

飼料作物の蛋白質生産性に関する研究

河野 憲 治
(広島大学生物生産学部)

1983年4月30日受理

Studies on the Protein Production of Forage Crops

Kenji KOUNO

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

(Fig. 1-54; Table 1-19)

目 次

第 1 章 緒 論	70
第 2 章 実験方法および材料	75
第 3 章 ソルガムの乾物生産, 蛋白質含有率, 葉蛋白質生産に及ぼす生育条件の影響	78
実験1 培地窒素濃度の影響	78
実験2 照度の影響	81
実験3 日射量の影響	83
実験4 季節の影響	85
考 察	86
第 4 章 肥培管理によるソルガムの葉蛋白質生産速度の改善	88
実験1 窒素施与量と栽植密度の影響	88
実験2 窒素供給条件の改善による葉蛋白質生産速度と蛋白質生産の向上	92
考 察	96
第 5 章 葉蛋白質生産速度のイタリアンライグラスとソルガム間の比較	98
実験1 密植・多窒素条件下におけるイタリアンライグラスの葉蛋白質生産速度	98
実験2 イタリアンライグラスの葉蛋白質生産速度に及ぼす培地窒素濃度の影響	101
実験3 イタリアンライグラスとソルガムの葉蛋白質生産速度に及ぼす日射量の影響	102
考 察	106
第 6 章 葉蛋白質生産速度の暖地型草種間の比較	107
実験1 栽植密度と窒素施与量の影響	107
実験2 数種暖地型草種の葉蛋白質生産速度に及ぼす培地窒素濃度と日射量の影響	109
考 察	114
第 7 章 総 合 考 察	116
要 約	123
引用文献	125
Summary	133

本論文で用いた主要用語

用語	略号	単位	備考
葉蛋白質生産速度	PPR	$mg\ N/m^2/日$ 又は $mg\ N/個体/日$	* 蛋白態窒素で表示 PPR = L - GR × PN%
葉の乾物生産速度	L - GR	$g/m^2/日$ 又は $mg/個体/日$	
生産された乾物の蛋白質含有率	PN%	%	*
相対葉蛋白質生産速度	RPPR	$mg\ N/g/日$	*
葉の相対乾物生産速度	L - RGR	$mg/g/日$	
刈取り毎の平均葉蛋白質生産速度	{PPR}	$mg\ N/m^2/日$	* {PPR} = {L - GR} × {PN%}
乾物生産速度	CGR	$g/m^2/日$	
刈取り毎の平均乾物生産速度	{CGR}		
窒素吸収呼吸効率		$mg\ N/g\ CO_2$	単位根部呼吸量当りの窒素吸収量
葉蛋白質生産呼吸効率		$mg\ N/g\ CO_2$	* 単位地上部呼吸量当りの葉蛋白質生産量
葉蛋白質含有率		%	* 地上部乾物中における葉の蛋白態窒素の割合
葉蛋白質密度		$mg\ N/dm^2$	* 単位葉面積当りの葉の蛋白態窒素含有量
葉の厚さ		$g\ F.W./dm^2$	単位葉面積当りの葉の新鮮重
窒素吸収能		$mg\ N/g$	根部の単位乾物当りの窒素吸収量
葉面積拡大速度		$cm^2/個体/日$	
葉面積指数増加速度	LAI 増加速度	LAI/日	

* 蛋白態窒素で表示した。

第1章 緒 論

青刈飼料作物や牧草類（以下両者を飼料作物と呼ぶ）は反芻家畜の主要な蛋白質およびエネルギー供給源として重要であるばかりでなく、濃厚飼料に比較して繊維質を多く含み、各種ビタミン類やミネラルに富み^{105, 109)}、また牛の泌乳や発育を促進する未知因子を含むため^{76~78)}、反芻家畜の栄養障害を防ぐことから、その重要性が再認識されてきた。しかし、日本の北海道以外の地域では、農家一戸当りの耕地面積が狭小なために飼料作物の単位土地面積当りの乾物生産量（以下乾物生産量）は不足しており、その向上が望まれている。

一般に、飼料作物のうち、マメ科草種ではイネ科草種よりも蛋白質含有率が高いが乾物生産量はアルファルファを除いて、著しく低く、エネルギーに不足する。それに対して、イネ科草種では乾物生産量が高いが可消化養分含量が低い。従って、乾物生産量を向上させるためにはイネ科飼料作物の方が有利である

が、これらの飼料作物では可消化粗蛋白質含量（DCP）や可消化養分総量（TDN）を向上させることが望まれている。

我が国で古くから栽培されてきた寒地型草種は本州の関東以西では夏枯れ現象を起すことから、夏場に旺盛な生育を示す暖地型イネ科草種の導入が西南暖地を中心に試みられてきた。しかし、暖地型草種は寒地型草種に比較して飼料としての品質が総じて劣る^{121, 160, 161)}こともあって十分には普及していない。従って、暖地型イネ科草種の品質の改善が特に望まれている。

以下に、飼料作物（主にイネ科）の乾物生産と品質の改善のために行われてきた既往の研究の主要な成果を概括し、残された問題点を指摘することとする。

(1) 乾物生産

飼料作物の乾物生産量の向上に関しては、肥料3要素の施与、刈取り回数などを中心に、主として寒地型草種を対象として古くから研究されてきた。

食用作物については Watson¹⁵⁹⁾らによって、いわゆる生長解析の手法が確立され、生長量は相対生長速度（RGR - Relative Growth Rate）、純同化速度（NAR - Net Assimilation Rate）、葉面積比（LAR - Leaf Area Ratio）、葉面積指数（LAI - Leaf Area Index）に分解して解析されている。また、武田^{167, 168)}、村田^{111, 112)}、門司⁹¹⁾らは作物群落の構造に着目し、受光態勢の概念を導入し、乾物生産速度を葉の同化速度、葉面積、受光係数（吸光係数）の3因子に解析する手法を確立した。さらに田中らは^{57, 142, 144)}物質生産における呼吸の能率を考慮して生長効率の概念を導入した。

それらの考え方によると、作物の乾物生産量を高めるには、栽培密度を高めたり、施肥量（特に窒素肥料）を増やすことにより、作物群落の LAI を高める必要がある。しかし、葉面積が一定以上に達すると相互遮へいによるへい害が著しくなるので、群落の受光能率を向上させるために草型の改善が必要となる。たとえば水稲では、短程で直立した葉身をもち、分けつが過度に旺盛でなく、けっ子があまり開いていない、草型の品種を育成し、それらを密殖多肥栽培することによって乾物生産量が増加してきた。また、短程品種では非同化器官の呼吸量が相対的に少ないために、生長効率の点からも有利とされている。しかしながら、さらに乾物生産量を高めるためには単位葉面積当りの CO₂ 同化速度（以下光合成能）を高めることが必要と考えられている。

こうした作物の多収穫理論は、主として水稲を対象として確立されてきた。しかし、飼料作物は水稲の場合と比較して、(1) 収穫目的部位が茎葉であり、(2) 刈取りと再生長が繰り返され、(3) 反芻家畜に対する飼料としての栄養価値が問題となることなどの点で異なる。

それ故、水稲で確立されてきた多収穫理論を参考にしつつ、飼料作物についての多収穫理論を確立することが必要である。

酒井^{125 ~ 128)}らはオーチャードグラス草地の生長解析を行い、多肥により葉面積および NAR が増加することを報告した。また泉^{1, 2)}らは牧草群落の光合成能、呼吸能と吸光係数から乾物生産量を推定する数式を作り^{66 ~ 68)}、施肥⁶⁹⁾、土壌水分³⁾、温度、日射量を異にした場合の乾物生産量の推定を行った。そして、多肥条件で単葉光合成能と葉面積増加速度が高まり、乾物生産が最も高まることを報告している。大久保らは草地群落の乾物生産を解析する手段として、単位土地面積上のクロロフィル総量を指標とした¹¹²⁾。また、牧草群落の光エネルギー利用効率を算定¹¹³⁾し、エネルギー利用効率を向上させるためには、NAR を高く保つことが重要であると報告している。

これらは主として寒地型草種を対象として行われた調査結果によるもので、暖地型草種での検討例は少ない。秋山^{8 ~ 10)}、武田¹⁴¹⁾らは著しく密植栽培したトウモロコシについて調査を行い、葉面積を増大させることが乾物生産量の増加に結び付くと報告している。その場合の LAI は 18.7 にも達し、LAI の増加につれ吸光係数が低下するなどを増収要因として上げている。また単葉光合成能については、群落下部の弱光下における光合成能が高い品種程乾物生産量が高いことを報告している。

一方、最適 LAI の値は日射量が多い程大きいことが門司⁹¹⁾らにより理論的に示され、Takeda¹³⁹⁾ら、Stern¹³⁰⁾ら、Black¹⁶⁾によって実験的にも実証されている。暖地型草種の最適 LAI に達する時期は7月

中旬から9月中旬と日射量の多い時期にあることから、暖地型草種の最適 LAI に関しては今後さらに検討が必要と考える。その際、特に窒素の多施与が葉面積拡大ばかりでなく、単葉光合成能も高めることは注目すべきである。

(2) 単葉光合成能

作物の乾物生産は光合成能に影響されるとする立場から、光合成能の種間差や気象条件や葉の栄養状態の影響についても検討されてきた。田中らは、トウモロコシの単葉光合成能と窒素¹⁴⁶⁾、リン酸¹⁴⁷⁾、加里¹⁴⁸⁾、カルシウムおよびマグネシウム¹⁴⁹⁾などとの関連についての一連の研究から、光合成能の主要な支配要因は葉身の窒素含有率であり、光合成能は葉身窒素含有率 3.0%までは、その上昇により急激に上昇し、それ以上ではゆるやかに上昇すると報告している。

さらに特に重要な点はC₃光合成系とは別にC₄光合成系が発見されたことである。C₄系を有する植物の生理的、葉の組織構造的特徴に関しては多くの総説^{56), 63), 134)}がある。C₄植物はC₃植物に比較して2倍近い最大単葉合成能をもち、光飽和点が高く、CO₂補償点が低く、光呼吸がC₃植物には認められないなどの生理的特徴の他、C₄植物では維管束鞘細胞にクロロプラストを含み、維管束間の距離が短く、葉肉細胞は小さいなど葉の組織構造にも特徴があることが指摘されている。また最近C₄酸脱炭酸酵素の差により、C₄植物はさらに3つのグループに分けられている⁴²⁾。

暖地型草種の多くはC₄植物に属することから、それらの生理学的、組織学的研究も進められてきた^{19), 20), 24~26), 39~41)}。そして、暖地型草種でも葉身窒素含有率と光合成能との関係が注目されてきた。館野¹⁵⁴⁾は、数種の暖地型草種の光合成能は葉身の窒素含有率の上昇で、ある含有率までは直線的に上昇し、それ以上で飽和型を示すと報告している。また杉本^{131), 132)}らはローズグラス、ダリスグラス、パヒヤグラスの光合成能は葉身窒素含有率3%まで葉身窒素含有率の上昇に伴って上昇し、それ以上ではあまり上昇しないと報告している。

このように、葉面積の確保や光合成能の向上に対して窒素施与が最も密接な関連を有することから、最近イネ科草種に対する窒素施与の効果が研究されている⁶⁴⁾。しかし、葉面積を確保するための栽植密度と窒素施与量とは相互に密接に関連するにもかかわらず、それらを組合せた研究例が少ない。また葉に含まれる窒素の形態は多様であり、各化合形態の窒素と光合成能との関連や、乾物生産と品質との関連を検討した例はほとんどなく、今後に残された問題である。

(3) 飼料作物の品質

飼料作物の品質に関しては、その消化率と栄養価の観点から、特に DCP や TDN に及ぼす施肥や刈取り時期などの影響についての多数の報告がある。石栗ら^{54), 55)}は、寒地型草種の季節別の化学成分と消化率、栄養価の関係を調べ、粗蛋白質含有率が高い程、消化率が高く、DCP、TDN も高く、従ってイネ科草種では粗蛋白質含有率で DCP を推定し得ると報告している。イタリアンライグラスでも窒素多施与により DCP と TDN がともに増加し⁸¹⁾、また刈取りの遅い程 DCP と TDN が減少する¹³³⁾。さらに三秋⁸⁵⁾はオーチャードグラスを若刈り(草丈48cm、葉部割合48%)すると、乾物当り DCP 14%、TDN 71%であるが、穂孕期(草丈66cm、葉部割合17%)の刈取りでは、それぞれ9%と56%となり、開花盛期(草丈102cm、葉部割合9%)では4%と69%となり、生育に伴って DCP や葉部割合が低下し、し好性は葉部割合の低い程低いと報告した。

同様の傾向は、ローズグラス⁸⁴⁾、トウモロコシ¹⁸²⁾、テオシント⁸³⁾、ハイブリットソルゴー⁸⁰⁾などでも認められている。また、丹比も^{151~153)}暖地型草種を用いた一連の研究で同様の事を報告している。さらに、相井らはソルガムについて乾物消化率は茎部より葉部で高いと報告した^{3), 5)}。また青刈ソルガムの採食率(し好性)は、トウモロコシと同様に、生育とともに低下し¹³⁵⁾、暖地型草種では蛋白質含有率の低いことが特に問題であるとの指摘¹⁰⁴⁾もある。

ただし、最近 DCP に代わる飼料蛋白質の評価法が検討されようとしている。すなわち、飼料中の粗蛋白質は反芻家畜に摂取されると、ルーメン内で発酵分解され微生物の体蛋白質となる部分と、ルーメン内で分解されない部分とに分かれ、その割合は飼料によって異なると言われている。それらは両者ともに小

腸に流下して消化、吸収される。しかし、高蛋白質飼料で、分解される割合が高い場合、微生物に利用されない過剰のアンモニアはそのまま吸収、排泄されることになる。従って、単に高蛋白質飼料としてDCPを高めることが家畜の蛋白質要求量を満足させる方向に結び付かないとの指摘¹²⁾がある。しかしながら蛋白質資源は量的に不足しており、さらに、ルーメン内分解蛋白質の割合が高い飼料でも人工乾草やホルマリン処理サイレージにするとその割合が低下することが認められている。従って、高蛋白質飼料でも利用法の改善によって十分な利用が可能であると考えられる。

いずれにしても、飼料作物、特に暖地型草種の質的改善を図るには蛋白質生産を向上させ、蛋白質含有率を高めることがまず重要な課題である。

(4) 蛋白質生産と乾物生産および飼料の品質との関連

飼料作物は乾物生産量の向上ばかりでなく、品質も同時に改善する必要がある。すなわち、光合成能を高め乾物生産量を向上させると同時に、蛋白質生産量も向上させることが必要である。福永⁵²⁾は、イタリアアンライグラスやオーチャードグラスへの窒素施与は乾物生産量を増加させるばかりでなく、蛋白質、アミノ酸、カロチン生産量を増加させ、品質の向上にも寄与すると報告している。また蛋白質合成は光合成能が低下する前に低下する¹⁸⁾との指摘もある。こうした量と質の両者の相互関係を検討した例は極めて少なく、今後の重要な研究課題である。

LAIと窒素施与との関係、また、単葉光合成能と葉身窒素含有率との関係からも容易に推察されるように、乾物生産と蛋白質生産は排反して進行するのではなく、葉の蛋白質生産を高めることによって、光合成能が向上し、乾物生産が高まると考えるべきである。すなわち、飼料作物では光合成器官である茎葉そのものが収穫目的物である。葉部の蛋白質については後述するが、その主要部分はFraction I Proteinと呼ばれる光合成の暗反応を司る酵素蛋白質であり、光合成の明反応に関与するラメラ膜は、脂質やクロロフィルと結合した構造性蛋白質である。従って葉の蛋白質生産性を増大させることは、蛋白質含有率を上昇させ、飼料としての品質を改善するばかりでなく、光合成能や葉面積拡大速度の増大を通じて乾物生産の向上にも結び付くものと考えられる。

葉の蛋白質生産性の向上は、こうした光合成能や飼料としての品質からの要求ばかりでなく、葉から蛋白質を抽出して直接人間の蛋白質供給源として、あるいは豚、鶏の飼料として利用しようとする立場からも望まれている。抽出葉蛋白質の製品化されたものはLeaf Protein Concentrate (LPC)と呼ばれており、主としてアルファルファを対象として多数の報告や総説^{15, 73, 74, 103, 136)}がある。これらの研究成果によると、葉蛋白質はリジン等動物に対するアミノ酸含量は高く、概して良質であるが、含硫アミノ酸であるシスチンとメチオニンの含有濃度が低く、そのアミノ酸組成は一定している。

このように葉蛋白質生産性の向上は光合成能や品質の改善あるいはLPCなどから望まれるが、他方で葉蛋白質を初期光合成産物から、できる限り能率よく生産することも要求される。田中、山口らは水稻の乾物生産におけるエネルギー効率すなわち、呼吸の効率を生長効率を用いて論じた^{143, 144, 162, 166)}。そして、生長効率は種々の条件によって変化し、また器官別でも異なり¹⁶⁴⁾、光合成産物の蛋白質への転換効率は炭水化物のそれに比べて低く¹⁶⁵⁾、蛋白質合成の旺盛な場合は生長効率が低いこと¹⁶³⁾などを報告している。従って、呼吸効率を考慮しつつ葉蛋白質の生産性を高めることが必要と考えられる。

また、最近、光合成能との関連でも葉蛋白質の画分内容が着目され始めた。村田や長田^{97, 100)}は水稻葉の光合成能の生育時期別変化は葉身の蛋白態窒素含有率の推移と密接に関連すると報告しており、Morita^{93~96)}らは水稻葉の葉緑体窒素の分画法およびその窒素画分の変動と光合成能との関連を検討し、ラメラ窒素の増大が光合成能を高めると報告した。さらに趙ら^{22, 23)}は、水稻に窒素を追肥した場合、光合成能が高まるが、それはFraction I Proteinと全窒素の含有率の上昇に起因すると報告している。同様の結果を折谷や内田らも報告している。また、水稻葉やハウレン草の単離クロロプラストを用いて、RuBP carboxylaseの活性と光合成能との間には高い相関が認められるとの報告^{123, 124)}は多い。しかし、生育や環境要因によるそれらの変動要因の解析は十分とは言えない。

一方、飼料としての品質と葉の蛋白質画分との関係も古くから検討されてきた。大山^{115~117)}は牧草の蛋白質を水溶性、熱アルカリ性エタノール溶性、不溶性画分に分け、消化率は水溶性>熱アルカリ性エタノ

ール溶性>不溶性の順であること、また消化率の高い水溶性や熱アルカリ性エタノール溶性蛋白質画分の含有率は生育に伴って減少し、環境要因によって著しく変動し、さらに乾燥させた場合は水溶性蛋白質画分が減少し消化率が低下すること¹¹⁸⁾を報告している。またイタリアンライグラスの乾草中には熱アルカリ性エタノール溶性画分が最も多く、消化性も高いとの報告⁸⁶⁾もある。一方、五十嵐⁵³⁾、神立⁶⁰⁾、堀米^{43~47)}、保井^{167~170)}らは古くからこの問題を取り上げ、葉蛋白質を細胞質とクロロプラスト態蛋白質とに分離する方法やそれらの消化率や栄養価および消化率に及ぼす随伴物質(フェノール化合物など)の影響について一連の研究を行い、細胞質蛋白質がクロロプラスト態蛋白質に比較して消化率のよいことや両者でアミノ酸の組成は同様であることを示した。同様の結果を Davies²⁹⁾ からも報告している。いずれにせよ、可溶性の蛋白質(水あるいは希アルカリ性緩衝液に易容性の蛋白質)は構造性蛋白質に比較して消化率は高いが、生育や環境要因による変動が大きいことから、それを変動させる要因の解析が望まれる。

(5) 葉蛋白質の分画法

葉蛋白質の所在とその性質および細胞や葉蛋白質の分離法に関しては、保井¹⁶⁹⁾、Wildman¹⁵⁹⁾ら、Pirie¹²⁰⁾、Stahman¹²⁹⁾、Quail¹²²⁾らの総説があり、また、クロロプラストとミトコンドリアの構造性蛋白質²⁸⁾や Fraction I Protein⁶²⁾についての総説もある。

葉蛋白質は細胞構造に基づいて細胞質蛋白質、葉緑体蛋白質、核蛋白質、細胞壁蛋白質、ミトコンドリア蛋白質、リボゾーム蛋白質などに分けられる。この内、細胞壁蛋白質は全蛋白質の2%程度と少なく、また核蛋白質も1~2%程度であり、その量よりも生理的意義が重要なものと言われている。

細胞質蛋白質は水や希アルカリ緩衝液に易容性でpH4~4.5で等電沈殿し、RuBP carboxylaseである Fraction I Protein の他に、dehydrogenase、peroxidaseなどの酵素に加えて80Sリボゾームが含まれている。

ミトコンドリアは35~40%の蛋白質を含有し、その約40%が不溶性の構造性蛋白質であり、ここにはTCAサイクルに関与する酵素が全て不溶性蛋白質として存在する²⁸⁾と言われている。

また、葉蛋白質の多くは葉緑体に存在すると言われ、葉緑体蛋白質の35~40%は脂質やクロロフィルと結合して複合体を作り、ラメラ膜を構成し、光合成における明反応に関与している。この蛋白質は水に不溶で希アルカリ性エタノールあるいは phenol:acetic acid:Water (2:1:1^{W/V/V}) 混液で抽出される。残部の65~55%の溶性蛋白質と70Sリボゾームがストロマに存在し、光合成の暗反応に関与しているとされている。この蛋白質は葉緑体膜が磨砕によって破壊された時には、水や希アルカリ性緩衝液に易溶性で細胞質の Fraction I Protein と全く同じ性質を有する。この Fraction I Protein とラメラ蛋白質はクロロプラストで形成される²¹⁾。また、Fraction I Protein はC₃植物の葉肉細胞とC₄植物の維管束鞘細胞のクロロプラストに局在する⁵¹⁾との報告もある。

これらのことから、溶性と不溶性蛋白質とに分けた場合、水や希アルカリ性緩衝液に易溶性蛋白質画分には細胞質蛋白質、ミトコンドリア蛋白質の一部、葉緑体ストロマの部分を含み、不溶性画分には葉緑体とミトコンドリアの構造性蛋白質、核蛋白質、細胞壁蛋白質を含むと言われている。

一方、光合成反応の研究のためにホウレン草²⁷⁾や水稲^{11, 32, 93)}などを用いてクロロプラストの単離が多くの研究者によって試みられている。機械的な方法としては、一般に酵素活性を維持させるための成分を含む等張液中で短時間ブレンドし、遠心分離により分画する方法^{87, 102)}が用いられている。この場合、取り出されるクロロプラストの包膜の有無、包膜の諸化学的物質に対する透過性あるいは炭酸固定能の有無などの諸性質により、完全な葉緑体(タイプA)、未破壊葉緑体(タイプB)、破壊葉緑体(タイプC)、フリーラメラ体(タイプD)、葉緑体断片(タイプE)、亜葉緑体粒子(タイプF)に分けられる^{36, 88)}。光合成能との関連で葉緑体を分画する場合、できる限りタイプAあるいはタイプBで、しかもできる限り完全に抽出することが望まれる。

本研究では飼料作物の光合成能と品質の両者の関連を考慮することから、葉蛋白質の分画法としては、まず、できる限りタイプAあるいはタイプBの形でクロロプラストを可能な限り完全に分離し、そして残りを溶性画分(主として細胞質蛋白質)と不溶性画分(細胞壁蛋白質と未抽出のクロロプラストやミトコ

ンドリアの構造的蛋白質)に分画することとした。

C₄植物では維管束鞘細胞が発達しており、維管束鞘と葉肉細胞の両方にクロロプラストが存在し、それぞれのクロロプラストに含まれる酵素や機能も異なることから、最近、維管束鞘と葉肉細胞を分離し、それぞれのクロロプラストを単離する手法が確立されてきた^{30, 32, 48, 50, 59}。本研究ではそれらの分離は行っていない。

また、クロロプラスト分離のための抽出液としては、細胞の浸透圧と等張にし、さらに酵素活性を維持させるための種々の試薬が用いられている^{11, 72}。本研究ではクロロプラストをできる限り破壊することなく抽出するためと、重窒素 (¹⁵N) 使用のため、できる限り使用試薬からの窒素の混入を避けるために、0.4 M sucrose と 0.04 M リン酸緩衝液 (pH = 7.5) のみを抽出液¹¹⁰として使用した。

(6) 本研究の目的

本研究は上記の知見を背景にして、飼料作物の乾物生産と品質(飼料としての栄養価値)の両者を改善し、蛋白質生産の向上を図るため、光合成能および品質の向上に結び付く葉蛋白質画分をできる限り能率良く生産する技術を確認する目的で、下記の項目について検討を加えたものである。

- (1) 乾物生産、蛋白質含有率、葉蛋白質生産量の相互関係に及ぼす各種生育条件の影響。
- (2) 葉蛋白質生産速度を改善するための肥培管理法。
- (3) 最適の肥培管理条件下における葉蛋白質生産可能水準量の推定。
- (4) 葉蛋白質限界生産量の草種間比較。

第2章 材料および実験方法

供試草種

(1) 葉身窒素含有率と光合成能との関係に特徴があること、(2) 西南暖地において、現在栽培されているか、あるいは乾物生産量が高いなどで今後有望視されていること、(3) 一定品種の種子が入手し易いことなどを考慮して、Table 1 に示す草種を用いた。

Table 1. Experimental materials

Species	Variety	
Sorghum	(<i>Sorghum vulgare</i> PERS)	Sweet Sioux IV
African millet	(<i>Eleusine corocana</i> (GA RTN)	Snow brand
Fall panic	(<i>Panicum dichotomiflorum</i> MICHX)	Kagawa native
Rhodes grass	(<i>Chloris gayana</i> KUNTH)	Fords Katambora
Italianryegrass	(<i>Lolium multiflorum</i> LAM)	Washikari

栽培法

水耕実験: 40×30×10cmの塩ビ製バットに10kgの箕島花崗岩崩壊土壌を充填し、播種床とした。表層5kgの土壌に硫酸2.5g、過石1.5g加え、さらにpH 6.0となるよう消石灰3gを加えた。発芽後1~2週間で6~10cm程度に生育した幼植物を水耕用培養液槽に移植した。基本培養液の組成はTable 2に示した。水耕用培養液槽は17ℓ容のものを用い、水温25℃に調節した大型水槽中に設置した。

水耕用培養液槽(40×30×20cm)は地上部と根部の呼吸能(単位重量当りのCO₂放出速度)を独立して測定できる構造にし、植物体は水耕用培養液槽の上に設置した植物支持板の穴に単泡ネオプレンで固定した。培養液への通気は、通気用ポリエチレンパイプを通じてロータリ

Table 2. Composition of standard culture solution.

Element	Concentration (ppm)	Reagents
N	20	NH ₄ NO ₃
P	20	KH ₂ PO ₄
K	40	KH ₂ PO ₄ K ₂ SO ₄
Ca	50	CaCl ₂ ·2H ₂ O
Mg	20	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Fe	5	EDTA-Fe
B	0.5	H ₃ BO ₃
Mn	0.4	MnSO ₄ ·4H ₂ O
Mo	0.05	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O
Cu	0.02	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Zn	0.05	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

ーコンプレッサーにより2時間間隔で行った。基本培養液で、移植後5~10日間生育させ、24時間窒素欠除栽培した後、各処理を行った。

圃場試験：各々の実験について後述する。

試料採取法

採取固体は脱塩水で根を洗浄した後、直ちに葉、莖、根部に分け新鮮重を測定し、90℃で2時間、引き続き60℃で24時間以上乾燥させた。また、一部の個体は葉部を生葉のまま5mm程度に細断し、新鮮重を測定した後、チャック付ポリ袋に入れ、-20℃で凍結させた。

光合成能、呼吸能の測定法

光合成能と呼吸能は同化箱あるいは培養液槽に導入する空気の流量と、入口と出口のCO₂濃度差により算定した。CO₂濃度は日立一堀場製作所の赤外線CO₂分析装置ASSA-1110型により測定した。

外気のCO₂濃度の変動を消去するため、3m³のバッファータンクを設置した。またコンプレッサーで導入した空気温度は40℃以上になるため冷却装置を通して、冷却と除湿を行った。流量計は各々5, 10, 50, 200ℓ/min容のフローメータおよび5ℓ以下はローターメータキットを用いた。光源は500Wの陽光ランプ6ヶ取り付け付けた人工照明装置を用い、光強度はランプの点燈数とランプを上下させることにより調節し、照度と光量子量で表示した。ランプからの輻射熱は水深10cmの水フィルタにより除いた。また、根部呼吸能の測定のための培養液槽は水温を25℃に調節した大型水槽中に設置した。なお葉温は銅-コンスタンタンの熱電対により測定し、寒地型草種では20℃、暖地型草種では30℃前後に調節した。同化箱内の空気を均一にするのに必要な風量は同化箱内に設置したファンの回転数をスライダックで変えることにより調節した。根部呼吸能の測定に際しては根から排出されたCO₂を速やかに検出するため、できる限り均一に通気した。

重窒素(¹⁵N)分析法

¹⁵Nの分析は米山、熊沢らの方法^{61, 72, 171)}を参考にし、ケルダール分解液をDumus法によって分析する方法を採用した。

植物体乾燥粉末試料あるいは葉蛋白質画分別試料を、空気や試薬などからの窒素の混入を極力防ぎつつ硫酸分解し、窒素をセミマイクロケルダール蒸留法により定量した。そして、窒素量が0.5~1μgN/mlとなるように100~500μℓの吸収液(0.1NHCℓ)を内室に、2~8mlの分解試料液を外室に入れ、試料液をアルカリ性にするに必要な40%NaOHを外室に加え、すばやく密栓し、40℃の定温器に48時間保った。そして、あらかじめ、よく洗浄し乾燥した後、560℃で1時間加熱し汚染されないよう密栓して保存しておいた内径1mm長さ10mm程度のキャピラリーに、上記内室液を採取し、清浄な空気を送りつつ赤外線ランプで乾燥させた。

内径2mm長さ20cmのバイレックス管を十分洗浄し、乾燥させた後、560℃で1時間加熱し汚染されないようデシケーター中に保存しておき、その一端を閉じ、元素分析用酸化銅と、あらかじめ800℃で3時間加熱し炭酸ガスを除いた粒状酸化カルシウムを入れ、先に調製した試料の入ったキャピラリーを入れ、真空装置に装着し、10⁻⁴Torr以上の真空度で、熔融切断して放電管とした。そして電気炉で560℃で3時間加熱して試料をN₂ガス化させた後、¹⁵Nアナライザー(日本分光NIA-1型)で発光させ²⁸N、²⁹Nのスペクトル強度を測定し¹⁵Natom%を算出した。

なお対象として、使用した¹⁵N試薬を上記と同様の方法により測定した。また、¹⁵Nを取り込ませていない植物体粉末を用いて上記と同様に¹⁵Nを分析し、自然¹⁵Natom%を算出した。

葉蛋白質画分画法

タイプAあるいはタイプBのクロロプラストをできる限り完全に抽出し、残りを主に細胞質蛋白質である溶性画分と細胞壁蛋白質、クロロプラストやミトコンドリアの構造的蛋白質などの不溶性画分に画分する方法は検討した例が見当らなかったことから、ブレンド、ろ過、遠心分離などの条件を検討した。

ブレンド：クロロプラストを破壊しないための条件として15秒以内が望ましい¹⁵⁷⁾とされていることから、ホモジナイザー(日本精機ユニバーサルホモジナイザー)によるブレンドの時間は15秒とした。抽出率を

最大限にするためのブレンドの回数をソルガムとイタリアンライグラスを用いて検討した結果、3回以上ではほぼ一定の抽出率に達することが明らかになった。従って、ブレンドはホモジナイザーが最大回転数に達してから15秒間として3回抽出し、さらに残渣について、クロロプラストとミトコンドリアを完全に破壊し溶性画分を抽出するため60秒間ブレンドした。またブレンドする場合の抽出液量は1回20mlとした。ろ過：クロロプラスト懸濁液のろ過には20 μm のナイロンネットを用いるとの報告が多い^{90, 157)}が、吸引ろ過に5分以上を要する難点がある。一方、メッシュを80 μm 程度としても繊維細胞が通過することはないので80 μm のナイロンネットを使用した。

遠心分離と蛋白質凝固剤：堀米⁴⁷⁾、Usuda¹⁵⁶⁾らの方法を参考にして、2500 G で20分間遠心分離し、蛋白質は20%酢酸で pH 4.2 の等電沈殿させた。この方法による蛋白質の沈殿は、トリクロル酢酸を用いる方法に比較して沈殿に時間を要したが、得られる蛋白質量に有意差は認められなかった。

以上の予備実験に基づいて Fig 1 に示す分画法を採用した。すなわち、凍結葉 1~3 g と抽出液20mlを

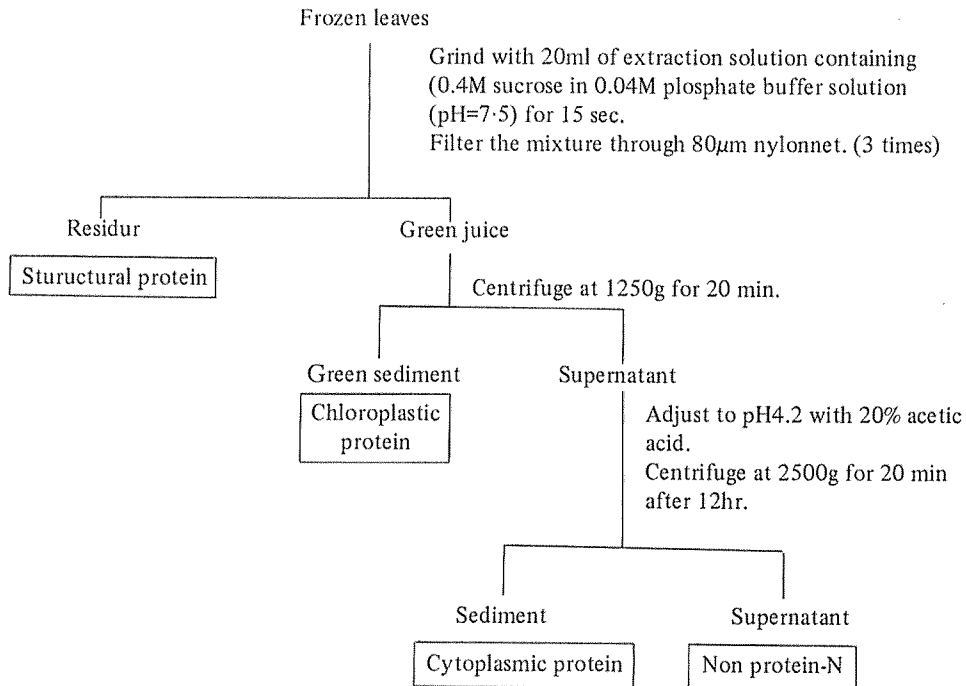


Fig. 1. Procedure for fractionation of leaf protein.

