エリアンサス群落における株の発育変異の解析

金井一成¹⁾・森田茂紀²⁾

(¹⁾ 鷗友学園女子中学高等学校, ²⁾ 東京農業大学農学部)

要旨：セルロース系のエネルギー作物の1つとして、エリアンサスが注目されている。エリアンサスは、苗を定植した後、毎年の再生過程で旺盛な生育を示し、個々の株が大型化していく。それに伴って群落を構成している株の生育に大きな差異が認められるようになり、場合によっては枯死する株もある。そこで本研究では、エリアンサス群落を構成する株の生育変異の年次推移について、個体群生態学的な観点から解析を試みた。その結果、定植年数に関わらず、茎数/株が小さいものの頻度が高く、茎数/株が大きいものほど頻度が低い傾向が年々、拡大した。また経年変化を見ると、苗の定植後、群落を構成する株の茎数が増加しながら、生育変異が拡大していくことが明らかになった。そこで、この生育変異について周囲から受ける被圧との関係を検討したところ、全体傾向として、茎数/株が小さいと、その株が受けると考えられる被圧が大きく、茎数/株が大きいと被圧が小さい傾向が認められた。少なくとも、エリアンサスを数年にわたって栽培した範囲では最終収量一定の法則が成り立つ可能性が示唆され、早期に人為的な間引きを行うと収量が増加する可能性があり、また株の生育変異が拡大しにくくなる可能性があるため、収穫時の作業効率もあがると考えられる。

キーワード：エリアンサス、群落、生育変異、相互作用。

石油枯渇と地球温暖化は人類が対応すべき喫緊の課題であり、そのための対策の一つとして再生可能エネルギーが注目されている (Shiotsu ら 2011)。とくに 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降、日本でも再生可能エネルギーの利用が注目を浴びている。再生可能エネルギーの多くは太陽エネルギーや風力エネルギーのように電気に変換されるのに対し、バイオマスエネルギーは気体、液体、固体と様々な形で利用できる。とくに、液体であるバイオエタノールは、ガソリンと混合して利用できるという大きなメリットがあるため、バイオエタノールの生産量は 2000 年代に入り世界的に増加してきた (REN21 2018)。

世界で、既に事業化されているバイオエタノールのプラントでは、サトウキビ、トウモロコシ、キャッサバなどの食用作物を原料としている。しかし、2008 年に起こった穀物価格の世界的高騰を契機として、食用作物を原料とすることに批判が集まり、エネルギー生産と食料生産との競合を避けるため、セルロース系原料作物の開発が世界的に求められている (Boddiger 2007, Hattori and Morita 2010)。また日本の場合、エネルギー作物の栽培と利用が、東日本大震災の復興支援や耕作放棄地対策を含む農業振興に対して、大きな意味がある (森田・金井 2020a, b)。

著者らはセルロース系エネルギー作物として、不良環境条件下でも高い物質生産を示す (Hattori ら 2010, Ra ら 2012, Sekiya ら 2014)、イネ科の多年生・草本作物であるエリアンサス (*Saccharum* spp.) に着目して研究を進めている (森田ら 2013, 森田 2018)。すなわち、エリアンサスが持つ高バイオマス生産性の背景を理解するために、物質生産の基盤となっている群落構造に着目して一連の解析を進

めている (金井ら 2017, 金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)。

多年生作物であるエリアンサスは、苗を定植した後、年々、株が大型化するが、それに伴って群落を構成する株の生育に大きな差異が認められることが経験的に知られている。群落内における株ごとの生育変異は、収穫時の作業効率に影響を与え、生育が均一であると作業効率が向上し、作業トラブルも減少することが報告されており (農林水産技術会議事務局 2017)、エリアンサスの低投入持続型栽培・利用システムを構築するための重要な課題である。

しかし、株の生育差異の様相や生育変異の年次変化については、まだ解析されていない。また、群落を構成する株の生育が斉一である方がよいという理論的な根拠も、今のところ確立しているわけでもなく、群落を構成している株の生育変異が大きくなることが累積収量に対してどのように働くかは、まだ明らかになっていない。

