研究論文

複雑適応系を応用したコムギ収量の空間的不均一性の解析

片岡哲朗*・久保田浩史**・米川智司**

* 東京大学大学院農学生命科学研究科生圏システム学専攻

** 東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場

Analysis of the Spatial Heterogeneity of Wheat Yield Based on
Complex Adaptive Systems' Approach

Tetsuro KATAOKA*, Hirofumi KUBOTA** and Satoshi YONEKAWA**

* Department of Ecosystem Studies, Graduate School of Agricultural
and Life Sciences, The University of Tokyo

** Field Production Science Center, Graduate School of Agricultural
and Life Sciences, The University of Tokyo

1. 緒言

圃場内のばらつきを科学的に理解して、技術革新による生産性・収益性の向上と環境負荷軽減を目指す精密農業の研究が近年盛んに行われている(澁澤 2003). 小規模圃場における土壌の硝酸イオン濃度や電気伝導度の時空間変動には、施肥や作物の生育との相関が見られ(李ら 1999), 大規模圃場においても土壌の電気伝導度と無機窒素量に相関が見られ、簡便に計測できる電気伝導度で圃場内の無機窒素量の分布が推定された(Korsaeth 2005). また、地形や高低差は土壌肥沃度との間に相関がなくても、作物収量との相関が見られ(Kravchenko 2000), 水稻作では収量と微小な高低差に負の相関が見られた(庄司ら 2007). さらに、高低差は土壌含水率と相関があり(Kaleita ら 2007), 時間変化に関係なく常に平均値に近い土壌含水率を示す地点の存在も示唆された(諸泉ら 2002). 一方、水分や有機物含量、硝酸態窒素などの土壌パラメータのサンプリング間隔を変えて最適なサンプル数を求めたり(Imade ら 2002),

収量と土壌有機物、高低差、pH などの土壌パラメータから圃場をゾーニングする方法が検討されたが(Roel ら 2004), 圃場内のばらつきの理解に必要な十分なサンプル数・位置の設定方法などは確立されていないといえる.

不均一性や要素間の非線形的な相互作用による階層的な構造編成という特徴をもつ生態系は、複雑適応系であるとされる(Levin 1999). 例えば、耕地生態系では、品種特性、土壌水分、肥効成分、気象、トラクタ作業方向等の階層があり、そのうち土壌水分を例にとれば、萎れ点以上の土壌水分なら植物は正常だが、萎れ点を超えると植物は水欠乏の症状を現す. すなわち、ある環境要因に対する作物の応答について、その環境要因が適値域内であれば、要因の値に関係なく良好な生育を示すが、要因の値が適値域の上限・下限を超えると生育不良となり、一定の栽培管理下であっても圃場内に空間的なばらつきが生じると考えられる. よって、耕地生態系は複雑適応系に含まれると考えられる. 本研究では一様な栽培管理下のコムギ圃場を用いて、複雑適応系の考え方が適用できるかを検証した. そして、収量の不均一性を解析することで、精密農法における重要行程であるサンプリングサイズ、サンプル数およびゾーニングの効率的な設定方法について検討し、階層によって異なると考えられる最適なサンプリング方法を明らかにすることを目的とした.

平成 21 年 3 月 12 日受付

平成 21 年 8 月 22 日受理

Corresponding Author

米川智司 Satoshi YONEKAWA

〒188-0002 東京都西東京市緑町 1-1-1

1-1-1 Midori-cho, Nishitokyo, Tokyo 188-0002, Japan

E-mail : yonekawa@fm.a.u-tokyo.ac.jp

2. 材料および方法

1) 試験圃場

東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場（東京都西東京市）内の耕種履歴が一律な 72 a の圃場を用いた。土性は壤土（L）で火山灰土壌（立川ローム層）に属し、表層は黒ぼく土である。

2) 供試作物

コムギ (*Triticum aestivum*, cv. きぬの波) を圃場内で一様に栽培した。ロータリで整地した後の 2006 年 11 月 17 日に 11.4 kg/10 a, 条間 19 cm ですじ播き機 (JD1560 ; John Deere 社) を用いて播種し, 2007 年 6 月 13 日に収穫した。トラクタ作業は, 東西端約 10 m を南北方向に行った以外は東西の長辺方向に行った。