ステンレス製カップに入れ15秒間ブレンドし、ろ過し、残渣を同様に2度ブレンド、ろ過し、さらに60秒間ブレンドしてろ過した。ろ液は直ちに1250 G で20分間遠心分離してクロロプラストを分離した後、上澄液を pH 4.2 として一晩放置し、2500 G で20分間遠心分離して細胞質蛋白質を分画した。こうして分画した構造性蛋白質、クロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質画分は各々硫酸分解してセミマイクロゲルダール蒸留法により、各蛋白態窒素を算定した。

葉蛋白質生産速度表示法

実験結果を本研究の目的に従って解析するために、単位土地面積当り、あるいは個体当りの葉蛋白質増加速度を葉蛋白質生産速度 (PPR: Protein Production Rate) と呼ぶことにし、その値を下記の式で算出し、それぞれ $mgN/m^2/日$ 又は $mgN/個体/日$ として表示した。

$$PPR = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \quad A_1, A_2 : t_1, t_2 \text{ 時における単位土地面積当り (又は個体当り) の葉蛋白質量}$$

この式は次のように書き直すことができる。

$$PPR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \times \frac{A_2 - A_1}{W_2 - W_1} \quad W_1, W_2 : t_1, t_2 \text{ 時における単位土地面積当り (又は個体当り) の葉部乾物重}$$

この場合、 $\frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$ は葉部乾物増加速度であり、 $\frac{A_2 - A_1}{W_2 - W_1}$ は生産された乾物の蛋白質含有率である。すなわち、このように表示すると、葉蛋白質増加速度を葉の乾物生産速度と生産された乾物の蛋白質含有率とに解析して考えることができる。なお、便宜上、葉の乾物生産速度を L-GR (Leaf-Growth Rate)、生産された乾物の蛋白質含有率を PN% と呼ぶことにする。

ただし、ここでは PN% を、“生産された乾物の蛋白質含有率” と考えることにしたが、窒素供給が十分な場合には新に吸収された窒素の一部が古い組織の構成成分になることもあり、一方、窒素供給不足の場合には古い組織から新しい組織への窒素の転流が起るために、厳密には PN% = “生産された乾物の蛋白質含有率” とはならない。それ故、上記手法による解析に当ってはこの点に十分留意した。

さらに、供試個体の大きさが著しく異なる場合は、個体当りの PPR や L-GR の単純な比較が困難であるから、葉蛋白質生産速度と葉部乾物生産速度をそれぞれ相対葉蛋白質生産速度 (RPPR: Relative Protein Production Rate) と葉部相対乾物生産速度 (L-RGR: Leaf-Relative Growth Rate) と呼ぶことにし、その値を下記の式で算出し、 mgN/g/日 として表示した。

$$RPPR = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} \quad A : \text{葉蛋白質質量} \\ dA : dt \text{ 時間における葉蛋白質質量}$$

この式は次の様に書き直せる。

$$RPPR = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{A_2}{A_1} \quad A_1, A_2 \text{ または } W_1, W_2 : t_1, t_2 \text{ 時の単位土地面積当り (または個体当り) の葉蛋白質質量または葉部乾物質量} \\ = \frac{2.301}{t_2 - t_1} (\log A_2 - \log A_1)$$

そして両式は次のような関係にある。

$$RPPR = \frac{1}{t_2 - t_1} (\ln \frac{W_2}{W_1} + \ln \frac{N_2}{N_1}) \quad N_1, N_2 : t_1, t_2 \text{ 時の葉の蛋白質含有率}$$

この場合の $\frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{N_2}{N_1}$ は生産された乾物の蛋白質含有率の増加速度を示す。

呼吸効率表示法

呼吸の効率は、単位時間における葉蛋白質生産量を地上部呼吸量で除して葉蛋白質生産呼吸効率とし、また窒素吸収量を根部呼吸量で除して窒素吸収呼吸効率とした。

第3章 ソルガムの乾物生産、蛋白質含有率、葉蛋白質生産に及ぼす生育条件の影響

飼料作物の葉の蛋白質含有率が高ければ、(1) 光合成能が高く、乾物生産速度が高いと同時に、(2) 飼料としての品質も良い。それ故、乾物生産、品質の両面からみて葉蛋白質生産を高めることが望まれる。

一方、葉蛋白質は前記のように、いくつかの画分に分けられるが、それぞれの画分と光合成能との関係は充分には解明されておらず、また各画分で栄養価値も異なるので、葉蛋白質の各画分に注意を向ける必要がある。

以上の考え方に基づいて、葉蛋白質生産に及ぼす培地窒素条件、光、季節などの影響について検討した。

実験1 培地窒素濃度の影響

実験方法

ソルガムの苗を25個体ずつ17ℓ容水耕培養液槽に移植し、基本培養液で1週間培養した後、 NaNO_3 または $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を用いて 0, 2, 10, 50, 250 ppmN の処理を行った。処理はそれぞれ2連とした。培

養液は処理後4日目に交換し、1日2回pHを5.5に調節した。各区とも処理後0, 3, 7日目に10個体ずつ採取し、葉、莖、根部の乾物重、葉面積、各葉蛋白質画分の蛋白態窒素、全窒素を測定した。また、光合成能〔照度は同化箱上部で50KLux (590 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$)、葉温は26~28℃〕、呼吸能も測定した。なお、同一窒素濃度での $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 処理間の差は小さく、処理3日目に比べて7日目に処理間差異が明瞭であったので、主として $\text{NO}_3\text{-N}$ 系列の7日目の結果について述べる。

実験結果

光合成能は培地窒素濃度の上昇に伴って、0~50ppmN区間では上昇し、50~250ppmN区間ではほぼ一定となった (Fig 2)。地上部と根部呼吸能および葉面積は培地窒素濃度の上昇に伴って、0~50ppmN区間で上昇し、50~250ppmN区間ではほぼ一定となった。

葉と莖の乾物重は培地窒素濃度の上昇に伴って、0~50ppmN区間では著しく、50~250ppmN区間ではわずかに増加した (Table 3)。一方、根の乾物重は10ppmN以上の区では培地窒素濃度の上昇に伴い減少した。また葉/莖乾物重比 (以下葉/莖比) は培地窒素濃度に影響されなかった。

PPRは培地窒素濃度の上昇に伴って、50ppmN区まで顕著に上昇し、それ以上で一定となった (Fig 3)。

PPRをL-GRとPN%に解析すると、培地窒素濃度の上昇に伴って、L-GRはゆるやかに上昇したのに対して、PN%は著しく上昇した。従って、培地窒素濃度の上昇に伴うPPRの上昇は主としてPN%の上昇に起因する。さらに、PN%が3.5%以上の場合に高いPPRを維持した。

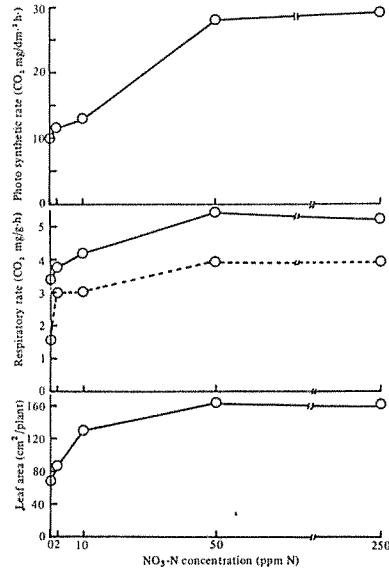


Fig. 2 Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in culture solution on photosynthetic rate, respiratory rate and leaf area. (7 days after the treatment)

Table 3. Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of nutrient solution on dry weight and leaf-stem ratio of sorghum on 7 days after the treatment.

N-concentration (ppm N)	Dry weight (mg/plant)			Leaf-stem ratio
	Leaf	Stem	Root	
0	151	88	159	1.72
2	161	101	191	1.59
10	242	134	208	1.81
50	298	150	164	1.99
250	299	158	171	1.89

葉蛋白質量は培地窒素濃度の上昇に伴って増加した。葉蛋白質画分別にみると、各画分共に培地窒素濃度の上昇に伴って増加するが、増加量はクロロプラスト態蛋白質が最も多い (Fig 4)。0ppmN区に対する窒素濃度の上昇に伴う増加割合は細胞質蛋白質、クロロプラスト態蛋白質、構造型蛋白質の順であった。そして、培地窒素濃度の上昇に伴って、葉蛋白質中に占めるクロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質の割合は上昇し、構造型蛋白質の割合が低下した。

また、処理期間中の各蛋白質画分の変動をみると、無窒素区では構造型蛋白質のみが増加した。培地窒素濃度の高い区ほど構造型蛋白質に比較してクロロプラスト態蛋白質画分と細胞質蛋白質画分の増加割合が大きかった (Table 4)。

植物体集積窒素の葉部分配割合は培地窒素濃度の上昇に伴って、0~50ppmN区間では上昇し、50~250ppmN区間では一定となった。一方、葉部増加窒素の蛋白態窒素割合は培地窒素濃度の上昇に伴

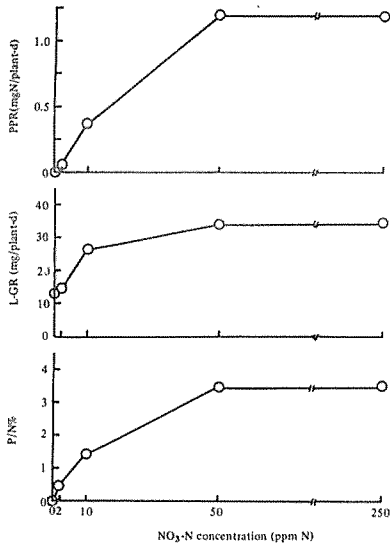


Fig. 3 Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ nitrogen in culture solution on protein production rate. (PPR*), L-GR* and PN%. (7 days after the treatment)

* see text.

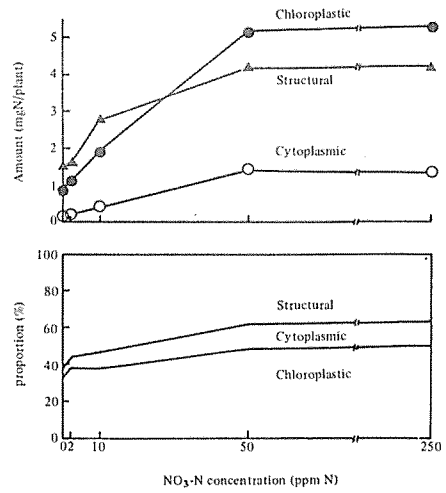


Fig. 4 Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in culture solution on the proportion and amount of chloroplastic, structural and cytoplasmic proteins.

Table 4. Effects of nitrogen concentration in culture solution on increment of N in the protein fractions, proportion of prot-N and distribution of nitrogen to leaf in sorghum.

N-Concentration (ppm N)	Amount of nitrogen (mgN/plant. 7 days)					Proportion * of protein-N (%)	Distribution of N** to leaf (%)
	Structural protein	Chloroplastic protein	Cytoplasmic protein	Non-Protein -N	Total-N		
0	0.50	-0.41	-0.10	0.03	0.02	—	4.0
2	0.63	-0.09	-0.05	0.06	0.55	90.9	21.5
10	1.74	0.69	0.17	0.47	3.07	85.0	43.6
50	3.17	3.97	1.22	1.86	10.22	81.9	56.2
250	3.13	4.10	1.19	1.97	10.39	81.1	54.0

* Proportion of prot-N to total-N which was increased in leaf for 7 days.

** Nitrogen absorbed for 7 days to leaf.

てわずかに低下し、250 ppmN 区では81.1%であった。

また、窒素吸収呼吸効率と葉蛋白質生産呼吸効率は培地窒素濃度の上昇に伴って、0~50 ppmN 区間では上昇し、50~250 ppmN 区間では一定となった (Fig 5)。

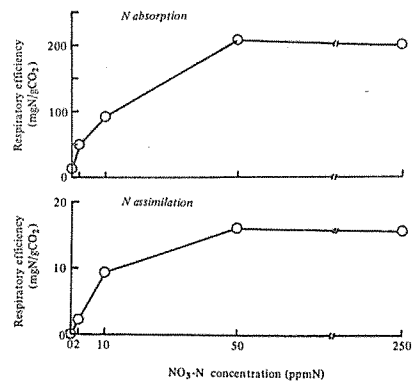


Fig. 5 Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in culture solution on respiratory efficiency for absorption or assimilation of N.

実験2 照度の影響

実験方法

17ℓ容培養液槽に幼植物を20個体ずつ移植し基本培養液で7日間培養し、その後24時間窒素欠除栽培し、NO₃-NまたはNH₄-Nをそれぞれ50ppmN供給するとともに、自然条件に対する相対照度を100, 50, 20, 0%の4段階に変えた。相対照度は黒色寒冷紗1枚で50(40~50)%, 3枚で20(15~20)%, アルミ箔を接着したビニールシートで0%とした。また処理期間中の各葉蛋白質画分の増加量を測定するため、供給窒素は(15NH₄)₂SO₄(10.1atom%)とNa¹⁵NO₃(10.2atom%)を使用した。処理はそれぞれ2連とし、各処理区とも処理開始後0, 3日目に10個体ずつ採取して各種の測定を行った。

実験結果

照度の低下に伴って、葉、茎の乾物重は減少し、根の乾物重は相対照度100~50%間で著しく、50~0%間でわずかに減少し、葉/茎比は変動しなかった(Table 5)。また、照度の低下に伴う乾物重と葉/茎比の変化はNO₃-N区、NH₄-N区とも同様であった。

Table 5. Effects of light intensity on dry weight and leaf-stem ratio in sorghum.

Source of N	Relative light intensity (%)	Dry weight (g/plant)			Leaf-stem ratio
		Leaf	Stem	Root	
NO ₃ -N	100	0.74	0.47	0.41	1.57
	50	0.61	0.31	0.27	1.97
	20	0.57	0.30	0.27	1.90
	0	0.52	0.27	0.24	1.92
NH ₄ -N	100	0.68	0.39	0.36	1.74
	50	0.55	0.31	0.25	1.77
	20	0.54	0.26	0.23	2.08
	0	0.51	0.27	0.24	1.89

* 100% represents the natural light condition.

PPRはNO₃-N区、NH₄-N区ともに照度の低下に伴って低下し、照度の高い場合はNO₃-N区で、低い場合はNH₄-N区で高かった(Fig 6)。PPRをL-GRとpN%に解析すると、L-GRはNO₃-N区、NH₄-N区ともに照度の低下に伴って低下し、その低下割合はNO₃-N区で大きかった。一方、pN%はNO₃-N区では相対照度50%以下で低下したのに対して、NH₄-N区では照度に影響されなかった。従って、照度の低下に伴うPPRの低下の内容はNH₄-Nの場合は主としてL-GRの低下に起因し、NO₃-Nの場合はL-GRとpN%の両者の低下に起因した。

処理期間中の各葉蛋白質画分への窒素取り込み量は照度の低下に伴って、NO₃-N区では顕著に、NH₄-N区ではゆるやかに減少し、照度の高い場合はNO₃-N区で、照度の低い場合はNH₄-N区で多かった(Table 6)。そして増加葉蛋白質の構造型蛋白質、クロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質への分配割合は照度や窒素源に影響されなかった。

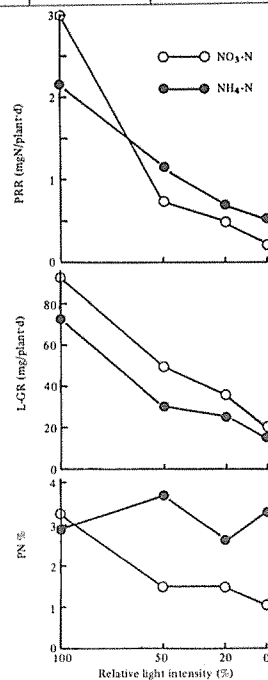


Fig. 6 Effects of light intensity on the protein production rate (PPR), L-GR and pN%.

Table 6. Effects of light intensity on the fate of ^{15}N incorporated into sorghum.

Source of N	Relative light intensity (%)	Amount of nitrogen incorporated (mgN/plant-3 days)					Proportion* of protein -N (%)	Distribution of ^{15}N ** to leaf (%)
		Structural protein	Chloroplastic protein	Cytoplasmic protein	Non-protein -N	Total-N (%)		
$\text{NO}_3\text{-N}$	100	4.17	3.15	1.77	1.05	10.14	89.6	34.2
	50	1.05	0.93	0.21	1.75	3.94	55.6	36.7
	20	0.84	0.54	0.18	0.97	2.53	61.7	30.4
	0	0.39	0.24	0.09	0.66	1.38	52.2	24.1
$\text{NH}_4\text{-N}$	100	4.14	1.68	0.60	0.07	6.49	98.9	34.0
	50	2.01	1.17	0.33	0.38	3.89	90.2	35.7
	20	1.11	0.78	0.24	1.01	3.14	67.8	40.1
	0	0.81	0.60	0.27	0.90	2.58	65.1	35.8

* Proportion of prot.- ^{15}N to total ^{15}N which was incorporated into leaf.

** Nitrogen incorporated into plant.

Table 7. Effects of light intensity on respiratory rate and amount of ^{15}N incorporated into sorghum.

Source of N	Relative light intensity (%)	Respiratory rate of top (mg CO_2 /plant.d)	Respiratory rate of root (mg CO_2 /Plant.d)	Amount of nitrogen incorporated (mgN/plant.d)
$\text{NO}_3\text{-N}$	100	127.3	23.62	9.89
	50	76.4	9.66	3.58
	20	82.2	5.38	2.77
	0	65.2	4.90	1.91
$\text{NH}_4\text{-N}$	100	142.2	24.71	6.36
	50	107.8	7.26	3.63
	20	66.2	5.91	2.61
	0	74.2	5.88	2.40

取り込み窒素の葉部分配割合は照度の低下に伴って、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区では相対照度20%以下で低下し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区では変動しなかった。また、葉部取り込み窒素の蛋白態窒素割合は照度の低下に伴って、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区ともに低下し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 区で高かった。

窒素吸収量、地上部および根部の呼吸量は照度の低下に伴って減少し、特に根部呼吸量の減少が顕著であった (Table 7)。そして、窒素吸収呼吸効率は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区ともに相対照度 100~0% ではば一定であった。しかし、葉蛋白質生産呼吸率は照度の低下に伴って、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区ではゆるやかに、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区では顕著に低下した (Fig 7)。

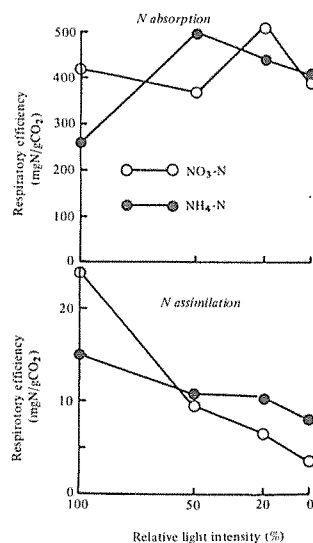


Fig. 7 Effects of light intensity on respiratory efficiency for absorption or assimilation of N.

実験3 日射量の影響

実験方法

昭和53年8月に実験2と同様にして $\text{NO}_3\text{-N}$ あるいは $\text{NH}_4\text{-N}$ をそれぞれ50 ppmN (^{15}N を含む) 供給した植物について、1日当りの日射量を以下の方法により5段階に変えた。(1) 12:00~13:00の1時間自然光下で照射し、残り23時間は暗所(ガラス室内に設置した)に置いた。(2) 10:00~16:00の6時間自然光下で照射し、残り18時間は暗所に置いた。(3) 自然光下。(4) 自然光に加え、17:30~23:30の間人工光により補光した。(5) 18:00~19:00の1時間暗所に置き、残り23時間は自然光と人工光で照射した。以下それぞれ(1)……(5)区と呼ぶことにする。

人工光の照度は上位葉で50KLux ($620 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$)。下位葉で15~30KLux ($290\sim410 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$)であり、約 $0.25 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{min}$ に相当すると推定され、従って、1日当りの平均日射量は(1)~(5)の各区でそれぞれ、70, 280, 400, 490, 565 $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{日}$ と推定した。

各区とも処理開始後0.3日目に10個体ずつ採取して各種の測定を行った。

実験結果

葉、茎、根の乾物重は日射量の増加に伴って、(4)区まで増加し、(4)~(5)区ではわずかに増加するか、ほぼ一定となった(Table 8)。また、葉/茎比は日射量を変えても変動しなかった。これらの傾向は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区と $\text{NH}_4\text{-N}$ 区ではほぼ同様であった。

Table 8. Effects of light intensity on dry weight and leaf-stem ratio in sorghum.

Source of N	Light intensity (Cal/cm ² .d)	Dry weight (mg/plant)			Leaf-stem ratio
		Leaf	Stem	Root	
$\text{NO}_3\text{-N}$	(1) 70	138	85	125	1.62
	(2) 280	205	121	145	1.69
	(3) 400	250	144	164	1.74
	(4) 490	358	158	199	2.27
	(5) 565	293	161	183	1.82
$\text{NH}_4\text{-N}$	(1) 70	168	75	126	2.24
	(2) 280	153	104	123	1.47
	(3) 400	270	149	153	1.81
	(4) 490	318	183	176	1.74
	(5) 565	345	175	191	1.97

PPRは日射量の増加に伴って、(4)区までは上昇し、(4)~(5)区ではわずかに上昇するか、ほぼ一定となり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 区でやや高かった(Fig 8)。PPRをL-GRとPN%に解析すると、L-GRは日射量の増加に伴って上昇したが、PN%の変動は一定しなかった。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区と $\text{NH}_4\text{-N}$ 区の差異はともに明瞭でなかった。従って、日射量の増加に伴うPPRの上昇は主としてL-GRの上昇に起因した。

処理期間中の各葉蛋白質画分への窒素取り込み量は日射量の増加に伴って、(4)区まで増加し、それ以上の日射量の増加では一定あるいはわずかに増加した(Table 9)。そして、増加葉蛋白質の構造的蛋白質、クロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質への分配割合は日射量や窒素源に影響されなかった。

取り込み窒素の葉部分割合は日射量の増加に伴って上昇し、日射量の少ない場合は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 区で高かった。また、葉部取り込み窒素の蛋白態窒素割合は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区ともに日射量に影響されず、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 区で高かった。

地上部呼吸量は(1)区で特に低かったのに対し、根部呼吸量は日射量の増加に伴って増加し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区間の差異は明瞭でなかった。その結果、窒素吸収呼吸効率は日射量の増加に伴って上昇する傾

向を示し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ 区でやや低かった (Fig 9)。それに対して、葉蛋白質生産呼吸効率は(1)区から(2)区でやや低下したが、(2)区より日射量が多いと日射量の増加に伴って上昇し、窒素源間には明瞭な差異は認められなかった。

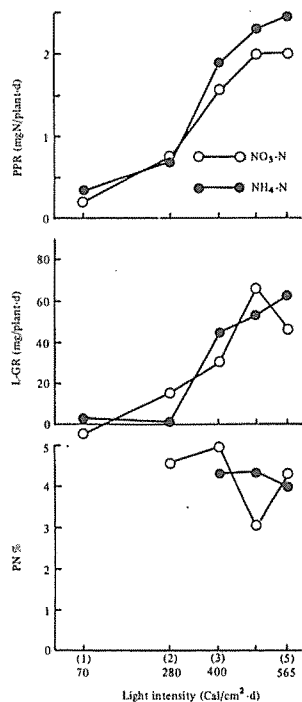


Fig. 8 Effects of light intensity on the protein production rate (PPR), L-GR and PN %

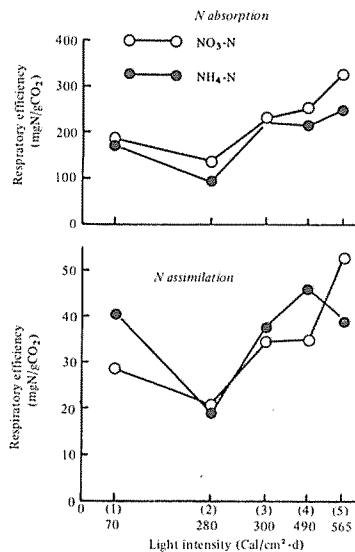


Fig. 9 Effects of light intensity on respiratory efficiency for absorption or assimilation of N.

Table 9. Effects of light intensity on the fate of ^{15}N incorporated into sorghum.

Source of N	Light intensity ($\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}$)	Amount of nitrogen incorporated ($\text{mgN}/\text{plant} \cdot 3 \text{ days}$)					Proportion* of protein N (%)	Distribution of $^{15}\text{N}^{**}$ to leaf (%)
		Structural protein	Chloroplastic protein	Cytoplasmic protein	Non-protein -N	Total-N		
$\text{NO}_3\text{-N}$	(1) 70	0.25	0.23	0.07	0.36	0.91	60.4	27.6
	(2) 280	1.01	0.90	0.31	0.60	2.83	78.8	34.9
	(3) 400	2.07	2.05	0.58	0.59	5.28	88.8	39.1
	(4) 490	2.77	2.63	0.61	1.74	7.74	77.5	47.0
	(5) 565	3.22	2.11	0.61	0.97	6.90	85.9	45.2
$\text{NH}_4\text{-N}$	(1) 70	0.58	0.36	0.11	0.11	1.15	90.4	41.8
	(2) 280	1.01	0.89	0.22	0.11	2.23	95.1	35.3
	(3) 400	3.01	2.13	0.65	0.07	5.86	98.8	48.8
	(4) 490	3.23	2.57	1.22	0.83	7.85	89.4	50.6
	(5) 565	3.77	2.76	0.94	1.23	8.70	85.9	52.0

* Proportion of prot- ^{15}N to total ^{15}N which was incorporated into leaf

** Nitrogen incorporated into plant

実験4 季節の影響

実験方法

8月中旬に行った実験3と同様の実験を10月中旬に行った。両実験とも培養液温度は25℃前後に調節し、窒素源はNO₃-Nのみを用いた。実験期間中の平均気温は8月中旬で30℃よりやや高く、10月中旬では25℃前後であった。ここでは両実験を8月区、10月区と呼んで論議する。また、1日当たり平均日射量は10月区では(1)~(5)区でそれぞれ、70, 210, 300, 390, 465 cal/cm²/日と推定され、8月区の場合と異なる。そのため8月区(1)~(5)区と区別するため、10月区では(1)'~(5)'区と呼ぶことにする。

実験結果

処理開始時の葉、茎、根の乾物重は10月区よりも8月区で3~5倍と大きかった (Table 10)。そのためここではPPRに加えてRPPRとL-RGRも解析に加えた。

Table 10. Dry weight of sorghum at the beginning of treatment

Planting season	Dry weight (mg/plant)			Leaf-stem ratio
	Leaf	Stem	Root	
Oct	31.8	14.8	44.1	2.15
Aug	156.0	90.0	120.0	1.73

各部位の乾物重は10月区、8月区とも日射量の増加に伴って増加した。葉/茎比は日射量の増加によって変動せず、両区間で差異は認められなかった。

PPRは10月区よりも8月区で高く、日射量の増加に伴って、10月区では上昇し、8月区では(4)区まで上昇し、(4)~(5)区ではほぼ一定となった (Fig 10)。さらに、RPPRの場合も10月区より8月区で高く、

両区ともに日射量の増加に伴って上昇した。

PPRをL-GRとpN%に解析すると、L-GRは10月区より8月区で高く、日射量の増加に伴って、10月区では上昇し、8月区では(4)区まで上昇した。しかし、L-RGRでは日射量の増加に伴って両区ともL-GRの場合と同様の傾向を示したが、その値は10月区よりも8月区でやや低かった。一方、pN%は、10月区では(1)'~(2)'区で1%と低く、(3)'~(5)'区では3%前後で一定であり、8月区では日射量の増加に伴う変化は明瞭でなかったが、(2)~(5)区で明らかに10月区よりも高かった。

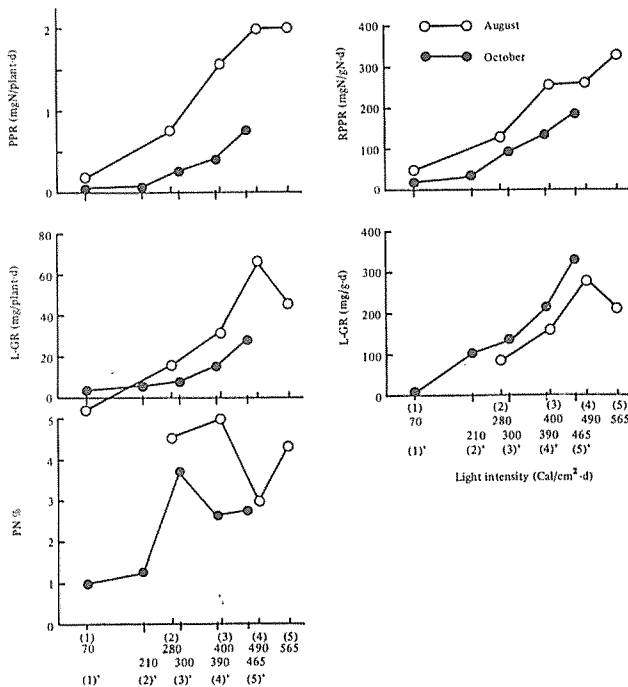


Fig. 10 Protein production rate (PPR) and Relative protein production rate (RPPR) in sorghum at different season.

の日射量の増加に伴う PPR の上昇は主として L-GR に起因し、10月区よりも8月区で高い PPR を示したのは主として pN% の高いことに起因した。

処理期間中に取り込んだ窒素の葉部分割合は10月区、8月区とも日射量の増加に伴って上昇し、両区

従って、10月区、8月区

で差異は認められなかった (Table 11)。また、葉部取り込み窒素の蛋白態窒素割合は日射量に影響されず、10月区よりも8月区で高かった。

Table 11. Effects of planting season on the fate of ^{15}N incorporated into sorghum.