そこで、本研究ではエリアンサス群落における株の生育変異について検討した。すなわち、エリアンサスの群落における株の生育差異を定量的に把握したうえで、その生育変異の年次変化について解析を試みた。そのうえで、エリアンサス群落における株の生育変異の背景について、個体群生態学的な観点、すなわち株間の相互作用に着目して考察を試みた。

材料と方法

本研究で対象としたのは、東京農業大学農学部 (厚木キャンパス) の附属圃場で栽培したエリアンサス (*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*) の品種 JES1 の群落である。本研究で用いた圃場は、エリアンサスの栽培

を行う前までは食用作物を栽培しており、作物栽培の様子やヒアリングも含めて群落のいずれにおいても作物の出来に大きな差異はなかった。よって圃場内における土壌の化学性や物理性の違いは小さいとみなした。また、熟練した技術職員の協力を得て、トラクタを用いて深さ 20 cm にあらかじめ耕起した。

多めに購入した苗から正常な生育をした揃いのよいものを選択して 2015 年 9 月 17 日、条間 2 m × 株間 1 m で、茎数が 1~3 本程度の苗を 565 株、定植した。このとき圃場の形状から、A 行と I 行の 49 列以降は定植時から欠株とした。

また、施肥や灌水は行わず、適宜、手取り除草のみを行った。なお、2016 年 4 月に株が越冬せず、枯死した場合は補植を行った。また、2017 年 4 月に群落を分割して、一方は 2 m × 1 m の栽植間隔（中密度区）のままとし、他方は間引きを行い、2 m × 2 m の栽植間隔（低密度区）に変更した（水嶋ら 2018）。すなわち、群落を 9 行（A~I）× 68 列として、11 から 40 列までを中密度区とし、1 から 10 列までと 41 から 68 列までを低密度区とした。

このように栽培したエリアンサス群落において、2015 年 12 月 23~26 日、2017 年 11 月 3~25 日、2018 年 11 月 1~21 日に、いずれも群落を構成しているすべての株の茎数を調査した。その測定には一定の日数が必要となるので、測定時期の早晚で茎数がほとんど変化しない出穂期に調査を行った。

群落を構成する株の生育変異を把握するため、茎数 / 株を地図化した。このとき欠株は茎数を 0 とした。また、個体群生態学的な観点からの解析として、株間における相互作用の 1 つの指標として、該当する株が周囲の 8 株から受ける被圧を、 $\Sigma[\text{茎数} / (\text{距離})^2]$ として算出した（Thomas and Weiner 1989）。このとき、ボーダー株を含めて周囲に株がない場合は被圧を 0 として扱った。

なお、本研究は、通常の栽培試験とは根本的に異なり、対象とする作物（品種間差異を含む）や栽培管理の効果を比較検討するものではない。すなわち、群落を構成する株の生育変異とその経年推移を解析することに目的があり、敢えていえば比較すべき処理区は各栽培年次における生育状況となるため、とくに試験区を分けて解析することはせず、変異の様相全体を栽培年次間で比較検討するというアプローチを行った。

結 果

1. 株の生育変異と経年変化

群落を構成するエリアンサス株の茎数 / 株を地図化したところ（第 1 図）、2015 年には株の生育がまだ十分でなく、変異がほとんど認められなかったが、生育が進んだ 2017 年には株間の生育変異が顕著になり、まだら模様を示した。さらに、2018 年になると株間の生育変異がさらに明瞭に認められた。

第 1 図 エリアンサス群落内における茎数 / 株の変異の様相。

左：2015 年，中：2017 年，右：2018 年。

図中の濃淡は茎数の多少を示し、色が濃くなるほど、茎数が多い。

$0 \leq \square < 100$, $100 \leq \blacksquare < 200$, $200 \leq \blacksquare < 300$, $300 \leq \blacksquare < 400$.