3) 試験区設定

2007 年 4 月 12 日に圃場全体に生育中のコムギの中に 12 個の試験区を図 1 のように, 隣接する試験区間の間隔が広くなるように, 長辺方向と平行に 21 m 間隔で 3 個ずつ, 短辺方向には 10 m 間隔で 4 個ずつ碁盤目状にならないように設定し

た。各試験区は 4 条×3 m とし, 試験区の独立性を保つために, 試験区の両隣の 3 条と各条端 60 cm 以上のコムギは刈り取った。

4) 調査項目

(1) 収量: サンプル値

各試験区の条を 60 cm ずつ 5 等分して全量を刈り取り, 1 試験区で合計 20 個のサンプルとした。各サンプルは恒温乾燥機で乾燥させて脱穀し, 子実の乾燥質量を計量してサンプル値とした。

(2) 土壌の化学性と物理性

出穂期と収穫期に各試験区内の任意の 4 地点で, 表層から深さ 10 cm までの土壌を採取して混合し, 風乾土に蒸留水を加えて濾過し, 濾液の電気伝導度, 硝酸イオン濃度, pH をコンパクトメータ (B-141, C-141, B-211 ; 堀場製作所) で計測し, 試験区の値とした。また, 収穫後に TDR 土壌水分センサ (CS616 ; Campbell Scientific) で各試験区内の任意の 3 点において深さ 30 cm までの平均土壌含水率を測定し, 3 点の平均値を試験区の土壌含水率とした。

図 1 試験圃場と試験区の配置

注) 圃場内の四角形が試験区を表し, 数字は試験区の番号を表す。

5) 解析方法

(1) 変動係数による比較

圃場内におけるサンプル値のばらつき程度を把握するため、変動係数による比較を行った。各試験区ごとに、20 個のサンプル値の変動係数を試験区サイズの変動係数 (CVP) とし、12 個の CVP の平均値 (CVMP) を求めた。また、各試験区の平均サンプル値の変動係数を圃場サイズの変動係数 (CVF) とした。そして、各試験区内のばらつきに対する圃場全体のばらつき程度を表す係数 ζ を、次式のように定義した。

$$\zeta = \frac{\text{圃場サイズの変動係数(CVF)}}{\text{試験区サイズの変動係数の平均値(CVMP)}} \quad (1)$$

すなわち、圃場内全 12 個の試験区の各平均サンプル値の変動係数を、各試験区内のサンプル値の変動係数の平均値で割った値をとし、試験区という相対的に狭い範囲と、圃場内という相対的に広い範囲での相対的なばらつきを対比した。よって、 ζ が 1 より小さければ、ばらつき程度が圃場全体で同様であることを表し、 ζ が 1 より大きければ、ばらつき程度が圃場内の位置に依存する、すなわち、ばらつきの空間分布があることを表している。また、 ζ が大きい値ほど試験区が圃場内の空間分布を明瞭に表しているといえる。

(2) 圃場内のゾーニング

圃場内をサンプル値の分布によって分類するため、2~6 個の試験区を組合せて 1 つのゾーンとした。例えば 3 個の試験区を組合せたとき、そのゾーン内のサンプル数は 60 個になり、この 60 個のサンプル値の変動係数をゾーンサイズの変動係数 (CVZ) とした。また、圃場内にある 4 つのゾーンの CVZ の平均値 (CVMZ) を求め、各ゾーンのサンプル値の平均値の変動係数をゾーニングにおける圃場サイズの変動係数 (CVFz) とした。そして、試験区単位での解析と同様に、ゾーン内のばらつきに対する圃場全体のばらつき程度を表す係数 ζ_z を次式のように定義した。

$$\zeta_z = \frac{\text{ゾーニングにおける圃場サイズの変動係数(CVFz)}}{\text{ゾーンサイズの変動係数の平均値(CVMZ)}} \quad (2)$$

すなわち、先例においては、圃場内全 4 個のゾーンの各平均サンプル値の変動係数を、各ゾーン内のサンプル値の変動係数の平均値で割った値を ζ_z とし、ゾーン内という相対的に狭い範囲と、圃