Planting season	Light intensity (Cal/cm ² .d)	Amount of nitrogen incorporated (mgN/plant-3 days)					Proportion* of protein-N (%)	Distribution of $^{15}\text{N}^{**}$ to leaf (%)
		Structural protein	Chloroplastic protein	Cytoplasmic protein	Non-protein -N	Total-N		
Oct.	(1)' 70	0.03	0.03	0.01	0.04	0.11	63.6	23.9
	(2)' 210	0.07	0.07	0.02	0.14	0.29	55.2	31.5
	(3)' 300	0.22	0.25	0.05	0.16	0.69	75.4	38.1
	(4)' 390	0.30	0.38	0.08	0.48	1.24	61.3	44.8
	(5)' 465	0.68	0.73	0.12	0.51	2.04	75.0	42.1
Aug.	(1) 70	0.25	0.23	0.07	0.36	0.91	60.4	27.6
	(2) 280	1.01	0.90	0.31	0.60	2.83	78.8	34.9
	(3) 400	2.07	2.05	0.58	0.59	5.28	88.8	39.1
	(4) 490	2.77	2.63	0.61	1.74	7.74	77.5	47.0
	(5) 565	3.22	2.11	0.61	0.97	6.90	85.9	45.2

* Proportion of prot.- ^{15}N to total ^{15}N which was incorporated into leaf.

** Nitrogen incorporated into plant.

処理期間中の各葉蛋白質画分への窒素取り込み量は10月区よりも8月区で多く、両区とも日射量の増加に伴って増加した。そして、増加葉蛋白質の各葉蛋白質画分への分配割合は日射量に影響されず、両区間でも差異はなかった。

窒素吸収呼吸効率は日射量の増加に伴って10月区、8月区とも上昇し、10月区よりも8月区で高かった (Fig 11)。それに対して葉蛋白質生産呼吸効率は日射量の増加に伴って、一定した変動を示さず、10月区と8月区の差異も明瞭でなかった。

従って、8月に比べ10月に栽培した場合、葉/茎比や増加葉蛋白質の各葉蛋白質画分への分配割合は変わらないが、PPR、窒素吸収呼吸効率、葉部取り込み窒素の蛋白態窒素割合は低下した。

考 察

本研究では葉蛋白質を(a)クロロプラストをタイプAまたはタイプBの形でできる限り完全に分離し、残りを(b)主に細胞質蛋白質である溶性画分と(c)細胞壁蛋白質とクロロプラスト態蛋白質、ミトコンドリア蛋白質の構造性蛋白質などから成る不溶性画分に分画した。

この分画法によって分画した各画分について、光合成能と葉の蛋白態窒素^{97, 100}、ラメラ窒素^{94, 95}、Fraction I Protein^{22, 23, 119, 155}や RuBP carboxylase 活性¹²⁴との関係、また、飼料の消化率と葉蛋白質画分との関係^{43, 44, 86, 115~117, 170}についてのこれまでの報告と対応させると、クロロプラスト態蛋白質を増大させることは光合成能を向上させることになり、クロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質は、いわゆる水および希アルカリ性熱エタノール可溶性の部分であって、これらを増大させることは飼料の消化率を高め、栄養価を向上させることになると考えられる。

ただし、クロロプラストを完全に抽出することは容易でなく、抽出率はソルガムで82%、イタリアンラ

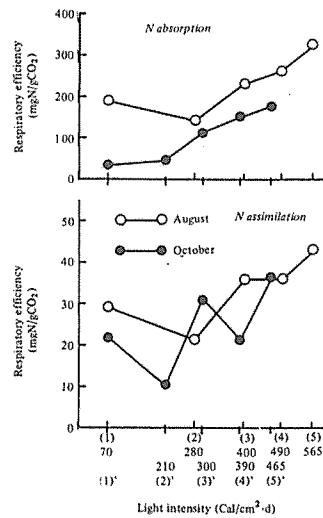


Fig. 11 Respiratory efficiency for absorption or assimilation of N in sorghum at different season.

イグラスで90%程度であった。C₄植物では維管束鞘細胞が発達しており、クロロプラストの抽出が困難^{30, 32, 50, 157)}で、上記両草種間の抽出率の差異は主にC₃, C₄種の葉の構造の差異によると考える。そして他のC₄植物間の抽出率の差異は10%以内であった。

また、実験4における10月区と8月区の日射量と各項目との関係において、両区の差異は主として気温の差異と考え、以下論議する。

実験1の結果から、光合成能と単位葉面積当りの各葉蛋白質画分含有量との関係についてみると、光合成能とクロロプラスト態蛋白質画分との間に高い正の相関が認められた。しかし、クロロプラスト態蛋白質が増加する場合には他の葉蛋白質画分も増加する結果、いずれの葉蛋白質画分においても光合成能と正の相関が認められた (Fig 12)。そして、光合成能はクロロプラスト態蛋白質で3.5 mgN/dm²、全葉蛋白質で6.5 mgN/dm²までは上昇し、それ以上ではほとんど上昇しなかった。

また、各葉蛋白質画分の増加速度と葉面積拡大速度とは正の相関を示した

(Table 12)。

従って、6.5 mgN/dm²までの葉蛋白質密度 (単位葉面積当りの葉蛋白質含有量) の増加では光合成能や葉面積拡大速度が上昇し、ソルガムの乾物生産と品質の両面に寄与し、それ以上の葉蛋白質密度の増加では主として品質の改善に寄与するものとする。

ソルガムの PPR は窒素

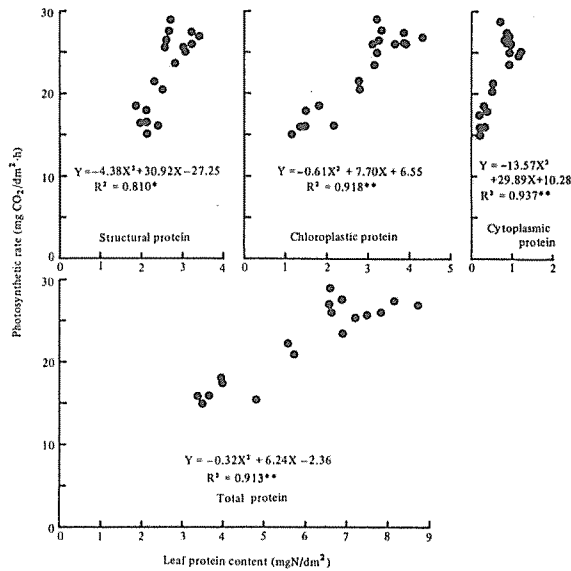


Fig. 12. Relationship between photosynthetic rate and leaf protein content.

Table 12. Relation between the production rate of leaf protein fractions and leaf expansion rate.

Leaf protein fraction	Regression equation	R (n = 14)
Structural protein	$Y = 46.3 X - 79.6$	0.916**
Chloroplasmic protein	$Y = 76.6 X - 342.7$	0.881**
Cytoplasmic protein	$Y = 23.3 X - 94.1$	0.782**
Total protein	$Y = 154.1 X - 592.1$	0.876**

** Significant at the 1% level.

供給不足、日射量の不足、低温の場合に著しく低下する。また、低照度下での PPR の低下割合は NH₄-N よりも、NO₃-N を窒素源とした場合に大きい。これらの PPR の変化を L-GR と pN% の変化に解析すると、その変動は窒素供給、気温の変化では主として pN% の変動に、光条件の変化では主として L-GR の変動に起因していることが明らかになった。

低温下での pN% の低下は窒素吸収の抑制が原因と考えられ、pN% は窒素吸収状態により一義的に決まるものと考えられる。ただし、低照度下で NO₃-N を供給した場合や、低温で日射量が少ない場合に、pN% の低下が認められた。これらは光不足による NO₃-N の還元抑制と光合成産物の不足による窒素吸収の阻害によるものとする。

一方、L-GR は光不足で低下した。これは主として光合成量の減少によるものと考えられる。

さらに、光合成能や葉面積拡大速度を高く維持するためには、ある葉蛋白質密度を維持することが必要である。そのために必要な pN% を推定してみると、実験1と実験2の NO₃-N 区の場合、pN% が 3.5% 以上ではいずれも高い PPR と L-GR を示し、2% 以下では PPR が著しく低いことから、2% 以上が是非とも必要であり、3.5% 以上では上昇効果が低いものと考ええる。

PPR の向上を図る上で葉/莖比も重要な要因の1つであるが、葉/莖比は温度、光、窒素源のいずれの条件の変動によっても変動せず、窒素供給が不足すると低下した。また、増加窒素の葉部分配割合は窒素供給不足で低下し、日射量の減少でやや低下した。そして、葉部増加窒素の蛋白態窒素割合は窒素濃度の上昇でわずかに低下し、日射量の減少により低下し、その低下割合は NO₃-N を窒素源とした場合に顕著であった。さらに、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質および構造性蛋白質への分配割合は、窒素源、光および温度条件の変動によってほとんど変動せず、窒素供給が不足するとクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質画分が減少する。そして、窒素の供給が十分であれば増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質画分への分配割合は環境要因によって変動せず、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質画分の増加を図るためには PPR の向上を図ることが必要と考えられる。

次に、窒素吸収呼吸効率は窒素供給不足、日射量の不足および低温条件で低下する。他方、葉蛋白質生産呼吸効率は光、温度条件の変動では変化せず、窒素供給不足により低下する。ただし、NO₃-N を窒素源とした場合は照度不足により低下する。すなわち、窒素吸収呼吸効率と葉蛋白質生産呼吸効率は PPR が高い程高く、主として窒素の体内取り込みが制限された場合に低下するものと考えられる。なお、NO₃-N を窒素源とすると、光が不足する場合にも低下する。

以上のように、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質を増大させるには PPR を高める必要があり、また PPR は L-GR と pN% の増大により上昇する。そして、肥培管理の面からそれらを向上させる方策としては、窒素供給条件の改善であり、栽植密度を高めることであろう。しかし、栽植密度を高めると pN% が低下し勝ちであるので、pN% が 2% 以下にならない様に窒素施与量を高める必要が生じ、栽植密度と窒素施与量とを切り離して考えることはできない。これらの関係については圃場条件下での検討が必要である。

第4章 肥培管理によるソルガムの葉蛋白質生産速度の改善

第3章では個体として生育させたソルガムの PPR を支配する諸要因について調査し、PPR は pN% と L-GR の増大により向上し、pN% は窒素供給と温度条件の改善により、L-GR は光条件の改善により、それぞれ向上することを明らかにした。

本章では圃場に生育する個体群としてのソルガムについて、窒素施与量および栽植密度と単位土地面積当たりの PPR との関係解析して、葉蛋白質生産を向上させ、乾物生産、蛋白質生産を向上させる肥培管理法を明らかにした。

実験1 窒素施与量と栽植密度の影響

実験方法

広島大学精密実験圃場（花崗岩風化鈣質酸性土壌、Table 13 参照）で窒素施与量と栽植密度をそれぞれ3段階に変えた試験区を設定した。

Table 13. Some properties of the soils used.

Texture	pH ^{a)} KCl	TN %	P ^{b)} ppm	Exchangeable ^{c)} ppm		
				K	Ca	Mg
Sandy loam	5.4	0.20	12.5	260	1480	80

a) Soil/water ratio = 1.0:2.5

c) Extracted with 1N NH₄OAc, pH7.0

b) Extracted with 0.2N HCl

播種量は 27, 54, 108 kg/ha の区を設けた。ただし、ON 区では 54 kg/ha 区のみを設けた。播種量を変えるに当っては畝当りの播種量は同量（株間 5 cm, 3 粒/株 2 条植）とし、畝間隔を 120, 60, 30 cm と変えることによって栽植密度を変え、それぞれ 3 R, 6 R, 12 R 区とした。この各栽植密度区に 3 段階の窒素を施与した。すなわち、施与量は密植と過石（100 kg P₂O₅/ha）、塩加（150 kg K₂O/ha）を均一に散布し、硫酸の施与量を 0, 60, 120, 240 kg N/ha の 4 段階（0 N, 1 N, 2 N, 4 N）とし、それぞれの量を作条施与とした。そのため、栽植密度の低い区で畝当り施与量は多くなった。なお栽植密度一窒素施与量の組合せで各区は例えば 30 cm, 60 kg N/ha 区は 12 R - 1 N 区と呼ぶことにし、1 区の大きさは 3.6 m × 9 m とした。

昭和 51 年 6 月 17 日に播種し、発芽後必要に応じて灌水した。原則として 7 日毎に葉、莖、根部乾物重、葉面積、全窒素、蛋白態窒素（5% 冷過塩素酸で非蛋白態窒素を除いた残り）などを測定した。なお各処理区については一畝 50 cm の試料を 2 ケ所から採取し、葉、莖、根部に分け、莖数、新鮮重を測定し、一部を熱風乾燥し分析に供した。また別に 10 個体ずつ採取し、葉の新鮮重を測定し、葉面積（莖部は含まない）を測定した。

実験結果

発芽は 3 R - 4 N 区では畝当り施与量が多かったため、わずかに不良であったが、それ以外の区は良好であった。

莖数は 3 R - 4 N 区では生育後期でもわずかに少なかったが、それ以外の区では窒素施与量による影響は認められず、3 R, 6 R, 12 R でそれぞれ 95~90, 180~190, 390~370 本/m² であり、分けつはほとんど認められなかった。

刈り取り時の草丈は多窒素、疎植区程高く、4 N 区の疎植区では 191 cm, 密植区では 185 cm であった。

播種後 49 日目（発芽後 46 日目）の乾物収量（刈り取り時の乾物生産量）と地上部窒素含有量は密植、多窒素区程多く、6 R 区は 3 R 区と 12 R 区の中間の値、2 N 区は 1 N 区と 4 N 区のほぼ中間の値を示した（Fig 13）。

葉蛋白質生産量は密植・多窒素区程多く、12 R - 4 N 区では 84 kg N/ha であった（Fig 14）。

〔PPR〕[※]は 12 R - 4 N > 3 R - 4 N > 12 R - 1 N > 3 R - 1 N の順であり、各々 183, 113, 80, 59 mg N/m²/日であった。そして、PPR の経時的変化についてみると、生育に伴って、12 R - 4 N 区では発芽後 30

日目までは顕著に上昇し、その後低下し、3 R - 4 N 区では発芽後 23 日目まで上昇し、その後低下し、3 R - 1 N 区と 12 R - 1 N 区

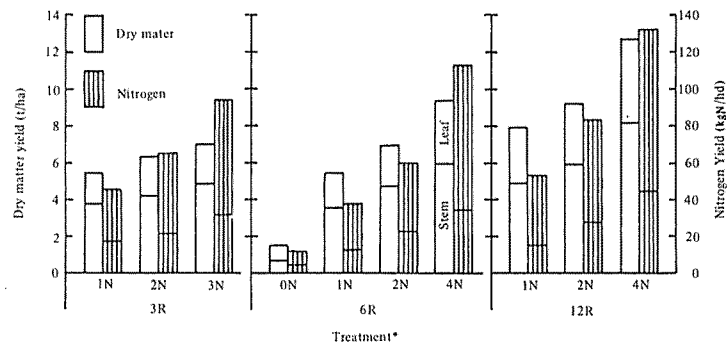


Fig. 13 Effects of plant density and nitrogen application rate on the dry matter and nitrogen yield in 46 days after germination.

* See text

※ PPR は厳密には時々刻々の葉蛋白質生産速度であるが、実際の算定は 3~7 日間隔で調査し、1 日当りの葉蛋白質生産速度で表示した。一方、実際栽培における問題を考える上での各刈り取り時の葉蛋白質生産量に対する各種処理の影響あるいは草種間差を検討する場合に、生産量を刈り取りまでの所要日数と生産速度に解析するため、刈り取り時の葉蛋白質生産量を刈り取りまでの所要日数で除して、刈り取り毎の平均葉蛋白質生産速度（〔PPR〕）を算出した。従って、PPR と同じ単位であるが、前記 PPR と同様な意味ではない。そこで PPR と区別するため、〔 〕を付けて示すことにする。

〔CGR〕, 〔L-GR〕, 〔pN%〕も同様な意味で〔 〕付きとする。

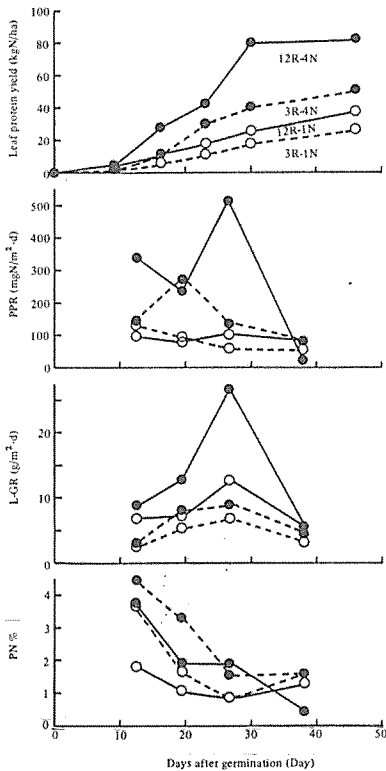


Fig. 14 Effects of plant density and nitrogen application rate on leaf protein yield, PPR, LGR and PN %.

芽後15日目以前に窒素供給が不足し、pN%は発芽後15日目ですでに2%以下であった。しかし、栽植密度が高くLGRが高かったため、〔PPR〕は3R-1N区よりもわずかに高かった。

LAIは生育に伴って、密植区では発芽後36日まで増加し、その後わずかに低下し、疎植区では発芽後46日まで増加し、密植・多窒素区程大きく、最大値は12R-4N区の18.7であった（Fig 15）。

葉蛋白質密度は生育に伴って、3R-4N、12R-4N、3R-1N区では発芽後16日目まで増加し、その後低下し、12R-1N区では発芽後9日目から低下し、最大値はpN%と同様で、3R-4N > 12R-4N、3R-1N > 12R-1Nの順であった。そして、光合成能や葉面積拡大速度を高く維持するのに必要な葉蛋白質密度 6.5 mgN/dm^2 （第3章）以下となったのは、3R-4N区では発芽後30日目、12R-4N、3R-1N区では20日目、12R-1N区では10日目であった。

ではほとんど変化せず生育期間を通じて低かった。そして、PPRの最大値は12R-4N > 3R-4N > 3R-1N、12R-1Nの順で最大値は12R-4N区の $510 \text{ mgN/m}^2/\text{日}$ であった。

PPRをL-GRとpN%に解析すると、L-GRは生育に伴って、発芽後30日目まで上昇し、その後低下し、密植区で大きく、12R-4N > 12R-1N > 3R-4N > 3R-1Nの順であった。一方、pN%は生育に伴って各区とも低下したが、発芽後20日目までは3R-4N > 12R-4N、3R-1N > 12R-1Nの順であり、pN%が2%以下となったのは、3R-4N区では発芽後25日目、12R-4N区と3R-1N区では20日目、12R-1N区では15日目であった。

すなわち、3R-4N区では畝当りの窒素施与量が最も多かったことから、発芽後20日目頃まで窒素供給が十分であり、高いpN%を維持したが、密植密度が低く、L-GRが低かったため〔PPR〕は小さかった。12R-4N区と3R-1N区では畝当り窒素施与量が同じであったことから、pN%もほぼ同様であり、窒素供給が十分であったのは発芽後15日目頃までであった。そして栽植密度の差異によって、12R-4N区の〔PPR〕は最も高く、3R-1N区では低かった。また、12R-1N区では発

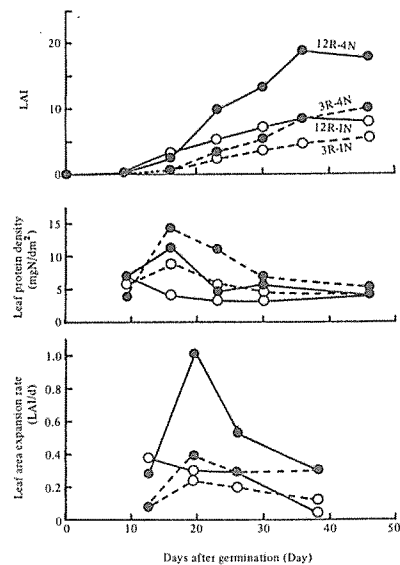


Fig 15 Effects of plant density and nitrogen application rate on leaf area index (LAI), leaf protein density and leaf area expansion rate.

LAI 増加速度は生育に伴って、3R-4N区では発芽後20日目まで上昇し、その後わずかに低下してほぼ一定となり、12R-4N区と3R-1N区では発芽後20日目まで上昇し、その後低下し、12R-1N区では発芽後10日目から低下した。そして最大値は12R-4N区の1.0/日であった。

地上部乾物重（生育期間中の乾物生産量）は生育に伴って、各区とも増加し、12R-4N>>12R-1N>3R-4N>3R-1Nの順で密植・多窒素区程多く、12R-4N区では12.6 t/ha（〔CGR〕=27.4 g/m²/日）であった（Fig 16）。

CGRはL-GRとほぼ同様の傾向を示した。すなわち、生育に伴って、密植（12R）区では発芽後25日目まで上昇し、その後低下し、疎植（3R）区では発芽後25日目までゆるやかに上昇し、その後わずかに低下するか、あるいは一定であった。そして最大値は12R-4N>>12R-1N>3R-4N>3R-1N区の順で密植・多窒素区程大きく、12R-4N区では68.5 g/m²/日であった。

葉/茎比は生育に伴って、各区とも発芽後16日目まで一定で、その後低下し、窒素施与量や栽植密度によって影響されなかった。また、刈取り時の根重/地上部重比は密植・多窒素区程低かった。

地上部の全窒素中の非蛋白態窒素の割合は葉部では生育初期で15~20%、刈取り時では5~10%程度であったが、茎部では生育初期で55~65%、刈取り時でも35~40%と高く、地上部の蛋白態窒素の70~80%は葉部に存在した（Table 14）。

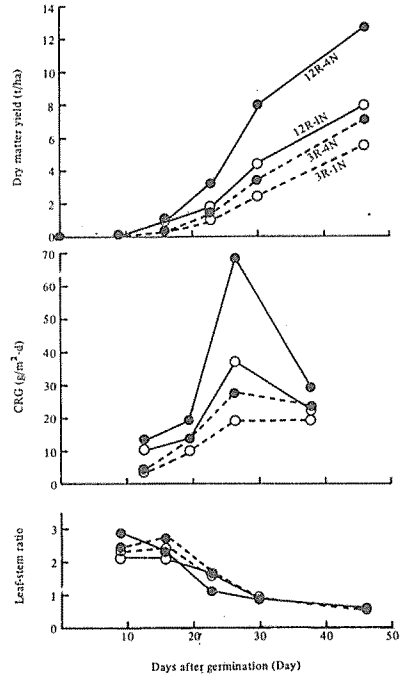


Fig. 16 Effects of plant density and nitrogen application rate on dry matter yield, CGR and leaf-stem ratio.

Table 14. Proportion of non protein-N to total N, proportion of leaf protein to total protein in top, recovery rate of fertilizer N and root-top ratio in sorghum at 49 days after sowing.

Treatment	Non protein-N/total-N (%)		Leaf protein* Total protein in top (%)	Recovery rate of fertilizer N** (%)	Root-top ratio (%)
	Leaf	Stem			
3R-1N	6.0	40.3	70.7	64.7	24.8
3R-4N	5.2	36.6	73.6	37.4	14.0
12R-1N	4.9	40.1	79.8	66.0	22.2
12R-4N	8.7	43.5	76.0	55.4	12.9

* Proportion of leaf protein to total protein in top.

** Recovery rate of fertilizer N = 100 (A-B)/C

A: Amount of nitrogen absorbed by plant.

B: Amount of nitrogen absorbed in O-N plot.

C: Amount of Fertilizer N applied.

窒素吸収率（〔窒素吸収量-O-N区窒素吸収量〕/施与窒素量）は多窒素区で低く密植区で高く、12R-4N区で55.4%であった。

葉部と茎部の硝酸態窒素含有率は生育に伴って、12R-4N区では発芽後15日目まで上昇し、その後低下し、3R-4N区では発芽後22日目まで上昇し、その後低下し、両区とも葉部よりも茎部で高かった。また、地上部の硝酸態窒素含有率は発芽後、12R-4N区では22日目、3R-4N区では35日目で0.2%以下となった（Fig 17）。

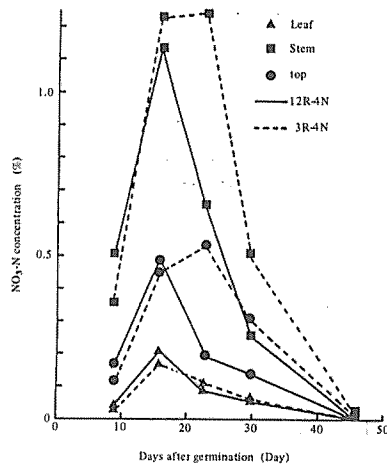


Fig. 17 Effect of plant density and nitrogen application rate on nitrate concentration.

実験 2 窒素供給条件の改善による葉蛋白質生産速度と蛋白質生産の向上

実験方法

前期同様の広島大学実験圃場に Table 15 に示す 9 区を設けた。なお使用した乾燥牛糞と緩効性肥料の

Table 15. Treatment and rate of fertilizer application.

Treatment	Basal application (kg/ha)				
	AS-N*	CM-N*	SR-N*	P ₂ O ₅	K ₂ O
ON	0	—	—	480	410
2N+C	120	120	—		
4N	240	—	—		
6N	360	—	—		
8N	480	—	—		
4N+C	240	120	—		
4N+2C	240	240	—		
4N+S	240	—	120		
4N+2S	240	—	240		

Nutrient concentration of dried cattle manure and slow-release fertilizer.

Fertilizer	Nutrient concentration (% in F·W)				C/N ratio
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Moisture	
Dried cattle manure	2.0	2.3	1.2	45	11.0
Slow -release fertilizer	13.0	24.0	20.3	—	—

* AS-N: Ammonium sulfate-N
 CM-N: Cattle manure-N
 SR-N: Slow-release fertilizer-N

成分についても Table 15 に付記した。

播種量は 100 kg/ha とし、畝巾は 30 cm とした。なお $2\text{ N} + \text{C}$ 区では播種量 50 kg/ha 、畝巾 60 cm とした。この区は当地域での農家の現行とほぼ類似である。

昭和52年6月6日に播種し、原則として発芽後7日毎に、葉、茎、根部乾物重、葉面積、全窒素、蛋白態窒素を測定した。刈取りは7月14日、8月18日、10月4日の3回行い、各刈取り直後に各区とも 120 kg N/ha (硫酸) の追肥をした。

実験結果

1番刈り後、再成長させ、2番刈り、3番刈りで行い、120日間に3回の刈取りが可能であった。

発芽は8N区および牛糞添加 ($4\text{ N} + \text{C}$, $4\text{ N} + 2\text{ C}$) 区で遅れたが、それ以外の区では良好であった。

茎数は各区とも1番刈りで $300 \sim 500\text{ 本/m}^2$ 、2番刈りで $250 \sim 300\text{ 本/m}^2$ 、3番刈りで $200 \sim 220\text{ 本/m}^2$ と刈取り毎に減少した。

刈取り時の草丈は1番刈りで $155 \sim 170\text{ cm}$ 、2番刈りで $200 \sim 210\text{ cm}$ 、3番刈りで $170 \sim 210\text{ cm}$ であった。

3番刈りまでの合計乾物収量と地上部窒素含有量は ON 区を除くと $2\text{ N} + \text{C}$ 区で最も低く、4N区よりも牛糞や緩効性窒素肥料を多量に施与した $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区で多く、4N+C、 $4\text{ N} + \text{S}$ 区は4N区と $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区の間の中値であった

(Fig 18)。また、6N区と8N区では、窒素含有量は4N区と同等以上であったが、乾物収量は逆に低か

た。これらのことから、以後、4N区に加えて窒素 240 kg/ha を化学肥料、牛糞、緩効性窒素肥料で与えた8N区、 $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 区、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区を対比しつつ論議する。

4N区の乾物収量と地上部窒素含有量をそれぞれ100として各区の乾物収量と地上部窒素含有量を相対値で示すと、相対乾物収量は8N区では1～3番刈りとも100%以下であり、1番刈りの $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区と2、3番刈りの $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区では100以上となったが、最大値は120程度に留まった (Table 16)。

Table 16. Relative value of dry matter yield and amount of nitrogen in top.

Treatment	Relative dry matter yield (%)			Relative amount of nitrogen absorbed (%)		
	1st cutting	2nd cutting	3rd cutting	1st cutting	2nd cutting	3rd cutting
4N	100	100	100	100	100	100
8N	84	88	87	116	94	97
$4\text{ N} + 2\text{ C}$	82	124	116	113	147	151
$4\text{ N} + 2\text{ S}$	106	104	110	156	137	135

それに対して、相対窒素含有量は2、3番刈りの8N区以外は100以上であり、特に1番刈りの $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区と2、3番刈りの $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区では135～156と高かった。1番刈りの4N区に対する相対葉蛋白質生産量は8N、 $4\text{ N} + 2\text{ C}$ 、 $4\text{ N} + 2\text{ S}$ 区でそれぞれ115、108、163%で、相対地上部窒素含有量とほぼ同様の傾向であった。

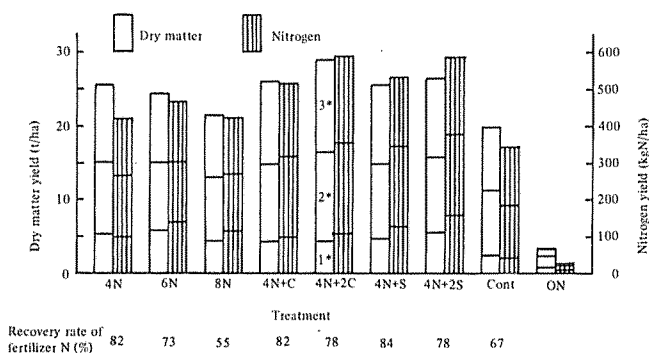


Fig. 18 Dry matter yield, nitrogen yield and recovery rate of fertilizer nitrogen at each harvest.

* Number of harvest.

葉/莖比は2,3番刈りよりも1番刈りでわずかに高かったが、処理間の差異は明瞭でなかった。それに対して、地上部/根部乾物重比は各区とも1番刈り>2番刈り>3番刈りの順に高く、1,2番刈りでは4N区よりも8N, 4N+2C, 4N+2S区で高く、3番刈りでは4N, 8N区に比較して4N+2C, 4N+2S区で高かった (Table 17)。

Table 17. Leaf-stem ratio and top-root ratio.

Treatment	Leaf-stem ratio			Top-root ratio		
	1st cutting	2nd cutting	3rd cutting	1st cutting	2nd cutting	3rd cutting
4N	0.81	0.68	0.70	5.86	4.56	3.00
8N	0.84	0.74	0.67	8.33	5.90	2.79
4N+2C	0.86	0.68	0.88	7.84	6.45	4.95
4N+2S	0.88	0.79	0.69	9.45	5.67	3.58

従って、1番刈りの4N+2S区と2,3番刈りの4N+2C, 4N+2S区では窒素供給が改善され、乾物収量がわずかに増加したのに対し、葉蛋白質生産量は著しく増加し、刈取り時の葉蛋白質密度や葉蛋白質含有率（全乾物に対する葉の蛋白態窒素の割合）が上昇した。そして3番刈りまでの窒素吸収率は8N区では55%と低かったが、4N, 4N+2C, 4N+2S区では78~82%と高かった (Fig 19)。

そこで、1番刈りについて、4N区と4N+2S区の生育に伴う各項目の変動をFig 19に示した。

葉蛋白質量は生育に伴って、4N区では発芽後28日

目まで顕著に、その後ゆるやかに増加し、4N+2S区では発芽後35日目まで顕著に増加した。そして、発芽後35日目の葉蛋白質量は4N区よりも4N+2S区で多く、 87kgN/ha であった。

〔PPR〕は4N+2S区では $249\text{mgN/m}^2/\text{日}$ であり、4N区では $149\text{mgN/m}^2/\text{日}$ であった。そして経時の変化についてみると、PPRは生育に伴って、4N区では低下し、4N+2S区では発芽後25日目（播種後28日目）まで上昇し、その後一定となり、最大値は4N区よりも4N+2S区で高く、 $415\text{mgN/m}^2/\text{日}$ であった。L-GRは生育に伴って、4N区では一定であり、4N+2S区では発芽後25日目まで上昇し、その後一定となり、4N区よりも4N+2S区で高かった。PN%は生育に伴って、4N区では顕著に低下したのに対し、4N+2S区ではわずかに低下したにすぎない。その結果、4N区では発芽後25日目以降で2%以下となり、4N+2S区では発芽後35日目の刈取り時においても3%と高かった。

葉蛋白質密度は両区とも生育に伴って低下し、4N区では発芽後25日目で 6.5mgN/dm^2 以下となったの

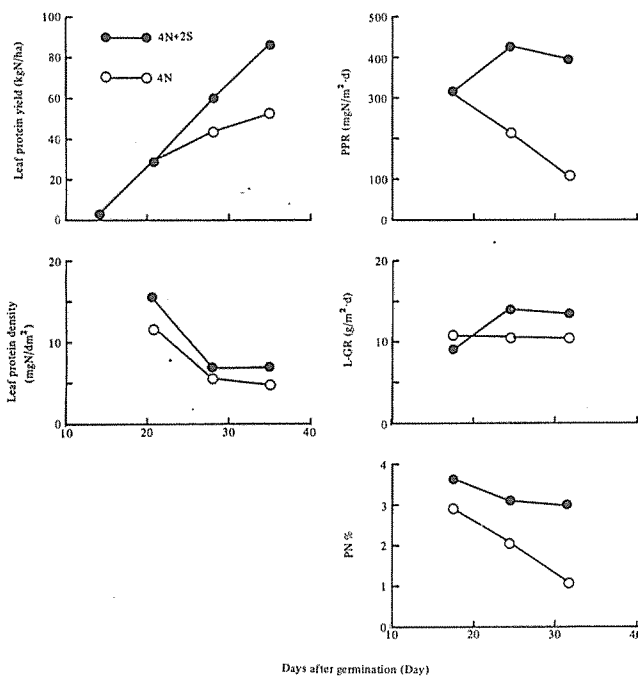


Fig. 19 Changes of leaf protein yield, leaf protein density and protein production rate (PPR), L-GR and PN% during the growth period.

