernia procumbens</i>	アゼナ	II	IV	2	II	IV	V	II	1	I	·	II	·	·
<i>Ranunculus cantoniensis</i>	ケキツネノボタン	I	II	1	·	II	IV	·	·	·	II	I	·	·
<i>Polygonum hydropiper</i>	ヤナギタデ	V	IV	1	II	·	III	V	·	·	II	V	·	·
<i>Alopecurus aequalis</i>	スズメノテッポウ	IV	IV	·	V	V	V	V	1	·	III	·	·	·
<i>Lobelia chinensis</i>	ミゾカクシ	V	·	1	·	I	III	V	·	II	·	·	·	I
<i>Rotala indica</i>	キカシグサ	II	II	2	I	·	I	V	·	·	·	III	2	·
<i>Hypericum laxum</i>	コケオトギリ	III	III	2	·	·	III	III	·	·	·	I	·	·
<i>Fimbristylis miliacea</i>	ヒデリコ	III	II	·	·	·	II	V	·	·	·	I	2	·
<i>Rorippa indica</i>	イヌガラシ	II	III	1	IV	V	III	I	·	·	I	·	·	·
<i>Stellaria alsine</i> var. <i>undulata</i>	ノミノフスマ	IV	V	2	IV	V	V	IV	·	·	·	II	·	I
<i>Digitaria adscendens</i>	メヒシバ	I	I	2	V	V	IV	V	·	·	·	·	·	·
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	ナズナ	I	II	1	V	V	V	II	·	·	·	·	·	·
<i>Lapsana apogonoides</i>	コオニタビラコ	I	III	1	V	III	III	V	·	·	·	·	·	·
<i>Centipeda minima</i>	トキンソウ	I	·	1	IV	III	V	II	·	·	·	·	·	·
<i>Polygonum longisetum</i>	イヌタデ	II	III	1	·	III	IV	II	·	·	·	·	·	·
<i>Sedum bulbiferum</i>	コモチマンネングサ	I	I	·	II	II	III	I	·	·	·	·	·	·
<i>Acalypha australis</i>	エノキグサ	·	II	·	I	III	I	III	·	·	·	·	·	·
<i>Vandellia angustifolia</i>	アゼトウガラシ	I	II	·	II	·	I	III	·	·	·	·	·	·
<i>Eclipta prostrata</i>	タカサブロウ	II	I	·	V	III	IV	V	·	·	·	·	·	I
<i>Poa annua</i>	スズメノカタビラ	·	I	·	V	V	III	IV	·	·	·	·	·	·
<i>Gnaphalium affine</i>	ハハコグサ	·	·	·	I	III	II	II	·	·	·	·	·	·
<i>Eleocharis acicularis</i> var. <i>longiseta</i>	マツバイ	II	I	1	·	·	·	II	·	·	·	·	1	III
<i>Eriocaulon hondoense</i>	ニッポンイヌノヒゲ	II	I	2	·	·	·	I	·	·	·	·	1	III
<i>Cyperus brevifolius</i> var. <i>leiolepis</i>	ヒメクグ	I	II	1	·	·	·	I	·	·	·	·	·	·
<i>Sacciolepis indica</i> var. <i>oryzeturum</i>	ヌメリグサ	I	I	·	·	·	I	IV	·	·	·	·	·	·
<i>Cyperus flaccidus</i>	ヒナガヤツリ	III	I	·	·	·	·	IV	·	·	·	·	·	·
<i>Vandellia anagallis</i> var. <i>verbenaeifolia</i>	スズメノトウガラシ	I	·	·	·	·	I	II	·	·	·	I	·	·
<i>Lindernia dubia</i>	アメリカアゼナ	·	·	·	II	III	·	·	·	·	·	·	·	I
<i>Crassocephalum crepidioides</i>	ベニバナボロギク	·	·	·	II	III	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Solanum nigrum</i>	イヌホオズキ	·	·	·	II	I	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Equisetum arvense</i>	スギナ	I	·	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Cerastium holosteoides</i> var. <i>angustifolium</i>	ミミナグサ	·	·	1	·	II	·	·	·	·	·	·	·	·
<i>Callitriche verna</i>	ミズハコベ	·	·	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·