次に、それぞれの年度で茎数 / 株のヒストグラムを描き、経年変化を検討した。その結果、2015 年、2017 年、2018 年のいずれにおいても、全体傾向として茎数 / 株が小さいものの頻度が高く、反対に、茎数 / 株が大きいほど頻度が低い傾向が認められた（第 2 図）。また、経年変化として、その頻度分布の山が若干低くなり、変異の幅が広がっていることも明らかとなった（第 2 図）。

このように群落を構成している株の茎数を用いて個体サイズ分布の様相を解析した結果、茎数の少ない株が多く、茎数が多い株が少ない L 字型分布から変異が広がり、茎数の多い株の頻度が高い J 字型分布に近づいていることが明らかになった。そこで、2017 年と 2018 年との茎数 / 株の相互関係を解析した結果、両者の間に有意な正の相関関係が認められた。すなわち 2017 年に茎数が少ない株は 2018 年も少なく、2017 年に茎数が多い株は 2018 年にも多い傾向が明瞭に認められた（第 3 図）。その場合、両年における茎数 / 株の間には回帰直線が認められた。なお、この回帰直線は、 $y=x$ よりも上に位置していた。また、栽植密

第2図 群落を構成する株の茎数/株のヒストグラム

上：2015年，中：2017年，下：2018年。

■：2m×2m（低密度区），□：2m×1m（中密度区）。

度の違いに関係なく、個々のプロットは $y=x$ より下に位置するものも認められた。すなわち、栽植密度にかかわらず、一部の株においては茎数/株が2017年 > 2018年ということも、若干ではあるが認められた。なお、栽植密度の違いによって生育変異については特段の差異はみられなかった。

2. 株の生育変異と環境要因

エリアンサス群落を構成する株の生育変異の傾向を把握する1つの試みとして、東西方向および南北方向の条における生育変異の平均値を算出した。その結果、東西方向において、2015年は茎数/株の値がいずれの株においても小さく、特に傾向は認められなかった。生育が進み、茎数/株が増えた2017年および2018年には、東西方向で若干

の傾向が認められた。すなわち、2017年および2018年には、株の生育の変異が非常に大きいものの、西端および東端部分における茎数/株が、両者に挟まれた部分より多い傾向が認められた（第4図上）。このとき西端および東端部分は低密度区、両者に挟まれる部分は中密度区にほぼ対応していた。

一方、南北方向では、いずれの年においても南側から北側へ向かって茎数/株が多くなる傾向が認められた（第4図下）。ただし、茎数/株の値が2015年 < 2017年 < 2018年であるとともに南北方向の推移の勾配も異なった。すなわち、2015年に比べて2017年の茎数/株の値はいずれの位置でも著しく多く、同時に推移の勾配も2015年より大きく顕著であった。2018年になると茎数/株は南北

第3図 2017年の茎数/株と2018年の茎数/株との関係。

●: 2 m × 2 m (低密度区), ○: 2 m × 1 m (中密度区), 実線 (極太): $y = x$, 実線 (太): 全体, 実線 (細): 低密度区, 破線: 中密度区。

図中の *** は1%水準で有意であることを示す。

方向のいずれの位置でも2017年より大きく、南北方向の勾配は2017年より緩やかであった。

このように、東西方向および南北方向における生育変異の様相が異なることが明らかになった。

3. 株の相互作用と経年変化

個体群生態学的な解析の試みとして、株同士の相互作用に着目し、被圧に相当する指標を試算した結果、いずれの年においても茎数と被圧との関係はばらつきが大きく決定係数が低かった。ただし、生育変異が大きくなった2018年には、有意な決定係数が認められた(第5図)。すなわち、茎数/株と被圧との関係は、明瞭ではないが茎数/株が少ないほど被圧が大きく、茎数/株が多いほど被圧が小さい傾向が認められた。このとき、いずれの栽植間隔においても回帰直線の勾配およびy切片は2017年 < 2018年であった。