に対して 4N + 2S 区では発芽後35日目まで 7.0 mgN/dm^2 と高かった。

LAI は生育に伴って、両区とも増加し、4N 区よりも 4N + 2S 区で高く、最大値は 12.4 を示した (Fig 20)。そして、LAI 増加速度は生育に伴って、両区とも発芽後25日目まで上昇し、その後低下し、4N 区よりも 4N + 2S 区で高く、最大値は $0.94/\text{日}$ であった。

地上部乾物重は生育に伴って、両区とも増加し、最大値は 4N 区よりも 4N + 2S 区でわずかに高く、1 番刈り取り時で 5.7 t/ha ($\text{CGR} = 16.3 \text{ g/m}^2/\text{日}$) であった (Fig 21)。そして、CGR は地上部乾物重とはほぼ同様の傾向を示し、最大値は 4N + 2S 区の $42 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であった。

地上部と葉部の窒素含有量は各区とも生育に伴って増加し、4N 区よりも 4N + 2S 区で著しく多く、最大値はそれぞれ 4N + 2S 区の 165 kgN/ha と 93 kgN/ha であった (Fig 22)。

2 番刈りの地上部と葉部の窒素含有量、LAI、LAI 増加速度、乾物収量、CGR の最大値は、いずれも 1 番刈りよりも高かった (Fig 20, 21, 22)。すなわち、地上部と葉部の窒素含有量は各区とも生育に伴って、刈り取り後22日目まで増加し、その後一定あるいはわずかに増加し、最大値は 4N、8N 区よりも 4N + 2C、4N + 2S 区で高く、4N + 2C 区の最大値はそれぞれ 240 kgN/ha と 135 kgN/ha であった。

LAI は生育に伴って、各区とも刈り取り後22日目まで顕著に、その後ゆるやかに増加し、最大値は 4N、8N 区よりも 4N + 2C、4N + 2S 区で高く、4N + 2C 区で最大値 15.3 を示した。また、LAI 増加速度は生育に伴って、各区とも刈り取り後28日目まで上昇し、その後低下し、最大値は 4N + 2S 区の $1.25/\text{日}$ であった。

地上部乾物重は生育に伴って、各区とも増加し、最大値は $4N + 2C > 4N + 2S > 8N > 4N$ 区の順で 4N + 2C 区で 12 t/ha ($\text{CGR} = 34.3 \text{ g/m}^2/\text{日}$) であった。また、CGR は生育に伴って、各区と

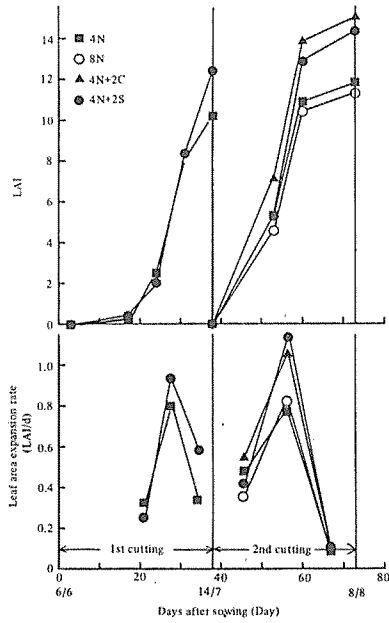


Fig. 20 Changes of LAI and leaf area expansion rate with growth.

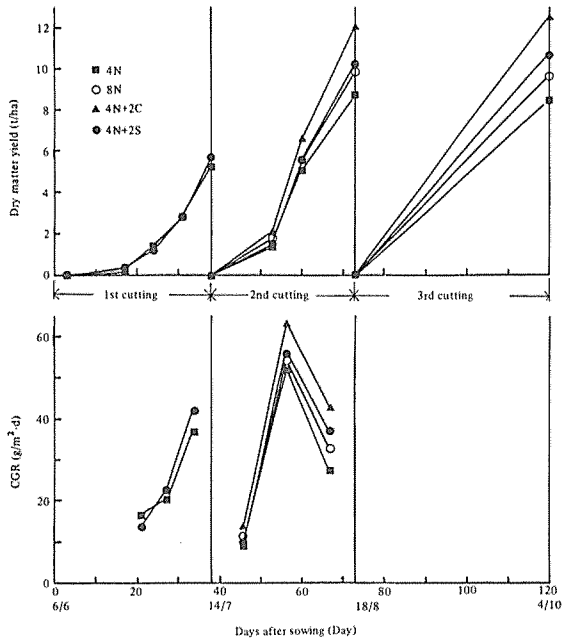


Fig. 21 Changes of dry matter yield and crop growth rate (CGR) with growth.

も刈取り後28日目まで上昇し、その後低下し、最大値は $4N + 2C > 4N + 2S > 8N > 4N$ 区の順で、いずれも $50 \text{ g/m}^2/\text{日}$ 以上であり、 $4N + 2C$ 区では $63.5 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であった。

さらに、120日間（1～3番刈り）の〔PPR〕の平均は $4N + 2C$ 区で $258 \text{ mgN/m}^2/\text{日}$ で最も高く、3回刈りの合計葉蛋白質生産量は 310 kgN/ha となり、その場合の合計乾物収量は 29 t/ha であった。

考 察

実験1の12R-4N区または3R-4N区の結果

(Fig 23) を検討すると、12R-4N区では生育に伴って、PN% は発芽後10～20日目で低下し、葉蛋白質密度は発芽後16日目まで上昇し、16～23日目で低下し、LAI 増加速度は発芽後20日目まで上昇し、20～25日目で低下し、L-GR とCGR は発芽後25日目まで上昇し、その後低下した。すなわち、PN% が発芽後10～20日目に低下して、20日目には2%以下の値となり、それに伴って葉蛋白質密度は発芽後16～23日目に低下し、23日目では 5 mgN/dm^2 と低くなり、葉蛋白質密度がこのような低い値になってから一週間後にはLAI 増加速度が低下し、さらに一週間後にはL-GR とCGR が低下した。

一方、12R-4N区に対して栽植密度が4分の1で畝当りの窒素施与量が多かった3R-4N区では、PN% が発芽後20日目まで3%以上と高く、25日目ではじめて2%以下となり、それに対応して、葉蛋白質密度は発芽後16日目まで上昇し、その後ゆるやかに低下し、30日目頃まで 6.5 mgN/dm^2 以上の値を示し

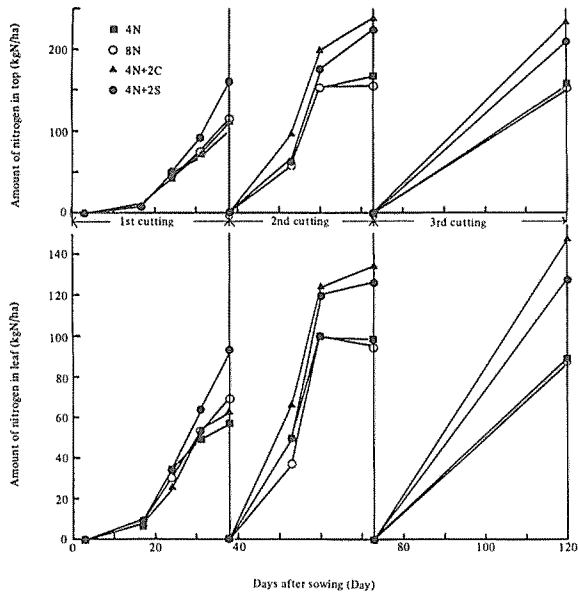


Fig. 22 Changes of the amount of nitrogen in top and leaf with growth.

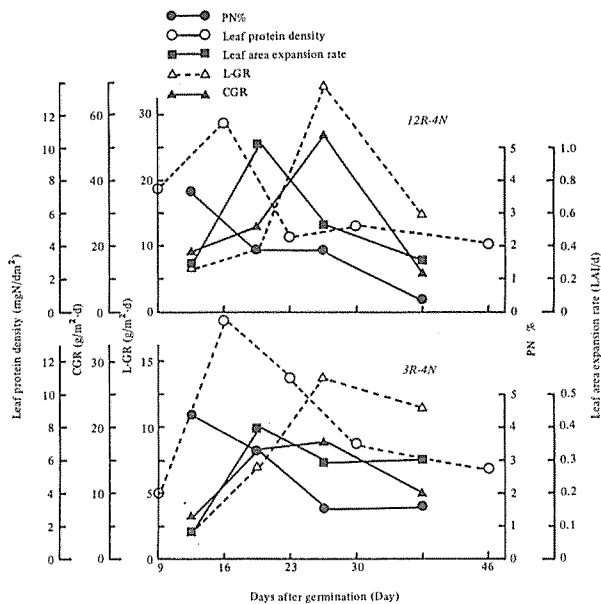


Fig. 23 Relationship among PN %, leaf protein density, leaf area expansion rate, L-GR and CGR in 12R-4N and 3R-4N plot.

た。また、LAI 増加速度は発芽後20日目まで上昇し、その後わずかに低下し一定となった。さらにL-GR と CGR は発芽後25日目まで上昇し、その後ゆるやかに低下した。

すなわち、pN%が2%以下に低下すると一週間程度のずれをおいて、葉蛋白質密度、LAI 増加速度、L-GR とCGR が順次低下する。そして、窒素供給が十分でpN%が高く維持されると、PPR が上昇するばかりでなく、葉蛋白質密度が上昇し、LAI 増加速度、L-GR、CGR が高く維持される。

一方、地上部窒素のうち、茎部では非蛋白態窒素の割合が多く、地上部の蛋白態窒素の70~80%は葉部に存在した。また茎部の蛋白態窒素含有率は生育初期で2%前後、刈取り時では0.3%程度と低く、その多くは構造的蛋白質であると考えられる。従って、光合成を司る酵素蛋白質のほとんどが葉部に存在すると考えられ、葉蛋白質生産が乾物生産の面からも重要である。

しかし、L-GRやCGRは栽植密度の高い程高いために、3R-4N区よりも栽植密度が4倍も高かった12R-4N区で著しく高かった。従って〔PPR〕は12R-4N区で最も高く、 $183\text{mgN}/\text{m}^2/\text{日}$ と3R-1N ($59\text{mgN}/\text{m}^2/\text{日}$)の3倍であり、それは主としてL-GRの低いことに起因した。その結果、刈取り時の葉蛋白質生産量は12R-4N区 ($370\text{本}/\text{m}^2$, $240\text{kgN}/\text{ha}$)で最も多く、 $84\text{kgN}/\text{ha}$ であり、乾物収量も12R-4N区で最も多く、 $12.6\text{t}/\text{ha}$ であった。しかし、刈取り時の葉蛋白質密度と葉蛋白質含有率はそれぞれ $4.2\text{mgN}/\text{dm}^2$ と0.67%であり、3R-4N区 ($90\text{本}/\text{m}^2$, $240\text{kgN}/\text{ha}$)の $5.3\text{mgN}/\text{dm}^2$, 0.74%よりも低かった。このことは、飼料としての品質の点からは3R-4N区よりも12R-4N区で低いことを示す。

以上の結果によると、ほぼ現在の慣行播種量・窒素施与量である6R-1N区 ($180\text{本}/\text{m}^2 \cdot 60\text{kgN}/\text{ha}$)よりもさらに密植・多窒素でPPRが上昇し、葉蛋白質生産量が増加し、また乾物生産量も増加した。しかし、その場合、生育中期以後のpN%が低下したことから、さらに窒素供給条件を改善することによってpN%が高まり、PPRが上昇し、葉蛋白質生産量が増加すると考えられた。

そこで実験1の結果に基づいて、密植条件下に、さらに窒素供給量を増加して、6月初めから9月末までの120日間ソルガムを栽培し、その間に3回の刈取り再生長を行わせた。

その結果、実験1の4N区よりもさらに化学肥料で基肥窒素施与量を $480\text{kgN}/\text{ha}$ と増加した場合、塩類濃度障害と思われる発芽遅延が生じ、1~3番刈りの合計地上部窒素含有量は4N区と同程度であり、乾物収量は逆に低下した。また、4N (硫酸 $240\text{kgN}/\text{ha}$)に乾燥牛糞 ($240\text{kgN}/\text{ha}$)を加えた4N+2C区でも発芽遅延が生じた。しかし、4N+2C区の2、3番刈りおよび4Nに緩効性窒素肥料 ($240\text{kgN}/\text{ha}$)を加えた4N+2S区の1~3番刈りでは4N区よりも葉蛋白質生産量、乾物生産量ともに増加した。

4N+2C区の2、3番刈り、4N+2S区の1~3番刈りにおけるこうした改善を、1番刈りの4N+2S区について解析すると、4N区では生育に伴って、pN%が低下し、〔PPR〕が $149\text{mgN}/\text{m}^2/\text{日}$ と低かったのに対して、4N+2S区では、生育に伴うpN%とL-GRの低下がほとんどなく、〔PPR〕が $249\text{mgN}/\text{m}^2/\text{日}$ と高かった。また、葉蛋白質密度は4N区では発芽後25日目以降で $6.5\text{mgN}/\text{dm}^2$ 以下となったのに対して、4N+2S区では刈取り時でも $7.0\text{mgN}/\text{dm}^2$ と高かった。その結果、4N+2S区の葉蛋白質生産量は $87\text{kgN}/\text{ha}$ 、乾物収量は $5.7\text{t}/\text{ha}$ であった。これらは4N区に対する相対値で示すと、それぞれ163%と106%であり、葉蛋白質含有率は1.53%となった。

さらに、4N+2C区の1~3番刈りの〔PPR〕の平均は $258\text{mgN}/\text{m}^2/\text{日}$ であり、3回刈りの合計葉蛋白質生産量は $310\text{kgN}/\text{ha}$ となった。その場合の乾物生産量は $29\text{t}/\text{ha}$ であり、葉蛋白質含有率も1.1%と高かった。

従って、4N ($240\text{kgN}/\text{ha}$)よりもさらに乾燥牛糞や緩効性窒素肥料で窒素を増加すると、生育中期以降の窒素供給条件が改善され、pN%や葉蛋白質密度が高く維持され、LAI 増加速度やCGRの低下が緩和され、乾物収量が増加するばかりでなく、葉蛋白質生産量が著しく増加し、葉蛋白質含有率も上昇すると考えられる。また、このように窒素供給量を増加しても窒素吸収率が80%前後と著しく高かったことは注目に値する。

次に、こうした密植・多窒素栽培した場合、再生長の不良や倒伏が生じるとの報告や青酸配糖体集積が生じるとの報告あるいは硝酸態窒素の蓄積による中毒症¹⁰¹⁾やミネラル不均衡によるグラステニーの発生を引き起し易いなどの報告^{37, 38, 109)}などがあるが、これらの問題について若干の考察を加える。

再生長については、密植すると刈株、根部の糖含有率が低下し、再生長が不良になるとの報告^{49, 71, 75)}があるが、実験1における根部の糖含有率は密植区と疎植区であまり変わらず、密植区の再生茎数は十分確保された。これは刈取り、再生長の時期が7月、8月の晴天が続き、日射量の多い時期であったことに起因するかも知れない。いずれにしても、ソルガムでは密植・多窒素による再生長の不良の問題は少ないと考える。ただし、実験2ではいわゆる密植効果によって、2番刈り、3番刈りで茎数の減少が認められる。

倒伏に関しては、特に1番草で生じ易く、2、3番草では問題ないように思われた。その要因の1つとして、2、3番草では根部がよく発達し、地上部/根部比が1番草よりも2、3番草で高かったことが考えられる。従って、この対応策の1つとして、深耕などにより1番草の根の発達を促進することが考えられる。

青酸配糖体集積に関しては、尾形らはソルガムの青酸配糖体は抽出直後から展開完了時頃までの葉で、葉中の窒素濃度が3%以上と高い場合に集積する¹⁰⁶⁾、また、青酸配糖体の集積は品種によって異なる¹⁰⁸⁾ことを認めている。また、ハイブリッドソルガムの青酸含量は生育初期には高いが、60°C通風乾燥すると半減し、サイレージではほとんど消失し⁶⁾、1mの草丈になれば有害量は含まれない⁹²⁾との報告がある。従って、ソルガムを生育中～後期に利用する場合は問題がないと考える。

硝酸態窒素集積に関しては、硝酸態窒素含有率が0.22%以上になると硝酸中毒の危険があると言われて^{172, 173)}が、実際には摂取量が問題であり、江原ら¹³¹⁾は体重1kg当りNO₃-Nとして0.081gが中毒限界値としている。また、給与青刈ソルガム中にNO₃-Nとして50gが乳牛に急性中毒をおこさせる量であるとの報告⁷⁾がある。一方、安藤らは硝酸態窒素の迅速定量法¹³⁾を開発するとともに暖地型草種の硝酸態窒素集積について検討し、硝酸集積は草種によって異なる¹⁰⁷⁾ことや光条件によっても異なること、また葉鞘茎部に集積することなどを認めている。

実験1での各区の地上部硝酸態窒素含有率は、刈取り時では0.2%以下であった。ただし、刈取り時期を早めたり、窒素施与量を増すと、3R-4N区でみられるように、0.2%以上となり得る。そうした可能性のある場合は葉での硝化還元同化を促進させる方策や土壌中での硝酸化成抑制などの検討、あるいはサイレージに調製すると、硝酸態窒素の約30%が消失するとの報告⁸⁹⁾があり、利用の方法により対応することも必要と考えられる。

さらに、高蛋白質飼料とした場合に問題となる点はサイレージにした場合の品質の問題がある。一般に高蛋白質とすると糖含有率が低下し、サイレージにする場合の発酵が不良となり品質が低下すると言われているが、本試験でのソルガムの糖含有率はいずれも12%以上と高く、サイレージに調製した場合の品質も良好であったことを安藤ら¹⁴⁾が報告した。このことは、ソルガムを密植・多窒素栽培して蛋白質含有率を高めても必ずしも糖含有率は低下しないことを意味する。

第5章 葉蛋白質生産速度のイタリアンライグラスとソルガム間の比較

第4章では暖地型草種であるソルガムを密植・多窒素条件下で栽培すると葉蛋白質生産が高まり、高い乾物生産量や蛋白質生産量を上げうることを明らかにした。

本章では、さらに高い蛋白質生産を目標とした技術を確認するために寒地型草種であるイタリアンライグラスのPPRと葉蛋白質生産性およびそれらを支配する要因をソルガムと比較して検討した。

実験1 密植・多窒素条件下におけるイタリアンライグラスの葉蛋白質生産速度

実験方法

イタリアンライグラス6品種を基肥として硫酸(180kgN/ha)、熔燐と過石(140kgP₂O₅/ha)、硫黄(200kgK₂O/ha)を均一に散布した区に栽培適期である10月2日(昭和53年)に播種(播種量40kg/ha、

畝巾30cm条播)した。1区面積は18.4m²であり、各品種4連とし、翌年5月末まで栽培した。その間刈取りは11月30日、4月3日、5月1日、5月30日に行い、各刈取り後および2月19日に硫酸(150kgN/ha)と塩加(150kgK₂O/ha)を追肥した。

発芽後原則として7日毎に葉、莖の乾物重、葉面積、葉蛋白質量などを測定した。そして、得られた結果は、ほぼ同様な栽培条件で、緩地型草種の栽培適期である6月6日に播種したソルガム(第4章、実験24N+2S区)について得られた結果と対応させて検討した。

実験結果

イタリアンライグラスの乾物収量と地上部窒素含有量の品種間差異は顕著でなかった(Fig 24)ので以下特にワセヒカリとエースについて論議する。

乾物収量はワセヒカリとエースでそれぞれ、

4.2 t/ha ([CGR]=7.9 g/m²/日), 3.7 t/ha ([CGR]=7.0 g/m²/日)で、ソルガムの5.7 t/ha ([CGR]=16.3 g/m²/日)に比べ著しく低かった(Fig 24)。また、地上部窒素含有量はワセヒカリで120 kgN/ha、エースで123 kgN/haであり、ソルガム(155 kgN/ha)に比べわずかに低かった。

葉蛋白質量は生育に伴って、ワセヒカリ、エースともに発芽後47日目まで増加し、その後一定となり、刈取り時(発芽後53日目)ではそれぞれ87 kgN/ha、93 kgN/haであり、ソルガム(87 kgN/ha)と同程度であった(Fig 25)。

[PPR]はワセヒカリ、エースでそれぞれ164、175 mgN/m²/日であり、PPRは生育に伴って、ワセヒカリでは発芽後28日目まで上昇し、その後低下し、エースでは発芽後35日目まで上昇し、その後低下し、最大値はワセヒカリで360 mgN/m²/日、エースで410 mgN/m²/日でソルガム(425 mgN/m²/日)と同程度であった。

L-GRは生育に伴って、ワセヒカリでは発芽後35日目まで上昇し、その後ゆるやかに低下し、エースでは発芽後35日目まで上昇し、43日目までほぼ一定で、その後低下し、最大値はワセヒカリで9.0 g/m²/日、エースで10.5 g/m²/日でソルガム(14.0 g/m²/日)よりも低く、また、[L-GR]もワセヒカリで5.5、エースで5.2 g/m²/日でソルガム7.6 g/m²/日よりも低かった。

PN%は生育に伴って、ワセヒカリでは発芽後28日目まで、エースでは発芽後35日目まで一定で、その後低下した。そして発芽後28日目までのPN%はワセヒカリで4.5%、エースで4.1%であり、ソルガム(3.1%)よりも1%以上高かった。

葉蛋白質密度は生育に伴って、両品種ともほとんど変動せず、刈取り時(発芽後53日目)においてもワセヒカリで9.0 mgN/dm²、エースで11.0 mgN/dm²、

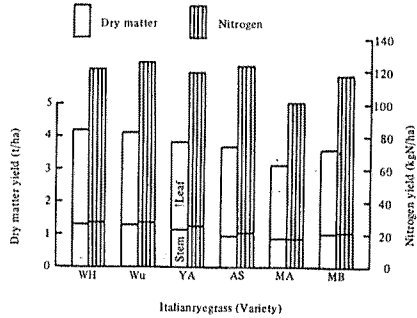


Fig. 24 Varietal differences of Italianryegrass in dry matter and nitrogen yield.

WH: Washikari AS: Ace
WU: Waseyutaka MA: Mammoth Italian A
YA: Yamaaoba MB: Mammoth Italian B

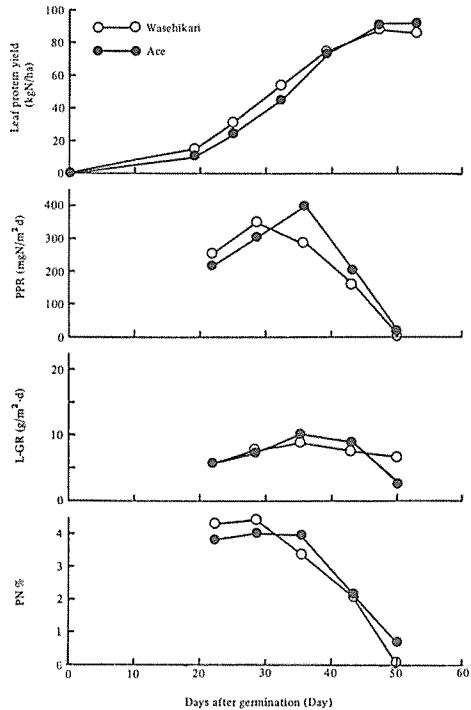


Fig. 25 Changes of leaf protein yield, protein production rate (PPR), L-GR and PN% during the growth period.

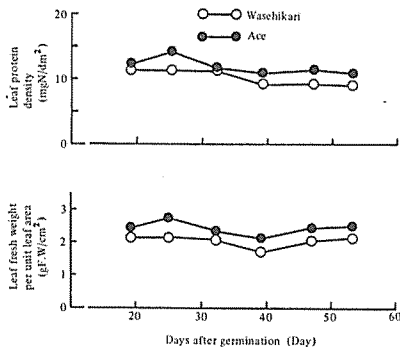


Fig. 26 Changes of leaf protein density and leaf fresh weight per unit leaf area of Italianryegrass during the growth period.

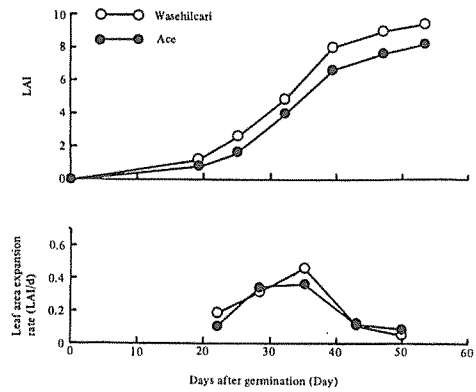


Fig. 27 Changes of leaf area index (LAI) and leaf area expansion rate of Italianryegrass during the growth period.

とソルガム (7.0mgN/dm²) よりも高かった (Fig 26)。また葉の厚さ (単位葉面積当り葉新鮮重) は、葉蛋白質密度とほぼ同様な傾向を示した。

LAIの最大値はワセヒカリで9.5, エースで8.4とソルガム (12.4) よりも低かった (Fig 27)。また, LAI増加速度は生育に伴って, 両品種とも発芽後35日目まで上昇し, その後低下し, 最大値はワセヒカリで0.48/日, エースで0.37/日でソルガム (0.94/日) の2分の1程度であった。

CGRは生育に伴って, 両品種とも発芽後43日目まで上昇し, その後低下し, 最大値は両品種ともに13.5g/m²/日でソルガム (41.5g/m²/日) の3分の1程度であった (Fig 28)。一方, 葉/茎比は生育に伴って, 両品種ともゆるやかに低下し, 刈取り時においてもワセヒカリで2.3, エースで2.9であり, ソルガム (0.9) の2倍以上と高かった。

1年の全栽培期間 (イタリアンライグラスでは10月初~5月末, ソルガムでは6月初~9月末) を通じて, イタリアンライグラスの最大LAI, LAI増加速度および最大CGRをソルガムと比較すると, イタリアンライグラスの最大LAIは13.1でソルガム (14.4) よりもわずかに低く, LAI増加速度は0.53/日でソルガム (1.24/日) の2分の1以下であり (Fig 29), CGRの最大値は27.5g/m²/日でソルガム (56g/m²/日) の2分の1と低かった (Fig 30)。

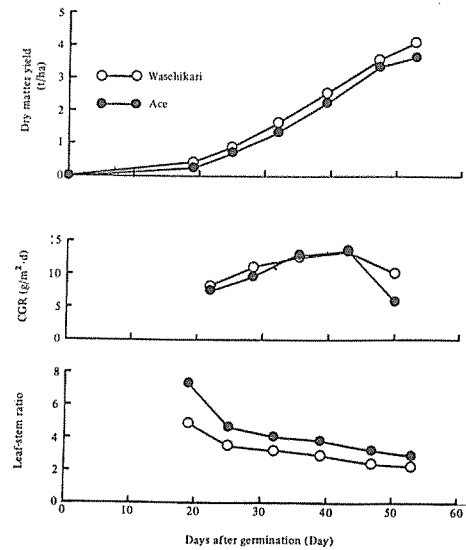


Fig. 28 Changes of dry matter yield, crop growth rate (CGR) and leaf-stem ratio of Italianryegrass during the growth period.

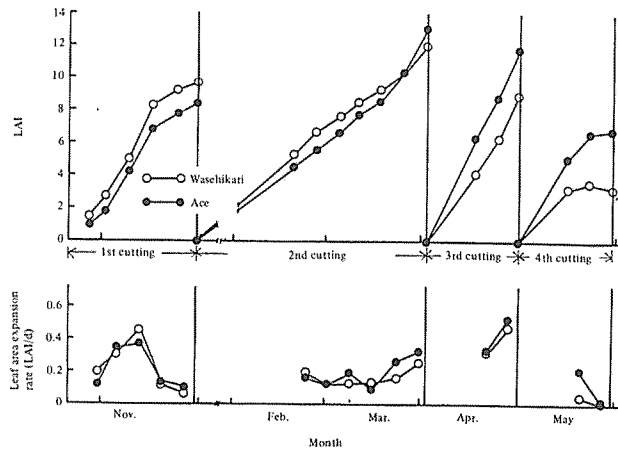


Fig. 29 Changes of leaf area index (LAI) and leaf area expansion rate of Italianryegrass throughout a growing season.

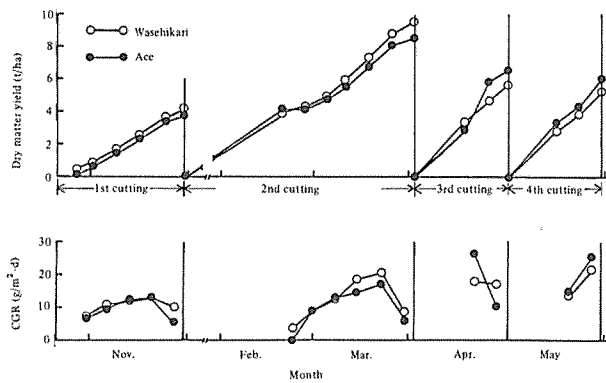


Fig. 30 Changes of dry matter production and crop growth rate (CGR) of Italianryegrass throughout a growing season.

