節間長パターンと展開葉数を用いたスイートソルガムの茎伸長開始期の推定

藤井昭裕¹⁾・中村聡²⁾・鍋谷佳太¹⁾・後藤雄佐¹⁾

(¹⁾ 東北大学大学院農学研究科, ²⁾ 宮城大学食産業学部)

要旨: スイートソルガムにおいて, 茎伸長開始期は, 外観からでも茎を認識できるようになる時期であり, 茎体積と深い関連がある茎基部に位置する節間の形状が形成される時期でもある。しかし, 各節間が葉鞘で隠されていることから, 茎伸長開始期の定義付けが難しく, また, その時期を外観だけからの生育調査では正確な判断をすることができなかった。前報では, 収穫時の節間長が 10 cm に最も近い基部節間を選び, その節間の伸長盛期を展開葉数から推定し, これを茎伸長開始期とした。本報では, より簡便な推定方法として節間長パターンと展開葉数を用いた茎伸長開始期の推定方法を考案し, 従来の推定方法と比較した。その結果, 節間長パターンを用いた推定方法でも, 従来の方法と同様に茎伸長開始期を推定できることが分かった。このような節間長パターンを用いた推定方法では, 全個体ひとつひとつのデータに戻る必要がなく, 従来の方法より, 利用価値が高いと考えられた。

キーワード: 茎伸長開始期, スイートソルガム, 節間長パターン, *Sorghum bicolor* Moench, 展開葉数。

日本では主に飼料作物として栽培されているスイートソルガム (*Sorghum bicolor* Moench) は, 茎に糖を蓄積する性質があり, その搾汁液から燃料用エタノールを生産することができる (Monk ら 1984, Smith and Buxton 1993)。また, 近年では, セルロース系バイオ燃料やバイオメタノール原料としても注目され (小林 2009), スイートソルガムはバイオマス資源作物としてもその利用が期待されている。

スイートソルガムを飼料作物やバイオマス資源作物として利用する場合, 収穫対象の中心となるのは茎で, その乾物収量と茎に蓄積される糖収量との間には密接な関係がある (Tsuchihashi and Goto 2004, 佐藤ら 2008, 中村ら 2009)。さらに, 茎乾物収量や糖収量は茎体積とも高い相関がある (中村ら 1997)。したがって, 茎体積を大きくすることによって, 糖収量や茎乾物重が増大すると考えられる。また, 茎体積の大きさには茎の形状が関与している。スイートソルガムの茎は, 基部にある 6 個前後の非伸長節間 (節間長が 1 cm 未満の節間) と, それより上位の 10~20 個, あるいはそれより多い伸長節間 (節間長が 1 cm 以上の節間) から構成されており (Nakamura and Goto 1996), 茎の形状には, 節間の長さや太さ, また, その数とともにそれら長短の節間が茎内でどのように配列しているのかも関係している。

節間の長さの配列を表現するには, 節間長パターンが用いられている (Ayyangar ら 1938)。節間長パターンとは, 横軸に節間位をとり, 縦軸に節間長をとって, 下位から上位に向かって収穫時の伸長節間の節間長を節間位順に並べた図の描くパターンのことで, 従来, 増加型, 単峰型, 双峰型の 3 つの型に分類されてきた。

スイートソルガムの節間長パターンでは, 通常, 最基部の節間長が最も短く, 上位に向かって長くなり, 最基部よ

り数節間上位で 20 cm を超え, 節間長パターンのひとつのピークとなる (中村ら 2010)。このピークの前の基部近くの節間が伸長する時期は, 外観からでも茎を認識できるようになる時期であり, また, 茎が伸長を開始し始めた時期と捉えることができる時期でもある。さらに, この時期は, 基部節間が肥大する時期でもあり (Nakamura ら 2011), これら基部節間の形状が形成される時期でもある。また, 茎体積の大きさは, 基部付近の節間の形状に関する諸性質と深い関連があることから (藤井ら 2014), 茎伸長開始期は, 茎体積の構築過程を把握するために重要な時期と考えられる。

茎が伸長を開始した時期は, 各節間が何層かの葉鞘で隠されていて, 節間の伸長過程は, 外観から直接観察できず, 生育調査だけではこの時期を厳密に判断しにくい。そこで, 前報 (藤井ら 2014) では, 収穫後の節間形質の調査を基にして, 茎伸長開始期を推定する方法を考案した。すなわち, 基部の節間で節間長が 10 cm に最も近い節間を選び出し, その節間が急速に伸長する時期を茎伸長開始期として, 展開葉数との関係からその時期を推定した。ここで 10 cm に最も近い節間を対象としたのは, 1 cm 以上の節間を対象とした場合では短すぎて茎の伸長が開始した時期が判断しにくく, また 5 cm 以上や 10 cm 以上と区切った場合には 20 cm を超す節間も含まれてしまい, 節間長の大きく異なる節間を同じ基準で扱ってしまう可能性があったためである (藤井ら 2013)。しかし, その前報の方法では, 1 個体ごとに基部近くの 10 cm に最も近い節間を選び出し, 展開葉数との関係を調べ, 茎伸長開始期を推定したうえ, その平均値を算出する必要があった。また, 葉数増加と節間長パターンが示されていても, この方法ではすぐに茎伸長開始期を推定することはできなかった。そこで本報では, より簡便