このように群落を構成している株の茎数/株と被圧との間に一定の傾向が認められたので、同じ株における被圧について2017年と2018年を比較したところ、両者の間には有意な正の相関関係が認められた(第6図)。すなわち、2017

第4図 東西方向・南北方向における条内の茎数/株の分布。

上: 東西方向の平均値, 下: 南北方向の平均値。

●: 2015年, ▲: 2017年, ×: 2018年。

第5図 茎数/株と被圧との関係。

上：2015年，中：2017年，下：2018年．中および下において，●：2m×2m区，○：2m×1m区．実線：2m×2m区の回帰直線，破線：2m×1m区の回帰直線．

図中の***は1%水準で有意であることを示す．

第6図 2017年の被圧と2018年の被圧との関係。

● : 2 m × 2 m 区, ○ : 2 m × 1 m 区。

図中の *** は 1%水準で有意であることを示す。

年の被圧が高い株は2018年の被圧の値も高く、2017年の被圧が低い株は2018年にも低い傾向が明瞭に認められた。

考 察

1. 株の生育変異とその経年変化

著者らは、エリアンサス群落における数年に渡る生育調査（生産構造図の解析を含む）と収量調査の結果に基づいて、株を構成する分げつの生育が群落の収量形成に大きく寄与することを明らかにしてきた（金井ら2017, 金井・森田2018）。収穫時の茎数とバイオマス収量との間に有意な正の相関関係が認められることは、ほかにも報告があり（Hattoriら2010）、とくに生育初期に形成された茎数が収量形成に重要であることが指摘されている（松波ら2014）。すなわちエリアンサスのバイオマス生産では分げつ形成、とくに生育初期に茎数を確保することが重要であることが明らかとなってきた。

株の生育の指標としては、バイオマス量/株が分かればベストである。イネでは、茎数と草丈との積がバイオマス量との間に相関関係があることがわかっているが（末信ら1994）、エリアンサスでは茎数と草丈との積がバイオマス量との間に必ずしも密接な相関関係が認められないことを予備的な検討の結果で確認している。そこで本研究では、群落を構成する株の生育変異を把握する指標として茎数/株を採用し、株の生育変異について解析を試みた。

2017年（苗の植付けは2015年であるが、定植した時期が遅かったためにその年にはほとんど生育せず、実質は定植2年目に相当する）と2018年（同じく実質的に定植3年目）の出穂期において、群落を構成するすべての株の生育調査を行ったが、ほとんど生育していない2015年度の

茎数/株も参考にした。

それらの結果は、すでに記載したとおりで、定植年数にかかわらず、茎数/株が小さいものの頻度が高く、茎数/株が大きいほど頻度が低い傾向が年々、拡大していた（第1図, 第2図）。ただし、茎数/株は少ない株が最も多いことはさておき、群落が発達するに伴って、ピークが複数ある可能性も現時点では否定できない。

また、群落内の位置と生育変異との関係として、栽植密度が狭い箇所より広い箇所で茎数/株が多い傾向が認められた。栽植間隔が広い方が茎数/株も多いことはイネでも報告されている（安藤1913）。したがって、エリアンサスの場合も、茎数/株の多少に、栽植間隔が関係している可能性が高い。

栽植密度と個体群全体の収量、および個体群を構成する個体のバイオマス量との関係については、様々な作物で多くの個体群生態学的な検討が行われてきた（Shinozaki and Kira 1956, Koyama and Kira 1956, 依田1971, 小川1980）。その成果として、生育過程で個体密度と個体重との間には正の相関関係があり（Kiraら1953）、十分に生育が進めば個体群の収量は一定値に収束する、すなわち最終収量一定の法則が成り立つこととされている（Shinozaki and Kira 1956）。収量と栽植密度に関する研究はさまざまな作物で研究が行われており、水稻でもある栽植密度以上では地上部バイオマスだけでなく、子実でも最終収量が一定となることが報告されており（神田・柿崎1959, Yamadaら1961, 伊藤・山口1972）、コムギやトウモロコシでも、地上部バイオマスで成り立つという報告もある（Donald 1963）。ただし、最終収量一定の法則については、成り立たないとする否定的な意見もある（川嶋1986）。

