

エネルギー作物エリアンサスの
栽培・利用システムの構築に関する研究

2022 年

金井一成

目次

緒言	1
第1部 群落の発育形態学的解析	
第1章 群落構造の経年変化の解析	
— 一定植 1・2 年目群落の生産構造図の比較 —	4
第2章 間引きが群落構造および収量に及ぼす影響	23
第3章 群落における株の生育変異の解析	33
第2部 群落を形成する株の発育形態学的解析	48
第4章 群落を形成する葉身における機械的強度の解析	49
第5章 群落を形成する葉鞘と茎の機械的強度の解析	66
第6章 分けつ生育の発育形態学的解	78
第7章 穂の形態と形成の解析	98
第8章 根系形成の発育形態学的解析	114
第3部 栽培・利用システムの構築と評価	132
第9章 組織培養を利用した苗生産システムの確立	134
第10章 刈取り方法・乾燥方法の検討	142
第11章 利用システムと事業性評価	153
総合考察	
— エネルギー作物のエリアンサスの	
低投入持続的な栽培・利用システムの構築 —	176
要旨	184
Abstract	188
謝辞	195
引用文献	196

20 世紀において人類は多くのエネルギーを利用することで、より便利でより快適な生活を求めてきた。そのエネルギーのほとんどは化石エネルギーに由来するため、石油枯渇と地球温暖化の問題が発生した。これらの問題を解決するための方策として、再生可能エネルギーが注目されており (Shiotsu ら 2011), 2000 年以降, 世界におけるバイオエタノールの生産量が増加している (REN21 2018).

現在, 世界のいくつかの国で事業化されているバイオエタノールプラントでは, サトウキビ, トウモロコシ, コムギ, キャッサバなどの糖質系やデンプン系などの食用作物が原料として使われている。しかし, 2008 年に起こった食糧危機を契機にして, 糖質系やデンプン系などの食用作物をバイオエタノール原料とすることに批判が強まり, 食糧とエネルギーとの競合を避けるために, 非食用であるセルロース系資源作物を原料としてバイオエタノールを生産するための技術開発が進められている (Boddiger 2007, Hattori and Morita 2010).

セルロース系資源作物として, 従来研究成果から, いくつかの候補作物に絞り込むことができ, 多年生のイネ科 C₄ 型光合成を行う作物が有力候補とされている (森田ら 2013). 実際の栽培結果も参考に選定を行うと, 日本国内ではエリアンサスが有力候補として提案されている (Hattori and Morita 2010, Hattori ら 2010, Ra ら 2012).

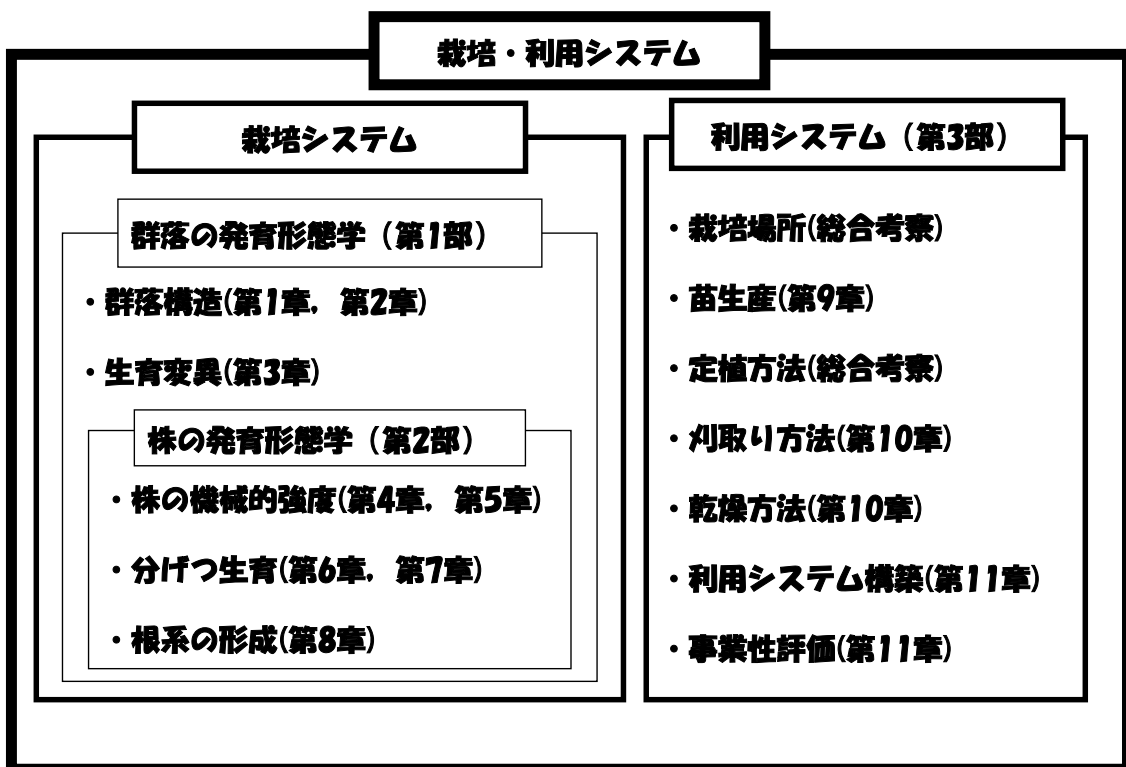
エリアンサスはサトウキビに近縁のイネ科の多年生作物である。熱帯・亜熱帯原産で (関谷ら 2015), C₄ 型光合成を行うが, 日本では少なくとも福島県以南で旺盛な生育を示し, 高い物質生産性を発揮する (森田ら 2013a, 松波ら 2013). エリアンサスが低い物質生産性や高いストレス耐性を発揮するメカニズムについては明らかになっていないが, その背景として根系が深くて大きいことがあると考えられており, エリアンサスの根系に着目した研究が進められている (Sekiya ら 2013, Sekiya ら 2014, Sekiya ら 2016, Shiotsu ら 2015;2016). このようにストレス耐性が高く, 不良環境条件でも旺盛な生育を示すことは (Sekiya ら 2014), セルロース系の原料作物として有利な点である (Matsuo ら 2002).

以上のようにエリアンサスはエネルギー作物として注目されている

が、その高い物質生産性の背景については十分に解明されておらず、また、具体的な栽培や利用に関するシステムが構築されていない。

そこで、まずはエリアンサスの群落形成に関する作物学・栽培学的研究を推し進め、低投入持続的であることを念頭に置きながら、収量を高く維持するための栽培システムについて検討した。

また、エネルギー作物を栽培して利用していくには原料作物の群落における収量について検討するだけでは不十分である。すなわち、エネルギー作物を栽培して利用する背景には、前述した地球温暖化問題および石油枯渇問題があるため、栽培システムだけでなく、利用まで含めたシステム全体におけるエネルギー収支やエネルギー効率、そして、最終的には経済的な評価が、食用作物の栽培利用以上に重要なポイントになってくる。そこで、栽培だけでなく利用まで含めたシステム全体について検討し、足りない個別テーマについて研究を進め、これらの成果を基に、エリアンサスの栽培・利用システム(第 0-1 図)を構築することが本研究の最大の目的である。



第 0-1 図 本論文における各部および各章の関係。

第1部 群落の発育形態学的解析

第1章 群落構造の経年変化の解析

一定植1・2年目群落の生産構造図の比較

エリアンサスは不良環境条件下でも高い物質生産性を示す。この点については、茎数と収量(Hattoriら 2010)や、栽植密度(森田ら 2013a)、窒素吸収量(Raら 2012)の観点から検討がされ、ある程度の研究成果が蓄積されている。しかし、高い物質生産性を示す背景について、光合成物質生産の観点からの解析は行われていない。

そこで、本研究では定植1年目と2年目のエリアンサス群落を対象として、物質生産の基盤となる群落構造について検討を行った。すなわち、出穂期の群落を対象として層別刈取り法を利用して生産構造図を描くことで物質生産に関する解析を試みた。これらの結果に加え、生育期間を通しての生育調査の結果を踏まえ、エリアンサスの高い物質生産性を支える背景について解析を行った。

1. 材料と方法

(1) 材料の栽培と生育調査

本研究では、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培した定植1年目および2年目のエリアンサス(*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)の品種JES1の群落を対象とした。JES1は、遺伝資源であるJW4を育種母材として育種されたエリアンサスにおける初めて品種である。除草と耕起を行った圃場に、2014年6月13日(以下、群落Aとする)と2015年5月26日(以下、群落Bとする)に、条間1m×株間1mの栽植間隔(10条×11株)で、それぞれ110株ずつの苗を定植した。基肥および追肥は施用せず、灌水もしなかったが、いずれの群落も定植1年目は適宜、手取り除草を行った。この圃場は、エリアンサスを栽培する数年前から休耕地であり、なおかつ、ヒアリングを含め、エリアンサスの栽培を行う前までの作物栽培において、群落のいずれにおい

でも作物の生育に大きな差異はなかった。また、栽培期間中、気候条件は平年並みであった。このようにして栽培した群落 A(定植 2 年目)と群落 B(定植 1 年目)において、標準的な生育を示したそれぞれ 24 株を選定し、毎週 1 回、草丈と茎数を継続的に記録した。

(2) 収量調査と生産構造図

出穂期には、6 株(3 株×2 列)、2 反復について層別刈取りを行い、生産構造図(Monsi und saeki 1953)を描いた。すなわち、定植 1 年目の群落は 2015 年 10 月 13 日、2 年目の群落は 2015 年 10 月 20 日に、地表面から 20cm の高さで地上部を刈取り、高さ 20cm ごとに切り分けた後、いずれの高さについても同化器官(葉身)と非同化器官(葉鞘、茎および穂)とに分けて紙袋に入れ、80℃に設定した乾燥機で重量の減少がゼロとなるまで乾燥させてから、重さを測定した。また、刈取り前に、照度計(HIOKI 社 LR5041 VOLTAGE LOGGER)を用いて群落内の光合成有効放射量を測定して、高さ別の相対照度を算出した。

(3) 生産構造図の推移

生育調査を行っている株付近において、再生を開始した後、約 1 ヶ月毎にプラントキャノピーアナライザー(メイワフォーシス株式会社製 LAI-2000)を利用して高さ別に葉面積指数を測定し、葉面積指数からみた群落構造の変化を追跡調査した。すなわち、群落内の平均的な生育を示した 6 株(3 株×2 列)が配置する長方形の対角線の、等分に位置する 4 箇所計測を行うことを、位置をずらして 3 回繰り返すことを 1 組とし、4 組の反復測定を実施した(4 箇所×3 回測定×4 反復)。このような測定を高さ 30cm ごとに行い、測定結果の差し引きからそれぞれの高さにおける葉面積指数を算出した。

同時に、プラントキャノピーアナライザーに付属している照度計で、群落内における照度を地表面から 30cm ごとに測定して、高さ別の相対照度を算出した。

キャノピーアナライザーによる測定精度を検証するために、出穂期に群落内で平均的な生育を示した 6 株を選定し、30cm ごとに層別刈取りを行い、卓上面積計(メイワフォーシス株式会社 LI-3100C)を使って、そ

それぞれの高さにおける葉面積を測定し、実測に基づいて葉面積指数の高さ別分布と比較検討した。

また、出穂期には、これとは別に6株(3株×2列)の2反復について層別刈取りを行い、生産構造図を描いた。すなわち、定植1年目の群落は2015年10月13日、2年目の群落は2015年10月20日に、地表面から約20cmの高さで、地上部を刈取り、高さ20cmごとに切り分けた後、いずれの高さについても光同化器官(葉身)と非同化器官(葉鞘、茎および穂)とに分けて紙袋に入れ、80°Cに設定した乾燥機で重量の減少がゼロとなるまで、乾燥させてから、重さを測定した。さらに、照度計(PELICAN社1030 Micro Case Series)を用いて群落内の光合成有効放射量を測定して、高さ別の相対照度を算出した。

2. 結果

(1) 生育調査と収量調査

群落B(定植1年目)の生育はゆっくり進み、出穂期における地上部バイオマス収量(以下、収量)は6.3t/haであった。群落A(定植2年目)のエリアンサスは4月中頃に再生が始まり、生育は群落B(定植1年目)より旺盛で、出穂期における収量は群落B(定植1年目)の約4倍に当たる23.5t/haに達した。このとき、収量の増加は、同化器官より非同化器官で著しく、その結果、定植2年目の葉量比(=同化器官の乾物重/(同化器官の乾物重+非同化器官の乾物重)×100)は、群落Bより群落A(定植2年目)の方が小さかった(表1.1)。

地上部の生育の様相を茎数と草丈の推移(第1-1図)についてみると、群落B(定植1年目)は、苗の定植後4週間ほどは茎数がほとんど増加しなかった。その後、6月下旬から増加を始め、多少の凸凹はあるが概ね出穂期頃まで直線的に増加した。一方、群落A(定植2年目)の群落では4月に再生が始まり、生育初期に茎数が急激に増加した。その後の増加は緩やかで、出穂の約1ヶ月前に増加が止まった。以上の生育の結果、出穂期における茎数は群落A(定植2年目)および群落B(定植1年目)のいずれも、ほぼ同じレベルの70本/株前後となった。

群落 B(定植 1 年目)の草丈は、定植した直後から増加が始まり、出穂期頃まで増加が続いたが、生育後半の増加は前半より若干、緩やかであった。これに対して、群落 A(定植 2 年目)では株が再生を始めた 4 月から草丈が増加し、その後は群落 B(定植 1 年目)と同様の経過をたどった。群落 A(定植 2 年目)は草丈の増加の開始時期が早かったため、生育期間が群落 B(定植 1 年目)より長くなり、それに伴って最終的な草丈(穂を除く葉身先端までの長さ)は、群落 B(定植 1 年目)より 140cm ほど高かった。

(2) 出穂期の群落構造と相対照度

群落 B(定植 1 年目)の出穂期における生産構造図(第 1-2 図)をみると、高さ別の同化器官の乾物重の分布は山型を示し、最大量を示した層(80~100cm)は草丈の中間地点より下にあり、重心の高さは約 94cm であった。一方、非同化器官の乾物重は地表に近い層で最大で高い層ほど少なく、重心の高さは約 63cm であった。群落 B(定植 1 年目)の同化器官と非同化器官を合わせた株全体の乾物重の重心の高さは約 79cm であった。

群落 A(定植 2 年目)の出穂期における群落の生産構造図(第 1-2 図)をみると、同化器官の乾物重の総量は群落 B(定植 1 年目)より多く、分布は山型を示したが、全体が高い側に移動していた。すなわち、最大値を示した高さ(180~200cm)は群落 B(定植 1 年目)より高く、草丈の中間にあった。同化器官の乾物重の重心の高さは約 169cm であり、これは群落 B(定植 1 年目)よりも高かった。非同化器官は同化器官以上に乾物重の増加が著しかったが、分布パターンは群落 B(定植 1 年目)に似ていた。すなわち、地表に近い層で最大で、高い層ほど分布が少なかった。非同化器官の乾物重の重心の高さは約 64cm で、群落 B(定植 1 年目)とほぼ同じであった。定植 2 年目の株全体の乾物重の重心の高さは約 105cm で、群落 B(定植 1 年目)より高かった。

群落内の相対照度の推移を群落頂部から基部に向かってみると、群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)は、いずれの場合も光合成器官の分布が増えるのに伴って減衰し、一定の高さで 0%に近づいた。相対照

度の減衰は群落 A(定植 2 年目)の方がやや緩やかであったが、0%に近くなる高さは高かった。群落 B(定植 1 年目)の群落では高さ 100cm で 0%に近くなったのに対し、群落 A(定植 2 年目)の群落では、200cm で既に 0%に近かった。

(3) 群落構造と相対照度の推移

群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)のそれぞれの群落について、異なる生育段階においてプラントキャノピーアナライザーを利用して葉面積指数を測定し、群落構造の形成を解析した。その結果、群落 B(定植 1 年目)における生育に伴う葉面積指数の増加は群落 A(定植 2 年目)ほど著しくなく、葉面積指数は群落の下側に分布していた(第 1-3 図)。

一方、群落 A(定植 2 年目)は、生育に伴う葉面積指数の増加が群落 B(定植 1 年目)より著しかった。また、葉面積指数の増加に伴い、その分布が群落の上側に移動していた(第 1-4 図)。葉面積指数の重心の高さは生育とともに、すなわち、葉面積の著しい増加に伴い、群落の上側に向かって移動した(第 1-5 図)。

葉面積指数の分布の変化に伴って、相対照度の高さ別の減衰の様相も変化した。すなわち、群落 B(定植 1 年目)より群落 A(定植 2 年目)の方が、群落の高い位置で相対照度が 0%に近い値になっていた。

3. 考察

(1) 収量形成と株の生育

出穂期にエリアンサス群落の収量調査を行ったところ、群落 B(定植 1 年目)の収量は必ずしも多くなかったが、群落 A(定植 2 年目)は著しく増加した。群落 B(定植 1 年目)の生育は旺盛ではないが、2 年目以降に収量が飛躍的に増加することは、すでに Ra ら(2012)によって報告されている。本研究でも同様の結果が確認できたことから、かなり普遍的に認められる現象と考えられる。

ただし、群落 A(定植 2 年目)でも群落 B(定植 1 年目)でも、出穂期における株当たりの茎数は 70 本程度で、ほぼ同じであった。このことから、

群落 A(定植 2 年目)の出穂期における茎 1 本あたりの平均乾物重は、群落 B(定植 1 年目)よりかなり大きかったことになる。また、群落 A(定植 2 年目)の出穂期における収量は群落 B(定植 1 年目)より増加していたが、同化器官(葉身)より非同化器官(茎・葉鞘・穂)の増加が著しいことが特徴であった。これらのことから、定植 2 年目の株を構成する茎が 1 年目よりかなり太いか、長いか、または、その両者であることが考えられる。これは、それぞれの群落の生産構造図を描くために刈取りをしたときの観察結果と整合している。

以上のように、本研究の結果から、茎の生育が収量に大きく影響している可能性が示唆された。エリアンサスの茎数と乾物重との関係については、処理のいかんに関わらず、有意な正の相関関係が認められることがすでに報告されている(Hattori ら 2010)。ただし、この結果は定植 1 年目の結果であり、定植 2 年目にかけてそれぞれの茎が大きくなるため、収量に対する茎数の影響がさらに大きくなったと考えられる。定植年数の如何に係らず、茎数と収量との間に正の相関関係があるかどうかは分からず、多年生作物の収量形成については、経年変化を含めて検討を行っていく必要がある。

(2) 群落構造と株の生育

本研究の結果、多年生作物であるエリアンサスの群落構造が、定植 1 年目から 2 年目にかけて大きく変化したことが明らかとなった。群落の物質生産を解析する場合、生産構造図を描いてみることはオーソドックスなアプローチであるが、これまでの群落構造の研究の多くは一年生の食用作物か、自然生態系を構成する複数の植物種を対象としたものがほとんどであり、多年生草本植物における群落構造の経年的な変化を追跡した報告は目につかない。したがって、本研究の結果は、多年生草本植物の群落構造の経年変化を明らかにした貴重なデータといえる。

群落全体の収量が増加したときに非同化器官の増加が著しかったことは、すでに結果で記載したとおりである。これに対して、同化器官はバイオマス量が増加するとともに、高さ別の分布が群落上部へ移動してい

たのが特徴的である。苗を定植した1年目は、1~2本の茎から出発したが、生育調査のところで記載したように、定植直後から1ヶ月ほどは茎数がほとんど増加せず、その後、出穂期まで徐々に茎数が増加した。これは、生育初期に出現して生育期間が相対的に長い分げつが少なく、生育が進んでから順次出現してくるため、生育期間が相対的に短い分げつの割合が多かったことに対応するはずである。すなわち、株を構成している分げつの生育期間には大きな変異が認められ、分げつの生育期間の長短は総葉数の差、すなわち、葉面積の大小として現れたと考えられる。定植1年目の群落は葉面積の形成は生育初期から旺盛というわけではなく、順次、出現してくるため、生育期間が異なる分げつの総体として葉面積が規定されるため、その高さ別の分布は相対的に低い位置にピークが形成されたと考えられる。群落B(定植1年目)の収量が高くなかったことは、このような分げつ形成の反映として理解できる。

これに対して、群落A(定植2年目)は、前年度の冬季間に刈取りを行った株からの再生という形で生育が始まった。再生開始時点で、刈り株には、すでに多くの分げつ芽が形成されていたはずである。そのため、生育調査の結果が示すように、株再生開始後の短期間に多くの茎数が確保され、その後、出穂期まで徐々に増えた。したがって、出穂期における最終的な茎数は群落B(定植1年目)と群落A(定植2年目)でほぼ同じであったが、その発育形態学的な構造は異なっていたと考えられる。すなわち、定植2年目の株を構成する多くの茎は、株の再生開始直後に生育を開始しているため、生育期間が相対的に長いものが多く、そのため、茎は太く、長く、着生した葉の数が多いはずである。草丈は、定植1年目と2年目でほぼ同じような推移を示し、定植2年目は生育期間が長い分、最終的な草丈も長くなった。上記のような茎の構成を持つため、生育期間が相対的に長い茎に多くの葉が着生するだけでなく、その茎も1年目よりも長く、そのため同化器官としての葉身の高さ別分布のピークは、1年目より高い位置に移動していたと理解できる。

これらのことから収量形成だけでなく、それを支える群落の物質生産の基礎となる群落構造は、群落を構成する個々の株の生育、とくに分け

つ構成と密接に関係していることが明らかとなった。これを援用すると、生育初期に早目に多くの茎数を確保し、生育期間の長い分げつの割合をあげることが収量形成に必要と考えられる。ただし、このような分げつ形成に伴って光合成器官の重心の位置が高くなるため、群落内の相対照度は高い位置で減衰することとなり、物質生産にとってマイナスに働く可能性もある。この点については、以下で考察する。

(3) 方法論に関する検討

本研究では、プラントキャノピーアナライザーで高さ別に葉面積指数を測定して、その差し引きから同化器官の高さ別の分布を構成することを試みた。このような方法で群落の構造を解析した事例がみつからなかったため、方法論についての比較検討ができていないが、今回の試みでは、プラントキャノピーアナライザーで測定した葉面積指数の測定値が信頼できることを前提としている。この点についての従来への検討結果は、信頼性を支持しているものが多いが(山本ら 1995, Iwaya ら 2004)、葉面積の絶対値が小さい場合は誤差が生じることも報告されている(Iwaya ら 2004, 丸山ら 2005, 荒井・佐藤 1998)。生育の遅い定植 1 年目で、プラントキャノピーアナライザーを利用した測定の開始を遅らせている理由は、ここにある。本研究で対象としたエリアンサスの群落では株数も限られているため、随時、刈取りを行う破壊的な調査を行うことはできず、データの信頼性の検証は限られている。すなわち、刈取りの直前にプラントキャノピーアナライザーで、定植 1 年目の群落について葉面積指数を測定するとともに、実際に 30cm ごとに刈取り、卓上面積計葉面積を実測した。葉面積の絶対値については対応が必ずしもよくなかったが、高さ別の分布の様相は類似した傾向を示した。さらに、定植 1 年目の出穂期に層別刈取り法を用いて測定した葉の乾物重の高さ別分布の様相とも整合していた。したがって、エリアンサス群落に対してプラントキャノピーアナライザーを記載したような方法で使用して群落構造の形成を議論しても、全体の論旨に特段の問題はないと考えている。この点は、測定データを増やして検討する必要があるが、本研究では、群

落構造の形成過程に関する貴重なデータであることから、葉面積指数の絶対値ではなく葉面積指数からみた群落構造の形成と、出穂期の生産構造図を結びつけて議論することができるという前提で、若干の考察を試みたい。

(4) 群落構造の形成過程

本研究では、同化器官および非同化成器官のバイオマス量が増加しながら、とくに同化器官の分布が高い方へ移動することが明らかにできた。それに伴って、群落内の相対照度が大きく減衰する位置が高い方へ移動することも確認できた。群落 B(定植 1 年目)は測定データが少なく、葉面積の絶対値が小さいので、参考とする場合以外は除外し、群落 A(定植 2 年目)のデータに基づいて議論を進める。

本研究では、葉面積が増加するのに伴って相対照度が 50%未満になる位置が高くなることを明らかにした(第 1-6 図)。群落 A(定植 2 年目)は群落 B(定植 1 年目)より収量がかなり多かったが、出穂期における生産構造図と、その形成過程をみる限り、群落の受光態勢は必ずしもいいものではない可能性がある。

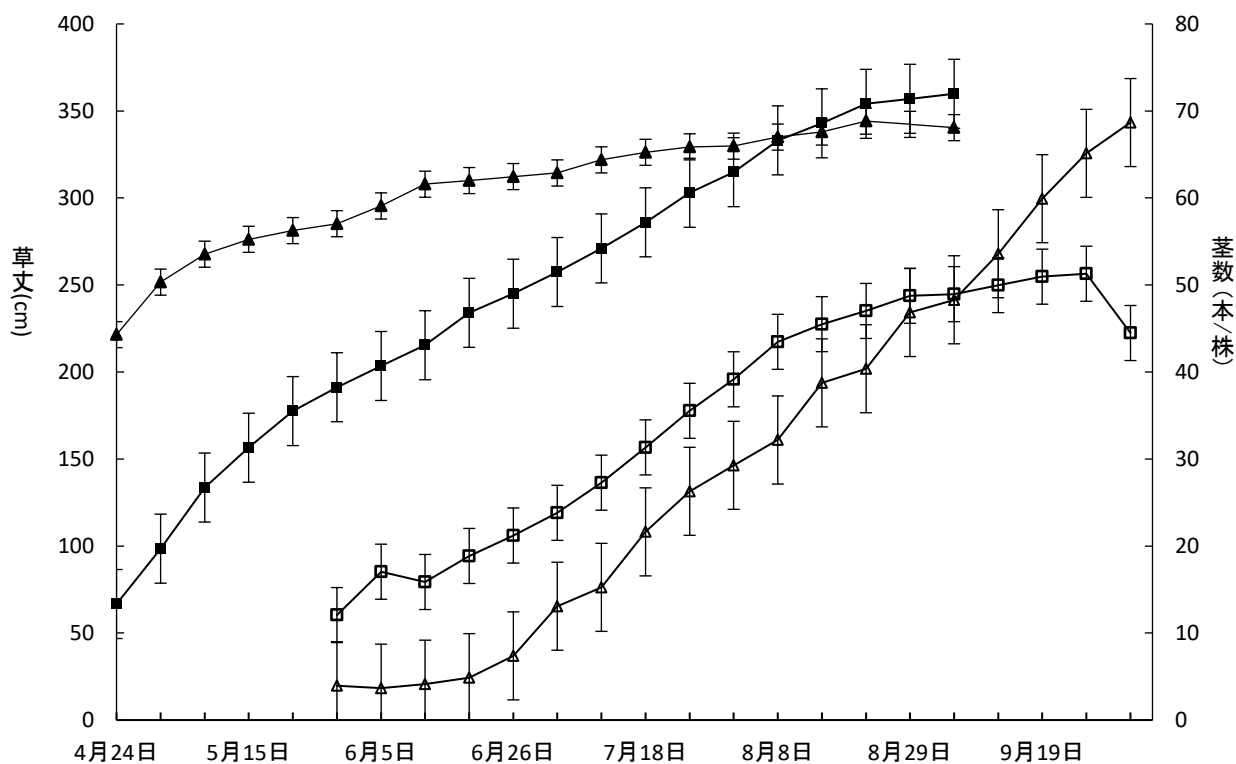
群落としての物質生産は、同化器官としての葉面積の絶対値と相対照度との兼ね合いで決まるため、判断基準がないのが現状である。そこで、群落の物質生産能力を検討する一助として、葉面積に相対照度を掛けたものを高さ別に算出し、群落としての総和を群落物質生産指標として、その推移をみたところ(第 1-7 図)、群落 B(定植 1 年目)では、群落の生育に伴って短期間に、群落物質生産能力指数が増加した。一方、群落 A(定植 2 年目)では葉面積が著しく増加したにもかかわらず、群落物質生産能力指数の増加は緩やかであった。このことは、葉面積が増加しても群落としての物質生産能力は、さほど増加していないことを意味しており、その原因として、群落内における相対照度の減衰の様相が大きく関係している可能性が考えられる。群落として一定の物質生産能力が長期間に渡って維持された結果、群落の収量としては増加したということであろう。上記の考察は群落の部位によって、また、形成時期によって葉面積

当たりの光合成速度に有意な差異がないことを仮定するというやや乱暴なものではあるが、群落の構造と物質生産とを結び付けて議論して課題を抽出する範囲で、ある程度有効なものであると考えている。破壊的な調査によって群落の物質生産能力を検証するまでの作業仮説としておきたい。

実際、エリアンサス群落の収量形成という観点からみた最適密度は、植付け年次とともに変化することが、すでに報告されている(林ら 2012)。すなわち、定植 1 年目は高密度(1m×1m)の収量が最高であったのに対し、定植 2 年目には中密度(2m×1m)で収量が最高となった。したがって、これらの研究結果を総合すると、多年生作物の栽培システムでは、群落の形成とともに最適な栽植密度が変化する可能性があり、生育とともに栽植密度を変えることが有効である可能性がある。すなわち、間引きを適切な年次に行うことで、単位面積当たりの総収量の経年変化を含めて最大化できる可能性が大きい。栽植密度が群落としての収量形成や、窒素利用効率に大きな影響を与えることが報告されており(Ra ら 2012)、群落の物質生産を考察するうえで重要なポイントとなる。すなわち、多年生草本植物であるエリアンサスを長期に渡って栽培して、その間の合計の収量を最大にすることを目指した場合、肥料や機械という形で補助エネルギーを投入することに比較して低投入である間引きという管理作業を導入することで、低投入持続的な栽培システムを構築できるのではないか。ここで採用する間引きは、一年生の食用作物を栽培する場合の間引きとは意義が異なるものであり、少なくとも数年の時間スケールで合計の収量を考えていくという点も含めて、群落の栽培管理において新しい視点を提示できたと考えている。

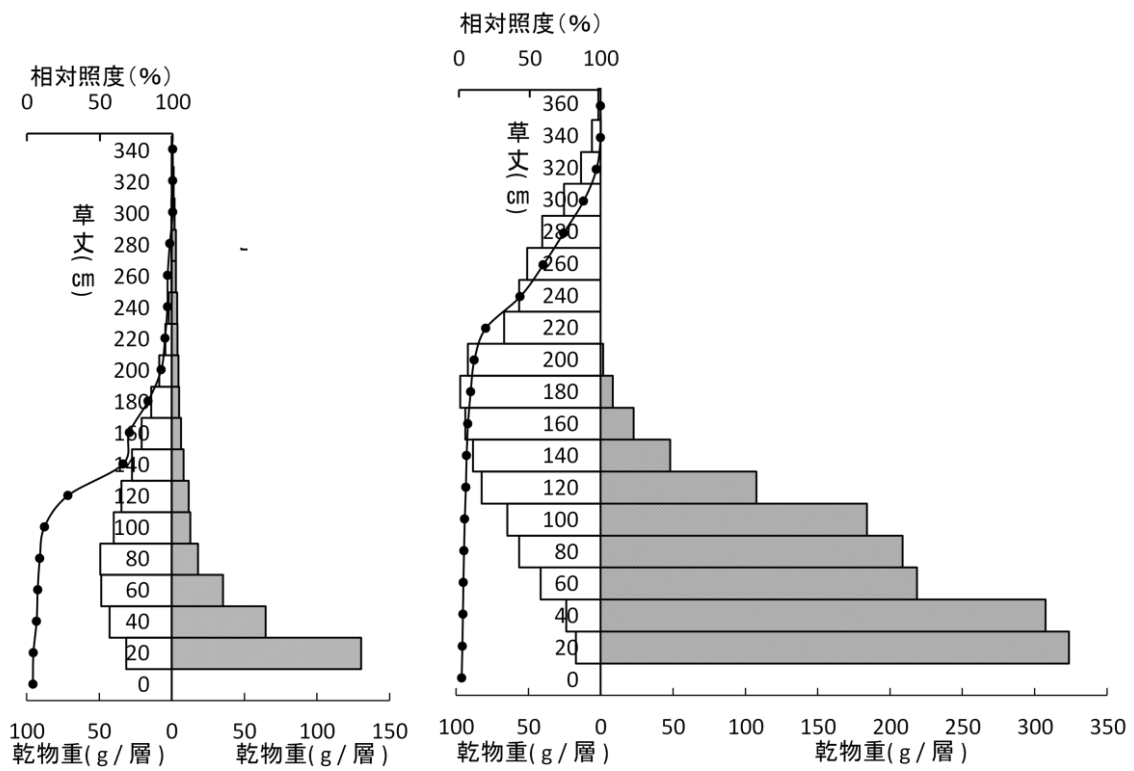
以上、定植 1 年目と 2 年目のエリアンサスの群落構造とその形成過程を生産構造図と生育調査の結果を手がかりにして解析した。その結果、2 年目には収量の増加とともに、群落構造が大きく変化することが、形成過程を含めて明らかとなった。その背景には、前年度の刈取り時点で形成されている分けつ芽の数と翌年の生育があると推察される。

一方で、群落内の相対照度の減衰も高い方へ移動することから、群落としての物質生産機能をさらに効果的に発揮させるために、栽植密度の調節、すなわち、間引きによって栽植間隔を広げることが有効と考えられる。この点は理論的な検討だけでは限界があるので、実際に間引きを行い、群落構造と収量がどのように変化するかを第2章で述べる。いずれにせよ、これまでの一年生食用作物の栽培学とは異なる、多年生草本作物の栽培学の確立が必要である。



第 1-1 図 群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)の草丈と茎数の推移.

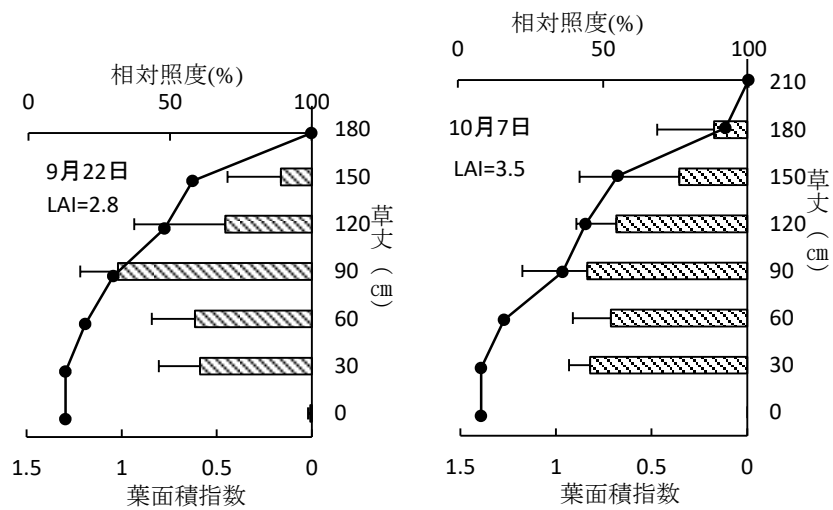
■ : 草丈(群落 A(定植 2 年目)), □ : 草丈(群落 B(定植 1 年目)),
 ▲ : 茎数(群落 A(定植 2 年目)), △ : 茎数(群落 B(定植 1 年目)).
 バーは標準誤差を示す(n=24).



第 1-2 図 群落 A(2 年目)および群落 B(定植 1 年目)の群落の生産構造図.

左：群落 B(定植 1 年目)，右：群落 A(定植 2 年目)。

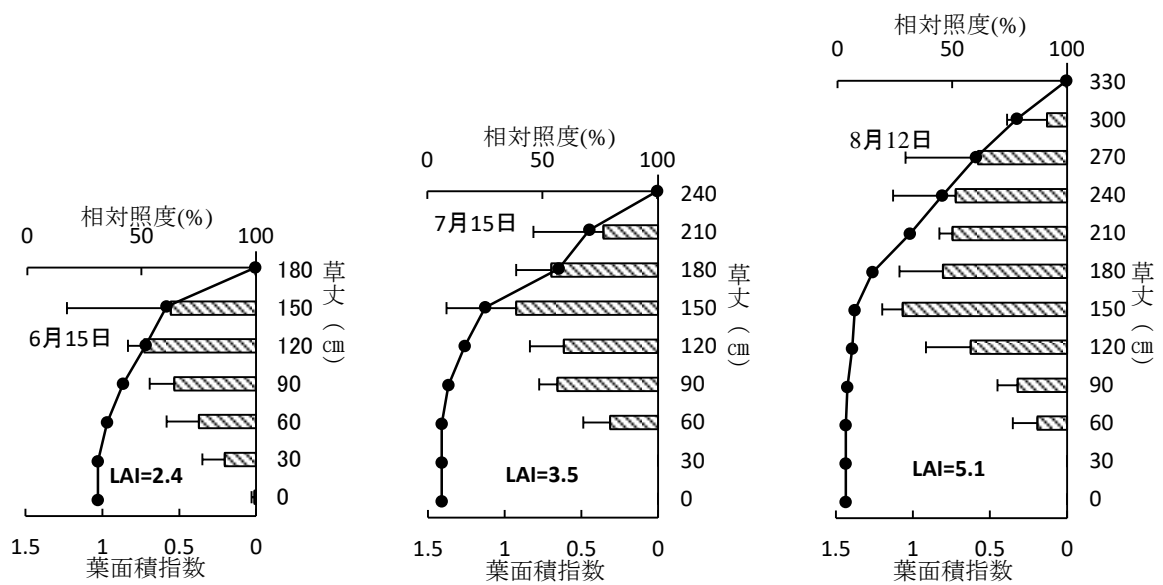
▨：非同化器官，□：同化器官，●：相対照度。



第 1-3 図 群落 B(定植 1 年目)の層別葉面積指数の分布と相対照度の推移.

▨ : 葉面積指数, ● : 相対照度.

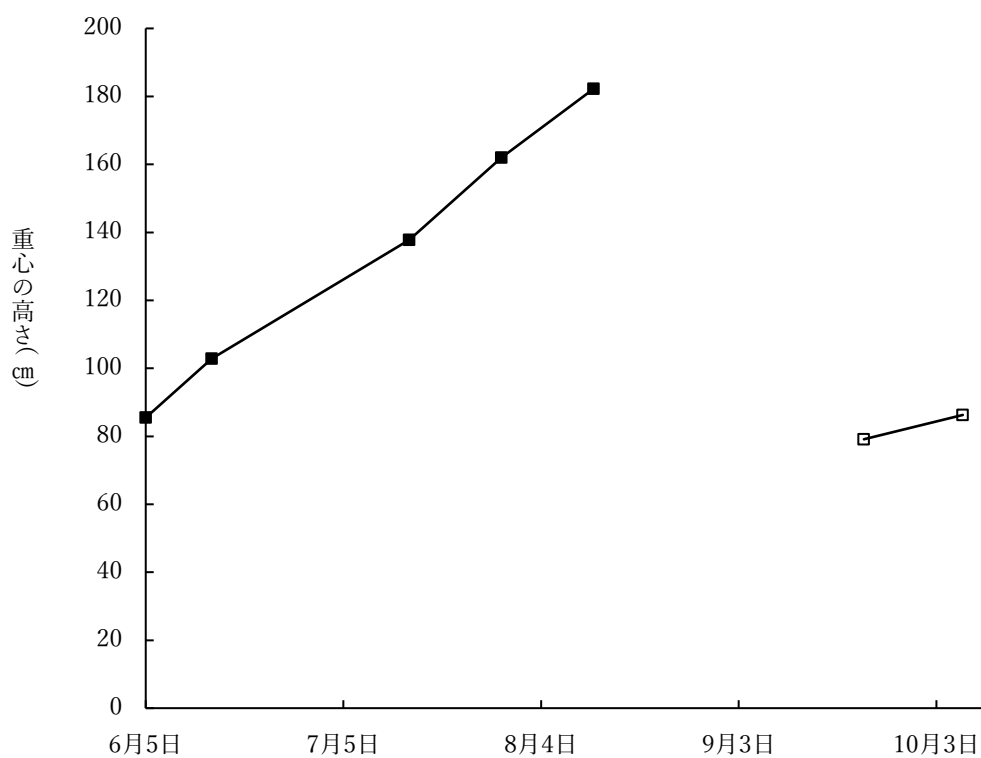
横線は標準偏差を示す(n=4).



第 1-4 図 群落 A(定植 2 年目)の層別葉面積指数の分布と相対照度の推移.

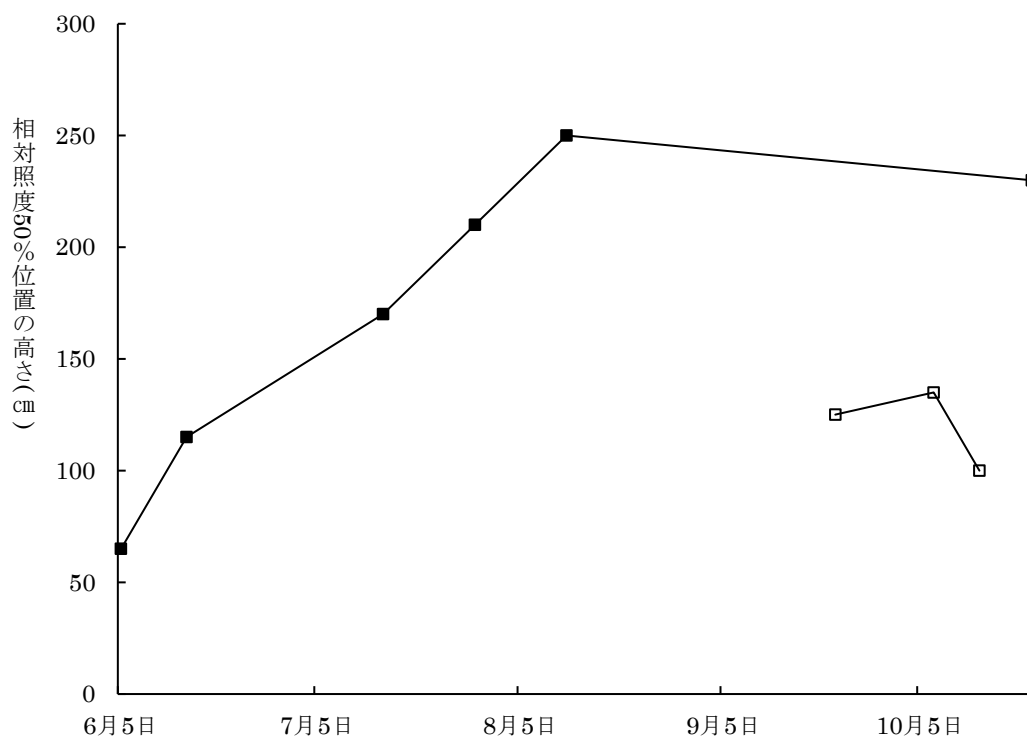
▨ : 葉面積指数, ● : 相対照度.

横線は標準偏差を示す(n=4).



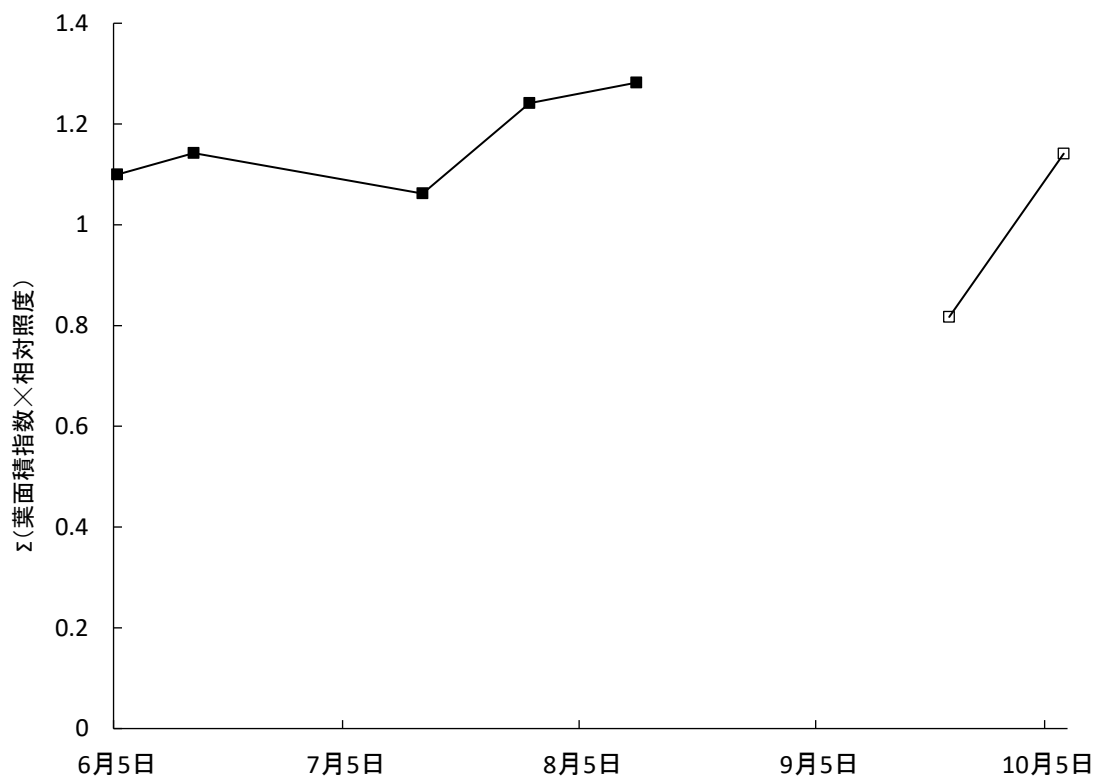
第 1-5 図 群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)の葉面積指数の層別の重心の高さの推移。

■ : 群落 A(定植 2 年目), □ : 群落 B(定植 1 年目).



第 1-6 図 群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)の相対照度 50%位置の推移.

■ : 群落 A(定植 2 年目), □ : 群落 B(定植 1 年目).



第 1-7 図 群落 A(定植 2 年目)および群落 B(定植 1 年目)の高さ毎の葉面積指数×相対照度の総和の推移.

■ : 群落 A(定植 2 年目), □ : 群落 B(定植 1 年目).

表 1-1 群落構造の指標.

	群落 B(定植 1 年目)	群落 A(定植 2 年目)
同化器官の乾物重 (g /株)	325.8	918.3
非同化器官の乾物重 (g /株)	312.7	1431.5
葉量比 (%)	51.0	39.1

第1部 群落の発育形態学的解析

第2章 間引きが群落構造および収量に及ぼす影響

第1章において、エリアンサスの高い物質生産性を理解するため、定植1年目および2年目のエリアンサス群落について物質生産を支える群落構造を解析した(金井ら 2017a)。その結果、定植2年目になると定植1年目より収量は高かったが、群落構造も変化し、群落内部の光環境が定植1年目より悪化していると考えられた。この解析結果を踏まえて、間引きを導入することによって、収量がどのような経年変化を起こすかについて検討する必要がある。

そこで、第1章で対象とした群落AおよびBを用いて、群落Aは定植2年目の刈取り後に、群落Bは定植1年目の刈取り後に、それぞれ間引きを行った。これら2つの群落について、収量と群落構造を解析することで、間引きの効果について検討した。また、群落AおよびBの定植後3年間の累積収量を比較することで、低投入持続的な栽培システムについて検討を行った。

2-1. 材料と方法

(1) 材料の栽培と間引き

本研究では、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培した、定植年度の異なるエリアンサス (*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)の品種 JES1 の群落を対象としている。簡単な除草と耕起を行った圃場に、群落Aは2014年6月13日に、また、群落Bは2015年5月26日に、条間1m×株間1mの栽植間隔で、いずれも110株の苗を定植した。基肥も追肥も施用せず、灌水も行わなかった。

第1章において、群落AおよびBを設定し、定植1年目および定植2年目の群落構造の調査を行った。その後、2016年4月16日にそれぞれの群落を間引いて、いずれも条間1m×株間2mとした。すなわち、群落Aは定植2年目から3年目にかけて、群落Bは定植1年目から2年目に

かけて、それぞれ間引いた。これらの群落を対象として、群落 A は定植 3 年目、群落 B は定植 2 年目および 3 年目において標準的な生育をしたそれぞれ 9 株を選定して、生育前期は毎週、生育後期は隔週で、草丈と茎数を記録した。

2015 年に、群落 A および B の群落構造の調査を行い(金井ら 2017a), その後、2016 年 4 月 16 日にそれぞれの群落を間引いて、いずれも条間 1m×株間 2m とした。群落 A は定植 3 年目、群落 B は定植 2 年目および 3 年目において標準的な生育をしたそれぞれ 9 株を選定して、生育前期は毎週、生育後期は隔週で、草丈と茎数を記録した。

(2) 生産構造図の解析

また、出穂期には生育調査を行った株を含め、数株を層別刈取りし、生産構造図(Monsi und saeki 1953)を描いた。すなわち、群落 A(定植 3 年目)は 2016 年 11 月 15 日に 8 株、群落 B(定植 2 年目)は 2016 年 11 月 2 日に 8 株、群落 B(定植 3 年目)は 2017 年 11 月 6 日に 6 株の地上部を、いずれも地表面から約 20cm の高さで刈取り、高さ 20cm ごとに切り分け、いずれの高さについても同化器官(葉身)と非同化器官(葉鞘、茎および穂)に分け、80°C で重量の減少がゼロとなるまで乾燥させて重さを測定した。また、照度計(HIOKI 社 LR5041 VOLTAGE LOGGER)を用いて群落内の光合成有効放射量を測定し、高さ別の相対照度を算出した。これらの測定結果を基に、群落内のどの高さにおいても光合成速度は照度に比例すると仮定して、高さごとの同化器官量と、その高さにおける相対照度から群落物質生産指数(金井ら 2017a, 野本・横井 1981), すなわち、群落物質生産指数 = $\Sigma(\text{同化器官量} \times \text{相対照度})$ を算出した。

2-2. 結果

(1) 栽植間隔・定植後年数の異なる群落の生育と収量

間引き後の群落の収量を調査した結果、群落 A(定植 3 年目)は 31.7t/ha, また、群落 B(定植 2 年目)は 19.8t/ha で、いずれも前年の収量(金井ら 2017a)より高かった(表 2-1)。なお、群落 B(定植 2 年目)の収量は群落 A(定

植 2 年目)の収量(金井ら 2017a)より若干低かったが、株当たりの収量は群落 A(定植 2 年目)の 2 倍近い値であった。また、群落 B(定植 3 年目)の収量は 37.5t/ha であり、前年より高かった。なお、それぞれの群落の定植後 3 年間の収量を合計すると、単年度の収量は低い年もあったが、群落 B の方が高かった(表 2-1)。

それぞれの群落の出穂期における茎数を見ると、群落 B(定植 2 年目)の茎数は、前年よりも多く、群落 A(定植 2 年目)(金井ら 2017a)と比較しても多かった(表 2-1)。群落 A(定植 3 年目)の茎数は、前年と同じ程度であった。また、群落 B(定植 3 年目)の茎数は前年と同程度であったが、群落 A(定植 3 年目)より多かった。このように、早い時期に間引きすると、間引きしなかった場合より茎数が多くなった。なお、それぞれの群落の草丈は再生開始時から高くなり、最終的な草丈はいずれも 300cm を超えた(表 2-1)。

(2) 栽植間隔・定植後年数の異なる群落の構造

群落 A(定植 3 年目)の生産構造図(第 2-1 図)を見ると、高さ別の同化器官の乾物重は山型の垂直分布を示し、その最大量は、草丈の中間より上の高さ 220~240cm にあった。また、相対照度は群落下層ほど低下し、高さ 180cm 付近で 10%以下になった。

群落 B(定植 2 年目)の生産構造図(第 2-2 図)を見ると、高さ別の同化器官の乾物重は山型の垂直分布を示し、その最大量は、草丈の中間より下の高さ 16~180cm にあった。また、相対照度は群落下層ほど低下し、高さ 80cm 付近で 10%以下になった。群落 B(定植 2 年目)では、群落 A(定植 2 年目)より群落の比較的下層まで光が到達していた。

群落 B(定植 3 年目)の生産構造図(第 2-3 図)を見ると、高さ別の同化器官の乾物重は山型の垂直分布を示し、その最大量は、高さ 240~260cm と 140~160cm の 2 か所にあった。また、相対照度は群落下層に向かうほど低下し、高さ 180cm 付近で 10%以下になった。

いずれの群落においても、非同化器官の乾物重は基本的には最下層で最も多く、高い層ほど少なかった。そこで、それぞれの群落における各

器官の空間的分布を定量的に把握するため、重心の高さを算出したところ、各器官および株全体の重心の高さは、定植後年数の経過とともに上層へと移動した(表 2-1).

出穂期における群落物質生産指数(金井ら 2017a, 野本・横井 1981)を算出したところ、前年よりも高くなった(表 2-1). また、それぞれの群落の群落物質生産指数の推移を見ると、群落 B の方が高い値で推移した.