場内という相対的に広い範囲での相対的なばらつきを対比した。よって、 ζ_z が大きい値ほどゾーンが圃場内の空間分布を明瞭に表しているといえる。すなわち、 ζ_z が大きい値をとるゾーニング方法は圃場内を分類するのに適しているといえる。

試験区の組合せ方法として、組合せる試験区が 2 個のときは中心間距離が 23 m 以内の組合せを、組合せる試験区が 3 個以上のときは試験区の中心を結んで作った多角形の内側に他の試験区が入らない組合せを、空間的に連続な試験区の組合せとし、それ以外を空間的に非連続な試験区の組合せとした。以下、これら 2 種類の組合せを、連続な組合せ、非連続な組合せと表記する。

(3) 最適サンプル数の検討

圃場のばらつきを把握するのに必要なサンプル数を求めるために、次の 2 通りの方法で検討した。

① ランダムにサンプル数を減らしていく方法

各試験区 20 個のサンプルから、無作為に 1~18 個ずつサンプルを除外して各試験区のサンプル数を 19~2 個に減らす操作を各 10 万回繰り返し、各サンプル数での CVMP, CVF, ζ , CVFz の平均値と標準偏差を求めた。

② 重みづけをする方法

複雑適応系の考え方を取り入れ、試験区の全てのサンプルについて、サンプル値 (x) の重みづけを図 2 のように行った。この例では、全サンプルの平均値 (M) からの偏差が小さい 50% のサンプルを原値である重み 1 とし、平均値からの偏差が大きい 20% のサンプルを重み 0 として除外した。このときのしきい値を小さい方から p, q, r, s とし、 $M-q=r-M$, $M-p=s-M$ となるように設定した。そして残りの 30% のサンプルについては、pq 間, rs 間の重みをそれぞれ、 $\frac{x-p}{q-p}$, $\frac{s-x}{s-r}$ とした。以下、重みが 1 のサンプル数の割合を α 、重みが

図 2 サンプル値と重み (α - β - γ =50-30-20)

0より大きく1より小さいサンプル数の割合を β 、重みが0のサンプル数の割合を γ とし、 $\alpha-\beta-\gamma$ と表記することにする。この例の50-30-20の他に、50-40-10、40-40-20、70-0-30、50-50-0の各割合による重みづけをしてから、それぞれのCVF、CVZを求めた。

3. 結果および考察

1) 変動係数による比較

サンプル値の統計量と土壌の物理性・化学性の測定値を表1に示す。全サンプルを用いて算出した各試験区の平均収量は、10aに換算して乾物質質量で501 kg~899 kg (平均755 kg)で、CVMPが25.6、CVFが18.1だった。よって、 ζ は0.70であったことから、ばらつき程度は圃場全体で一様と考えられる。また、多重比較(Tukey法)では、圃場南側の試験区1, 3, 5を除く9個の試験区で有意差がなかった。これは品種改良がされてきたコムギは、収量のばらつきが小さい作物種と考えられ、試験区サイズ・圃場サイズともにばらつきが小さかったためと考えられる。なお、多重比較で有意差があった試験区1, 3, 5は平均収量および出穂期の土壌の硝酸態窒素含有量が他の試験区に比べて低く、出穂期までにコムギが吸収できた硝酸態窒素量が少なかった可能性があるが、この3個の試験区の土壌の硝酸態窒素含有量と同程度だった試験区が他にもあったこと、土壌の硝酸態窒素含有量と平均収量に相関がなかったことか

表1 サンプル値の統計量と土壌の物理性・化学性の測定値

試験区	平均値 [g] [†]	標準 偏差	CVP	収穫後 の土壌 含水率	出穂期の土壌 の硝酸態窒素 含有量 [mg/kg]
1	57 d	21.0	36.8	0.395	34
2	90 ab	26.5	29.5	0.400	36
3	61 cd	17.9	29.4	0.394	34
4	100 ab	21.3	21.4	0.380	36
5	69 bcd	17.3	25.2	0.391	36
6	84 abc	19.3	23.0	0.374	42
7	98 a	16.1	16.5	0.382	42
8	100 a	19.2	19.1	0.379	42
9	101 a	23.2	23.0	0.378	50
10	103 a	28.9	28.1	0.388	40
11	93 a	23.1	24.8	0.397	40
12	79 abcd	24.5	30.9	0.403	40