<i>Hydrocotyle maritima</i>	ノチドメ	・	・	・	・	・	I	II	・	・	・	・	・	・	・
<i>Setaria glauca</i>	キンエノコロ	・	・	・	・	・	・	II	・	・	・	・	・	・	・
<i>Bidens tripartita</i>	タウコギ	III	・	・	・	・	I	・	・	・	・	IV	1	・	・
<i>Aneilema keisak</i>	イボクサ	III	・	・	・	・	I	・	・	・	・	・	2	・	・
<i>Mosla dianthera</i>	ヒメジソ	・	・	・	・	・	I	II	・	・	・	II	・	・	・
<i>Panicum bisulcatum</i>	ヌカキビ	I	・	・	・	・	・	II	・	II	・	・	・	・	・
<i>Eriocaulon sieboldtianum</i>	ホシクサ	I	・	1	・	・	・	・	・	・	・	I	2	・	・
<i>Eleocharis congesta</i>	ハリイ	I	・	・	・	・	・	・	・	・	・	I	2	・	・
<i>Scirpus juncoides</i> var. <i>ohwianus</i>	イヌホタルイ	II	I	2	・	・	・	・	2	III	II	III	・	II	・
<i>Eleocharis kuroguwai</i>	クログワイ	・	・	・	・	・	・	・	・	II	I	I	1	・	・
<i>Polygonum thunbergii</i>	ミゾソバ	・	・	・	・	・	・	・	・	I	I	III	2	III	・
<i>Bidens frondosa</i>	アメリカセンダングサ	・	・	・	・	・	・	・	・	I	・	・	1	I	・
<i>Leersia sayanuka</i>	サヤヌカグサ	・	・	・	・	I	・	・	4	・	・	II	1	II	・
<i>Polygonum nipponense</i>	ヤノネグサ	・	・	・	I	・	・	・	・	I	・	・	2	・	・
<i>Glyceria ischyrroneura</i>	ドジョウツナギ	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	1	・	・
<i>Isoetes japonica</i>	ミズニラ	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	1	・	・

Fig. 3. The dendrogram of cluster analysis of the data obtained in the year 2002 and the positions of subclusters on the fields. Blank fields have no corresponding quadrats. The *1 indicates a field which has overlapping quadrats belong the same subcluster. The *2 indicates abandoned fields.

図 3. 2002年のデータを用いたクラスター解析により得られたデンドログラムと、サブクラスター毎の水田の位置（クラスター別に示した）。空白の水田は対応するコードラットがなかったことを示す。*1 は同じサブクラスターに重複する水田を示す。*2 は放棄水田を示す。

Fig. 4. Comparison of (a) soil water content (vol%) and (b) soil pH between clusters I and II; the data has been obtained in 2003. A significant ($p < 0.01$, U-test) difference is observed between the clusters with respect to the water content.

図 4. 2003年のデータによるクラスター I と II での土壌水分 (a) と pH(b) の比較. 土壌水分では有意な差があった ($p < 0.01$, U 検定).

Fig. 5. The relationships between the similarity index and the 3 types of distance. Distance A is the horizontal distance. Distance A' is the 3-dimensional distance. Distance B is the 3-dimensional distance along the path of water flow (see the text for a detailed explanation). Three types of regression analyses (linear, logarithmic, and power) were performed. The regressions with the highest coefficient value of determination were placed in the figures. The figure (c) shows liner regression and the others show logarithmic regressions.

図 5. 類似度指数と 3 タイプの距離との関係. 距離 A は水平距離. 距離 A' は 3 次元の距離. 距離 B は 3 次元での水の流れに沿った距離 (詳しくは本文を参照). 3 タイプの回帰 (直線回帰, 対数回帰, 累乗回帰) の結果, 最も高い決定係数と, それが得られた回帰線を示した. (c) では直線回帰が採用されたが他は対数回帰が採用された.