2-3. 考察

(1) 間引きが栽培期間の収量および茎数に与える影響

多年生作物であるエリアンサスの群落における収量が最大となる栽植密度は、定植後の年数によって変わること、すなわち、最適な栽植間隔が徐々に大きくなる可能性を報告した(金井ら 2017a, 森田ら 2013a). したがって、複数年に亘る栽培期間中に間引くことで、収量を増やせる可能性がある(金井ら 2017a). ただし、以上の考察は、異なる栽植密度で栽培した場合の収量の経年推移と、同じ栽植密度で栽培した場合の群落構造の経年変化に基づくものである. すなわち、栽培期間中に間引くと収量がどのように推移するかは、まだ検討していなかった. そこで、同じ品種を異なる年度に同じように定植して、同じように栽培した2つの群落を同年に間引いて栽培した. すなわち、群落 A では群落内の光環境が悪化した定植2年目の刈取り後に、群落 B は光環境が悪化する前の定植1年目の刈取り後に、それぞれ間引きを行った群落を対象として、その年度だけでなく、栽培期間中の累積収量を最大化するという観点から検討を行った.

エリアンサスの収量を解析すると、収量が高い場合には非同化器官の割合が高かった. すなわち、栽植密度も無視できないが、群落を構成している個々の株の茎数が収量に大きな影響を与える. このことについては Hattori ら(2010)も指摘しているところである. したがって、収量を増やすためには、茎数の確保が重要である(その他に、個々の茎の太さもある). そこで、異なる時期の間引きの効果について、収量だけでなく、株あたり茎数に着目して検討した.

その結果、間引きを行うと、いずれの群落でも前年より収量が高かった(表 2-1)。なお、間引き年次が早いと、翌年の収量は間引きをしなかった場合より低いが、翌々年(定植 3 年目)の収量が著しく増加した。そこで、栽培期間中の累積収量を比較すると、群落 B の方が多かった。すなわち、多年生作物の収量は、単年度で検討するだけでは不十分であり、複数年に亘る累積収量という視点から検討する必要がある。

また、それぞれの群落の出穂期における茎数をみると、群落 A(定植 3 年目)は前年の茎数と同程度であったが、群落 B(定植 2 年目)は前年の茎数より多く、その後も多かった。定植 1 年目から 2 年目にかけて間引くと、その後の茎数が増えたが、茎の基部側に形成された分げつ芽の数も増加し、それが次年度の株の再生を担う中心となるため、次年度の茎数も多く、それぞれの茎の生育期間も長くなるため、収量も増加したと考えられる。さらに、群落 B(定植 3 年目)の茎数が群落 A(定植 3 年目)より多いため、次年度の再生を担う分げつ芽も十分に確保されているはずであり、栽培期間の累積収量を最適化できると考えられる。水嶋ら(2018)の研究でもエリアンサス群落を間引くと株当たりの茎数と、1 株あたりの収量も増加することが報告されており、数年間にわたる順応的な管理が必要であることを指摘している。

いずれにせよ、早期に株当たりの茎数を確保することで、単年度でみた場合の収量が必ずしも多くなくても、複数年に亘る栽培期間の収量の合計を最大化できることが明らかになった。

以上、栽培期間中に間引きを行うことで栽植間隔を変え、単年度の収量が必ずしも多くなくても、栽培期間中の累積収量を最適化するという、これまでの一年生作物にはない視点が提示できた。

(2) 間引きおよびその処理時期が群落構造に与える影響

そこで、収量についてさらに検討を進めるために、間引きによって、物質生産の基盤となる群落構造の変化について解析した。その結果、それぞれの群落は、間引きによって物質生産量が前年よりも多くなるとともに、群落が巨大化したことが明らかになった。また、収量が多くなる

にしたがって、前年よりも、高さ毎の各器官量が増加しただけでなく、同化器官量の最大を示す層と、各器官および株全体の重心の高さは前年よりも高くなった。このように、収量が高くなると、各器官の垂直分布量が増加するだけでなく、群落は上部に向かって発達していることが明らかになった。

そこで、群落構造の変化に伴って物質生産にどのように影響するかを検討するために、群落物質生産指数 $=\Sigma(\text{葉身乾物重}\times\text{相対照度})$ を算出した。その結果、間引き年次の如何に係らず、前年より高い値となった。そこで、第1章(金井ら 2017a)で対象とした群落も含め、群落物質生産指数がどのような推移をしたか検討した。その結果、それぞれの群落は定植年数を経るにしたがって、群落物質生産指数も高くなったが、群落Bのほうが高い値で推移した(表 2-1)。以上のことから、早い時期に間引きを行うことで光環境の悪化を避けることができれば、群落の物質生産に有利な状況を作り出せることが示唆された。

以上、エリアンサスの2つの群落AおよびBを異なる年次に間引きを行い、それが収量および群落構造の推移に与える影響について検討した。その結果、群落が大型化する過程で、群落内の光環境が悪化する前(本研究では定植1年目から2年目にかけて)に間引くことで、栽培期間中の累積収量を増やせる場合があることを実証できた。

ただし、その間引きの時期が定植1年目から2年目にかけてかどうかは必ずしも明らかではない。実際、水嶋ら(2018)の研究では、条間2m×株間1mの栽植間隔で定植を行い、そのままの栽植密度で栽培した群落と、間引きを行い、条間2m×株間2mとした群落とを用意して、本研究と同様に、生産構造図を描くことで群落構造を解析したが、本研究と比較しても、その収量は必ずしも高くなかった。

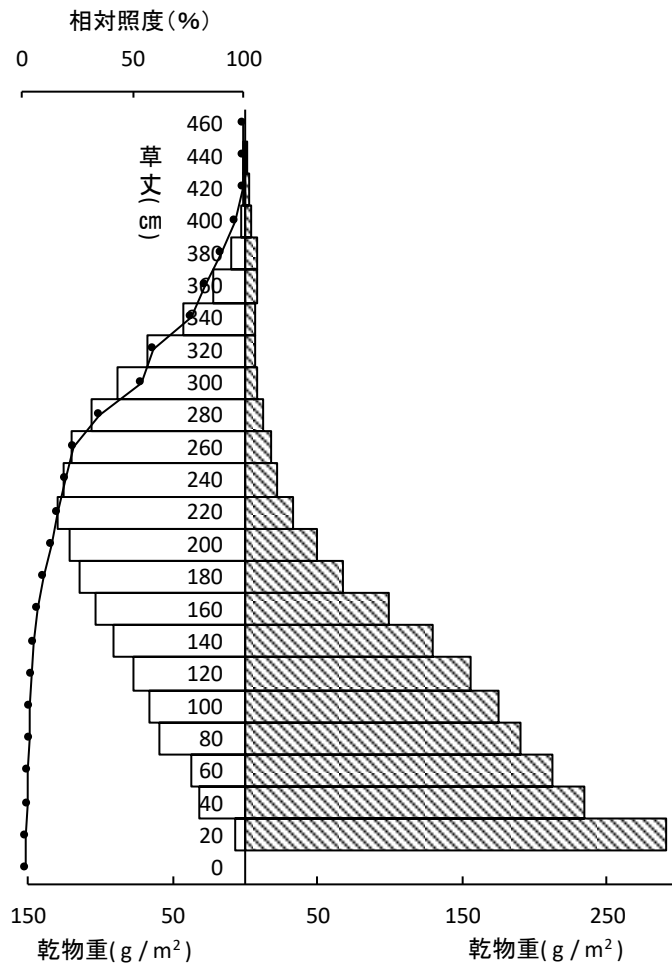
このように、定植時の栽植間隔や、間引きの時期、また遺伝的背景や自然条件で栽培管理が異なることは否定できないが、一年生作物の栽培では想定されていない栽植密度の調節が、エリアンサスの栽培システムを確立する場合に必要となることは確かである。

表 2-1 それぞれの群落の生育と収量および群落構造を示す形質の比較.

	定植 1 年目	定植 2 年目	定植 3 年目	
群落 A	収量[累積収量](t/ha)	5.6**)[5.6]	23.5*)[29.1]	31.7[60.8]
	茎数(本/株)	60.0**)	68.1*)	66.8
	草丈(cm)	251.3**)	359.9*)	358.6
	同化器官の重心の高さ(cm)	-	169.1*)	206.2
	非同化器官の重心の高さ(cm)	-	64.4*)	99.6
	株全体の重心の高さ(cm)	-	105.2*)	147.6
	群落物質生産指数(g)	-	180.9***)	310.5
	栽植間隔(m×m)	1×1**)	1×1*)	2×1
群落 B	収量[累積収量](t/ha)	6.3*)[6.3]	19.8[26.1]	37.5[63.6]
	茎数(本/株)	68.7*)	95.3	92.5
	草丈(cm)	222.4*)	326.8	390.1
	同化器官の重心の高さ(cm)	93.7*)	161.5	207.0
	非同化器官の重心の高さ(cm)	62.9*)	114.6	115.8
	株全体の重心の高さ(cm)	78.6*)	136.0	150.9
	群落物質生産指数(g)	86.1***)	237.1	428.0
	栽植間隔(m×m)	1×1*)	2×1	2×1

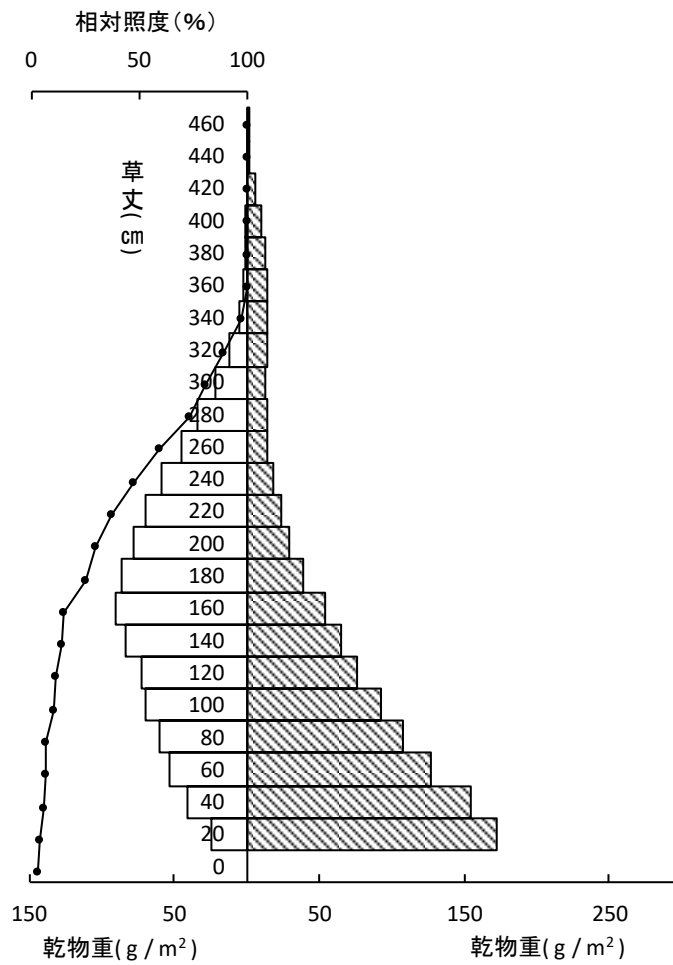
*は金井ら(2017a), **は金井・森田(2015)のデータをそれぞれ引用.

***金井ら(2017a)のデータをもとに算出.

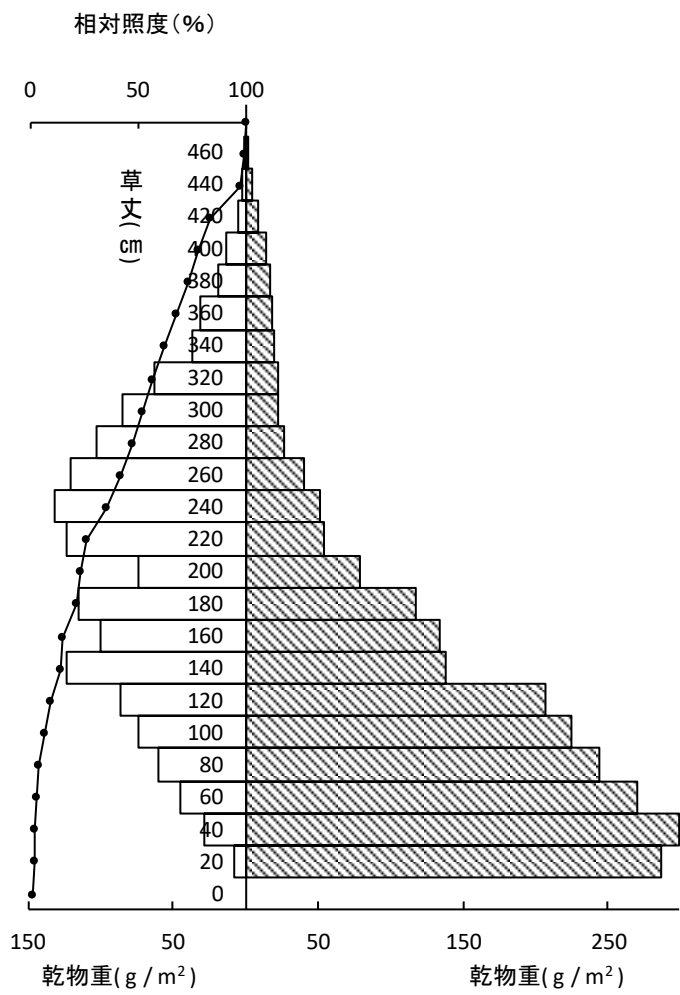


第 2-1 図 群落 A(定植 3 年目)の出穂期における生産構造図.

▨ : 非同化器官, □ : 同化器官, ● : 相対照度.



第 2-2 図 群落 B(定植 2 年目)の出穂期における生産構造図.
 ▨ : 非同化器官, □ : 同化器官, ● : 相対照度.



第 2-3 図 群落 B(定植 3 年目)の出穂期における生産構造図.
 ▨ : 非同化器官, □ : 同化器官, ● : 相対照度.

第1部 群落の発育形態学的解析

第3章 群落における株の生育変異の解析

第1章および第2章において、エリアンサスの高い物質生産性を理解するために、物質生産を支える群落構造について解析した(金井ら 2017a, 金井・森田 2018). その過程で、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生じるようになることに気が付いた. 群落内における株の生育変異は、以前から認められており、生育が均一であると収穫時の作業効率が向上し、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), エリアンサスの栽培・利用システムを構築するためにも重要な課題である.

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. そもそも群落を構成する株の生育が斉一である方がよいという根拠も、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のが累積収量に対してどのように働くかも、まだ明らかにされていない.

そこで、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.

3-1. 材料と方法

(1) 材料の栽培

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(以後、群落 C とする)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農業者が食用作物を栽

培していたところを目視で観察したところ、圃場の場所の違いに伴って作物の生育に大きな差異はみとめられなかった。よって、圃場内における土壌の物理化学性に特に大きな変異があるとは考えられない。また、あらかじめ熟練した技術職員の協力を得て、トラクタを用いて深さ 20cm まで耕起した。

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 2m×株間 1m で、茎数が 1~3 本程度の苗を 565 株、定植した。すなわち、群落を 9 行(A~I)×68 列として、圃場の形上、A 行と I 行の 49 列以降は欠株とした。

また、圃場は直前まで農業者が食用作物の栽培しており、エريانサスの栽培にあたっては、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 2m×1m の栽植間隔(中密度区)のままとし、他方は間引きを行い、2m×2m 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 列のうち、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。

(2) 生育調査と解析方法

このように栽培したエريانサス群落において、2015 年 12 月 23 日から同年同月 26 日、2017 年 11 月 3 から同年同月 25 日、2018 年 11 月 1 から同年同月 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、 $被圧 = \sum [茎数 / (距離)^2]$ 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。

3-2. 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 3-1 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.

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/株が大きいくほど頻度が低い傾向が認められた(第 3-2 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 3-2 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, 茎数が大きい株が少ない分布から変異が広がり, 茎数の多い株の頻度が高い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, 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 3-3 図). また, プロットの多くは, $y=x$ よりも上に位置しており, 栽植間隔の違いによる生育変異については特段の差異はみられなかった.

また, 栽植間隔の違いに関係なく, 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, 栽植間隔にかかわらず, 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.

(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一つの試みとして, 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3-4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3-4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、ばらつきが大きかったが、生育変異が大きくなった2017年と2018年には、茎数と被圧との関係に一定の傾向がみられた(第3-5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。なお、この傾向は、いずれの栽植間隔においても、2017年よりも2018年で強くなっていた。

そこで、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、2017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(第3-6図)。

1-3. 考察

(1) 株の生育変異とその経年変化

第1章と第2章において、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、株を構成する分け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た(金井ら 2017a, 金井・森田 2018). 収穫時の茎数と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物質生産では分けつ形成, 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/株が分かれば最善である. 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済みである. 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. 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、栽植間隔が狭い箇所

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、すなわち栽植密度が関係していると考えられる。

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, 小川 1980, 依田 1971)。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が指摘されている(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, 伊藤・山口 1972, Yamada ら 1961)、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と示唆される。この点については、株間の相互作用と合わせて考察する。

(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。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。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生育に大きな差異はなかったため、圃場内で土壌化学性、あるいは物理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の変異との関係としては優先順位が高い要因ではないと考えた。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、刈取って地上部バイオマス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、株のバイオマスの第一近似としての指標として解析を進めた。

まず株間の相互作用について検討を行った。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、被圧 $=\Sigma(\text{茎数}/\text{距離}^2)$ を算出して、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。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は必ずしも明瞭ではないことから、細かい考察はできないが、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。そこで、個体群における株の生育変異の研究を展開するため、被圧に関するデータから、個体群生態学的な観点から考察を試みる。

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、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、多くのプロットの分布が $y=x$ よりも上側に位置していたことから、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。

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/株が大きい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、全体的な傾向として右肩下がりの分布が強くなっている。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。

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。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

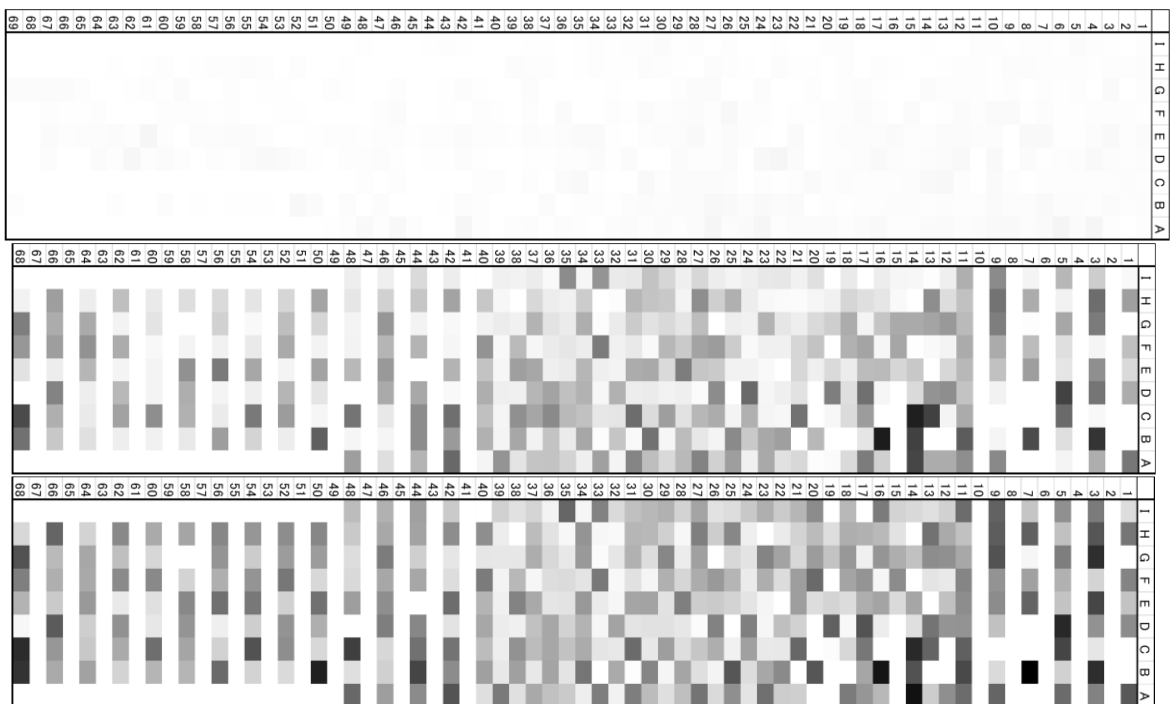
間引きが起こることが示唆される。

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ことが示唆される。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を踏まえると(金井ら 2017a, 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と考えられる。

すなわち、エリアンサスの栽培では、定植してから最終収量に到達するまでの数年の期間における累積収量を高くすることが累積収量の最大化につながり、早期に人為的な間引きを行うこと累積収量を増加させるのに効果的であり、株が受ける被圧を下げ、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向上できると考えられる。ただし、定植1年目および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(いつの年次)で間引くかは、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て、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く、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。また、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。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、および個々の株としての光合成・物質生産がどのように変化するかは検討していく必要がある。

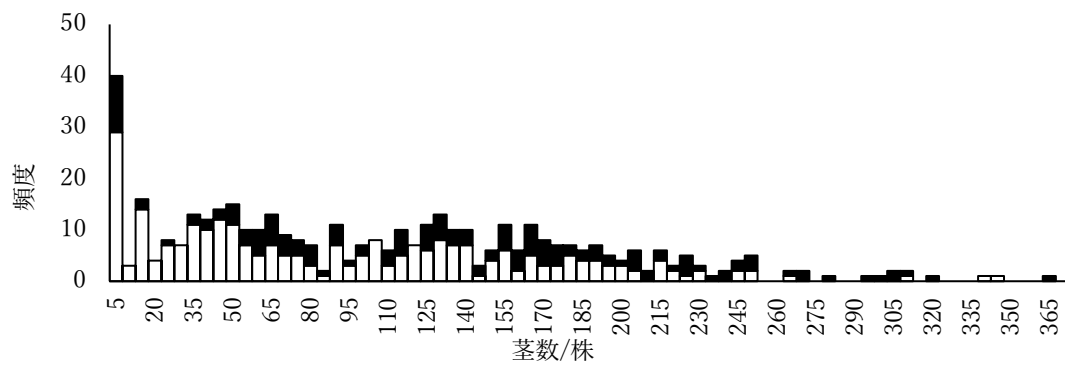
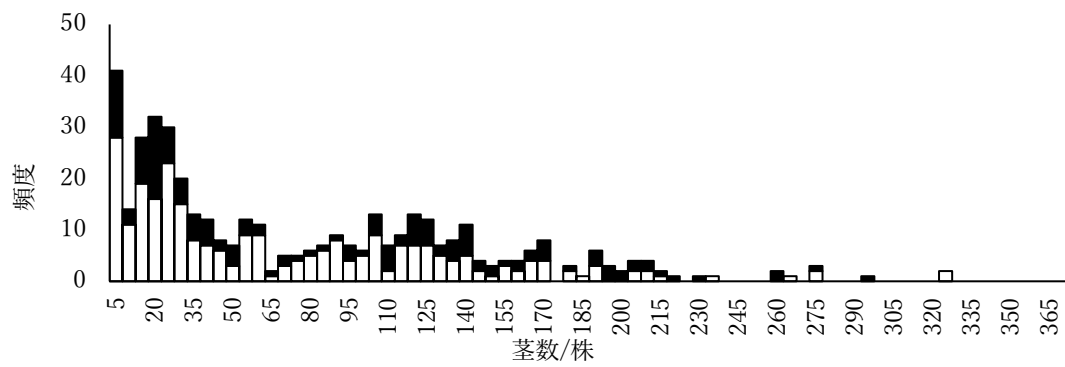
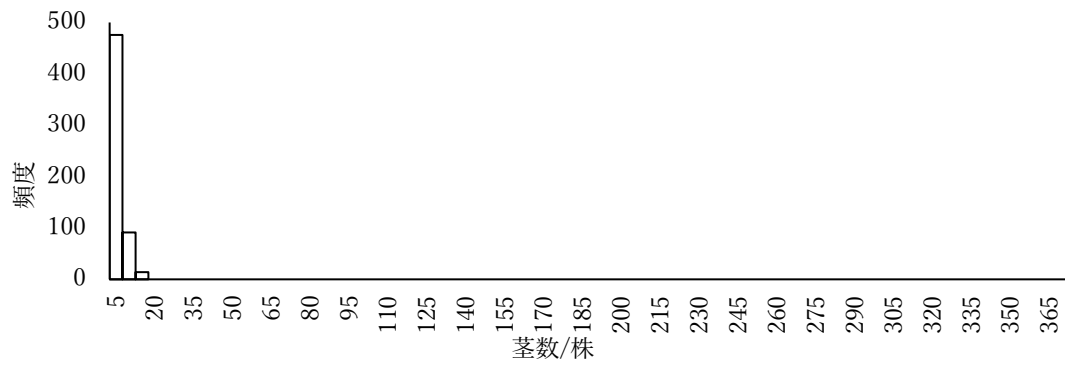


第 3-1 図 エリアンサス群落内における茎数/株の変異の様相。

上：2015 年，中：2017 年，下：2018 年。

図中の濃淡は茎数の多少を示す。

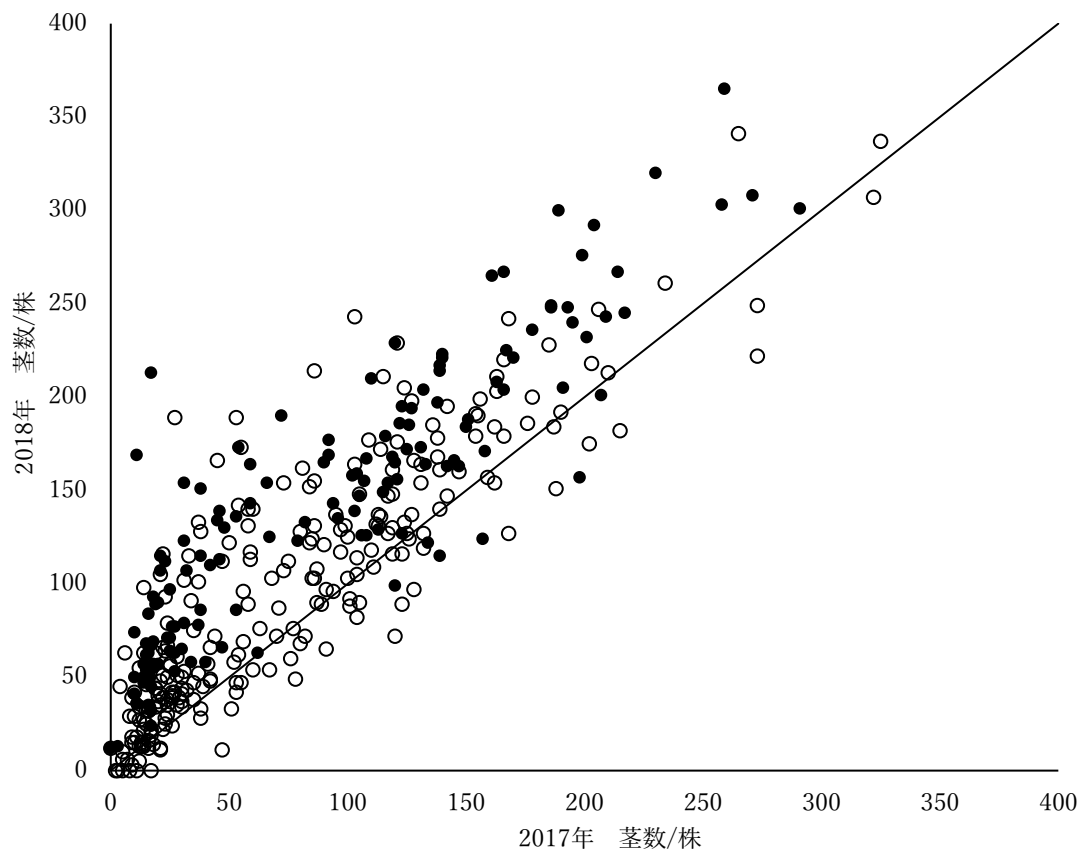
$0 \leq \square < 100$ ， $100 \leq \square < 200$ ， $200 \leq \blacksquare < 300$ ， $300 \leq \blacksquare < 400$ 。



第 3-2 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。

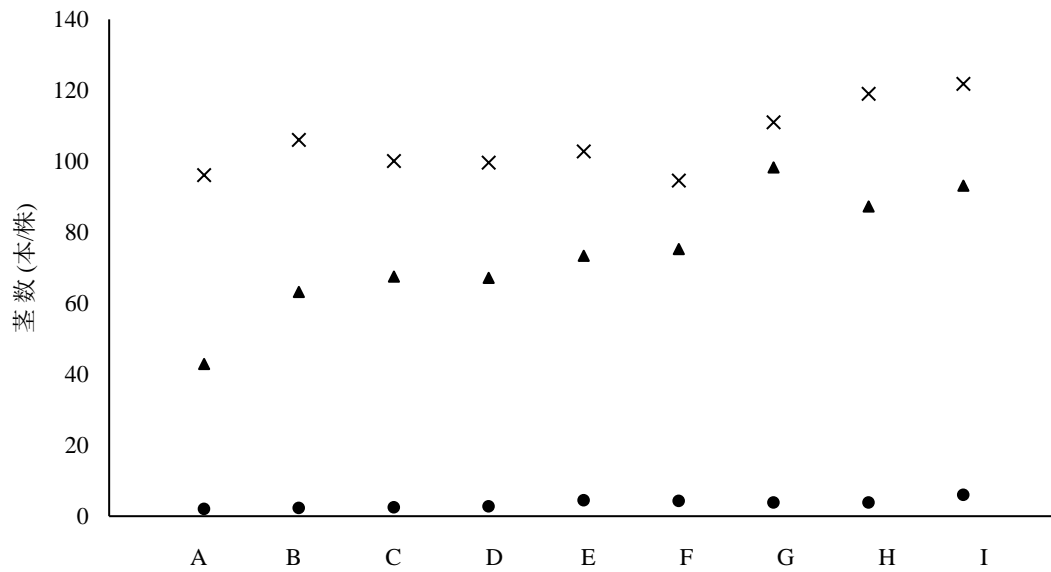
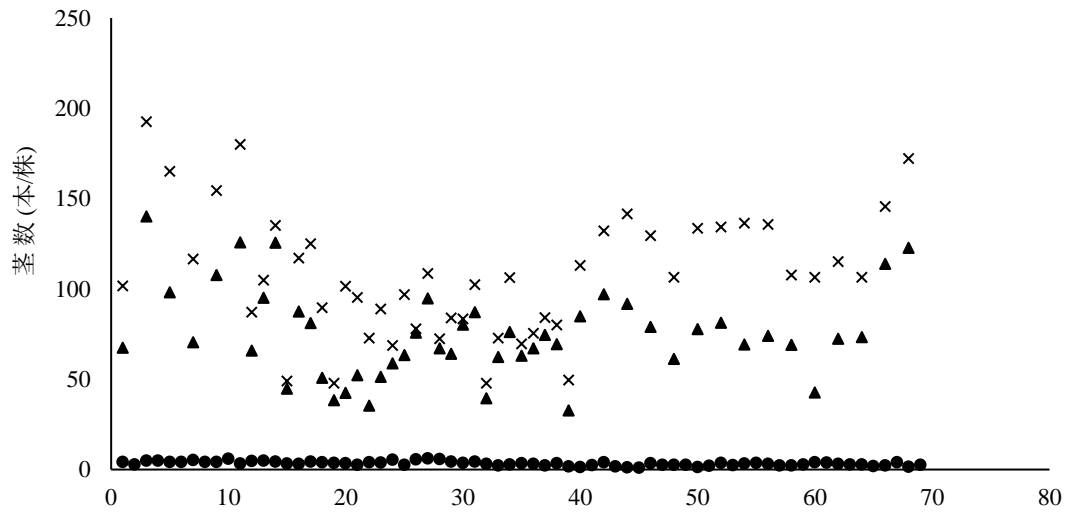
■：2m×2m(低密度区)，□：2m×1m(中密度区)。



第 3-3 図 2017 年の茎数/株と 2018 年の茎数/株との関係.

● : 2m × 2m (低密度区), ○ : 2m × 1m (中密度区).

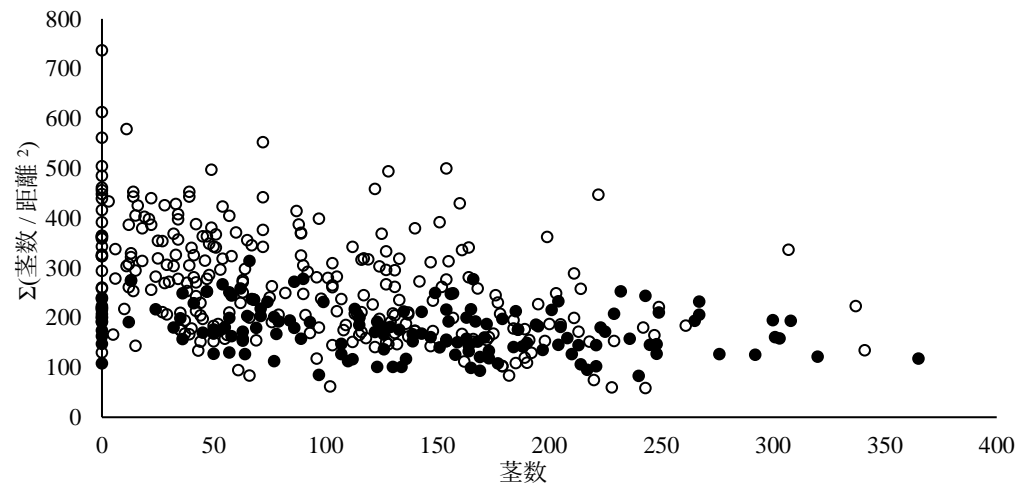
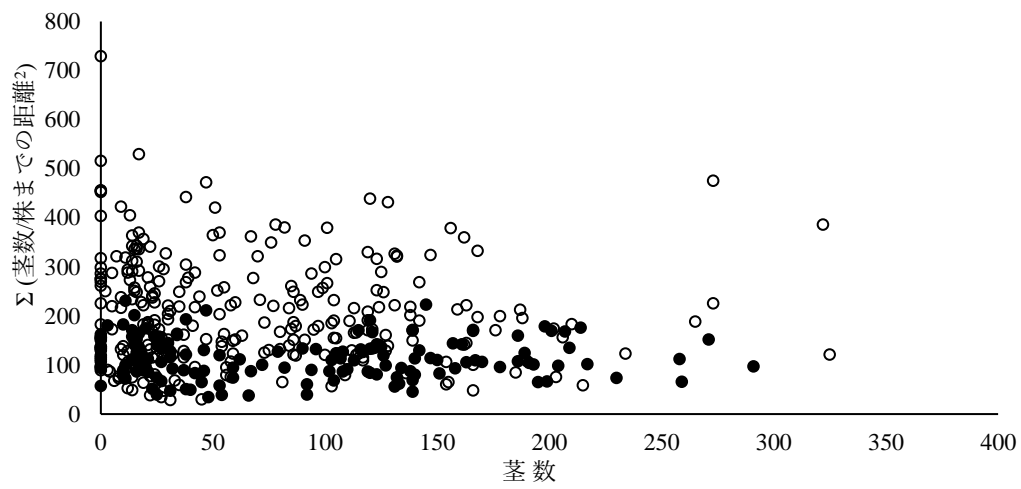
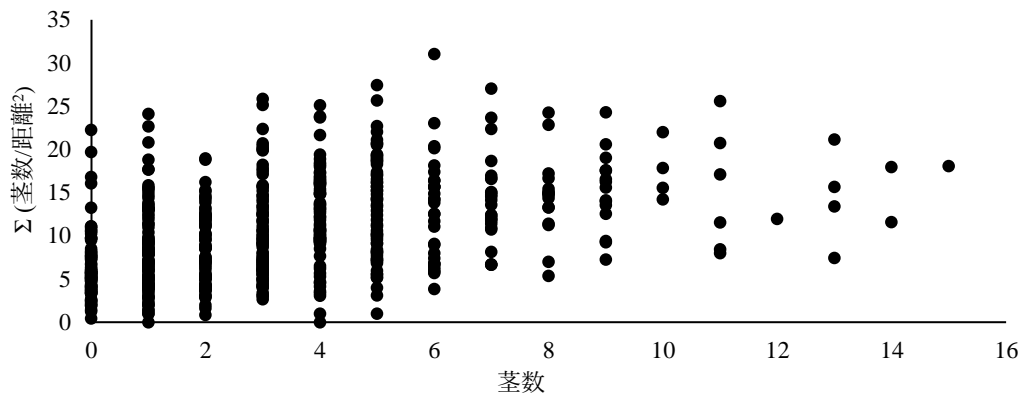
図中の実線は $y=x$ を示す.



第 3-4 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。

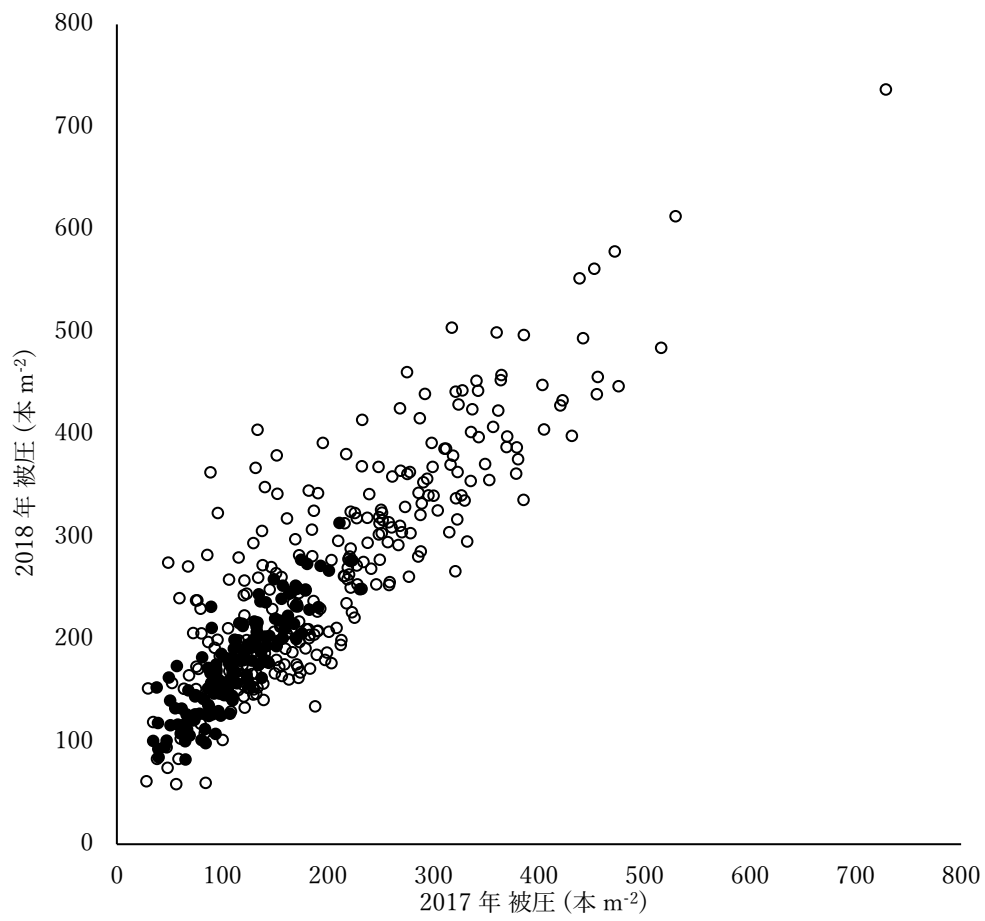
●：2015 年，▲：2017 年，×：2018 年。



第 3-5 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.



第 3-6 図 2017 年の被圧と 2018 年の被圧との関係.

● : 2m × 2m 区, ○ : 2m × 1m 区.

第2部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第1部では、エリアンサスが高い物質生産性を示す背景を理解するために、群落構造が、どのように関わっているか、また、どのように物質生産性を持続的に維持向上させていくかを検討するために、群落の発育学的研究を進めた。その結果、物質生産には群落構造と分けつの生育とが重要になることが明らかになった。

群落構造については、群落が大型化するのに伴って群落構造が変化し、同化器官の分布、すなわち、葉身の空間的配置が群落の上側に推移していることが明らかになった。このように、物質生産にとって、特に葉身の空間的配置が重要になる。ただし、群落を空間に維持・形成するためには、まず、エリアンサス自身に機械的強度が保たれていることが前提になるが、葉身や葉鞘、茎を空間に配置するための機械的強度やそのメカニズムについては、まだ解析されていない。

また、分けつの生育については、特に生育初期に形成された分けつが、生育期間を十分に確保されているため、収量に大きく貢献していることが明らかになった。このように、収量形成のためには、分けつの形成や、その生育について検討する必要があるが、個々の分けつの生育については、まだ解析されていない。

さらに高い物質生産性の背景には、群落構造や分けつの生育の他にも、根系が関係していると考えられる。エリアンサスの根系については、いくつかの検討がされてるが(Sekiya ら 2013, Sekiya ら 2014, Sekiya ら 2016, Shiotsu ら 2015;2016), 根系形成がどのように進むのか、また群落構造と根系構造と結びつけた検討はされていない。

そこで、栽培システムを構築するために、第1部で進めた地上部の発育形態学的研究の成果と組み合わせて、第2部では群落を構成している株について作物学・栽培学的研究を行った。具体的には、分けつを構成している葉身、葉鞘、茎の機械的強度を形態学的に把握した上で、その発育について根系も含めて、形態学的な観点から解析を行った。

第2部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第4章 群落を形成する葉身における機械的強度の解析

植物群落の物質生産に葉身の空間的配置が重要であることは、古くから指摘されてきた。群落が繁茂して、土地面積より葉面積が大きくなった場合、葉身を水平に配置すると相互遮蔽ができるため、群落全体の物質生産にとって不利となる(Boysen-Jensen 1932)ため、葉身が直立していることが望ましい。

群落の物質生産に大きな影響を与える受光態勢を解析する場合、吸光係数(Monsi und saeki 1953)を指標として用いることが多い。実際、吸光係数は葉身の傾斜角度に大きく影響されることが報告されており(伊藤 1969, 宇田川ら 1974), 吸光係数が小さく、受光態勢が優れていると考えられる群落では乾物生産が高いことが報告されている(徐ら 1997, 斎藤ら 1990)。

以上のように、葉身の空間配置が群落の物質生産にとって重要であることはすでに解明されているが、葉群を形成して維持するために、葉身は自身を支える機構を有しているはずである。そのための植物体の機械的強度については、工学的な観点から研究が行われており(Niklas 1992), 作物の場合は、倒伏との関係から茎の機械的強度について解析した研究(星川・北條 1976, 北條・小田 1965a, 北條・小田 1965b, 大川・石原 1992, Zuber 1999, 古畑・有馬 2007)が多い。しかし、葉身が直立するための機械的強度については、ほとんど検討されていない(角田 1960)。

そこで、まず葉身に着目して、形態学的観点から、その機械的強度について解析を試みた。

4-1. 材料と方法

(1) 材料の栽培

本研究で材料として利用したのは、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培したエリアンサス(*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)の品種 JES1 の群落(群落 A)である。

数年間、耕作されていなかった農地において簡単な耕起と除草を行った後、2014年6月13日に条間1m×株間1mの栽植間隔で10条×11株、合計110株の苗を定植した。定植2年目、2016年4月16日に間引いて条間2m×株間1m、また定植3年目の2017年4月13日に間引いて条間2m×株間2mとした。苗の定植から現在まで、施肥と灌水は行わず、定植1年目のみ、適宜、手取り除草のみ行った。

(2) 葉の採取と分類

群落の生育が進んで大型化した2017年10月13日~同年12月20日に、出現時期および大きさの異なる葉身を合計63枚採取し、まず、目視によって、葉身先端から基部(葉鞘との境界)までが折れたり曲がったりせずに直立している直立型、葉身が直立しているが、先端部分が折れて垂れ下がっている挫折型、葉身全体が撓んでいる湾曲型の3タイプに分類した。そのうえで、挫折型で葉身が折れ曲がっている点を挫折点、湾曲型で草高が最も高い点を湾曲点、また葉身先端から挫折点あるいは湾曲点までの距離を懸垂長とし、挫折型および湾曲型の葉身における懸垂長を測定した(第4-1図)。

(3) 葉身の機械的強度

葉軸に沿ってそれぞれの部位が支えている重さを把握するため、葉身の先端から基部(葉身と葉鞘との境界)までを10cmごとに切断し、電子天秤(メトラー・トレド社 SARTORIUS)で生体重を測定した。この生体重を、先端から基部に向かって累積することで、葉身のそれぞれの部位が支えている重さを算出し、これを葉身重とした。また、それぞれの葉身断片から中肋のみを切り出して、生体重を測定した。

葉身全体と中肋のみの機械的強度を定量化するために、葉身の先端から基部に向かって5cmごとに、フォースゲージスタンド(日本電産シン

が株式会社製 FGS-50V-H)とフォースゲージ(日本電産シンボ株式会社製 FGX-5R)を使用して、葉身全体および中肋のみの挫折時モーメントを測定した。このとき、フォースゲージの挫折支点間距離は 4cm とし、実際の葉の折れ曲がる方向を考慮して、葉身および中肋の背軸側から支点間の中心に加圧した。このようにして測定した葉身の各部位における挫折時モーメントの値と、葉身先端からの距離を利用して、それぞれの各部位が支えることができる重さ(支持重)を、

支持重(g)=挫折時モーメント(g・cm)/(葉身先端からの距離(cm)×2)

として算出した。葉身が自重を支えきれずに挫折する場合は、葉身先端から挫折点までの距離が支点間距離の半分となると考え、葉身先端から挫折点までの距離の 2 倍を挫折時の支点間距離として、挫折時モーメントを支点間距離で割った。このようにして求めた値を、葉身が自重を支えることができる限界と考えて、支持重と呼ぶことにした。

また、葉身の異なる部位の横断徒手切片を作成し、実体顕微鏡(OLYMPUS 株式会社製 SZ61 型)を利用して、中肋の大きさと形に重点をおいて観察した。

4-2. 結果

(1) 葉軸に沿った生体重と支持重

葉身のそれぞれの部位が支えている自重、すなわち、葉身重は葉身の先端から基部側に向かうにしたがって、大きいことが確認できた(第 4-2 図)。

葉身のそれぞれの部位の挫折時モーメントも、基部側に向かうにしたがって大きいことが分かった(第 4-3 図)。ただし、多くの葉身において先端の 30~40cm は非常に柔らかく、挫折時モーメントが測定できなかった。このような場合は、便宜上、挫折時モーメントをゼロとした。

挫折時モーメントの測定値と葉身先端からの距離を利用して、材料と方法で記載した式で葉身の各部位における支持重を算出した結果、基部ほど大きかった。ただし、最も基部の 20~30cm では支持重は基部側が若

干，低くなる部分が認められた(第 4-4 図). いずれにしても，支持重は葉身の基部(葉身と葉鞘との境界部位付近)で最大であった.

葉身の各部位における葉身重と支持重との関係の全体傾向を把握するために，まず葉身先端からの距離と葉身重および支持重のそれぞれについて，曲線回帰を試みた. その結果，いずれの場合も有意な関係が認められ，葉身先端からの距離と葉身重は下に凸，支持重は上に凸の曲線で，それぞれ近似できた(第 4-4 図). そこで，それぞれの回帰曲線の大小関係をみると，葉身先端から約 20cm では葉身重 > 支持重，約 20~260cm では葉身重 < 支持重で，さらに葉身(に相当する長さ)が長い場合では葉身重 > 支持重であった(第 4-4 図). なお，本研究で取り扱った材料で最長の葉身は約 290cm であった.

(2) 葉軸に沿った中肋の形態と機械的強度

中肋の両側に切れ目を入れ，中肋とそれ以外の葉身部分とを切り分けたところ，中肋は折れずに直立したままであったが，中肋の両側部分は直立できずに，切れ目を入れた部位まで垂れ下がった.

葉身から中肋のみを切り出して生体重を測定したところ，葉身先端から基部側に向かうほど中肋の生体重は大きく(第 4-5 図)，葉軸に沿った推移の様相は第 4-2 図に示した葉身全体の生体重の場合に似ていた. 多くの葉身は，先端 30~40cm 部分で中肋が発達していないので，中肋の生体重はゼロとした.

つぎに，切り出した中肋のみの挫折時モーメントを測定した結果，葉身先端から基部側に向かうほど大きかった(第 4-6 図). ただし，葉身先端 30~40cm 部分では，中肋が発達しておらず，挫折時モーメントを測定できなかったのものでゼロとした.