実験2 イタリアンライグラスの葉蛋白質生産速度に及ぼす培地窒素濃度の影響

実験方法

イタリアンライグラス（ワセヒカリ）の幼植物を昭和54年10月に66ℓ容培養液槽に25個体ずつ移植し、基本培養液で10日間生育させた。その後24時間窒素欠除栽培し、 NaNO_3 または $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を用いて、0, 10, 50, 200 ppmNの処理を行った。培養液は処理後5日目に交換し、1日2回pHを5.5に調節した。各区とも処理後0, 9日目に10個体ずつ採取し、葉、茎、根の乾物重、葉蛋白質量を測定した。そして、得られた結果は6月に行ったソルガム（第3章、実験1）で得られた結果と対比させて検討した。

実験結果

PPRは培地窒素濃度の上昇に伴って、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区では50 ppmN区まで顕著に上昇し、それ以上の濃度で一定となり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区では50 ppmN区まで上昇し、それ以上でわずかに低下し、最大値は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区で $0.87\text{mgN}/\text{個}/\text{日}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区で $0.70\text{mgN}/\text{個}/\text{日}$ でソルガム（ $1.23\text{mgN}/\text{個}/\text{日}$ ）よりも低かった（Fig 31）。L-CGRは培地窒素濃度の上昇に伴って、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区とも50 ppmN区まで上昇し、それ以上ではやや低下し、最大値は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区で $13.0\text{mg}/\text{個}/\text{日}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区で $15.0\text{mg}/\text{個}/\text{日}$ で、ソルガム

(34.5 mg/個/日) の2分の1以下であった。一方、PN%は培地窒素濃度の上昇に伴って、NO₃-N区、NH₄-N区とも50 ppmN区まで上昇し、最大値はNO₃-N区で5.6%、NH₄-N区で5.9%とソルガム(3.5%)よりも高かった。

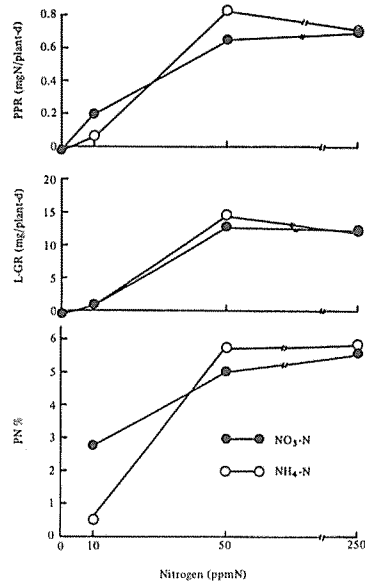
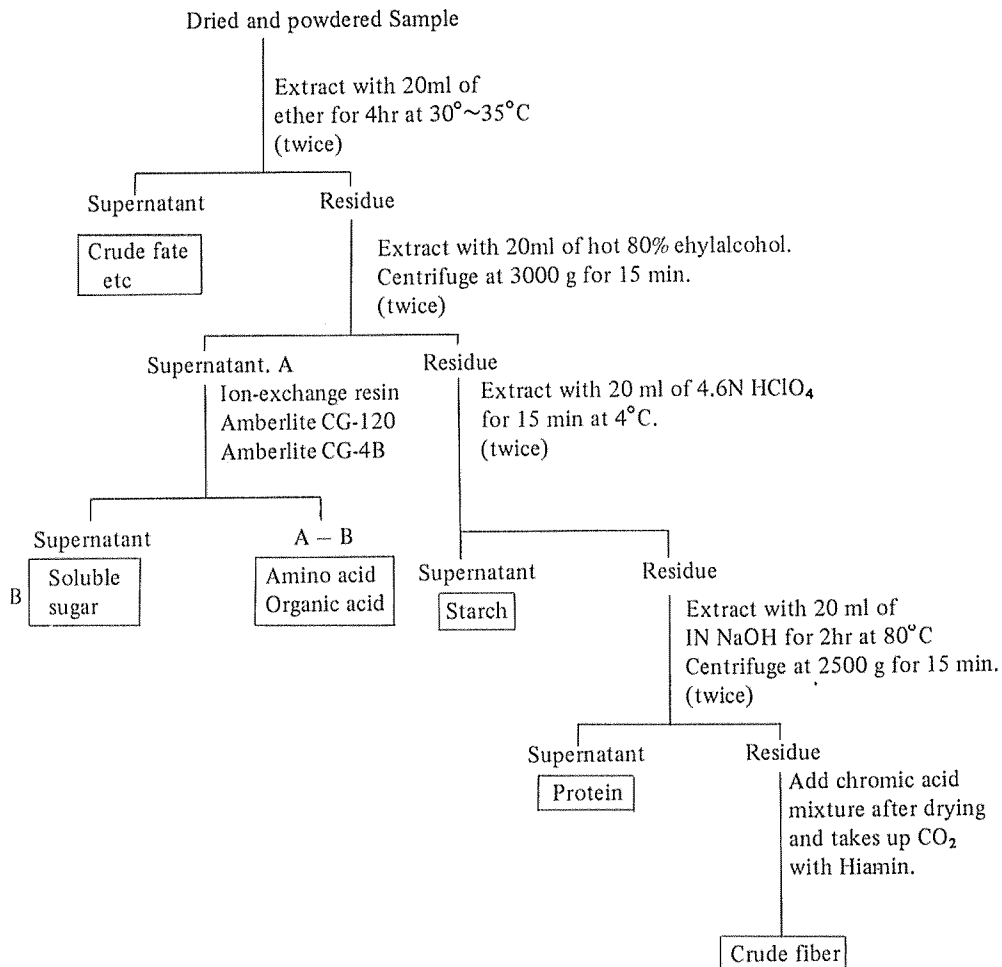


Fig. 31 Effect of nitrogen concentration of nutrient solution on protein production rate (PPR), L-GR and PN% of Italianryegrass.

実験3 イタリアンライグラスとソルガムの葉蛋白質生産速度に及ぼす日射量の影響

実験方法

イタリアンライグラスとソルガムの幼植物を17ℓ容培養液槽に20個体ずつ移植し、基本培養液でイタリアンライグラスでは12日間、ソルガムでは7日間生育させた。その後24時間窒素欠除栽培し、10.2atom%のNa¹⁵NO₃を50 ppmNで供給し、第3章の実験3と同様の方法で1日当りの日射量を5段階に変えた。処理はイタリアンライグラスでは昭和53年10月26日、ソルガムでは昭和53年8月14日と10月2日の2回行った。イタリアンライグラスの日射量および処理区は第3章の実験4の10月区と同様とした。各区とも2連で、培養液のpHは1日2回5.5に調節した。そして処理後0, 3日目に10個体ずつ採取し、葉、茎、根の乾物重、葉面積、葉蛋白質画分量、光合成能、呼吸能などを測定した。また処理後4日目に¹⁴Cを各区とも25 μCiを自然光の下で10分間取り込ませ、その直後に採取し、Fig 32に示す各画分への¹⁴Cの分配割合を測定した。なお、¹⁴Cの測定は液体シンチレーションカウンターによった。

Fig. 32 Procedure for fractionation of ^{14}C -labeled constituents.

実験結果

イタリアンライグラスの PPR は日射量の増加に伴って上昇したが、その絶対値、増加割合ともにソルガム（8月区）よりも小さかった（Fig 33）。L-GR は PPR とほぼ同様な傾向を示したのに対して、PN% は日射量の増加に対して明瞭な傾向を示さず、最大値はソルガムでは10月区では3.2%、8月区では4.9%であり、イタリアンライグラスでは5.9%であった。

葉面積拡大速度は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスとソルガム（10月区）ではわずかに上昇し、ソルガム（8月区）では4区まで上昇し、最大値はイタリアンライグラス、ソルガム（10月区）、ソルガム（8月区）でそれぞれ6、10、 $45\text{cm}^2/\text{個}/\text{日}$ であった（Fig 34）。

葉蛋白質密度は両草種とも日射量の増加に対してほとんど変動せず、ソルガムでは季節によっても変動しなかった。そして、その最大値はソルガムよりもイタリアンライグラスで約2倍と高かった。また、葉の厚さは葉蛋白質密度と同様の傾向を示した。

窒素吸収能（単位根重当りの窒素吸収量）は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスとソルガム（10月区）では上昇し、ソルガム（8月区）では4区まで上昇し、最大値はイタリアンライグラス、ソルガム（10月区）、ソルガム（8月区）でそれぞれ、51.5、26.5、 $37.5\text{mgN}/\text{g}/\text{日}$ であった（Fig 35）。

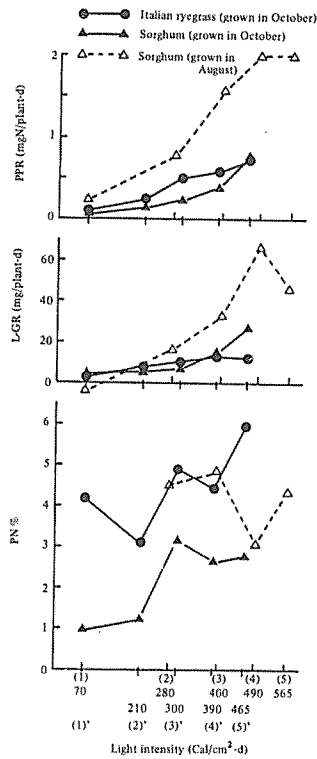


Fig. 33. Effects of light intensity on protein production rate (PPR) of Italianryegrass and sorghum.

光合成能は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスではほとんど変動せず、ソルガムでは上昇し、最大値はソルガムよりもイタリアンライグラスで約2分の1程度と低かった。それに対して、地上部呼吸能は日射量の増加に伴って、両草種ともわずかに上昇する傾向を示し、草種間差異、季節による差異は明瞭でなかった。また、根部呼吸能は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスでは上昇し、ソルガムでは両季節区ともほとんど変動せず、最大値はソルガムよりもイタリアンライグラスで約2

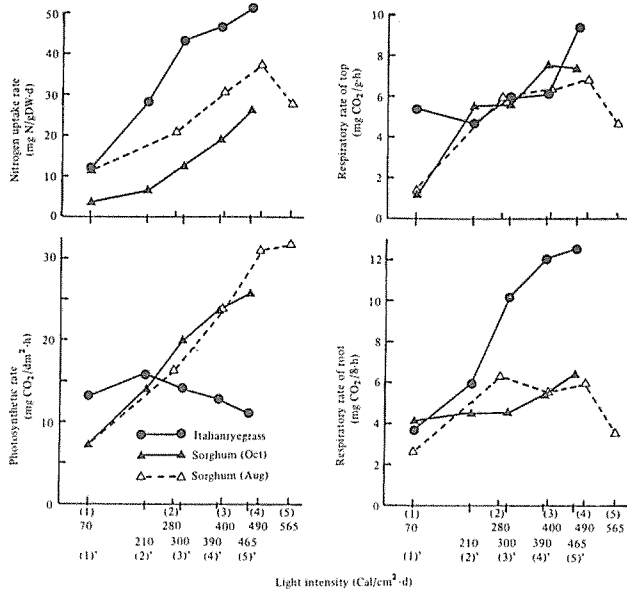


Fig. 35 Nitrogen uptake rate, photosynthetic rate and respiratory rate of Italianryegrass and sorghum.

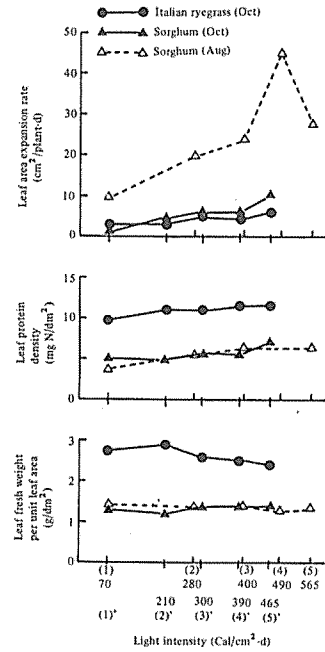


Fig. 34. Leaf area expansion rate, leaf protein density and leaf fresh weight per unit leaf area of Italianryegrass and sorghum.

倍と大きかった。

次に、取り込んだ窒素の各部位および各葉蛋白質画分への分配割合は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスでは葉、茎、根部への分配割合は変動せず、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合はわずかに上昇したのに対してソルガムでは10月区、8月区ともに根部への分配割合は低下したが、葉部への分配割合は上昇し、さらにクロロプラスト態蛋白質への分配割合が上昇した (Fig 36)。そして、

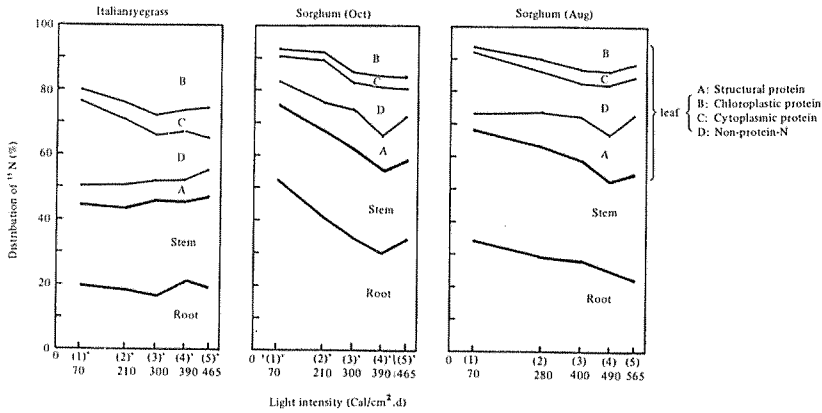


Fig. 36 Distribution of the ¹⁵N absorbed in Italianryegrass and sorghum.

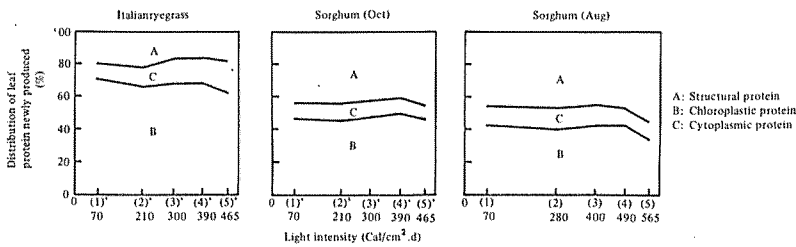


Fig. 37 Distribution of the leaf protein which was newly produced in Italianryegrass and sorghum.

イタリアンライグラスではソルガムよりも葉部への分配割合およびクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合が高かった。

増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合は日射量の増加に伴って、両草種とも変動せず、またソルガムでは季節によっても変動せず、ソルガムよりもイタリアンライグラスで明らかに高かった (Fig 37)。

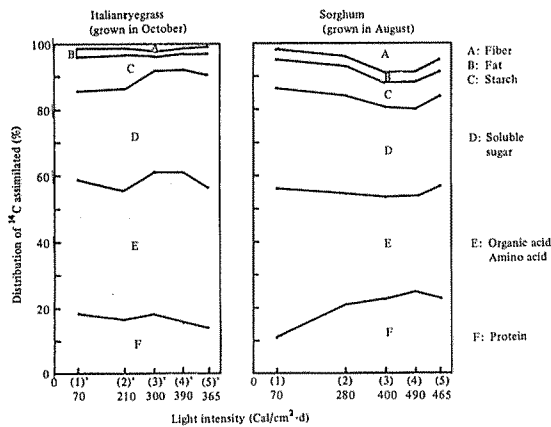


Fig. 38 Distribution of the ¹⁴C assimilated by Italianryegrass and sorghum.

一方、取り込んだ¹⁴Cの各成分への初期分配割合はイタリアンライグラスではソルガムよりも繊維質と蛋白質画分への分配割合が低かった (Fig 38)。そして、蛋白質画分への分配割合は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスでは変動せずソルガムでは上昇した。

窒素吸収呼吸効率は日射量の増加に伴って、イタリアンライグラスでは変動せず、ソルガムでは10月区、8月区ともに上昇し、10月区よりも8月区が高かった (Fig 39)。また、両草種間の差異は明瞭ではなかった。それに対して、葉蛋白質生産呼吸効率は日射量の増加に伴って、両草種とも上昇する傾向を示し、ソルガムよりもイタリアンライグラスでやや高かった。

考 察

イタリアンライグラスはソルガムに比較して一般に蛋白質含有率が高く飼料としての品質が良いとされている。このイタリアンライグラスのPPRとそれを支配する要因についてソルガムと対比させて比較検討した。

なお、実験3の日射量と各項目との関係において、ソルガムの10月区と8月区の差異は主として気温によるものと考え、以下論議する。

圃場条件でイタリアンライグラスの6品種を密植・多窒素栽培すると、葉蛋白質生産量とPPRの最大値はイタリアンライグラスの品種間では差異がなく、イタリアンライグラスはソルガムと同程度に達することが明らかになった。しかしながら、その内容は両草種で異なり、イタリアンライグラスでは密植であったにもかかわらず、L-GR、LAI増加速度およびCGRがソルガムの2分の1程度と低く、pN%や葉/茎比が高い。

しかし、L-GR、CGRは温度、光条件によって変動することから、草種としての特徴が否かを単純に比較することはできない。特に、生育適温はイタリアンライグラスでは20℃前後、ソルガムでは30℃前後と両草種で大きく異なるので両草種の比較は各々の生育適温下で同じ日射量の下で行うことが望まれる。そこで試験地(福山)の年間の日射量と平均気温についてみると、4~8月の全日射量は350~410 cal/cm²/日と比較的高い値で一定している (Fig 40)。また、平均気温は4~5月では15~20℃であり、7~8月では25℃以上となり、4~5月はイタリアンライグラス、7~8月はソルガムの生育適温域であった。従って、前記条件を満足する

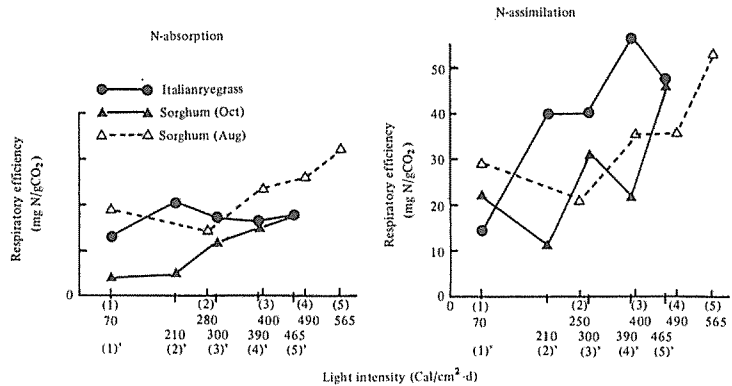


Fig. 39 Respiratory efficiency of N absorption and assimilation in Italianryegrass and sorghum.

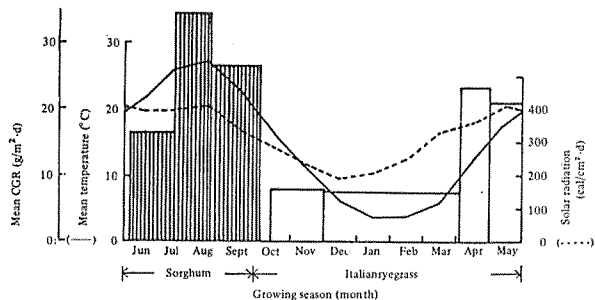


Fig. 40 Temperature and solar radiation during a growing season and dry matter yield (mean CGR x growth period) at each harvest of Italianryegrass and sorghum.

これらの時期に両草種のL-GR, CGRを比較することによって、草種としての特徴を把握できるものとする。また、両草種の全栽培可能期間中の〔CGR〕の最大値はイタリアンライグラスでは4月、ソルガムでは7月に得られた。

そこで、それらの時期の両草種の〔L-GR〕と〔CGR〕の最大値についてみると、イタリアンライグラスでは $11.3 \text{ g/m}^2/\text{日}$ と $23.3 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であり、ソルガムでは $12.9 \text{ g/m}^2/\text{日}$ と $34.3 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であった。さらに、最大CGRと最大LAI増加速度はそれぞれ、イタリアンライグラスでは $27.5 \text{ g/m}^2/\text{日}$ 、 $0.53/\text{日}$ であり、ソルガムでは $56.0 \text{ g/m}^2/\text{日}$ 、 $1.24/\text{日}$ であった。従って、最適期におけるCGRやLAI増加速度はソルガムよりもイタリアンライグラスで2分の1程度と低い。このことは草種の有する特徴と言える。これらの差異は主として C_3 、 C_4 植物の光合成能の差異によるものと思われる。村田⁹⁹⁾は数多くの C_3 、 C_4 植物を比較して、 C_3 植物よりも C_4 植物でCGRが高く、それらは主に光合成能の差異によるものと報告している。

全栽培期間のLAIの最大値はイタリアンライグラスでは13.1であり、ソルガムでは18.2であり、ソルガムが高い。しかし、刈取り時の葉蛋白質密度はイタリアンライグラスでは 11.0 mgN/dm^2 であり、ソルガム(7.4 mgN/dm^2)よりも高かった。

さらに、イタリアンライグラスのPPR(L-GR, PN%)を支配する形態的、生理的要因をソルガムと比較してみると、イタリアンライグラスはソルガムよりも(1)葉面積拡大速度は2分の1以下と低いが、葉/莖比、葉蛋白質密度および葉の厚さは2倍以上と高い、(2)光合成能や窒素吸収呼吸効率は低いが、窒素吸収能や葉蛋白質生産呼吸効率は高い、(3)取り込んだ窒素の葉部への分配割合や増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質への分配割合が高い、などの特徴を示した。

そして、これら要因のうち、葉/莖比や葉蛋白質密度はイタリアンライグラスの品種間でも差異が認められたことから、ソルガムでも同様の事が期待できる。また、葉蛋白質密度と葉の厚さとは密接に関連した。そして葉の厚いイタリアンライグラスでもLAIの最大値は13.1と比較的高かったことから、葉の厚い程葉蛋白質生産に有利と考える。

一方、イタリアンライグラスのもう1つの生理的特徴はソルガムと比較して光に対する反応が異なることである。すなわち、日射量が減少すると、ソルガムではPPR、取り込み窒素の葉部やクロロプラスト態蛋白質画分への分配割合および取り込み ^{14}C の葉蛋白質画分への初期分配割合がソルガムよりもイタリアンライグラスで低いことである。

こうしたイタリアンライグラスとソルガムにおける生理的、形態的差異は寒地型草種と暖地型草種の基本的な差異によるものか否か、そして、イタリアンライグラスのもつ特徴が他の暖地型草種において認められるか否かの検討が必要である。

第6章 葉蛋白質生産速度の暖地型草種間の比較

第5章において、イタリアンライグラスはソルガムよりもL-GRは低いがPN%が高い、さらに(1)葉/莖比が高く、葉が厚く葉蛋白質密度も高い、(2)窒素吸収能が高く、しかも取り込んだ窒素の葉部への分配割合や増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合が高い、(3)葉蛋白質生産呼吸効率が低い、などの特徴が認められた。

本章では、数種暖地型草種の単位土地面積当りの蛋白質生産速度やLAI増加速度に及ぼす栽植密度と窒素施与量の影響を検討し、さらに個体を対象として、数種暖地型草種のPPRを比較検討し、各々の草種のPPRを高めるために必要な条件を明らかにするとともに、前記イタリアンライグラスに認められた各種形態的、生理的特徴について暖地型草種間で比較検討した。

実験1 栽植密度と窒素施与量の影響

実験方法

広島大学実験圃場に栽植密度3段階、窒素施与量を4段階に変えた試験区を設定した。供試草種はソルガム、シコクビエ、ローズグラスで播種量は通常の播種量の2倍、4倍となるよう、ソルガムでは30, 60,

120kg/ha, シコクビエでは20, 40, 80kg/ha, ローズグラスでは15, 30, 60kg/ha とし, それぞれL, M, H区とした。そして各々の区に4段階の窒素を施与した。すなわち, 熔燐と過石 (90kgP₂O₅/ha), 硫加 (150kgK₂O/ha) を均一に散布し, 硫安の施与を0, 50, 100, 200kgN/haとし, それぞれ0N, 1N, 2N, 4N区とした。各区は窒素施与量と栽植密度の組合せで, 例えば200kgN/haの密植区は4N-H区と呼ぶことにした。1区の大きさは6㎡とし, 昭和51年7月1日に散播し, 発芽後, 7日毎に地上部の乾物重, 葉面積, 全窒素, 蛋白態窒素などを測定した。

実験結果

各草種の発芽定着数は, ソルガムではL, M, H区でそれぞれ55, 110, 225個体/㎡であり, シコクビエでは700, 1700, 2650個体/㎡であり, ローズグラスでは1150, 3400, 5500個体/㎡であった。

発芽後21日目の地上部乾物重と地上部窒素含有量はともに, 各草種とも窒素施与量の多い程多く, 最大値はソルガムでは4N-H区, シコクビエでは4N-L区, ローズグラスでは4N-M区で認められ, ソルガムやローズグラスよりもシコクビエで大きかった (Fig 41)。一方, LAIは各草種とも密植・多窒素区程高く, 最大値はソルガム, ローズグラスよりもシコクビエで高かった。従って, 発芽後21日目までのLAI増加速度はシコクビエではソルガムやローズグラスの2倍以上と高かった (Fig 42)。

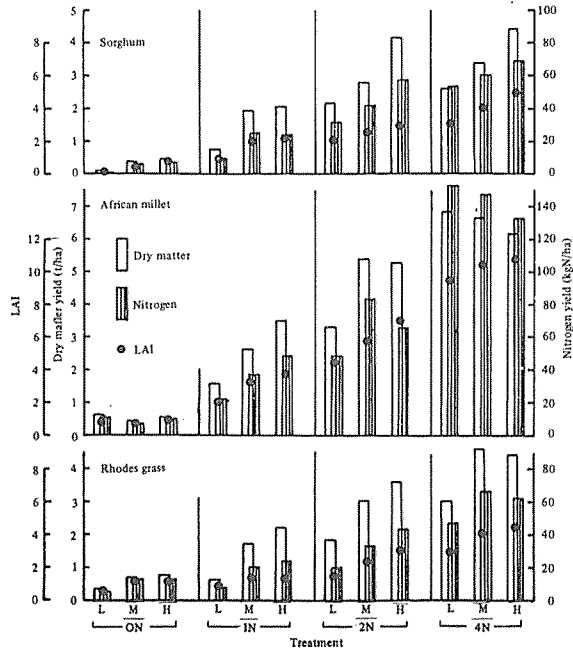


Fig. 41 Effects of plant density and nitrogen application rate on the dry matter yield, nitrogen yield and leaf area index (LAI) on 21 days after germination.

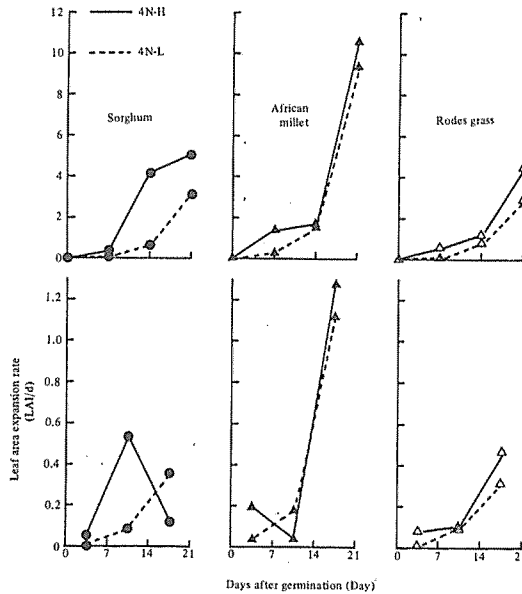


Fig. 42 Changes of leaf area index (LAI) and leaf area expansion rate of sorghum, African millet and Rhodes grass.

各草種の蛋白質生産量を4N-L区、4N-H区で比較すると、蛋白質生産量は生育に伴って増加し、発芽後21日目では、ソルガムやローズグラスよりもシコクビエで高く、ソルガムとローズグラスでは疎植区よりも密植区で高かったが、シコクビエでは逆に疎植区で高かった (Fig 43)。

蛋白質生産速度は生育に伴って、ソルガムとシコクビエの疎植区では上昇したが、各草種の密植区とローズグラスの疎植区では発芽後14日目まで上昇し、その後低下し、最大値はソルガム、ローズグラスよりもシコクビエで高かった。そして、CGRとpN%に解析すると、CGRは生育に伴って、各草種の疎植区とソルガムの密植区では上昇し、シコクビエとローズグラスの密植区では発芽後14日目まで上昇し、その後一定、あるいはやや低下し、最大値はソルガム、ローズグラスよりもシコクビエで大きく、 $67 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であった。また、疎植区に対する密植区の割合は各草種とも発芽後14日目まで140%以上と高いが、発芽後21日目では草種により異なり、ソルガムでは130%と高く、ローズグラスでは96%、シコクビエでは62%と低かった。一方、pN%は各草種とも生育に伴って低下し、発芽後7日目以降ではソルガム>シコクビエ>ローズグラスの順に高く、発芽後21日目では各草種の密植区とローズグラスの疎植区すなわち、蛋白質生産速度が低下した区で著しく低かった。従って、各草種の密植区での蛋白質生産速度の低下は主としてpN%の低下に起因した。

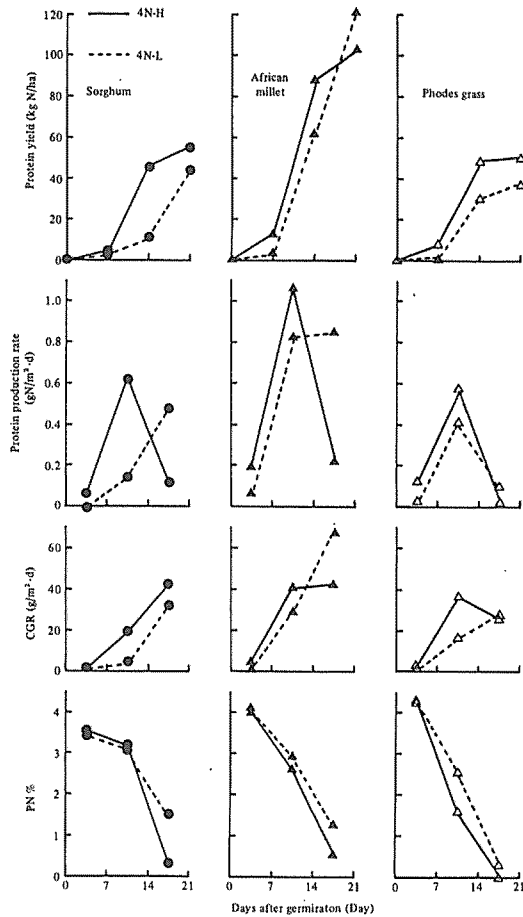


Fig. 43 Effects of plant density on protein yield and production rate in sorghum, African millet and Rhodes grass.

実験2 数種暖地型草種の葉蛋白質生産速度に及ぼす培地窒素濃度と日射量の影響

実験方法

シコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスの幼植物を17ℓ容水耕培養液槽に25個体ずつ移植し、基本培養した後、 NaNO_3 を用いてシコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスを各々昭和53年7月19日、7月18日、7月20日(発芽後、各々15、20、18日目)に0、2、10、50、250 ppmNの処理を行った。処理は各々2連とした。培養液は処理後4日目に交換し、1日2回pHを5.5に調節した。各区とも処理後0、3、7日目に10個体ずつ採取し、葉、茎、根部乾物重、葉面積、葉蛋白質含量、光合成能〔同化箱上部50K Lux ($590 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$)、葉温 30°C 〕、呼吸能などを測定した。なお処理後7日目で処理間差が顕著となったので7日目の結果について述べる。なお、昭和53年6月17日(発芽後15日目)にソルガムについて行った同様の実験(第3章、実験1)の結果を同時に示した。

また、以上の実験とは別に、シコクビエ、ローズグラスの幼植物を17ℓ容培養液槽に20個体ずつ移植し、

基本培養した後、昭和54年7月23日にシコクビエ、8月9日にローズグラス（各々発芽後15、16日目）を24時間窒素欠除栽培し、10.2 atom%の $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ を50 ppmN供給し、第3章の実験3と同様の方法で1日当りの日射量を5段階に変え、処理開始後0、3日目に10個体ずつ採取し、前記同様の調査を行った。なお、昭和53年8月10日（発芽後15日目）にソルガムについて行った同様な実験（第3章、実験3）の結果を同時に示した。また、各区の1日当りの日射量は第3章実験3の場合とほぼ同様と推定した。

実験結果

培地窒素濃度の上昇に伴って、PPRはソルガム、シコクビエ、ローズグラスでは50 ppmN区まで上昇し、上昇率はシコクビエで特に顕著であり、オオクサキビでは250 ppmN区まで顕著に上昇し、最大値はオオクサキビ>シコクビ

エ>ローズグラス>ソルガムの順であった（Fig 44）。そして、L-GRは50 ppmN区までシコクビエ、ローズグラス、オオクサキビでは顕著にソルガムではゆるやかに上昇し、50~250 ppmN区ではオオクサキビで上昇し、それ以外の草種で一定となった。それに対してpN%は、各草種とも50 ppmN区まで上昇し、50~250 ppmN区間で一定となり、最大値はオオクサキビ、ソルガム、シコクビエ>ローズグラスの順であった。そしてローズグラスでは2.5%、その他の草種では3.0%以上のpN%の時に高いPPRを示した。

また、日射量の増加に伴って、PPRはソルガムでは(4)区まで上昇し、それ以上で一定となり、シコクビエとローズグラスでは(3)区まで上昇し、最大値はシコクビエ>ソルガム>ローズ

グラスの順であった（Fig44）。L-GRは各草種ともPPRとほぼ同様の傾向を示したのに対して、pN%はシコクビエでは(3)区まで上昇し、それ以上で一定となり、ソルガム、ローズグラスでは一定した傾向を示さず、最大値はソルガム>シコクビエ>ローズグラスの順であった。

従って、窒素供給が不足すると各草種ともPPRが低下し、低下割合はシコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスで顕著であり、その主たる要因はソルガムではpN%の低下、オオクサキビ、シコクビエ、ローズグラスではL-GRとpN%の両者の低下に起因した。また、日射量が不足すると、PPRはソルガム、シコクビエ、ローズグラスで低下し、特にローズグラスの低下は顕著であり、その主たる要因は、ソルガム、シコクビエではL-GRの低下、ローズグラスではL-GRとpN%の低下であった。さらに、

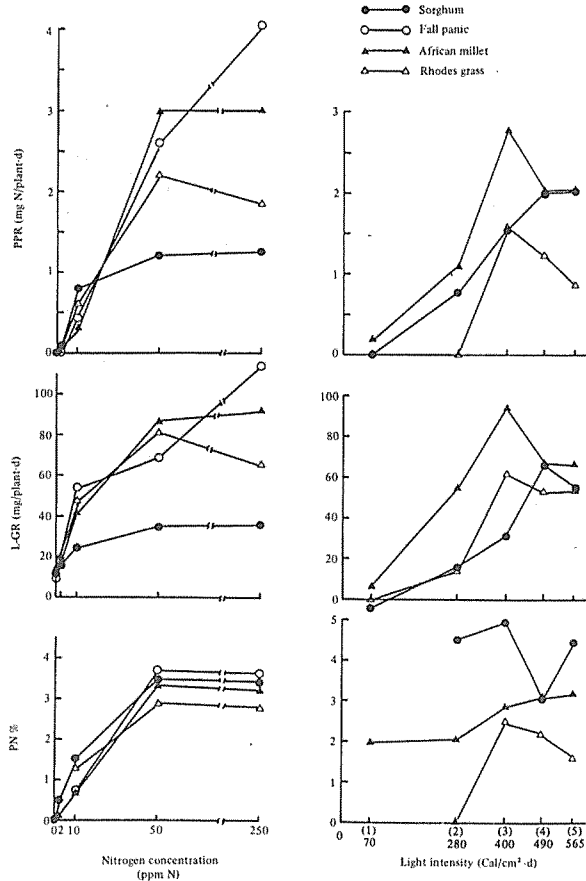


Fig. 44 Effects of N concentration of nutrient solution and light intensity on protein production rate (PPR) in four warm season grasses.