このように、密度効果に関する研究は多く行われてきたが、エリアンサスでも同じことが起こるかどうかは明らかでないが、群落の発達に伴って生育変異が大きくなったことは事実であり整合している。したがって、エリアンサス群落においても最終収量一定の法則が成立する可能性が示唆される。この点については後で株間の相互作用と合わせて考察する。

南北方向の回帰直線の経年変化についても注目しておきたい。すなわち、南北方向の位置と茎数/株との間に得られた回帰直線の、y切片は、2017年 < 2018年、勾配は2017年 > 2018年であった（第4図）。これらの点は、後に検討する株間の相互作用と関係する可能性があると考えている。現時点では十分に考察するだけの精度の高いデータを持ち合わせていないが、株間の生育変異が小さくなる方向へ調節が働いている可能性があるのではないかということである。この点については今後、さらに検証を続けていきたい。

2. 株の相互作用と生育変異

本研究の結果、エリアンサスを個体群として栽培すると、

個体群を構成する株当たりの茎数の変異が、年々、大きくなることを明らかにした（第2図）。その推移の様相は、茎数/株の変異を示す斑模様の変化からも確認できる（第1図）。そこで、エリアンサスの群落における生育変異についてさらに検討を行った。まず、株の生育に影響を与える要因として降水量や気温などの気象条件や土壌環境があるが、各年の気象条件については平年並みであること、土壌環境については、エリアンサスの栽培を行う前までの、作物栽培の様子やヒアリングも含めて、群落のいずれにおいても作物の出来に大きな差異はなかった。よって、圃場内で土壌の理化学性の違いが小さいとして、それぞれの年次における株間の生育変異に影響を与える要因としては優先順位が高いとは考えにくいと判断した。そこで、これらの環境条件とは異なるものとして、隣接する株との相互作用という視点から検討を進めることにした。

本研究で対象としたエリアンサス群落を構成する株が非常に多いだけでなく、個々の株が大きくなる場合があり、刈り取ってバイオマス量を測定するには多くの時間と労力を要するだけでなく、破壊的な調査となるため、その後の生育調査ができなくなる。通常の生育調査では茎数と草丈を測定するが、両者を調査するにはやはり時間と労力を要し、しかもエリアンサスの場合は、茎数×草丈で株のバイオマス量を推定することが難しい。そこで、収量と密接な関係にあることが報告されている茎数に着目し、株のバイオマス量の第一近似としての指標として解析を進めた。

本研究でできる範囲として、まず株間の相互作用について予備的検討を試みた。すなわち、それぞれの株が、それを取り巻く株からどれくらいの影響を受けるかを検討するにあたり、被圧という概念を利用した。本研究では、Thomas and Weiner (1989) の研究を参考にして、ある株を取り巻く8株（ボーダーの株や、隣接する部位に欠株がある場合は、8株より少ない）について、 Σ （茎数/距離²）を算出して、被圧の指標とした。そのうえで、茎数/株と被圧との関係を、年次別、栽植間隔別に検討した。その結果は、すでに結果に記載した通りである（第5図）。ただし、本研究だけでは年次や事例としてのデータが少なく、また茎数/株と被圧との間に得られた関係も有意なものではないことから、必ずしも細かい考察ができるわけではないが、本研究から得られたデータからも示唆されるところは少なくないと考えている。個体群における株の生育変異の研究を展開するための手掛かりをつかむために、被圧に関するデータから、以下、若干の考察を試みる。

まず、それぞれの株についての茎数の年次変化をみると、2017年の茎数/株と2018年の茎数/株との間には極めて有意な相関関係が認められた（第3図）。また、両者の間に得られた回帰直線をみると、勾配は1に比較的近く、 $y=x$ を上側に少し平行移動したような位置にあった。つまり、茎数/株が少ない株は翌年も少なく、茎数/株が多い株は翌年も多いという傾向を示しながら、いずれの株も茎