葉身の先端から基部側に向かって横断徒手切片を作成し，実体顕微鏡で形状を観察した結果，葉軸に沿って中肋の大きさと形が異なることが明らかとなった(第 4-7 図). すなわち，葉身先端 10cm ほどの部分では，中肋が発達していなかったが，先端から約 50cm 基部側では中肋が明確で，断面が半円形を呈していた. さらに先端から 100~200cm 基部側では，

葉身部分(中肋以外の葉身部分)の反り返りが頂端側とは逆になり，また小型化していた．一方，中肋は非常に大きく，断面形態が半円形から U 字型に変化していた．

(3) 葉身タイプ別の発育形態学的特徴

群落を構成する葉身は，全体の形状によって，直立型，挫折型，湾曲型の 3 タイプに分類できた．その場合，葉身長が短いと直立型だけであるが，長くなるにつれて挫折型が，さらに湾曲型が現れ，それに伴って懸垂長が長かった(第 4-8 図)．また，懸垂長は，いずれも 20cm 以上で，0~20cm は認められなかった．葉身先端から挫折点までの生体重は 0.2~6.1g の変異があり，モードは 0.4~0.6g であった．

さらに，群落を構成している株の個々の分けつをみると，直立型，挫折型および湾曲型の葉身が着生しており，葉位の低い葉には湾曲型が多く，葉位が高くなるにつれて挫折型，さらに直立型が多くなった．また，これらの 3 タイプの群落内における垂直分布をみると，群落上層には直立型や挫折型が，また中層~下層には湾曲型が，それぞれ多く分布していた．

4-3. 考察

(1) 葉身の自重と機械的強度との関係

本研究では，エリアンサスが大型の群落・葉群を形成し，維持するメカニズムについて解析するため，まず葉身を取り上げて，その機械的強度について検討した．

葉身が支えている自重(本研究で葉身重)は，葉身先端から基部側に向かうほど大きいことが確認できた．そのとき，葉身先端からの距離に対する累積生体重の関係は必ずしも線形関係ではなく，指数関数的な曲線関係であった．これは，葉身の幅や厚さが基部側ほど大きな値を取るためであると考えられるが，以下で考察するように，中肋の大きさや形が変化していることも関係すると考えている．

この葉身重と、葉身の各部位が支持できる最大の重さである支持重との大小関係を検討した。支持重は葉身重に比較して変異が大きいため、全体の傾向を把握するために曲線回帰したところ、上に凸の曲線であった。

この支持重の回帰曲線と葉身重の回帰曲線との交点の葉身先端からの距離を算出したところ、約 20cm と約 270cm であった。すなわち、この間は葉身重 < 支持重で、葉身の自重を支える強度があることになり、実際に葉身が立っているという事実と整合している。また、少なくとも本研究の検討範囲では最長の葉身は約 290cm であり、葉身重 > 支持重となる長い葉身は存在しなかったこととも矛盾がない。なお、葉身先端の数十 cm については、挫折時モーメントが測定できずゼロとしているため、立ち入った考察はここでは差し控え、考察(2)で中肋の形態との関係でふれる。

個々の葉身における支持重は、最も基部側で最大値を示した。実際の群落において葉身は基部が葉鞘に固定されているが、先端側は固定されていない。したがって、片持ち梁と同じ状態であり、このような場合は、最も基部側で危険断面が発生する(Thompson 1973)。エリアンサスの葉身の支持重の最大値が最も基部側にあったことは、エリアンサスの葉身でも、この部位が危険断面に相当することを示唆している。

以上の事実と考察から、著者の方法論が正しいとするのは早計であるが、事実と考察は、現実と矛盾していなかった。

(2) 葉身の機械的強度と中肋との関係

中肋の両側に切れ目を入れて、中肋と中肋以外の部分とに分けると、中肋は単独で直立したが、両側部分は直立できずに垂れ下がった。この事実は、葉身の機械的強度を支えているのが、主として中肋であることを強く示唆している。中肋のみの挫折時モーメントを測定した結果、葉身全体の場合と同様に、葉身先端から基部側に向かうにつれて大きく、しかも葉身全体の挫折時モーメントの値に近く、中肋が葉身全体の機械的強度を大きく担っていると考えることと矛盾しない。

そこで、中肋の機械的強度を支えている背景を検討するために、中肋の部位別の生体重を測定したところ、葉身の基部側ほど大きく、中肋の挫折時モーメントと似た傾向が認められた。この事実から、中肋の機械的強度には中肋の大きさが関係していることが分かる。

つぎに、葉軸に沿った異なる部位で中肋の横断切片を作成して顕微鏡で観察したところ、中肋の大きさだけでなく、形が異なることが明らかとなった。すなわち、中肋は葉身先端から基部側に向かうにしたがって大型化するだけでなく、断面が円形、半円形から U 字型へと変化していた。中の詰まった円柱形と比較して、同じ断面積であるなら中空の管状構造の方が、機械的強度が強いことが明らかになっている(角田 1960, Niklas 1992)。エリアンサスの中肋が、葉身の基部側に向かって大型化するとともに形態が変化していることは、この延長として理解できそうである。少なくとも、矛盾した点は認められない。なお、既往研究では、表皮や維管束が葉身の機械的強度を補っているとする報告もあり(Niklas 1992)、葉身の機械的強度を高めている背景に中肋以外の器官も複合的に寄与している可能性が高い。

植物体の機械的強度については、工学的な観点から検討が行われている(Niklas 1992)。イネ科作物の水稲(大川・石原 1992, 大川・石原 1993, 古畑・有馬 2007)、コムギ(Zuber 1999)、オオムギ(北條・小田 1965a, 北條・小田 1965b)で耐倒性を茎の機械的強度から検討した研究は、その代表例である。一方、群落の葉群を構成する葉身については、水稲群落において直立型の葉身が物質生産に有利であることや、直立型葉身の配置に中肋や茎が重要であることが指摘されているが(角田 1973)、定量的なデータはなく、理論的な解析が進んでいるとはいえない。さらに、葉身長が水稲の 10 倍(草丈では数倍)にもなるエリアンサスの大型群落を解析する場合に、水稲と同じ論理が成り立つかどうかは確認されていない。しかし、エリアンサス群落を形成維持するために葉身が機械的強度を保つことが重要であることは確かであり、そのために中肋が大きな役割を果たしていることが明らかになった。

以上、本研究では、葉身の機械的強度を定量的に測定評価する方法論

を含めて検討した。まだ十分とはいえないが、葉身のそれぞれの部位には長大な葉身の自重を支えるのに十分な機械的強度があり、それが中肋の大きさと形によると考えられた。今後、群落の形成と維持について検討していくためには、葉身の機械的強度だけでなく、葉身との境界部分を含めた葉鞘，茎，地上部を支える根系の機械的強度も含めて総合的に検討する必要があると考えている。

(3) 葉身の機械的強度と群落構造について

本章での主な目的は、葉身の機械的強度を測定・評価することであるが、最終的には個々の株の生育と群落構造とを結びつけてエリアンサスの高い物質生産性を理解し、栽培・利用システムを構築したいと考えている。そこで、本研究の成果と、群落構造との関係についても、考察しておきたい。

まず、葉身の3タイプの形態学的背景について、挫折型を基準にして考察する。3タイプの懸垂長を測定した結果、いずれも20cm以上で、0~20cmというケースは認められなかった。懸垂部分の重さを計測すると平均0.4~0.6gと軽いため、中肋が発達していなくても、挫折時モーメントが測定できないほど機械的強度が弱くても、折れずに支えられている可能性がある。それが、基部側に向かって支えなければならない重さが大きくなり、その値が葉身の機械的強度よりも大きくなる部位が挫折点になると考えられる。この部位は、中肋が発達して支える葉身重より機械的強度が大きい部分との境界にも当たるはずである。すなわち、葉身全体が短いか、生育途中で抽出部分が短い場合は、葉身先端が折れずに直立することができる。また、葉身長が長いと、支える重さと支持重の値が近くなり、葉身は折れないが、葉身全体が湾曲するのであろう。

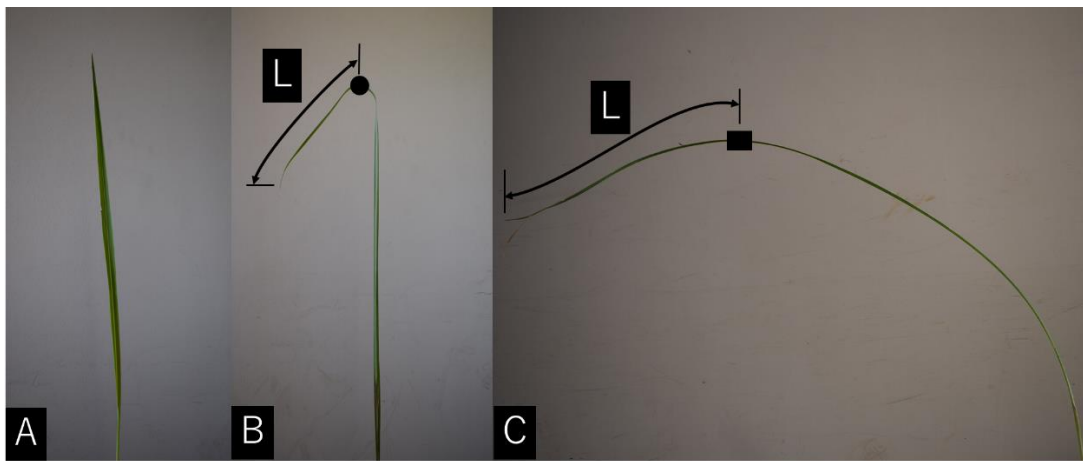
さらに、葉身長と懸垂長の間関係を見ると、葉身長が短いものでは直立型が多く、葉身長が長くなるにつれて挫折型、湾曲型が現れる傾向が認められるため、エリアンサスの個々の葉は生育に伴って直立型から挫折型、湾曲型に推移している可能性がある(森田・金井 2019g, 森田・金井 2019h)。すなわち、最も基部の部分は除き、葉位の低い葉は、生育期間

が長く、葉身が長いため湾曲型が多く、葉位の高いものは、生育期間が短いため、葉身が短く、直立型が多いと考えられる。この考察は、エリアンサスの株を構成する個々の分けつに着生する葉の観察結果と整合する。

このように考えると、エリアンサスの草型、および群落構造については、群落下層では湾曲型が多く、中層から上層にかけて挫折型、さらに直立型が多いことを説明できると考えられる。

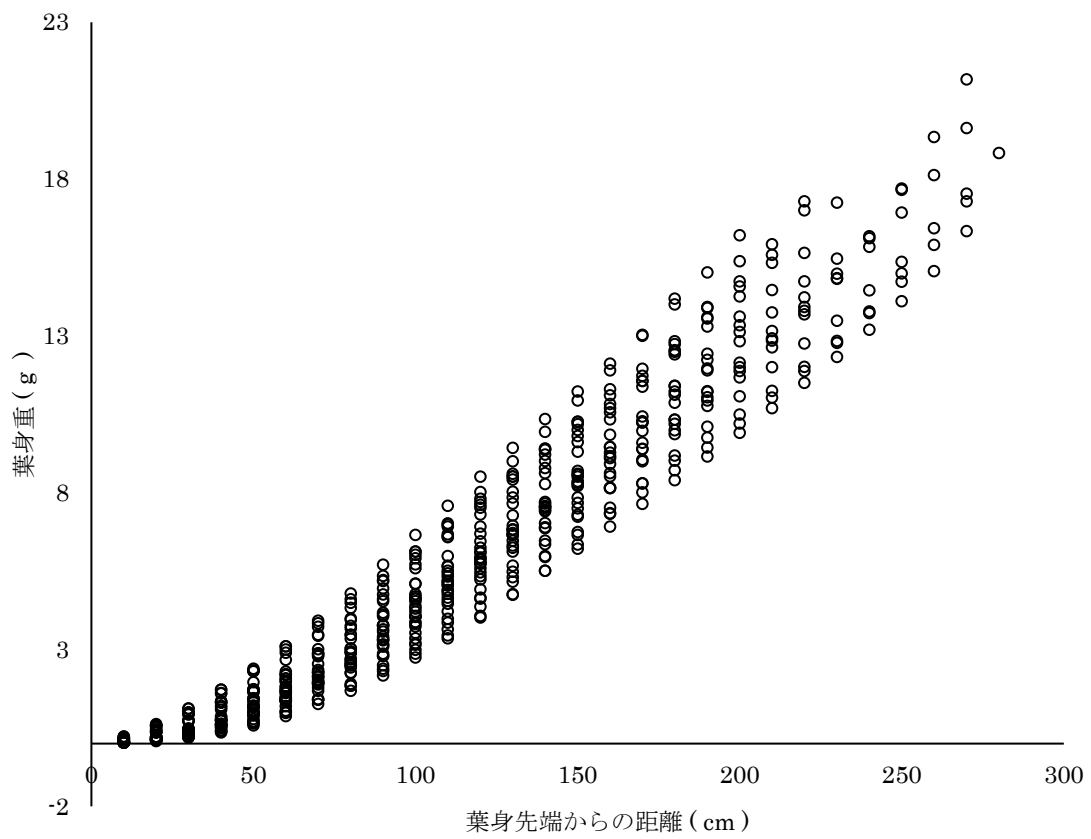
エリアンサスは葉鞘が短く、葉位間での変異も小さいが、多くの節間が下位から伸長するので、葉鞘の着生位置が、垂直方向に離れることが報告されており(板倉ら 2018)、群落下層では長大な湾曲型の葉身が多く、中層から上層にかけて挫折型、さらに直立型が多く分布するので、葉面積の増大に伴う葉の相互遮蔽を避ける形になっており、そのため群落の受光態勢が比較的良好になり、高い物質生産性を支えているものと考えられる。

以上のように、本研究でエリアンサスの大型群落を形成している長大な葉身が支えられているメカニズムについて、解析方法を開発しながら考察した結果、機械的強度に中肋が大きく貢献していることが強く示唆された。また、その中肋の発達に対応して葉身には3タイプあり、それが株の草型や群落構造に関係していること、ひいては群落の物質生産を支えている可能性が高い。

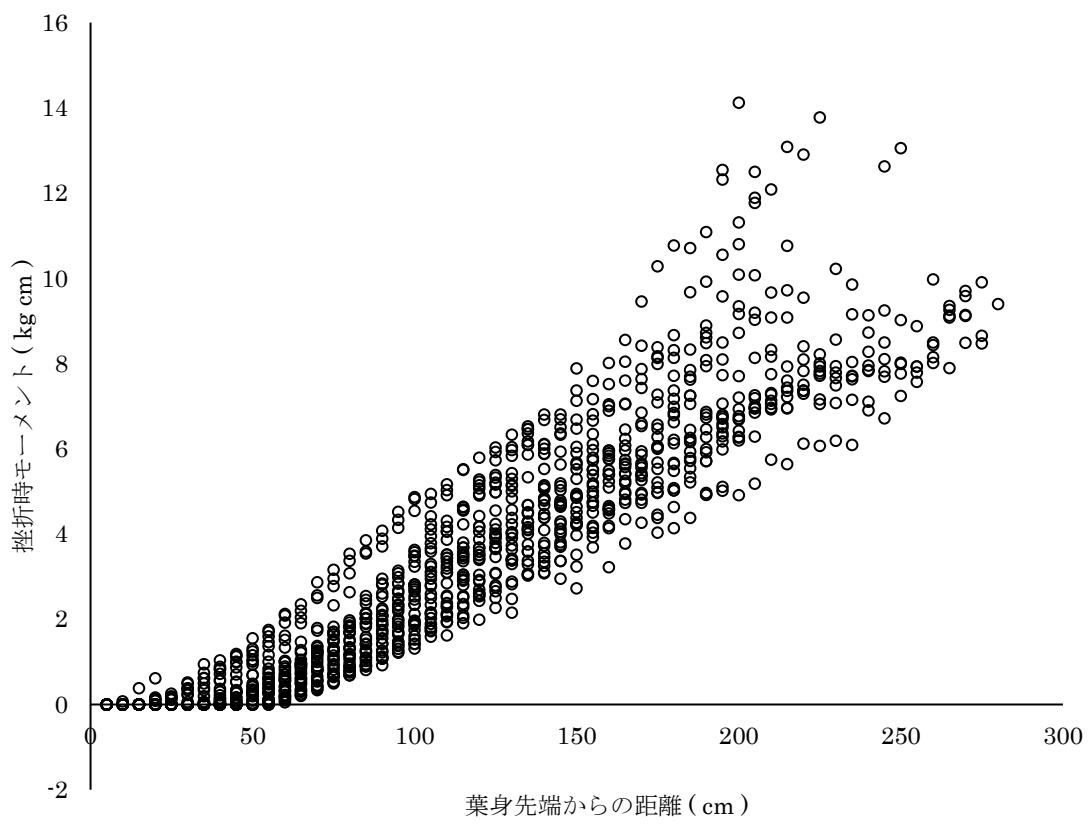


第 4-1 図 葉身の 3 タイプの形状.

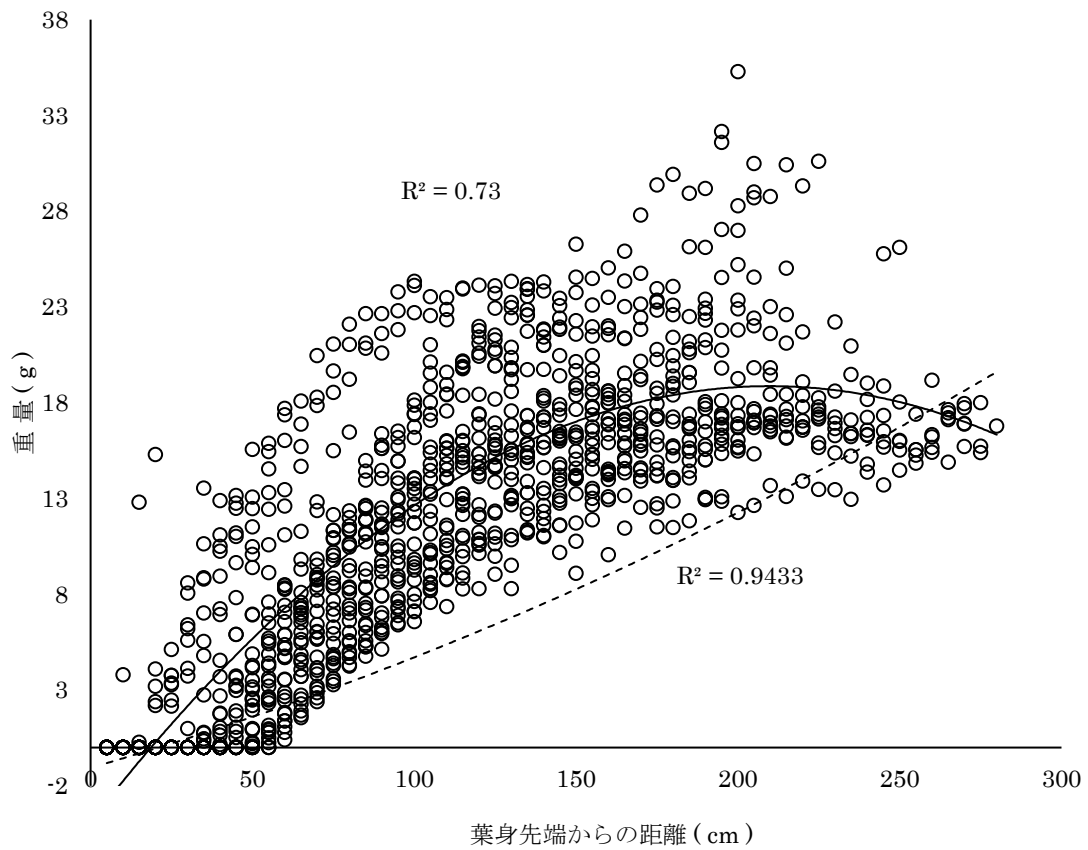
A : 直立型, B : 挫折型, C : 湾曲型,
L : 懸垂長, ● : 挫折点, ■ : 湾曲点.



第 4-2 図 葉身の各位別における葉身重。

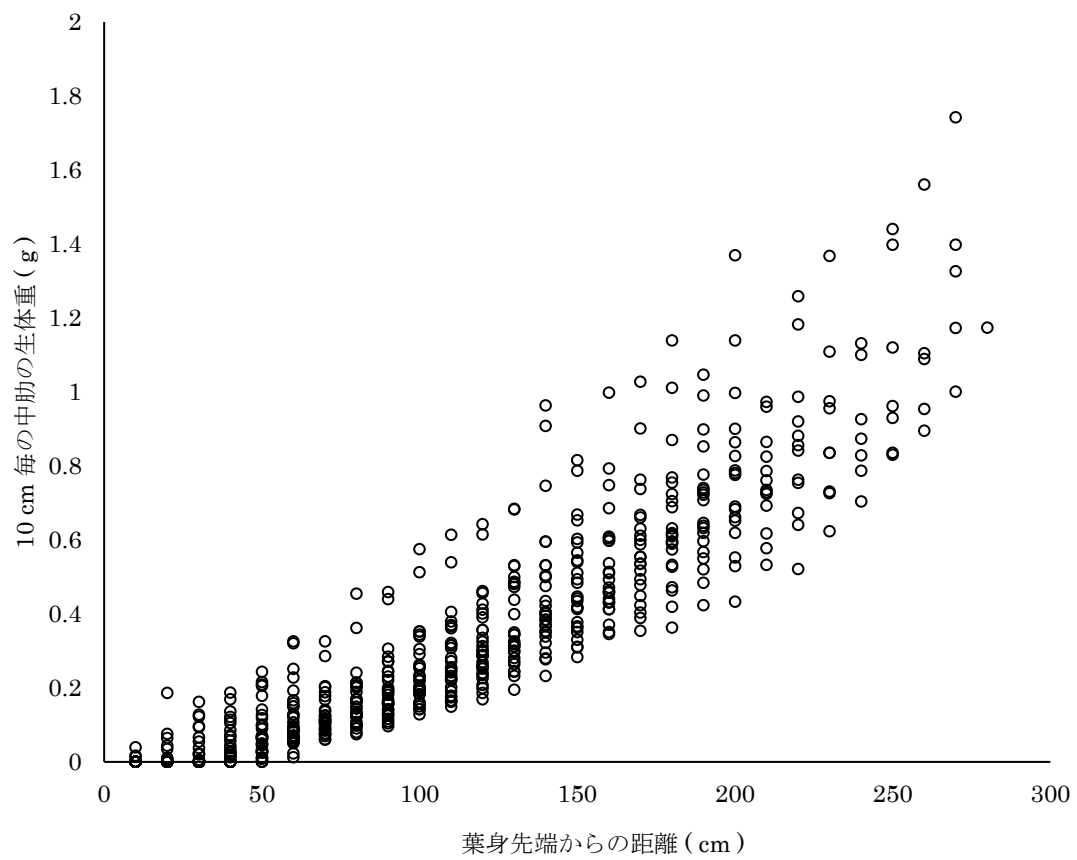


第 4-3 図 葉身の各部位における挫折時モーメント。

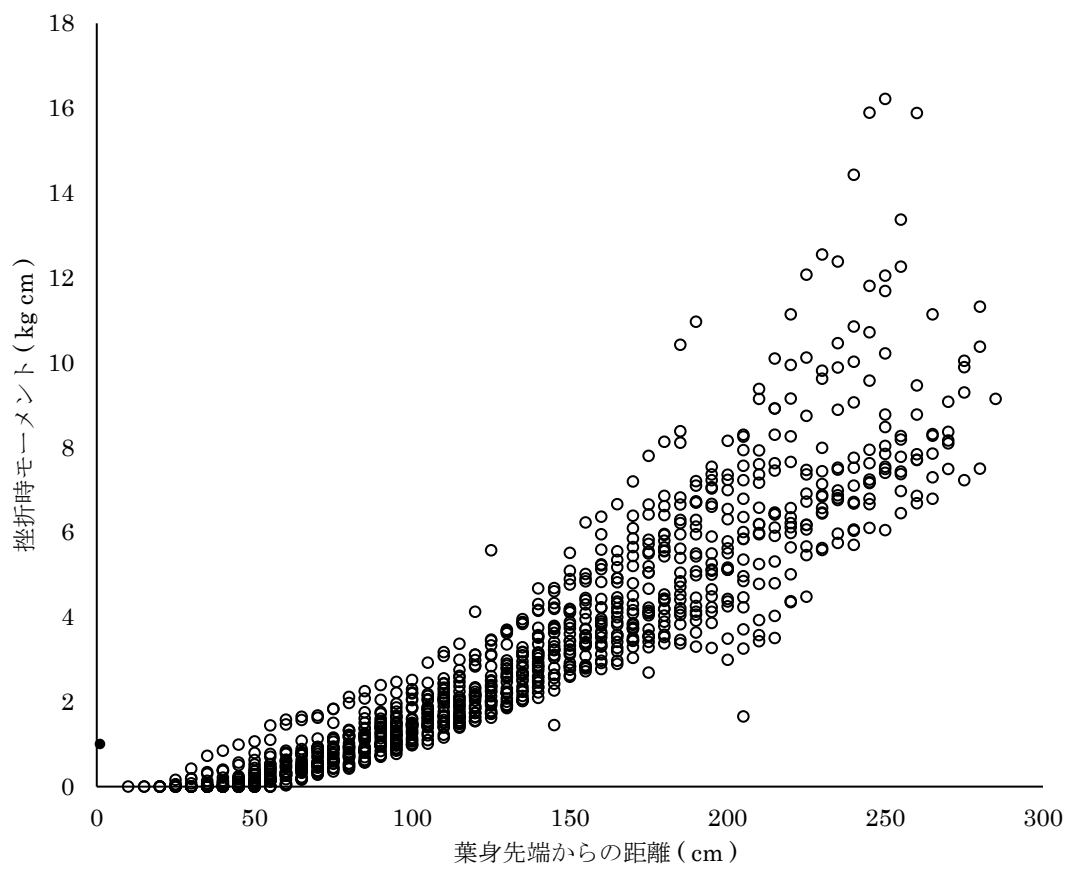


第 4-4 図 葉身の各位別における葉身重と支持重との関係.

○ : 支持重. 図中の実線は葉身先端からの距離と支持重との間に, 破線は葉身先端からの距離と葉身重との間に, それぞれ得られた回帰曲線.



第 4-5 図 葉身の各位別における中肋の生体重.



第 4-6 図 葉身の各部位における中肋の挫折時モーメント。

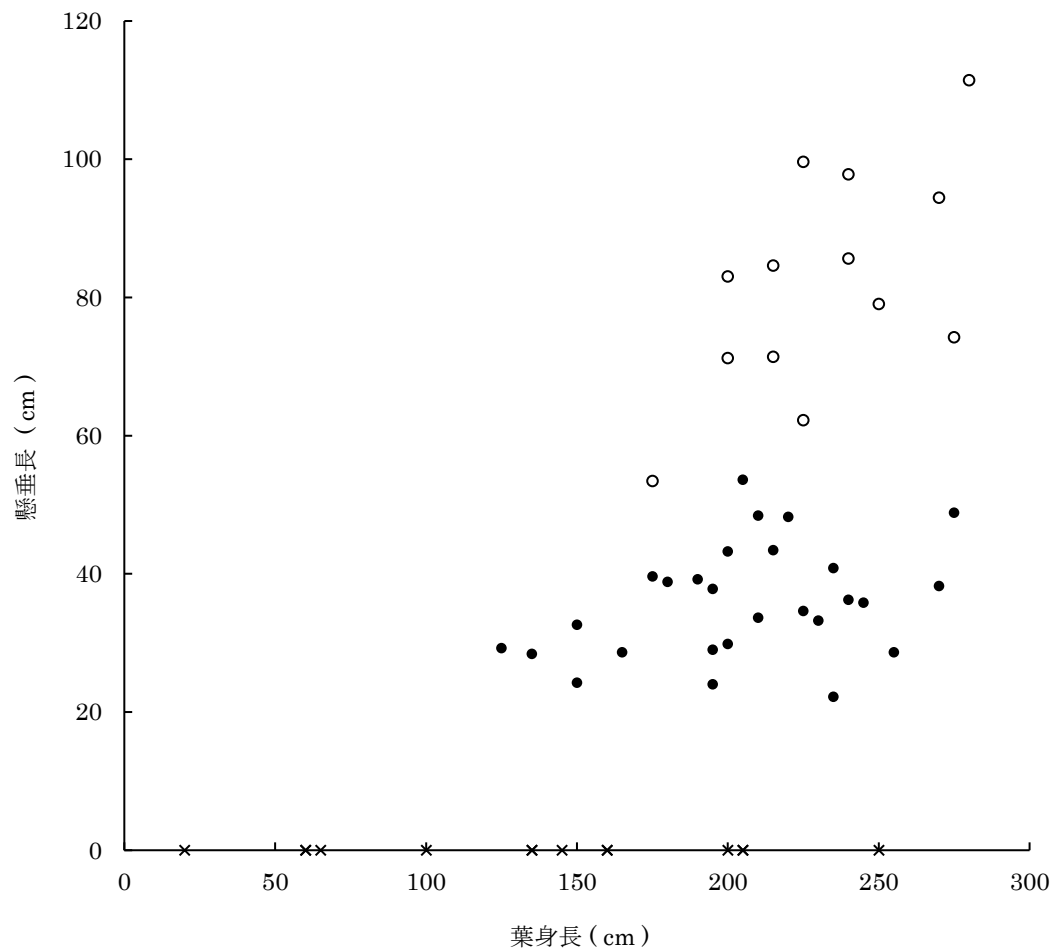


第 4-7 図 葉身の異なる部位における横断面。

左上：葉身先端から 10cm，右上：同 50cm，

左下：同 100cm，右下：同 200cm。

図中のバーは，5 mm を示す。



第 4-8 図 葉身タイプ別の葉身長と懸垂長との関係.

× : 直立型, ● : 挫折型, ○ : 湾曲型.

第 2 部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第 5 章 群落を形成する葉鞘と茎の機械的強度の解析

エリアンサスが高い物質生産性を発揮する背景の一つとして、物質生産を支えている群落構造がある。そこで、第 1 章および第 2 章において苗を定植してから数年間にわたって群落構造の解析を進めてきた(金井ら 2017a, 金井・森田 2018)。この群落構造を空間に形成・維持している背景として、葉身は自身を支える機構を有していると考え、第 4 章において葉身の機械的強度について解析を試みた(金井・森田 2020)。

以上のような、葉群を形成する葉身のほか、葉身を支えている葉鞘や茎の機械的強度を形成しているメカニズムとして、形態学的な背景があると考えられる。しかし、エリアンサスの葉と茎の形態、特に組織構造については、葉身の中肋について報告をした程度で(Kanai ら 2017, 金井・森田 2020, 高橋ら 2017)、ほとんど知見がない。

そこで、群落を空間に形成、維持しているメカニズムを解析するための基礎的知見を得るために、エリアンサスの葉(葉身と葉鞘)および茎の形態、とくに組織構造を把握することにした。そのうえで、形態学的観点から組織構造と機械的強度との関係について検討を行った。

5-1. 材料と方法

本研究で用いたエリアンサス(*Saccharum arundinaceum* Syn. *Erianthus arundinaceus*)は、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培した品種 JES1 の群落(群落 C)である。除草と耕起を行った圃場に 2015 年 9 月 17 日、条間 2m×株間 1m の栽植間隔で 565 株の苗を定植し、施肥および灌水は行わず、必要最低限の手取り除草のみを行った。2017 年 4 月 24 日に群落を二分し、一方はそのままとし(中密度区)、他方は条間 2m×株間 2m の栽植間隔に間引いた(低密度区)。

2017 年~2019 年に採取したエリアンサスの葉身、葉鞘、茎について、横断徒手切片を作成し、実体顕微鏡(OLYMPUS 株式会社製 SZ61 型)と

蛍光顕微鏡(OLYMPUS 株式会社 BX51 型)で組織構造を観察した。

5-2. 結果

(1) 葉身の構造

エリアンサスの葉身の横断面を観察すると、基本的構造はイネ科植物に共通する構造である。すなわち、エリアンサスの葉身は、多くの維管束が縦走しており、大小の維管束が一定間隔で分布している(第 5-1 図)。大維管束では、向軸側に大型の導管を含む木部が、背軸側に師部が分化し、それを維管束鞘が取り囲んでいる。小維管束は、構成する細胞は大維管束より少なく、木部と師部の分化は、進んでいない。葉軸に沿って先端部から基部の組織構造を比較した際、葉縁部で厚壁組織が発達しており、厚壁組織の長さは先端部<中央部<基部である(第 5-2 図)。

維管束周辺を取り囲む維管束鞘は、1~数層の厚壁細胞層を介し、向軸側及び背軸側の表皮細胞と接している。向軸側にある機動細胞は、一定間隔で数個ずつ大型化している。機動細胞より背軸側では、1~数個の小維管束が分布している。葉肉細胞は維管束の間を埋めており、葉身の向軸側には大型の機動細胞があるため、相対的に葉肉細胞の分布は、葉身の背軸側に偏っている。

葉身の先端部分では、中央部分に中肋が発達していないが、基部側に向かうにつれて大型化し、独特の構造を呈している(第 5-3 図)。すなわち、中肋部分では大小維管束が葉身の背軸側に位置し、その大維管束と表皮細胞・機動細胞との間に大型の厚壁細胞が発達する。一方、その発達した厚壁細胞によって背軸側に押し出されたように山型となった大維管束の背軸には小型の厚壁細胞が発達して維管束との間を埋め尽くしている。その大維管束の両側に位置する小維管束も葉身の背軸側に位置しており、背軸側の表皮との間にも、厚壁細胞が分布している。これらの維管束の間を葉肉細胞が埋めており、中肋の向軸側に大型の厚壁細胞が多数分布しているため、とくに中肋部分では葉肉細胞が葉身の背軸側に分布している。

表皮細胞の一部は、一定間隔で、数個ずつの大型の機動細胞に特殊化

しており、機動細胞の背軸側には 1~数個の小維管束が位置する(第 5-1 図). それらの細胞の間を、葉肉細胞が埋めている. また葉身の表面構造について観察すると、ケイ素の集積が確認された(第 5-4 図).

(2) 葉鞘の構造

エリアンサスの葉鞘は、他のイネ科作物と共通する構造であり、何枚かが重なり茎を取り囲んでいる(第 5-5 図). 葉鞘中央部分の厚さは、中央<基部側<先端部である. 葉鞘の内部構造を観察すると、先端側、中央部、基部側を通しては、大小維管束が一定間隔で交互に配列し、縦走している(第 5-6 図). 必ずしも維管束間とは限らないが、先端部を除いて一定間隔で破生通気腔が形成されることが多い.

大小維管束は葉鞘の背軸側に位置しており、大小維管束延長部として小型の厚壁細胞が背軸側表皮まで埋め尽くしており、背軸側の維管束周辺にのみに葉肉細胞が分布する.

(3) 茎(節間)の構造

エリアンサスの節間は、単子葉植物に共通する構造である. すなわち、節間内に維管束が不規則かつ疎らに分布する不整中心柱である(第 5-7 図). しかし、節間内の維管束の大部分は周辺部で密に分布しており、維管束周辺や茎の周辺部で厚壁組織が発達している(第 5-8 図).

5-3. 考察

エリアンサスの葉身、葉鞘、茎について、横断徒手切片を作成し、実体顕微鏡と蛍光顕微鏡で組織構造を観察した結果、それらの組織構造を明らかにした.

第 4 章において、エリアンサスの中肋は基部に近いほど発達し、葉身の機械的強度も比例して高くなることを明らかにした(金井・森田 2020). よって、本研究で葉身を葉軸に沿って観察した結果、機械的強度と対応して、先端側から基部側に向かって、中肋が大型化するとともに変形していた. 基部側の葉縁の厚壁組織が長くなることは、これらの組織構造

が葉身の機械的強度に貢献していると考えられる。そして、葉鞘、茎(節間)内部構造を観察した結果、特徴的な構造を確認できた。

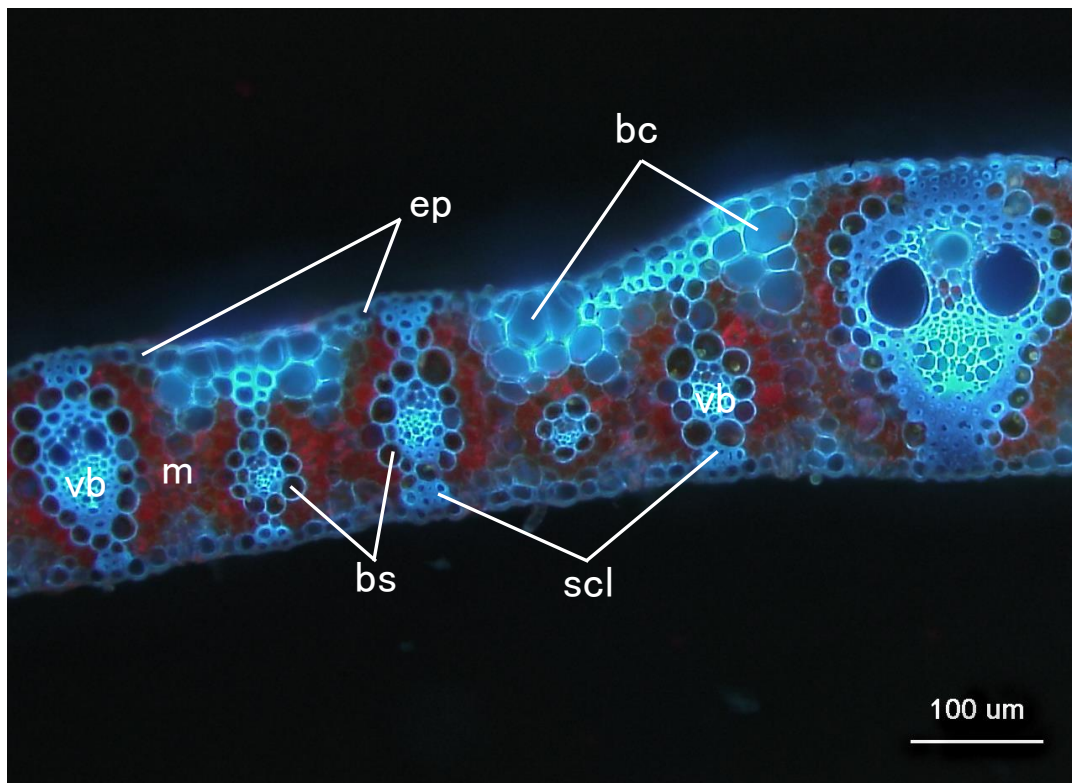
以上、エリアンサス群落が高い物質生産能力を発揮する背景として大型の葉群構造(金井ら 2017a, 金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)があり、その大型の葉群構造を支える基礎として、葉群構造を維持するための機械的強度がある(金井・森田 2020)。そこで、機械的強度を高めている背景について、形態学的に解析を試みた結果、葉身、葉鞘、茎(節間)の形態が大型の葉群を形成・維持することに有効に機能している可能性が高いことが確認できた。

また、具体的な検討を行っていないが、葉身と葉鞘との接合点はポイントになるはずであるし、葉鞘自体の機械的強度のメカニズムや、葉鞘全体が茎を取り巻いていることが、どのように機械的強度に貢献しているかについては、今後の課題である。

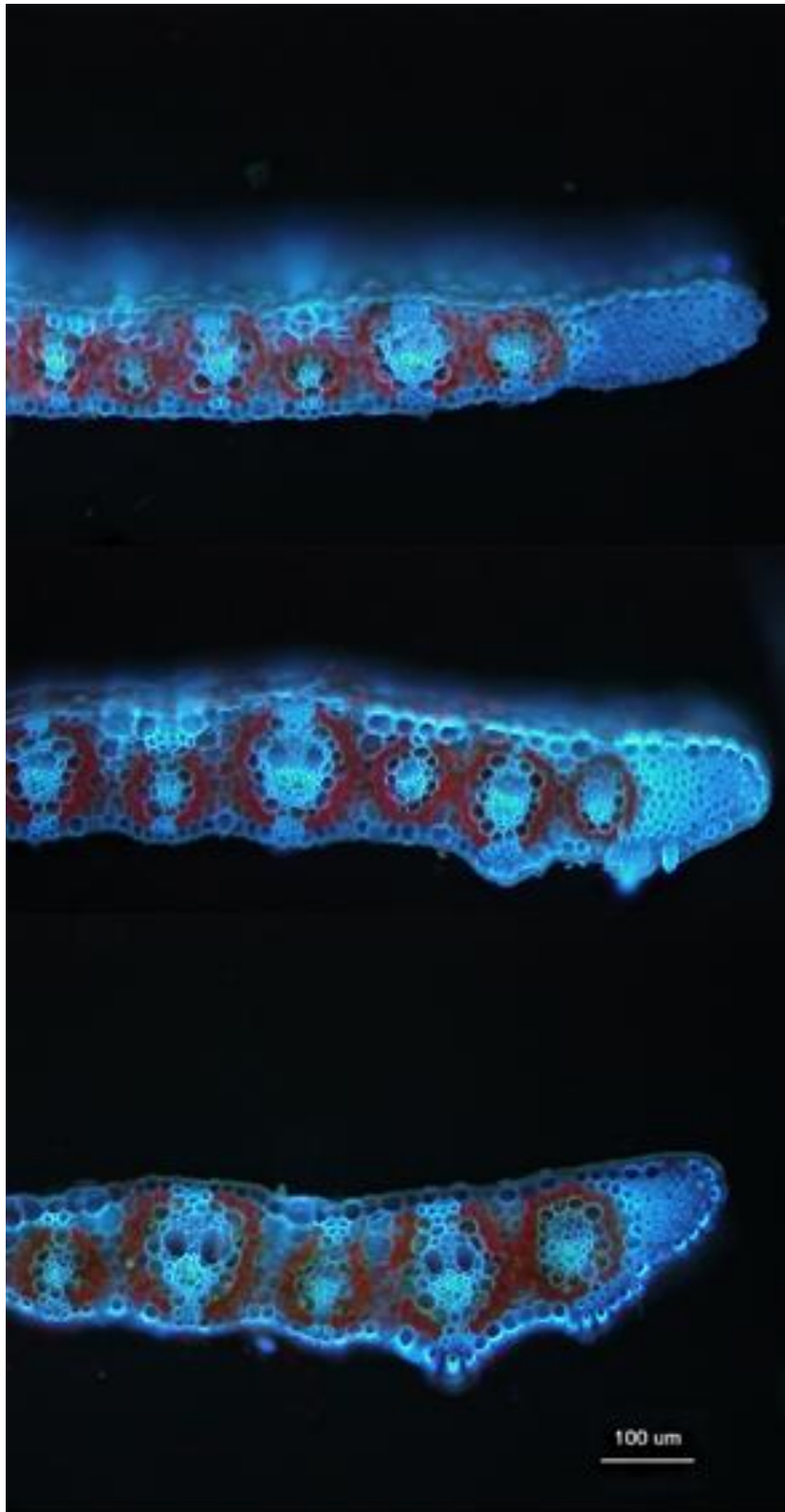
さらに、葉身と葉鞘を着生している茎も、葉身の機械的強度を計測した方法(金井・森田 2020)では計測不能なほど堅牢だったことも含め、高い機械的強度を有するものであるが、形態学的な観察によって、機械的強度を高めている背景について確認できた。群落の発育に伴って、株の生育が進み、太くて硬い茎が増えていくことは生産構造図からも確認できるところで、分けつの生育が物質生産性と、その基礎となる群落構造の機械的強度につながっていると考えられる。

また、エリアンサスが大型葉群を形成・維持している要因としては、これら地上部を構成している要素としての葉身、葉鞘、茎だけでなく、地上部を支持する根系も一定の役割を果たしているはずである。エリアンサスの根系が深く広く、根系を構成する個々の節根も細いものから太いものまで様々であり、太い節根については機械的強度が高いことが経験的に知られている。群落の根系については、第8章で改めて取上げる。

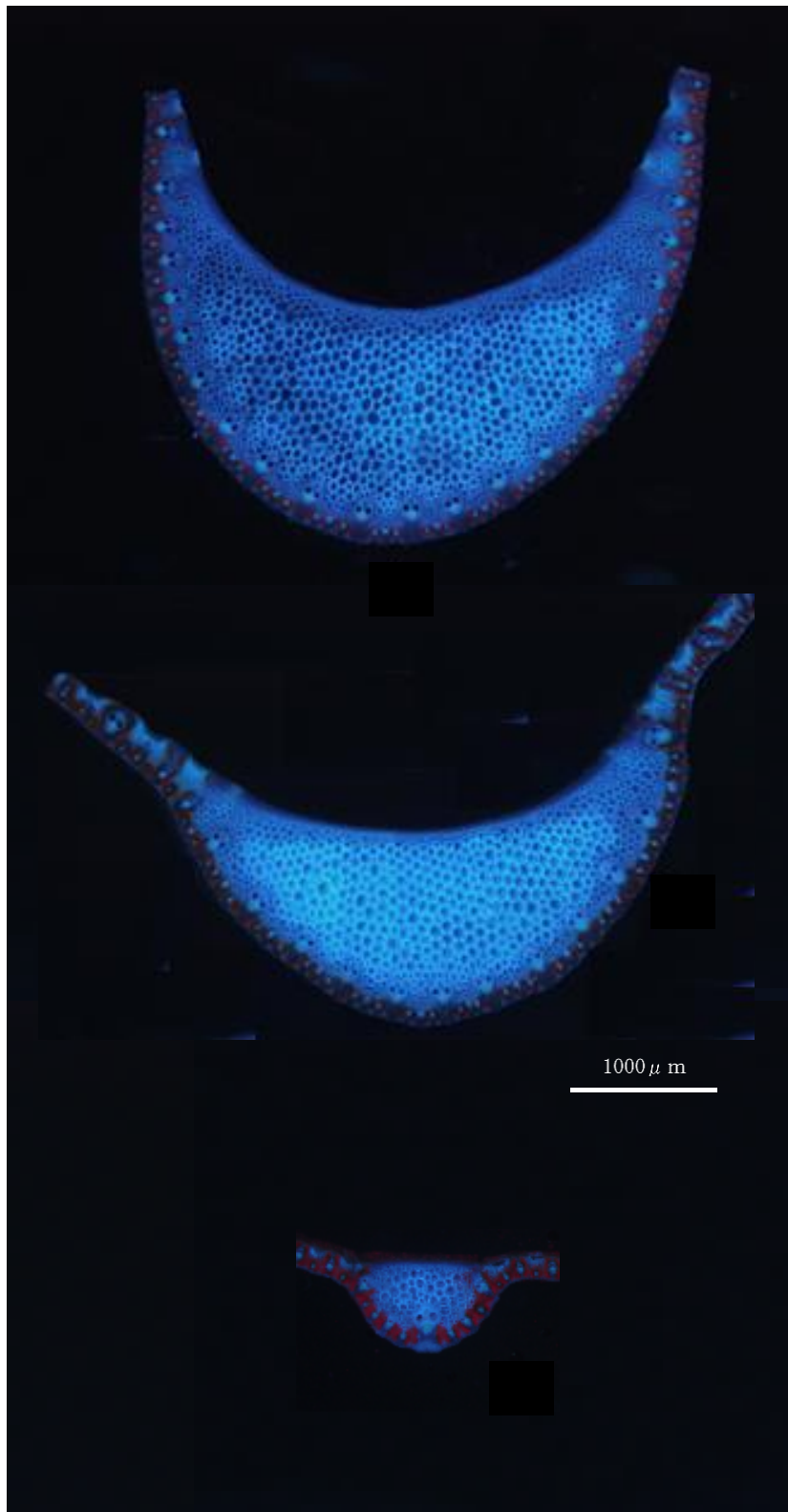
このような、それぞれの器官の機械的強度の総合として、大型の葉群構造が支えられ、高い物質生産能力につながっていると考えられる。本研究の結果はエリアンサスの群落構造を理解するために大いに役立つ。



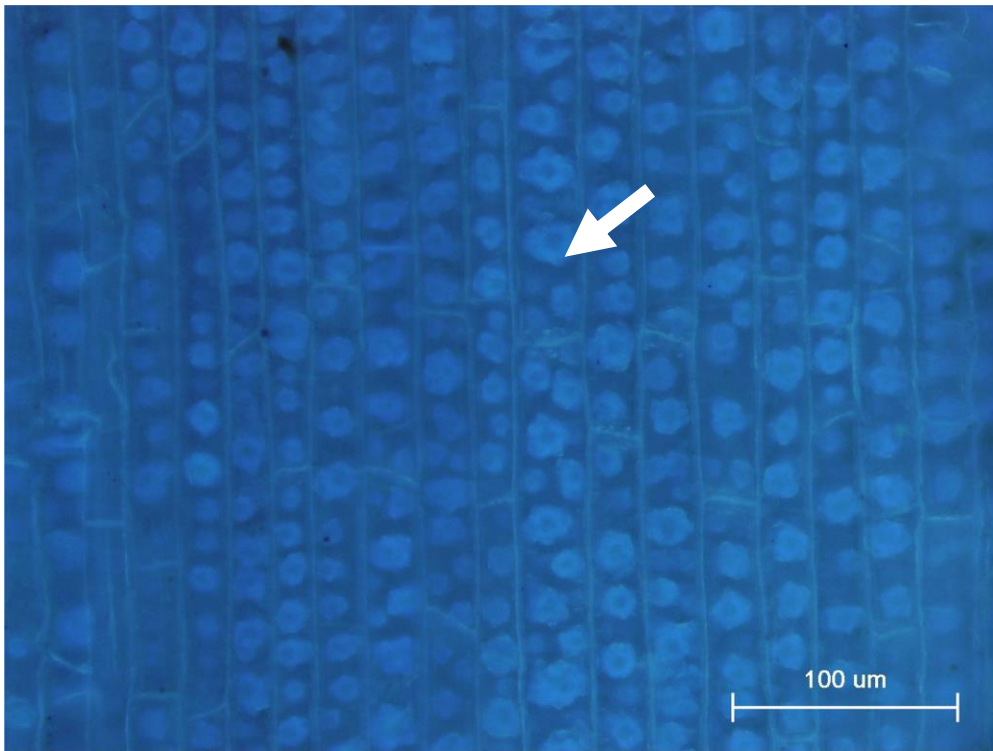
第 5-1 図 エリアンサス葉身横断面の蛍光顕微鏡写真.
ep : 表皮, bc : 機動細胞, scl : 厚壁組織,
bs : 維管束鞘細胞, m : 葉肉, vb : 維管束.



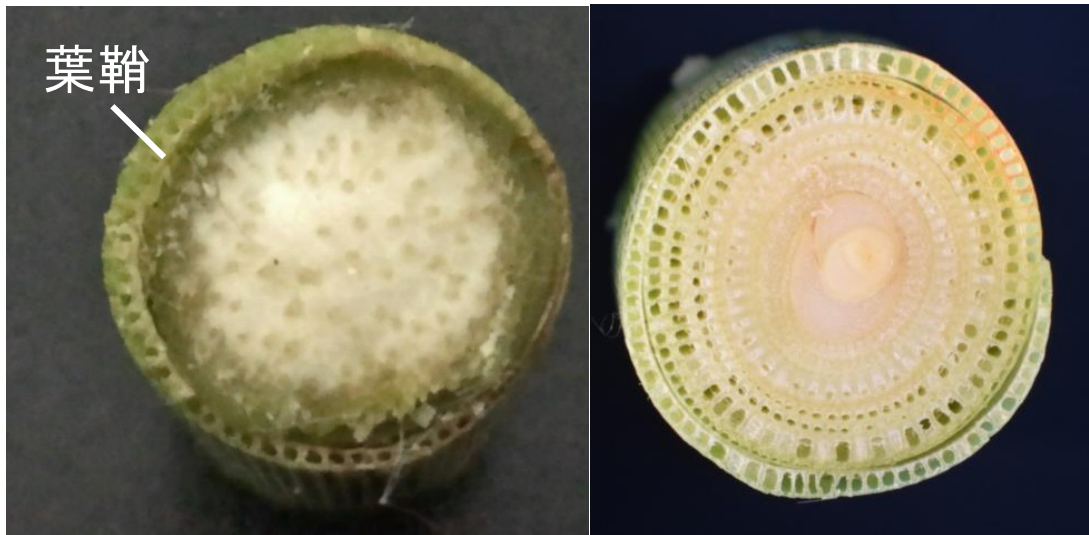
第 5-2 図 エリアンサス葉身葉縁部の厚壁組織の蛍光顕微鏡写真.
上：基部，中：中央部，下：先端部.



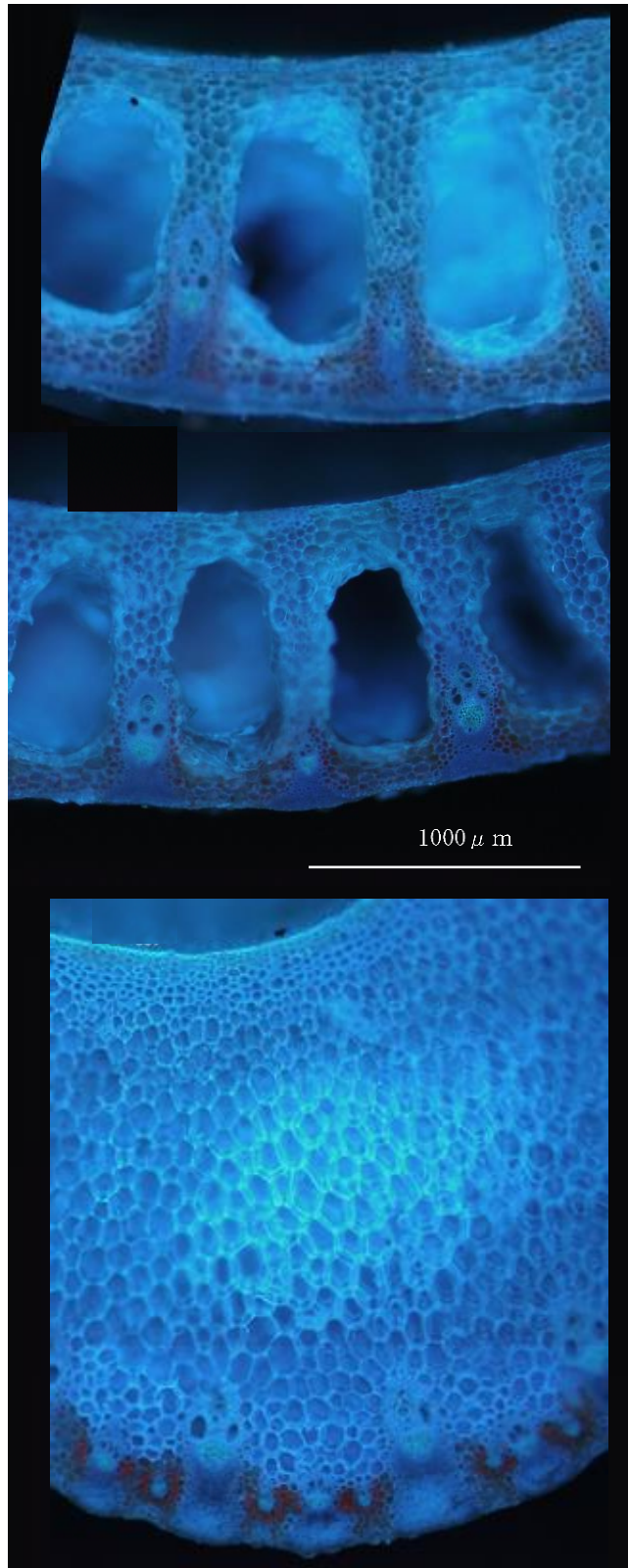
第 5-3 図 エリアンサス中肋横断面の蛍光顕微鏡写真。
上：基部，中：中央部，下：先端部。



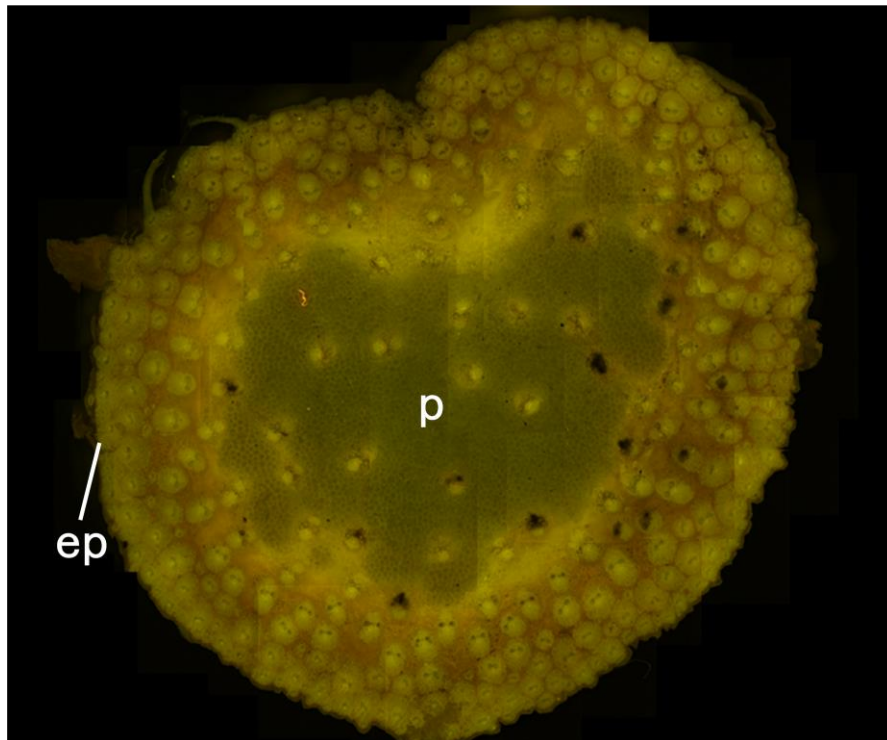
第 5-4 図 エリアンサスの葉身の表面構造の蛍光顕微鏡写真。
図中の矢印はケイ素を示す。



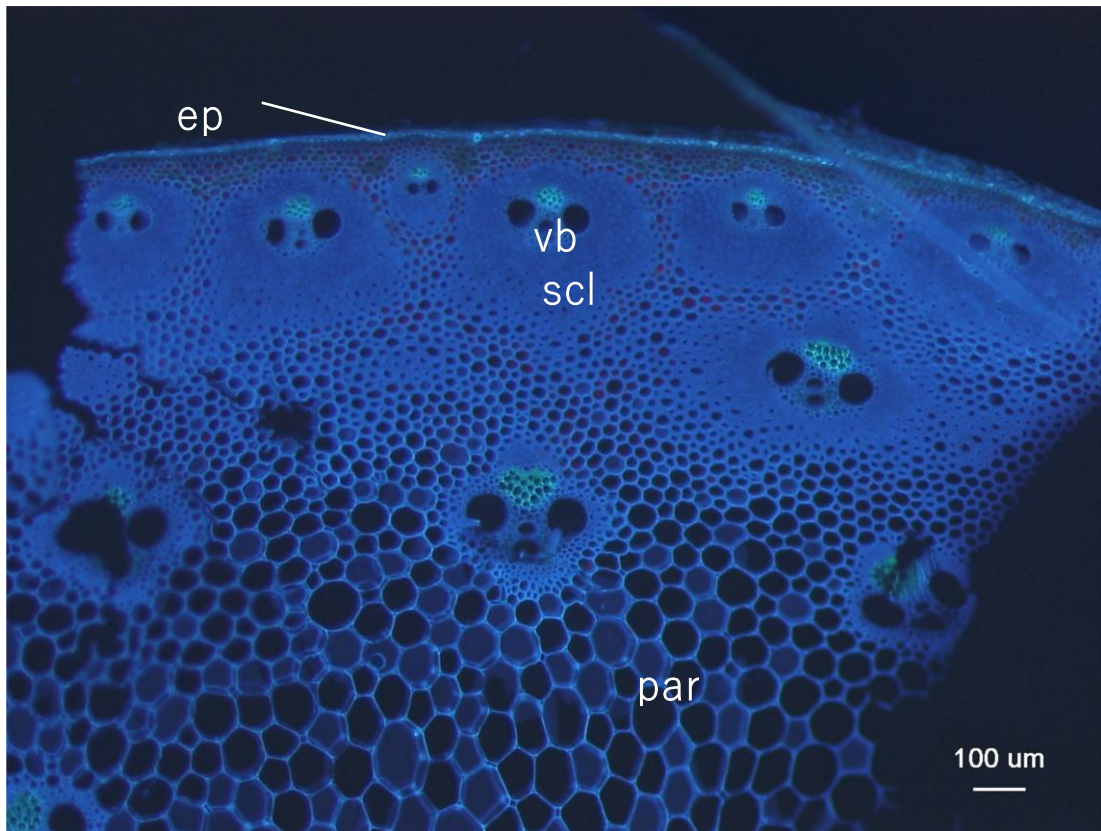
第 5-5 図 エリアンサス葉鞘横断面。
左：茎の下部，右：茎の上部。



第 5-6 図 エリアンサス葉鞘横断面の蛍光顕微鏡写真。
上：基部，中：中央部，下：先端部。



第 5-7 図 エリアンサス節間横断面。
上：実体顕微鏡，下：蛍光顕微鏡写真。
p：髓，ep：表皮。



第 5-8 図 エリアンサスの茎横断面の蛍光顕微鏡写真。

scl : 厚壁組織, vb : 維管束, ep : 表皮, par : 柔組織.