プの距離 (Distance A, A', B) についての散布図を描き、それぞれについて線形回帰、対数回帰、累乗回帰をおこなった。3タイプの回帰の結果、得られた最も高い決定係数の値は、水平距離 (Distance A)、斜距離 (Distance A')、水の流れに沿った斜距離 (Distance B) の順に、クラスター I の場合で 0.123, 0.124, 0.194, クラスター II の場合で 0.170, 0.171, 0.225 となった (Fig. 5)。最も高い決定係数の値が得られた回帰の種類は、クラスター I と Distance B の組み合わせでは対数回帰、他の組み合わせでは線形回帰であった。いずれの距離を用いた場合でも、距離が大きくなると類似度が低下する傾向がみられたが、水の流れに沿った斜距離 (Distance B) を用いた場合に決定係数の値が最も高くなった。

以上のように、距離と類似度の間には負の相関関係があり、互いに距離が近いスタンドほど類似性が高く、逆に距離が離れるほど類似性が低くなるという空間パターンを有することが示された。

水田をつなぐ短水路の有無と類似性の関係

隣り合う水田間の種組成の類似度は、短水路でつながっていると高くなる傾向があり、クラスター I において短水路でつながっている水田間とつながっていない水田間で有意な差があった ($p < 0.05$; U検定) (Fig. 6)。また、上方の水田のスタンドに出現する種が下方の水田のスタンドにも出現する比率を、水田間の短水路の有無に

よって比較した結果、クラスター I のスタンド間において、アゼナ (水流散布)、ミゾカクシ (*Lobelia chinensis*)、メヒシバ、イヌタデ (*Polygonum longisetum*)、ナズナ (以上、重力散布)、チョウジタデ (風散布) の6種で、短水路がある場合で有意に高かった (Fisher の正確確率検定; $p < 0.05$)。反対に、短水路でつながっていない場合で有意に確率が高い種は抽出されなかった。クラスター II においては、有意差はないが、出現頻度が 15% 以上である 12 種のうち 10 種は、短水路でつながっている方が、上方の水田にスタンドに出現する種が下方の水田のスタンドにも出現する確率が高かった。

考 察

水田に生育する植物種群には季節的な変化があることが指摘されているが (下田 2000 など)、調査時のスタンドには、主な生育期が調査時の秋季ではない水田雑草もみられた。これは、夏季に生育する水田雑草の残りがあり、加えて越冬草の春季の水田雑草が発芽したためと考えられる。したがって、本研究の解析に用いたデータは一時期のみのものであったが、生育期間を違えて調査地の水田に生育する種の多くについて扱うことができた。

クラスター解析の結果、本調査地の水田には湿潤型と乾燥型の2タイプの水田雑草群落が成立していることが

Fig. 6. Comparison of similarity indices between two adjacent fields connected by a water inlet (=C) and those without a water inlet (=NC). There was a significant ($p < 0.05$, U-test) difference in cluster I.

図 6. 隣り合う水田間の小水路の有無による類似度指数の比較。(C) は小水路有り、(NC) は小水路なし。クラスター I のデータによる比較では、有意差があった ($p < 0.05$, U検定)。

明らかとなり、水分条件の違いは種組成に大きな影響を与えていると考えられた。過去の研究から、耕作水田及び放棄水田に成立する水田雑草群落の種組成が水田の水分条件によって異なることが指摘されている（下田 1996, 2000 など）。また、耕作放棄水田における埋土種子集団においても、発芽する種が水位によって異なることが指摘されている（中本ほか 2000）。これまでの報告と同様に、水分条件は本調査地の水田雑草群落の種組成を決定する主要な要因の1つであると考えられた。