数/株を増加させている傾向が認められた。

その場合、群落を構成する株の生育を目視で観察した結果、大きな株の周囲には小さい株が多く、小さな株の周囲には大きい株が多いのではないかと感じた。そこで、この点を定量的に解析するために被圧を指標として、解析を進めることにした。その結果、有意な関係は認められなかったが、茎数/株と被圧との関係のグラフで、ほとんどのプロットが分布する領域の上限は、茎数/株が多いほど被圧が小さい傾向があるようにみえる（第5図）。両者の関係を解析するためには、プロットの上限を直線より曲線で回帰する方が望ましいのではないかと考えているが、両者の間に得られた回帰直線の傾きが負であることには注目しておきたい。

すなわち、全体の傾向を大雑把に把握すると、茎数/株が小さいと被圧が大きく、茎数/株が大きくと被圧が小さい傾向が認められるということである（因果関係を踏まえて記載する場合は逆の表現になるだろうが、ここでは、因果関係にまで言及するつもりはない）。また、2017年より2018年の方が群落全体として大型になり、茎数/株の変異幅が広がっているのに、回帰直線のy切片も勾配も、2017年<2018年であった。このことは、年次経過とともに、株が大型化すると、相対的に小さい株が受ける被圧が増加し、相対的に大きい株が受ける被圧が減少することを意味しており、株間の被圧差が大きくなることを示唆している。実際に、同じ株における被圧について2017年と2018年とを比較した結果も、そのことを支持している（第6図）。ただし、このことは、株間の生育変異が小さくなるように現れる可能性と矛盾はしていない。

同時に、2017年と2018年の茎数/株の関係のグラフでは、 $y=x$ より下に分布するプロットも若干、認められた（第3図）。このことは、年次とともに茎数/株が減少したことを意味しており、年次経過とともに株が小型化したり、場合によっては欠株となることもありえる。これは従来から指摘されているところで、いわゆる自己間引き（Shinozaki and Kira 1956）に当たるものと考えられる。自己間引きの背景、の一つに被圧があり、茎数の少ない株は周囲の株から受ける被圧が年々、増加し、その結果として自己間引きが起こることが示唆される。

これらの事実から、エリアンサスの群落でも、最終収量一定の法則が成り立つ可能性が示唆されたと考えている。ただし、定植後の少なくとも数年間は収量が増加することが明らかになっていることを踏まえると（金井ら 2017, 金井・森田 2018, 水嶋ら 2018）、定植してから数年後に最終収量に到達する可能性が高い。

本研究の結果を踏まえると、エリアンサス群落の栽培では早期に間引きを行うことが、経年経過を含めて収量を増加させるのに効果的と考えられる。すなわち、エリアンサスの栽培で早期に人為的な間引きを行うと、行わなかった場合に比較して、収量が増加するだけでなく（金井・森田

2018), 株が受ける被圧を下げて, 株の生育の変異が拡大しにくくなる可能性がある, 収穫時の作業効率もあげられる可能性がある。ただし, 苗の定植 1, 2 年目は, 地上部の生育が必ずしもよくないことが経験的に知られており, ある程度密植した方が, 収量が高くなる (林ら 2012, 松波ら 2016)。すなわち, どの段階 (どの年次) で間引きを行うかは, 実際の群落の生育をみて判断する必要がある (金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)。

以上, 本研究の結果, エリアンサス群落は苗の定植後, 毎年の再生を重ねるにつれ, 群落を構成する株が大型化しながら, 生育変異 (茎数 / 株) が拡大していくことを明らかにした。その場合, 株の生育は前年の生育に規定される側面が強い。同時に, それぞれの株の生育は周囲の株からの被圧の影響を受ける可能性も強い。群落を構成する個々の株の地上部バイオマス量を, 茎数 / 株を指標として利用しているため, 詳細な解析を行うためには限界があるし, 茎数 / 株が被圧という, まだ実態が明らかになっていない要因だけで決まっているはずもない。しかし, 茎数 / 株と被圧との関係を示したグラフにおいて, プロットの分布範囲に一定の傾向が認められことは, 示唆に富む結果といえる。苗の定植後の年数が増すと, 生育変異が広がり, 顕著になる側面と, 自己調節機能のようなものが働き, 収束したり, 斉一性が高くなると考えられる。