第 2 部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第 6 章 分けつ生育の発育形態学的解析

エリアンサスを日本で栽培すると、福島県以南では越冬し、毎年、刈り株から再生が起こることが知られており(松波ら 2013)、苗を定植してから数年間、収量が増加していく。

第 1 章において定植 1 年目から 2 年目にかけて群落構造と生育調査とを調査した結果、エリアンサスは苗を定植してから少なくとも数年間は収量が増加し、同化器官・非同化器官のいずれも増加するが、とくに非同化器官の増加が顕著であることが明らかになった。定植 1 年目は 1~2 本の茎から生育が始まり、出穂期に 70 本程度になったのに対し、定植 2 年目は生育初期から多くの茎数が確保され、その後、若干増加して同じ 70 本程度になった(金井ら 2017a)。定植 1 年目と 2 年目で茎数がほぼ同じレベルであるのに、非同化器官の乾物重は 2 年目の方が高かったのは、生育初期に形成された分けつが、収穫まで十分に生育する時間が確保され、太く、長くなったためと考えられる。本研究のほかにも、収穫時の茎数と収量との間に有意な正の相関関係が認められており(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報告されている(松波ら 2014)。このように、エリアンサスの物質生産では分けつ形成が重要であり、とくに生育初期に茎数を確保することが収量形成に大きく貢献していることが考えられる。

そこで、本研究では、生育初期における分けつ形成を解析するために、エリアンサス群落を構成する株を対象として、分けつ形成の様相について、ポット栽培した材料を対象として、分けつ芽の形成と生育について、それぞれ検討を行った。そして、これらの知見に基づいてエリアンサスにおける分けつ形成について、発育形態学的な観点から考察を行った。

6-1. 材料と方法

本研究で材料として利用したのは、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培したエリアンサス(*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)の品種 JES1 の3つの群落(群落 A, B, C)である。

簡単な除草と耕起を行った圃場に、群落 A は 2014 年 6 月 13 日に、群落 B は 2015 年 5 月 26 日に条間 1m×株間 1m の栽植間隔で、それぞれ 110 株の苗を定植した。群落 A は、2 年目の収穫後に間引いて条間 2m×株間 1m とし、また 3 年目の収穫後に間引いて条間 2m×株間 2m とした。群落 B は、1 年目の収穫後に間引いて条間 2m×株間 1m とした。群落 C は、2015 年 9 月 17 日に条間 2m×株間 1m で 565 株を定植し、2 年目に群落を 2 つに分けて、一方の群落 C①はそのまま栽培し、他方の群落 C②は間引いて条間 2m×株間 2m とした。いずれの年も施肥と灌水は行わず、定植 1 年目のみ、適宜、手取り除草を行った。これらの群落について、群落を代表する株について生育(草丈と茎数)および収量の調査(板倉ら 2018, 金井ら 2017a, 金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)を行った。

以上の 3 群落を対象とし、2017 年の再生開始から出穂後まで、株を構成する個々の分げつを、形成時期や大きさを考慮して 50 本ほどを選定し、それぞれにおいて葉位別に地際から葉の先端までの長さ(葉先高)を追跡した。葉先高を追跡した分げつを出穂期に採取して解剖し、葉位別に葉身長、葉面積、乾物重、葉鞘長、節間長を測定した。

2018 年度(2018 年 4 月~2019 年 3 月)に定植 5 年目の群落 A の中から、標準的な生育を示してきた株を 5 株、選定した。この内、2 株について、2018 年 3 月 15 日と同年 3 月 24 日にそれぞれ株直上にカメラ(サンワサプライ 400-CAM061)を設置し(第 6-1 図)、2 ヶ月間、毎日 1 回、株の写真を撮影した。

また、残りの 3 株については、10cm 格子のコドラートを設置し、生育が開始した分げつに印を付け、株の中における分げつの位置を 2 ヶ月間、毎週 1 回記録した。2 ヶ月後、株に外接する長方形を設定して、対角線の交点である株の中心から、それぞれの分げつまでの距離を計測して、株内における分げつの形成位置について解析を行った。

さらに、2018年5月25日から同年6月10日に、コドラート設置株から10本の分げつを採取して解剖し、実体顕微鏡(OLYMPUS社 SZ61型)で生長点の様相について観察を行った。

もう1つの研究材料は、ポット栽培したエリアンサスである。すなわち、1/2000aワグナーポットに市販の腐植質火山灰土壌の下層土(赤土)約10kgを充填し、2015年10月6日と2017年5月10日に1株ずつエリアンサス品種 JES1の苗を定植して栽培した。施肥は行わず、ポットは露地に置いて灌水も行わなかった。2016年9月7日から2017年8月28日に、このように栽培したエリアンサスから適宜、生育段階の異なる21株を採取した。株の周辺側から順次、中心側に向かって分げつを、それぞれが母茎から出現している基部で切り離して解剖し、分げつ芽について観察を行った。肉眼で確認できる段階をもって分げつ芽の形成を確認し、形成位置、生育を始めている分げつの位置と数、母茎の生育との対応関係について検討した。

6-2. 結果

(1) それぞれの群落における収量と茎数

エリアンサス群落の収量は、群落B>群落A>群落Cであったが、茎数の大小関係は逆であった(表6-1)。個々の分げつのバイオマス量は群落Cで小さく、群落Bで大きかったことから、少なくとも今回の群落の収量形成では、茎数の多少以上に、個々の分げつの生育の良否が収量に影響していた。草丈は群落A≒群落B>群落Cであった。

(2) 分げつの発育形態学的な分類

エリアンサス株の再生における分げつ形成について、定点カメラを用いて追跡するとともに、目視による観察を行った結果、いずれの株においても、株を構成する分げつには3種類あることが明らかとなった(第6-2図)。すなわち、1つは、2017年度(以前)に地表面から30cm以上を刈取られて、2018年度には葉身が展開しなかった分げつ(枯死分げつ)である。

枯死分げつは、株の上側から茎の切断面が確認でき、全体が茶褐色を呈していた。

2018 年度に緑色の葉身が展開してくる分げつは、2 つに分類できた。いずれも 2017 年度(以前)の収穫時に地上 30cm 以上を刈取られて、2018 年度に刈り株から葉身が展開したものである。1 つは、最初に展開してくる葉身(1~2 枚程度)の先端が切断されているもので(旧分げつ)、この場合、葉身の切断部分は褐色に枯れていた。もう 1 つは、2018 年度に先端が切断されていない、インタクトな葉身が展開するもの(新分げつ)である。

以上のように、エリアンサスの再生株を構成している分げつには、枯死分げつ、旧分げつ、新分げつの 3 種類があり、新分げつと旧分げつが葉身を展開して株の再生を担っていることが明らかとなった。

(3) 分げつ分類別の生長点の様相

エリアンサスの株を構成する分げつの形成を発育形態学的な観点から考察するために、上記のように 3 分類したそれぞれの分げつにおける生長点の有無および状態を観察した。その結果、枯死分げつではすでに節間伸長が起こり、2017 年度(以前)の刈取りで生長点(に由来する穂を含む部分)は切り取られていた(第 6-3 図)。これに対して、旧分げつを解剖すると栄養相の生長点が存在し、その周りを生育途中の複数の葉原基と幼葉が取り囲んでいた(第 6-4 図)。また、新分げつでも基本的に同じで、栄養相の生長点と、それを取り囲む葉原基・幼葉が確認できた。

(4) 分げつ分類別の形成順序と数

エリアンサスの分げつの種類別に、株の再生における分げつ形成を追跡した。その結果、最初に旧分げつから葉が展開を始め、その後も生育を続けていく。この旧分げつの出現がほぼ完了したころから、新分げつの葉が抽出を開始した(第 6-5 図)。そして調査終了時(2018 年 5 月 25 日)の分げつ数は、枯死分げつ>新分げつ>旧分げつであったが、生育した分げつ(新分げつ+旧分げつ)>枯死分げつであった。

次にそれぞれの分けつが、株のどの部分に形成されるかを解析した。その結果、枯死分けつは株中心から 15~20cm に位置しているものが最も多く、最周辺部分にはあまり認められなかった(第 6-6 図)。これに対し、新分けつと旧分けつは、株の中心部分にはほとんど形成されず、株の中心から周辺側に向かうにつれて両分けつとも数が増加した(第 6-7 図)。また、個々の株の茎数を見ると差があるが、いずれの株においても株の周辺側に多いという特徴は、旧分けつより新分けつで顕著であった。

(5) 母茎と分けつ芽の生育の対応

ポット栽培したエリアンサスについて、母茎の葉数に着目しながら分けつ芽の形成や生育を観察した。その結果、母茎から 4~5 枚の葉が展開すると、母茎の第 4 葉が着生するファイトマーに分けつ芽の形成が認められた。その後、葉の展開に伴って順次、向頂的に分けつ芽の形成が進んだ。例えば、母茎が 7 葉期に 3 ヶ所、8 葉期に 5 ヶ所、9 葉期には 6 ヶ所に分けつ芽が形成されていた(第 6-7 図)。

また、このようにして形成された分けつ芽のすべてが、すぐに生育を開始して、茎になるとは限らず、休眠するものもあった。エリアンサスの分けつ芽は母茎に向頂的に形成されていたが、母茎に形成された分けつ芽の中で最も基部側に位置するものと同じ側において、頂端側に形成された分けつ芽が発育することが多かった。また、これらの旺盛に生育した分けつとは、母茎に対して反対側に形成された分けつ芽は休眠することが多かった。

(6) 分けつの生育

個々の分けつの生育の様相を把握するために、それぞれの分けつにおいて葉位別に葉先高を追跡し、生長曲線を描いた結果、エリアンサスの葉身は、最上位の複数枚の葉が同時に展開していた(第 6-8 図)。

またエリアンサスの葉身の生育を調査した結果、分けつの生育期間は、再生を開始してから出穂するまでであり、最終的に分けつに形成される

葉は 20 枚前後であった。また、葉身の最高展開速度は 2.3cm/日であり、最終葉身長も 300cm と長大な葉身を形成していた。

出穂期に分げつを解剖した結果、葉鞘は葉身に比較して短い、伸長している節間の数が比較的多いことが明らかになった(第 6-9 図)。すなわち、エリアンサスでは葉鞘が短く、葉位間での変異も小さいが、多くの節間が下位から伸長することで、葉鞘の着生位置が、垂直方向に離れていた。

6-3. 考察

(1) 分げつの発育形態学的分類と生育順序

本研究では、エリアンサス群落を構成する標準的な株を選定して、とくに生育初期における分げつ形成の様相について明らかにするために、発育形態学的な観点から検討を行った。その結果、エリアンサスの再生株を構成する分げつが、枯死分げつ、旧分げつ、新分げつの 3 種類に分類できた。枯死分げつは生長点がなくなっているため主軸は生育できない。これに対して、新分げつと旧分げつには栄養相の生長点が残っており、主軸が生育を再開することで株が再生することが明らかとなった。

これらの 3 種類に分げつは、形成時期や生育段階が異なるものと考えられる。すなわち、枯死分げつでは 2017 年度の刈取り時期(出穂期後)にすでに生殖相に転換して生長点から穂が形成されており、節間伸長した茎が刈取られた分げつ(2016 年度以前に刈取られた分げつも含まれている)と考えられる。

これに対して旧分げつは、2017 年度の収穫時期に生育中の分げつで、刈取りのショックや環境条件の影響によって、生長点が生育を止めたまま生き残って越冬し、2018 年度に環境条件が整うと生育を再開したと考えられる。また、新分げつでは最初に展開してくる葉の先端部分が切れていない、インタクトな状態であることから、2017 年度の刈取り時期には、まだ新しい葉の抽出・展開が開始しておらず、おそらく分げつ芽のまま越冬し、2018 年度になって初めて生育が開始したと考えられる。

このような分げつの生育や生育の再開については、飼料作物において年数回の刈取直後の再生という観点から取り扱った研究がいくつかみられる(藤井 2009, 橋本・青田 1964, 佐藤・大友 1974, 佐藤・佐々木 1987). 出穂せずに越冬した後の分げつの生育あるいは生育の再開に着目した研究は、オーチャードグラス(伊東ら 1989), リードカナリーグラス(伊東ら 1990a, 伊東ら 1993), チモシー(藤井 2009)や、イネ科 *Panicum* 属(蔡ら 1998)など限られたものしかない。

例えば、リードカナリーグラスでは、まず既存分げつ(本研究でいう旧分げつに相当)が早期に生育するため、再生初期から多くの葉数と葉面積が確保されること(伊東ら 1990b), 既存分げつが刈取りによって生長点を失うと、既存分げつに形成されていた分げつ芽がすぐに生育を開始して、莖数を確保していることが報告されている(伊東ら 1990a). このような生育特性が、リードカナリーグラスの高い物質生産を支えている。またチモシーにおいても越冬前に存在した分げつが、翌年に旧分げつとなって一番草の乾物生産を担っていることが報告されている(藤井 2009).

エリアンサスでは、まず旧分げつが動き出し葉を展開する。そのため、再生初期から莖数が確保されるとともに、それぞれの莖が生育する結果、早期に葉数および葉面積が確保される。この点は、リードカナリーグラスの生育と似ている。なお、リードカナリーグラス(伊東ら 1990a), オーチャードグラス(伊東ら 1989), チモシー(藤井 2009)では生育期間中に一部の分げつが枯死するが、エリアンサスでは認められていない。これらの生育特性によって、エリアンサスの高い物質生産性が発揮されていると考えられる。

また、同じ株の中に、出穂してすでに刈取られた枯死分げつと、栄養相の生長点を持つ旧分げつおよび新分げつとが観察された。この事実から、エリアンサスの株を構成している分げつの生育は必ずしも同調しておらず、幼穂分化して出穂する年度が分げつによって異なる場合があることが分かる。エリアンサスでは、株を構成するすべての分げつから同時に出穂するわけではないことは、以前から気が付いていた。本研究の

結果、新分けつの一部が次年度に旧分けつとして生育を再開することが明らかになった。

同じように、すべての分けつで相転換が一斉には起こらず、低次の分けつほど幼穂分化が早い傾向は、チモシー(藤井 2009)やイネ科 *Panicum* 属の牧草(蔡ら 1998)で報告されている。本研究の結果、年1回の刈取りを想定した多年生草本作物の再生における分けつ形成を全体として統一的に理解することができるようになったといえる。

エリアンサスの分けつの生長点が相転換を起こすためには、環境条件や一定の生育期間が必要であり、とくに基本栄養生長性が強いと考えられる。それによって、同じ株に形成された分けつであっても、すべてが斉一に相転換したり、出穂するわけではなく、新旧分けつの区別に典型的に現われているような生育段階のズレがみられる。このことは、穂を収穫する穀類であれば望ましくない特性であるだろうが、エネルギーの原料として栽培する多年生草本作物にとっては毎年の再生が速やかに開始されるので、出現した分けつの生育期間が十分に確保できる。

このように、株を形成する分けつの生育が同調していないことが、多年生作物の収量形成にはプラスに働いていると考えられる。したがって、株を構成するそれぞれの分けつにおける相転換のタイミングや斉一性が、収量形成をどう規定しているかに着目して解析を進める必要がある。

(2) 株におけるそれぞれの分けつ形成の位置

エリアンサスの再生株におけるそれぞれの分けつの形成位置を調査したところ、新分けつと旧分けつは株の周辺側に多く形成される傾向が認められた。

エリアンサスを栽培する場合、株分けした苗を定植することが多い。その場合、苗の主茎的な茎に形成された分けつ芽が生育を開始することで株の形成が始まり、その分けつから、さらに高次の分けつが分枝し、茎数が増えていく。

分けつの観察の結果では、分けつ芽の形成位置、形成時期、休眠の様相は、他のイネ科作物と基本的に共通していた。すなわち、エリアンサ

スでも主軸の生育に伴い、主軸の葉の葉腋に順次、向頂的に分げつ芽が形成され、生育する。ただし、形成されたすべての分げつ芽が生育するのではなく、母茎を中心として一方の側の分げつが生育し、反対側に形成された分げつ芽は休眠することが多いという特徴が認められた。

分げつ芽が生育するか休眠するかが、どのようなメカニズムで決まるかは明らかではないが、コムギの分げつの生育に物理的力が影響しているというアイデアが古くからある(Williams and Langer 1975)。エリアンサスの分げつ形成においても、既存分げつの密度が低い株の周辺側に新しい分げつが生育する傾向が認められることは、このアイデアと矛盾してしない。いずれにしても、徐々に株の周辺側に向かって新しい分げつが形成される傾向があることは事実であり、それに伴って株が大型化していく。このように、枯死分げつ、旧分げつ、新分げつの3種類の分げつが、形成時期と形成位置がそれぞれ異なっていることが明らかとなった。

(3) 株を構成する分げつ生育の様相

エリアンサスの葉身の生長曲線を描いたところ、最上位の複数枚の葉が同時に展開していたことが明らかになった。これは展開中の葉が完全展開してから次の葉が順次、展開する、イネの葉の生長(川原ら 1968)の様式ではなく、トウモロコシの葉の生育(吉田 1973)と同様の様式であり、また、その葉身の最高展開速度が、2.3cm/日と、イネの0.3cm/日(藪田ら 2012)より速く、トウモロコシの5.4cm/日(吉田 1973)より遅いことが明らかになった。ただし、エリアンサスの分げつの生育期間はイネやトウモロコシと比較して長く、複数枚の葉身が同時に展開することが、葉の生育期間を相対的に長くなるため、多くの長大な葉が形成されることにつながっていると考えられる。

また、出穂期にエリアンサスの分げつを解剖したところ、葉鞘が短く、葉位間での変異も小さいが、多くの節間が下位から伸長することで、葉鞘の着生位置が、垂直方向に離れていたが、このことが、葉面積の増大に伴う葉の相互遮蔽をできるだけ避ける方向に働いており、長大な葉身

が物理的に支えられて立ち型であること(金井・森田 2020)とともに，受光態勢が比較的良好な理由となり，高い物質生産性を支えているものと考えられる．

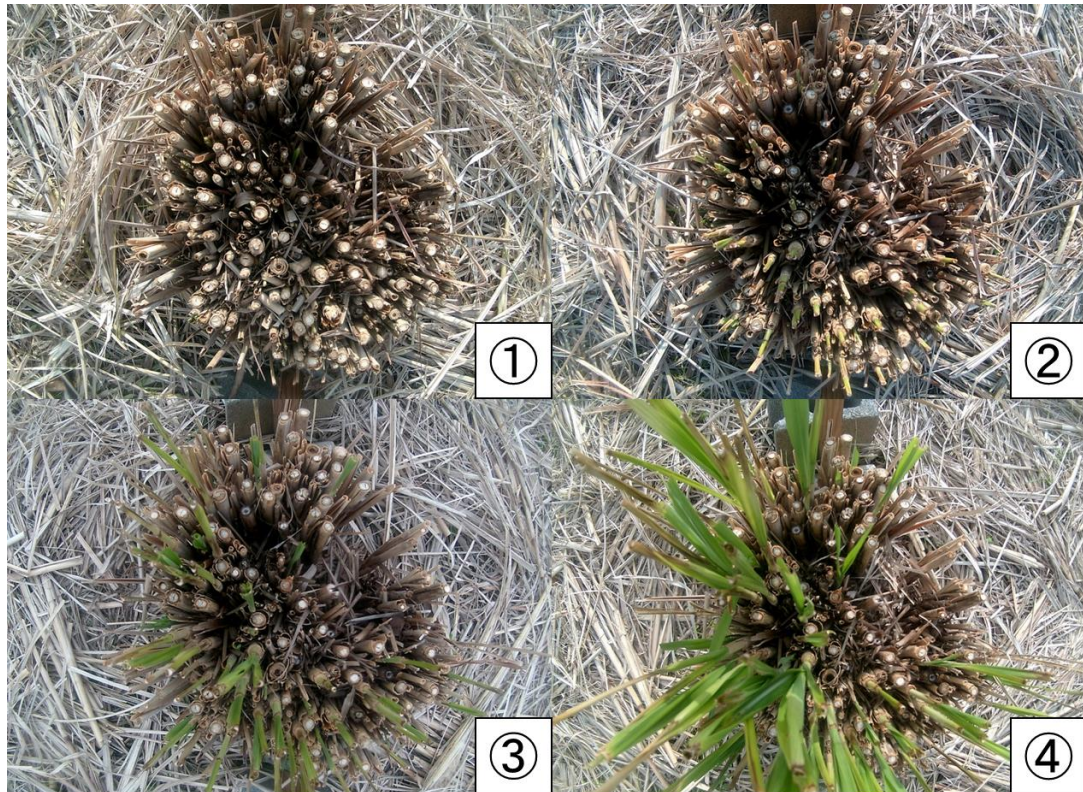
以上，本研究の結果，エリアンサスの生育における分けつ形成の特性と，その発育形態学的な背景が明らかとなった．また，その生育の様相によって，受光態勢に優れ，高い物質生産性を支える背景となっていると考えられる．

表 6-1 定植年数の異なるエリアンサス群落の収量および生育の様相.

群落	A	B	C①	C②
定植後年数	4	3	2	2
収量(t/ha)	24.1	37.5	8.5	13.4
茎数(本/株)	130.8	92.2	182.0	137.5
草丈(cm)	399.8	390.1	287.8	296.6



第 6-1 図 定点カメラの設置状況。
矢印は定点カメラを示す。



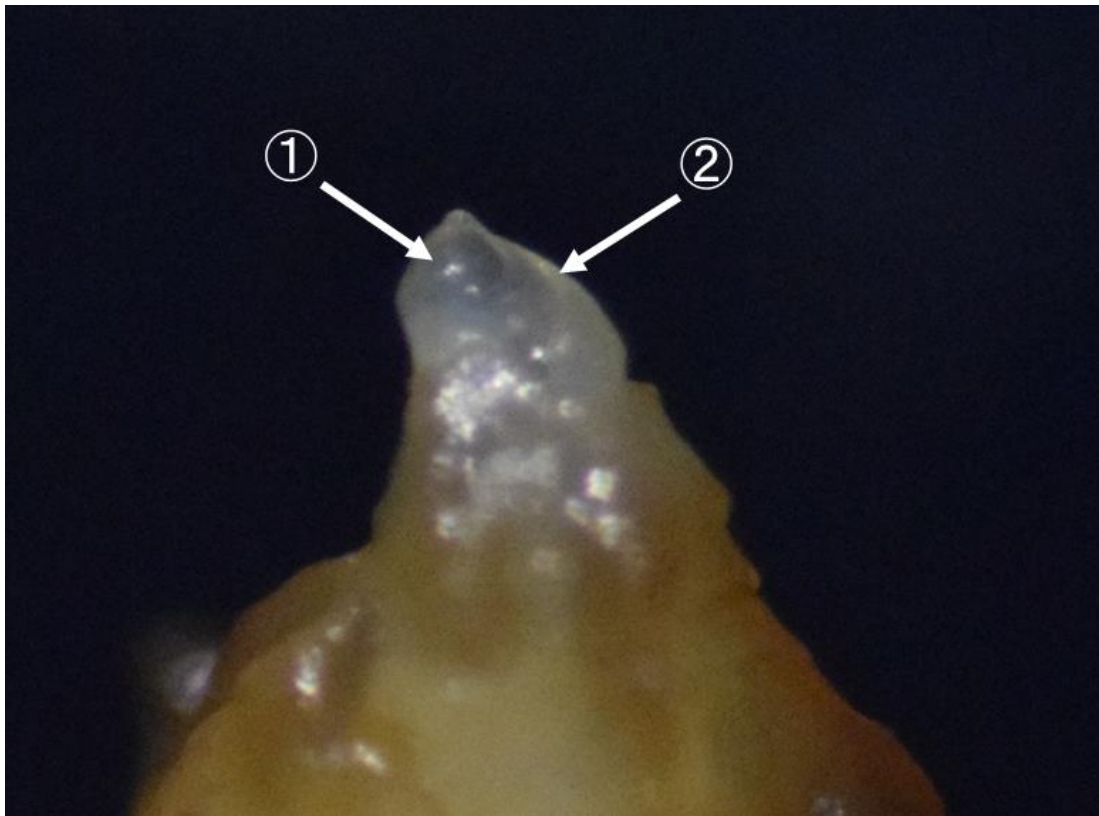
第 6-2 図 定点カメラで撮影した分けつ形成の推移.

撮影日は①2018年3月15日, ②同年3月28日(①から13日後), ③同年4月3日(同19日後), ④同年4月8日(同24日後).



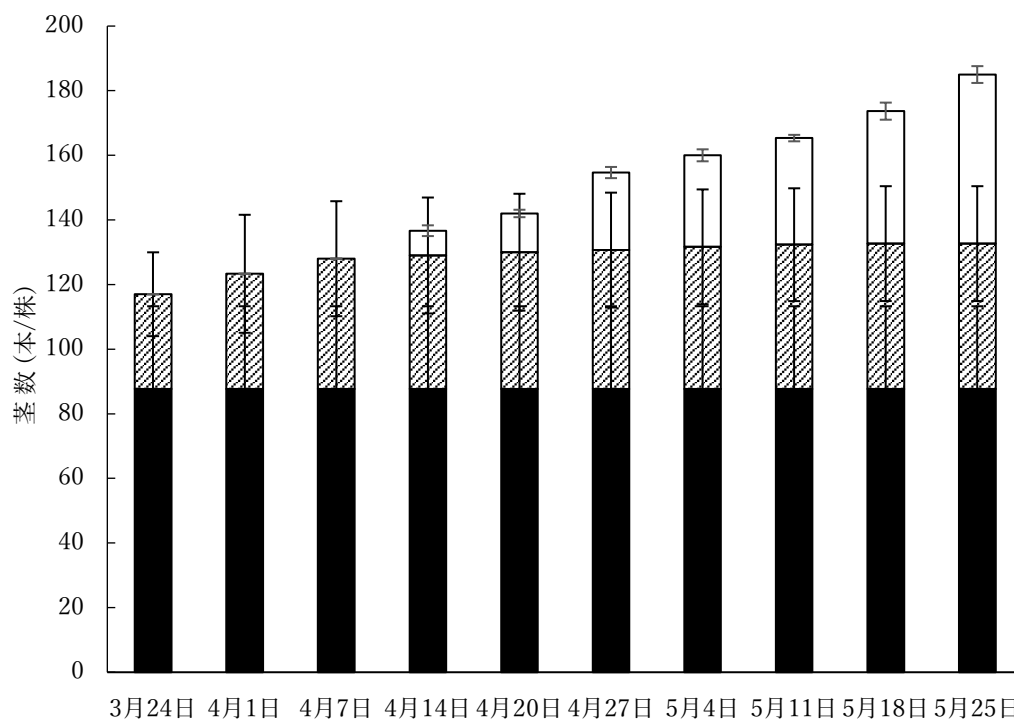
第 6-3 図 枯死分げつの縦断面。

①は収穫時の刈取り面，②は分げつの基部側を，それぞれ示す。



第 6-4 図 旧分けつの生長点の様相.

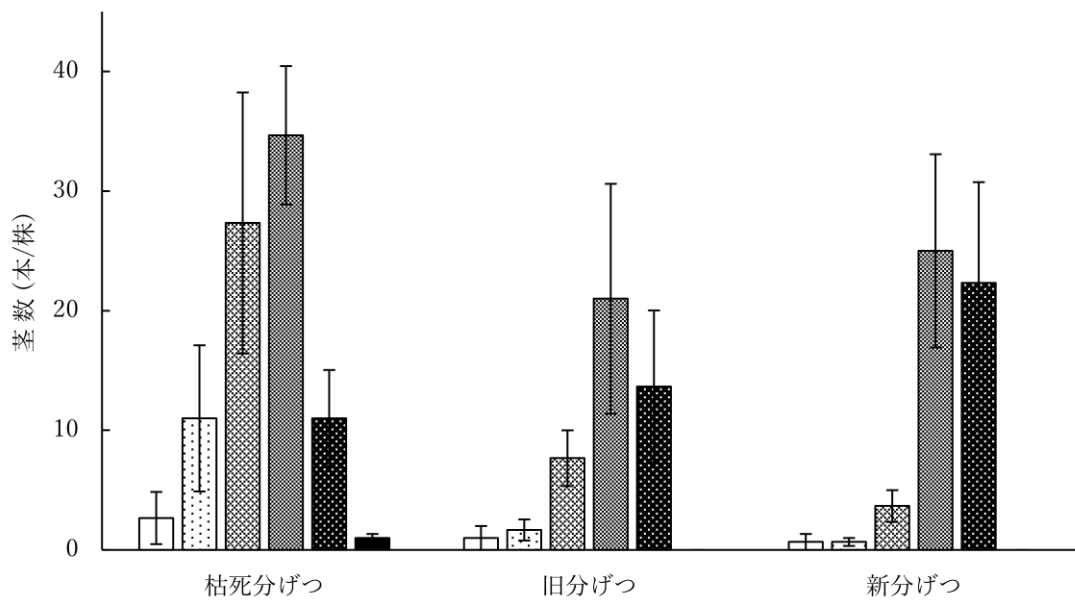
①は生長点，②は生長点をフード上に覆っている葉原基を，それぞれ示す.



第 6-5 図 分げつ形成の推移.

■ : 枯死分げつ, ▨ : 旧分げつ, □ : 新分げつ.

いずれもバーは標準誤差を示す(n=3).

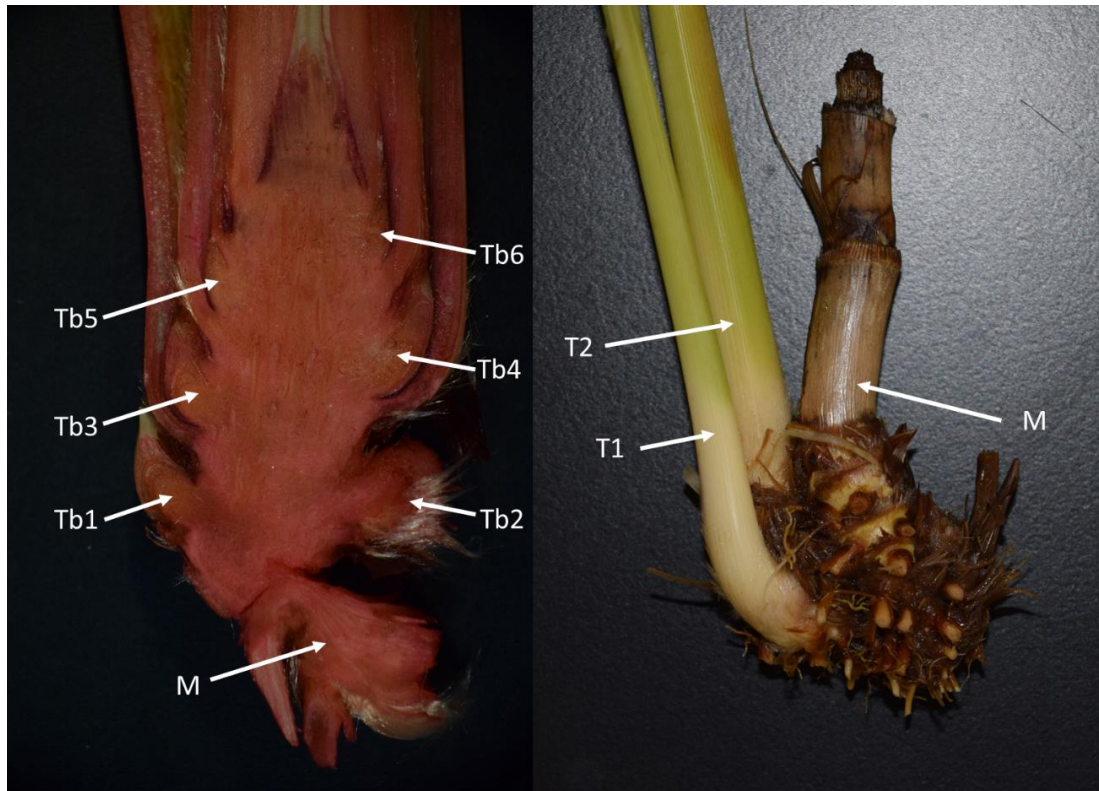


第 6-6 図 それぞれの分げつの形成数と形成位置の関係

$0 \leq \square \leq 5.0\text{cm}$, $5 < \text{点線} \leq 10.0\text{cm}$, $10 < \text{斜線} \leq 15.0\text{cm}$,
 $15 < \text{格子} \leq 20.0\text{cm}$, $20.0 < \text{黒点} \leq 25.0\text{cm}$, $25.0 < \blacksquare \leq 30.0\text{cm}$.

数字は株の中心からそれぞれの分げつまでの距離を示す。

いずれもバーは標準誤差を示す(n=3).

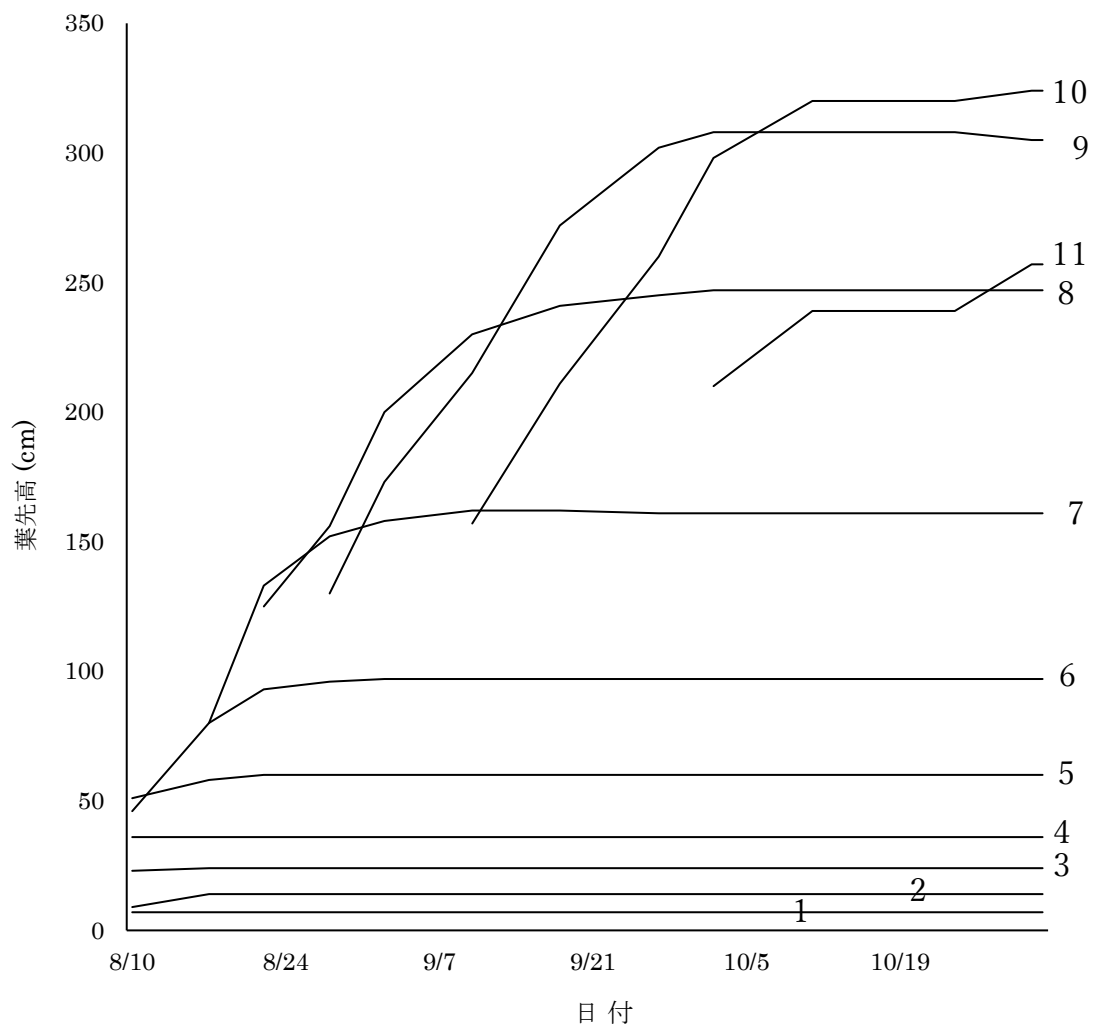


第 6-7 図 エリアンサスの苗の基部およびその縦断面

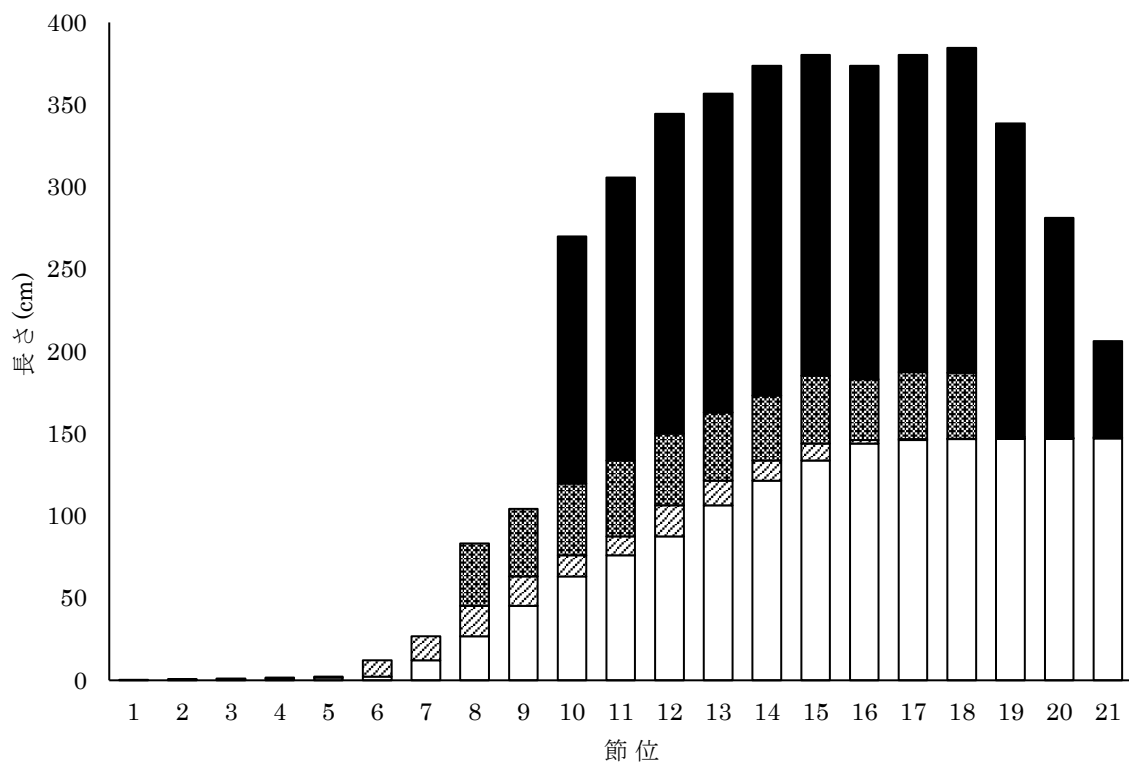
左：苗の基部の縦断面，右：苗の基部(根を除去)。

縦断面をサフラニンで染色している。

M は母茎，T は分けつ，Tb は分けつ芽を示し，アルファベットに付随する数字は向頂的にナンバリングした分けつと，分けつ芽とを示す。



第 6-8 図 エリアンサスの分けつにおける葉の生長曲線
 図中の数字は、葉位を示す。



第 6-9 図 エリアンサスの各葉位の葉身，葉鞘，節間の長さの推移の例。
□：下位節間長の累積，▨：節間長，▩：葉鞘長，■：葉身長。

第2部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第7章 穂の形態と形成の解析

エリアンサスが高い物質生産性を発揮することに、分げつ形成が大きく貢献していることが指摘されており(Hattori ら 2010), とくにそれぞれの分げつの生育期間の長短が物質生産量を規定している(金井ら 2017a). それぞれの分げつの生育期間は、分げつがいつ形成されて生育を開始したか、いつ相転換して幼穂形成が進むか、それと刈取り時期との関係によって決まる(金井ら 2019a). したがって、分げつの生育を理解し、ひいては群落構造との関係を考察するために、分げつにおける幼穂形成過程を明らかにしておく必要がある.

また、エリアンサスは熱帯・亜熱帯原産であり、日本では出穂・開花しても南西暖地を除いて稔実した種子ができないといわれている. しかし、地球温暖化が進んだ場合、種子が形成されて栽培地域から逸出したり、他種植物と交配する可能性も想定しておく必要がある.

イネ科作物の花序は穂と呼ばれ、他の植物の花序とは、かなり異なる形態を呈するため、生殖器官の構造や形成に関する書籍でも独立した章として取り扱われることがある(熊沢 1979, Greyson 1994). イネ科作物の穂の構造については古くから報告があるが、幼穂形成過程についての詳細な記載は、イネ(松島 1957), トウモロコシ(Cheng ら 1983, Miller 1919), コムギ(Percival 1921, 稲村 1955, Toyota ら 2001), オオムギ(稲村 1955, Sattler 1973)を除くと必ずしも多くない. エリアンサスと近縁のサトウキビについても古い報告(Cobb 1906, Dillewijn 1952, Dillewijn 1971, 板倉ら 1984)があるくらいで、エリアンサスの穂の構造や幼穂の形成については、これまで検討されてこなかったとって過言ではない. そこで、本研究では、以上のような点を検討していくための基礎的な知見を得るために、エリアンサスの穂の構造を把握するとともに、幼穂形成過程について検討を行った.

7-1. 材料と方法

本研究で用いたエリアンサス(*Saccharum arundinaceum* Syn. *Erianthus arundinaceus*)は、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培した品種 JES1 である。除草と耕起を行った圃場に 2015 年 9 月 17 日に、条間 2m×株間 1m の栽植間隔で 565 株の苗を定植した(群落 C)。施肥および灌水は行わず、必要最低限の手取り除草のみを行った。2017 年 4 月 24 日に群落を二分し、一方はそのままとし(中密度区)、他方は条間 2m×株間 2m の栽植間隔に間引いた(低密度区)。

2018 年 5 月 25 日以降、これらの群落において標準的な生育を示した株を選定し、適宜、分けつを採取して解剖し(計 250 本以上)、実体顕微鏡(OLYMPUS 社 SZ61 型)で茎頂の様相を観察して、幼穂形成過程を検討した。また、出穂期(2018 年 10 月から同年 12 月)に出穂した分けつを採取して(計 30 本以上)、穂、小穂および小花の構造について観察を行い、比較形態学的な観点から考察を行った。

7-2. 結果と考察

(1) 穂の基本的な構造

本研究では、花序を穂(松尾ら 1990)、穂が発育形態学的に完成して出穂するまでの段階を幼穂と呼ぶことにする(松尾ら 1990, 松島 1957, 星川 1975)。花序の構造は分類学的に重要な形質であるが、変異が大きく分類が容易ではない。通常は、まず単軸分枝する無限花序の総穂花序と、仮軸分枝する有限花序の集散花序とに大別することが多い(Weberling 1989, 原 1994)。

エリアンサスの穂は、総穂花序に属する総状花序であるが、以下でみるように多重構造を呈するので、複総状花序に相当する。また、出穂した穂では穂軸(花序の主軸)に着生する下位の 1 次枝梗(側枝)ほど高次の分枝を形成し大型化するため、穂全体の外観が円錐形に見えることから、円錐花序にも分類される(第 7-1 図)。

イネでは穂首節よりも頂端側を穂としている(松尾ら 1990)。エリアンサスの穂を見ると穂首節が明瞭に確認できない場合が多いが、これは最

も基部側に形成されている 1 次枝梗が穂首節と非常に近接しているために、穂首節が不明瞭になっている可能性が高い。このような場合、最も基部側の 1 次枝梗が穂軸に着生する部位には毛が形成されており、これよりも頂端側の 1 次枝梗が穂軸に着生する部位とは様相が異なる(第 7-2 図)。そこで、本研究では穂首節が明瞭に同定できない場合、便宜上、最基部の 1 次枝梗から穂軸の先端までを穂長とした。エリアンサスの穂長は 50cm 程度のものが多く、イネの穂が 12~15cm である(星川 1975)のに対して長大である。ただし、エリアンサスと分類的に近縁のサトウキビ(Tsuruta ら 2012)の穂とは同程度の長さである。

エリアンサスの 1 本の穂には平均 70 本ほどの 1 次枝梗が形成される。このとき、穂長と 1 次枝梗の数との間に有意な正の相関関係は認められなかった(第 7-3 図)。1 次枝梗は穂軸に 4 本前後がまとまって分枝するが、それらの 1 次枝梗間の距離が非常に近いため、1 次枝梗が輪生しているように見える(第 7-4 図)。この 1 次枝梗のまとまりどうしの間隔は向頂的に狭くなる。1 次枝梗から 2 次枝梗が、また 2 次枝梗から 3 次枝梗が、それぞれ互生をなして形成される。本研究の範囲では、4 次枝梗以上は認められなかった。

穂軸の横断面は基部では円形を呈しているが、1 次枝梗が分枝する部分では窪みが認められ、その窪みは頂端側ほど明瞭となる(第 7-5 図)。また、1 次枝梗が着生する穂軸部位に膨らみが認められる(第 7-6 図)。サトウキビでも似た構造が cushion joint(まくら節)として報告されており(Brandes and Starrett 1929, Dillewijn 1952, Dillewijn 1971)、これに相当する構造と考えられる。cushion joint から数本の枝梗が形成されているように見える(第 7-6 図)。この部分を、サトウキビの穂における知見も参考にしながら検討すると、1 次枝梗の最基部に形成される 2 次枝梗の着生位置と、2 次枝梗の最基部に形成される 3 次枝梗の着生位置が、1 次枝梗が穂軸に着生する部位と非常に近いため、cushion joint から数本の枝梗が着生しているように見えると推察される。

エリアンサスの穂軸および各次元の枝梗の先端、また穂軸と各次元の枝梗の上には、小穂が形成される(第 7-7 図)。小穂は、護穎とそれに囲ま

れた小花を指し(松尾ら 1990), イネ科作物の穂を構成する単位構造として重要なものである(Greyson 1994).

エリアンサスの小穂は, 着生様式の違いによって2種類に分けられる. すなわち, 柄を介して穂軸や枝梗に着生する有柄小穂と, 柄はなく直接, 穂軸や枝梗に着生する無柄小穂とである(第7-7図). この2種類の小穂が, 対をなして着生する. このような有柄小穂と無柄小穂が対をなして着生する様式は, サトウキビでも認められる(Dillewijn 1952, Dillewijn 1971, Engard and Larsen 1948). ただし, エリアンサスでは, 穂軸および各次元の枝梗の先端では, 2個の有柄小穂と1個の無柄小穂がセットになって着生しているように見える. これは, 穂軸および各次元の枝梗の先端に有柄小穂が分化し, そのすぐ基部側に1対の有柄小穂と無柄小穂とが形成されるため, 合計3個の小穂がまとまって着生するように見えている可能性が高い(第7-7図).

(2) 小穂と小花の構造

エリアンサスの有柄小穂と無柄小穂は, 基部に柄があるかないかを除いて, 小穂自体の構造は同じである. すなわち, 有柄小穂と無柄小穂のいずれも, 1対の護穎(苞穎)に囲まれており, 護穎からは毛が生じている(第7-8図). イネ科作物の場合, 1小穂に形成される小花の数は, 基本的に種によって決まっており(熊沢 1979), 1小穂2小花の場合が多い.

イネは1小穂1小花である(星川 1975)が, これを進化的にどう理解するかは研究者によって諸説ある. ただ, 多くの研究者は1小穂2小花で, その一方の小花が退化したと考えている(前川ら 1968, 清水 1979). トウモロコシは1小穂2小花である. サトウキビは1小穂1小花であり(大井 1978), サトウキビに近縁のエリアンサスも1小穂1小花であることが本研究の結果, 明らかになった.