スタンド間の種組成の類似性と距離との関係を検討した結果、有意な負の相関関係が認められた。また、最下流のスタンドを基準にして距離と種組成の類似性との関係を検討した結果、距離の増加に伴い類似度の値は減少した（Fig. 5）。距離の増加に伴う種組成の類似性の減少は様々な群落で観察される現象である（Palmer 2005）。距離と種組成の類似性との関係を、定量的に記述した研究はほとんどなく、Mistral et al. (2000) が段丘上の森林、氾濫原上の森林、湿原、林道上の植生、Nekola & White (1999) がトウヒ林でおこなっている。木本樹種のみを対象とした研究としては、熱帯乾燥林（Balvanera et al. 2002）や、アマゾンの湿性林（Valencia et al. 2004）の研究がある。これらの研究が対象としているのは、スケールや人為的影響の有無などで、本研究の対象とした水田とは非常に異なる環境であるが、いずれの研究においても、距離の増加に伴い種組成の類似性が減少することが確認されている。本研究では、水田の植物群落においても、距離と種組成の類似性についての同様のパターンが成り立っていることが確認できた。

隣り合う水田間の種組成の類似度は短水路の有無で異なり（Fig. 6）、空間的な距離は同程度でも、短水路でつながっている水田間においてスタンドの共通種の割合が高くなり、クラスターⅠでは有意な違いであった。さらに、隣り合う水田において水田間に短水路がある場合には、上方の水田に出現すると下方の水田にも出現する頻度が有意に高い種が抽出された。クラスターⅡでは有意差がなかったが、水路で繋がっているほうが、上方の水田に出現すると下方の水田にも出現する種の割合が高かった。これらの結果は、種子が上方の水田から下方の水田に水田間の短水路を通して散布されている可能性を示唆する。出現頻度が有意に高い6種（アゼナ、ミゾカクシ、メヒシバ、イヌタデ、チョウジタデ、ナズナ）のうちアゼナ以外の種の散布型は水流散布ではなかった。これは、散布型にかかわらず種子が水田間の水路を通して散布されているためと考えられる。水流散布とされない

特別に浮くための構造を持っていない種子でも、流水によって散布される可能性があることは、これまでも指摘されている（中西 1994；米森・倉本 2000）。また、6種のうちナズナ以外の種は、水田に水が溜められる時期に結実し散布されることから、種子が短水路を通して散布された可能性が高いと考えられた。

距離の増加に伴い種組成の類似性が減少したという結果は、本調査地における水田雑草群落の種組成に、正の空間自己相関（事象の類似性と近接性の間に正の相関関係が認められるという状態）があることを反映していると考えられる。さらに、クラスター解析によって分類された同じグループに属するスタンドがある水田は、互いに近接していたという結果にも（Fig. 3）、正の空間自己相関の存在が反映されていると考える。このような局所的な植物の分布の空間パターンをもたらし要因の一つに、散布要因があげられており（Pacala 1997）、空間的に近いと同じ種が散布されやすくなるため、空間自己相関があったと考えられる。また、水田配置上の水の流れに沿った距離には水流による種子の散布されやすさが反映されているため、水の流れに沿った距離と種組成の類似度に、直線的な距離を用いた場合よりも決定係数の値が高くなった（Fig. 5）と考えられる。以上のように、種組成の空間パターンに、散布要因が影響していることが示唆された。

水流のつながりと散布の関係に関して、いくつかの研究が河川でおこなわれている。Johansson et al. (1996) は、河岸植生を対象にした散布形態・特性による種の出現頻度と分布の比較から、川の流れが種子散布による種の分布の拡大に役立っていると指摘している。Andersson et al. (2000) は、ダムの有無による比較から、ダムがなく水流のつながりが分断されていない河川でより多くの種の散布体を得られたことを示した。また、Kudoh & Whigham (2001) は、北アメリカ東部の低地の湿原におけるハイビスカス属の1種（*Hibiscus moschetos*）を対象におこなった研究から、湿原内の川を通った種子の水流による移動が、局所集団間の遺伝的変異をもたらしと考察している。これらの研究は、水流のつながりが散布体の移動を促進することを示している。水田地帯においても、短水路による連結という水流のつながりが、散布体の移動を促進している可能性が高い。また、水の流れに沿った距離や、短水路による連結の有無が、種組成の空間パターンを説明する際に有効であったことから、水流のつながりに関する要因が、水田雑草群落の種組成の空間パターンに影響を与えていることが示唆される。この