に節間長パターンと展開葉数だけから茎伸長開始期を推定する方法を提案した。

材料と方法

1. 試験方法

本試験は、前報（藤井ら 2014）と同じ試験データを用いて解析した。すなわち、供試品種は東北地方で通常の栽培が可能なスイートソルガム 8 品種、HS-G（商品名：タキイのハイブリット）、KCS404（高消化ソルゴー）、Arjuna（2006 年味の素（株）育成）、Keller（1964 年アメリカ育成）、Wray（1966 年アメリカ育成）、FS501（高糖分ソルゴー）、SG-1A（甘味ソルゴー）、KCS105（スーパーシュガースオルゴー）を用い、東北大学大学院農学研究科内の圃場にて、2007 年 6 月 4 日、2011 年 6 月 7 日、2012 年 6 月 8 日に畝間 85 cm で播種した。出芽後間引いて株間 15 cm とし、1 株 1 個体とした。基肥として、被覆緩効性肥料「くみあいエコロン 424 100 日タイプ」（ $N:P_2O_5:K_2O=14:12:14$ ）と速効性肥料「くみあい 8 号」（ $N:P_2O_5:K_2O=8:8:8$ ）を窒素成分で m^2 当たりそれぞれ 12 g と 4 g を施用し、追肥は行わなかった。

調査個体として、2007 年および 2011 年は各品種 5～6 個体、2012 年は各品種 8～10 個体測定した。主茎の展開葉数は 2007 年では 7 月 2 日、2011 年および 2012 年では 7 月 6 日から約 1 週間おきに測定した。展開葉数は、葉身が前の葉の葉鞘より完全に抽出した葉の数とした。

茎の形状が完成した個体として、各品種とも出穂後 30 日前後に採取し、各節間の節間長と節間径を測定した。節間径は、節間中央部の横断面の径とし、互生する葉の中肋と中肋とを結ぶ方向の径を a 径、それと垂直な方向の径を b 径として、断面積（S）は $S = \pi ab/4$ で算出した。節間位は、第 n 葉が着生している節と第（n+1）葉が着生している節との間の節間を第 n 節間（IN n と表記）とした。

また、解析に当たり、齢（age）を表すために葉位齢を用いた（後藤ら 1994）。

2. 節間の伸長盛期の推定

スイートソルガムの節間伸長様式はシグモイド曲線で示され、その節間の伸長過程の中で最も速い増加速度で伸長する時期（伸長盛期と呼ぶ）は、IN n の場合葉位齢では $n+2$ の時である（後藤ら 1994）。また、展開葉数と葉位齢との関係については、調査時に展開葉数 m の個体は、葉位齢では $m+0.5$ になると考えた（Fujii ら 2014）。各品種について、生育調査で測定した展開葉数を縦軸、暦日を横軸にとった葉数増加を示すグラフを作り、そこから IN n の伸長盛期となる葉位齢 $n+2$ の時、すなわち展開葉数 $n+1.5$ となる暦日を求めた。

結果と考察

節間長パターンを用いて、ある節間長となる節間位を推

第 1 図 節間長パターンから節間長が 10 cm の節間位を求める方法（Wray, 2012 年播種）。

節間長が 10 cm となった節間位は IN 8.3。

定する場合、本来は自然数で表わされるが、本報では概念を拡大して小数点第一位までの数値で示した。また、節間の伸長盛期を推定する場合、伸長盛期の暦日も小数点第一位まで示した。なお、節間長パターンを描くにあたって、最下位はそれぞれの品種、年度における全ての個体で伸長節間となった最下位の節間位で、最上位は穂首を含まない最上の節間位とした。

ここで、茎伸長開始期を、節間長パターンの基部近くで 10 cm となった節間の伸長盛期と定義し、その暦日を求めた。まず、節間長パターンを基に茎基部で 10 cm となった節間位を推定した。第 1 図に 2012 年の Wray を用いてその推定方法を示した。

その節間位の節間の伸長盛期の暦日を、展開葉数の調査結果から求めた。これは節間位 n が $n < p < (n+1)$ の場合、IN n と IN (n+1) の節間伸長盛期を求め、p に対して直線的な経過として IN p の伸長盛期（Tp）を推定し、以下の式で表した。Tp = Tn + (T(n+1) - Tn) × (p - n)。例えば 2012 年に播種した Wray の場合、10 cm となった節間は IN 8.3 であり、IN 8 の伸長盛期は 7 月 17 日、IN 9 の伸長盛期は 7 月 21 日であるため、 $17 + (21 - 17) \times (8.3 - 8.0) = 18.2$ 、IN 8.3 の伸長盛期を 7 月 18.2 日とした。