エリアンサスの小花の基本的構造も, 有柄小穂と無柄小穂とで違いは認められない. すなわち, 小穂の中に, 外穎と内穎とに囲まれた1つの小花が位置する. 外穎と内穎は, それぞれ花序の苞葉と小花の小苞に当たる. その内側に, 基部側から頂端側に向かい, 2枚の鱗皮, 3本の雄

蕊，1本の雌蕊(心皮)がある。それぞれの雄蕊は葯と花糸から，雌蕊は子房と，先端が2本に分かれた柱頭からなる(第7-8図)。

エリアンサスの小花では，外穎は向軸側に，内穎は背軸側に着生する。外穎と内穎は外側が毛で覆われ，開花すると穎が開き雌蕊の柱頭と雄蕊の葯が外部に露出する。このような開花様式はサトウキビに類似している(Cobb 1906, Dillewijn 1952, Dillewijn 1971)。

以上のように，エリアンサスの小穂および小花の構造は多くのイネ科作物に認められるところに共通する点が多く，またとくにサトウキビ(Brandes and Starrett 1929, Cobb 1906, Dillewijn 1952, Dillewijn 1971, Engard and Larsen 1948)と非常に類似していることが明らかになった。

(3) 幼穂の形成過程

エリアンサスの株を構成するそれぞれの分けつでは，条件が揃うと生長点が相転換し，幼穂形成が進み，やがて出穂に至る。この幼穂形成過程を明らかにするために，異なる時期に分けつを採取して茎頂近傍を解剖し，茎頂における幼穂の形態が複雑化していく順に並べ，幼穂形成過程を再現することを試みた。その際，近縁であるサトウキビの幼穂形成に関する既往研究(Moore 1971, 板倉ら 1984)を参考にして解析を進めた。その結果，相転換以後の幼穂形成は，以下のような5つの生育段階(栄養相の段階を除く)が認められた。

ステージ 0(栄養相)：生殖相への転換がまだ起こらずに，栄養相の段階にある茎頂をステージ 0 とする。この段階では，ドーム状の茎頂を数枚の葉原基と幼葉が取り囲んでいる(第7-9図①)。

ステージ 1(苞原基分化期)：茎頂全体が大型化するが，とくに軸方向の伸長が顕著である。その後，茎頂の基部に隆起が形成される。この隆起は，苞原基である(第7-9図①A, B)。

ステージ 2(1次枝梗分化期)：茎頂の側面の基部(苞原基の頂端側近傍)に突起が形成される。この突起は，1次枝梗の原基である(第7-9図②)。1次枝梗の形成は，茎頂の基部側で始まり，向頂的に進んで茎頂全体に及ぶ。

ステージ 3(高次枝梗分化期): 1次枝梗の分化が茎頂先端まで進むと、基部に分化している1次枝梗上に突起が形成される。この突起は、2次枝梗の原基である(第7-9図③A, B)。2次枝梗の分化は、それぞれの1次枝梗において向頂的に進むとともに、茎頂全体においても向頂的に進む。これに続いて、一部の2次枝上に3次枝梗が分化するが、短時間で進み、部位による時間的な差はほとんど認められない。

ステージ 4(小穂分化期): 1次枝梗、2次枝梗および、おそらく3次枝梗の分化が茎頂先端まで進むと、それぞれ基部側に位置する各次元の枝梗、すなわち、早時に分化した各次元の枝梗に、新たに突起が形成される。この突起は、小穂原基群である。小穂の分化も茎頂全体で短時間に進むため、時間的な前後関係は必ずしも明らかではない。本研究における観察の範囲では、穂軸の先端が小穂に分化することや異なる形成段階の比較対象から、各次元の枝梗における小穂分化は求基的に進む可能性が高い。穂軸や各次元の枝梗に形成された小穂原基群はその後2分し、最終的に1対の有柄小穂と無柄小穂とに分化すると考えられる(第7-9図④)。

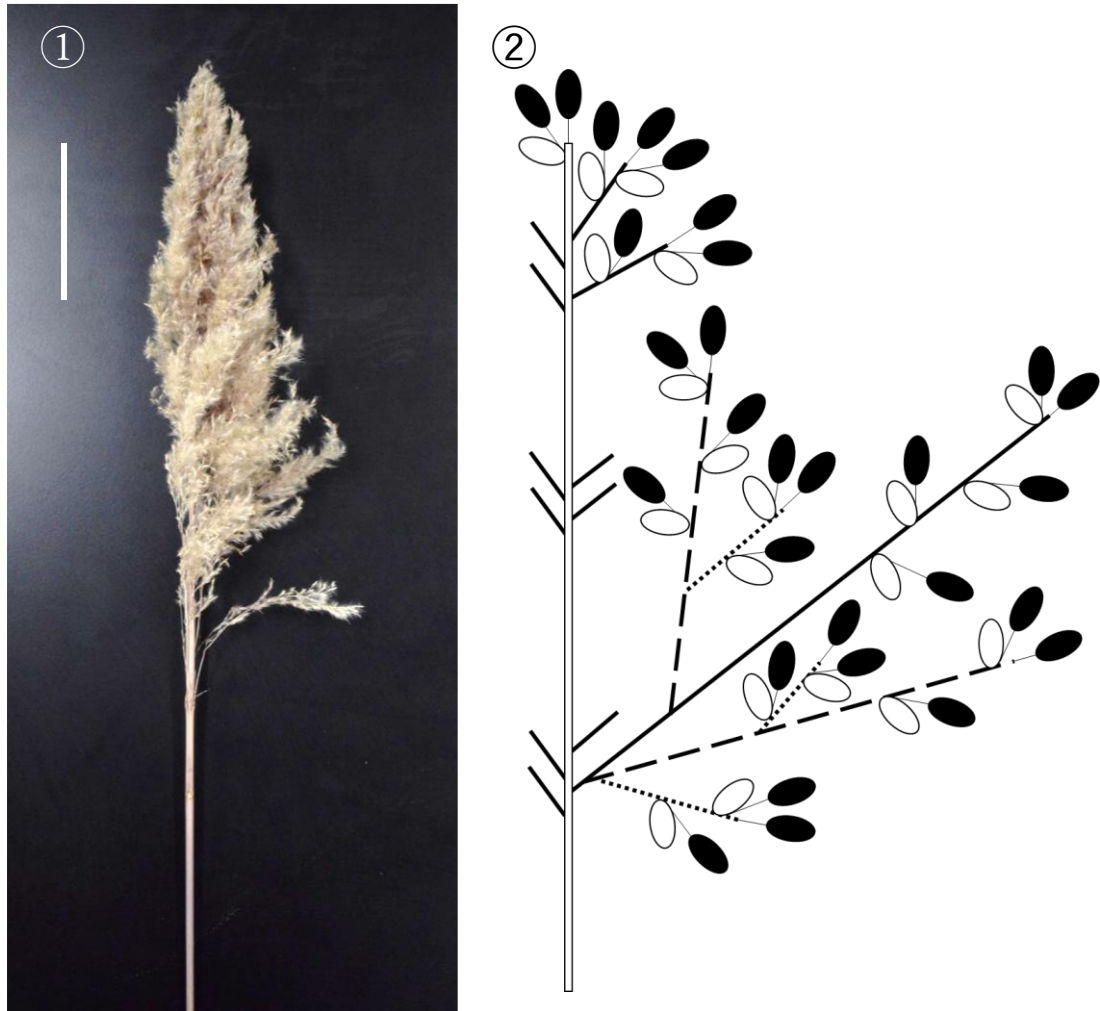
ステージ 5(小花分化期): 小穂原基に護穎、および小花を構成する花器、すなわち、外穎、内穎、鱗被、雄蕊、雌蕊が、順次、向頂的に分化する(第7-9図⑤)。花器の形成が進み、小花が成熟すると幼穂として完成する。その後、幼穂よりも下にある節間が伸長して出穂・開花する。

以上、本研究の結果、エリアンサスの幼穂形成はサトウキビの幼穂形成(Moore 1971, 板倉ら 1984)に極めて類似していることが明らかとなった。ただし、生長点が相転換する際に、イネの幼穂形成過程で観察される苞原基(松島 1957)が見られたので、新たに苞原基分化期を設けた。本研究では Moore(1971)のような組織切片の観察ではなく、板倉ら(1984)と同様に解剖に基づく外部形態で生育段階を同定していることもあって、花器形成以降、出穂・開花までは板倉ら(1984)と同様に、1つのステージとして区分し小花分化期とした。

以上、本研究の結果、エリアンサスの穂の構造と幼穂形成過程を明らかにした。エリアンサスの株を構成する分けつにおける幼穂形成は必ずしも同調しておらず、すべての分けつから出穂するわけでもないことを

明らかにしている(金井ら 2019a). エリアンサスの出穂については, それぞれの分けつの生長点がいつ相転換して, 幼穂形成がどのように進むかという時期と時間の観点からも検討していく必要がある.

いずれにしても, 本研究の結果, エリアンサスの穂の基本構造と幼穂形成過程が明らかになったことは, 株の生育(金井ら 2017a, 板倉ら 2018), ひいては群落の形成(金井ら 2017a, 金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)を理解するために役立つ.

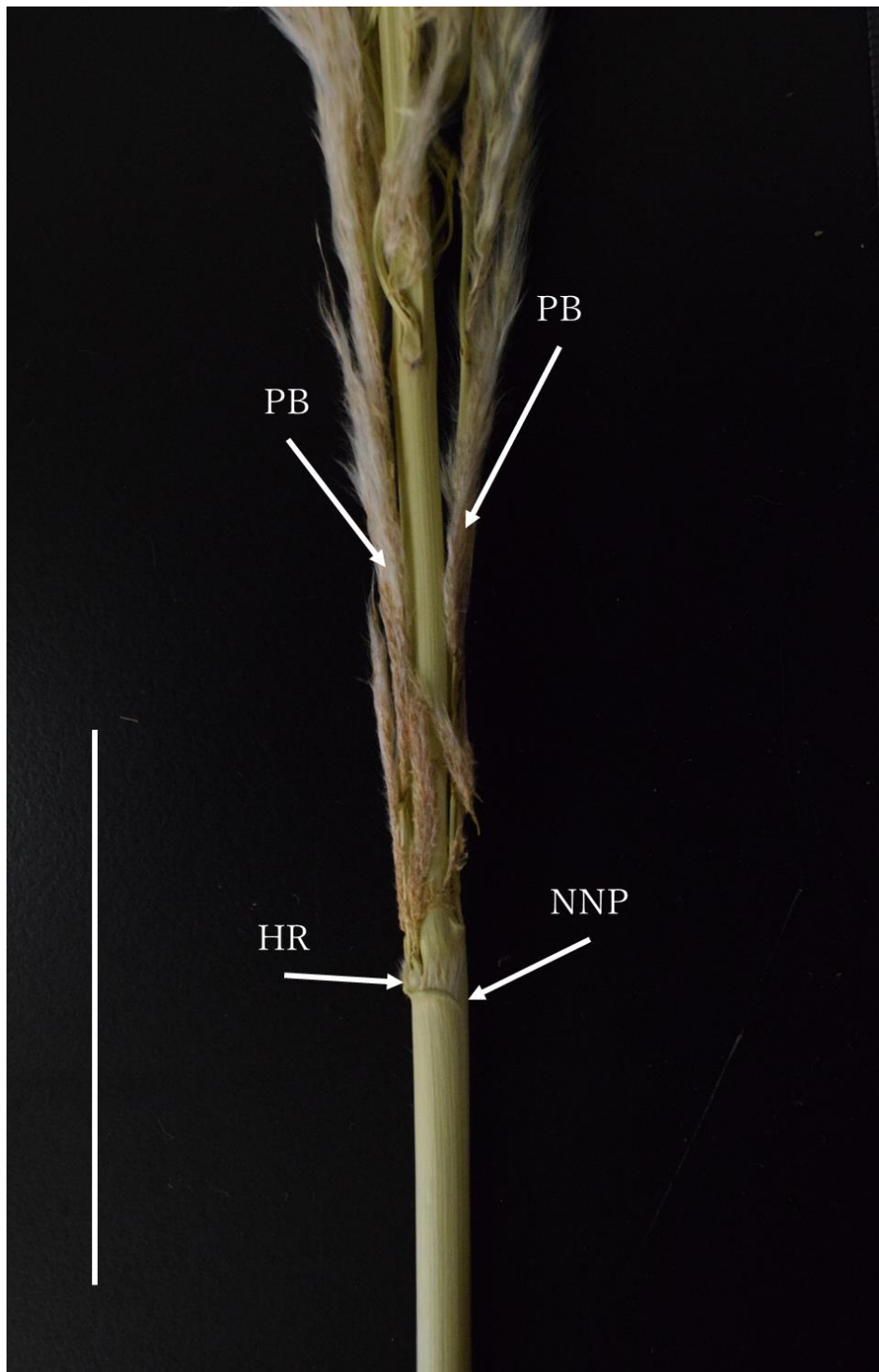


第 7-1 図 エリアンサスの穂と構造を示す模式図.

①穂の外観, ②穂の構造の模式図.

白抜き線: 穂軸, 実線: 1次枝梗, 破線: 2次枝梗,
点線: 3次枝梗, 円形(黒): 有柄小穂, 円形(白): 無柄
小穂.

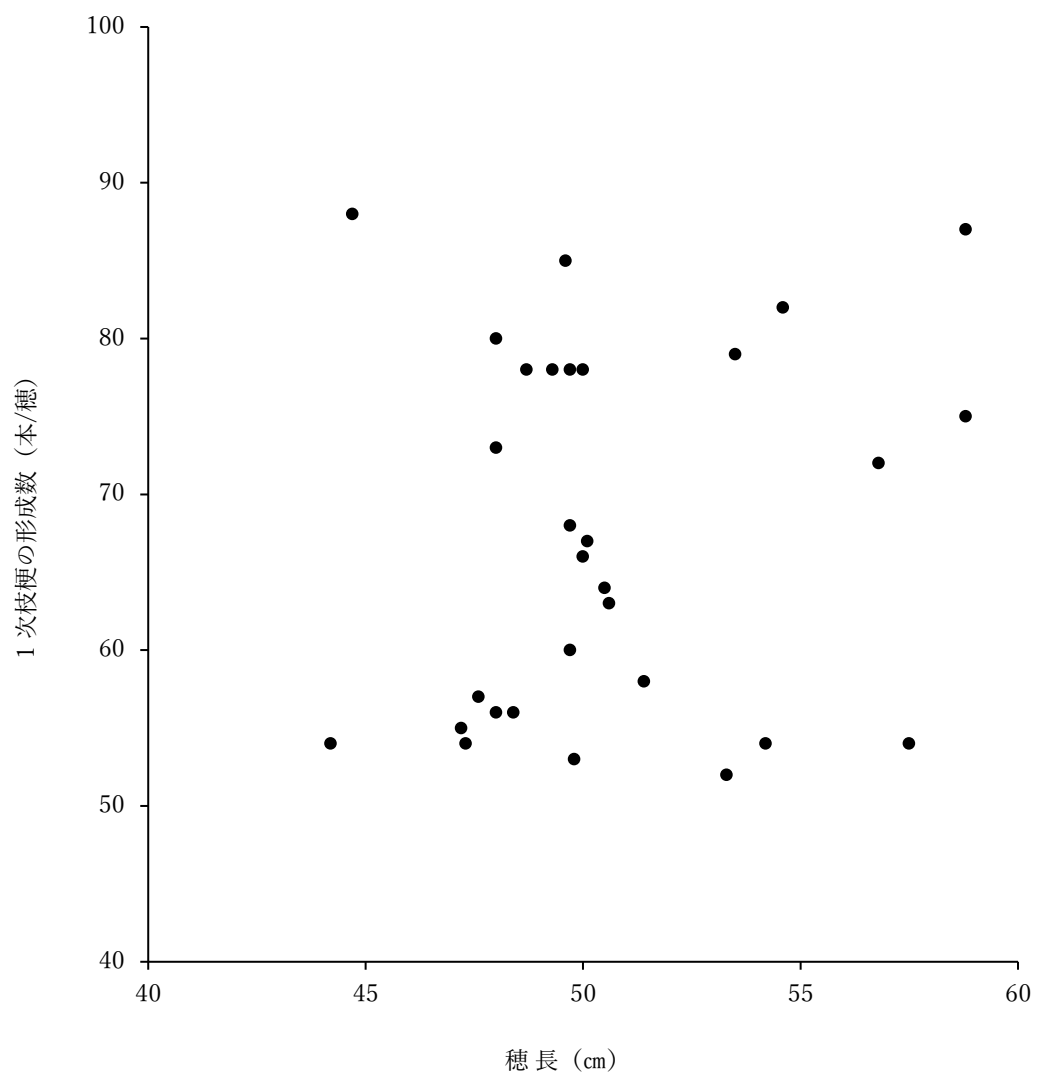
図中のバーは 10cm を示す.



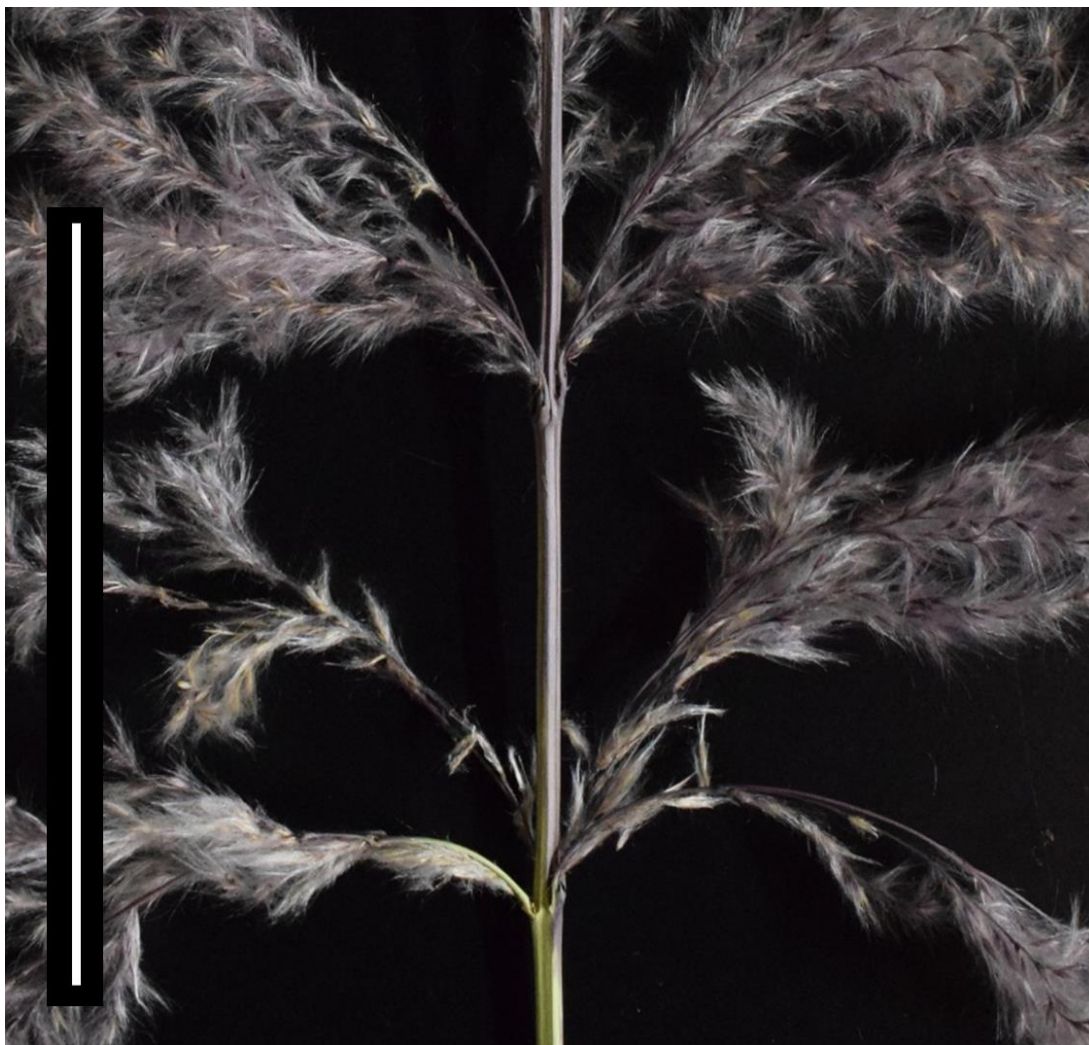
第 7-2 図 穂軸の基部に形成された 1 次枝梗.

NNP : 穂首節, HR : 毛, PB : 1 次枝梗.

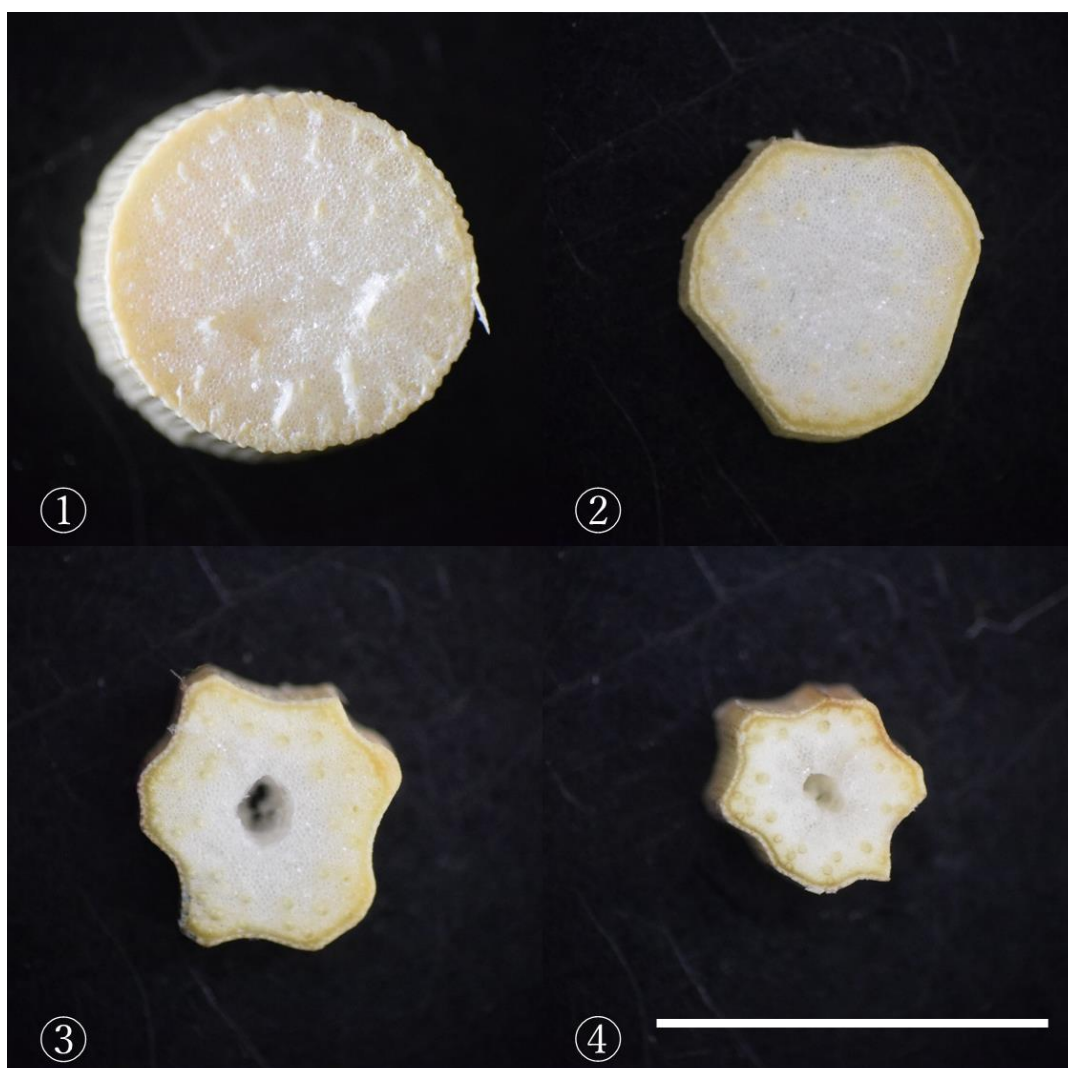
図中のバーは 5cm を示す.



第 7-3 図 穂長と 1 次枝梗の数との関係.



第 7-4 図 エリアンサスの穂軸に形成される 1 次枝梗の着生の様相.
説明のためにいずれの 1 次枝梗も周辺側に広げている
ため、インタクトな形態ではない.
図中のバーは 10cm を示す.



第 7-5 図 エリアンサスの穂軸の断面の様相.

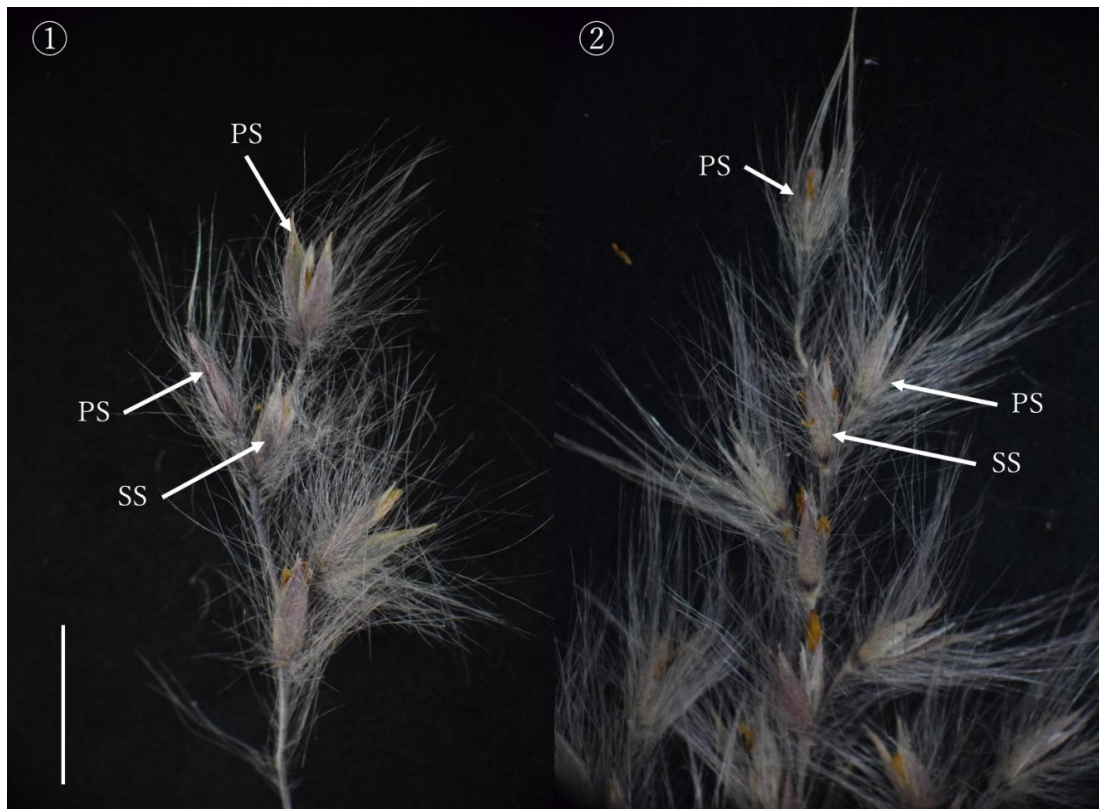
①：最も基部側に着生する 1 次枝梗の位置から 10cm 基部側の横断面，②：最も基部側に着生する 1 次枝梗の位置から 10cm 先端側の横断面，③：最も基部側に着生する 1 次枝梗の位置から 20cm 先端側の横断面，④：最も基部側に着生する 1 次枝梗の位置から 30cm 先端側の断面の様相.

図中のバーは 5mm を示す.



第 7-6 図 穂軸に 1 次枝梗が着生する部位の様相。

PB : 1 次枝梗, SB : 2 次枝梗, TB : 3 次枝梗,
CJ : cushion joint(まくら節).

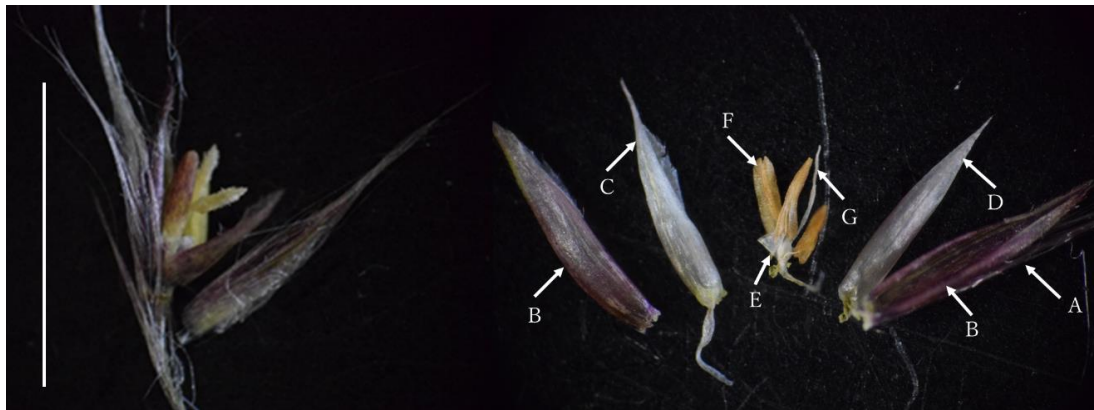


第 7-7 図 有柄小穂と無柄小穂.

①穂軸に形成される小穂, ②1次枝梗に形成される小穂.

PS: 有柄小穂, SS: 無柄小穂.

図中のバーは 5mm を示す.

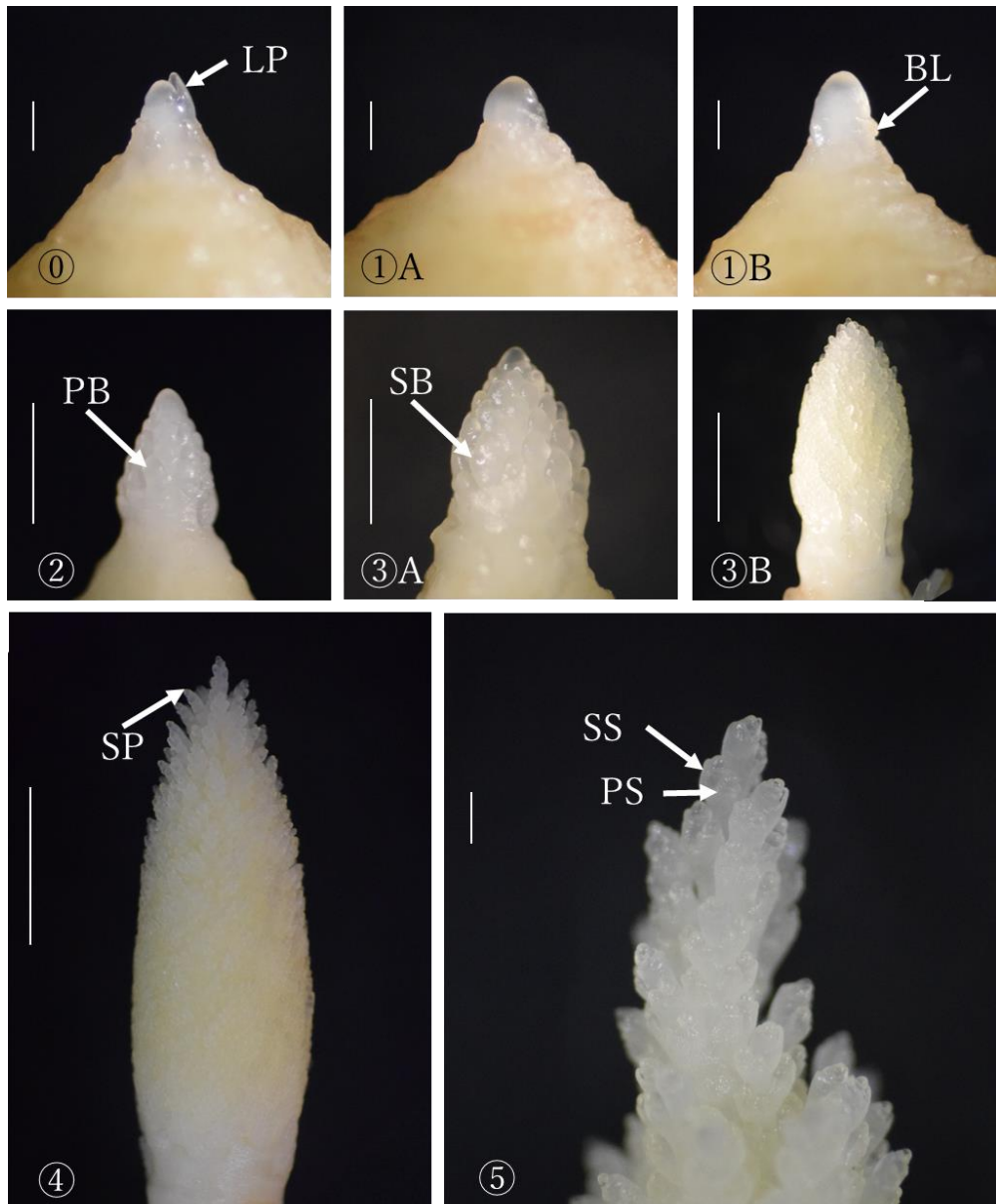


第 7-8 図 エリアンサスの小穂と小花の構造.

左：小穂の外観，右：解剖した小穂および小花.

A：毛，B：護穎，C：外穎，D：内穎，E：鱗皮，
F：雄蕊，G：雌蕊(心皮).

図中のバーは 5mm を示す.



第 7-9 図 エリアンサスの幼穂形成過程.

①：栄養相の生長点と葉原基，①A：大型化した茎頂，
 ①B：苞原基分化期，②：1次枝梗分化期，③A：高次枝
 梗分化期(③Aより③Bが進んだ段階)，④小穂分化期，
 ⑤小花分化期.

LP：葉原基，BL：苞原基，PB：1次枝梗，SB：2次枝梗，
 SP：小穂原基，SS：有柄小穂，PS：無柄小穂.

図中のバーは，①，①A，①B，⑤は 300 μ m，②，③A，
 ③B，④は 1mm を示す.

第 2 部 群落を形成する株の発育形態学的解析

第 8 章 根系形成の発育形態学的解析

エリアンサスは乾燥・過湿条件や貧栄養土壌でも旺盛な生育を示し、ストレス耐性が高いことが知られている(Matsuo ら 2002, Sekiya ら 2014). また, 多年生作物で, 毎年, 地上部が再生するが, それに伴って新しい根が形成され, 古くなった根が枯死脱落して土壌中に炭素が供給されていくことがわかっている(Sekiya ら 2013). 枯死脱落した根の一部は土壌微生物によって分解されて二酸化炭素が発生するが, 残りは土壌中に炭素を貯留することになる.

エリアンサスとネピアグラスをインドネシアのスマトラ島の鉱山跡地において栽培し, イングロースコア法を利用して土壌表層 30cm における根の形成と枯死とを解析を行ったところ, 土壌表層 30cm における土壌炭素量が増加することが報告されている(Sekiya ら 2015). また, 根からは有機物が分泌されており(Iijima ら 2008), この現象も土壌中への炭素供給につながる. このように, 多年生植物の根系形成に伴う土壌中への炭素供給, ひいては炭素貯留は地球温暖化対策となると考えられる.

しかし, まだ研究事例が少ないことに加え, これらの検討は土壌表層 30cm に限定したものである. さらに, 土壌断面法によるフィールド研究では, 根域は少なくとも深さ 2.6m までは広がっていることが確認されているが(Sekiya ら 2013, Sekiya ら 2014), その形成過程を含め, 不明な点が多く存在し, エリアンサスの根の形成や, 枯死脱落による土壌中への炭素供給量・貯留量に関する定量的データを蓄積していく必要がある.

そこで, 本研究では出穂期における根系形態を改良土壌断面法で定量的に把握するとともに, 根量の相対的な割合が高い土壌表層 30cm における根の形成と枯死とをイングロースコア法を利用して追跡した. 両者の調査結果を踏まえて根系形成の様相について考察をしたうえで, 土壌深さ 2m までの根域における根系形成に伴う土壌中への炭素供給量の推定を試みた.

8-1. 材料と方法

(1) 材料の栽培

本研究では，東京農業大学農学部(神奈川県厚木市)の圃場(関東ローム層の赤色土壌)で栽培しているエリアンサス(*Saccharum arundinaceum* Syn. *Erianthus arundinaceus*)品種 JES1 の群落を対象とした．手取り除草を行ったあと，耕耘機で 20cm ほど耕起した圃場に，2014 年 6 月 13 日(群落 A)および 2015 年 5 月 26 日(群落 B)，エリアンサスの苗を条間 1m×株間 1m の栽植間隔で定植した(11 株×10 列)．両群落とも施肥と灌水は行わず，定植した初年目のみ株周囲の除草を行った．

このように栽培した群落 A および B において 2 つの根系調査を行い，根の形成・枯死の過程を調査した．

(2) 改良土壌断面法

1 つは，改良土壌断面法(森田・豊田 1998, Sekiya ら 2013)を用いて，定植 1 年目と 2 年目の出穂期における根系分布を明らかにした．この方法は土壌を攪乱する破壊的な方法であるため，継続して同じ根系の形成過程を追跡することはできないし，頻繁に実施することも現実的ではない．そこで，隣接する場所に，年度をずらして 2 つの群落を用意した．また，イネ科作物では出穂期前後に節根の形成がほぼ終了すると経験的に知られていることを考慮した上で，定植 1 年目と 2 年目の群落の出穂期に調査することで経年変化を調査した．すなわち，群落 A は定植 2 年目となる 2015 年 11 月 5 日に，群落 B は定植 1 年目となる 2015 年 10 月 16 日に，それぞれ改良土壌断面法による根系調査を行った．

いずれの群落においても，生育調査の結果から，草丈と茎数が標準的な生育をした株を選定し，その株の近くに塹壕(幅 2m×奥行 1m×深さ 2m)を掘り，調査する土壌断面を垂直に整形した後，株から左右両側に 40cm ずつ，また深さ 2m まで，縦横いずれも 10cm ごとに採土容器(容積 100cc)をハンマーで打ち込み(第 8-1 図)，根を含む土壌を採取した．反復は 2 とした．採取した土壌から迅速かつ丁寧に根を洗い出し，A3 Transparency

Unit(EPSON)とスキャナーEXPRESSION 10000EL(EPSON)を用いて解像度 300dpi で画像を取り込み、256 グレースケールに変換した後、根長測定ソフト Win-RHIZO Basic LA 2400 (Regent Instrument, Quebec Canada)を用いて直径別の根長を計測した。根長を測定後、80°Cで2日間乾燥して重さを測定した。このようにして得られた根長と根重のデータを土壌体積で割って根長密度と根重密度を、それぞれ算出した。根長密度の等高線図は Excel 2013(Microsoft 社)を用いて作図した。また、根長密度および根重密度を利用して根の深さ指数(小柳 1998)も算出した。根の深さ指数は、根系の重心に相当する深さに相当する指標で、 Σ (それぞれの土層の深さの中央値, $\text{cm} \times$ その層に含まれる根長あるいは根重の割合)で定義される(小柳 1998)。

(3) イングロースコア法

もう1つの根系調査では、イングロースコア法(Sekiya ら 2015)を利用した。この方法を採用すると根の現存量だけでなく、形成量と枯死量とを比較的容易に区別して取り扱うことができる利点がある。ただし、改良土壌断面法と異なり、土壌深くまで調査することにはなじまない。そこで本研究では、既往研究(関谷ら 2015)や予備的な観察の結果から、また実施上の制約との兼ね合いから、土壌表層 30cm を対象として、定植1年目の群落については7月から、また定植2年目の群落は6月から、いずれも翌年の2月まで、1~2 か月ごとに調査を行った。

イングロースコア法では、生育時期 A に土壌コアを掘り出し、含まれている根量を現存量 MA とする。土壌コアを掘り出した場所にメッシュバッグ(プラスチック網製の円筒)を埋め、根が含まれていない土壌を充填した(第 8-2 図)。このメッシュバッグを、1~2 か月後の生育時期 B に掘り出して、その中に存在する根量を YB とする。生育時期 A にメッシュバッグを埋めた時点では中に根はなかったので、根量 YB は生育時期 A から B までの間に新たに形成された根量ということになる。また、生育時期 B に新たに土壌コアを掘り取り、その中に含まれていた根量を現存量 MB とする。このとき、以下のような式が成り立つはずである。

生育時期 A の現存量(MA)+生育時期 A~B に形成された根量(YB)－生育時期 A~B に枯死した根量(X)=生育時期 B の現存量(MB)

したがって、上記の手順で MA, YB, MB を実測すれば、根の枯死量 X を算出できる。

本研究では対象株数が限られているため、調査箇所は、調査株の株際(株中心から 20cm)、条間の 2 株の中央(同 50cm)、相互に隣接する 4 株の中央の 3 か所から、それぞれ 3 反復ずつ根を含む土壌コアを採取した。採取した土壌コアから迅速かつ丁寧に根を洗い出し、80℃で 2 日間乾燥させた後、重さを測定して平均値を算出した。また、乾物重測定後に CN コーダー(ヤナコテクニカルサイエンス株式会社)で成分分析し、根の乾物重に対する炭素の含有率を測定した。

8-2. 結果

(1) 根量の分布

定植 1 年目と 2 年目のエリアンサス群落を対象として、出穂期に改良土壌断面法で根系調査を行った結果、いずれの群落においても、土壌表面から 2m までのすべての深さで根の存在が確認された(第 8-3 図)。深さ別の根量分布をまず大まかに捉えるために、便宜上、根長密度が 0.5cm/cm³ 以上の部分をみると、定植 1 年目は深さ 1m までであったが、2 年目には深さ 2m までに拡大していた。

また、水平方向の経年変化をみると、定植 1 年目は株からの距離にほとんど関係なく、土壌表層(深 0~30cm)に根が一様に分布していたが、中層(深さ 30~100cm)では株直下の根量が多い傾向が認められた。2 年目になると表層から中層にかけて根長密度が増加するとともに、株直下だけでなく、中層でも根が一様に分布していた。さらに、定植 2 年目には下層(深さ 100~200cm)においても根量が増えていた。

深さごとの根長密度と根重密度の様相は、いずれも定植 1 年目には土壌表層に根が多く、深さ 2m までに分布する根長の 55%、根重の 61%がそれぞれ土壌表層 30cm に分布していた。定植 2 年目になると根系が深く広がり、土壌表層 30cm までに分布する根長は定植 1 年目とほぼ同じ

であるが、根重は約 2 倍に増加した。その結果、定植 2 年目では土壌表層 30cm に分布する割合が低下し、深さ 2m までに分布する根長の 27%、根重の 42%が、それぞれ土壌表層に分布していた。

また、土壌表面から深さ 2m までに分布する根長および根重は、いずれも定植 2 年目に 1 年目の約 2 倍となったが、どの深さで増加したかは根長と根重とで異なっていた。すなわち、根長は中層~下層、また根重は表層~中層で、それぞれの増加が著しかった。また、根長密度と根重密度を利用して根の深さ指数を算出した結果、根長では定植 1 年目が 44.3cm、定植 2 年目が 72.9cm で、根重では定植 1 年目が 33.2cm、定植 2 年目が 50.4cm であり、定植 2 年目に根系分布が著しく深くなったことが確認できた。なお、いずれの年においても、根長密度の深さ指数 > 根重密度の深さ指数であった。

根長密度と根重密度のデータを利用して根量を試算したところ、定植 1 年目が根長で約 10km/m²、根重で約 200g/m² であり、定植 2 年目が根長で約 20km/m²、根重で約 606g/m² という値が得られた。すなわち、根長は約 2 倍、根重は約 3 倍に増加していた。

さらに、それぞれの深さにおける根長を根重で割り、深さ別の比根長(森田ら 2013b)を算出したところ(第 8-5 図)、いずれの群落であっても、概して深いほど比根長の値が大きい傾向があり、いずれの深さにおいても 1 年目より 2 年目の方が小さかった。1 年目の比根長は深さ 1m と 2m 辺りで特に大きい値となることが特徴的であった。

(2) 直径別密度の分布

土壌表層(深さ 0~30cm)と土壌全層(深さ 0~2m)のそれぞれにおける直径別の根長を調査した結果、土壌表層における根長は定植 1 年目から 2 年目にかけて、直径 0.2mm 未満が減少し、0.2~0.4mm はほとんど変わらず、0.4mm 以上で増加した(第 8-6 図)。一方、深さ 2m までの土壌全層では、いずれの直径においても根長が増加したが、とくに直径 0.2~0.4mm で増加が著しかった。

土壌表層と土壌全層のそれぞれにおける直径別の根長割合を調査し

た結果、土壌表層では、直径 0.2mm 未満が減少し、0.2~0.4mm はほとんど変わらず、0.4mm 以上で増加した(第 8-7 図)。これに対して、土壌全層では、直径 0.2mm 未満が減少し、0.2~0.4mm で増加し、0.4mm 以上はほとんど変化がなかった。

(3) 根の形成・枯死および炭素含有量

イングロースコア法を用いて根系形成を形成と枯死とに分けて解析した結果、定植 1 年目における根の形成量は 7 月から 9 月にかけて徐々に増加し、最高に達した後、翌年の 2 月まで減少した(第 8-8 図)。一方、根の枯死量は 8 月から 10 月にかけて増加し、その後は若干の増加もあったが翌年 2 月まで減少した(第 8-8 図)。その結果、形成量と枯死量の差し引きで決まる現存量は 7 月から 9 月にかけて増加し、その後 12 月まで若干増加した後、翌年度の地上部の再生まで徐々に減少した。

定植 2 年目では 6 月以降、若干の増減があったが、新根の形成は年末にかけてほぼ維持された(第 8-8 図)。また、根の枯死は 8 月、10 月、1 月にピークがあり、11 月から 12 月にかけては、ほとんど認められなかった(第 8-8 図)。その結果、定植 2 年目の根の現存量は 1 年目より急激な増加傾向を示し、年末まで増え続けた。

イングロースコア法を用いて採取した根の一部を取り出して CN コーダーで成分分析をしたところ、乾物重にしめる炭素含有率は生育段階によって若干の変化はあったものの、いずれの時期も 36%程度であった。

8-3. 考察

(1) エリアンサスの根系形成

本研究では、関東地方の圃場で栽培した定植 1 年目と 2 年目のエリアンサス群落の根系形態を、出穂期に改良土壌断面法を利用して調査した。その結果、いずれの年においても、深くなるにつれて根長密度や根重密度が減少していたが、定植 1 年目から 2 年目にかけて根系分布が深層へ拡大していることが、深さ別の根長密度、根重密度、これらのデータを利用して算出した根の深さ指数で定量的に確認できた。

本研究と同一品種のエリアンサスを同じ関東地方で栽培し、同じ方法で根系調査を行った結果、定植 13 ヶ月目の根の深さ指数として 40cm、定植 33 ヶ月に 79cm という報告がされているが(Sekiya ら 2013)、本研究で得られたデータと極めて近い値であった。また、エリアンサスは主要作物と比べて概して根量が多いことが報告されているが(関谷ら 2015)、本研究において推定した根量は、定植 1 年目には根長が $10\text{km}/\text{m}^2$ 、根重が $200\text{g}/\text{m}^2$ 、また定植 2 年目には根長が $20\text{km}/\text{m}^2$ 、根重が $606\text{g}/\text{m}^2$ であり、エリアンサスは主要作物と比べて概して根量が多いことが確認できた。

そこで、深さ別の根長密度・根重密度、比根長、直径別の根長の年次変動、土壌表層における根の形成量と枯死量を利用しながら、定植 1 年目から 2 年目にかけて根系形成の様相について考察する。本章で用いた群落と同じ群落を用いた生育調査と群落構造の研究報告(第 1 章)では、定植 1 年目と 2 年目の最終的な茎数は同じ 70 本程度であるが、その茎の直径は太くなっていることを報告した(金井ら 2017a)。イネ(根本・山崎 1986)やトウモロコシ(山崎・帰山 1982)では茎の直径が太いほど、その部分に形成される節根の直径も太いことが報告されている。本研究では 1 年目から 2 年目にかけて土壌表層で直径の大きな根の長さが増えていることから、同じ現象が起きていると考えられる。すなわち、定植 2 年目のエリアンサス群落を構成する個々の株で、茎数は 1 年目とほぼ同じであるが、個々の茎は 1 年目より太く、その茎から 1 年目より太い節根が形成されたものと考えられる。

また、イネ(山崎ら 1981)やトウモロコシ(伊藤ら 2004)では、直径の大きな節根が下方方向に伸長する傾向や、基部直径が大きな節根の最終根長が長くなる傾向(川田ら 1980)が認められている。以上のことを総合して考えると、2 年目の地上部の再生では 1 年目より太い茎が(しかも、相対的に早い時期に)形成され、その太い茎から太い節根が出現して、その太い節根が土壌の下方方向を中心に広く伸長して、深くまで達したと考えられる。このように考えると、改良土壌断面法における根系分布の変化と矛盾しない。

エリアンサスの比根長は例えばイネ(Kang ら 1994)と比べると小さい値をとるが、比根長が小さい値をとる場合は節根が太いか、側根形成が旺盛でないことを示唆している。ただし、出現直後は太い節根が(定植 2 年目の群落では)土壌深層に達するまでの間に徐々に細くなっているはずである。イネ(川田ら 1980, 佐々木ら 1983)では、節根の直径が減少していく部分で側根形成が進む傾向が認められている。同じ傾向がエリアンサスでも認められれば比根長が大きくなるはずである。そこで深さ別の比根長をみると、深いほど比根長が大きい傾向は認められるが、それぞれの深さでは 1 年目に比べて 2 年目で小さくなっている。以上を総合すると、1 年目より 2 年目で節根(および側根の一部)が太くなっていると考えられる。

本研究では根量を根の直径別に解析したが、既往研究(Shiotsu ら 2015)および予備的な観察結果に基づいて、直径 0~0.4mm を細い側根、0.4~0.6mm を太い側根と節根、0.6mm 以上は節根として考察を行った。定植 2 年目では、土壌表層 30cm における直径 0.2~0.4mm の根長が増加しているが、エリアンサスでは直径 0.5mm が節根と側根との境界と考えられるので、定植 2 年目には太い側根が増加していると考えられる。トウモロコシでは節根が太いと、その節根に形成される側根も太い傾向が認められており(山崎・帰山 1983)、エリアンサスでも同じ現象が起こっているとすれば、言い換えると太い節根と太い側根が増加したとすれば、定植 2 年目に比根長が小さくなった事実と整合する。ただし、土壌表層 30cm における根系形成については、イングロースコア法による調査結果も参考にしながらもう少し考察することが可能である。すなわち、土壌表層 30cm における根長密度は 1 年目と 2 年目とでほとんど同じであるが、根重密度は約 2 倍になった。このことは、2 年目には太い根が同じ長さ分布しているということであるので、細い節根や細い側根が枯死して、それに代わって太い節根や太い側根が増えたと考えられる。このように考察すると、比根長の低下について説明がつく。直径別の根長データ(第 8-6 図, 第 8-7 図)をみると、根長が減少したのは主に側根と考えられる。ただし、エリアンサスの節根の少なくとも基部では時期によっ

でデンプン粒が蓄積されていることが報告されており (Shiotsu ら 2015),
これが比根長にどれくらい影響するかは明らかでないが, このような根
系形成, すなわち太い節根の増加と細い側根の減少は, イングロースコ
ア法の結果(第 8-8 図)を参照すると, 6 月~10 月に起こったと考えられる.

(2) 土壌への炭素供給量の推定

本研究では, 定植 1 年目および 2 年目のエリアンサス群落における根
系形成を検討した結果, 多くの根が新たに形成されるとともに, 古い根
が枯死脱落したことが明らかとなった. この根の枯死脱落の他, 生きて
いる根からの有機物の分泌によっても土壌に炭素が供給される.

本研究では根からの有機物の分泌については検討していないので, エ
リアンサスの根系形成によって, 炭素が実際に土壌中に供給される量に
ついて正確に把握できないが, いずれにしても炭素が土壌中に貯留され
れば, 最終的には地球温暖化対策となる可能性がある. そこで, 本研究
における改良土壌断面法のデータとイングロースコア法のデータとを
組合せて, 土壌中への炭素供給量について簡単な試算を試みた.

イングロースコア法における出穂期の土壌表層の現存量と, 生育期間
中の枯死量の合計との比率が, 土壌全層でも同じように成り立つと仮定
して, 両者の比率は, 定植 1 年目が 1:1.94, 定植 2 年目が 1:1.26 であっ
た. 改良土壌断面法で調査した出穂期における深さ 2m までの現存量は,
定植 1 年目が約 200g/m^2 , 定植 2 年目が約 606g/m^2 であったので, 枯死
量の合計は定植 1 年目が約 380g/m^2 , 定植 2 年目が約 760g/m^2 という計
算になる. 本研究でエリアンサス根の炭素含有率を実測したところ, 約
36%であった. 炭素含有率が生育時期や根の部位などによってほぼ同じ
だと仮定すると, 定植 1 年目は約 140g/m^2 , また 2 年目は約 270g/m^2 の
炭素が土壌中に供給されることになる.