ことは、これまでに指摘されてきた水分状態や耕作に伴う攪乱に加えて、水流による連続性も水田雑草群落の種組成を規定する要因として重要であることを示すものである。

近年、生物多様性保全の立場から、放棄水田及び休耕田の耕起再開による管理方法についての議論がさかんにおこなわれている(浅見ほか 2001; 中本ほか 2002 など)。本研究の結果は、種子の供給という視点から水流のつながりを考慮することが、管理計画の立案に際して重要であることを示すものである。例えば希少種の個体群サイズを広い範囲にわたる多くの水田で維持する上では、伝統的な田越し灌漑が有効であると考えられる。しかしながら、水流のつながりによって外来種が広がるという危険性もある。種によっては、在来種を消滅させるなどして雑草群落の種組成に大きな影響を与える可能性があるため、水流のつながりとの関係から問題となる種の分布状況を把握し、蔓延を予防するための対策を検討する必要がある。

謝 辞

東京植生研究会の井関智裕氏と東京農工大学助手吉川正人博士には本論文の草稿を見ていただき、有益なご助言をいただいた。調査には、東京農工大学植生管理学研究室のメンバーの協力を得た。これらの方々にお礼申し上げる。

摘 要

栃木県の丘陵地の谷間にある田越し灌漑がおこなわれている水田を対象に、水田雑草群落の種組成の空間パターンを明らかにすることを目的とした。連続して配置されている47枚の耕作水田において、主に類似性と距離の関係から種組成の空間パターンを記述し、水流のつながりが与える効果に注目して解析をおこなった。

2002年の秋に、4 m²のスタンドを用いて得られた種の有無を含む86の植生調査資料は、種組成によるクラスター解析の結果、水分状態の違いと対応する2つのクラスターに分類された。さらに下位区分した結果、同じサブクラスターに分類されるスタンドの属する水田は互いに近接していた。2003年秋の調査から得られた34の植生調査資料も、同様に2つのクラスターに分類され、クラスター間で土壌水分の値に有意な差があった。

スタンド間の種組成の類似性とスタンドが位置する水

田間の直線距離との間には、有意な負の相関関係が認められた。最下流に位置する水田と他の水田間との種組成の類似性と3タイプの距離(水平距離・斜距離・水の流れたに沿った斜距離)との関係を検討した結果、いずれの距離を用いた場合も負の相関関係があったが、水の流れたに沿った斜距離を用いた場合に決定係数の値が最も高くなった。

隣り合う水田間の種組成の類似度は、短水路でつながっていると高くなった。水田間の短水路がある場合に、上方の水田にあると下方の水田にも出現する頻度が有意に高い種として6種が抽出された。

本調査地における水田雑草群落の種組成に、正の空間自己相関があると考えられた。種子が水田間の短水路を通して散布されている可能性が示された。水の流れたに沿った距離や、短水路による連結の有無が、種組成の空間パターンを説明する際に有効であったことから、水流のつながりに関する要因は、水田雑草群落の種組成の空間パターンに影響を与えると考えられた。