両処理で得られた PPR の最大値を比較すると、オオクサキビとシコクビエはソルガムよりも高い PPR を示し、それは主として、L-GR が各々ソルガムの 2.0 倍、1.5 倍と高いことに起因し、pN% はソルガムよりも低かった。ローズグラスはソルガムよりも pN% が低い、L-GR が高いためソルガムと同程度の PPR を示した。

また、高い PPR を維持するのに必要な pN% は、ローズグラスでは 2.5%、その他の草種では 3.0% であった。

葉面積拡大速度は培地窒素濃度の低い場合は各草種とも低く、培地窒素濃度の上昇に伴って、オオクサキビ、シコクビエ、ローズグラスでは顕著にソルガムではゆるやかに上昇した (Fig 45)。また、日射量の増加に伴って、ソルガムでは(4)区、シコクビエでは(3)区まで上昇し、ローズグラスでは(2)区まで 0 と低く、(2)~(3)区で顕著に上昇

した。そして最大値はソルガム、オオクサキビ>シコクビエ>ローズグラスの順で各々46, 43, 37, 31cm²/個/日であった。従って、葉面積拡大速度はソルガム、シコクビエ、オオクサキビで高く、窒素供給が不足すると、シコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスで、日射量が不足するとシコクビエ、ローズグラスで特に低下した。

葉蛋白質密度は培地窒素濃度の低い場合、オオクサキビ、シコクビエ、ローズグラスでは 3mgN/dm²前後と低く、培地窒素濃度の上昇に伴って、各草種とも増大し、その割合はオオクサキビとシコクビエで顕著であった。また、日射量の増加に伴って、ソルガムでは増大し、シコクビエとロー

ズグラスでは一定した傾向を示さなかった。そして最大値はシコクビエ>オオクサキビ、ローズグラス>ソルガムの順で各々 10.1, 9.1, 8.5, 7.8mgN/dm²であった。

また、葉の厚さは培地窒素濃度や日射量の増加によって、各草種ともほとんど変動せず、最大値はシコクビエ>オオクサキビ、ローズグラス>ソルガムの順で各々 2.2, 2.0, 1.8, 1.4g F.W./dm²であった。

窒素吸収能は低窒素濃度区では各草種とも 10mgN/g 以下と低く、培地窒素濃度の上昇に伴って、各草種とも上昇した (Fig 46)。また、日射量の増加に伴って、ソルガムでは(4)区まで、シコクビエとローズグラスでは(3)区まで上昇し、それ以上で一定となり、最大値はソルガム、シコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスで各々 37.5, 56.0, 52.5, 62.5mgN/g であった。

取り込んだ窒素の各部位や葉蛋白質画分への分配割合をみると、葉部への分配割合は日射量の増加に伴って、ソルガムでは(4)区、シコクビエでは(3)区、ローズグラスでは(2)区まで上昇し、それ以上で一定とな

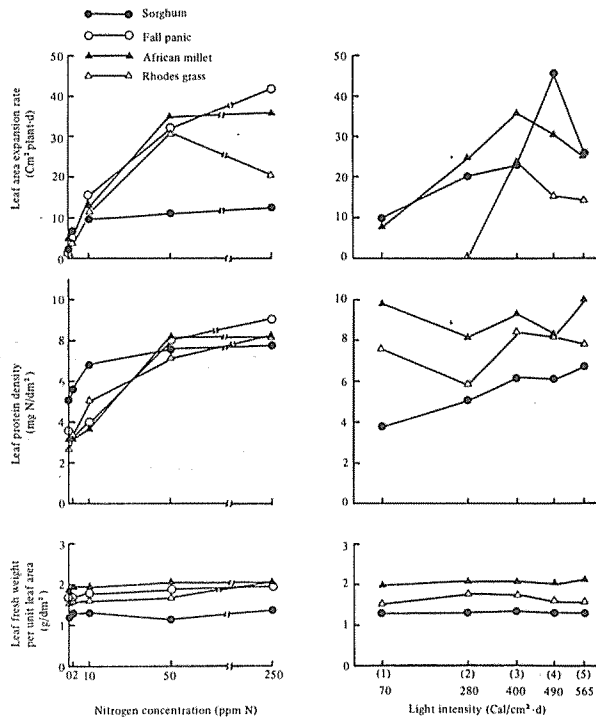


Fig. 45 Effects of N concentration of nutrient solution and light intensity on leaf area expansion rate, leaf protein density and leaf fresh weight per unit leaf area of four warm season grasses.

り、最大値はソルガムよりもシコクビエやローズグラスで高かった (Fig 47)。また、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合は日射量の増加に伴ってソルガムでは(5)区、シコクビエでは(3)区まで上昇し、ローズグラスでは一定した傾向を示さず、最大値はソルガムやローズグラスよりもシコクビエで高かった。さらに、ローズグラスでは特に非蛋白態窒素の割合が高かった。

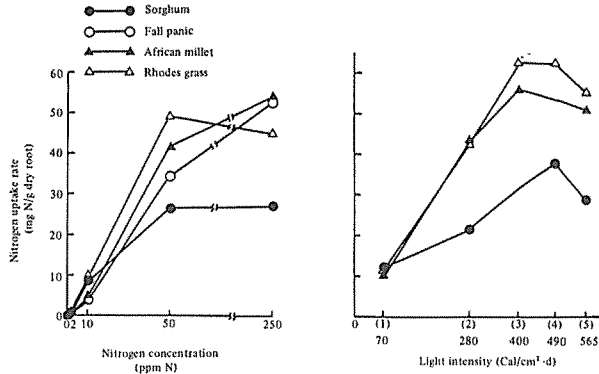


Fig. 46 Effects of N concentration of nutrient solution and light intensity on nitrogen uptake rate by four warm season grasses.

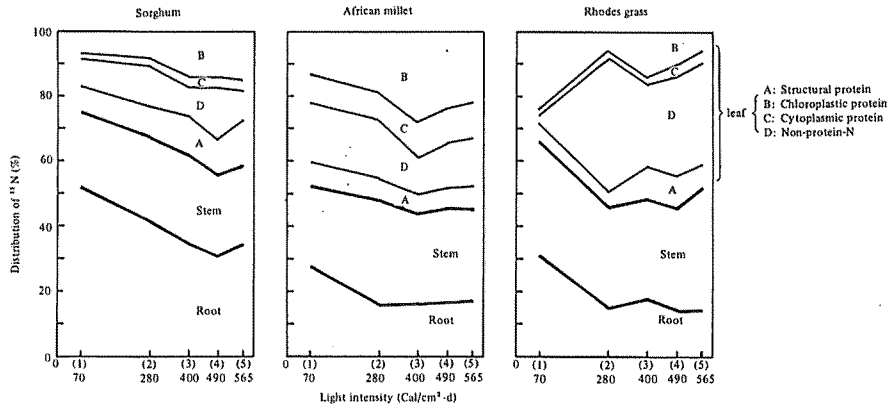


Fig. 47 Distribution of the ¹⁵N absorbed by some warm season grasses.

増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合は各草種とも培地窒素濃度の低い 0, 2 ppmN 区では 0% であり, 10 ppmN 以上の区で 60% 以上で一定となり, シコクビエ, オオクサキビ > ローズグラス, ソルガムの順で, シコクビエとオオクサキビでは 85~90% と高かった (Fig 48)。また, 日射量の増加に伴って, ソルガムでは変動せず, シコクビエではゆるやかに上昇し, ローズグラスでは一定した傾向を示さず, 最大値はソルガム, ローズグラスに比較してシコクビエで 89% と高かった (Fig 49)。

光合成能は培地窒素濃度の上昇に伴って, ソルガム, オオクサキビでは 50 ppmN 区, シコクビエでは 250 ppmN 区, ローズグラスは 10 ppmN 区まで上昇し, それ以上で一定となり, 最大値はシコクビエ, オオクサキビ > ローズグラス > ソルガムの順で各々 49, 44, 37, 29 mg CO₂/dm²/hr であった (Fig 50)。

地上部呼吸能は培地窒素濃度の上昇に伴って, オオクサキビ, シコクビエ, ローズグラスでは上昇し, ソルガムでは変動しなかった。また, 日射量の増加に伴って, 各草種とも(3)区まで上昇し, それ以上で一定となり, 最大値はシコクビエ, オオクサキビ > ローズグラス > ソルガムの順であった。

一方, 根部呼吸能は培地窒素濃度の上昇に伴って, 各草種とも上昇し, 上昇割合はオオクサキビとシコクビエで顕著であった。また, 日射量の増加に伴って, シコクビエでは(4)区まで, ソルガム, ローズグラスでは(2)区まで上昇し, それ以上で一定となり, 最大値はソルガムよりもシコクビエ, ローズグラスで高かった。

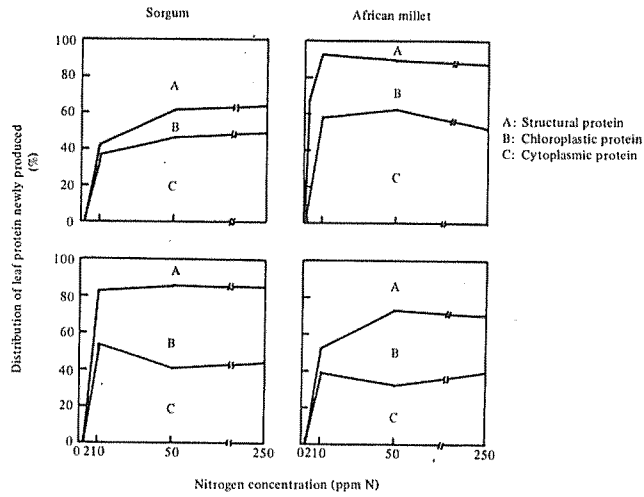


Fig. 48 Effects of nitrogen concentration of nutrient solution on distribution of the leaf protein which was newly produced in four warm season grasses.

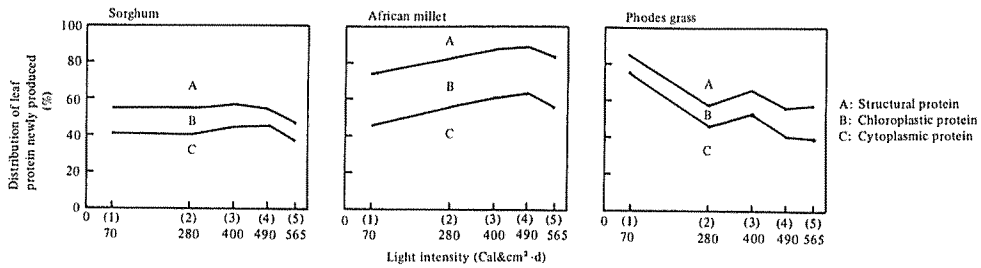


Fig. 49 Effects of light intensity on distribution of the leaf protein which was newly produced in some warm season grasses.

その結果、窒素吸収呼吸効率は培地窒素濃度の上昇に伴って、オオクサキビでは250 ppmN区まで、その他の草種では50 ppmN区まで上昇し、それ以上で一定あるいは低下した。また、日射量の増加に伴って、ソルガムでは(5)区、シコクビエでは2区、ローズグラスでは(4)区まで上昇し、それ以上で一定あるいはやや低下し、最大値はシコクビエ>ローズグラス>オオクサキビ、ソルガムの順で各々640、490、340、320 $\mu\text{gN/gCO}_2$ であった (Fig 51)。また、葉蛋白質生産呼吸効率は培地窒素濃度の上昇に伴って、各草種ともわずかに上昇し、日射量の増加に伴って、ソルガム、シコクビエでは上昇し、ローズグラスでは変動せず、最大値はシコクビエ、ソルガム、ローズグラス、オオクサキビで各々63、35、23、14 $\mu\text{gN/gCO}_2$ であった。

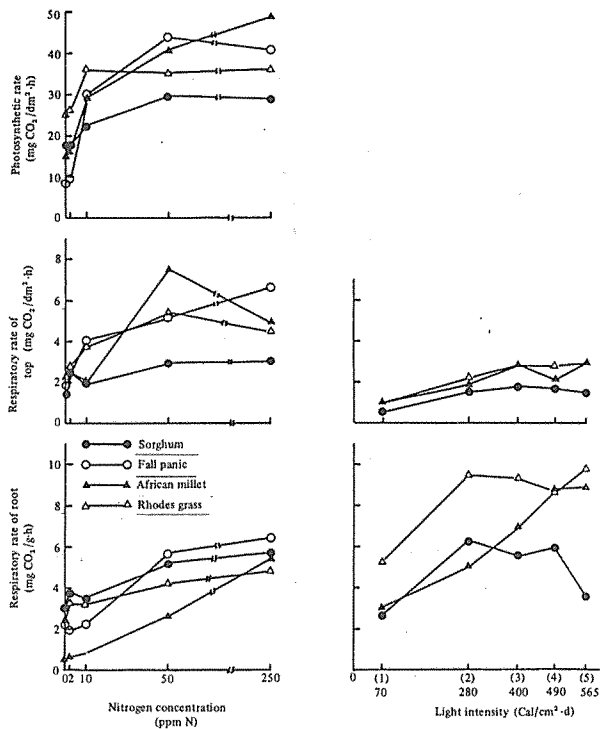


Fig. 50 Effects of N concentration of nutrient solution and light intensity on photosynthetic rate and respiratory rate of four warm season grasses.

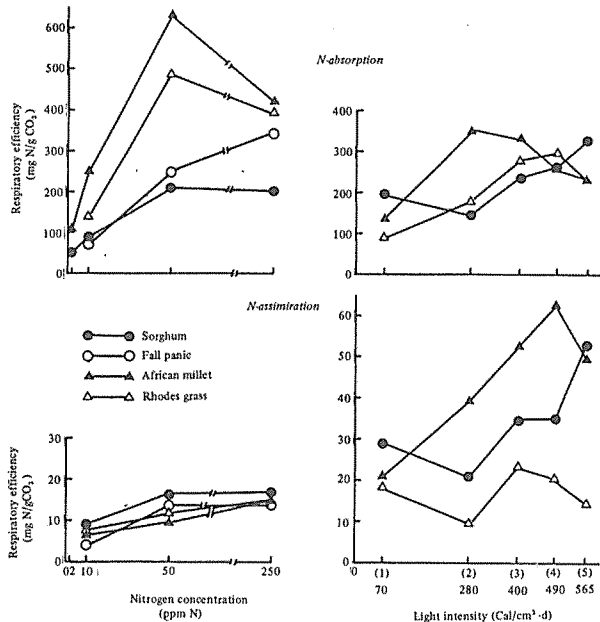


Fig. 51 Effects of N concentration and light intensity on respiratory efficiency of N absorption and assimilation in four warm season grasses.

考 察

発芽後21日目の地上部の窒素含有量と乾物重は各草種とも多窒素区程多かったが、それらの最大値はソ

ルガムでは4 N-H (200 kgN/ha・225 個体/m²)区、シコクビエでは4 N-L (200 kgN/ha・700 個体/m²)区、ローズグラスでは4 N-M (200 kgN/ha・3400 個体/m²)区で得られ、ソルガムやローズグラスに比較してシコクビエで高かった。すなわち、多窒素供給条件下においてもシコクビエやローズグラスの密植区では発芽後14日目以降でpN%が著しく低下したため、蛋白質生産速度が低下し、蛋白質生産量や乾物生産量はLあるいはM区よりも低かった。そして、その傾向はCGRの大きいシコクビエで顕著であった。

上記密植区でのpN%の低下の要因として、

- (a) シコクビエでは特に生育が速いため、生育初期から相互遮へいによって光不足となったこと、
- (b) 単位時間当りの窒素要求量が多いため、土壌の窒素供給速度が制限要因になったこと、

などが考えられる。

ここで蛋白質生産速度がソルガムやローズグラスに比較してシコクビエで明らかに高かったことに着目し、これらの草種の特徴を個体を対象として検討した。その際、西南暖地で広く栽培されているこれらの一年生飼料作物に加えて、窒素施与反応に特徴があり、今後有望な草種と言われるオオクサキビを同時に比較した。

まず、各草種の個体当りのPPRを比較検討することにした。各草種間の比較はその草種のとりうる最大値で行うのが望ましいと思われるが、L-GRは生育ステージによって異なり、どの時点で比較するかが問題である。ここでは(1)ソルガムでの圃場試験の結果(第4章)、L-GRやPPRの最大値は発芽後20~25日目得られ、窒素の供給が十分であれば刈取り時(発芽後35日目)まではほとんど低下しなかったこと、(2)実験1で発芽後21日目までのCGRに顕著な草種間差異が認められたこと、(3)発芽後30~40日目刈取り利用するためには初期生育におけるPPRを高めることが重要であること、などの理由から、各草種の発芽後15~25日目のPPRで比較した。しかしながら、栽培時期の差異などにより、同じ草種でも両実験(培地窒素濃度あるいは日射量を変えた場合)での値が大きく異なる場合があったため、草種間の比較は両実験の最大値で行った。

各草種のPPRはオオクサキビ>シコクビエ>ソルガム、ローズグラスの順であり、L-GRはソルガムに比較して、オオクサキビ、シコクビエ、ローズグラスで高く、pN%はソルガムで最も高く、ローズグラスで最も低い。

こうしたPPRを支配する形態的、生理的要因について草種間で比較してみると、葉面積拡大速度はソルガム、シコクビエ、オオクサキビで高く、ローズグラスで低い。そして、葉蛋白質密度の高い草種程、葉が厚く、それはシコクビエ、オオクサキビで高く、ソルガム、ローズグラスで低い。従って、シコクビエ、オオクサキビでは葉蛋白質密度、葉の厚さともにソルガムより大きく、葉面積拡大速度もソルガムと同程度と高い。ローズグラスでは葉蛋白質密度、葉面積拡大速度ともにソルガムよりも低い。

このことから、シコクビエ、オオクサキビは葉蛋白質を保有する器としては4草種中最も有利な条件を備えていると考える。

さらに、PPRの高いシコクビエやオオクサキビでは光合成能、呼吸能、窒素吸収能といった生理的機能が高く、しかも、窒素吸収や葉蛋白質生産呼吸効率も高く、取り込んだ窒素の葉部への分配割合および葉蛋白質中のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質の割合が高い。一方、ローズグラスでは取り込んだ窒素のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合が低く、葉部での非蛋白態窒素が多い、などの特徴を示した。

次に、窒素や光の供給に対するPPRの変化についてみると、窒素供給が不足すると、各草種ともPPRが低下し、特にシコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスで顕著に低下する。その主因はソルガムではpN%の低下で、オオクサキビ、シコクビエ、ローズグラスではL-GRとpN%の両者の低下であった。そして、オオクサキビとシコクビエでは窒素吸収能と光合成能および葉蛋白質密度、葉面積拡大速度などが顕著に低下し、ローズグラスでは窒素吸収能と葉面積拡大速度の低下が顕著であった。さらに、窒素供給が不足した場合は各草種とも増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質画分への分配割合が

顕著に低下した。また、日射量が不足すると、PPRは各草種ともに低下し、特にローズグラスで顕著に低下した。その主因はソルガム、シコクビエではL-GRの低下、ローズグラスではL-GRとpN%の低下であった。そして、ローズグラスでは窒素吸収能、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質への分配割合、窒素吸収呼吸効率および葉面積拡大速度が顕著に低下し、ソルガムとシコクビエでは窒素吸収能や葉蛋白質生産呼吸効率が低下した。

これらのことから、各草種の蛋白質生産を向上させるためには、まず、ソルガム、シコクビエ、ローズグラスで各々225個体/m²以上、700、3400個体/m²程度の密植にすると同時に各草種とも土壌の窒素供給条件を改善して、pN%をローズグラスでは2.5%、その他の草種では3%以上に維持することが必要と考える。そして、ソルガム、ローズグラスではPPRの高いシコクビエ、オオクサキビの有する生理的、形態的特性を育種的手段により導入すること、すなわち、ソルガムでは葉を厚くし、増加蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合を向上させること、ローズグラスでは葉を厚くし、取り込み窒素の葉部での同化を促進することが必要と考える。

第7章 総合考察

飼料作物の乾物生産と品質（飼料の栄養価値）の両者を改善し、蛋白質生産の向上を図るために、本論文においては、(1)葉蛋白質の各画分に着目しつつ、乾物生産、蛋白質含有率、葉蛋白質生産の相互関係を明らかにし、(2)圃場条件下で葉蛋白質生産速度を向上させるための肥培管理法を検討し、(3)さらに、葉蛋白質限界生産量の草種間比較を行った。

なお本論文では、ある時点の葉蛋白質増加速度を葉蛋白質生産速度（PPR）と呼び、それを葉の乾物生産速度（L-GR）と生産された乾物の蛋白質含有率（pN%）とに解析する手法を導入した。

各々の実験で得られた結果については、その都度考察を試みたが、ここではすべての実験結果を念頭において総合考察を行うこととする。

ソルガムについての調査結果では、地上部窒素のうち、茎部では非蛋白態窒素の割合が多く、地上部の蛋白態窒素の70~80%は葉部に存在した。また、茎部の蛋白態窒素含有率は生育初期で2%前後、後期では0.3%程度と低く、その多くは構造性蛋白質である。それ故、光合成を司る酵素蛋白質はほとんど葉部に存在すると考えられる。

pN%、葉蛋白質密度、LAI増加速度、L-GRおよびCGRの相互関係についてみると、(a)生育に伴ってpN%が低下する場合、pN%が2%以下に低下すると、一週間程度の時間的ずれを置いて、葉蛋白質密度、LAI増加速度、L-GRとCGRが順次低下し、(b)窒素の供給を増加すると、pN%が高く維持され、葉蛋白質密度が上昇し、LAI増加速度、L-GR、CGRがより長期間高く維持され、PPRが上昇することが認められた。

各葉蛋白質画分と光合成能や葉面積拡大速度との関係をソルガムについて検討した結果によると、光合成能とクロロプラスト態蛋白質画分との間には高い正の相関関係が認められた。しかし、クロロプラスト態蛋白質が増加すると、他の蛋白質画分も平行して増加するために、光合成能はいずれの葉蛋白質画分とも正の相関を示した。また、各葉蛋白質画分の増加速度は葉面積拡大速度とも正の相関を示した。このような光合成能と葉の蛋白質含有率との関係は他の作物でも認められており、例えば、水稻では光合成能が蛋白態窒素含有率^{97, 100)}、ラメラ窒素の割合^{94, 95)}およびFraction I Protein含有率^{22, 23)}と正の相関を示し、ハウレン草では光合成能がRuBP carboxylase活性と高い相関を示す¹²⁴⁾ことなどが報告されている。

しかし、葉身の窒素含有率が一定値に達すると、それ以上の上昇では単葉の光合成能がほとんど上昇しないことが報告されており、ソルガムについても同様のことが認められた。すなわち、クロロプラスト態蛋白質3.5mgN/dm²または全葉蛋白質6.5mgN/dm²までは葉蛋白質密度の上昇で光合成能や葉面積拡大速度が上昇し、乾物生産が増大するが、それ以上に葉蛋白質密度を高めても乾物生産速度は上昇しなかった。このように、一定値以上に葉蛋白質密度が上昇しても光合成能は上昇せず、一定の高い値に保たれる。しかし、飼料としての品質面からみれば、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質の増大は消化率を向上さ

せ、栄養価値を高めると考えられる。従って、飼料作物においては光合成能を向上させるのに必要な値以上に、葉蛋白質密度を向上させることの意義を積極的に評価すべきである。

また、窒素の供給が十分に葉蛋白質の生産が旺盛な場合は、地上部、根部ともに呼吸能が上昇し、窒素吸収呼吸効率、葉蛋白質生産呼吸効率も高かった。すなわち、葉蛋白質生産の旺盛な場合は、蛋白質合成以外のための呼吸、あるいは維持呼吸¹⁶³⁾の割合が低く、葉蛋白質生産の上昇によって呼吸効率が低下することは無いと言える。

ソルガム以外の暖地型草種においても光合成能と葉蛋白質密度との間に正の相関が認められた。すなわち、光合成能は葉蛋白質密度の上昇に伴って、シコクビエでは 7.0 mgN/dm^2 、オオクサキビでは 6.0 mgN/dm^2 まで顕著に、ローズグラスでは 5.0 mgN/dm^2 までゆるやかに上昇し、それ以上で一定となった (Fig 52)。

水耕試験の結果では、葉蛋白質密度の最大値はソルガムでは 8.7 mgN/dm^2 であったが、シコクビエでは 10.1 mgN/dm^2 、オオクサキビでは 9.1 mgN/dm^2 、ローズグラスでは 8.5 mgN/dm^2 であり、ソルガムよりもシコクビエ、オオクサキビで高かった。

それ故、葉蛋白質密度を高めることは、ソルガム、シコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスについて各々 6.5 、 7.0 、 6.0 、 5.0 mgN/dm^2 までは乾物生産と品質の両面で、それ以上の密度では主として飼料としての品質の改善の面で寄与すると考える。

ソルガムを各種条件下に生育させて、葉蛋白質生産速度 (PPR)、増加蛋白質の葉への分配割合、葉における各蛋白質画分への分配割合の変動を調査した結果によると、PPR は窒素供給不足、日射量不足、低温によって低下した。この PPR の低下を L-GR と PN% に解析した結果、光不足の場合は主として、L-GR の低下、窒素供給不足と低温の場合は主として PN% の低下に起因することが明らかとなった。すなわち、日射量を多くして乾物生産を盛んにし、窒素を十分供給し、適温に保って窒素吸収を盛んにすることが、PPR を高く維持するために必要であると結論できる。

なお、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が窒素源の場合は低照度下で PN% が低下し、PPR が低下した。この現象は通常の栽培条件下では重要である。なぜなら、畑地条件下では通常、硝酸化成により、作物によって吸収される窒素はほとんどが $\text{NO}_3\text{-N}$ であり、また密植・多窒素条件下では相互遮へいにより下位葉は低照度条件になる場合が多いからである。

植物体集積窒素の葉部への分配割合についてみると、窒素供給の不足で低下し、日射量の減少や低温でやや低下した。また、葉部全窒素中の蛋白態窒素の割合は日射量の減少により低下し、窒素供給が多量の場合にわずかに低下した。すなわち、PPR を高く保つ限り、吸収された窒素は能率良く葉蛋白質に取り込まれると考えて良い。

つぎに増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質および構造的蛋白質への分配割合をみると、窒素、光、温度条件ではあまり変動しなかった。ただし、窒素供給が著しく不足すると、クロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質画分の割合が減少し、飼料としての品質も低下する。

以上のことから、日射量が多く、適温で、窒素供給が十分であれば葉蛋白質は盛んに合成され、そのためクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質画分が増大し、PPR が向上し、葉蛋白質生産が高まると考えられる。現在の慣行栽培下における暖地型草種の PN% は生育中～後期では 1.5% 以下に留まる場合が多く、PN% の向上によって PPR を改善して葉蛋白質生産の向上を図り得る余地は大きいと推定される。

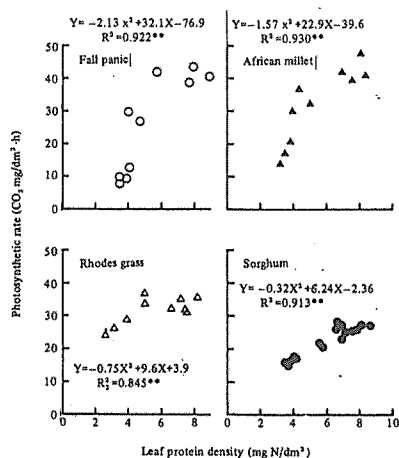


Fig. 52 Relationship between the photosynthetic rate and leaf protein density.