注1) [†]: 同ジアルファベットは多重比較(Tukey法)で有意差がないことを示す。

注2) CVP: 試験区サイズの変動。

ら、平均収量が低かったことの主因とは断定できなかった。

2) 圃場内のゾーニング

はじめに、試験区を組合せる方法を検討した。

1つのゾーンとして組合せる試験区の数に2~6にしたときのCVZについて、全ての組合せの平均値を表2に示す。表2では、連続な組合せと非連続な組合せを分けて平均値を求め、t検定を行った結果も示した。全ての組合せでは1つのゾーンに組入れる試験区の数が多くなるほどCVZの平均値は大きくなった。これは、圃場内に空間分布があり、互いに離れた試験区が同一のゾーンに組入れられるようになったのが原因と考えられる。また、1つのゾーンに3個以上の試験区を組入れたとき、連続な組合せは非連続な組合せよりも有意にCVZの平均値が小さくなった。これは、連続な組合せのときは、平均サンプル値が同程度の試験区を含む組合せが多くなるために、非連続な組合せのときよりもCVZが小さくなるためと考えられる。一方、1つのゾーンに組入れる試験区数が2個のときは、連続な組合せと非連続な組合せには有意差がなかった。これは、連続な組合せの数が少ない上に、連続な組合せでも試験区の平均サンプル値が大きく異なる場合があったのが原因と考えられる。以上より、連続な3個の組合せはCVZが小さく、圃場内の空間分布を捉えるゾーンができると考えられる。

次に、具体的なゾーニングを検討した。土壌の測定項目のうち、収穫期の土壌含水率が高い試験

表2 1つのゾーンに組み入れる試験区の数とCVZの平均値

1ゾーンに 組入れる 試験区の数	2	3	4	5	6
全ての組合せ	28.86 (66)	29.84 (220)	30.29 (495)	30.55 (792)	30.72 (924)
連続な組合せ	27.41 (26)	28.11 (52)	29.41 (144)	30.23 (284)	30.35 (530)
連続な組合せ	29.81 (40)	30.37 (168)	30.65 (351)	30.73 (508)	31.21 (394)
t検定	ns	**	**	*	**

注1) () は試験区の組合せの数を示す。

注2) t検定は連続な組合せと非連続な組合せの2群による検定。

(ns: 有意差なし, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

注3) CVZ: ゾーンサイズの変動。

図 3 ゾーニング方法

区から 3 試験区ずつ順に組合せてゾーニングすると図 3A になり、 ζ_z は 0.64 で、3 個の試験区を 1 つのゾーンとして圃場内を 4 つにゾーニングする全 15400 通りの中で 45 番目に大きい値だった。このゾーニングは非連続な組合せのゾーンも含まれるが、環境要因の値からゾーニングして収量を分類する適切な例と考えられる。また図 4 に示したように、土壌含水率と平均収量は線形的な関係ではないが、環境要因の適値域なら生育が良好で、適値域の上限・下限を超えると生育不良となるという考え方に基くと、多重比較で有意に平均収量が他の試験区に比べて低かった試験区 1, 3, 5 は土壌含水率以外の要因で平均収量が減って

図 4 各試験区の土壌含水率と平均収量

注 1) 数字は試験区の番号を示す。

注 2) ○で囲ったのは図 3A のゾーニング。

いと仮定し、土壌含水率が適値域外だった場合は平均収量が低下し、適値域内なら一定の平均収量を維持すると見ることができる。試験区 1, 3, 5 は土壌の硝酸態窒素含有量が低かったが、試験区 2, 4, 5 の硝酸態窒素含有量は同程度だったことから、1, 3, 5 の平均収量が低かった原因は、土壌の硝酸態窒素含有量や土壌含水率以外の要因が関与していると推定される。