概念的な IN 8.3 の伸長盛期を例示した 2012 年播種の Wray を用いて具体的に考えてみると、まず、茎伸長開始期である 7 月 18.2 日は、葉位齢では 10.3 の時となる。その葉位齢における茎の状態は、Nakamura ら（2011）の報告した節間の伸長様式と節間の肥大様式を基に各節間の伸長程度や肥大程度を推定することで、把握可能と考えられる。葉位齢 10.3 の時では、IN 8 の節間長は最終的な長さの 71% 程度の長さで、節間断面積は最終的な太さの 74% 程度の太さとなっている。同様の方法で、葉位齢 10.3 の時の節間長と節間断面積が推定可能だった IN 7～IN 11 の各節間についても節間長と節間断面積を求め、それら節間を積み重ねて描いたのが第 2 図である。この時の茎長は 13.7 cm で、外観から茎を認識可能となる長さとして、適

第2図 茎伸長開始期における茎の模式図 (Wray, 2012年播種)。

*: 最終的な長さに対する伸長程度

**: 最終的な太さに対する肥大程度

当であると考えられた。

各品種の節間長パターンを用いて 10 cm となった節間位を求め、第1表に示した。表中には、個体ごとの平均値として算出した前報 (藤井ら 2014) の値との比較も表示した。2007 年の KCS404 で、差が -0.4 となったが、その他では差は小さく、差が認められなかったものが 25.0 %、差が ± 0.1 となるものが 54.2 %であった。

節間長パターンを用いて推定した各品種の茎伸長開始期を第2表に示した。個体ごとの平均値として算出した前報 (藤井ら 2014) の値と比較した結果、いずれの品種においてもその差は小さく、最も大きくても KCS404 (2007 年) における暦日で 1.7 日の差だった。

このように、茎伸長開始期の推定方法として、前報 (藤井ら 2014) で検討したような個体ごとに 10 cm に最も近い基部節間を選び出し、それらの節間ひとつひとつについて展開葉数との関係を用いて茎伸長開始期を求める方法と、今回のように節間長パターンから求めた 10 cm の節間の節間位と展開葉数の平均値との関係を用いる方法とでは、ほとんどの品種と年度において、前報の方法で選び出した 10 cm に最も近い基部節間の節間位と、節間長パターンを用いて推定した 10 cm の節間の節間位とでは大きな差は認められなかった。また、それら節間位を用いて推定した茎伸長開始期となる暦日もほぼ同じであった。以上のことから、節間長パターンを用いた場合でも、前報の推定方法と同様に茎伸長開始期を推定できると考えられた。

第1表 節間長パターンを用いて推定した各品種の 10 cm となった基部節間の節間位。

品種名	2007 年	2011 年	2012 年
HS-G	8.9 (+0.1)	9.4 (+0.1)	7.9 (+0.1)
KCS404	7.9 (-0.4)	9.0 (0)	7.3 (+0.1)
Arjuna	8.2 (+0.2)	8.7 (-0.1)	6.9 (-0.1)
Keller	8.1 (-0.1)	8.7 (0)	7.1 (+0.1)
Wray	8.4 (+0.1)	10.2 (+0.2)	8.3 (+0.2)
FS501	9.2 (0)	9.7 (0)	8.3 (+0.2)
SG-1A	9.2 (0)	10.4 (-0.1)	8.4 (-0.1)
KCS105	9.5 (0)	10.3 (-0.1)	8.4 (+0.1)

() 内の数値は藤井ら (2014) での 10 cm に最も近い基部節間の節間位との差を示す。

第2表 節間長パターンを用いて推定した各品種の茎伸長開始期*。

品種名	2007 年	2011 年	2012 年
HS-G	15.1 (-0.5)	16.1 (-0.1)	16.7 (+0.5)
KCS404	11.0 (-1.7)	15.2 (+0.1)	15.4 (+1.6)
Arjuna	19.1 (+1.0)	16.9 (-0.6)	15.3 (-0.6)
Keller	16.5 (-0.2)	18.1 (+1.4)	18.7 (+0.4)
Wray	16.8 (+0.5)	18.7 (+0.5)	18.2 (+0.4)
FS501	18.9 (+0.7)	19.1 (+0.6)	19.6 (+0.8)
SG-1A	19.4 (0)	21.2 (-0.5)	18.9 (-0.2)
KCS105	17.8 (-0.4)	18.4 (-0.5)	19.6 (+0.6)