PPRはL-GRとpN%の両者を増大させることにより上昇する。肥培管理の面からソルガムのpN%を向上させる方策を考えると、光や土壌水分の不足がない限り、窒素供給条件、すなわち、窒素施与量、施与方法、施与窒素形態の改善が重要であると考えられる。

一方、L-GRを上昇させる方策は光環境を悪化させずに栽植密度を高めることである。この場合、栽植密度を高めるとpN%が低下し勝ちであるから、pN%が2%以下にならない様に窒素施与を高める必要が生じ、栽植密度と窒素供給条件とを切り離して考えることはできない。

また、実際栽培における問題を考える場合、PPRを向上させると共に刈取り毎の平均葉蛋白質生産速度〔PPR〕を向上させることが必要である。すなわち、できる限り早期に最大PPRを確保し、そしてそのPPRを刈取り時まで高く維持することが必要である。肥培管理の面から〔PPR〕を向上させる方策を考えると、基本的にはPPRの場合と同様である。ただし、(a)各草種がとり得るLAIには限界があり、生育に伴ってLAIが大きくなると相互遮へいのため光環境が悪化し、PPRが低下すること、(b)また、生育段階が進むと栄養生長から生殖生長に変わることや老化現象など植物自体の生理的現象によっても、PPRが低下すること、などが考えられるので、そのような要因でPPRが低下する前に刈取り、そして良好な再生長を行わせ、次の刈取りの〔PPR〕を向上させることが必要と考えられる。

ソルガムについての圃場試験の結果によると、PPRの最大値および〔PPR〕はともに密植・多窒素程高く、370本/m²・240kgN/haにおいて、〔PPR〕は183mgN/m²/日であり、1回刈(発芽後46日目)の葉蛋白質生産量は84kgN/haであった。その場合の乾物生産量は12.6t/haであり、葉蛋白質含有率は0.67%であった。

この場合、生育中期(栄養生長中期)以降のpN%が2%以下と低く、PPRも低かったことから、栽植密度は同じとし、窒素施与量を240kgN/haの確安に、乾燥牛糞や緩効性窒素肥料でさらに240kgN/haを加え、基肥として480kgN/haとした。その結果、pN%とL-GRが生育中期以降もほとんど低下せず、刈取り時までPPRが高く維持され〔PPR〕がさらに上昇し、葉蛋白質生産量が増加した。すなわち、120日間で3回の刈取りの〔PPR〕は平均で258mgN/m²/日で、その間の合計葉蛋白質生産量は310kg/haとなり、その場合の乾物生産量は29t/haで、葉蛋白質含有率は1.1%と上昇した。さらに、葉蛋白質密度は生育中期以降も光合成能を上昇させる値(6.5mgN/dm²)以上であった。また、前期〔PPR〕が向上した他の要因として、比較的早期(出穂前)に刈取り、再生長を行ったことと、こうした栽培条件下においても再生長が良好であった点にある。

従って、飼料作物で出穂前に刈取り・再生長させる場合、生育に伴う光合成能あるいは品質の低下の主因は生育中期以降の窒素供給不足に伴うpN%の低下であると考えられる。そして生育に伴うpN%の低下は必然的なものでなく、窒素供給条件の改善、すなわち、土壌の窒素供給能を高めることによって、生育中期以降のpN%が高く維持され、その結果PPR、葉蛋白質密度が高く維持され、LAI増加速度やCGRの低下が緩和され、乾物生産量が高まるばかりでなく、葉蛋白質生産量が著しく増加し、飼料としての品質が高まると結論できる。

本研究で得られた乾物生産量やCGR、LAIの最大値はソルガムや他の作物で得られた調査^{58, 65, 70, 79)}例と比較して著しく高い。

武田ら¹⁴¹⁾はトウモロコシを超密植栽培(400本/m²)し、最大CGR 54.7g/m²/日、最大LAI 18.7を得、そのような高いLAIの下で高いCGRが得られた要因として、LAIの上昇に伴って吸光係数が低下し、比葉面積(SLA)が増大し、弱光域における光エネルギー利用率が上昇したことを上げている。

SLAはトウモロコシ、ソルガムともに400~500cm²/g D.W.であり、本実験においては7月末に最大LAIに達したが、この時期は日射量が多い時期であったことから、群落内への光の透過が良好で、高いLAIで高いCGRを示したと考える。

村田⁹⁹⁾は作物の生産力を比較する目的で、世界における作物の高収例のデータを用いて、(1)年間乾物生産量、(2)〔CGR〕、(3)最大CGR、(4)RGRを比較した結果、ニューソルゴの乾物生産量40.3t/ha/年、〔CGR〕28.4g/m²/日という値が最高値であったと述べている。本研究における高収のソルガ

ムについてみると、〔CGR〕は2番刈のみの場合 $34 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であり、高い値と言える。

また、田中¹⁵⁰⁾は収穫物の成分組成の差を考慮しつつ、作物の生産性を比較するため、“equivalent yield”の概念を導入した。すなわち、収穫器官の各構成成分は第1次光合成産物から生産され、第1次光合成産物の一部は各成分の合成に必要なエネルギーを産出するために呼吸によって消費されるので、成分によって、第1次光合成産物の歩止まりに差があり、単位量の第1次光合成産物（グルコース）から生産されるでんぷん、蛋白質、脂肪の量（変換効率）はそれぞれ0.84、0.38、0.31であることを示した。そして、収穫器官の成分組成と変換効率から、収穫器官の単位量を生産するための第1次光合成産物の量（ $\text{g glucose/m}^2/\text{日}$ ）を算出し、この単位で表示した第1次光合成産物量を“equivalent yield”と呼んだ。そして、“equivalent yield”として各作物についての世界的記録収量を比較した結果、トウモロコシやジャガイモで生産性が高く、トウモロコシでは $14.2 \text{ g glucose/m}^2/\text{日}$ （収穫指数0.50）であると報告している。

この算定法によると、この研究におけるソルガムの高収例の“equivalent yield”は $45.9 \text{ g glucose/m}^2/\text{日}$ であった。このような高い値が得られたのは、収穫目的物が茎葉部であるために、(a)生育期間が短く、(b)収穫指数が1.0である点などが上げられる。

上記の密植・多窒素条件で、葉蛋白質量が高いと言うソルガムで認められた傾向は、他の草種においても基本的にはあてはまると考えられる。しかし、生育が速く、個体当りのPPRが高い草種の場合は、密植にすると、生育初期から相互遮へいによって光不足となり、L-GR、pN%の低下を招く。同時に、単位時間当りの窒素要求量が多いため、土壤の窒素供給速度が制限要因になり易い。

ソルガム、シコクビエ、ローズグラスについての圃場試験の結果によると、シコクビエではソルガム、ローズグラスよりも生育が速く、密植にすると上記の傾向が顕著に認められた。それ故、このような草種については、特に土壤の窒素供給条件の改善が必要であると同時に、その草種がとり得る最大LAIとそのLAIを早期に確保するための栽植密度の検討が必要である。

本実験結果から、そのような栽植密度を推定すると、ソルガムでは $350\sim 400$ 個体/ m^2 程度、シコクビエでは 700 個体/ m^2 程度、ローズグラスでは 3400 個体/ m^2 程度と推定される。その場合の播種量はシコクビエ、ソルガム、ローズグラスで各々20、110~120、 30 kg/ha である。

なお、各草種のとり得る最大LAIは、ソルガムでは19程度で、シコクビエとローズグラスでは未明で今後の研究課題である。

次に、本研究を実施した西南暖地で最適な肥培管理を行った場合の各草種の最大葉蛋白質生産量をこの研究で得られたデータを用いて、極めて大胆ではあるが推定することにする。

与えられた草種の葉蛋白質生産量は、その草種がとり得る最大〔PPR〕とそのPPRを維持し得る生育期間によって決定される。この場合、最大〔PPR〕は最大〔L-GR〕と最大〔pN%〕の積として試算することにする。

また、(a)生育に伴ってLAIが大きくなると相互遮へいのために、生育が停滞するので、各草種がとり得るLAIに限界がある。(b)各草種個有の葉蛋白質密度の限界がある。そのため、刈取り・再生させる必要があり、1回の刈取りで得られる葉蛋白質生産量の最大値は最大LAIと最大葉蛋白質密度の積として試算することにした。そして、この値を前記最大〔PPR〕で除して、最大葉蛋白質量に達するのに必要な日数、すなわち、1回の刈取りの所要日数を算出した。さらに、年間栽培可能日数をこの値で除して、年間刈取り回数とし、刈取り回数に1回刈で得られる最大葉蛋白質生産量を乗じて栽培可能期間における最大葉蛋白質生産量とした。また、その場合の乾物生産量は最大〔CGR〕により試算した。

Table 18には各草種の圃場試験で得られた〔L-GR〕、〔pN%〕、〔CGR〕およびLAI、刈取り時の葉蛋白質密度の最大値、さらに、これらの値を用いて上記の方法で算出した最大葉蛋白質生産量、最大乾物生産量を示した。

ソルガムでは〔L-GR〕の最大値は $13.0 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であり、〔pN%〕の最大値は3.2%であった。従って〔PPR〕の最大値は $416 \text{ mgN/m}^2/\text{日}$ と推定される。一方、LAIの最大値は18.7であり、刈取

Table 18. Estimation of maximum production of dry matter and leaf protein in four grasses.

Species	Sorghum	African millet	Rhodes grass	Italianryegrass	
*[L-GR] (g/m ² ·d)	13.0	22.4	13.5	11.3	
*[PN %]	3.2	2.1	1.5	4.0	
Max [PPR] (mgN/m ² ·d)	416	470	203	452	
*LAI	18.7	11.0	5.0	13.1	
*Density of leaf protein at harvest (mgN/dm ²)	7.4	10.0	8.0	11.0	
Max leaf protein yield at a harvest (KgN/ha)	140	110	40	144	
Days required for the grow th to harvest (Day)	34	24	20	35	
*[CGR] (g/m ² ·d)	34	33	21	23	
Dry matter yield at a harvest (t/ha)	11.7	6.9	4.4	8.0	
Growing period (Day/year)	120	120	120	150	
Number per annum	3	5	6	4	
Maximum	Dry matter production (t/ha)	35	35	26	32
	Leaf protein production (kgN/ha)	420	550	240	576

* The maximum value which was obtained in the field experiment.

り時の葉蛋白質密度の最大値は 7.4 mgN/dm^2 であった。それ故、1回の刈取りで得られる葉蛋白質生産量の最大値は 140 kgN/ha と推定される。これを前述の〔PPR〕で割ると34日となるので、ソルガムの栽培可能期間が120日程度である西南暖地では3回の刈取りにより 420 kgN/ha の葉蛋白質生産が可能である。その場合の乾物生産量についてみると、〔CGR〕の最大値は $34 \text{ g/m}^2/\text{日}$ であるから、1回刈の乾物生産量は 11.7 t/ha で3回刈ともこの乾物生産速度で生育すると仮定すると、合計 35 t/ha と推定される。

他の草種についてもソルガムの場合と同様に推定すると、〔PPR〕の最大値はソルガム、シコクビエ、ローズグラス、イタリアンライグラスで各々416、470、203、452 $\text{mgN/m}^2/\text{日}$ と推定され、シコクビエ、イタリアンライグラス>ソルガム>ローズグラスの順である。また、1回刈で得られる葉蛋白質生産量の最大値はソルガム、シコクビエ、ローズグラス、イタリアンライグラスで各々140、110、40、144 kgN/ha と推定され、ローズグラスで特に低く、他の草種では同程度である。その結果、栽培可能期間中の葉蛋白質生産量は、寒地型草種のイタリアンライグラスで最も高く、暖地型草種ではシコクビエ、>ソルガム>ローズグラスの順で、各々576、550、420、240 kgN/ha と推定された。そして、その場合の乾物生産量は各々32、35、35、26 t/ha と推定される。

すなわち、葉蛋白質生産可能水準量はソルガム、ローズグラスよりもシコクビエ、イタリアンライグラスで多い。

その主な要因は、シコクビエではソルガムよりも〔PN%〕は3分の2と低いが、〔L-GR〕が高いため、〔PPR〕が $470 \text{ mgN/m}^2/\text{日}$ と高いことによっており、イタリアンライグラスではソルガムよりも〔L-GR〕がわずかに低いが、〔PN%〕が4.0%と高いため、〔PPR〕が $452 \text{ mgN/m}^2/\text{日}$ と高いことによっている。また、両草種とも〔CGR〕に対する〔L-GR〕の割合(葉/茎比)が高いことも、

〔PPR〕を高めている要因の1つである。

一方、ソルガムの葉蛋白質生産可能水準量が低いのは〔CGR〕が高いにもかかわらず、〔L-GR〕が低いから、〔PPR〕が低いことにある。すなわち、葉/莖比が低いからである。この比は生育に伴って低下するので、早期刈取りはソルガムの葉蛋白質生産量を向上させる上で有利である。

ローズグラスの葉蛋白質生産可能水準量が最も低い理由は〔PN%〕が1.5%と著しく低いため、〔PPR〕が他草種の2分の1以下と低いことである。

なお、年間の栽培可能期間はソルガム、シコクビエ、ローズグラスではいずれも6月～9月であり、イタリアンライグラスでは10月～5月であり両者で異なる。従って、年間の葉蛋白質生産量の推定値はイタリアンライグラスに、暖地型草種のいずれかを組み合わせた値となる。すなわち、イタリアンライグラスとシコクビエの組み合わせで最も多く、その場合の年間の葉蛋白質生産可能水準量は1026kgN/haであり、その乾物生産量は67t/haと推定される。

各草種とも水耕条件下で窒素を十分に供給すると、PN%や葉蛋白質密度はさらに高くなるので、これらの値が水耕条件下で得られた値にまで上昇し得ると仮定すると、前記の各草種の葉蛋白質生産可能水準量はさらに1.3～1.5倍程度増加する可能性があると考えられる。

なお、上記算定に際して〔PPR〕は〔L-GR〕と〔PN%〕の各々の最大値の積として、また、1回刈で得られる最大葉蛋白質生産量はLAIと刈取り時の葉蛋白質密度の、各々の最大値の積として算定したが、〔L-GR〕と〔PN%〕間またはLAIと葉蛋白質密度間に例えば〔L-GR〕が上昇すると〔PN%〕が低下すると言った相互関係が存在すると、この算定は妥当とは言えなくなる。そこで、ソルガムの圃場試験の結果からそれらの関係についてみると、〔PN%〕や葉蛋白質密度が高くなる程、〔L-GR〕やLAIが低下することはなかった（Fig 53）。従って、少なくとも〔PN%〕と〔L-GR〕間葉蛋白質密度とLAI間には相互に相反する関係は存在しないと見える。

また、これらの算定で得られた、1回刈までの所要日数はソルガム、シコクビエ、ローズグラス、イタリアンライグラスで各々34、24、20、35日であり、年間の刈取り回数は各々3、5、6、4回となったが、これらの値は実際の栽培状況と比較して、刈取りまでの所要日数が短く、刈取り回数が多いが大きくは異なる。従って、ここで行った推定値は現実と大きく離れたものでないと言える。ただし、栽培期間中の生産量の推定値は、全栽培期間中、温度、日射量が、最大の〔L-GR〕、〔PN%〕、LAI、刈取り時の葉蛋白質密度、〔CGR〕などが得られた時期と同様であることを前提としており、特に、イタリアンライグラスでは栽培期間の3分の2は気温、日射量ともに不十分な時期であることから、実際にはこの3分の2程度と推察される。

〔PPR〕を向上させるための肥培管理的手段はPPRの向上と、そのPPRを刈取り時まで高く維持することであるが、各草種のPPRを向上させるための方策として、肥培管理的手段の次の段階は育種であろう。飼料作物においても育種に対する期待は大きい。しかし、そのためには生理的にみただけの育種目標が必要である。

そこで、個体当りのPPRの草種間差異と各草種のPPRを支配する形態的、生理的要因の特徴について述べ、さらに各草種のPPRを改善するための条件について考察する。

各草種の個体当りのPPRの最大値は次のような特徴が認められた（Fig 54）。すなわち、PPRはオ

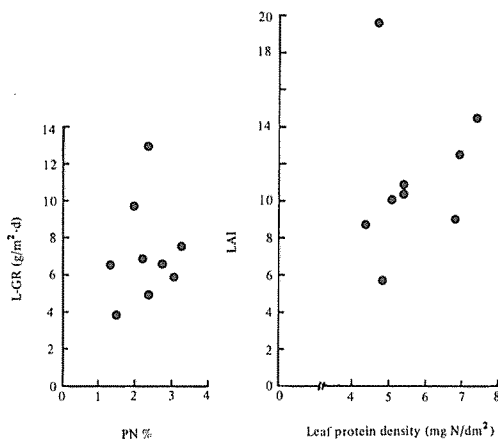


Fig. 53 Relationships between PN % and L-GR, and between leaf protein density and LAI in the sorghum grown in field.

オクサキビ>シコクビエ>
ソルガム、ローズグラス>
イタリアンライグラスの順
であり、暖地型草種よりも
イタリアンライグラスで低
かった。この差は主として
L-GRの差によりランク
付けられた。ただし、ロー
ズグラスではソルガムより
もL-GRが高いが、PN
%が5草種中最も低いため
にソルガムと同程度のPP
Rを示した。このように、
PN%についても草種間で
明らかな差異が認められ、
PN%は暖地型草種よりも

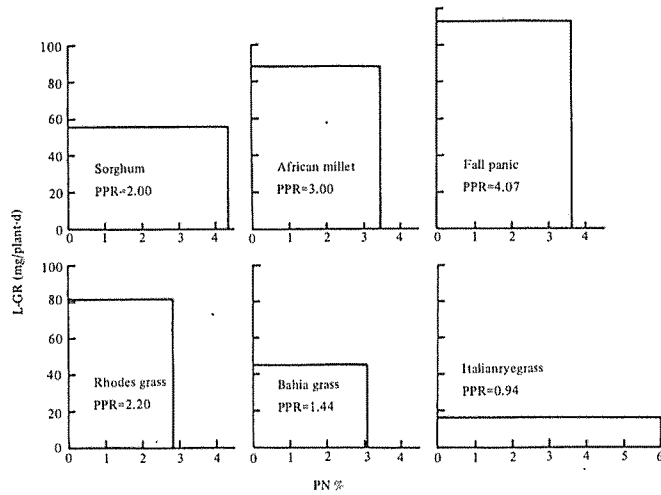


Fig. 54 LAI and PN % in several grasses when PPR reached to the maximum.

イタリアンライグラスで高く、暖地型草種間ではソルガムで最も高く、ローズグラスで最も低かった。

こうした PPR を支配する形態的、生理的要因についての各草種の特徴は以下の通りである (Table 19)。

Table 19. Morphological and physiological characteristics of several grasses.

Species	Italian-ryegrass	Sorghum	African millet	Fall panic	Rhodes grass
Leaf area expansion rate (cm ² /plant-d)	6 ^{c*}	46 ^a	37 ^{ab}	43 ^a	31 ^b
Density of leaf protein (mgN/dm ²)	12.0 ^a	7.8 ^c	10.1 ^{ab}	9.1 ^{bc}	8.5 ^{bc}
Thickness of leaf (g F.W./dm ²)	2.9 ^a	1.4 ^a	2.2 ^{bc}	2.0 ^{cd}	1.8 ^{cd}
Nitrogen uptake rate (mgN/g)	52 ^a	38 ^b	56 ^a	53 ^a	63 ^a
Distribution to leaf of N incorporated (%)	57 ^a	45 ^b	57 ^a		54 ^a
Distribution to chloroplastic and cytoplasmic protein of leaf protein increased (%)	84 ^a	64 ^b	92 ^a	86 ^a	72 ^b
Photo synthetic rate (mg CO ₂ /dm ² ·h)	17 ^d	29 ^c	49 ^a	44 ^{ab}	37 ^{bc}
Respiratory efficiency in absorbing nitrogen (mgN/gco ₂)	200 ^c	320 ^{bc}	640 ^a	340 ^{bc}	490 ^{ab}
Respiratory efficiency in assimilating nitrogen (mgN/gco ₂)	57 ^a	35 ^b	63 ^a	14 ^c	23 ^{bc}

* The means not followed by the same letter differ significantly at the 5% level. Duncan's New Multiple Range Test.

ソルガム：葉面積拡大速度は5草種中最も高いが、葉蛋白質密度と葉の厚さは最も小さい。窒素吸収能、取込んだ窒素の葉部への分配割合、増加葉蛋白質のクロロプラスト態と細胞質蛋白質への分配割合が特に低い。

シコクビエ：葉面積拡大速度、葉蛋白質密度、葉の厚さともに比較的高い。窒素吸収能、光合成能などの生理的機能が特に高く、取込んだ窒素の葉部への分配割合、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合も高い。窒素吸収や葉蛋白質生産における呼吸効率が低い。

ただし、上記生理的要因は培地窒素濃度や日射量の変動に敏感に反応する。

オオクサキビ：窒素吸収や葉蛋白質生産における呼吸効率が低いこと以外はシコクビエと類似である。

ローズグラス：葉面積拡大速度、葉蛋白質密度がやや低く、葉が薄い。窒素吸収能は特に高く、取込んだ窒素の葉部への分配割合も比較的高いが、葉部での蛋白態窒素の割合が低い。葉蛋白質生産の呼吸効率が低い。また特に光が不足すると、葉面積拡大速度、窒素吸収能、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質への分配割合が低下する。

イタリアンライグラス：葉面積拡大速度は暖地型草種よりも低いが、葉蛋白質密度や葉の厚さは高い。暖地型草種よりも光合成能と窒素吸収の呼吸効率は低いが、窒素吸収能、取込み窒素の葉部への分配割合、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質への分配割合が高く、シコクビエやオオクサキビと同程度である。

各草種の葉蛋白質生産可能水準量は上記に示したそれぞれの欠点を補足することによって、さらに向上すると考えられる。すなわち、ソルガムでは葉/茎比を高め、葉を厚くすることと、窒素吸収能と増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合を高めること、ローズグラスでは葉を厚くして葉蛋白質密度を高めることと、葉部集積窒素の同化を促進して葉部全窒素中の蛋白質割合を高めることである。

要 約

飼料作物の乾物生産と品質（飼料の栄養価）の両者を改善し、蛋白質生産の向上を図るために、①各葉蛋白質画分に着目しつつ、乾物生産、蛋白質含有率、葉蛋白質生産の相互関係を明らかにし、②圃場条件下で、葉蛋白質生産速度を向上させるための肥培管理法を検討し、③西南暖地において最適の肥培管理をした場合の最高葉蛋白質生産量を推定し、④さらに、葉蛋白質限界生産量の草種間比較を行った。

その結果は次の通りである。

- (1) ある時点の葉蛋白質増加速度を葉蛋白質生産速度（PPR）と呼び、それを葉の乾物生産速度（L-GR）と生産された乾物の蛋白質含有率（pN%）とに解析した。これらの概念は葉蛋白質生産性の把握とその草種間差異の解析に有効である。
- (2) 地上部窒素のうち、茎部では非蛋白態窒素の割合が多く、地上部の蛋白態窒素の70%以上は葉部に存在し、また、光合成を司る酵素蛋白質はほとんど葉部に存在する。そして葉蛋白質画分のうち、クロロプラスト態蛋白質画分と光合成能との間に高い正の相関が認められた。
- (3) 光合成能は葉蛋白質密度の上昇に伴って、ソルガム、シコクビエ、オオクサキビ、ローズグラスで各々6.5、7.0、6.0、5.0mgN/dm²まで上昇するが、これらの値以上に葉蛋白質密度が上昇しても光合成能は上昇せず一定の高い値に保たれる。一方、飼料としての品質面からみれば、クロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質の増大は消化率を向上させ、栄養価を高めるので、飼料作物においては光合成能を向上させるために必要な値以上に、葉蛋白質密度を高め、葉蛋白質生産量を向上させることが、品質を高める上で重要である。
- (4) ソルガムのPPRは窒素供給不足、日射量不足、低温によって低下した。このPPRの低下は、光不足の場合は主としてL-GRの低下に窒素供給不足と低温の場合は主としてpN%の低下に起因した。植物体集積窒素の葉部への分配割合は窒素供給不足、日射量の減少、低温で低下した。葉部全窒素中の蛋白態窒素の割合は日射量の減少、窒素の多量供給により低下した。しかし、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質、細胞質蛋白質および構造的蛋白質への分配割合は窒素供給の増加、窒素源、光、温度によってあまり影響されなかった。ただし、窒素が著しく不足すると、クロロプラスト態蛋白質と細胞質蛋白質への分配割合が低下した。
- (5) ソルガムのPPRの最大値および刈取りまでの平均葉蛋白質生産速度（〔PPR〕）は密植・多窒素条件で高く、370本/m²・240kgN/haにおいて、〔PPR〕は183mgN/m²/日であり、1回刈（発芽後46日目）の葉蛋白質生産量は84kgN/haであった。その場合の乾物生産量は12.6t/haであり、葉蛋白

質含有率（地上部乾物に対する葉の蛋白態窒素の割合）は0.67%であった。この場合、生育中期（栄養生長中期）からPN%が2%以下に低下した結果、葉蛋白質密度、LAI増加速度、L-GRとCGRが順次低下した。

それに対して、栽植密度は同じとし、さらに基肥として240kgN/haの窒素を増加した場合は、生育中期以降もPN%が高く維持され、葉蛋白質密度が上昇し、L-GR、CGRがより長期間高く維持され、PPRが高く維持され、葉蛋白質生産量が増加した。すなわち、栽培期間120日間で3回の刈取りの〔PPR〕の平均は258mgN/m²/日で、その間の合計葉蛋白質生産量は310kgN/haとなり、その場合の乾物生産量は29t/haであり、葉蛋白質含有率は1.1%に上昇した。

- (6) 本研究のソルガムの最高収量は、刈取り毎のCGRおよび“quivalent yield”で示すと各々34g/m²/日と45.9g glucose/m²/日となり、それらを指標とした世界の記録の高収例（各々28.4g/m²/日、14.2g glucose/m²/日〔収穫部位のみで収穫指数0.50〕）と比較して高かった。
- (7) ソルガムで認められた上記の傾向は他の草種においても基本的にはあてはまる。ただし、シコクビエでは700個体/m²、ローズグラスでは3400個体/m²以上の栽植密度にすると、生育初期から相互遮へいによる光不足と土壌の窒素供給速度が制限因子となり、PN%が低下した。
- (8) 西南暖地で最適な肥培管理をした場合の各草種の葉蛋白質生産可能水準量を、本研究で得られた刈取り毎のL-GR、PN%およびLAI、刈取り時の葉蛋白質密度の最大値を用いて推定した結果、その値はソルガム、シコクビエ、ローズグラス、イタリアンライグラスで各々420、550、240、576kgN/haであり、その場合の乾物生産量は各々35、35、26、32t/haと推定された。なお、栽培可能期間はソルガム、シコクビエ、ローズグラスでは6月～9月であり、イタリアンライグラスでは10月～5月であるので、年間の葉蛋白質生産可能水準量はイタリアンライグラスとシコクビエの組合せで最も多く、1026kgN/haで、その乾物生産量は67t/haと推定された。
- (9) シコクビエやイタリアンライグラスが高い葉蛋白質生産性を示す要因は、シコクビエではL-GR、イタリアンライグラスではPN%が特に高いことと、両草種とも葉/茎乾物重比が高い点にある。
- (10) 葉蛋白質生産性の高い草種は、葉面積拡大速度が高く、葉が厚く、葉蛋白質密度が高く、窒素吸収能が高く、植物体集積窒素の葉部への分配割合と増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合が高く、窒素吸収や葉蛋白質生産呼吸効率も高い。
- (11) 以上を総合すると、日射量が多く、適温で、窒素供給が十分であれば、葉蛋白質が盛んに合成され、そのためにクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質が増大し、葉蛋白質生産量が増大する。また、葉蛋白質生産が向上すると、まず乾物生産が向上し、さらに葉蛋白質生産が向上すると、葉蛋白質含有率が上昇して品質が改善されると結論できる。

実際栽培で葉蛋白質生産量を増大させるためには、PPRを高め、刈取り時までPPRを高く維持して〔PPR〕を向上させることが必要であり、そのための条件は各草種とも密植・多窒素条件で、早期に刈取り・再生させることであるが、さらにそれぞれの草種については以下のような条件を満足させれば良い。

- (a) ソルガムでは350～400本/m²程度に密植にし、葉/茎乾物重比を高め、葉を厚くし、増加葉蛋白質のクロロプラスト態蛋白質や細胞質蛋白質への分配割合を高め、窒素吸収能を高める。
- (b) シコクビエやオオクサキビではL-GRが高く、窒素吸収能も高いので、特に窒素供給条件を良くする。シコクビエでは栽植密度を700個体/m²程度とする。
- (c) ローズグラスでは3400個体/m²程度の栽植密度とし、葉を厚くして葉蛋白質密度を高め、葉部集積窒素の同化を促進して、葉部全窒素の蛋白質割合を高める。

謝 辞

本研究を遂行するに当り、広島大学生物生産学部、尾形昭逸教授ならびに安藤忠男教授に終始御懇切な御指導を頂いた。また、赤木英二技官には多大な御援助を頂いた。深く感謝の意を表わします。

本研究の取りまとめに際しては、北海道大学農学部、田中明教授に終始適切かつ有益な御助言と御校閲を頂いた。心より感謝の意を捧げます。また、北海道大学農学部、岡島秀夫教授ならびに朝日田康司教授には御校閲と有益な御助言を頂き、但野利秋助教授には有益な御助言を頂いた。厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 県和一, 窪田文武, 鎌田悦男: 牧草の乾物生産 (第1報), 光合成連続測定による牧草群落の乾物生産量の計算値と実測値の比較, 日草誌, 17, 223~228 (1972).
- 2) 県和一, 窪田文武, 鎌田悦男: 牧草の乾物生産 (第3報), 牧草の乾物生産と最適刈取回数におよぼす吸光係数の影響, 同上, 17, 235~242 (1972).
- 3) 県和一, 窪田文武, 鎌田悦男, 三田村強: 牧草の乾物生産 (第10報), 土壤水分条件を異にしたオーチャードグラス草地の乾物生産量の推定, 同上, 19, 283~291 (1973).
- 4) 相井孝允: ソルゴの利用について (第1報), 青刈ソルゴの各部の生育別化学的組成と in vitro 法による推定乾物消化率, 同上, 17, 269~274 (1971).
- 5) 相井孝允: ソルゴの利用について (第2報), 青刈ソルゴの組織別化学的組成と組織別の消化の難易について, 同上, 18, 95~102 (1972).
- 6) 相井孝允: ソルゴの利用について (Ⅳ), HCN Content in the sorghum forage, 同上, 19, 333~340 (1973).
- 7) 相井孝允: ソルガムの利用について (第5報), 青刈ソルガム中の硝酸態窒素含量, 乳牛に対する青刈ソルガム給与ならびに硝酸塩中毒の人工発症試験, 同上, 21, 109~115 (1975).
- 8) 秋山侃, 武田友四郎: トウモロコシの物質生産に関する研究 (第3報), 個体群光合成構成因子の生育に伴う変化とその相互作用, 日作紀, 44, 7~13 (1975).
- 9) 秋山侃, 斉藤吉満, 武田友四郎: トウモロコシの物質生産に関する研究 (第4報), 個体群内部の光環境と群落吸光係数, 同上, 44, 14~21 (1975).
- 10) 秋山侃, 武田友四郎: トウモロコシの物質生産に関する研究 (第5報), 個葉光合成能力と物質生産の関係, 同上, 44, 269~274 (1975).
- 11) ASADA, K. and M. TAKAHASI: Consavation of Electron Transport and Energy Transfer Reactions of Spinach Chloroplasts in Glycerol, *Plant Cell Physiol*, 12, 709-715 (1971).
- 12) 朝日田康司: 乳牛のタンパク栄養, 英国の新飼養標準から, 日畜会道支報, 23, 15~19 (1981).
- 13) 安藤忠男, 尾形昭逸: 硝酸態窒素の微量迅速定量法, 土肥誌, 51, 48~54 (1980).
- 14) 安藤尚実, 河野憲治, 赤木英二, 尾形昭逸: 低暖地における飼料作物の高位生産技術に関する研究 (第5報), イタリアンライグラスとソルゴの品質, 特にサイレージの品質について, 日草誌, 26 (別号), 267~268 (1980).
- 15) BETSCHART, A. and J.E. KINSELLA: Extractability and solubility of Leaf Protein, *J. Agr. Food Chem*, 21, 60-65 (1973).
- 16) BLACK, J.N.: The Interrelationship of Solar Radiation and Leaf Area Index in Determining the Rate of Dry Matter Production of Swards of Subterranean Clover (*Trifolium subterranean L.*), *Aust. J. Agr. Res*, 14, 20-38 (1962).
- 17) BLENKINSOP, P.G. and J.E. DALE.: Effects of Shade Treatment and Light Intensity on Riburose - 1, 5 - Diphosphate Carboxylase Activity and Fraction I Protein Level in the First Leaf of Barley, *J. Exp. Bot*, 25, 899-912 (1974).