さて、連続な組合せによるゾーニングが適切なことを以下の方法で検証した。3 個の試験区を 1 つのゾーンとして圃場内を 4 つにゾーニングする全 15400 通りのうち、4 つのゾーンが全て連続な組合せで構成されるゾーニング (全 40 通り) とそれ以外を区別して、 ζ_z のヒストグラムを図 5 に示した。全てのゾーニングのうちで ζ_z の最大値は 0.67 であり、4 つのゾーンが全て連続な組合せで構成されるゾーニングの中では、 ζ_z の最大値は図 3B のときの 0.65 だった。また、4 つのゾーンが全て連続な組合せで構成されるゾーニングの中での ζ_z の最小値は 0.30 で、全てのゾーニングのうち 7976 番目だった。また、4 つのゾーンが全て連続な組合せで構成されるゾーニングは、常に ζ_z が ζ_z の平均値 (0.30) 以上となった。

次に、4 つのゾーンが全て連続な組合せで構成されるゾーニングの例として、トラクタの作業方向に並ぶ試験区を組合せる方法を検討した (図 3C)。CVZ は圃場の南から 31.2, 25.8, 28.4, 21.9 で、CVMZ は 26.8, CVFz は 16.3 で、 ζ_z は 0.61 だった。 ζ_z は全 15400 通り中 201 番目で、4 つの

図 5 3 個の試験区を 1 つのゾーンにしたときの ζ_z のヒストグラム

注 1) 全部で 15400 通り.

注 2) ■ は全て連続な組合せで構成されるゾーニング.

注 3) ζ_z : ばらつき程度を表す係数.

ゾーンが全て連続な組合せで構成される全 40 通り中 6 番目であった (図 5). トラクタの作業方向のゾーニングは、平均収量が近い試験区を組合せる結果になったのに加え、平均収量が低かった試験区 1, 3, 5 がトラクタの作業方向に並んでいたことから、圃場内の収量の空間分布を捉えている方法といえる (表 1). よって、土壤の硝酸態窒素含有量および土壤含水率に加えて、トラクタの作業方向が収量に影響を与える主な環境要因であることが示唆された. なお、 ζ_z が大きいゾーニングは、3 個の試験区を 1 つのゾーンにした方法が占めていた. 精密農業において、土壤水分や窒素などの肥効成分が空間的ばらつきを生じさせる主な階層としてマップ作りが行われているが、本研究では、土壤水分が主階層となるという既往見解と一致するものと、トラクタの作業方向が主階層となるという既往の研究では重要視されていない階層が主になることが明らかになった.

ゾーニング方法 A, B, C の ζ_z はいずれも、試験区から求めた ζ (0.70) に近い値が得られており、これらのゾーニングされた 4 試験区でサンプリングを行った場合でも、12 試験区全てでサンプリングしたときと同様の圃場サイズの収量の空間分布を把握できると考えられる.

3) 最適サンプル数の検討

(1) ランダムにサンプル数を減らしていく方法

ランダムにサンプル数を減らしていく方法の CVMP, CVF, ζ を図 6 に示す. CVMP の平均値はサンプル数が少なくなるにつれて小さくなった

図 6 ランダムにサンプル数を減らしていく方法の CVMP, CVF, ζ

注 1) バーは標準偏差を表す.

注 2) CVMP: 試験区サイズの変動の平均値,

CVF: 圃場サイズの変動,

ζ : ばらつき程度を表す係数.

が、CVMP の標準偏差はサンプル数の減少とともに増加していた. 一方、CVF の平均値はサンプル数が少なくなるにつれて増加し、CVF の標準偏差もサンプル数が少ないほど大きくなった. 例えば、平均値の誤差が 5% 以内、平均値 $\pm$ 標準偏差の誤差が 20% 以内を許容すると、サンプル数を 10 個に減らすことが可能で、20 個のサンプルのときと比べて誤差は平均値で 4%、標準偏差を入れると -4% から +13% になった. よって、サンプル数を半分にしても誤差は小さく、効率的な

サンプリングで圃場内の空間分布を捉えられると
考えられる。

次に、各試験区のサンプル数を減らした上で、
3 個の試験区を 1 つのゾーンとしてゾーニングし
たときの CVFz を図 7 に示す。なお、ゾーン内の最
大サンプル数は 60 個で、各試験区同時に 1 個ず
つ減らすので、1 つのゾーンでは 3 の倍数ずつサ
ンプル数を減らすことになる。図のように ξz が
大きいゾーニングほど CVFz の平均値が大きかった。
また、標準偏差は ξz にかかわらずほぼ同じ値
であったが、 ξz が大きいほど平均値のカーブは緩
やかになり、サンプル数を減らしたときの CVFz
の変化が小さくなった。例えば、最大サンプル数
のときと比べた CVFz の平均値の誤差が 5% 以