土壌中への炭素供給量に関する推定には, 誤差や大気中へ放出される
量や, 根から分泌される有機物(Iijima ら 2008)の量についても, 考慮で
きていないため, 信頼性が高いデータが得られたわけではない. しかし,
エネルギー作物エリアンサスの栽培を通して, エネルギー生産だけでのな

く、根系形成や、根が枯死脱落することによって土壌中に炭素が供給されることが明らかになった。このようにバイオマスエネルギーの生産過程で、根の機能によって地球温暖化対策が可能になると考えられる。

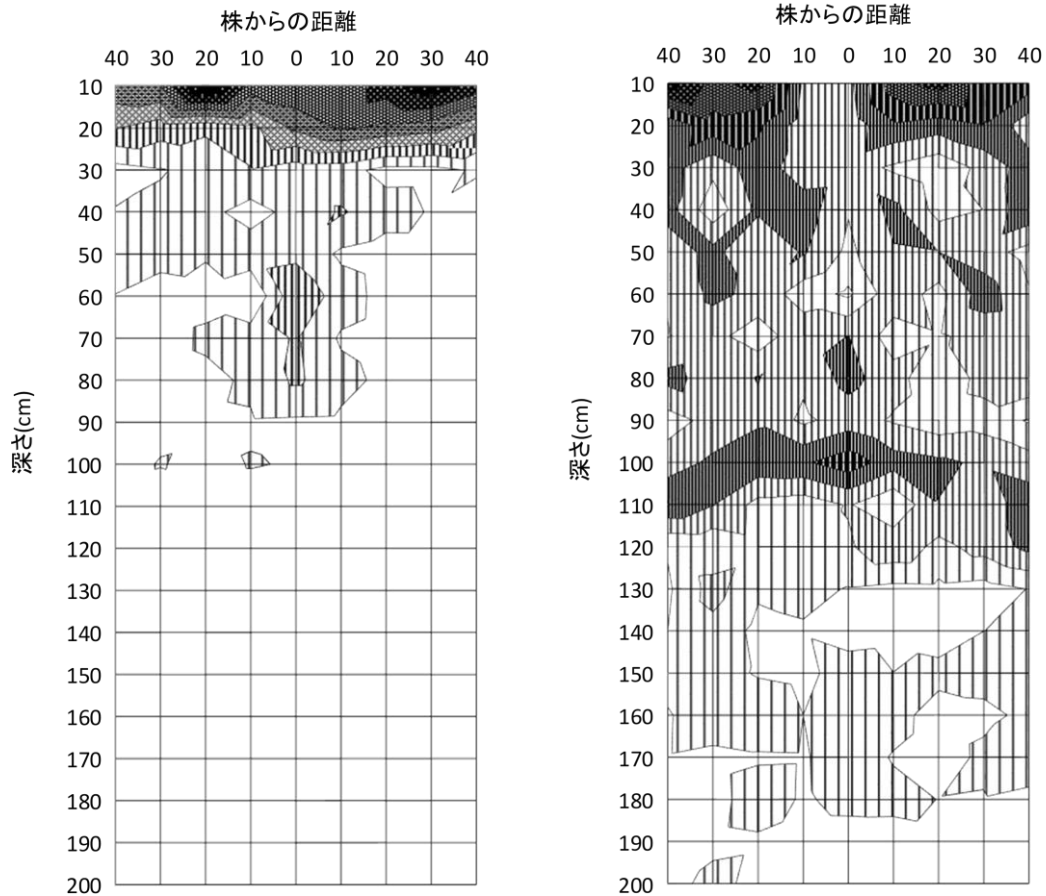
以上、定植 1 年目および 2 年目の根系構造について、形成過程を含めて解析した結果、根量が増加しながら、根系分布が深くなることが確認できた。この背景には太い節根および太い側根の存在があり、分げつの生育が根系構造に大きく関わっていると考えられた。また、バイオマスエネルギーの生産過程で、根の機能によって地球温暖化対策が可能になることは、エネルギー作物の栽培・利用システムを検討する上で、大きな成果である。



第 8-1 図 改良土壌断面法における根の採取.



第 8-2 図 イングロースコア法におけるメッシュバックの挿入.

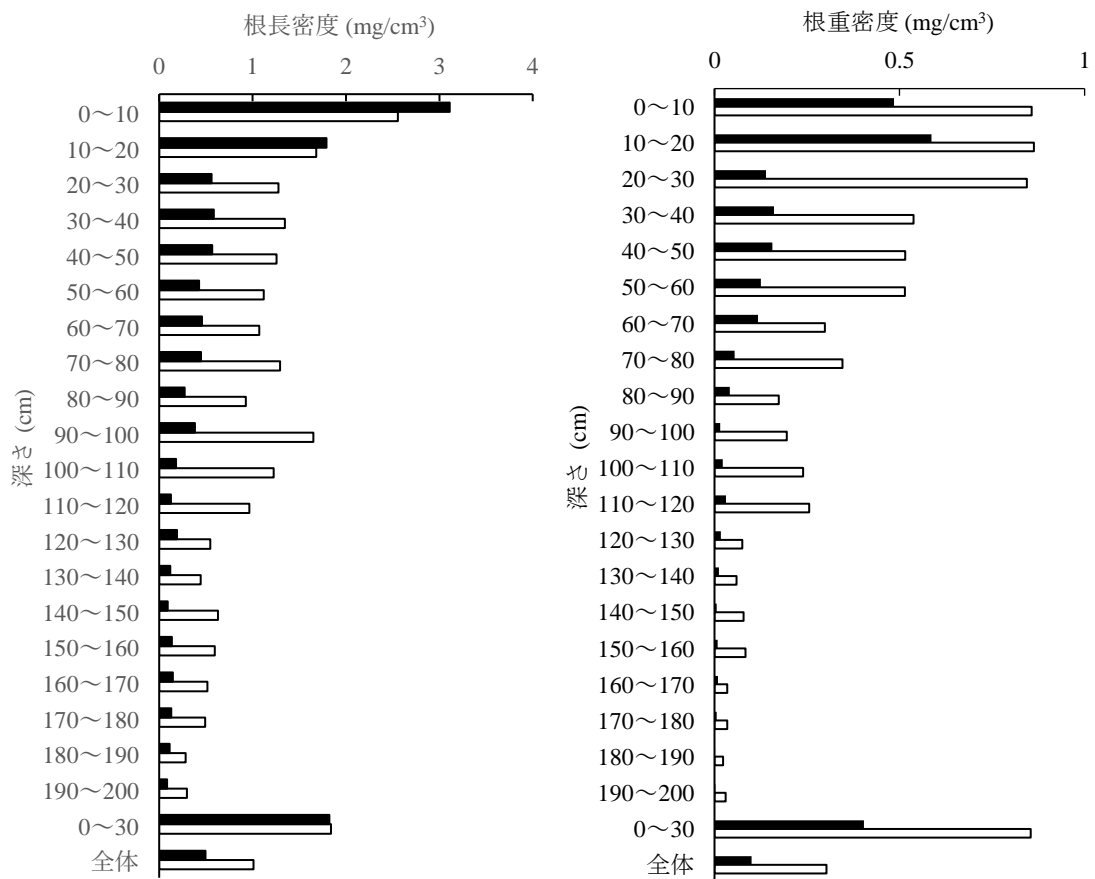


第 8-3 図 根長密度の等値線図。

左：1 年目，右：2 年目，横軸の 0 は調査した株の位置を示す。

RLD：根長密度。

- : $0\text{cm} < \text{RLD} \leq 0.5\text{cm}$,
 ▤ : $0.5\text{cm} < \text{RLD} \leq 1.0\text{cm}$,
 ▥ : $1.0\text{cm} < \text{RLD} \leq 1.5\text{cm}$,
 ▦ : $1.5\text{cm} < \text{RLD} \leq 2.0\text{cm}$,
 ▧ : $2.0\text{cm} < \text{RLD} \leq 2.5\text{cm}$,
 ▨ : $2.5\text{cm} < \text{RLD} \leq 3.0\text{cm}$,
 ▩ : $3.0\text{cm} < \text{RLD} \leq 3.5\text{cm}$,
 ▪ : $3.5\text{cm} < \text{RLD} \leq 4.0\text{cm}$,
 ▫ : $4.0\text{cm} < \text{RLD} \leq 4.5\text{cm}$.

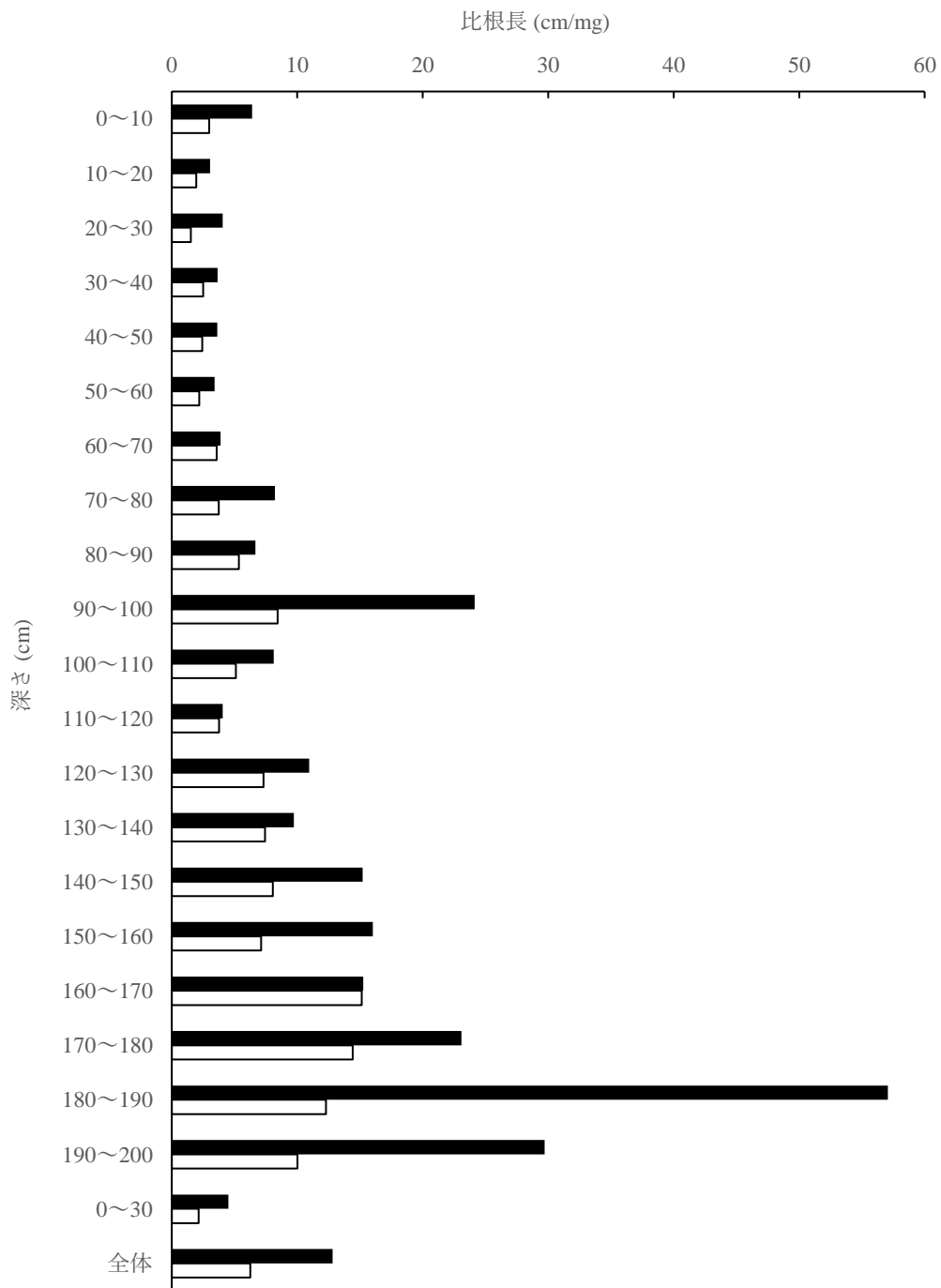


第 8-4 図 深さ別の根長密度と根重密度.

左：根長密度，右：根重密度.

■：定植1年目，□：定植2年目.

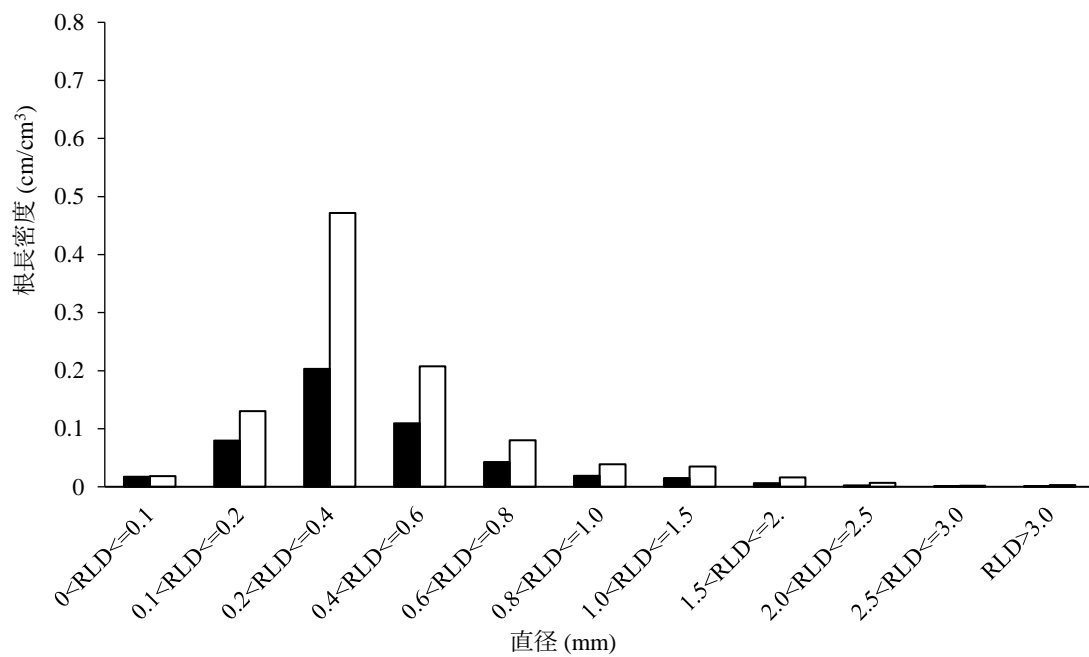
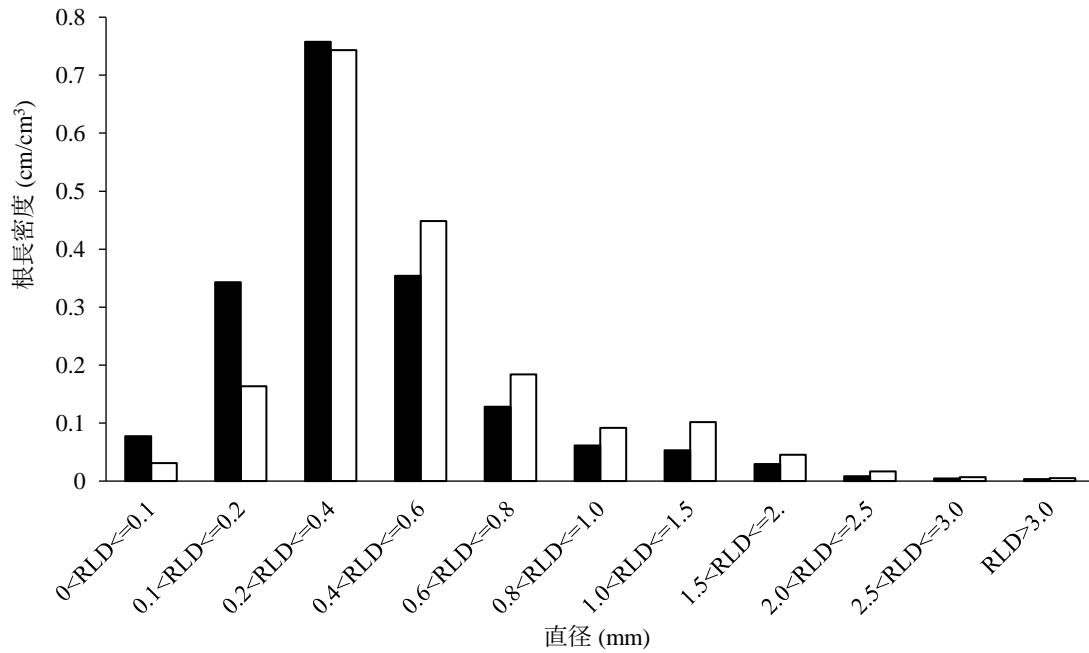
全体：深さ2mまでの平均，0~30：表層30cmの平均.



第 8-5 図 深さ別の比根長.

■ : 定植 1 年目, □ : 定植 2 年目.

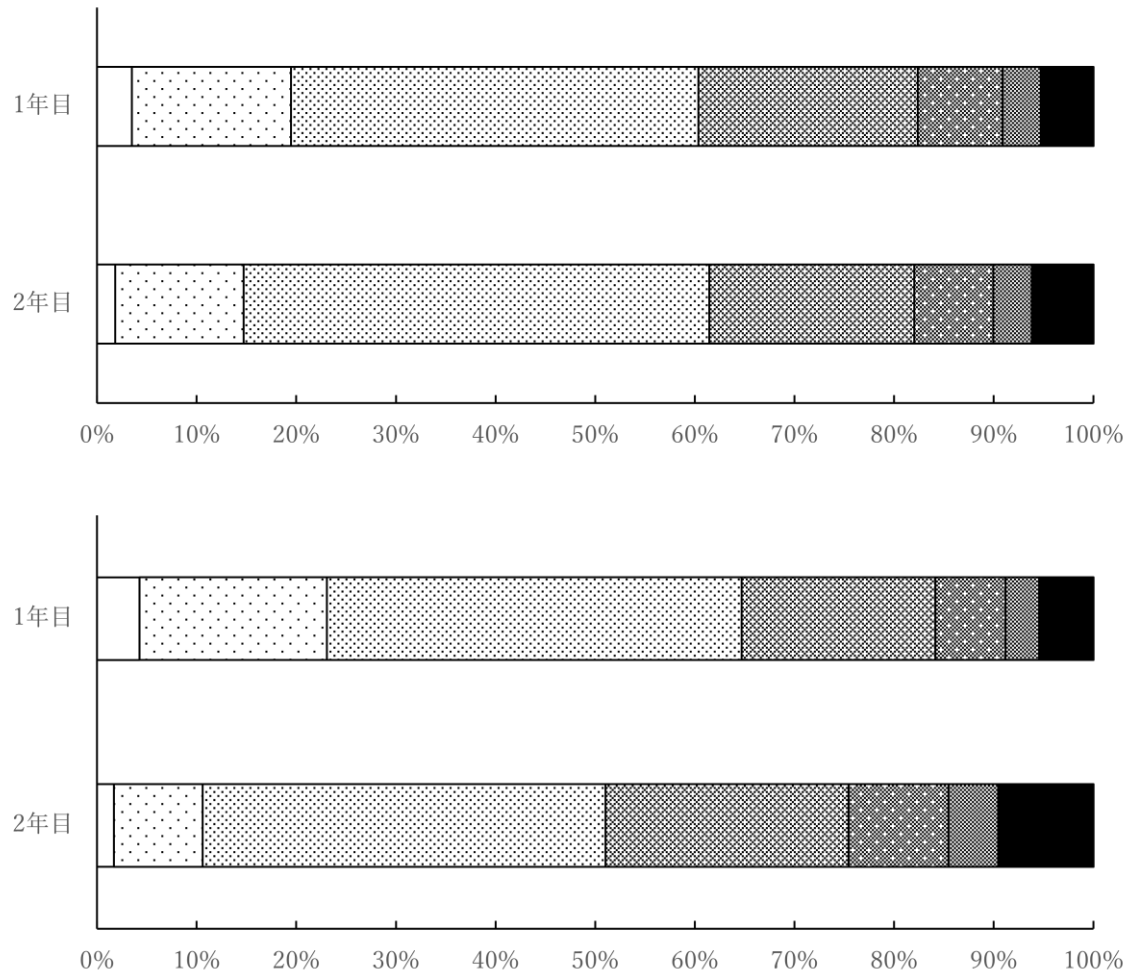
全体 : 深さ 2m までの平均, 0~30 : 表層 30cm の平均.



第 8-6 図 直径別の根長密度。

上：深さ 2m まで，下：表層 30cm まで。

■：定植 1 年目，□：定植 2 年目。



第 8-7 図 直径別の根長密度の割合.

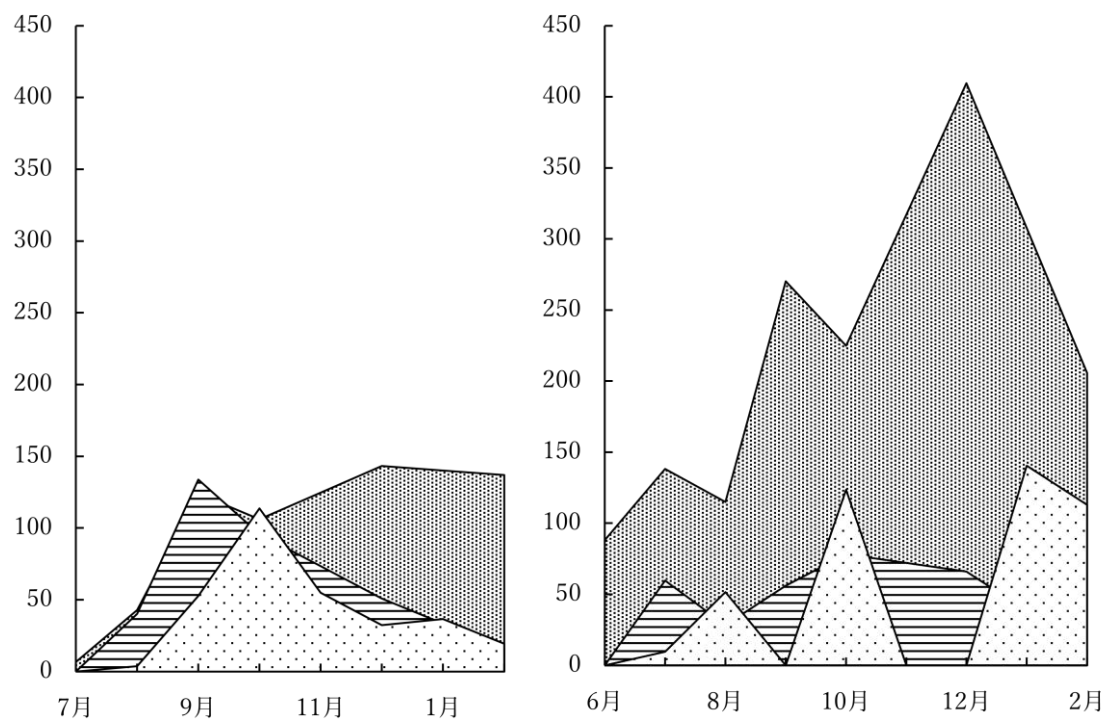
上 : 表層 30 cm まで, 下 : 深さ 2 m まで. D : 根の直径.

□ : $0\text{mm} < D \leq 0.1\text{mm}$, □ (点) : $0.1\text{mm} < D \leq 0.2\text{mm}$,

□ (斜線) : $0.2\text{mm} < D \leq 0.4\text{mm}$, □ (斜線) : $0.4\text{mm} < D \leq 0.6\text{mm}$,

□ (斜線) : $0.6\text{mm} < D \leq 0.8\text{mm}$, □ (斜線) : $0.8\text{mm} < D \leq 1.0\text{mm}$,

■ : $1.0\text{mm} < D > 3.0\text{mm}$.



第 8-8 図 イングロスコア法で推定した根重の推移.

左：定植 1 年目，右：定植 2 年目

□：根の現存量，▨：根の形成量，▩：根の枯死量.

*採取箇所と反復については，本文を参照.

第3部 利用システムの構築と評価

再生可能エネルギー，とくにバイオマスエネルギーの利用を日本で促進するため，本研究では原料作物として，高い物質生産性と高いストレス耐性を示す多年生イネ科草本植物のエリアンサスを選定した．エリアンサスはエネルギー作物として注目されているが，その高い物質生産性の背景については十分に解明されておらず，作物学・栽培学的研究はほとんど進んでいない．また，具体的な栽培管理システムが構築されているわけでもない．そもそも，多年生草本植物は飼料作物の一部を除いて農業利用も少なく作物学・栽培学的研究の学術体系が確立していないからである．

そこで，飼料作物とは異なる群落状態で栽培することを前提として，エリアンサスの栽培システムを構築するために，第1部で進めた群落の発育形態学的研究の成果と組み合わせて，第2部では群落を構成している株について作物学・栽培学的研究を進めた．

エリアンサスの栽培システムを構築する場合，エリアンサスを含むエネルギー作物を栽培して利用する背景には，すでに指摘したように地球温暖化問題および石油枯渇問題があるため，栽培システムと利用システムのシステム全体におけるエネルギー収支やエネルギー効率，そして最終的には経済的な評価が，食用作物の栽培利用以上に重要なポイントとして残る．

作物栽培をエネルギー収支の観点から最初に解析したのは，Pimentel(1973)のトウモロコシを対象とした研究である．それを踏まえて日本では宇田川(1976)が水稻栽培について研究を行った．食用作物の研究では，単位面積当たりの生産量，すなわち，収量を安定的に向上させていくことが最終目的である．したがって，産出エネルギーを増加させるためには，投入エネルギー量を増加させなければならず，主な投入エネルギーとしては肥料と機械である．

投入エネルギーを増加させると産出エネルギーもそれに伴って増加するが，産出エネルギー/投入エネルギー比は低下することが分かっている

る。しかし、食料問題を考える場合、最近は持続的な栽培システムを考慮するとともに、環境問題と、資源・エネルギー問題とのトリレンマを解決しなければならない。これは食用作物以上にエネルギー作物の栽培と利用を考える場合に考慮しなければならない。しかも多年生作物を原料とする場合には重要な観点となる。

そこで、第3部においては以上の環境問題や資源・エネルギー問題も念頭におき、エリアンサスの栽培・利用システムを構築するために足りない個別テーマについて研究を進め、最終的に栽培システムと利用システムの全体を最適化することを目指した。そして、その成果を栽培・利用システムとして、東日本大震災の復興支援策や耕作放棄地対策として利用することを提案した。

第3部 利用システムの構築と評価

第9章 組織培養を利用した苗生産システムの確立

バイオマスエネルギーの原料作物として選定したエリアンサスの低投入持続的な栽培システムを構築して実際に事業化を進める場合、必要なバイオマス量を確保するために大面積(自然条件や社会条件によって規定される規模感は一概に想定できず、スケールメリットを考えると開発輸入では数百~数千 ha レベルもありえるが、日本国内での耕作放棄地対策では現時点では数 ha の栽培もある)で栽培することが想定される。

エリアンサスは多年生作物であり、毎年、苗の定植を必要としないことは、大きな利点となる。日本ではエリアンサスの栽培の歴史は長くないので詳細は明らかでないが、これまでの経験から 10 年くらいは栽培を継続しても収量低下は認められないことが分かっている。ただし、10 年ほど経つと収量が低下する可能性があり、実際、インドネシアにおけるネピアグラスでは経年変化として群落の中の生育が低下していくことが認められている(Sekiya ら 2015)。

したがって、最初に苗を定植したり、数~10 年の間隔で改植したりする際に、生育が均一で高品質の苗を、一時期に大量に、しかも安価に準備する必要がある。苗生産を検討する場合、まず種子繁殖が想定される。しかし、エリアンサスを日本で栽培しても、西南暖地を除いて、稔実した種子を得ることができない。これは栽培地周辺の環境に悪影響を与えないという意味ではメリットであるが、自家採取ができないことでは苗生産にとってはデメリットとなる。また、種子から大型苗を育成するのに時間がかかるため、現実的な選択肢とはなりにくい。

つぎに栄養繁殖が想定される。その中でも株分けは、一定の品質の比較的大型の苗が準備できるため、人海戦術で対応できる面積であれば効率が高く、順調に生育が進む。ただし、株分けを行うには時間と労力が必要で、大量の苗生産には必ずしも向かない。そのため、大面積での栽培を前提とした事業化では、株分けも現実的な選択肢には向かないと考

えられる。そこで、事業化に向けての苗生産では、種子繁殖や株分け以外の方法を確立しておく必要がある。

そこで、組織培養(厳密には器官培養であるが、本研究では便宜上、組織培養とする)による苗生産に注目することにした。組織培養を利用すれば、遺伝的背景が均一で高品質な苗を、比較的短時間に大量に生産できる可能性が高いからである。エリアンサスの分けつ芽(側芽)を利用して組織培養による苗生産方法については、すでに予備的な検討が行われており、原理的に可能であることは確認されている(Morita ら 2018)。そこで、予備的な検討の研究成果(Morita ら 2018)を参考にしながら、エリアンサスの分けつに形成されている分けつ芽(側芽)を組織培養した苗の生産システムを確立するための検討を行った。

9-1. 材料と方法

(1) 材料の栽培

材料としたエリアンサス (*Saccharum arundinaceus* Syn. *Erianthus arundinaceus*)は、東京農業大学農学部(厚木キャンパス)の圃場で栽培したものである(群落 B)。2015年5月26日に品種 JES1 の苗 110 株を条間 1m×株間 1m の栽植間隔で定植した。施肥や灌水は行わず、定植 1 年目に手取り除草のみを行った。2016年4月16日に間引きを行い、条間 2m×株間 1m とした。

(2) 側芽の摘出・殺菌

このように栽培したエリアンサスから、2018年7月以降、適宜、シュート(側芽を中心とした部分)を採取した。すなわち、採取したシュートを取り囲む葉身と葉鞘を可能な範囲で丁寧に取り除き、5mm 程度に発達した側芽を含む一辺 2cm ほどの方形切片を切り出し、クリーンベンチ内で殺菌処理を行った。

殺菌処理は、①70%エタノール 1 分間浸漬+1%次亜塩素酸ナトリウム 10 分間処理と、②70%エタノール 2 分間浸漬+1%次亜塩素酸ナトリウム 10 分間処理とを設定した。①、②のいずれの場合も、これらの処理に続

いてクリーンベンチ内で方形切片を滅菌水で3回洗浄した後、側芽を中心に5mm×5mm×厚さ2mm程度の外植体を調整し、培地を30mLずつ分注した試験管(直径40mm×長さ130mm)に1つずつ置床後、アルミフویلで閉栓した。その後、白色蛍光灯16時間照明(55 μ molm⁻²s⁻¹PPFD)/8時間暗黒、明/暗を27°C/25°Cに設定したインキュベーター内で培養した。

(3) 多芽体の誘導と培地

試験管に分注した培地は、多芽体を誘導することを目的としたもので、基本培地はMS培地(Murashige and Skoog 1962)にショ糖30g/Lとゲランガム2g/Lを添加し、pHを5.75に調整した。

反復は、側芽の採取位置を考慮せず混合したもので、処理①で25、処理②で50とした。また、側芽を比較的頂端側から採取したものでは、処理②にかけたものを50とした。

多芽体を誘導のため、基本培地に生長調節物質を添加した以下の5区を設定した。すなわち、すべての処理区にナフトレン酢酸(NAA)0.2mg/Lを添加した上で、A区：ベンジルアデニン(BA)を0.2mg/L、B区：BAを1mg/L、C区：チジアズロン(TDZ)を0.5mg/L、D区：TDZを1mg/L、E区：カイネチンを1mg/Lをそれぞれ添加し、各処理区の反復は10とした。

また、多芽体の誘導の実験で得られた大量のシュートを処理区ごとに分けて、すでに発根しているものは、根を完全に取り除いた。そのうえで、発根促進剤のオキシベロン粉剤を塗布したものと、無処理のものを用意した。これらのシュートをロックウールあるいはバーミキュライトを充填したセルトレイに定植して発根の有無を調査した。

9-2. 結果

(1) 外植体の採取部位と殺菌処理

まず、材料とする外植体の採取位置について、採取した外植体の殺菌処理との組合せを検討した。その結果、側芽の採取位置を考慮せず、処理①を行った場合では14/25が汚染し、汚染発生率は56%であった。側

芽の採取位置を考慮せず、処理②を行った場合では 26/50 が汚染し、汚染発生率は 52%であった。

また、側芽を材料の頂端側から採取した外植体を用いて処理②を行った場合は 19/50 が汚染し、汚染発生率は 38%であった。

このように、分げつの基部側から切り出した外植体は汚染発生率が高く、頂端側から切り出した外植体では反対に、汚染発生率が低かった。

(2) 培地組成と多芽体形成

次に既往研究を参考にしながら、多芽体の誘導培地の検討を行った。その結果、組織培養を開始してから 20 日頃から A 区、B 区、E 区で多芽体が発生し始め、1 か月後にはとくに B 区で旺盛な増殖が認められた(第 9-1 図)。また、置床後 3 ヶ月すると、すべての処理区で多芽体が発生したが、多芽体の形成率は A 区が最も高かった(第 9-2 図)。また、E 区で旺盛に発根したものが確認された。

以上のように、処理区間や個体間で遅速はあったものの、最終的にすべての処理区で多芽体が形成された。

(3) 培地組成と苗の発根

多芽体を処理区ごとに分けたうえで、発根促進剤のオキシベロン粉剤を塗布したものと、無処理のものを用意し、これらのシュートをロックウールあるいはバーミキュライトを充填したセルトレイに定植した。その後、発根の有無を調査した結果、いずれの処理区でも発根して、旺盛に生育した。また NAA を処理した A 区は発根促進剤を処理しなかった区の方が旺盛に発根して、E 区では発根促進剤処理に係らず、ロックウール培地で旺盛に発根していた。

9-3. 考察

(1) 外植体の採取部位と殺菌処理の検討

組織培養による苗生産を検討するにあたり、材料とする外植体を分げつ芽を含む周辺部分とし、分げつ芽の着生位置に着目して検討した。こ

れは、分げつ芽の着生位置が、分げつ芽の生育段階すなわち成熟程度を意味しているとともに、微生物による汚染が組織培養の成否に大きく影響すると考えたからである。

そこで、材料とする外植体の採取位置と、採取した外植体の殺菌処理とを組合せて検討した。その結果、母茎の基部側に形成された分げつ芽を切り出した場合は、殺菌処理の如何に関わらず外植体の汚染発生率が高く、反対に頂端側に形成された外植体を使うと汚染発生率が低かった。したがって、分げつ芽の生育段階がある程度若いと組織培養の成功率が高いといえる。そのメカニズムについては明らかでないが、組織培養に提起した生育段階があることや、それに伴う汚染状況が関係していると考えられる。

また、外植体の殺菌処理について検討した結果、処理①では全体の約50%が汚染したのに対して、処理②では汚染は全体の半分以下となった。このように70%エタノールへの浸漬時間が長いと汚染を抑えられることが明らかになった。ただし、70%エタノールへの浸漬時間の長短によって、多芽体の発生率に違いは認められなかったため、70%エタノール処理時間を長くしても外植体へのダメージが低いことが示唆された。

以上の結果から、生育段階と殺菌処理との組み合わせることによって組織培養の成功率を上げられ、事業化へむけての目安が解明できた。

(2) 培地組成の確定

次に、Morita ら(2018)の研究成果を参考にしながら、多芽体の誘導培地の検討を行った。その結果、すべての処理区で多芽体が発生したが、多芽体の形成率はA区が最も高かった。

Morita ら(2018)の研究ではサイトカイニンとしてBAを添加したが、本研究の結果、BA以外のサイトカイニン処理でも多芽体の誘導ができた。また、E区で旺盛に発根したものが確認された。しかし、添加したサイトカイニンの種類によっては多芽体誘導過程で発根した。したがって、発根培地を省略できることが確認できた。

Morita ら(2018)の研究では、A区の培地を用いて多芽体を誘導して大

量のシュートが形成された後に、発根培地で発根させる苗生産方式を確立しているが、本研究の結果、発根培地を経由しない苗生産方式が開発できることが実証できた。そのため、事業化を前提とした組織培養を利用した苗の生産システムの確立においては、作業効率やコスト削減につながる知見といえる。

以上のように処理区によっては、発根や多芽体の発生時期に違いはあったが、最終的にすべての処理区で多芽体が形成された。

(3) 発根培地を用いない発根促進

組織培養によって得られたエريانサスのシュートからの発根については、すでに Morita ら(2018)が検討して生長調節物質を含まない MS 培地でも可能であることを報告している。ただし、準備ができた苗を定植する際、培地を洗い出す必要があるため、この段階を省略できれば、システムの効率化を図ることができる。また、セルトレイのサイズの苗を作成できれば、定植の際に既存の野菜移植機が使えることになる。

そこで、セルトレイに、そのまま定植できるロックウールとバーミキュライトとを用いた場合について検討した。その結果、いずれの処理区でも発根を確認し、旺盛に生育した。また、NAA を処理した A 区は無処理区の方が旺盛に発根して、E 区では発根促進剤処理の有無に係らず、ロックウール培地で旺盛に発根した。以上の結果は、多芽体の増殖の際に使用したサイトカイニンが植物体内に残留し、発根に影響していることを示唆している。

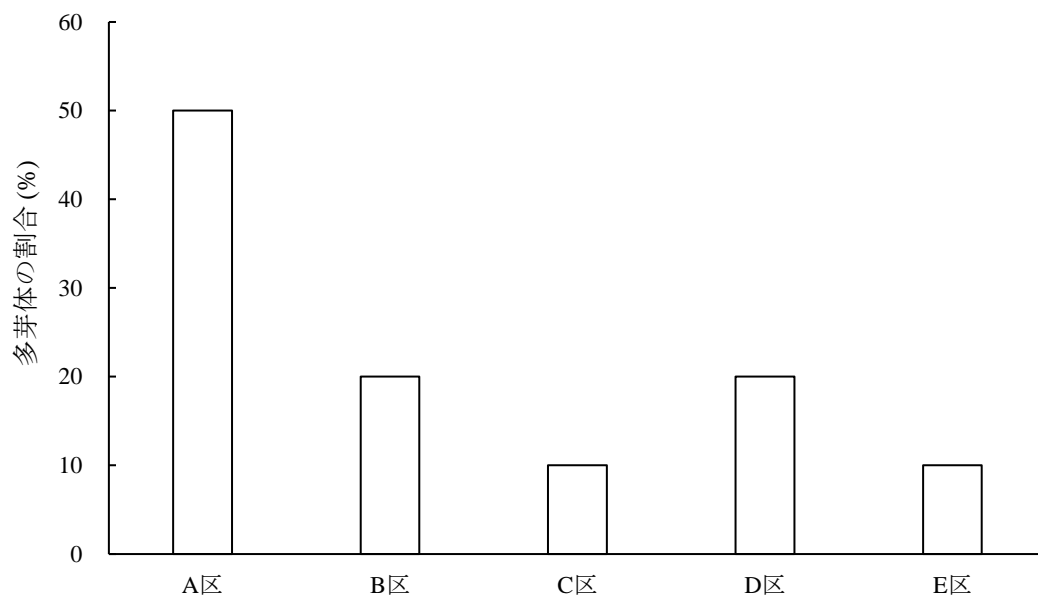
以上、圃場栽培したエريانサスの分けつの頂端側に形成された分けつ芽を採取して、70%エタノール 2 分間+1%次亜塩素酸ナトリウム 10 分間の処理を基本にすれば、汚染発生をある程度、抑えることが可能である。また、分けつ芽を培養する場合、MS 培地を基本培地とし、NAA と BA を組み合わせることが望ましいと考えられる。発根については若干の検討課題が残っているが、発根培地を必要としない苗生産方法を確立することができた。



第 9-1 図 エリアンサスの側芽の組織培養.

左から右に向かって, A 区, B 区, C 区, D 区, E 区.

処理内容は本文参照.



第 9-2 図 置床後 3 ヶ月後の多芽体形成率。

第3部 利用システムの構築と評価

第10章 刈取り方法・乾燥方法の検討

エリアンサスをエネルギー利用する場合の主な方法として、バイオエタノールを製造するほか、ペレット化して燃焼させる熱利用がある。

いずれの場合も原料バイオマスをプラントに搬入する段階で、含水率を15%程度にしておくことが望ましい(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2014)。ただし、乾燥過程で多くのエネルギーを使うことは、システム全体のエネルギー効率を低下させ、却って二酸化炭素排出量を増加させてしまうため、避けなければならない。

そこで、エリアンサスを原料とした栽培・利用システムを構築し、最適化するために、エリアンサスの刈取りと乾燥方法の確立を目指した。すなわち、定植1年目から物質生産が本格化する定植3年目までの群落を対象として、刈取り時期と乾燥の前処理を組合せた効果を検討することを通して、エリアンサスの刈取りと乾燥方法の確立を目指した。

10-1. 材料と方法

東京農業大学農学部(厚木キャンパス)で栽培したエリアンサス(*Saccharum arundinaceus*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)品種 JES1 を対象とした。除草と耕起を行った圃場に、2014年6月13日(群落A)と2015年5月26日(群落B)、条間1m×株間1mの栽植間隔(10条×11株)で、それぞれ110株ずつの苗を定植した。いずれの材料も、定植1年目は適宜、手取り除草を行ったが、その他の管理作業、すなわち、基肥・追肥や灌水は行わなかった。

群落A(定植2年目)と群落B(定植1年目)の材料を、2015年12月19日、2016年1月9日、同年2月13日、同年3月9日に(また風乾区は、すべての処理区の材料を同時に乾燥処理するため、それぞれ6日前に)刈取りを行った。群落A(定植3年目)と群落B(定植2年目)の材料は、2016年12月20日、2017年1月23日、同2月21日、同3月13日に、刈取

りを行った。いずれの材料も、それぞれ 3, 4 株を地表から約 30cm の高さで刈取った。

このようにして刈取った材料を前処理として、①30cm に裁断した区(30cm 区)、②チョッパーで 2~3cm(12 月のみ 15cm)に処理した区(チョッパー区)、③30cm に裁断してから 6 日間、雨風の当たらない場所で風乾した区(風乾区)、④材料を裁断せずに手で折り曲げたうえで、足で数回踏みつけて材料の表面に傷をつけた区(損傷区)、切断せずに車で轢くことで、材料表面を物理的に損傷させた後、約 1 か月、風雨が当たらない場所に静置して風乾する損傷風乾区を設けた(表 10-1)。

以上のように収穫して前処理を行った材料は、それぞれ段ボール箱に入れて、80°Cに設定した通風乾燥機(藤原製作所製 VC-100, ヤマト科学製 DK-83 および DK-600T の 3 機を使用)で処理した。この場合、通風乾燥機の容量に対して段ボール箱(外寸：幅 535×奥行 385×高さ 345mm, 内寸：幅 525×奥行 375×高さ 330mm)の容量が約 50%になるように設定した。また、乾燥の際は段ボール箱の側面に数カ所、通気のための穴をあけ、さらに上蓋をあけることで、通気を図った。また、サンプルが通気によって損失するのを防ぐため、金網を載せ固定した。乾燥開始後 96 時間までは 1 時間ごとに、それ以降は 2 時間ごとに重量を測定し、含水率(湿量基準)を算出した。なお、それぞれの反復は、群落 A(定植 2 年目)と群落 B(定植 1 年目)は 2 とし、群落 A(定植 3 年目)と群落 B(定植 2 年目)は 3 とした。

10-2. 結果

(1) 材料の刈取り時期と含水率の推移

本研究で対象とした群落は、年明け前後から立枯れとなった。そこで、刈取った材料の含水率を調査した結果、群落 B(定植 1 年目)では 1 月≒3 月>2 月であった。ただし、3 月 6~9 日に合計 71.5mm の降雨があり、直後に雨の中で刈取った。また、群落 A(定植 3 年目と 2 年目)、群落 A(定植 2 年目)エリアンサスも年明け前後から立枯れとなり、刈取りが遅いほど含水率は低い傾向が認められた(第 10-1 図)。

強制乾燥を行った結果、いずれの刈取り時期のいずれの材料についても、乾燥時間が長くなるにつれて含水率は低下した。含水率がプラント搬入時に必要な 15%まで低下するまでに必要な時間は、群落 B(定植 1 年目)の材料は、1 月は 11 時間 50 分、2 月は 7 時間 40 分、3 月は 6 時間 20 分であった。群落 A(定植 2 年目)の材料は、12 月は 207 時間 30 分、1 月は 107 時間、2 月は 48 時間 10 分、3 月は 25 時間 30 分であった。30cm の裁断を行った、群落 B(定植 2 年目)の材料は、12 月は 78 時間 20 分、1 月は 42 時間 10 分、2 月は 13 時間、3 月は 13 時間 20 分であった。30cm で裁断を行った、群落 A(定植 3 年目)の材料は、12 月は 143 時間 30 分、1 月は 68 時間 20 分、2 月は 38 時間 30 分、3 月は 31 時間 30 分であった。

このように、乾燥開始時の含水率が低いほど含水率が 15%に到達する時間が短い傾向が認められた。

(2) 前処理を行った材料の含水率の推移

群落 A(定植 2 年目)の材料を用いて、4 種類の前処理を加えてから強制乾燥を行った結果、3 月を除いて損傷区で乾燥が最も速く進んだ(第 10-2 図)。その他の前処理の効果は刈取り時期によってまちまちで、必ずしも一定の傾向は認められなかった。

群落 A(定植 3 年目)の材料を用いて、前処理として、材料表面を物理的に損傷させた後、約 1 か月、風雨が当たらない場所に静置して風乾する損傷風乾区の含水率が 15%に到達するまでの時間を調査した結果、15%に到達するまでの時間が大幅に短縮した。さらに、3 月に刈取って風乾処理を行った材料では、乾燥機による強制乾燥をしなくても、損傷風乾処理だけで含水率は 15%以下に達した(第 10-3 図)。

10-3. 考察

(1) 刈取り時期と材料の含水率

いずれの群落においても、年末から年明けにかけて株の立枯れが進み、それに伴って刈取り時期が遅いほど含水率が低下した。ただし、2016 年

3月に刈取った群落 B(定植 1 年目)で材料の含水率が高かったが、収穫当日に約 70mm の雨が降ったが、1 月や 2 月に刈取った材料より初期の乾燥が速く進んでいる。このことから、刈取り直前に降雨があると一時的に含水率が高くなるが、その水分は速やかに失われたと考えられる。また、同じ定植 2 年目であっても群落 A と群落 B の材料で含水率 15%に到達するまでの乾燥時間が大きく異なった。これには、刈取り時の含水率が異なることが影響していると考えられる。すなわち、いずれの材料であっても、刈取りが遅いほど含水率が低く、強制乾燥によって含水率が 15%に到達する時間が短い傾向が認められた。

このような立毛乾燥を利用するアイデアは、水稻でも低コスト化のための技術として検討されている。すなわち、積算温度と籾の含水率の間にはほぼ直線的な関係が認められ、立毛乾燥が進めば乾燥を省力化でき、低コスト化に貢献できることが報告されている(酒井ら 2011)。本研究の結果と比較するには、一年生か多年生か、子実部分か地上部全体かという違いはあるが、同じ立枯れ現象を利用するという点で参考になる管理作業といえる。つまり、バイオマスの含水率を落とすために、立ち枯れを利用することは、時間がかかるものの、コストと経費を節約し、エネルギー効率があげることにつながる。

(2) 前処理が材料の強制乾燥に及ぼす影響

いずれの材料であっても、刈取りが遅いほど含水率が低く、乾燥によって含水率が 15%に到達する時間が短い傾向が認められた。ただし、定植 2 年目、3 年目の材料は定植 1 年目と比較して、含水率が 15%まで低下するのにかなり長かった。その理由については、前処理の効果とともに考察したい。すなわち、材料を短く裁断するほど断面からの水の蒸発が促進され、乾燥が速やかに進むと考えていたが、実際には明確な効果は認められなかった。一方、乾燥実験を進める過程で、材料の表面を損傷すると乾燥が速やかに進むことに気づいた。そこで、バイオマスの前処理に加えたところ、刈取り時期に係らず乾燥を著しく速める効果が確認された。

木材の乾燥でも参考になる現象が認められている。すなわち、木材では、丸太より分割材で乾燥が速く進むことが報告されている(佐野ら 2012)。そのため、エリアンサスを短く裁断するほど断面からの乾燥が速く進むことを期待したが、効果は認められなかった。一方、スギの樹皮を剥ぐと、剥がない場合より乾燥が速く進むことも報告されており、樹皮が乾燥を抑制しているためと考えられている(岩田ら 1981)。本研究の損傷処理を、樹皮を剥ぐことと直接比較することは難しいが、茎葉部の表面を傷つけることで、表皮を含む周辺の構造が破壊され、茎葉部の内部が大気と直接、つながるという意味で共通の効果があると考えられる。すなわち、表皮周辺部分の構造がしっかりしていることが植物体からの水の損失を防ぐことに大きく貢献しており、いくら軸方向の長さを短くしても、乾燥効果は低いことが示唆された。

また、定植 1 年目に比較して 2 年目以降の材料で含水率が 15%に達する時間が非常に長くなったことは、茎の構造が関係していると考えられる。すなわち、エリアンサスの群落形成では、定植 1 年目から 2 年目にかけて群落下部において非同化器官の乾物重が大きく増加するが、このとき茎が太く、長くなっていることが確認されている(金井ら 2017a)。このことは、本研究の刈取り時にも確認している。茎が太く、長くなったことに伴って茎の含水量が増え、茎の内部から表面までの物理的な距離が長くなることで、乾燥しにくいことにつながっている可能性がある。

また、群落 A(定植 2 年目)の刈取り後の風乾の効果は必ずしも明確ではなかった。すなわち、群落 A(定植 2 年目)の材料で、風乾を行ったのは 6 日であり、この期間を長くすることで効果が明瞭になると考えた。

そこで、群落 A(定植 3 年目)の材料を用いて、材料表面を物理的に損傷させた後、約 1 か月、風雨が当たらない場所に静置して風乾する損傷風乾区を設けたところ、3 月に刈取って風乾処理を行った材料では、乾燥機による強制乾燥を行わなくても、損傷風乾処理だけで含水率を 15%以下にできた。これは、飼料作物の茎葉部を押しつぶして乾燥を促進させるモーアコンディショナ(山名 1995)と似た現象と考えられる。

以上のように、立毛乾燥が長いほど刈取り時の含水率が低下することが確認できた。したがって、エリアンサスを刈取り、バイオマスを乾燥させる場合、立ち枯れが進んだ年明け3月に刈取り、茎葉部の表面に傷をつけてから約1ヶ月間(これより短くても効果がある可能性は否定できない)、風乾することが最適である。

(3) エリアンサスの刈取り・乾燥方法の検討

本研究の結果から、エリアンサスは圃場で立枯れ状態となった2~3月頃に刈取り、表面を損傷させて乾燥するのがよいといえる。ただし、実際に事業化を展開するには、次年度の再生を意識して刈取り時期と、刈取り高さについても検討を行っておく必要がある。

まず刈取り時期についてだが、10月に刈取ると、翌年度の再生状況が著しく悪くなることはすでに報告されている(森田ら 2013a, 松波ら 2014)。12月から3月にかけての刈取りでは、翌年度の再生に悪い影響を与える報告はないため、問題はないと考えている。

次に刈取り高さについては、飼料作物では検討されているものの、エリアンサスではまだほとんど知見がなく、定植1年目の群落を対象とした場合、11月はできるだけ高く刈取り、2月以降は地上5cmの高さがよいとしながらも、年々、株の中央付近の成長点が高くなるため、極端な低刈りは避けるべきであると報告されている(松波ら 2014)。

エリアンサスの栽培試験をいくつか進める過程で、刈取り作業のやり易さと株の生育の様相に基づいて30cm程度の高さで刈取りを行ってきたが、定植4年目(群落C)を対象に、刈取りの高さと次年度の再生について検討を行った場合は、刈取り高さが高いほど、次年度の初期再生が良好であることがわかっている(森田・金井 2019i, 高橋ら 2019)。このメカニズムについての詳細は分かっていないが、エリアンサスは、根の中心柱柔細胞に多量のデンプン粒が蓄積する現象が認められ、これが次年度の再生のスターターとして利用していることが示唆されている(阿部ら 2010, Shiotsu ら 2015)。

また、エリアンサスは多年生作物で、分けつの生育にかなり遅速があ

り、それが株再生に有効に働いていると考えられているため(金井ら 2019a)、分げつの生育、とくに生長点の状況や分げつ芽の生育に着目して刈取りを行う必要がある。

このように刈取り高さについては、まだ不明な点も多く、さらなる検討が必要であるが、これまでの検討結果(森田・金井 2019i, 高橋ら 2019)に基づいて、敢えて刈取り高さを示せといわれれば、40~50cmということになる。ただし、対象とした場所で、対象とした品種をこのように栽培した場合にはということではない。さらに栽培年数を重ねて株の生育状況が変われば、それに応じて調整が必要であろう。

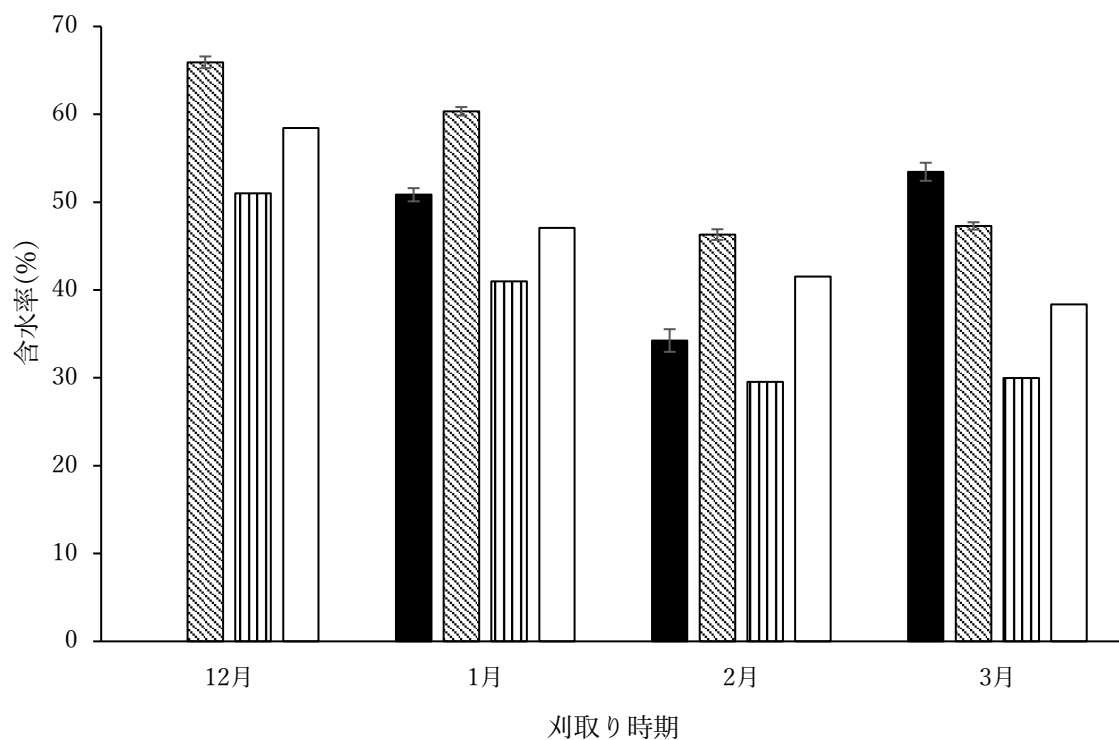
以上、刈取り方法、時期について多少の課題はいくつか残るものの、現時点では、立ち枯れが進んだ年明け3月に40~50cmの高さで刈取り、茎葉部の表面に傷をつけてから約1ヶ月間、風乾することが最適である。

表 10-1. 材料と前処理との組み合わせ.