- 18) BOYER, J.S. and H.G. MCPHERSON. : Physiology of Water Deficits in Cereal Crops Nutritional Quality-, *Advances in Agronomy*, **27**, 12-13 (1975).
- 19) BROWN, R.H. : A Difference in N Use Efficiency in C₃ and C₄ Plants and its Implications in Adaptation and Evolution, *Crop. Sci*, **18**, 93-98 (1978).
- 20) BROWN, R.H. and R. E. SIMMONS : Photosynthesis of Grass Species Differing in CO₂ Fixation Pathways (I) Water Use Efficiency, *ibid*, **19**, 375-379 (1979)
- 21) CASHMORE, A.R. : Protein Synthesis in Plant Leaf Tissue, *J. Biol. Chem*, **251**, 2848- 2853 (1976).
- 22) 趙東三, 村田吉男 : 水稻の光合成と物質生産に関する研究 (第1報), 窒素追肥による光合成能力変化の品種間差異, 日作紀, **49**, 88~94 (1980).
- 23) 趙東三, 横井誠一, 村田吉男 : 水稻の光合成と物質生産に関する研究 (第2報), 窒素追肥による葉内窒素成分の変化と光合成能との関係における品種間差異, 同上, **49**, 608~614 (1980).
- 24) 長南信雄 : 禾穀類の葉における同化組織に関する研究 (第5報), 葉肉構造の作物間の比較, 同上, **39**, 418~425 (1970).
- 25) 長南信雄 : イネ科の寒地型草種と暖地型草種の葉肉細胞の差異, 日作紀, **41**, 414~419 (1972).
- 26) 長南信雄 : イネ科作物の葉の構造と機能, 遺伝, **32**, 51~56 (1978).
- 27) COCKBURN, W., D.A. WALKER, and C.W. BALDRY. : The Isolation of Spinach Chloroplasts in Pyrophosphate Media, *Plant Physiol*, **43**, 1415-1418 (1968).
- 28) CRIDDLE, R.S. : Structural Proteins of Chloroplasts and Mitochondria, *Ann. Rev. Plant Physiol*, **20**, 239-253 (1969).
- 29) DAVIES, M., W.C. EVANS. and W.H. PARR. : Biological Value and Digestibilities of Some Grasses and Protein Preparations from Young and Mature Species, by the Thomas Mitchell Method, Using Rats, *Biochem. J.* **52**, XXiii (1952).
- 30) DAY, D.A., C.L.D. JENKINS. and M.D. HATCH : Isolation and Properties of Functional Mesophyll Protoplasts and Chloroplasts from *Zea Mays*, *Aust. J. Plant Physiol*, **8**, 21-29 (1981).
- 31) 江原薫, 山田芳雄, 梅津頼三郎 : 飼料作物における硝酸態窒素含量に関する研究 (第1報), 窒素施与量が飼料作物の硝酸態窒素含量に及ぼす影響, 日作紀, **34**, 292~297 (1966).
- 32) EDWARDS, G.E., R.M. LILLEY., S. CRAIG. and M.D. HATCH. : Isolation of Intact and Functional Chloroplasts from Mesophyll and Bundle Sheath Protoplasts of the C₄ Plant *Panicum miliaceum*, *Plant Physiol*, **63**, 821-827 (1979).
- 33) EDWARD, R.H., R.E. MILLER., D. FREMERY., B.E. KNUCKLES., E.M. BICKHOFF. and G.O. KOHLER. : Pilot Plant Production of an Edible White Fraction Leaf Protein Concentrate from Alfalfa, *J. Agric Food Chem*, **23**, 620-630 (1975).
- 34) GALLAHER, R.N., D.A. ASHLEY. and R.H. BROWN. : ¹⁴C-Photosynthate Translocation in C₃ and C₄ Plants as Related to Leaf Anatomy, *Crop. Sci*, **15**, 55-59 (1975)
- 35) GERLOLF, E.D., I.H. LIMA and M.A. STAHPMAN. : Amino Acid Composition of Leaf Protein Concentrates, *J. Agr. Food. Chem*, **13**, 139-142 (1965).
- 36) HALL, D.O. : Nomenclature for Isolated Chloroplasts, *Nature New Biol*, **235**, 32-36 (1977)
- 37) 原田勇, 篠原功 : 土壌と牧草栄養からみた牛の起立不能症 (1), 畜研, **31**, 32~36 (1977).
- 38) 原田勇, 篠原功 : 土壌と牧草栄養からみた牛の起立不能症 (2), 同上, **31**, 250~252 (1977),
- 39) HATCH, M.D. and S. MAU. : Activity, Location and Role of Aspartate Aminotransferase and Alanine Aminotransferase Isoenzymes in Leaves with C₄ Pathway Photosynthesis, *Arch. Biochem. Biophys*, **156**, 195-206 (1973).
- 40) HATCH, M.D. and T.KAGAWA. : Enzymes and Functional Capacities of Mesophyll Chloroplasts from

- Plants with C₄-Pathway Photosynthesis; *Arch. Biochem*, **159**, 842–853 (1973).
- 41) HATCH, M.D. and T. KAGAWA.: NAD Malic Enzyme in Leaves with C₄-Pathway Photosynthesis and its Role in C₄ Acid Decarboxylation, *Arch. Biochem. Biophys*, **160**, 346–349 (1974)
 - 42) HATCH, M.D., T. KAGAWA, and S. CRIG.: Subdivision of C₄-Pathway Species Based on Differing C₄ Acid Decarboxylating systems and Ultrastructural Features, *Aust. J. Plant Physiol*, **2**, 111–128 (1975).
 - 43) 堀米隆男, 神立誠: 草類蛋白質の栄養価 (X), 単離白クローバー葉蛋白質の消化比較, 日畜会報, **30**, 381–385 (1960).
 - 44) 堀米隆男, 神立誠: 草類蛋白質の栄養価 (XI), 白クローバー葉の窒素形態の分別定量法, 同上, **31**, 255–261 (1960).
 - 45) 堀米隆男, 神立誠: 草類蛋白質の栄養価 (第13報), 赤クローバーのフェノール化合物およびその蛋白質の消化率におよぼす影響, 農化誌, **40**, 246–251 (1966).
 - 46) 堀米隆男, 神立誠: 草類蛋白質の栄養価 (第14報), 茎葉のフェノール化合物およびオキシフェノールオキシダーゼの蛋白質の消化率におよぼす影響, 同上, **40**, 449–455 (1966).
 - 47) 堀米隆男: エンバクおよびラジノクローバーから分離した細胞質蛋白質ならびに葉緑体蛋白質の栄養価に関する研究, 日畜会報, **48**, 267–272 (1977).
 - 48) HORVACH, G., M. DROPPA., L.A. MUSTARDY, and D.A. FULUDI. Functional Characteristics of Intact Chloroplast Isolated from Mesophyll Protoplast and Bundle Sheath Cells of *Maize*, *Planta*, **141**, 239–244 (1978).
 - 49) 星野正生: 牧草の再生現象, 農業技術, **29**, 401–404, 440–442 (1974).
 - 50) HUBER, S.C. and G.E. EDWARDS.: Evaluation of some Parameters Required for the Enzymic Isolation of Cells and Protoplasts with CO₂ Fixation Capacity from C₃ and C₄ Grasses, *Physiol. Plant*, **35**, 203–209 (1975).
 - 51) HUBER, S.C., T.C. HALL, and G.E. EDWARDS.: Differential, Localization of Fraction 1 Protein between chloroplast Types, *Plant Physiol*, **57**, 730–733 (1965)
 - 52) 福永和男: 窒素施肥がライグラス類, チモシーおよびオーチャードグラスの収量, 蛋白質, アミノ酸およびカロチン含量に及ぼす影響, *Res. Bull. Obihiro Univ*, **5**, 208–224 (1967).
 - 53) 五十嵐喜治, 保井忠彦: 赤クローバー生葉から単離した蛋白質の随伴物質とその蛋白質の消化におよぼす影響, 農化誌, **52**, 241–246 (1978).
 - 54) 石栗敏機: 寒地型イネ科牧草の季節別の化学成分と消化率および栄養価の関係, 日草誌, **23**, 247–251 (1977).
 - 55) 石栗敏機: オーチャードグラスのめん羊による自由採食量と化学組成, 消化率および可消化量との関連, 同上, **25**, 156–160 (1979).
 - 56) 石井龍一, 村田吉男: C₃, C₄ 植物の光合成, 日作紀, **47**, 165–188 (1978).
 - 57) 石塚喜明, 田中明: 作物栄養学の発展方向 — 稲作を対象として —, 農及園, **42**, 728–734 (1967).
 - 58) 岩田文男, 大久保隆弘: とうもろこしの生育に関する生理生態的研究 (第3報), 品種および土壌肥沃度を異にした条件下における栽植密度効果, 日作紀, **39**, 97–104 (1970).
 - 59) KANAI, R. and G.E. EDWARDS.: Enzymic Separation of Mesophyll Protoplasts and Bundle Sheath Cells. from C₄ Plants, *Naturwissenschaften*, **60**, 157–158 (1973).
 - 60) 神立誠, 保井忠彦: 草類蛋白質の栄養価 (第8報), 青刈大豆葉蛋白質の消化に及ぼす各種乾燥方法の影響について, 農作誌, **33**, 899–903 (1959).
 - 61) 狩野広美, 米山忠克, 熊沢喜久雄: 発光分光分析法による重窒素の定量法について, 土肥誌, **45**, 549–559 (1974).

- 62) KAWAEIIMA, N. and S.G. WILDMAN. : Fractionl Protein, *Ann. Rev. Plant Physiol*, **21**, 325-358 (1970).
- 63) KELLY, G.J. and E. LETZKO. : Regulatory Aspects of Photosynthetic Carbon Metabolism, *ibid*, **27**, 181-205 (1976)
- 64) 北村征生：施肥窒素に対する数種暖地型イネ科草の感応特性, 日草誌, **26**, 151~156 (1980).
- 65) 小林作衛：密植と多肥によるニューソルゴの高位生産に関する研究, 同上, **7**, 36~40 (1961).
- 66) 窪田文武, 県和一, 鎌田悦男：牧草の乾物生産 (第4報), 牧草の乾物生産におよぼす吸光係数の影響 — 理論的解析 —, 日草誌, **17**, 243~249 (1972).
- 67) 窪田文武, 県和一, 鎌田悦男：牧草の乾物生産 (第5報), 乾物生産量の推定式 (乾物生産式) について, 同上, **18**, 277~282 (1972).
- 68) 窪田文武, 県和一, 鎌田悦男：牧草の乾物生産 (第7報), 乾物生産量の推定式 (乾物生産式) の適合性および活用方法の検討, 同上, **18**, 292~298 (1972).
- 69) 窪田文武, 県和一, 鎌田悦男：牧草の乾物生産 (第9報), 刈取回数と施肥量が牧草の乾物生産におよぼす影響, 日草誌, **19**, 201~207 (1973).
- 70) 窪田文武, 植田精一：飼料用トウモロコシの栽培環境と生産性 (Ⅲ), 高密度栽培によるトウモロコシの生産力向上, 同上, **27**, 182~189 (1981).
- 71) 熊井清雄, 真田雅：牧草の再生に関する研究 (第4報), オーチャードグラスの再生に及ぼす貯蔵炭水化物ならびに体内窒素の意義, 草地試研報, **3**, 25~32 (1973).
- 72) 熊沢喜久雄, 米山忠克, 狩野広美：発光分析法による水稻の乾燥粉砕物中の重窒素測定のための全窒素定量装置の作製に関する研究 (第1報), 土肥誌, **45**, 378~381 (1974).
- 73) LUGG, J.W.H. : Preparation of Some Protein Samples from the Fresh Leaves of Plants and the Sulphur Distribution of the Preparations, *Biochem. J*, **32**, 2114-2122 (1938).
- 74) LUGG, J.W.H. : The Amide, Tyrosine and Tryptophan Contents and the Sulphur Distribution (Cystine plus cystein and Methionine Contents) of Some Plants Leaf Protein Preparations, *ibid*, **32**, 2123-2128 (1939).
- 75) 前野休明, 江原薫：牧草の再生に関する生理・生態学的研究 (第11報), 牧草の再生に及ぼす窒素追肥の影響, 日草誌, **16**, 141~144 (1970).
- 76) 萬田富治, 佐藤庚, 松本達郎：牧草中のエストロジェン様物質に関する研究 (第4報), イネ科牧草の生育季節によるエストロジェン活性の変動, 同上, **18**, 28~33 (1972).
- 77) 萬田富治, 佐藤庚, 松本達郎：牧草中のエストロジェン様物質に関する研究 (第5報), ハムスターに対する生長促進効果の草種による差異, 同上, **19**, 389~393 (1973).
- 78) 萬田富治, 松本達郎：牧草中のエストロジェン様物質がハムスターの成長に及ぼす影響, 日畜会報, **44**, 1~10 (1973).
- 79) 増田安弘, 小中伸夫：青刈飼料作物の生育, 収量におよぼす栽植密度の影響 (第2報), ソルガムについて, 日草誌, **15**, 1~8 (1969).
- 80) 三秋尚, 藤原享, 山本一郎：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (第1報), 雑種ソルゴの化学的成分と飼料価値に及ぼす窒素質肥料, 生育段階ならびに生育相の影響について, 同上, **12**, 146~152 (1966).
- 81) 三秋尚, 能勢公：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (第2報), イタリアンライグラスの化学的成分と飼料価値に及ぼす窒素肥料の施肥水準と生育段階の影響について, 同上, **12**, 202~207 (1966).
- 82) 三秋尚, 能勢公：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (第3報), 青刈トウモロコシの化学的成分と飼料価値に及ぼす窒素肥料の施肥水準と生育段階の影響について, 同上, **12**, 208~212 (1966).

- 83) 三秋尚：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (X), テオシントの化学的成分と飼料価値におよぼす窒素施肥水準と生育段階の影響について, 日畜会報, **38**, 252~256 (1967).
- 84) 三秋尚：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (XII), ローズグラスの乾草とサイレージの化学的成分と飼料価値におよぼす窒素施肥水準の効果について, 同上, **41**, 459~464 (1970).
- 85) 三秋尚, 星島頼介：草類の刈取時の草丈と収量および飼料価値との関係 (1), オーチャードグラス, 畜研, **22**, 1357~1358 (1968).
- 86) 三秋尚：飼料作物の化学的成分と飼料価値に関する研究 (第18報), 草類の窒素溶性区分とその消化性に及ぼす窒素肥料の施肥水準の影響について, 岡山大農報, **43**, 53~57 (1974).
- 87) MIYACHI, S. and D. HOGETSU. : Light-enhanced Carbon Dioxide Fixation in Isolated Chloroplasts, *Plant Cell Physiol*, **11**, 927-936 (1970).
- 88) 宮地重遠：葉緑体, 蛋白質, 核酸, 酵素 (別冊), **76**, 64~69 (1976).
- 89) 宮崎昭：石田直彦：サイレージ調製時における青刈飼料中の硝酸塩含量の変化について, 日畜会報, **39**, 313~318 (1968).
- 90) MOHANTY, P. and J.S. BOYER. : Chloroplast Response to Low Leaf Water Potentials, *Plant Physiol*, **57**, 704-709 (1976).
- 91) MONSI, M. and T. SAEKI. : Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, *Jap. J. Bot*, **14**, 22-52 (1953).
- 92) 森田三郎, 仙田久芳, 本田透, 永見豊一, 佐野信孝：新飼料作物スダックスに関する試験成績 (第3報), 生育にともなう青酸含量の消長, 畜研, **21**, 973~974 (1967).
- 93) MORITA, K. and M. KONO. : Isolation of Chloroplasts from Rice Leaves Using Glutaraldehyde, *Soil Sci. Plant Nutr*, **18**, 225-231 (1972).
- 94) MORITA, K. and M. KONO. : Changes in the Nitrogen Localized in the Lamellae Systems and Stroma of Rice Chloroplast Accompanying the Stages of Growth, *ibid*, **20**, 79-86 (1974).
- 95) MORITA, K. and M. KONO. : Developmental Pattern of Lamellae and Stroma Fractions of Chloroplasts in Rice Plants, *ibid*, **23**, 381-389 (1977).
- 96) MORITA, K. : A Physiological Study on the Dynamic Status of Leaf Nitrogen in Rice Plants, *Bull. Hokuriku Natl. Agric. Exp. Stn*, **21**, 1-61 (1978).
- 97) 村田吉男：水稲の光合成とその栽培学的意義に関する研究, 農技研報, **D9**, 1~169 (1961).
- 98) 村田吉男：空気中の炭酸ガス濃度と作物の生育, 農及園, **37**, 5~10 (1961).
- 99) 村田吉男：C₃, C₄, CAM 植物の分類と生産性, 農業技術, **35**, 1~7, 49~55 (1980).
- 100) 長田明夫：水稲品種の光合成能力と乾物生産との関係 — 特に窒素条件との関係において, 農技研報, **D14**, 117~188 (1966).
- 101) 中村亮八郎, 吉田條二, 中村豊, 加藤寿次, 荻野順三：野外における乳牛の硝酸中毒と野草アオビユの硝酸塩含量, 日畜会報, **43**, 286~288 (1972).
- 102) NEAL, D.O., C.S. HEW., E. LATZKO. and M. GIBBS. : Photosynthetic Carbon Metabolism of Isolated Corn Chloroplasts, *Plant Physiol*, **49**, 607-614 (1972).
- 103) NELSON, O.E. : Genetic Modification of Protein Quality in Plants (III), The Relative Constancy of Leaf Protein Composition, *Advances in Agronomy*, **21**, 177-178 (1969).
- 104) 日本草地学会事務局：暖地草地研究最近の歩み, 昭和48年度日本草地学会秋季大会シンポジウム要旨 (1973).
- 105) 農林水産技術会議事務局：草地におけるミネラルの分布と動態に関する研究, 研究成果 **106**, 30~70 (1978).
- 106) 尾形昭逸, 安藤忠男, 藤井潤三：ソルガム属青刈飼料作物含有青酸の拡散分析法による定量について, 日草誌, **18**, 118~121 (1972).

- 107) 尾形昭逸, 下中野文人, 安藤忠男: 草類の硝酸吸収同化能の種間差異について (II), 数種暖地型牧草の硝酸の吸収同化と培地硝酸濃度との関係, 同上, 20 (別号), 148~149 (1974).
- 108) 尾形昭逸, 中村良夫, 安藤忠男, 河野憲治: ソルガム属飼料作物の青酸配糖体集積に関する研究 (第1報), 同上, 21 (別号), 42~43 (1975).
- 109) 尾形保, 小林義之, 田野良衛: 草類のミネラル組成に及ぼす土壤条件と肥培管理に関する研究(I), 多量要素の草種間差異, 草地試報, 2, 20~28 (1973).
- 110) OGAWA, T., Y. INOUE. and K. SHIBATA.: Chlorophylla Forms in Mesophyll and Bundle Sheath Chloroplasts of *Zea mays* Leaves Grown at Low Light Intensity, *Plant Cell Physiol*, 15, 913-918 (1974)
- 111) 大久保忠旦, 星野正生, 西村修一: クロロフィル量による牧草の物質生産の解析 (I), ラジノクローバーの再生長における葉面積指数とクロロフィル量の推移, 日作紀, 33, 125~129 (1964).
- 112) 大久保忠旦, 川鍋祐夫, 星野正生: クロロフィル量を指標とした牧草の物質生産の解析 (II), 最大乾物生産速度, 生長構成要素, 個葉光合成能力の季節変動とクロロフィル含量との相関関係, 日草誌, 21, 124~135 (1975).
- 113) 大久保忠旦, 川鍋祐夫, 星野正生: クロロフィル量を指標とした牧草の物質生産の解析 (III), 栽植密度の異なるアルファルファ群落の最大乾物生産速度と弱光下個葉光合成速度のクロロフィル含量に対する依存性, 同上, 21, 136~145 (1975).
- 114) 大久保忠旦, 大泉久一, 星野正生, 松本フミエ: 草地生態系のエネルギー効率, 同上, 15, 138~147 (1969).
- 115) 大山嘉信: 牧草蛋白質の栄養価 (II), オーチャードグラスの生育にともなう窒素形態の変化 (その1), 日畜会報, 31, 23~29 (1960).
- 116) 大山嘉信: 牧草蛋白質の栄養価 (III), オーチャードグラスの生育にともなう窒素形態の変化 (その2), 同上, 31, 31~35 (1960).
- 117) 大山嘉信: 牧草蛋白質の栄養価 (IV), オーチャードグラスの生育にともなう蛋白質の消化性の変化, 同上, 32, 11~17 (1961).
- 118) 大山嘉信: 牧草蛋白質の栄養価 (V), オーチャードグラスの乾燥時における蛋白質の消化性の変化, 同上, 32, 250~255 (1961).
- 119) 折谷隆志, 円仏利康, 葭田隆治: 作物の窒素代謝に関する研究 (第16報), 水稻各品種における光合成, 葉面生長とN代謝との関係, 日作紀, 48, 10~16 (1979).
- 120) PIRIE, N.W.: Leaf Protein, *Ann. Rev. Plant Physiol*, 10, 33-52 (1959).
- 121) POLLMAR, W.G., D. EBERHARD., D. KLEIN. and B.S. DHILLON.: Genetic Control of Nitrogen Uptake and Translocation in *Maize*, *Crop. Sci*, 19, 82-86 (1979).
- 122) QUAIL, P.H.: Plant Cell Fractionation, *Ann. Rev. Plant Physiol*, 30, 425-484 (1979)
- 123) 坂齊: イネの生育に伴う葉のRuDPカルボキシラーゼ活性, 葉緑素含量等の消長とそれらの相互関係について, 日作紀, 46, 164~170 (1977).
- 124) 坂齊: 光合成能力とRuDPカルボキシラーゼ活性, 農業技術, 33, 401~407 (1978).
- 125) 酒井博, 川鍋祐夫, 藤原勝美: オーチャードグラス草地の乾物生産と生産過程 (I), 季節間の生産量の比較, 日草誌, 15, 198~205 (1969).
- 126) 酒井博, 川鍋祐夫, 藤原勝美: オーチャードグラス草地の乾物生産と生産過程 (II), 刈取り高さの影響, 同上, 15, 206~213 (1969).
- 127) 酒井博, 川鍋祐夫, 藤原勝美: オーチャードグラス草地の乾物生産と生産過程 (III), 窒素施肥の影響, 同上, 15, 214~219 (1969).
- 128) 酒井博, 川鍋祐夫, 佐藤徳雄, 藤原勝美, 五十嵐昇: オーチャードグラス草地の乾物生産と生産過程 (IV), 多窒素の影響, 同上, 18, 34~40 (1972).

- 129) STAHMAN, M.A. : Plant Protein, *Ann. Rev. Plant Physiol*, **14**, 137-158 (1963).
- 130) STERN, W.R. and C.M. DONALD. : The Influence of Leaf area and radiation on the growth of Clover in Swards, *Aust. J. Agr. Res*, **13**, 615-623 (1962)
- 131) 杉本安寛, 仁木巖雄: 施肥窒素に対する牧草の反応に関する研究 (I), 数種暖地型牧草の施肥窒素に対する反応の差異について, 日草誌, **21**, 194~198 (1975).
- 132) 杉本安寛, 仁木巖雄: 施肥窒素に対する牧草の反応に関する研究 (III), 数種暖地型牧草の光合成作用に及ぼす窒素施肥量, 葉身窒素含有率およびクロロフィル含有量の影響, 同上, **25**, 121~127 (1979).
- 133) 杉崎昭夫, 吉原一郎, 斉藤富士夫: 刈取期によるイタリアンライグラス乾草の消化率の変化 — 水田裏作飼料の栄養価 —, 日畜会報, **31**, 18~21 (1960).
- 134) 杉山達夫: 総説, 光, 温度とC₄光合成酵素, 農化誌, **52**, R155~R166 (1978).
- 135) 鈴木嘉兵衛, 安藤文桜, 阿部林, 岡本道子: 飼料作物と牧草の生育期別飼料価値 (第2報), 青刈ソルゴーの生育期別, 採食率, 成分および消化率, 畜研, **18**, 1967~1968 (1964).
- 136) 高野信雄, 松山龍男, 他: 牧草の成分分画による有効利用技術, 農業技術, **33**, 347~351, 396~400, 449~453, 500~504, 549~553 (1978).
- 137) 武田友四郎: 密植の問題と水稲の増収限界 (I), 農及園, **36**, 627~632 (1961).
- 138) 武田友四郎: 水稲の密植問題と増収限界 (II), 同上, **36**, 791~796 (1961).
- 139) TAKEDA, T. : Studies on the Photosynthesis and Production of Dry Matter in the Community of Rice Plants, *Jap. J. Bot*, **17**, 403-437 (1961).
- 140) 武田友四郎, 福山正隆: イネ科植物における光合成に関する研究 (第I報), イネ科植物における亜科レベルにおける光合成速度とその系統関係, 日作紀, **40**, 12~19 (1971).
- 141) 武田友四郎, 秋山侃: トウモロコシの物質生産に関する研究 (第2報), 密植栽培が幼植物の物質生産に及ぼす影響について, 同上, **42**, 302~306 (1973).
- 142) 田中明, 山口淳一: 熱帯稲の増収可能性 — 水稲群落の乾物生産の解析を中心に —, 農及園, **42**, 1321~1328 (1967).
- 143) TANAKA, A. and J. YAMAGUCHI. : The Growth Efficiency in Relation to the Growth of the Rice Plant, *Soil Sci and Plant Nutr*, **14**, 110-116 (1968).
- 144) 田中明, 山口淳一: 作物の成長効率に関する研究 (第1報), 種子の暗所発芽時の生長効率, 土肥誌, **40**, 38~42 (1969).
- 145) 田中明: 水稲の品種特性と栄養, 農及園, **46**, 141~144 (1971).
- 146) 田中明, 原徹夫: 単葉光合成能の栄養生理学的研究 (第1報), トウモロコシにおける単葉光合成能と窒素栄養との関係, 土肥誌, **41**, 502~508 (1970).
- 147) 田中明, 原徹夫: 単葉光合成能の栄養生理学的研究 (第2報), トウモロコシにおける単葉光合成能とリン栄養との関係, 同上, **42**, 300~303 (1971).
- 148) 田中明, 原徹夫: 単葉光合成能の栄養生理学的研究 (第3報), トウモロコシにおける単葉光合成能とカリウム栄養との関係, 同上, **43**, 132~136 (1972).
- 149) 田中明, 原徹夫: 単葉光合成能の栄養生理学的研究 (第4報), トウモロコシ単葉光合成能とカルシウムおよびマグネシウム栄養との関係, 同上, **43**, 218~222 (1972).
- 150) TANAKA, A. : IRRI Symposium "Potential Productivity of Field Crops under Different Environments" -Physiological Aspect of Productivity in Field Crops -, (1980)
- 151) 丹比邦保: 暖地におけるイネ科青刈飼料の合理的な利用法に関する研究 (VII), エンバクの青刈時期別の飼料価値, 日畜会報, **38**, 397~401 (1967).
- 152) 丹比邦保: 暖地におけるイネ科青刈飼料の合理的な利用法に関する研究 (VIII), トウモロコシ, スーダングラス, ソルゴーおよびテオシントの飼料価値, 同上, **38**, 269~274 (1967).

- 153) 丹比邦保：暖地におけるイネ科青刈飼料の合理的な利用法に関する研究（Ⅷ），イタリアンライグラスの刈取期間別の飼料価値，日草誌，14，1～9（1968）。
- 154) 館野宏司，飯田克実：数種の暖地型牧草における個葉光合成と窒素栄養の関係，同上，24，203～209（1978）。
- 155) 内田直次，伊藤亮一，村田吉男：作物の葉における光合成能の発達と衰退に関する研究（第1報），イネ葉の発達過程における変化，日作紀，49，127～134（1980）。
- 156) USUDA, H., H. MATSUSHIMA. and S. MIYACHI. : Assimilation of Carbon Dioxide in Mesophyll Chloroplasts and Bundle Sheath Strands Mechanically Isolated from *Corn* Leaves, *Plant Cell Physiol*, 15, 517-526 (1974)
- 157) WALBOT, V. : Use of Silica Sol Step Gradients to Prepare Bundle Sheath and Mesophyll Chloroplasts from *Panicum maximum*, *Plant Physiol*, 60, 102-108 (1977).
- 158) WATSON, D.J. : The Physiological Basis of Variation in Yield, *Advances in Agronomy*, 4, 101-145 (1952)
- 159) WILDMAN, S.G. and A.T. TAGENDORF.: Leaf Proteins, *Ann. Rev. Plant physiol*, 3, 131-148 (1952).
- 160) WILSON, J.R. and K.P. HAYDOCK. : Temperature Influences on the Growth, Digestibility and Carbohydrate Composition of Two Tropical Grasses, *Panicum maximum* VAR. *trichoglume* and *Setaria sphacelata*. and Two cultivars of the Temperate Grass *Lolium perenne*, *Aust. J. Agr. Res*, 22, 563-571 (1971)
- 161) WILSON, J.R. and K.P. HAYDOCK. : The comparative Response of Tropical and Temperate Grasses to Varying Levels of Nitrogen and Phosphorus Nutrition. *ibid*, 22, 573-587 (1971)
- 162) 山口淳一，原徹夫，田中明：作物の生長効率に関する研究（第2報），トウモロコシの生育に伴う生長効率の変遷，土肥誌，41，73～77（1970）。
- 163) 山口淳一，田中明：作物の生長効率に関する研究（第3報），生育条件を異にしたトウモロコシの生長効率，同上，41，509～513（1970）。
- 164) 山口淳一，渡部幸一郎，田中明：作物の生長効率に関する研究（第4報），水稻およびトウモロコシの器官別呼吸能および生長効率，同上，46，113～119（1975）。
- 165) 山口淳一，河内和彦，田中明：作物の生長効率に関する研究（第5報），大豆の生育各時期における生長効率および水稻，トウモロコシとの比較における子実生産能，同上，46，120～125（1975）。
- 166) 山口淳一：作物の物質生産における呼吸と生長効率 — 講座・光合成と光合成産物の転流・9 —，農業技術，34，196～201（1979）。
- 167) 保井忠彦，神立誠：草類蛋白質の栄養価（第16報），人工消化試験法による蛋白質の形態別消化率測定法に関する検討，農化誌，42，388～393（1968）。
- 168) 保井忠彦，岩松君子：草類蛋白質の一新分離法とそのアミノ酸組成，同上，46，597～602（1972）。
- 169) 保井忠彦：総説，緑葉蛋白質：蛋白質の所在と性質，分離調製法，栄養価および Leaf Protein Concentrates (LPC) としての利用，栄養と食糧，27，427～436（1974）。
- 170) 保井忠彦，平透昭，馬場一之：緑葉たん白質の一新分離法と分離したたん白質の栄養価，同上，30，215～222（1977）。
- 171) 米沢忠克，有馬泰紘，熊沢喜久雄：発光分光分析法による重窒素定量に際しての供試アンモニアの濃縮法，土肥誌，46，146～147（1975）。
- 172) 吉田実：牧草における硝酸集積の動向，畜研，21，775～778（1967）。
- 173) 吉田実：牧草における硝酸集積の実態と家畜の硝酸集積，同上，27，496～500（1973）。

SUMMARY

In the production of forage crops, especially warm season grasses, it is necessary to improve not only the dry matter production but also the nutritive value for animals (quality of forage crops). Nitrogen nutrition of leaves is closely related to both the dry matter production and quality of forage crops. The purpose of this study is to clarify the conditions for the establishment of techniques to produce efficiently the leaf protein fraction which contributes to the improvement of photosynthetic rate and quality of forage crops.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) The leaf protein of sorghum (*Sorghum vulgare* PERS, Sweet Sioux IV) was 70–80% of the total protein produced during its growth period. The leaf protein was fractionated into chloroplastic, cytoplasmic and structural protein. The chloroplastic protein was about 50% of the whole leaf protein, and it was found out that its content per plant varied greatly with the change in the growth environments. Accordingly, it was considered that the chloroplastic protein may be responsible mainly for variation in photosynthetic rate and leaf expansion rate.
- 2) When the forage crops are grown under the conditions of optimum temperature and adequate supply of solar energy and nitrogen, chloroplastic and cytoplasmic protein can be vigorously synthesized in them, and as the result, the total leaf protein remarkably increases. In sorghum, African millet (*Eleusine corocana* GARTN), Fall panic (*Panicum dichotemiflorum* MICHX, Kagawa native) and Rhodesgrass (*Chloris gayana* KUNTH, Fords Katambora). photosynthetic rate and leaf-area expansion rate increased linearly with the increasing rate of leaf protein density (the amount of leaf protein per unit leaf area) at the range of 0-6.5, 0-7.0, 0-6.0 and 0-5.0 mg N/dm² respectively, but had a tendency to be constant at the range of the leaf protein density above them. Therefore, the dry matter and protein production in sorghum, African millet, Fall panic and Rhodesgrass will be improved by increasing the leaf protein density at the range of the above-mentioned values, and especially the protein production will mainly increase if the range of the leaf protein density can be kept over the above-mentioned values.
- 3) As nitrogen tends to be insufficient for crop growth in the field, it is necessary to increase not only plant density but also nitrogen application rate in order to increase leaf protein production by grasses. High value of mean crop growth rate (34 g/m² d) and leaf protein yield (310 Kg N/ha) were attained in this study by the sorghum which was grown under the conditions of high plant density (370 plant/m²) and heavy nitrogen application (480 Kg N/m²).
- 4) The possible maximum yields of leaf protein of the four grasses were estimated by using the data which was obtained in the fields experiments. The maximum yield of leaf protein of African millet (550 Kg N/ha) and that of Italianryegrass (576 Kg N/ha) are higher than those of sorghum (420 Kg N/ha) and Rhodesgrass (240 Kg N/ha). African millet and Italian-ryegrass showed higher value than sorghum and Rhodesgrass in the following parameters; leaf-stem ratio, thickness of leaf, nitrogen uptake ability, leaf

protein density, proportion of protein-N to total-N in leaf, and proportion of chloroplastic and cytoplasmic protein to total leaf protein. The conditions to maximize leaf protein production in sorghum and Rhodesgrass which were made clear on the basis of the above-mentioned characteristics of each forage crop are:

Sorghum: To increase leaf-stem ratio, thickness of leaf, nitrogen uptake ability, and proportion of chloroplastic and cytoplasmic protein to total leaf protein.

Rhodesgrass: To increase thickness of leaf, leaf protein density, and proportion of protein-N to total-N in leaf.