図 7 ランダムにサンプル数を減らしていく
方法の CVFz

注 1) バーは標準偏差を表す。

注 2) サンプル数のプロットは重ならないようにずら
しているが、実際は同じ整数上の点である。

注 3) CVFz: ゾーニングにおける圃場サイズの変動、
 ξz : ばらつき程度を表す係数。

内、平均値±標準偏差の誤差が 20% 以内を許容
すると、 ξz が大きいトラクタの作業方向のゾー
ニング ($\xi z=0.61$) では 1 ゾーンでサンプル数を 30
個 (1 試験区あたり 10 個) に減らすことが可能
で、60 個のサンプルのときと比べて誤差は平均値
で 1%, 標準偏差を入れて -8% から +10% だっ
た。 ξz がより大きいゾーニングをしたときには、
よりサンプル数を減らすことができるといえる。

また、トラクタの作業方向でゾーニングしてサ
ンプリングすると、試験区でサンプリングすると
きよりも、サンプル数を減らしたときの誤差の平
均値が小さくなり、減らせるサンプル数は同じ
だった。よって、サンプリング位置 (試験区) を
圃場全域に均等に設けるよりも、ゾーニングして
サンプリングした方が効率的であるといえる。

(2) 重みづけをする方法

サンプル値に重みづけする方法の CVF と、3
個の試験区を 1 つのゾーンとしたときの CVZ の
平均値を表 3 に示す。また、それぞれの重みづけ
をしたときのサンプル値のヒストグラムを図 8 に
示す。全サンプル値の平均値からの偏差が大きい
サンプル値の寄与を小さくするほど、つまり、50-
40-10 より 50-30-20 の方が、50-30-20 より 40-40-
20 の方が、CVF、CVZ の平均値とも小さくなった。
これは、平均値からの偏差が大きいサンプル値を
除くと圃場全体のばらつきがなくなったためであ
ると考えられる。なお、50-50-0 のときは完全に
無視するサンプルがないために、0 より大きく 1
より小さい重みをつける直線の傾きが緩やかにな
り、結果として重みが 1 に近いサンプルが多くな
るため、CVF および CVZ の平均値が大きくなった。
また、連続な組合せと非連続な組合せの CVZ
の t 検定において、重みづけなしのときと同じ
1% 有意水準で連続な組合せのほうが変動係数が

表 3 重みづけをする方法の CVF と CVZ の平均値

重みづけ方法	50-30-20	50-40-10	40-40-20	70-0-30	50-50-0	重みづけなし
〈12 試験区での比較〉						
CVF	7.68	9.70	7.35	8.01	13.12	18.06
〈3 個の試験区を 1 つのゾーンとしたゾーニング〉						
CVZ の平均値	14.08	16.45	12.69	16.64	20.15	29.84
t 検定	*	**	*	ns	**	**

注 1) t 検定は連続な組合せと非連続な組合せの CVZ の比較。
(ns: 有意差なし, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

注 2) CVF: 圃場サイズの変動, CVZ: ゾーンサイズの変動。

図 8 重みづけをしたサンプル値のヒストグラム

小さくなったのは 50-40-10 と 50-50-0 で、70-0-30 では有意差はなくなった。重みづけをすると空間分布が小さくなったことから、環境要因が適値域内のサンプルは要因の値に関係なく良好な生育を示していたが、要因の値が適値域の上限・下限を超えたサンプルが圃場内の空間的なばらつきを生じさせといえる。したがって、本試験のコムギ収量には複雑適応系の考え方が適用できることが示された。また、不均一性や要素間の相互作用は栽培期間や年次間差等の時系列で変化すると考えられるため、本研究では耕地生態系が完全に複雑適応系であると断定できないものの、複雑適応系の考え方をを用いる有効性は認められた。