引用文献

- Andersson E., Nilsson C. & Johansson M. E. (2000) Effects of river fragmentation on plant dispersal and riparian flora. *Regulated Rivers: Research & Management* **16**(1): 83-89.
- 浅見佳世・中尾昌弘・赤松弘治・田村和也 (2001) 水生生物の保全を目的とした放棄水田の植生管理手法。ランドスケープ研究 **64**(5): 571-576.
- Balvanera P., Lott E., Segura G., Siebe C. & Islas A. (2002) Patterns of beta diversity in a Mexican tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* **13**(2): 145-158.
- 千葉県史料研究財団編 (2003) 千葉県の自然誌別編4 千葉県植物誌。千葉県, 千葉。
- Johansson M. E., Nilsson C. & Nilsson E. (1996) Do rivers function as corridors for plant dispersal? *Journal of Vegetation Science* **7**(4): 593-598.
- 片野修・細谷和海・井口恵一郎・青沼佳方 (2001) 千曲川流域の3タイプの水田間での魚類相の比較。魚類学雑誌 **48**(1): 19-25.
- Kudoh H. & Whigham D. F. (2001) A genetic analysis of hydrologically dispersed seeds of *Hibiscus moschetos* (Malvaceae). *American Journal of Botany* **88**(4): 588-593.
- McCune B. & Mefford M. J. (1999) PC-Ord. Multivariate Analysis of Ecological Data for Windows, ver. 4. MJM Software Design, Gleneden Beach, OR, US.
- Mistral M., Buck O., Meier-Behrmann D. C., Burnett D. A., Barnfield T. E., Scott A. J., Anderson B. J. & Wilson J. B. (2000) Direct measurement of spatial autocorrelation at the community level in four plant communities. *Journal of Vegetation Science* **11**(6): 911-916.
- * Miyawaki A. (1960) Pflanzensoziologische Untersuchungen über Reisfeld-Vegetation auf den Japanischen Inseln mit vergleichender Betrachtung Mitteleuropas. *Vegetatio* **9**(6): 345-

- 408.
- 宮脇昭編 (1977) 日本の植生. 学研, 東京.
- 守山弘 (1997) 水田を守るとはどういうことか. 農山村漁村文化協会, 東京.
- 守山弘 (1998) 生物種を保全する谷津田. 研究ジャーナル **21** (12): 15-19.
- 茂木町史編さん委員会 (1996) 茂木町史第一巻自然・民俗文化編. 茂木町, 栃木.
- 中池敏之 (1992) 新日本植物誌シダ編改訂増補版. 至文堂, 東京.
- 中島峰広 (1999) 日本の棚田—保全への取組み—. 古今書院, 東京.
- 中本学・名取祥三・水澤智・森本幸裕 (2000) 耕作放棄水田の埋土種子集団—敦賀市中池見の場合—. 日本緑化工学会誌 **26**(2): 124-153.
- 中本学・関岡裕明・下田路子・森本幸裕 (2002) 復田を組み入れた休耕田の植生管理. ランドスケープ研究 **65**(5): 585-590.
- 中西弘樹 (1994) 種子ひろがる—種子散布の生態学—. 平凡社, 東京.
- Nekola J. C. & White P. S. (1999) The distance decay of similarity in biogeography and ecology. *Journal of Biogeography* **26** (4): 867-878.
- 沼田眞・吉沢長人編 (1971) 改訂・日本原色雑草図鑑. 全国農村教育研究, 東京.
- 大井次三郎 (北川政夫改訂) (1992) 新日本植物誌顕花植物編改訂版. 至文堂, 東京.
- Pacala S. W. (1997) Dynamics of plant communities. In: *Plant Ecology*, 2nd edn. (ed. M. J. Crawly), pp. 532-555. Cambridge: Blackwell Science Ltd. Oxford.
- Palmer M. W. (2005) Distance decay in an old-growth neotropical forest. *Journal of Vegetation Science* **16**(2): 161-166.
- 下田路子 (1996) 放棄水田の植生と評価—広島県の湿性放棄水田—. 植生学会誌 **13**(1): 37-50.
- 下田路子 (2000) 水田の植物相. 「農村ビオトープ」(自然環境復元協会編), pp. 123-134. 信山社サイテック, 東京.
- 田淵俊雄 (2000) 水田の物理的環境と生態. 「農村ビオトープ」(自然環境復元協会編), pp. 109-122. 信山社サイテック, 東京.
- 富田正彦 (2000) 農業と農村環境. 「農村ビオトープ」(自然環境復元協会編), pp. 1-15. 信山社サイテック, 東京.
- Valencia R., Foster R. B., Gorky Villa R., Condit R., Svenning J. C., Hernández C., Romoleroux K., Losos E., Magård E. & Balslev H. (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology* **92**(2): 214-229.
- 米森由佳・倉本宣 (2000) 多摩川における増水による種子散布と増水後の護岸植生についての研究. ランドスケープ研究 **63**(5): 527-530.

(*印を付した文献は直接参照していない)