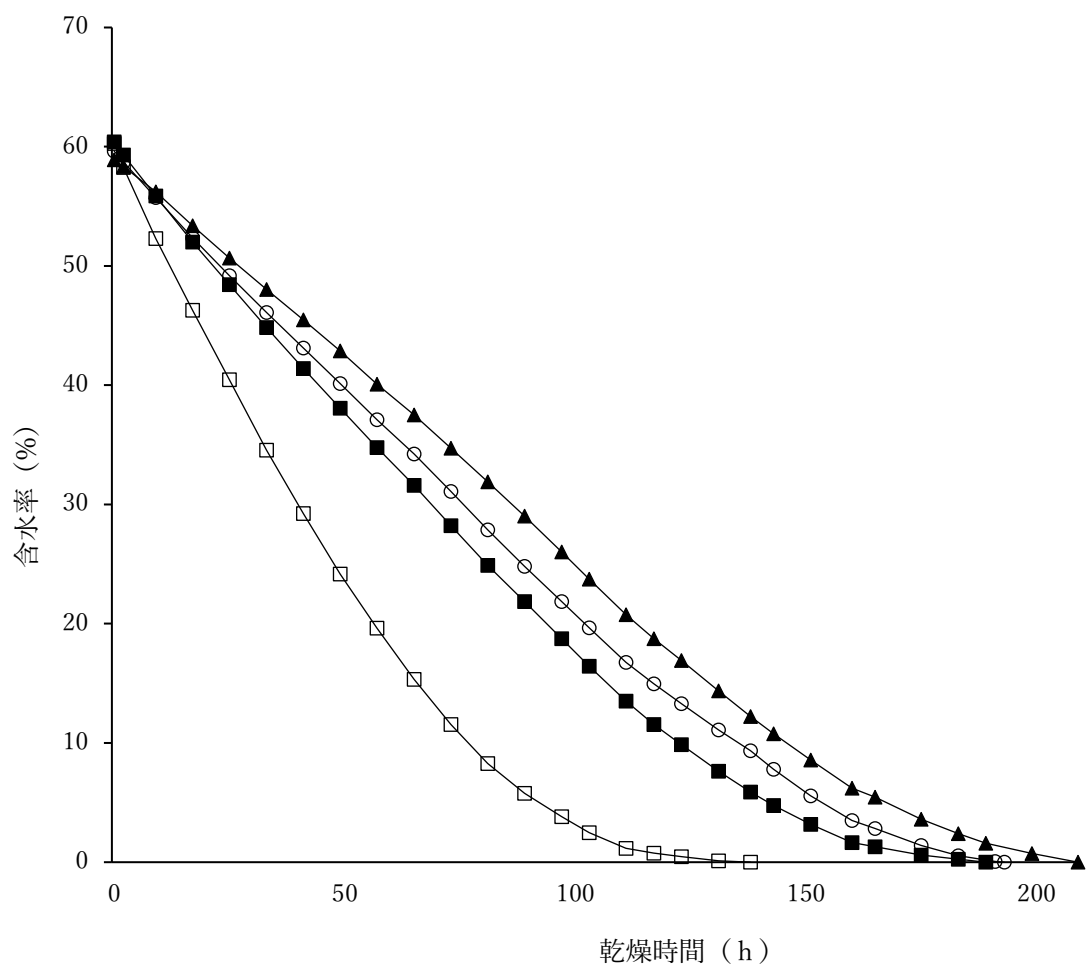
材料	30 cm	チョッパー区	風乾区	損傷区	損傷風乾区	
群落 A	2 年目	○	○	○	○	×
	3 年目	○	×	×	×	○
群落 B	1 年目	○	×	×	×	×
	2 年目	○	×	×	×	×

○：検討した項目，×：未検討の項目.

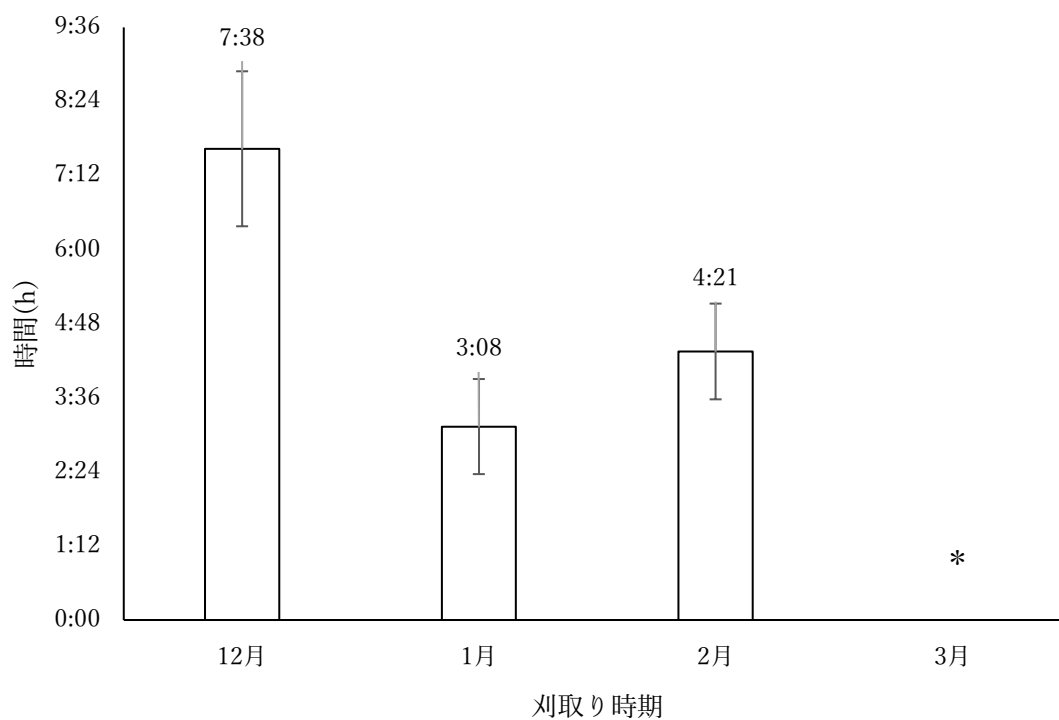
注：各処理の詳細は，本文を参照.



第 10-1 図 それぞれの群落における刈取り直後の含水率。
 ■群落 B (定植 1 年目), ▨ : 群落 A (定植 2 年目),
 ▩ : 群落 B (定植 2 年目), □ : 群落 A (定植 3 年目).
 図中のバーは標準誤差を示す.



第 10-2 図 群落 A (定植 2 年目) の材料を 1 月に収穫して異なる前処理をして乾燥させた場合の含水率の推移。
 ○ : チョッパー区, ■ : 30 cm 区, ▲ : 風乾区, □ : 損傷区.



第 10-3 図 群落 A (定植 3 年目) の材料を損傷風乾処理した場合の含水率 15% の到達時間.

* : 定植 3 年目の損傷風乾区の方法は, 立毛乾燥と損傷風乾処理のみで含水率が 15%以下となった.

第 3 部 利用システムの構築と評価

第 11 章 利用システムと事業性評価

私たち人類は、産業革命以降、多くのエネルギーを使って便利で豊かな生活を実現してきたが、それに伴って石油枯渇や地球温暖化の問題を引き起こした。これらの問題を解決して持続的な社会を作るための一つの手段として再生可能エネルギーが注目されている(Shiotsu ら 2011)。また、日本では、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故で放射性物質による汚染をきっかけとして、再生可能エネルギーの利用について注目を集めるようになり、復興政策の一つとして、資源作物の栽培が掲げられるようになった。

しかし、再生可能エネルギーを利用していく際、特にエリアンサスのようなセルロース系エネルギー作物を日本で栽培し、利用していく場合、事業としてうまく運営されるかどうかを検討する必要がある。しかし、システム実行時の利益性や、地域社会に与える効果などの事業性評価はされていない。

そこで本章では、利用システムとして、エリアンサスを栽培し、ペレット加工して施設園芸の暖房燃料として利用した場合の事業性評価を行った。ただし、この利用システムを導入した場合と、導入しなかった場合を比較検討するためには、基準となるシステムが必要となる。そこで、日本で再生可能エネルギーの利用について注目を集めるきっかけとなった東日本大震災に着目して、その被災地でエリアンサスを栽培し、熱利用した場合の事業性評価を行った。すなわち、東京電力福島第一原子力発電所に近く、被害が特に大きかった浪江町を対象として、浪江町が想定しているシステムの事業性評価と、復興支援の一環として、エリアンサスを栽培し、ペレット加工して施設園芸の暖房燃料として利用した場合の事業性評価を行い、両システムを比較検討した。

11-1. 材料と方法

(1) シミュレーションの条件設定：基準システム

本研究で提案するシステムが、本来、浪江町が想定しているシステムの事業性と比較検討するために基準となる基準システムが必要となる。そこで、浪江町が農業再生計画で公表しているシステム(注 1)を基準システムとした。すなわち、景観作物の栽培を利用した農地保全と、A 重油を利用してトルコギキョウを栽培し、最も価格が高くなる冬季に出荷することとを組み合わせたシステムである。

(2) シミュレーションの条件設定：提案システム I

システムのスケールとして、浪江町「花のまち計画」において浪江町の農家が提出している経営計画(注 1)を参考にし、標準的な大きさ(1 棟 300m²)のハウス 10 棟でトルコギキョウを、最も価格が高くなる冬季に出荷するため栽培することを想定した。この場合、温室暖房燃料である A 重油の消費量の試算は温室暖房燃料消費試算ツール(注 2)を参考とした。すなわち、1 棟当たり 15kL/年の A 重油が必要となり、10 棟で 150kL/年の A 重油が必要となる。これは熱量に換算しておおよそ 6600GJ で、エリアンサスペレットの熱量が 18GJ/t であるため(服部ら 2015)、ペレットは 360t(=6600GJ÷18GJ/t)必要となる。ペレット加工時の歩留りを 90% とすると、バイオマスの必要量は 400t(=360t÷0.9)となり、農地 12ha(=400t÷33.1t/ha)でエリアンサスを栽培する試算となる。

(3) シミュレーションの条件設定：提案システム II

提案システムIのスケールに加えて、同様の評価方法でペレット利用の規模を拡大した場合の試算および評価も行った。すなわち、評価の対象は①浪江町施設園芸(提案システムI)、②浪江町公共施設、③浪江町民間業務用、④近隣地域(南相馬市、大熊町を想定)公共施設、⑤近隣地域民間業務用を想定した。

この場合の規模拡大によるペレット需要量の算出方法は、以下のようにした。

ペレット需要量 = 福島県全体の A 重油消費量 × (対象地域帰還希望世帯

数＋非避難世帯数)/福島県総世帯数×A 重油熱量/ペレット熱量

ただし、提案システムIIではペレットの利用以降の利益額の収支推定が困難であるため、評価の対象はエリアンサスの栽培～加工・販売までとした。

(4) システムの評価方法

本研究の提案システムの評価では、事業価値を算出して評価した(小林ら 2005)。小林ら(2005)によると事業価値は①経済的価値、②社会的価値、③環境価値の3つからなるが、定量的評価が可能である項目と、定性的にしか評価ができない項目とがある。本研究では、3つの価値の定量的評価が可能な項目のうち、金額として提示できる部分を試算し、合計した金額を利用してシステムの評価を行った。金額で提示できる内容と計算の考え方は、以下のとおりである。

- ① 経済的価値：利益額(=(売り上げ－運転費)×事業継続年数－設備投資費)＋復田費用削減額(=乾田復元コスト×栽培面積)
- ② 社会的価値：地域所得創出額(=人件費＋経済波及効果の所得増加額)×事業継続年数
- ③ 環境価値：CO₂排出削減価値額(想定システム CO₂排出量－提案システム CO₂排出量)×CO₂排出削減価値額)×事業継続年数

この3つの価値を合計し、継続年数別に4%の割引率を設定して(注3)、正味現在価値として算出したものを事業価値とした。また、それとは別に耐用年数などを用い、それぞれのシステムにおける単年度ごとの各項目価値および事業価値も算出した。

なお、基準システムの場合、基準システムはA重油への支出額が大きくなるため、重油の購入による地域への経済波及効果のうち、被雇用者所得額も地域所得創出額に含めた。

また、復田費用削減額(10年以上経過した放棄田の復元費用)は、有田・大黒(2007)の研究を参考にし、500万円/haとした。本研究では、復田費用が変化しなくなる10年目で復田費用を設定して、50万円/年/haの復田費削減効果があるとした。

さらに提案システムⅡにおける規模の拡大した際の費用変化は、機械費はペレットの製造に関わる機材の費用はバイオマスペレットを用いた計画事例(表 11-1, 注 4)を参考にした他、近隣地域でもペレット利用を行う際は農地の距離が遠くなると想定されるため、ハーベスターを 2 台とした。人件費は配達に関して新たに 1000t/人/200 万円の割合で雇用するとした(農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」2006)。またペレット製造機の他にも地域全体のボイラーの機械管理を行ってもらうことを前提に機械管理の人件費を 500 万円/人とした。

11-2. 結果

(1) 提案システムⅠの評価

経済的価値

経済的価値は直接的と間接的の 2 種類に分けられる。すなわち、利益額は実際に金銭として利益を得ているため直接的経済価値とされ、復田費用削減額は本来、必要となるはずの復田費用が削減できるので、間接的経済価値とした。

直接的経済価値である利益額の算出に利用した数値は表 11-2, 表 11-3 の結果となった。すなわち、提案システム全体の単年度当たり利益額は -472.5 万円となったが、基準システム全体の利益は 459 万円であり、提案システムが約 900 万円、基準システムを下回っていた。また、基準システムですべての関係者の経営が黒字になるのに対して、提案システムではすべての関係者が赤字となった。

また間接的経済価値である復田費用削減額は、提案システムおよび基準システムのいずれも、12ha の農地保全することで復田費用削減額は年間 600 万円となった。

社会的価値

社会的価値である地域所得創出額は、システム実行時の人件費とそれによる経済波及効果のうち、被雇用者所得の総額とした。その結果、提案システム全体の地域所得創出額は 900 万円/年であった。内訳は、エリ

アンサス栽培・輸送が 20 万円，ペレット加工が 690 万円，トルコギキョウ栽培が 190 万円であった．このようにペレット加工が占める割合が大きかった．

これに対して，基準システム全体の地域所得創出額は 270 万円/年で，内訳はトルコギキョウ栽培が 270 万円である．すなわち，提案システムが基準システムより約 600 万円上回った(表 11-4)．

環境価値

提案システムの CO₂ 総排出量は 53t/年で，基準システムは 277.5t/年(=基準システム総 CO₂ 排出量 400t－レンジの CO₂ 固定量 120t)となり，差し引き提案システムの導入により毎年約 225t の CO₂ 排出削減量が可能である(表 11-5)．すなわち，提案システムは，利用時の CO₂ 排出量を理論上はゼロであるが，基準システムでは，A 重油燃焼による CO₂ の排出があるためである．

この削減可能量を 5000 円/t-CO₂(国土交通省)で金銭に換算すると CO₂ 排出削減価値額 114 万円となった．

事業価値

経済的価値，環境的価値，環境価値の 3 つの価値を実行年数ごとに累積し，4%の割引率で NPV 法(正味現在価値法)を用いて事業価値を算出した結果，初年度はマイナスであるが，5 年目以降にはプラスとなり，条件付きであるが実行価値があると判断された(第 11-1 図)．これに対して，基準システムは初年度からプラスとなっており，25 年目まで常に提案システムを上回った．事業価値の内訳を比較分析すると，利益額以外においては，提案システムは基準システムと同等か，上回ることになる．しかし，利益額が大きくマイナスとなるために事業価値が低下し，実現性が低くなった(第 11-2 図)．

(2) 提案システムⅡの評価

規模を拡大した場合のペレット需要量について試算した結果，①浪江町施設園芸(提案システムⅠ)では 360t，②浪江町公共施設では 900t，③浪

江町民間業務用では 2870t, ④近隣地域(南相馬市, 大熊町を想定)公共施設では 6830t, ⑤近隣地域民間業務用では 20890t となった(表 11-6).

経済的価値

直接的な経済価値である利益額は対象範囲が広がるにつれて高くなり, 浪江町での民間業務用の利用まで含めると, システム全体の利益額の収支は黒字に転換した(第 11-3 図). 経年別でも, 浪江町の業務用が収支の転換点となっている(第 11-4 図). 地域システムが黒字に転換するために必要な需要量の目安は, 業務用向けの試算に利用した際の 2000t/年となる. そのため, 必要な農地面積は約 80ha である.

間接的経済価値である復田費用削減額も需要量の増加に伴い農地の面積が増加するため, 比例的に増加し, 経済的価値に貢献した.

社会的価値

社会的価値である地域所得創出額も規模拡大に伴って増加した. ただし, 規模拡大とともに合理化が進んで人件費は削減されるため, 地域所得創出額と規模の関係性は比例しておらず, 増加率は漸減していた(第 11-5 図).

環境価値

環境価値である CO₂ 削減価値額は, 規模の拡大に比例して増加した.

事業価値

以上の 3 つを合計した事業価値は, 第 11-6 図のとおりである. エリアンサスを栽培してペレット利用するシステムは, 年間 360t 以上の需要があれば, いずれのシナリオにおいても事業価値がプラスという試算になった. 同時に, すべての価値が規模拡大に伴って増加した. そのため, 規模を拡大すれば事業価値は上昇することになる.

11-3. 考察

エネルギー作物を栽培し, エネルギーとして供給しようとした場合, 栽培システムの検討だけでは不十分である. すなわち, 栽培システムと利用システムのシステム全体におけるエネルギー収支やエネルギー効

率，そしてシステムとして運営していけるか，つまり事業価値の有無がポイントとなる。

そこで，本研究では，利用システムとして東日本大震災で被災した浪江町を対象として，浪江町が想定しているシステム(基準システム)と，エリアンサスを栽培し，ペレット加工して施設園芸の暖房燃料として利用するシステム(提案システム)の事業性評価を行い，比較検討した．事業性の評価としては継続年数別に算出した事業価値がプラスとなれば，提案システムの事業性があると判断できる．ただし，事業価値は経済的価値，社会的価値，環境価値の3つを総合的に判断し，算出されるため(小林ら 2005)，経済価値がマイナスであると，システム運営者(本研究では，自治体を想定している)の負担が増えるため，将来的に自治体やシステム運営者の負担をゼロとすることを目指して利用システムの構築を行った．

(1) 提案システム I および II における事業性評価

提案システムIの評価の結果から，社会的価値，環境価値は基準システムを上回っており，事業価値は基準システムと比較してもほぼ同程度のプラスとなっているため，提案システムIは十分に実行する価値があると評価できる．ただし利益額が基準システムと比較し大きくマイナスになるため，それを補助するシステム運営者の負担が大きくなるためシステムの実現性は低くなる．また，システムが実行されたとしても，それが持続可能なシステムとして成り立つかは疑問が残る．

そこで，提案システムIIの評価の結果をみると，規模の拡大とともに利益額は増加し，約 2000t のペレット需要を目安に利益額がプラスに転換した．したがって，エリアンサスの栽培利用システムにおいては，一定量以上の需要を確保したうえで提案システムを導入することが望ましい．

しかし，システムの規模拡大した場合，エリアンサスの栽培地をどこにするかが問題となる．そこで，以上の結果と現場の実情を勘案して，もう少し考案すると，エリアンサスの栽培は，浪江町では居住制限区域

の農地および帰還困難区域の農地，近隣地域ではそのほかに耕作放棄地が対象となると考えられる．

まず，居住制限区域内で安全基準値をクリアしている農地で，管理者が不在のために中長期の保全管理が必要な農地でエリアンサスを栽培し，ペレットの原料とする．また，帰還困難区域では，農地保全を目的としてエリアンサスを栽培し，安全基準値をクリアしていれば漸次利用していくことが考えられる．近隣地域に関しても，同様である．

(2) 事業化の向けての課題

以上の解析結果を踏まえて，提案システムの事業化への課題などについて，最後にもう少し考えておきたい．まず，提案システム導入のための立地条件である．コスト削減のためには，ペレット原料となるエリアンサスを栽培する農地とペレットの需要先とができるだけ近い方がよい．確実に利用が可能な生産地は主に居住制限区域であり，利用先は町の中心部であることを考えると，常磐線以西の町中心部側が候補となるだろう．大熊町や南相馬市などの近隣地域から原料バイオマスを受け入れる際にも中心地となりうることから，有力な候補地と考えられる．

立地とともに，あるいはそれ以上に重要な課題は利用で，ペレットの需要量をいかに増やして提案システムの実現性を上げるかということが大きな課題となる．その対策として，公共機関への優先的な導入と，民間における利益誘導を提案したい．まず，浪江町内の公共施設においてペレットボイラーを導入し，ペレットの安定した需要を作り出す．また，地域で栽培されたエリアンサスのバイオマスから生産されたペレットに対して再生産可能な最低価格を保障する．一方で，ペレット購入者に対しては，長期的にみれば設備投資費用を回収できる程度の補助(従来利用していた燃料との価格差+ α)で民間部門への導入を推進する．ペレット価格が従来の燃料価格より割安になれば補助を減らすか，無くせばよい．また，差額による利益は購入者と販売者が交渉で決めるという仕組みがあるのが望ましい．ただし，近隣地域にも利用を促す際は価格の補償が困難であることも考えられる．その場合は，耕作放棄地対策の一

環としてという形で近隣地域の公共施設に導入を依頼するというのが現実的な対応であろう。

また、規模拡大に伴って、いくつかの作業で機械化が想定される。すなわち、栽培管理では作業の効率化や人員の問題で、苗の定植や間引きなどで機械化が想定され、その場合、新たに苗移植機や間引きのためにユンボなどの農業機械や重機の購入が必要となる。この点については、詳細に試算が出来ていないが、事業化するにあたっては一つのポイントになると考えられる。

(3) 提案システムの展望

エネルギー作物であるエリアンサスを栽培してバイオマスをペレットに加工し、現地で暖房燃料に利用するとシステムは施設園芸で利用する(360t 以上)規模の需要と 5 年以上の中期計画があれば、事業価値はプラスとなり導入する価値がある。それ以上の規模であれば、さらに提案システムの事業価値は向上し、導入する価値も増す。ただし、施設園芸や公共施設での利用程度の規模では、バイオマスの導入によって事業価値にさして違いはなく、経費が多くかかるだけという見方もあるだろう。しかし、本研究での事業価値の評価は、あくまで金銭換算できるものとして利益額・復田費削減額・地域所得創出額・CO₂ 排出削減価値額のみを用いて試算したものである。つまり、定性的に期待される効果に関しては評価を行っていないため、定性的に期待できるものもあることを忘れてはならない(第 11-7 表, 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」 2006)。

その効果は、浪江町行政が「浪江町まちづくり計画」, 「まち・ひと・しごと創生浪江町総合戦略」に掲げている目標を実現するために役立つものも多く、実際には施設園芸の規模であっても、提案システムの導入は本研究の評価以上に価値あるものとなることが期待できる。

また、提案システム自体によるものではないが、地域レベルで提案システムが導入された場合、エコツーリズムによる集客や、それに伴った浪江町の PR, 情報発信も期待できる。日本ではとくに東日本大震災以

降，バイオマスを活用したエネルギーの生産と利用が注目されるようになったが，成功例は多くなく，しかも，そのほとんどは木質バイオマスによるものである．そのため，導入が成功すれば，草本系バイオマスを地域レベルで活用した先進事例となる．これは，耕作放棄地問題の解決モデルとしての意義があると考えられる．

以上，東日本大震災の被災地の浪江町を対象として，セルロース系エネルギー作物を日本で栽培し，利用していく場合の事業性評価を行った．いずれの規模でも事業を実行する価値があると評価できたが，一定量以上の需要を確保したうえでシステムを導入することが望ましいと考えられた．このシステムは，本研究で対象とした東日本大震災の復興支援の他，耕作放棄地問題の解決モデルとしても，有効な手段となると考えられる．

表 11-1 ペレット製造機費用.

ケース	資源投入量(t/年)	ペレット生産量		
		年間(t/y)	日(t/d)	設備費(百万円)
1	155	120	0.48	21
2	581	451	1.8	52.8
3	1006	781	3.12	77.7
4	2709	2102	8.41	155.3
5	4412	3423	13.69	218.5

表 11-2 提案システムおよび基準システムの項目別収支.

		栽培・刈り取り				回収				加工				利用			
提案システム	農地保全補助金	420	資材費	120	売上	80	人件費	2.5	売上	1080	設備費	437.5	売上	1600	資材費	320	
			設備費	400			燃料費	1			人件費	650			設備費	60	
			人件費	14.3							光熱費	91			人件費	180	
			光熱費	4.3							資材費	175			光熱費	1116.9	
	合計	420	合計	538.6	合計	80	合計	3.5	合計	1080	合計	1353.5	合計	1600	合計	1676.9	
	農業復興組合 -122.1									ペレット製造会社 -273.5				トルコギキョウ農家 -76.9			
システム全体収支 -472.5																	
基準システム	農地保全補助金	420	資材費	96	/				/				売上	1600	資材費	320	
															設備費	15	
															人件費	230	
															光熱費	900	
	合計	420	合計	96									合計	1600	合計	1465	
	農家・農業復興組合 324												トルコギキョウ農家 135				
システム全体収支 459																	

表中の単位は万円

表 11-3 提案システムおよび基準システムのステークホルダー別の収支.

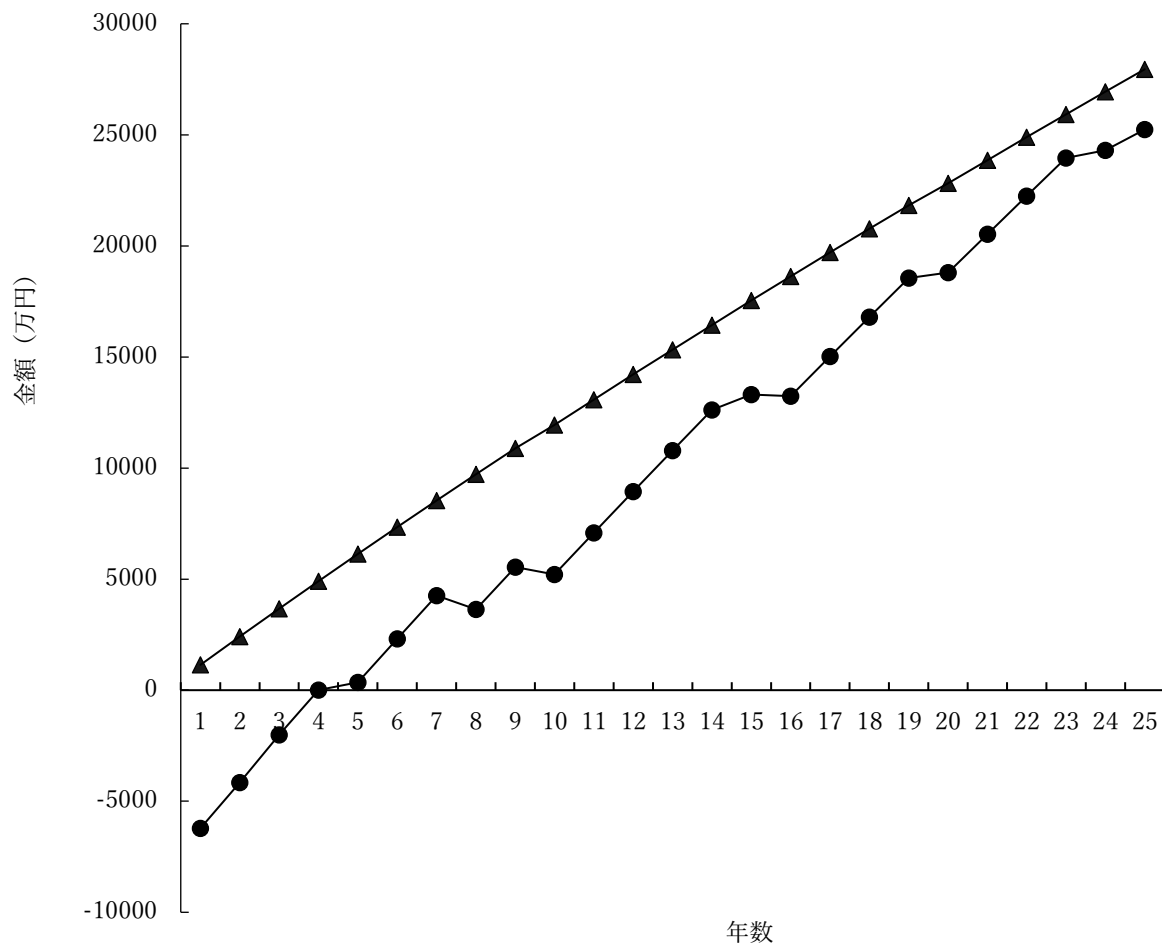
提案システム				基準システム			
設備投資費用							
	万円	耐用年数	1年あたり費用	設備投資費用	万円	耐用年数	1年あたり費用
エリアンサス苗代	1200	10	120	重油利用設備費	150	10	15
ハーベスター費用	2000	5	400				
ペレット製造機費用	3500	8	437.5				
ペレット利用設備費用	1500	25	60				
初年度草刈	100	10	10				
設備投資費用合計	8300		1027.5	設備投資費用合計	150		15
運転費用							
刈り取り費用	4.3			レンゲ種子費用	96		
刈り取り燃料費	4.3			トルコギキョウ栽培人件費	180		
輸送人件費	2.5			トルコギキョウ栽培資材費	320		
輸送燃料費	1			各機械整備費用	50		
ペレット製造人件費用	600			燃料費	900		
ペレット製造光熱費	91						
トルコギキョウ栽培人件費	180						
トルコギキョウ栽培資材費	320						
ペレット製造機維持費	175						
各機械整備費用	50						
光熱費	36.9						
運転費用合計	1465			運転費用	1546		
収入							
補助金	420			補助金	420		
市場価格	1600			市場価格	1600		
収入合計	2020			収入合計	2020		
収支							
利益額	-472.5			利益額	459		

表 11-4 提案システムおよび基準システムの工程別所得創出額.

	栽培・刈り取り		回収		加工		利用	
	地域新規需 要項目	地域所得 創出額	地域新規 需要項目	地域所得 創出額	地域新規 需要項目	地域所得 創出額	地域新規 需要項目	地域所得 創出額
提 案 シ ス テ ム	人件費	15 万円	人件費	2.6 万円	人件費	690 万円	人件費	191 万円
	地域経済 波及効果	15 万円	合計	2.6 万円	合計	690 万円	合計	191 万円
	地域所得創出額 898.6 万円							
基 準 シ ス テ ム	/		/		/		人件費	191 万円
							光熱費	76 万円
							合計	267 万円
地域所得創出額 267 万円								

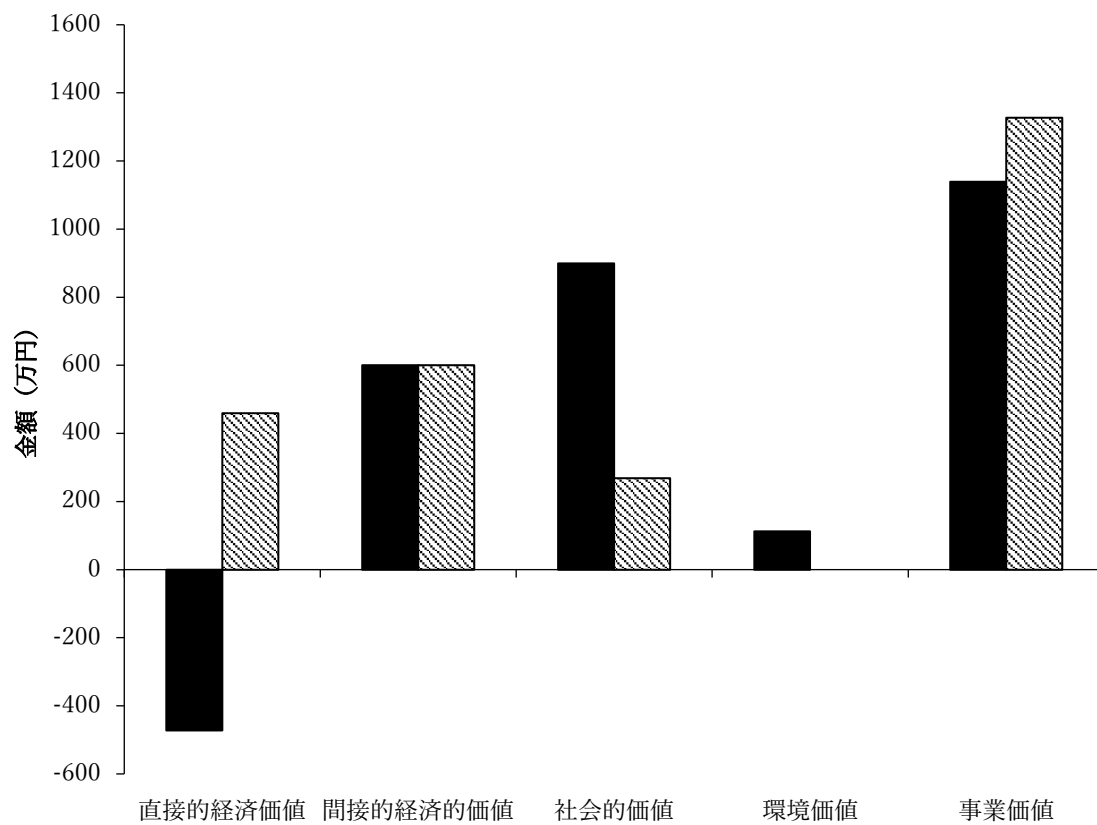
表 11-5 提案システムおよび基準システムの工程別 CO₂ 削減価値額.

提案システム	栽培・刈り取り				回収				加工				利用				
	CO ₂ 固定項目	CO ₂ 固定量	CO ₂ 排出項目	CO ₂ 排出量	CO ₂ 固定項目	CO ₂ 固定量	CO ₂ 排出項目	CO ₂ 排出量	CO ₂ 固定項目	CO ₂ 固定量	CO ₂ 排出項目	CO ₂ 排出量	CO ₂ 固定項目	CO ₂ 固定量	CO ₂ 排出項目	CO ₂ 排出量	
			刈取り	2.5t			輸送	0.1t				35.7t			電気	14.7t	
	レンジの 光合成	129t														暖房	406.5t
基準システム	CO ₂ 削減 可能量	-129t	CO ₂ 削減 可能量	-2.5t	CO ₂ 削減 可能量	0t	CO ₂ 削減 可能量	-0.1t	CO ₂ 削減 可能量	0t	CO ₂ 削減 可能量	-35.7t	CO ₂ 削減 可能量	0t	CO ₂ 削減 可能量		392.5t
	CO ₂ 削減 可能量 合計		-131.5t		CO ₂ 削減 可能量 合計		-0.1t		CO ₂ 削減 可能量 合計		-35.7t		CO ₂ 削減 可能量 合計		391.8t		
CO ₂ 削減可能総合計量 225.2t																	
CO ₂ 削減価値 227t-CO ₂ × 5000 円 = 112.6 万円																	



第 11-1 図 提案システムおよび基準システムの年度別事業価値の推移。

●：提案システム，▲：基準システム。

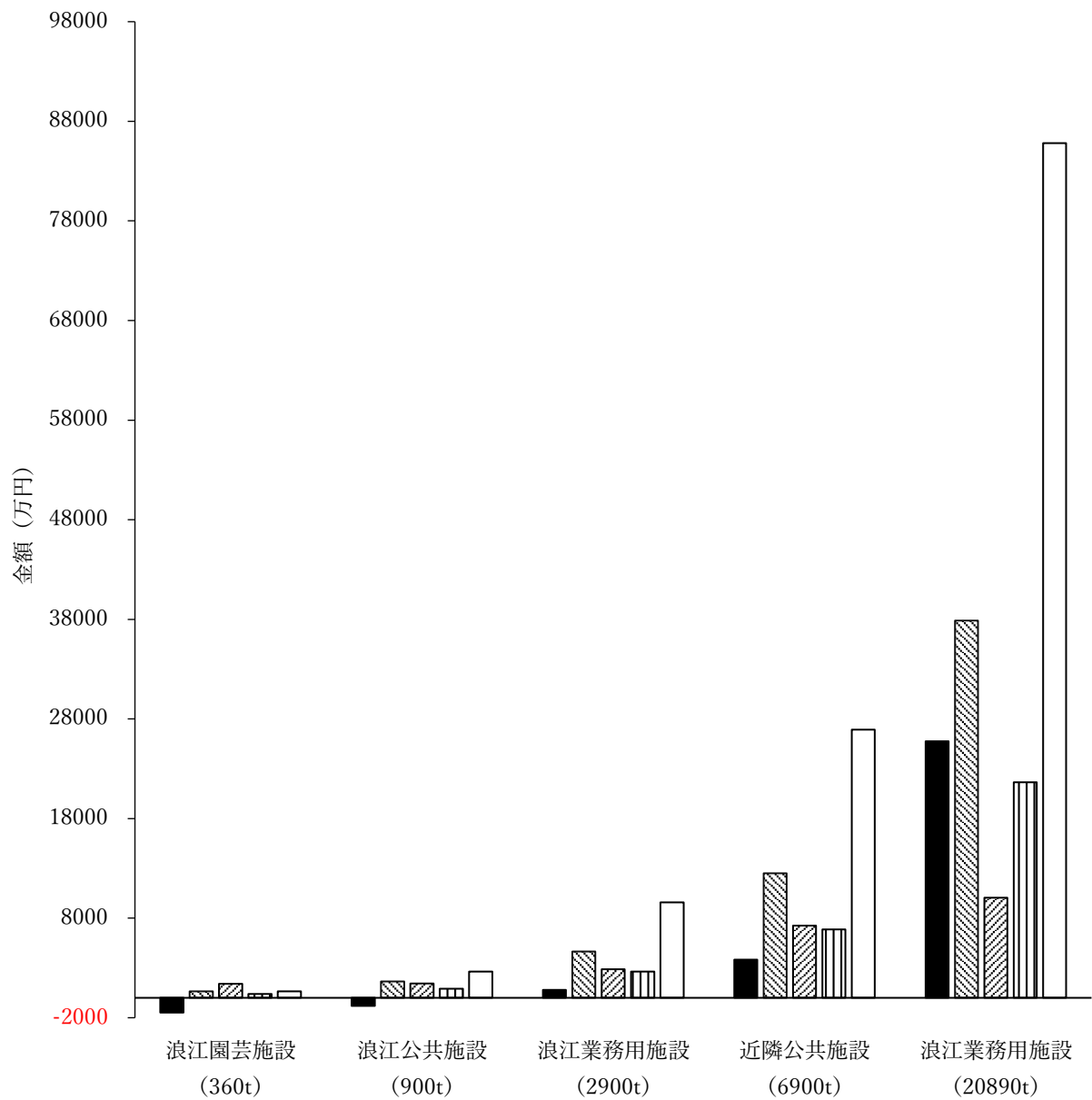


第 11-2 図 提案システムおよび基準システムの事業価値の内訳。

■：提案システム，▨：基準システム。

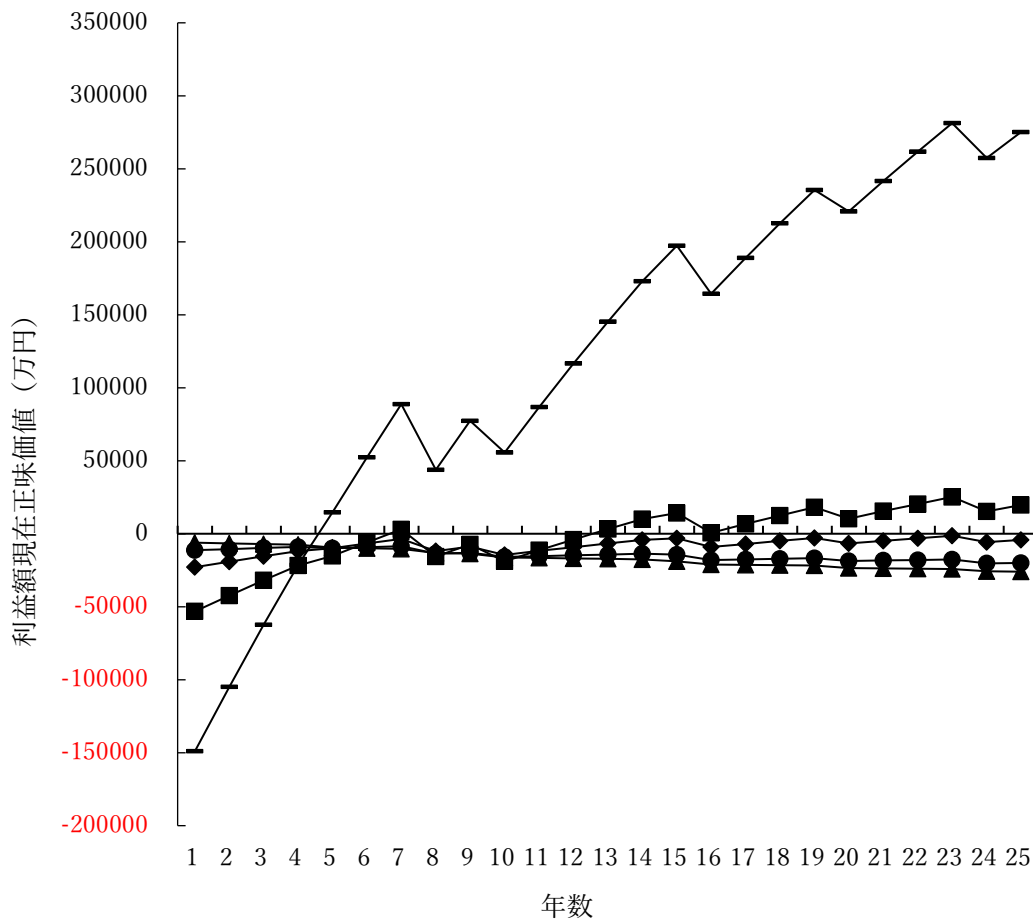
表 11-6 ペレット製造機費用.

ケース	資源投入量 (t/年)	ペレット生産量		設備費 (百万円)
		1年	1日	
① 浪江町施設園芸	155	120	0.48	21
② 浪江町公共施設	581	451	1.8	52.8
③ 浪江町民間業務用	1006	781	3.12	77.7
④ 近隣地域公共施設	2709	2102	8.41	155.3
⑤ 近隣地域民間業務用	4412	3423	13.69	218.5



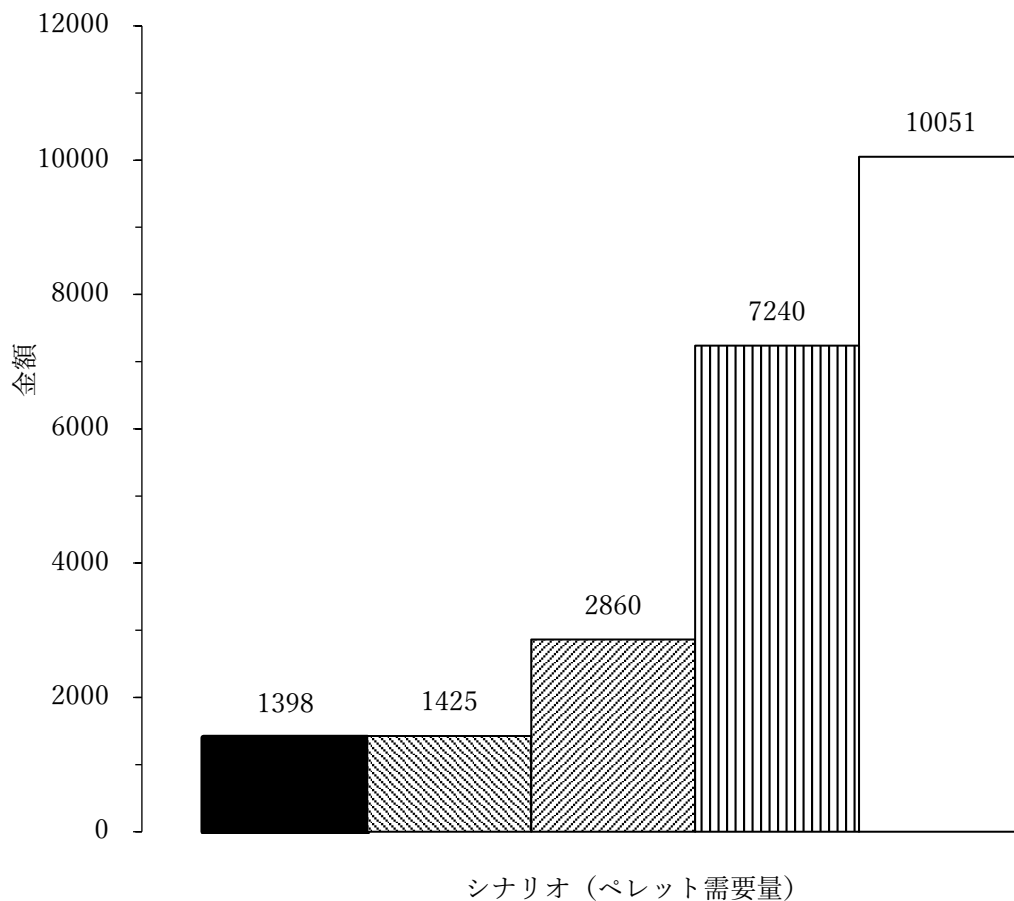
第 11-3 図 提案システムのシナリオ別単年度利益額。

■：直接的経済価値，▨：間接的経済価値，▩：社会的価値，
▮：環境価値，□：事業価値。



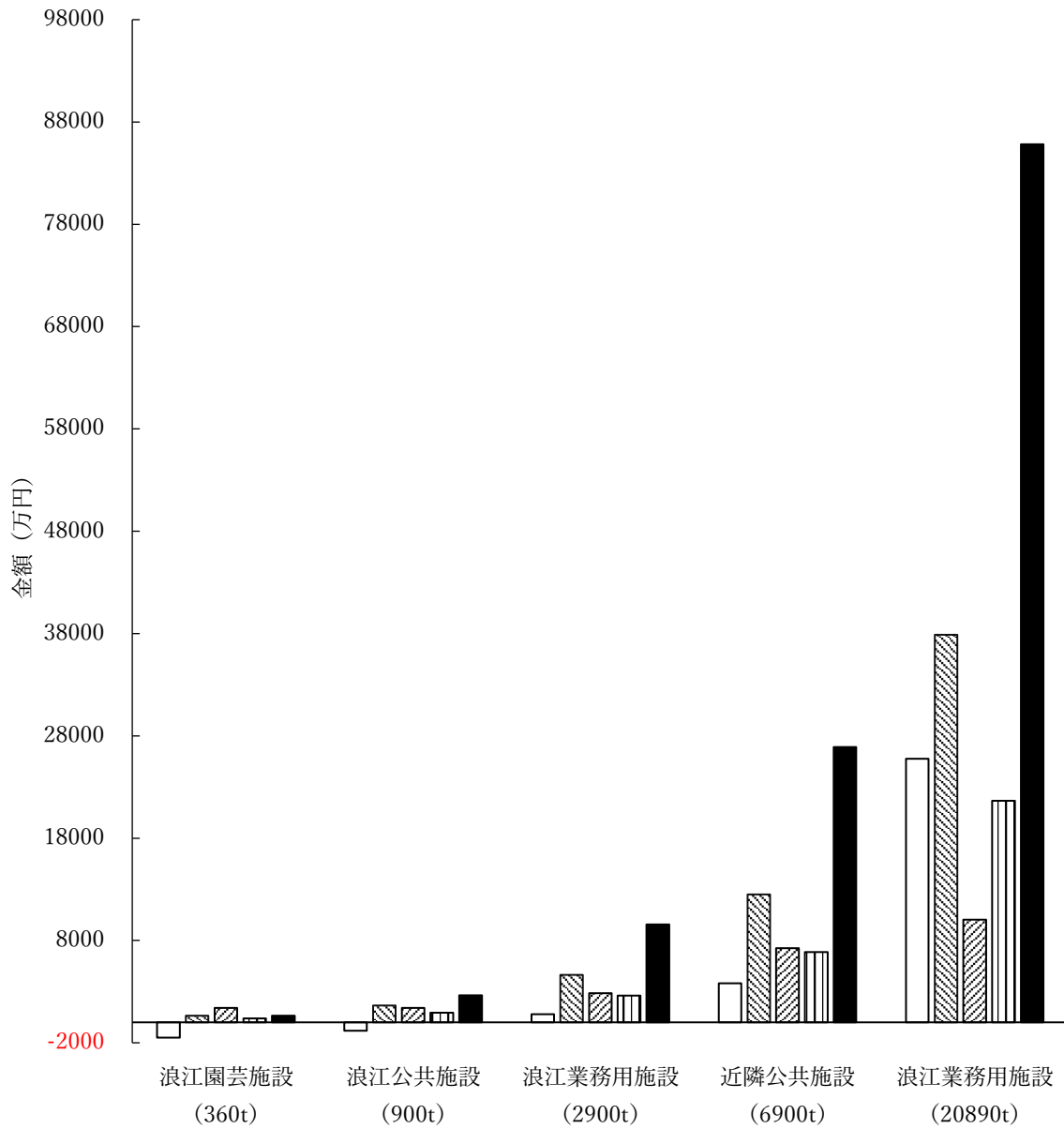
第 11-4 図 提案システムのシナリオ別実行年度別利益額.

- ▲ : 浪江町園芸施設(360t), ● : 浪江町公共施設(900t),
- ◆ : 浪江町業務用施設(2900t), ■ : 近隣公共施設(6900t),
- : 浪江町業務用施設(20890t).



第 11-5 図 提案システムのシナリオ別地域所得創出額.

- : 浪江施設園芸(360t), ▨ : 浪江公共施設(900t),
- ▩ : 浪江業務用(2900t), ▧ : 近隣公共施設(6900t),
- : 近隣業務施設(20890t).



第 11-6 図 提案システムのシナリオ別単年度事業価値.

□ : 利益額, ▨ : 復田費削減額, ▩ : 地域所得創出額,
 ▮ : CO₂削減量削減価値, ■ : 事業評価.

第 11-7 表 提案システムの導入により期待できる効果.