以上のことから、平均収量が同程度の試験区を 1 つのゾーンとして組合せることが栽培管理への応用上有益であると考え、土壌の硝酸態窒素含有量や土壌含水率の空間分布が既知であれば、同一作業方向上での限られたサンプル数で、圃場全体の不均一性の空間分布を把握可能であると考えられる。

ただし、得られた圃場内の情報を精密農法に応用するには、いつサンプリングするのが適当かの時間的な問題の解決、ゾーンごとの管理戦略の決定とそれを実現する技術が必要である。今後は年次変動等を検証し、精密農法への応用可能な効率的なサンプリング手法を確立する必要がある。

4. 摘要

72 a のコムギ圃場の不均一性を検証するため

に、4 条×3 m の試験区を 12 個設定し、各試験区から得られた 20 個の収量サンプル値を用い、試験区サイズ、数個の試験区を組合せたゾーニングサイズから、圃場サイズの不均一性を変動係数を用いて検証した。さらに試験区サイズとゾーニングにおける最適サンプル数を、ランダムにサンプル数を減らしていく方法と、サンプル値に重みづけをする方法によって検証した。その結果、本試験圃場では土壌の硝酸態窒素含有量と土壌含水率の空間分布およびトラクタの作業方向が収量に影響を与えていることが明らかになり、少なくともこれらを環境要因とした複雑適応系の考え方が適用できることが示された。本試験圃場では、圃場を環境要因が同程度の 4 区域にゾーニングすることで、サンプリングの効率化が可能であった。

キーワード

複雑適応系、圃場試験、コムギ、サンプリング、ゾーニング、変動、空間分布、精密農法

引用文献

- Imade, A.S.W., S. Shibusawa and A. Sasao (2002) : A sampling strategy in mapping soil parameters of paddy field. *Journal of JSAM* 64 (3) ; 86-93.
- Kaleita, A.L., M.C. Hirschi and L.F. Tian (2007) : Field-scale surface soil moisture patterns and their relationship to topographic indices. *Trans. ASABE*. 50 (2) ; 557-564.

- Korsaeth, A. (2005) : Soil apparent electrical conductivity (ECa) as a means of monitoring changes in soil inorganic N on heterogeneous morainic soils in SE Norway during two growing seasons. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 72 (3) ; 213-227.
- Kravchenko, A.N. and D.G. Bullock (2000) : Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92 (1) ; 75-83.
- Levin, S.A. (1999) : *Fragile Dominion —complexity and the commons*, Perseus Publishing, Cambridge, MA, USA.
- 諸泉利嗣・佐藤裕一・佐藤幸一 (2002) : 傾斜草地における表層土壌水分の空間分布特性と領域平均を示す代表地点の探索, 農業土木学会論文集 70 (4) ; 447-455.
- Roel, A. and R.E. Plant (2004) : Factors underlying yield variability in two California rice fields. *Agron. J.* 96 (5) ; 1481-1494.
- 李 民贊・笹尾 彰・澁澤 栄・酒井憲司 (1999) : 小規模ほ場における土壌肥沃度パラメータの時空間変動, 農業機械学会誌 61 (1) ; 141-147.
- 澁澤 栄 (2003) : 精密農業の研究構造と展望, 農業情報研究 12 (4) ; 259-274.
- 庄司浩一・小林伸哉・堀尾尚志・川村恒夫 (2007) : 水稻栽培試験における収量計測コンバインを利用した収量比較法, 農作業研究 42 (2) ; 105-110.

Summary

Twelve experimental sections of 4 rows×3 m were established to examine the heterogeneity of a 72-a wheat field. Using 20 sample yield values from each experimental section, the heterogeneity of the field size was examined using the coefficient of variation through experimental section size and zoning size, which was a combination of several experimental sections. In addition, experimental section size and optimal number of samples in zoning were examined by randomly reducing the number of samples and by weighing the sample values. The results indicated that the space distribution of soil nitrate content and soil moisture content as well as the direction of movement of tractors affected the yield in this test agricultural field, indicating that these can be used as environmental factors in the concept of complex adaptive systems. This test agricultural field, sampling efficiency was improved by zoning the field into 4 sections, each of which had approximately the same environmental factors.

Key Words

complex adaptive system, field experiment, wheat, sampling, zoning, variance, spatial distribution, precision farming.