*: 7月の暦日。

() 内の数値は藤井ら (2014) での茎伸長開始期との差を示す。

前報の推定方法の場合、1 個体ごとに基部近くの 10 cm に最も近い節間を選び出し、その節間位を基にして 1 個体ごとに茎伸長開始期を推定し、その平均値を算出する必要があった。一方で、節間長パターンを用いた推定方法の場合、他の解析でも用いる節間長パターンのグラフから直接 10 cm となった節間の節間位を求め、その茎伸長開始期を推定できる。

このように、節間長パターンを用いた推定方法は、全個体をひとつひとつ計算した前報の方法より、簡便かつ生育の解析における利用価値が高いと考えられた。

引用文献

- Ayyangar, G.N.R., Rao, V.P. and Reddy, T.V. 1938. Studies in sorghum internodes and leaf sheaths. Proc. Indian Acad. Sci. 7: 161-176.
- 藤井昭裕・中村聡・後藤雄佐 2013. スイートソルガムの茎伸長開始期決定方法の考案. 日作東北支部報 56: 47-48.
- Fujii, A., Nakamura, S. and Goto, Y. 2014. Relation between stem growth processes and internode length patterns in sorghum cultivar 'Kazetachi'. Plant Prod. Sci. 17: 185-193.
- 藤井昭裕・中村聡・後藤雄佐 2014. スイートソルガム茎体積の節間形質パターンによる解析. 日作紀 83: 112-117.
- 後藤雄佐・中村聡・酒井究・星川清親 1994. スイートソルガム (*Sorghum bicolor* Moench) 節間の伸長・肥大様式の解析—葉位齢

- を用いて. 日作紀 63: 473-479.
- 小林真 2009. バイオマスを利用したガス化・メタノール合成技術と永年性草類利用技術の展望. 日草誌 55: 284-287.
- Monk, R.L., Miller, F.R. and McBee, G.G. 1984. Sorghum improvement for energy production. Biomass 6: 145-153.
- Nakamura, S. and Goto, Y. 1996. Elongation patterns of basal internodes in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* Moench). Jpn. J. Crop Sci. 65: 324-329.
- 中村聡・斎藤満保・後藤雄佐 1997. 施肥法がスイートソルガム節間の形質に及ぼす影響. 日作紀 66(別 1): 68-69.
- 中村聡・中嶋信夫・佐藤敦・斎藤満保・新田洋司・後藤雄佐 2009. スイートソルガムの茎における出穂後の乾物および糖蓄積. 日作東北支部報 52: 43-44.
- 中村聡・佐藤敦・多賀谷友美・青木香奈子・斎藤満保・新田洋司・後藤雄佐 2010. スイートソルガム品種 Wray の茎諸形質の特性. 日作東北支部報 53: 29-32.
- Nakamura, S., Nakajima, N., Nitta, Y. and Goto, Y. 2011. Analysis of successive internode growth in sweet sorghum using leaf number as a plant age indicator. Plant Prod. Sci. 14: 299-306.
- 佐藤敦・中嶋信夫・中村聡・斎藤満保・新田洋司・後藤雄佐 2008. スイートソルガムの節間の形質に及ぼす施肥の影響. 日作紀 77(別 2): 106-107.
- Smith, G.A. and Buxton, D.R. 1993. Temperate zone sweet sorghum ethanol production potential. Bioresor. Technol. 43: 71-75.
- Tsuchihashi, N. and Goto, Y. 2004. Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia. Plant Prod. Sci. 7: 442-448.

Estimation of the Starting Time of Stem Elongation Based on Internode Length Pattern and Number of Expanded Leaves in Sweet Sorghum : Akihiro FUJII¹⁾, Satoshi NAKAMURA²⁾, Keita NABEYA¹⁾ and Yusuke GOTO¹⁾ (¹⁾ Graduate School of Agric., Tohoku Univ., Sendai 981-8555, Japan; ²⁾ School of Food, Agricultural and Environmental Sciences, Miyagi Univ)

Abstract : In sweet sorghum (*Sorghum bicolor* Moench), the starting time of stem elongation is the time when the stem can be recognized from external appearance and is also the time when the basal internodes, which are closely related to the stem volume, are formed. However, it is difficult to define the starting time of stem elongation because the internode is enclosed by leaf sheaths. The starting time of stem elongation can be estimated by measurements during the rapid elongation period of basal internode which became about 10 cm in length at harvest and the number of expanded leaves. In this study, we developed a new method for estimating the starting time of stem elongation based on the internode length pattern shown by arranging the internode length from the base to the top and the number of expanded leaves. Comparison of the two estimation methods suggested that the new method allows us to presume the starting time of stem elongation like the previous method, but is more useful than the previous method which requires confirmation of the data on all individuals.

Key words : Internode length pattern, Number of expanded leaves, *Sorghum bicolor* Moench, Starting time of stem elongation, Sweet sorghum.