多年生草本作物の場合, 群落における生育変異の経年推移に関する研究はないといってよい状況である。したがって, 本研究で生育変異に関する定量的な記載ができた意義は大きい。今後は, いくつかの環境要因と, 株間の相互作用に着目して, データの蓄積を行う必要がある。なお, 本研究で株間の相互作用の指標として利用した被圧についても, 現実的な意味や意義について検討する必要があることはいうまでもない。まだ, 具体的に考察するための精度のデータがあるわけではないが, 当然, 株の生育に伴って群落内の光環境が場所によってどのように変化していくか, それによって群落として, および個々の株の光合成・物質生産がどのように変化するかは検討しなければならない。

謝辞: 本研究の一部は, 岩谷財団科学技術研究助成を受けた。エリアンサス群落の全株の茎数調査では, 東京農業大学農学部作物学研究室の学生の協力を得た。

引用文献

- 安藤広太郎 1913. 水稻の分けつと栽植の疎密との関係試験成績. 農事試験報 40: 1-49.
- Boddiger, D. 2007. Boosting biofuel crops could threaten food security. The Lancet. 370: 923-924.
- Donald, C. M. 1963. Competition among crop and pasture plants. Advances in Agronomy 15: 1-114.
- Hattori, T. and Morita, S. 2010. Energy crops for sustainable bioethanol production; which, where and how? Plant Prod. Sci. 13: 221-234.
- Hattori, T., Shiotsu, F., Doi, T. and Morita, S. 2010. Suppression of tillering in *Erianthus ravennae* (L.) Beauv. due to drought stress at establishment. Plant Prod. Sci. 13: 252-255.
- 林智仁・羅海燕・阿部淳・我有満・上床修弘・森田茂紀 2012. 異なる栽培密度で植え付けたエネルギー作物エリアンサスの 2 年目のバイオマス収量および根系形態. 日作紀 81 (別 1): 262-263.
- 伊藤敏一・山口俊二 1972. 乾田直播栽培の播種密度に関する研究. 三重農技研報 1: 9-17.
- 金井一成・新村悠典・森田茂紀 2017. エネルギー作物エリアンサスの群落構造の解析—定植 1・2 年目群落の生産構造図の比較—. 東農大農学集報 62: 13-20.
- 金井一成・森田茂紀 2018. 間引き年次がエリアンサスの群落構造および収量に及ぼす影響. 東農大農学集報 63: 83-87.
- 神田巳季男・柿崎洋生 1959. 水稻の栽植密度に関する研究: 第三報 栽植様式と栽植密度の相互関連性について (2). 日作紀 27 (2): 177-178.
- 川嶋良一 1986. 農業技術研究の原点を求めて 農業技術の課題と展望 [1] 農業技術協会, 東京. 71-94.
- Kira, T., Ogawa, H. and Sakazaki, N. 1953. Intraspecific competition among higher plants. I. competition-yield-density interrelationship in regularly dispersed population. Journal of Institute of Polytechnics Osaka City University D4: 1-16.
- Koyama, H. and Kira, T. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VIII. Frequency distribution of individual plant weight as affected by the interaction between plants. Journal of Institute of Polytechnics Osaka City University D7: 73-94.
- 松波寿弥・小林真・安藤象太郎・寺島義文 2014. 刈取りの時期および高さが越冬後の数系統のエリアンサス (*Erianthus arundinaceus* (L.) Beauv.) の再生に及ぼす影響. 日草誌 59: 253-260.
- 松波寿弥・小林真・安藤象太郎・寺島義文・霍田真一・佐藤広子 2016. 栽植密度および施肥水準がエリアンサス (*Erianthus arundinaceus* (L.) Beauv.) の乾物収量に及ぼす影響. 日草誌 61 (4): 224-233.
- 水嶋啓太・金井一成・森田茂紀 2018. エリアンサスの収量と群落構造に及ぼす栽植密度の影響. 日作紀 87: 259-260.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013. セルロース系バイオエタノール原料作物の研究戦略. 日本エネルギー学会誌 92: 562-570.
- 森田茂紀 2018. エネルギー作物学. 朝倉書店, 東京. 1-168.
- 森田茂紀・金井一成 2020a. エネルギー作物エリアンサスの栽培利用の事業性評価 [1]. 農及園 95 (1): 86-90.
- 森田茂紀・金井一成 2020b. エネルギー作物エリアンサスの栽培利用の事業性評価 [2]. 農及園 95 (2): 151-160.
- 農林水産技術会議事務局 2017. 地域資源を活用した再生可能エネルギー等の利活用技術の開発—草本を利用したバイオエタノールの低コスト・安定供給技術の開発—. プロジェクト研究成果シリーズ 572: 22-29.
- 小川房人 1980. 個体群の構造と機能 植物生態学講座 5. 朝倉書店, 東京. 137-156.
- Ra, K., Shiotsu, F., Abe, J. and Morita, S. 2012. Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. Biomass and Bioenergy 37: 330-334.
- REN 21 2018. Renewables 2018. GLOBAL STATUS REPORT. REN 21, Paris. 1-325.
- Sekiya, N., Abe, J., Shiotsu, F. and Morita, S. 2014. Cultivation of *Erianthus* and Napier grass at an abandoned mine in Lampung,