経済性	新たな産業創出 復田費削減	地域経済の活性化 燃料調達手段の選択肢増加 経費削減 エコツーリズムによる観光客増加
社会性	雇用の創出 (地域所属創出)	農地の荒廃化防止 多くの市民の地域への誇り向上 地域イメージの向上 環境教育教材としての活用
環境性	CO ₂ 排出量削減	景観の保全

総合考察

—エネルギー作物のエリアンサスの

低投入持続的な栽培・利用システムの構築—

本研究では、バイオマスエネルギーの原料作物として注目されているエリアンサスに着目し、エリアンサスの群落形成に関する作物学・栽培学的研究を推し進め、得られた知見を踏まえてエリアンサスの栽培・利用システムを構築することを目的として研究を行った。その場合、エネルギー作物を栽培して利用していくには、原料作物の群落における収量について検討するだけでは不十分である。事業化するためにはさらに検討すべき課題として、栽培地選定、栽培管理体系、利用システムを構築する必要がある。そこで、事業化するための個別要素技術に関する研究を進めるとともに、利用システムを構築し、事業性を評価することを試みた。得られた結果を踏まえて、また関連の研究成果も合わせて、総合考察では事業化に向けての栽培・利用システムの構築について考察する。

1. 栽培地の検討

まず、検討すべき課題として栽培地がある。すでに述べたように、栽培場所の問題は、これまでの作物では検討の必要がなかった。しかし、エネルギー作物の栽培では、食糧との競合を避けるためには、最終的に非農地で栽培する必要がある。実際にエリアンサスにおいて、日本の非農地での試験栽培も行われ、高い収量が得られることがわかっている(森田ら 2013a)。

また、その他の候補地としては、東日本大震災で被災した農地のように、物理的な要因や風評被害のために食用作物を栽培していない農地や、耕作放棄地が有力な栽培候補地と考えられる。特に、東日本大震災で被災した農地(水田)については、実際に試験栽培を行い、高い収量が得られることがわかっている(阿部ら 2015, 森田・金井 2020c)。

2. 苗の生産と定植方法

エリアンサスは日本国内では、南西暖地を除き、稔実した種子を得ることができず、また稔実した種子を得られても苗を育成するのに時間を要する。そのため、ある程度の面積までであれば、株分けした大型苗を定植することが現実的である。ただ、面積が広くなると、苗の準備に時間と労力を要することが問題となる。

しかし、エリアンサスでは挿し木などの栄養繁殖が難しく、組織培養と比較すると効率が悪い。そこで、分げつ芽を利用して組織培養による苗生産について検討した結果、70%エタノール 2 分間+1%次亜塩素酸ナトリウム 10 分間の処理を基本にすれば、汚染発生をある程度、抑えることが可能であり、分げつ芽を培養する場合、MS 培地を基本培地とし、NAA と BA を組合せることで、発根培地を必要としない苗生産方法を確立することができた。現状では、まだコンタミネーションが少なくないなどの課題があり、さらに苗生産の効率を上げる必要があるが、事業化システムとして、苗を効率的に大量生産できることや、挿し木などの栄養繁殖以外の方法を確立したことは大きな成果である。

このようにして準備した苗をどのように定植するかについても、事業化にとって課題である。本研究で利用した群落は、いずれも株分けで準備した苗を移植ゴテで定植した。この場合、作業者のスキルの違いによって異なるが、110 株の苗を 10 人で植え付けるのに約 1 時間かかった。

したがって、栽培面積が小規模で、作業者を確保できる場合は、移植ゴテを用いて人海戦術で苗を定植することも可能である。しかし、事業化することを考えると、何千、何万 ha の大面積に栽培することも想定され、移植ゴテを用いた植え付けは現実的ではない。したがって、事業として大面積に栽培をする場合は、やはり機械化が必要である。

そこで、野菜苗の移植機を利用すれば短時間で定植が可能であろうと考えた。ホームページなどの情報をみると、1a 当たり数時間で済む。ただし、野菜苗の移植機を利用するためには、いくつかの課題が残されている。すなわち、苗のサイズと栽植間隔が問題になると想定される。

まず、苗のサイズであるが、野菜の苗移植機に利用するのは、セル苗

である。しかし、エリアンサスの株分け苗や挿し木苗はサイズがセル苗より大きいため、そのままでは利用できない。一方、組織培養で生産した苗であれば、適切なサイズに調整できると考えられる。

また、野菜の苗移植機械の場合、栽植間隔は 0.1~0.5m 程度のものが多い。エリアンサスの苗を定植する場合の栽植間隔は通常、1m×1m であり(金井ら 2017a)、野菜の場合よりかなり広い。これは操作上の工夫で対応できる。例えば、移植機の栽植間隔が 0.2m に調整してあるなら、5ヶ所に 1ヶ所だけ苗を設置することで対応できる。

次に作業効率について考察するが、本研究で用いた群落 A および群落 B は移植ゴテを用いて、110 株を 10 人で移植したが、作業時間として、1 時間近く必要とした。便宜上、作業時間を 1 時間とすると、このときの栽植間隔は 1m×1m なので、1a を 1 人で 10 時間という計算になる。野菜の苗移植機械を使えば、1 人で 1a に苗を定植するのに数時間かかるので、現時点では手植えの数倍の効率となる。すなわち、非常に効率が高いわけではないが、作業者の疲労が少なく済むことは大きなメリットであろう。もちろん、専用機械の開発も考えられるが、稼働率が考えると費用対効果があるかどうか明らかでない。

いずれにしろ、エリアンサスの苗の定植では、人海戦術で対応できる面積であれば手植えでよいが、広い面積の場合は、野菜苗の定植機を利用することで、効率的に定植できると考えられる(森田ら 2019k)。

3. 栽培管理の体系

3-1. 群落構造と間引きの効果

エネルギー作物の栽培では、従来の食用作物以上に、持続的であり、費用および二酸化炭素排出量を削減することが一つのポイントになる。そこで、低投入持続的な栽培システムの構築が必要となる。栽培管理のなかで、最も重要なものの一つは栽植密度である。

定植 1 年目と 2 年目の群落の構造を解析した結果、分けつの生育が収量形成に大きく貢献することが明らかとなった。また、定植 2 年目になると群落の発育に伴って収量は増加するものの、群落内の相対照度は高

い位置で減衰して群落内の光環境が悪化した。そこで、間引きを行うことで栽植密度を下げて群落内の光環境を改善すれば、物質生産を改善できると考察した(金井ら 2017a)。そこで、複数の群落において異なる年次に間引きを行ったところ、いずれの群落でも受光態勢が改善され収量が増加した(金井・森田 2018, 水嶋ら 2018)。また早期に間引くと、必ずしも単年度の収量が高くなくても、数年にわたる群落の累積収量が最大化できることを明らかにした(金井・森田 2018, 森田・金井 2019a, 森田・金井 2019b)。

栽培面積が小規模で、作業者を確保できる場合は、シャベルを用いて人海戦術で間引くことも可能である。実際に、本研究で間引きを行った際には、シャベルを用いて株を引き抜いた。しかし、事業化することを考えると、何千、何万 ha の大面積に栽培することも想定され、シャベルを用いた間引きは現実的ではない。したがって、事業として大面積に栽培をする場合は、機械化の検討が必要になる。実際にユンボなどの重機を用いれば容易に引き抜くことを確認しているができる。また、6. 復田化の技術的検討でも述べるが、除草剤を利用すると苗を引き抜く際の作業効率が上がることがわかっているため、重機の利用に合わせて利用することも想定される。

3-2. 株を構成する分けつの生育

この背景として、エリアンサスの株は発育形態学的に異なる3種類の分けつから構成されることや、多くの分けつが株の周辺側に形成されることで、株が大型化することが明らかになった(金井ら 2019a)。また、それらの分けつでは上位3枚程度の葉が同時に展開し、生長速度が速いだけでなく、生長期間も長いため、多くの長大な葉身が形成された(板倉ら 2018)。葉身に比較して葉鞘は相対的に短い、伸長する節間が多く、葉鞘の着生する位置が相互に離れているため受光態勢に優れ、高い生産性を発揮していることを明らかにした。さらに、生育せずに枯死する分けつの生育には、出穂と刈取り時期との関係があるため、穂の構造および幼穂形成過程も明らかにした(金井ら 2019b, 森田・金井 2019g, 森田・

金井 2019h, 森田・金井 2019j).

3-3. 群落構造の機械的強度

高い物質生産性を発揮する背景として大型の群落構造があると考え、群落構造の形成と維持について、形態学的な観点から検討した。その結果、葉身は中肋によって支持され、中肋の大型化と形態的变化が葉身の機械的強度に貢献していることを明らかにした(金井・森田 2020)。また、茎は茎周辺の円環状領域に多くの維管束が密集しており、維管束周辺部分を細胞壁が肥厚した小型細胞が埋めているため円環状領域の機械的強度が高く、茎は倒伏しにくいと考えられた(森田ら 2020)。このような背景のものと大型の群落を維持できると考えられた(森田・金井 2020d)。

3-4. 群落内の生育変異の推移

エリアンサス群落は年々、大型化するが、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。そこで、群落を構成する株の生育変異と年次推移について、分げつ数に着目して個体群生態学的な観点から解析した結果、苗の定植後、茎数が増加しながら株の生育変異が拡大した。また、生育変異について株の相互作用に着目して検討した結果、茎数/株が小さいと株が受ける被圧が大きく、反対に大きいと被圧が小さい傾向が認められ、最終収量一定の法則が成り立つことが示唆された。さらに、間引きを行うと収量が増加するだけでなく、生育変異が拡大しにくくなる可能性も明らかにした(金井・森田 2021)。

エリアンサスの栽培管理としては、苗を植え付けたら、そのままでもよいが、生育を早めるためには、耕起と施肥、とくに耕起の効果が大きいことが確認できている。苗を植え付けた1年目は地上部の生育が緩慢であるため除草が必要となるが、2~3年経つと、雑草より生育が旺盛で、基本的に除草は不要となる。また、日本で栽培する場合、灌水の必要はない。さらに、病気や害虫の発生については報告がなく、農薬散布を必要としない。

以上のように、エリアンサスは苗を植え付けたら放っておけばよく、

省力で栽培することが可能である。このことは、耕作放棄地で栽培する場合に大きなメリットとなる。

3-5. 根系形成とターンオーバー

エリアンサスが大型群落を維持し、高い物質生産性や高ストレス耐性を示すことには根系が関わると考え、定植1年目および2年目の群落において根の形成と枯死について定量的な解析を行った結果、定植1年目から2年目にかけて根量が増えるとともに根系分布が深くなることや、新しい根が形成される一方で、古い根が枯死していることが確認できた。これに伴って土壤中に炭素が貯留され、エリアンサスを栽培することが地球温暖化対策となることを示した(金井ら 2017b, 森田・金井 2019d, 森田・金井 2019e, 森田・金井 2019f)。

4. 収穫と乾燥作業

栽培研究や試験栽培のレベルなら、刈払い機で刈取ることがきる。しかし、栽培面積が広かったり、株が大型化したりした場合は、刈払い機による人海戦術では難しい。そこで事業化する場合は、飼料作物の収穫システムを導入することが考えられる。非常に大型化した株については、サトウキビの収穫機械の利用も考えられる。

収穫については、方法や機械のほかに時期や刈取りの高さもポイントになる。刈取り時期については、刈取り後の再生にできるだけ悪影響を与えないことが求められる。この点についてはまだ十分に検討できていないが、10月に刈取りを行うと翌年の再生が極端に悪くなることが経験的に知られている。これには、地上部と地下部との間での物質の転流が関係していると考えられる。

また、刈取り高さも、翌年の再生の良し悪しに影響を与えることが明らかになっている。ある程度、高いところで刈取ると再生に良い影響を与える。そのメカニズムは明らかでないが、これにも刈り株に蓄積された物質が係っていると考えられる。ただ、刈取り高さが徐々に高くなると刈取り作業にも影響することが考えられる。現実的には地表面から

30cm くらいまでの間になるだろうが，具体的にどうするかを決めるには経験的な知見を積み重ねる必要がある(森田・金井 2019i).

刈取ったバイオマスは，利用の如何に関わらず，プラントに搬入する段階で含水率を 15%以下に落とすことが期待されている．そのため，株の再生に悪影響を与えない範囲で，刈取り時期を引き伸ばすことで，含水率を下げることが考えられる．刈取り後に強制乾燥も想定できるが，ここで化石エネルギーを利用することは望ましくない．そこでエリアンサスのバイオマスの乾燥方法について検討を行った結果，立ち枯れが十分に進んだ 3 月に刈取り，茎葉部を物理的に損傷させた後，約 1 ヶ月，雨風の当たらない場所で風乾処理すると，強制乾燥せずに含水率を 15%以下にできる技術開発に成功した(金井ら 2018, 森田・金井 2019c).

5. システムデザインと事業性評価

利用システムについては，エリアンサスを栽培して，ペレット加工して施設園芸の暖房燃料として熱利用するシステムデザインを行った．このシステムを東日本大震災による復興支援の一環として実施した場合の事業性評価を行ったところ，一定の規模拡大を行うことによって，事業性が担保されることが明らかとなった(森田・金井 2020a, 森田・金井 2019b).

このようにエリアンサスの栽培・利用システムが実現すれば，再生可能エネルギーの地産地消ができるだけでなく，東日本大震災の復興支援策や，耕作放棄地対策となるし，地域に新たな雇用を生むことになる．

6. 復畑化の技術的検討

もう 1 つ考えておく必要があるのは，エリアンサスの栽培を終えた後に，復田・復畑化する方法である．エネルギー作物を栽培する場合，食料生産との競合を避けるために，非農地を利用することが望ましい．そして，将来的に食用作物を栽培する必要がでてきた場合には，食用作物を栽培するための農地として利用することも考えられる．エリアンサスを栽培することによって，非農地を農地化できる可能性があるからであ

る。また、エネルギー作物の栽培を耕作放棄地対策として利用する場合であれば、背景に農地保全があり、農地化を想定しておく必要がある。

以上のように、エネルギー作物を栽培するにあたっては、将来的に食用作物の栽培に変換することを想定しておく必要がある。しかし、エريانサスを定植して何年か栽培した後に復田・復畑化する方法については、すでに森田・金井(2020c)によって検討されており、エريانサスを栽培した後は、刈取り後に除草剤処理を行えば、比較的容易に復田復畑化が可能と考えられる。

以上のように、多年生イネ科草本作物のエريانサスの群落形成に関する作物学・栽培学を確立することができた。これは従来の作物学・栽培学とは異なり、草本多年生作物の群落における作物学・栽培学であり、新しい学術体系の展開といえる。また、得られた知見を踏まえてエريانサスの栽培・利用システムを構築した。これらの研究成果は、震災復興や耕作放棄地対策に利用することで、社会的問題の解決に役立つものといえる。さらに、根の発育を通して地球温暖化対策となると考えられる。このように本研究は学術的な展開と現実における有用性の点で高く評価できるもののといえる。

要旨

地球温暖化の影響が顕著に現れ、低炭素社会ではなく、脱炭素社会が強く求められている。そのための方途として再生可能エネルギーの利用があり、太陽光発電や風力発電だけでなく、バイオマスエネルギーが国内外で注目されている。その際、食料生産との競合を避けるために糖質系原料作物やデンプン系原料作物ではなく、セルロース系原料作物の栽培利用が求められているが、事業化に向けた研究が遅れている。

そこで、本研究では、セルロース系バイオマスエネルギーの原料作物として、不良環境条件下でも高いバイオマス生産性を示す多年生草本作物のエリアンサス(*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*)を取り上げ、低投入持続的に栽培してしたうえで、バイオマスをエネルギー利用するための研究を進め、その成果を利用するシステムデザインを行った。

1. 群落の発育形態学的解析

(1) 群落構造と間引きの効果

セルロース系バイオマスエネルギーの原料作物として、エリアンサスを選定し、物質生産の背景となる群落構造について発育形態学的な研究を行った。

定植1年目と2年目の群落の構造を解析した結果、分けつの生育が収量形成に大きく貢献することが明らかとなった。また、定植2年目になると群落の発育に伴って収量は増加するものの、群落内の相対照度は高い位置で減衰して群落内の光環境が悪化した。そこで、間引きを行い、栽植密度を下げることで、群落内の光環境を改善すれば、群落としての物質生産を改善できると考察した。

実際に、複数の群落において異なる年次に間引きを行ったところ、いずれの群落でも受光態勢が改善され、収量が増加した。また、早期に間引きを行うと、必ずしも単年度の収量が高くなくても、数年に亘る群落の累積収量が最大化することを明らかにした。

(2) 群落内の生育変異の推移

エリアンサス群落は年々、大型化するが、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。そこで、群落を構成する株の生育変異とその年次推移について、茎数/株に着目して個体群生態学的な観点から解析した結果、苗の定植後、茎数が増加しながら株の生育変異が拡大した。

また、生育変異について株の相互作用に着目して検討した結果、茎数/株が小さいと株が受ける被圧が大きく、反対に大きいと被圧が小さい傾向が認められ、最終収量一定の法則が成り立つことが示唆された。さらに、間引きを行うと収量が増加するだけでなく、群落内の株の生育変異が拡大しにくくなることも明らかにした。

2. 群落を形成する株の発育形態学的解析

(1) 群落構造の機械的強度

エリアンサスが高バイオマス生産性を発揮する背景として大型の群落構造があると考え、群落構造の形成と維持について、形態学的観点から検討した。まず、葉身が自重を支える実態を検討した結果、葉身が支えている自重(葉身重) $<$ 葉身の各部位が支持できる最大の重さ(支持重)であり、葉身が自立している事実と整合していることを確認した。葉身は主に中肋によって支持されており、中肋の大型化と形態的变化が葉身の機械的強度に貢献していることも明らかにした。

茎の組織構造を走査型電子顕微鏡で観察を行った結果、茎周辺の円環状領域に多くの維管束が密集していた。また、維管束周辺部分を細胞壁が肥厚した小型細胞が埋めているため円環状領域の機械的強度が高く、茎は倒伏しにくいと考えられた。

(2) 株を構成する分けつの生育

収量形成に大きく貢献することが明らかになった分けつの生育を解析した結果、エリアンサスの株は発育形態学的に異なる3種類の分けつ

から構成されることや、新しい分げつの多くは株の周辺側に形成され、それに伴って株が大型化することが明らかになった。また、それぞれの分げつでは上位3枚程度の葉が同時に展開し、生長速度が速いだけでなく、生長期間も長いため、多くの長大な葉身が形成される。葉身に比較して葉鞘は相対的に短いですが、伸長する節間が多く、葉鞘の着生する位置が相互に離れているため、受光態勢に優れ、高い物質生産性を発揮していることを明らかにした。さらに、生育せずに枯死する分げつの生育には出穂と刈取り時期との前後関係が関わるため、穂の構造および幼穂形成過程も明らかにした。

(3) 根系形成とターンオーバー

エリアンサスが大型群落を維持し、高いバイオマス生産性やストレス耐性を示すことには根系が関わりと考え、定植1年目と2年目の群落において根の形成と枯死について定量的な解析を行った。その結果、定植1年目から2年目にかけて根量が増えるとともに根系分布が深くなることや、新しい根が形成される一方で、古い根が枯死していることが定量的に確認できた。これに伴って土壌中に炭素が貯留され、エリアンサスを栽培することが地球温暖化対策となることを示した。

3. エリアンサスの栽培・利用システムの構築

エネルギー作物を栽培して利用していくには、単に原料作物の収量を検討するだけでは不十分である。事業化のためにさらに検討すべき課題として、低投入持続的な栽培管理体系や、それを踏まえた原料バイオマスの利用システムを構築する必要がある。

栽培管理体系ではコスト・二酸化炭素排出量を削減するために、低投入持続的な栽培システムの構築が必要となる。栽培管理のなかで最も重要なものに栽植密度があり、この点については群落形成を发育形態学的に解析した。その他、栽培体系を構築するために、苗生産や乾燥方法についても具体的な検討を行い、標準的な栽培システムを構築した。

(1) 苗生産と乾燥方法の確立

エリアンサスの栽培と利用の事業化を考えた場合、新たに栽培を開始した時や、時間経過に伴う改植においては相当量の苗が必要となるため、組織培養を利用した苗生産方法を確立した。また、バイオマス原料をプラントに搬入する段階で原料バイオマスの含水率を 15% 以下とすることが求められるため、乾燥方法について検討を行った。日本国内において事業化を進める場合は、立ち枯れが十分に進んだ 3 月に刈取り、茎葉部を物理的に損傷させた後、約 1 ヶ月、雨風の当たらない場所で風乾処理すると、強制乾燥せずに含水率を 15% 以下にできる技術開発に成功した。

(2) システムデザインと評価

以上の個別研究を踏まえて、利用システムについて検討した。システムデザインの 1 つとして、東日本大震災による農業の復興普及支援の一環として、東京電力福島第一原子力発電所の事故で飛散した放射性物質によって汚染された農地でエリアンサスを栽培し、収穫したバイオマスをペレットに変換して、園芸施設の暖房用燃料として熱利用するシステムをデザインし、その事業性評価を行った。その結果、一定の規模拡大を行うことによって、経済性・環境性・社会性を総合的に評価した場合の事業性が担保されることが明らかとなった。

以上のように本研究の結果、セルロース系エネルギー作物として多年生イネ科草本作物のエリアンサスの群落形成に関する作物学・栽培学を展開したことは、従来の一年生作物の栽培とは異なる新たな学術分野を確立することにつながった。また、得られた知見を踏まえてエリアンサスの栽培・利用システムを構築できた。このように新たな学術分野の確立にとどまらず、震災による被災地の農業復興普及や全国で問題となっている耕作放棄地対策に利用すること、さらに気候危機における土壌中への炭素の貯留という大きな問題に役立つ可能性が高く、様々な社会的問題の解決に役立つことが想定される。

Abstract

Bioenergy is a promising alternative to fossil fuels and a potential countermeasure against global warming because it is a one of carbon-neutral renewable energy sources. Bioenergy is often produced from edible crops including sugar cane, maize, wheat, and cassava, and there is a need for cellulosic energy crops as raw materials to avoid possible competition between food and energy, especially since the food crisis in 2008. I have been paying attentions to *Erianthus* (*Saccharum arundinaceum*, Syn. *Erianthus arundinaceus*), a perennial C4 grass, as a raw material crop for cellulosic bioethanol production because it shows high yield performance and high tolerance to environmental stresses even in Japan. In this study, I made efforts to construct a system design of growing *Erianthus* for sustainable utilization of biomass.

Canopy structure and biomass production

High performance on biomass production by *Erianthus* populations should be based on their canopy structure which has rarely been studied so far. I examined the canopy structure of *Erianthus* populations in the first- and second-year after planting at 1 m × 1 m spacing in 2014(A-population) and 2015(B-population).

The second-year (A-population) population showed much higher yield than the first-year population (B-population). The canopy structures of the two populations at heading were different from each other. The biomass of non-photosynthetic organs (leaf sheath, stem, and head) was much larger in the second-year population, though its distribution pattern was similar in both populations. Because the mean stem number of each plant was not significantly different between the first- and second-year populations,

stems in the second-year population were larger, contributing to the much higher yields.

The biomass of a photosynthetic organ (leaf blade) in the second-year population was larger than that in the first-year one. At the same time, the vertical distribution of leaf blade biomass peaked at a higher position in the second-year population. This canopy structure leads to a rapid decrease in solar radiation, which might worsen the light conditions in the second-year population. The biomass yield of the population could be larger at lower planting density through thinning.

These two populations have been thinned from 1 m × 1 m to 2 m × 1 m in different years, thinning after the two- and one-year harvesting in A- and B-population, respectively.

As a result, biomass production of both plant population in the subsequent year was larger by decrease in the planting density through thinning, possibly because of improving light conditions in the canopy.

Although the yield in the second year of B-population is less than that of A-population, total yield during the first three years of B-population is much more than that of A-population. Analysis on yield of both populations showed that yield should depend on the number of tiller buds formed in the previous year and their growth period in the next year.

In conclusion it is better to control light condition through thinning for higher biomass production for years. The time of thinning should be determined depending on the growth and development of the canopy of the populations.

Variation in growth and development in the population

During the annual regeneration of the population, variation in

the growth and development differences arise among in the population including disappearance in some cases. The variation in growth and development of stocks in the *Erianthus* population year by year has been examined from the view-point of population ecology.

Regardless of the years 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 might be hold. Thinning at the early growth stage could increase the yield and inhibit the increase in variations of growth and development in the canopy.

Growth and development of tillers

The high biomass production is fundamentally based on the growth and development of tillers. But the effect of tillering on biomass production in *Erianthus* has hardly been studied. Preliminary observation showed that there might be three kinds of tillers, namely dead, old and new ones in *Erianthus*.

Old tillers with stem apices restarted their growing in spring after overwintering. Such old tillers were slowly followed by the appearance of new ones. Both old and new tillers were well developed in the peripheral zone of each individual, probably because there might be room for the development of tiller buds.

Examination on the growth and development of tillers has shown that several apical leaves have grown contemporaneously developed. Each tiller can quickly produce many large leaves. The leaf sheath is shorter than the leaf blade, and leaves are spaced by elongated internodes. Such successive long internodes make superior spatial distribution of large leaf blades in the canopy, which will be effective for better light condition with reference to high biomass productivity.

The fundamental structure and development of panicle in *Erianthus* has rarely been studied though it must be important with reference to regeneration of three kinds of tillers.

The inflorescence (panicle) of *Erianthus* is a raceme with conical appearance. The rachis of the panicle has the first, second and third order rachis branches with spikelets. A pedicellate and a sessile spikelets are usually formed in pairs, while only a petiolate spikelet is formed at the tip of the rachis and each order rachis branch. Each spikelet has one floret covered by a pair of glumes and the floret consists of a lemma, a palea and floral organs, namely two lodicules, three stamens and a pistil.

The developmental process of panicle formation excluding the vegetative stage was classified into five stages: formation of bract primordia, formation of primary rachis branches, formation of high order rachis branches, formation of spikelets and formation of florets.

Mechanical strength for large canopy

High biomass production by *Erianthus* should be based on its large canopy. The formation and maintenance of the canopy structure, therefore, was morphologically examined.

The mechanical strength of the leaf blade was examined with reference to its morphology. The weight and mechanical strength of

leaf blade increased basipetally along the leaf axis and the size and shape of the midrib might contribute to the mechanical strength to support the leaf blade.

Stem has vascular bundles in the peripheral area surrounded by the cells with thickened cell walls. Such morphological characteristics might cause the high mechanical strength.

Development of large root system

Erianthus has high biomass productivity, even under poor soil conditions, partly because of its large root system. The root system development of field-grown *Erianthus* was examined by the wall profile method at the heading stage in the first- and the second-year populations.

The root system distribution was larger and deeper year by year. In the second-year population, thicker nodal roots elongated downward to construct the large and deep root system. In addition, the total root length increased, including the laterals.

Root turnover was examined by the ingrowth core method in the perennial grass *Erianthus*. Carbon supply in soil through root turnover in *Erianthus* was roughly estimated to be 140 g and 270 g root biomass/m² in the first- and the second-year populations, respectively. Such carbon accumulation in the soil might be a possible countermeasure against global warming.

Organ culture for seeding propagation

There still remains several issues to be solved. One of such issues will be to develop propagation system. At the beginning time as well as replanting so many seedlings will be necessary. Propagation system has rarely been developed. The author has develop the system through organ culture.

Lateral buds formed on the tiller are taken to be treated with 70% ethanol for 2 minutes and 1% sodium hypochlorite for 10 minutes for disinfection.

Many adventitious shoots can be grown from lateral buds for seedlings with rooting without the rooting medium by using MS medium supplemented with NAA and BA.

Harvesting and drying biomass

Erianthus biomass harvested should be become less than 15% of water content to produce pellets or bioethanol. Water content will be decrease down to around 30% during winter at standing. Harvesting biomass in February of March followed by air-drying with physical injury will be able to 15% water content.

Designing sustainable system of growing and utilization of *Erianthus* biomass

Based on the above-mentioned researches the system of growing *Erianthus* and utilization of the biomass has been designed for uncultivated farmland including contaminated area by radioactive substances. The business feasibility has been examined for the pellets produced from energy crop biomass for warming to grow flower plants in green houses. As a result, business feasibility can be established depending on the scale of the system.

Concluding remarks

The author has established the low-input and sustainable production system for *Erianthus* based on the new science of canopy analysis on perennial grass *Erianthus* which must be absolutely different from the science in annual grass. Such scientific development will be able to solve the global issues including global

warming. An another characteristic of this study could be turnover of roots in perennial grass with reference to carbon storage in soil which will be quite unique viewpoint, because growing perennial grass must be a possible countermeasure against global warming.

謝 辞

本研究は、東京農業大学農学部において森田茂紀教授のご指導の下で行われたものであり、感謝の意を表します。

主査の引き受け、および本論文の取りまとめにあたり、東京農業大学農学部の上地由朗教授に、ご指導を頂いた。

本論文の取りまとめにあたり、東京農業大学農学部の松田浩敬教授および西尾善太教授に、丁寧な御校閲を頂いた。

農学部改組の前後において、東京農業大学農学部の平野繁准教授・垣内仁准教授に、卒業論文および修士論文作成の過程において様々な形でご指導を頂いた。

本研究で用いたエリアンサスは我有満氏を通じて農研機構から分譲して頂いたものである。栽培に関しては同氏からアドバイスを頂くとともに、農学科作物学研究室の学生のほか、農学部の事務職員および技術職員からも協力を得た。

エリアンサスの組織構造に関する研究では、東京農業大学客員教授として招聘したスロバキア共和国コメニウス大学理学部の Alexander Lux 教授および東京大学大学院農学生命科学研究科の芋生憲司教授、長谷川文生研究員からご指導を頂いた。

エリアンサスの組織培養を用いた苗生産方法に関する研究では、東京農業大学農学部の雨木若慶教授からご指導を頂いた。

なお本研究の一部は、新技術開発助成、住友財団環境研究助成および一般社団法人海外農業教育・研究発協会 SAEDA からの研究助成を受けたものである。

また、本研究の内容は、2022 年度日本作物学会研究奨励賞を受賞した。以上のすべての方々および組織に対して、心から感謝申し上げる。

引用文献

- 阿部 淳・塩津文隆・森田茂紀・辻 涉・谷本英一 2010. エリアンサスの根におけるケイ素とデンプンの蓄積：低真空走査電子顕微鏡と X 線分析装置による観察. 根の研究 19(2): 5.
- 阿部 淳・松田浩敬・小林奈通子・関谷信人・我有 満・山田敏彦・森田茂紀 2015. 福島県浪江町被災水田におけるイネ科多年生バイオマス作物の栽培試験. 第 239 回日本作物学会講演要旨集 36.
- 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. 農事試報 40: 1-49.
- 荒井義光・佐藤博志 1998. プラント・キャノピー・アナライザーによる水稻葉面積指数の推定(1). 東北農業研究 51: 61-62.
- 有田博之・大黒俊哉 2007. 木本が侵入した耕作放棄田の復田コスト-新潟県上越市大島地区を事例として. 農業土木学会論文集 75(3):247-254.
- Boddiger, D. 2007. Boosting biofuel crops could threaten food security. The Lancet 370: 923-924.
- Boysen-Jensen, P. 1932. Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena, Berlin. 1-108.
- Brandes, E. W. and Starrett, R. C. 1929. Development of flower and seed of some varieties of sugarcane. Journal of Agricultural Research 39(1): 1-30.
- 蔡 慶生・伊藤浩司・石井康之・續 栄治・村山盛一 1998. パニカム属草種・品種における初冬までの分けつの生育と越冬性との関係. 日本草地学会誌 44(1): 67-72.
- Cheng, P. C., Greyson, R. I. and Walden, D. B. 1983. Organ initiation and the development of unisexual flowers in the tassel and ear of *Zea mays*. American Journal of Botany 70(3): 450-462.
- Cobb, N. A. 1906. Some elements of plant pathology. Report of the work of the Experiment Station of the Hawaiian Sugar Planters' Association, Division of Pathology and Physiology, Bulletin. 4: 1-46.
- Dillewijn, C. V. 1952. Botany of Sugarcane. The Chronica Botanica,

- Massachusetts. 48-51.
- Dillewijn C. V. 1971. 花序. 内原彪訳, 甘蔗植物学. 琉球分蜜糖工業会, 沖縄. 37-42.
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2014. バイオマスエネルギー技術研究開発/セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業. 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会, 東京. III-23.
- Donald, C. M. 1963. Competition, among crop and pasture plants. *Advances in Agronomy* 15: 1-114.
- Engard, C. J. and Larsen, N. 1948. Floral development of sugarcane. *Hawaii Agriculture Experimental Station Biennial Report 1946-1948*: 125-132. (Dillewijn 1952 から引用)
- 藤井弘毅 2009. チモシー (*Phleum pratense* L.) 品種の新旧分けつの季節的交代と各番草の収量構成分けつの発消長. *日本草地学会誌* 55(3): 206-216.
- 古畑昌巳・有馬 進 2007. 湛水直播水稲における出穂後日数の経過が耐倒伏性と稈基部の物理的性質に及ぼす影響. *日本作物学会紀事* 76(4): 529-539.
- Greyson, R. I. 1994. *The Development of Flowers*. Oxford University Press, New York. 195-230.
- 原 囊 1994. 植物形態学. 朝倉書店, 東京. 147-173.
- 橋本 勉・青田精一 1964. テオシントの刈取高さ, 特に生長点の高さとの関係が生育収量に及ぼす影響. *日本草地学会誌* 9(3): 169-173.
- Hattori, T. and Morita, S. 2010. Energy crops for sustainable bioethanol production; which, where and how? *Plant Production Science* 13(3): 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 Production Science* 13(3): 252-255.
- 服部育男・上床修弘・我有 満・加藤直樹 2015. バイオマス資源作物の

- 高位発熱量の推定と草種間差異. 日本エネルギー学会誌 94(5): 510-514.
- 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. 日本作物学会紀事 81(別 1): 262-263.
- 星川清親 1975. 解剖図説イネの生長. 農文協, 東京. 217-220.
- 星川清親・北條良夫 1976. 作物－その形態と機能－(下). 農業技術協会, 東京. 166-183.
- 北條良夫・小田桂三郎 1965a. 大麦の強稈性に関する研究. 第2報 稈における物理的性質の発達. 日本作物学会紀事 33(3): 259-262.
- 北條良夫・小田桂三郎 1965b. 大麦の強稈性に関する研究. 第7報 節組織の発育に伴う曲げモーメントの変化について. 日本作物学会紀事 33(4): 289-292.
- Iijima, M., Morita, S. and Barlow, P. W. 2008. Structure and function of the root cap. *Plant Production Science* 11(1): 17-27.
- 稲村 宏 1955. 麦類の幼穂分化過程の基準. 農業改良技術資料 62: 1-16.
- 板倉健斗・金井一成・森田茂紀 2018. エリアンサスの分けつの発育形態学. 日本作物学会紀事 87(3): 261-262.
- 板倉 登・最上邦章・工藤政明・坂本 茂 1984. 沖縄及び種子島におけるサトウキビの花芽の分化ならびに発達. 熱帯農業 28(1): 29-37.
- 伊藤綾子 1969. 水稻群落の葉群の構造と直達光の透入について. 日本作物学会紀事 38(3): 355-363.
- 伊藤香織・森田茂紀・阿部淳 2004. 圃場で栽培したトウモロコシおよびソルガム節根の伸長方向と根冠の形態. 根の研究 13(1): 9-13.
- 伊東睦泰・大野泰弘・遠山修自 1989. オーチャードグラス草地における時期別の分けつの発生・消長とその草地生産にはたす役割. 日本草地学会誌 34(4): 247-256.
- 伊東睦泰・小林清四郎・徳重英明・村木尚司・徳嵩富士 1990a. リードカナリーグラス (*Phalaris arundinacea* L.) 草地における分けつの発生・生長の動態. 日本草地学会誌 35(4): 279-285.

- 伊東睦泰・佐藤恵美子・後藤浩幸・服部義一 1990b. 群落におけるリードカナリーグラス (*Phalaris arundinacea* L.) 既存分けつの生育形態. 日本草地学会誌 36(3): 254-262.
- 伊東睦泰・桑木野広美・山科一樹 1993. リードカナリーグラスの既存分けつの生育と休眠分けつ芽の発育の相互関係. 日本草地学会誌 38(4): 469-477.
- 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. 三重県農業技術センター研究報告 1: 9-17.
- 岩田隆明・野原正人・大塚和典 1981. スギ, ヒノキ丸太の林内乾燥について. 岐阜県林業センター研究報告 9: 49-59.
- Iwaya, K., Yamamoto, H., Hayakawa, S. and Kamichika, M. 2004. Estimation of top nitrogen content in rice canopy using optical and nondestructive method. *Journal of Agricultural Meteorology* 60(2): 87-94.
- 徐 銀発・大川泰一郎・石原 邦 1997. 水稲多収性品種タカナリの収量と乾物生産過程の解析 - 1991 年から 1994 年の 4 年間 -. 日本作物学会紀事 66(1): 42-50.
- Kanai, I., Honda, T., Lux, A. and Morita, S. 2017. Anatomy and Morphology of Leaves and Stems in *Erianthus* with Reference to Canopy Structure. 日本作物学会第 243 回講演会要旨集 109.
- 金井一成・板倉健斗・森田茂紀 2018. エリアンサスの乾燥における刈取り時期と損傷風乾処理の効果. 日本作物学会紀事 87(1): 86-87.
- 金井一成・森田茂紀 2015. エリアンサスのエネルギー利用システム最適化のための刈取り時期・乾燥時間の検討. 日本作物学会関東支部会報 30: 50-51.
- 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. 東京農業大学農学集報 63(2): 83-87.
- 金井一成・森田茂紀 2020. エネルギー作物エリアンサスの葉身の機械的強度の形態学的解析. 日本作物学会紀事 89(4): 325-330.
- 金井一成・森田茂紀 2021. エリアンサス群落における株の発育変異の解析. 日本作物学会紀事 90(1): 29-37.

- 金井一成・佐藤湧大・小泉秀人・森田茂紀 2019a. エネルギー作物エリアンサスにおける分けつ形成の様相. 日本作物学会紀事 88(3): 187-192.
- 金井一成・新村悠典・森田茂紀 2017a. 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－. 東京農業大学農学集報 62(1): 13-20.
- 金井一成・新村悠典・小島 淳・岡部貴誠・森田茂紀 2017b. エリアンサスの根系形成と土壌中への炭素供給量の試算－改良土壌断面法とイングロースコア法の組合せによる解析－. 根の研究 26(2): 25-33.
- 金井一成・谷津威徳・森田茂紀 2019b. エネルギー作物エリアンサスの穂の発育形態学. 日本作物学会紀事 88(4): 273-279.
- 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). 日本作物学会紀事 27(2): 177-178.
- Kang, S., Morita, S. and Yamazaki, K. 1994. Root growth and distribution in some japonica-indica hybrid and japonica type rice cultivars under field conditions. *Japanese Journal of Crop Sciences* 63(1): 118-124.
- 川田信一郎・佐々木修・山崎耕宇 1980. 水稻根における分枝の様相, とくに冠根の直径と分枝との関係について. 日本作物学会紀事 49(1): 103-111.
- 川原治之助・長南信雄・和田 清 1968. 稲の形態形成に関する研究：第3報 葉, 穂, 稈の伸長の相互関係および稈の分裂組織について. 日本作物学会紀事 37(3): 372-389.
- 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 [I]. 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.
- 小林 久・小島浩司・島田 和宏・柚山 義人 2005. バイオマス利活用 (その 7) バイオマス利活用の評価手法. 農業土木学会誌 73(12): 1117-

1122.

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.

熊沢正夫 1979. 植物器官学. 裳華房, 東京. 14-17.

前川文夫・清水正治・武岡洋治 1968. イネの花の基本形態について. 植物研究雑誌 43(10・11): 386-391.

丸山篤志・桑形恒男・大場和彦 2005. プラントキャノピーアナライザによる植物面積指数の測定誤差とその葉群傾斜角への依存性. 農業気象 61(4): 229-233.

松波寿弥・小林 真・霍田真一・佐藤広子・安藤象太郎 2013. 温帯でも高バイオマス生産が可能な新規セルロース系資源作物「エリアンサス」. 農業および園芸 88(8): 822-828.

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. 日本草地学会誌 59(4): 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. 日本草地学会誌 61(4): 224-233.

Matsuo, K., Chuenpreecha, T., Matsumoto, N. and Ponragdee, W. 2002. Eco-physiological characteristics of *Erianthus* spp. and yielding abilities of three forages under condition of cattle feces application. JIRCAS Working Report 30: 187-194.

松尾孝嶺・清水正治・角田重三郎・村田吉男・熊澤喜久雄・蓬原雄三・星川清親・前田英三・山崎耕宇 編 1990. 稲学大成, 第1 巻形態編. 農文協, 東京. 237-272.

松島省三 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究. 農技研報 A5: 29-87.

Miller, E. 1919. Development of the pistillate spikelet and fertilization in *Zea*

- mays* L. J. Agric. Res. 18(5): 255-266.
- 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. 日本作物学会紀事 87(3): 259-260.
- Monsi, M. und Saeki, T. 1953 Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany 14: 22-52.
- Moore, P. H. 1971. Investigations of the flowering of *Saccharum*. 1. Ontogeny of the inflorescence. Canadian Journal of Botany 49(5): 677-682.
- 森田茂紀・金井一成 2019a. エネルギー作物エリアンサスの群落構造の解析[1]. 農業および園芸 94(1): 53-59.
- 森田茂紀・金井一成 2019b. エネルギー作物エリアンサスの群落構造の解析[2]. 農業および園芸 94(2): 178-183.
- 森田茂紀・金井一成 2019c. エネルギー作物エリアンサスの乾燥方法の開発. 農業および園芸 94(3): 267-273.
- 森田茂紀・金井一成 2019d. エネルギー作物エリアンサスのストレス耐性[1]. 農業および園芸 94(4): 323-326.
- 森田茂紀・金井一成 2019e. エネルギー作物エリアンサスのストレス耐性[2]. 農業および園芸 94(5): 434-441.
- 森田茂紀・金井一成 2019f. エネルギー作物エリアンサスのストレス耐性[3]. 農業および園芸 94(6): 503-508.
- 森田茂紀・金井一成 2019g. エネルギー作物エリアンサスの分けつの発育[1]. 農業および園芸 94(9): 829-833.
- 森田茂紀・金井一成 2019h. エネルギー作物エリアンサスの分けつの発育[2]. 農業および園芸 94(10): 888-892.
- 森田茂紀・金井一成 2019i. エネルギー作物エリアンサスの刈取り法の検討. 農業および園芸 94(11): 983-990.
- 森田茂紀・金井一成 2019j. エネルギー作物エリアンサスの穂の発育形態学 農業および園芸 94(12): 1083-1090.
- 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〕 農業および園芸 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〕 農業および園芸 95(2): 151-160.
- 森田茂紀・金井一成 2020c. エネルギー作物エリアンサスの栽培利用システムの総括. 農業および園芸 95(3): 240-252.
- 森田茂紀・金井一成 2020d. エネルギー作物エリアンサス葉群の機械的強度. 農業および園芸 96(1): 44-51.
- Morita, S., Ra, K., Uwatoko, N., Saitou, A. and Abe, J. 2018. Vegetative propagation of energy crop *Erianthus* by cuttings and tissue culture. Proceedings of the 7th Japan-China-Korea Grassland Conference 114-115.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013a. 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(7): 562-570.
- 森田茂紀・関谷信人・阿部淳 2013b. 根系の形成を「見る」. 根の研究 22(3): 111-118.
- 森田茂紀・高橋拓真・石島雄大・長谷川文生・芋生憲司・金井一成 2020. エリアンサスの茎の組織構造の観察. 日本作物学会紀事 89(3): 258-259.
- 森田茂紀・豊田正範 1998. メキシコ合衆国バハ・カリフォルニア州の沙漠地域で点滴灌漑を用いて栽培したトウガラシおよびメロンの収穫期における根系の形態. 日本作物学会紀事 67(3): 353-357.
- 森田茂紀・谷津威徳・小泉秀人・佐藤湧大・金井一成 2019k. エネルギー作物エリアンサスの苗生産と定植. 農業および園芸 94(7): 636-643.
- Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum 15(3): 473-497.
- 根本圭介・山崎耕宇 1986. 水稻主茎における茎の伸長, 肥大と1次根の形態との関係. 日本作物学会紀事 55(3): 352-359.
- Niklas, Karl. J. 1992. Plant Biomechanics. The University of Chicago Press, Chicago. 313-381.
- 野本宜夫・横井洋太 1981. 植物の物質生産. 東海大学出版会, 東京. 1-32.
- 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

- 一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.
- 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」2006. バイオマス利活用のシステムの設計と評価. 農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」, 茨城. 187-188.
- 大川泰一郎・石原 邦 1992. 水稻の耐倒伏性に関与する稈の物理的性質の品種間差異. 日本作物学会紀事 61(3): 419-425.
- 大川泰一郎・石原 邦 1993. 水稻稈基部の曲げ応力に影響する細胞壁構成成分の品種間差異. 日本作物学会紀事 62(3): 378-384.
- 大井次三郎 1978. 日本植物誌改訂増補新版. 至文堂, 東京. 184.
- 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.
- 小柳淳史 1998. 深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた. 日本作物学会紀事 67(1): 3-10.
- Percival, J. 1921. The wheat plant. A monograph. Duckworth and Co., London. 1-463.
- Pimentel, D., Hurd, L. E., Bellotti, A. C., Forster, M. J., Oka, I. N., Sholes, O. D. and Whitman, R. C. 1973. Food production and the energy crisis. Science 182(4111): 443-449.
- 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.
- 斎藤邦行・下田博之・石原邦 1990. 水稻多収性品種の乾物生産特性の解析 第1報 密陽23号と日本晴の受光態勢の比較. 日本作物学会紀事 59(1): 130-139.
- 酒井長雄・青木政晴・土屋 学 2011. 子実用水稻多収品種の収量性と立毛乾燥を前提とした倒伏耐性. 北陸作物学会報 46: 23-26.

- 佐野哲也・井春夫・吉田貴紘・大原誠資 2012. 乾燥時期が分割材の天然乾燥経過に与える影響. 日本森林学会誌 94(3): 142-148.
- 佐々木 修・山崎耕宇・川田信一郎 1983. 水稻冠根の伸長に伴う直径の変動と2次根の出現密度との関係. 日本作物学会紀事 52(1): 1-6.
- 佐藤 庚・大友健二 1974. ムギ類の青刈, 実取栽培の一例. 日本作物学会東北支部会報 16: 50-51.
- 佐藤 庚・佐々木秀一 1987. トウモロコシの腋芽の発達に及ぼす頂芽除去及び剪葉の影響. 日本作物学会紀事 56(3): 351-355.
- Sattler, R. 1973. Organogenesis of Flowers, A Photographic Text-Atlas. University of Toronto Press, Toronto. 187-192.
- Sekiya, N., Abe, J., Shiotsu, F. and Morita, S. 2014. Cultivation of *Erianthus* and Napier grass at an abandoned mine in Lampung, Indonesia. American Journal of Plant Sciences 5(11): 1711-1720.
- Sekiya, N., Abe, J., Shiotsu, F. and Morita, S. 2015. Effects of Partial Harvesting on Napier Grass: Reduced Seasonal Variability in Feedstock Supply and Increased Biomass Yield. Plant Production Science 18(1): 99-103.
- Sekiya, N., Abe, J. and Morita, S. 2016. Production and shedding of *Erianthus arundinaceus* roots revealed by ingrowth core method. Grassland Science 62(1): 61-65.
- Sekiya, N., Shiotsu, F., Abe, J. and Morita, S. 2013. Distribution and quantity of root systems of field-grown *Erianthus* and napiergrass. American Journal of Plant Sciences 4(12A): 16-22.
- 関谷信人・塩津文隆・阿部 淳・森田茂紀 2015. 原料作物のエリアンサスとネピアグラスの根. 根の研究 24(1): 11-22.
- 清水正治 編 1979. 作物の形態形成論 - 現状と展望 -. 養賢堂, 東京. 98-107.
- 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., Abe, J., Doi, T., Gau, M. and Morita, S. 2015. Root morphology and anatomy of field-grown *Erianthus arundinaceus*. *American Journal of Plant Sciences* 6(1): 103-112.
- Shiotsu, F., Abe, J., Gau, M. and Morita, S. 2016. Root-shoot relationships in four strains of field-grown *Erianthus arundinaceus* at seeding stage. *Plant Production Science* 19(1): 161-164.
- Shiotsu, F., Hattori, T. and 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.
- 高橋侑也・金井一成・森田茂紀 2017. エリアンサス群落を形成する葉の物理的強度の解析. 日本作物学会第244回講演会要旨集 22.
- 高橋拓真・桐山大輝・金井一成・森田茂紀 2019. エリアンサスの刈取り高さが再生に及ぼす影響. 日本作物学会第248回講演会要旨集 56.
- Thomas, S. C. and Weiner, J. A. 1989. Including competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. *Oecologia* 80(3): 349-355.
- Thompson, D'Arcy. 1961. *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge. 221-267.
- Toyota, M., Tsutsui, I., Kusutani, A. and Asanuma, K. 2001. Initiation and development of spikelets and florets in wheat as influenced by shading and nitrogen supply at the spikelet phase. *Plant Production Science* 4(4): 283-290.
- 角田重三郎 1960. 形態と機能からみた多収性品種. 松尾孝嶺編 稲の形態と機能. 農業技術協会, 東京. 180-225.
- 角田重三郎 1973. 草型と植物の生産力. *化学と生物* 11: 31-37.
- Tsuruta, S., Ebina, M., Kobayashi, M., Hattori, T. and Terauchi, T. 2012.

- Analysis of genetic diversity in the bioenergy plant *Erianthus arundinaceus* (Poaceae: Andropogoneae) using amplified fragment length polymorphism markers. *Grassland Science* 58(3): 174-177.
- 宇田川武俊・伊藤綾子・内嶋善兵衛 1974. 作物群落の計量植物学的研究 第3報 水稻群落内の光環境. *日本作物学会紀事* 43(2): 180-195.
- 宇田川武俊 1976. 水稻栽培における投入エネルギーの推定. *環境情報科学* 5(2): 73-79.
- Weberling, R. 1989. *Morphology of Flowers and Inflorescences*. Cambridge University Press, New York. 201-224.
- Williams, R. F. and Langer, R. H. M. 1975. Growth and development of the wheat tiller. II. The dynamics of tiller growth. *Australian Journal of Botany* 23(5): 745-759.
- 藪田 伸・箱山 晋・稲福さゆり・福澤康典・川満芳信 2012. 短日処理がイネ数品種の出葉速度および出葉転換点に与える影響. *日本作物学会紀事* 81(3): 299-308.
- Yamada, N., Ota, Y. and Nakamura, H 1961. Ecological effects of planting density on growth of rice plant. *Proceedings of the Crop Society of Japan* 29(3): 329-333.
- 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而 1995. プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. *日本作物学会紀事* 64(2): 333-335.
- 山名伸樹 1995. 肉用牛繁殖経営における粗飼料生産—乾草生産・調製技術及び機械の現状と展望—. *日本草地学会九州支部会報* 25(1): 34-39.
- 山崎耕宇・帰山長憲 1982. トウモロコシ根系を構成する1次根の外部形態およびその伸長方向. *日本作物学会紀事* 51(4): 584-590.
- 山崎耕宇・帰山長憲 1983. トウモロコシにおける1次根の直径と2次根の形成. *日本作物学会紀事* 52(1): 59-64.
- 山崎耕宇・森田茂紀・川田 信一郎 1981. 水稻冠根の伸長方向と直径との関係. *日本作物学会紀事* 50(4): 452-456.
- 依田忞二 1971. *森林の生態学*. 築地書館, 東京. 1-331.

吉田 稔 1973. トウモロコシの草型基本形質に関する研究 : I. 器官別生長について. 北海道大学農学紀要 9(1): 87-97.

Zuber, U., Winzeler, H., Messmer, M. M., Keller, M., Keller, B., Schmid, J. E. and Stamp, P. 1999. Morphological traits associated with lodging resistance of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Agronomy and Crop Science 182(1): 17-24.

参考文献

注 1) 浪江町「浪江町農業再生プログラム —平成 29 年 3 月の帰還開始に向けて—」 <https://www.town.namie.fukushima.jp/soshiki/7/8949.html> (2017 年 1 月 26 日)

注 2) 農研機構野菜茶研・高収益施設野菜研究チーム「我が国における各種音質の暖房燃料消費量の計算ツールわが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の試算ツール」 <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2007/vegetea07-02.html> (2017 年 1 月 26 日)

注 3) 国土交通省「公共事業費評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編)」 <http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/090601/0906012.html> (2017 年 1 月 26 日)

注 4) 奈良県「奈良県木質バイオマス資源利用可能性調査報告書」 <http://www.pref.nara.jp/27686.html> (2017 年 1 月 30 日)