- Indonesia. Amer. J. Plant Sci. 5: 1711-1720.
- Shinozaki, K. and Kira, T. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. Journal of Institute of Polytechnics Osaka City University D7: 35-72.
- Shiotsu, F., Hattori, T., Morita, S. 2011. Biomass as energy resource. In United Nations University ed., Designing Our Future from Local and Regional Perspective Bioproduction, Ecosystem and Humanity. United Nations University Press, Tokyo. 88-98.
- 末信真二・角重和浩・山本富三・井上恵子 1994. ヒノヒカリの窒素栄養診断 第2報 草丈・係数・葉色からの水稻窒素吸収量の推定 福岡農総試研報 A-13: 5-8.
- Thomas, S. C. and Weiner, J. A. 1989. Including competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. Oecologia 80: 349-355.
- Yamada, N., Ota, Y. and Nakamura, H. 1961. Ecological effects of planting density on growth of rice plant. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 29(3): 329-333.
- 依田忞二 1971. 森林の生態学. 築地書館, 東京. 1-331.

Analysis on Variation of Growth and Development in *Erianthus* Population : Issei KANAI¹⁾ and Shigenori MORITA²⁾ (¹⁾*Ohyu Gakuen Girls' Junior and Senior High School*; ²⁾*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture, 1737 Funako, Atsugi, Kanagawa 243-0034, Japan*)

Abstract : *Erianthus*, a perennial C₄ grass, is gathering attention as a raw material for cellulosic bioethanol, mainly because it has high potential for biomass production based on its large canopy. During the annual regeneration of the population, differences arise among stocks of the population including disappearance in some cases. In the present study, we investigated the variation in growth and development of stocks in the *Erianthus* population year by year from the view-point of population ecology. Regardless of the year after planting, stocks with small numbers of stems were frequently observed, while those with large numbers of stems were seldom observed. Such a tendency became more pronounced year by year. In addition, the trend in annual changes after transplanting indicated that the growth variation increased with the canopy development of the population. The relationship between the growth variation and the competitive effect showed that the less the number of stems per stock, the larger the competitive effect. Cultivation of *Erianthus* over several years suggested that the law of constant final yield may hold. Thinning at an early stage of cultivation may increase the yield and inhibit the increase of growth variation of the stocks in the canopy.

Key words : Competitive effect, *Erianthus*, Growth variation, Interaction, Population.