

株周，草丈と葉緑素値あるいは葉色を組み合わせた水稻

の生育診断の開発（第1報）

－地上部乾物重，窒素含有量の診断－

小林和広・植木 忠・今木 正

島根大学生物資源科学部 〒690-8504 松江市西川津町

1060

Development of a New Diagnosis Method for Rice
Plants by a Combination of the Circumference of
Plant Hill, Plant Length, and Green Value (Part 1)

-The Estimation of Aboveground Dry Weight and
Nitrogen Content-

Kazuhiro KOBAYASI, Tadashi UEKI, and Tadashi IMAKI
Faculty of Life and Environmental Science, Shimane
University, Shimane 690-8504 Japan

Abstract

A new diagnosis method for rice plants was developed. Four parameters were used to estimate aboveground dry matter (DW) and nitrogen content (Ng). The parameters were the circumference ($2\pi r$) of plant hill, plant length (H), chlorophyll value (SPAD), and crop green value (GR). Plant volume

which is defined as the product of H and profile area of rice plant hill (πr^2) is a good predictor of DW. SPAD and GR are good estimators of leaf nitrogen concentration. Ng has a relatively high positive correlation with the product of plant volume and SPAD or GR.

緒言

近年，コシヒカリなどの耐肥性に劣る良食味米の作付拡大，圃場の大型化，栽培管理の省力化などから，的確にしかも簡単に短時間で水稻の生育診断のできる技術開発を進める必要がある。生育診断には作物の反射スペクトルを解析する高価な機器を必要とするもの¹⁾からものさしと葉色板だけで済む安価なもの²⁻⁸⁾までである。反射スペクトルを利用する方法は水田の中に入る必要がなく，大面積を一度に測る利点がある。しかし，高価な機器なので一般農家では導入困難である，小面積の区画を多く持つ農家には使いづらい，圃場の中に入らない診断は病虫害の診断を同時にはできないなどの欠点がある。

ものさしや葉色板を使う方法は安価であり，ある程度習熟すればだれでも実行できる方法である。従来は，作物の生育量を草丈と分けつ数で，窒素栄養状態を葉色値でそれぞれ評価する方法が普及していた⁹⁾。しかし，分けつ数は最高分けつ期以降減少するため，分けつ数と生育量は最高分けつ期以降において比例的ではない。この

ため分けつ数に変わる指標として株周あるいは株体積が提唱された^{2,7)}。今回の実験では株体積によって水稻の地上部乾物重(DW)を、葉色値あるいは近年安価に手に入るようになった葉緑素計によって地上部窒素含有率(N%)を予測する方法を検討した。

株周と葉緑素計による葉緑素値(SPAD)から窒素吸収量を予測する方法にはかなり高い精度があることが報告されている²⁾。株周から求めた株体積と地上部DWには高い正の相関が認められている^{2,10)}。ところが、その回帰直線は山形県(品種ササニシキ)と鳥取県(品種コシヒカリ)では異なっている。寒地である山形における回帰直線の傾きの方が大きく、同じ株体積であってもDWが大きくなった。このことから株体積と地上部DWの関係は肥培管理や栽培環境の影響を受けると考えた。寒地では栄養生長期が低温であること、土壌由来の窒素が幼穂形成期頃に急速に発現することなどから、暖地とは水稻の窒素吸収パターンが異なると考えられている¹¹⁾。今回の実験では窒素吸収パターンの違いを施肥方法に反映させた実験によって、窒素吸収パターンによる水稻の生育の違いが、株体積とDWの関係の地域差に関与している可能性を検討した。

この実験では、性格の大きく異なる4つの施肥方法を設け、株体積とDWの関係を明らかにしようとした。コシヒカリよりも耐肥性が強いので、性格の大きく異なる4つの施肥法でも支障なく栽培できるが、偏穂数型で窒

素施肥によって，分けつ数などの稲の姿の大きく変わる日本晴を供試した。

その結果，この報告では4つの異なる施肥法間でも株周と草丈から求めた株体積で地上部DWが予測でき，さらに株体積と完全展開第2葉（最上位完全展開葉の1つの下位の葉身）のSPADから地上部の窒素保有量（Ng）をかなり高い精度で予測できたことを報告する。

材料および方法

1. 栽培の概略

1992年に水稻日本晴を供試した。32日間，箱育苗した苗を栽植密度22.2株/m²（栽植間隔15×30cm）1株2本植えて5月16日に移植した。窒素施肥方法の異なる4つの処理区を設けて，2反復の乱塊法で実験を行った。施肥方法は第1表のように，基肥のみの区（B区），V字稲作区（V区），後期重点型追肥区（L区），中間期追肥区（M区）の4つである。

2. 測定項目とその方法

7月6日（最高分けつ期），7月16日（2次枝梗分化期），7月27日（穎花分化後期），8月5日（減数分裂期）に各反復ごとに8株ずつ株周，草丈，群落の葉色（群落葉色）を測定した。その翌日に同じ株を抜き取り，分けつ数とSPADを測定したあと，葉身，葉鞘および稈（茎），枯死葉に分け，器官別DWを測定した。

株周は圃場において熊谷らの方法により，地上から約

5cm のところを測定した²⁾。群落葉色は富士葉色カラー
スケール（水稲用）で添付の説明書にしたがって測定し
た。SPAD はミノルタ葉緑素計 SPAD-501 を用いて、
中庸の茎の完全展開第2葉（最上位完全展開葉の1つ下
位の葉身）と完全展開第3葉について、1葉につき3回
測定し、そのモードを採用した。器官別DWはサンプル
を通風乾燥機で80℃で48時間以上乾燥したあと、電子天
秤で秤量した。このサンプルを粉碎後、セミマイクロケル
ダール法でN%を分析した。

3. 株周と葉色によるDWとNgの予測

今回、水稲の地上部が円柱であると仮定して、株周をL、
草丈をHとすると株体積は $\pi r^2 H = L^2 H / 4\pi$ となる。株体
積からDWを予測する式を単回帰分析から求めた。

結果

1. 生育経過

B区、V区の出穂期は8月10日、L区は11日、M区
は12日であり、施肥方法は出穂期などの発育段階にほと
んど影響しなかった。処理区の間で、最高分けつ期の分
げつ数は26.8-34.0に、草丈は47-55cmにわたった。減
数分裂期では分けつ数は20.5-29.3に、草丈は85-97cm
にわたった。このように窒素施肥パターンを変える処理
によって、日本晴の生育を大きく変化させることができ
た。

2. 株体積によるDWの予測

株体積と葉身DW，茎DWあるいは地上部DWとの間の相関関係をそれぞれのサンプリング日ごとに調べた結果，4回のサンプリングの相関係数は葉身DW，茎DW，地上部DWそれぞれ0.700～0.809，0.663～0.751，0.763～0.798となった。各サンプリング日の間に特徴的な違いはなかったため，4回のサンプリングを合わせて回帰分析した。葉身DW，茎DW，地上部DWについてそれぞれ株体積との相関係数は0.916**，0.884**，0.908**となった（第1，2，3図，**は1%水準で有意であることを示す）。

草丈と分げつ数の積（草丈×分げつ数）から地上部DWを予測する方法は従来からよく使われてきた。地上部DWと草丈×分げつ数の相関係数は4回のサンプリングそれぞれ，0.788**，0.794**，0.640**，0.828**であった。しかし，4回のサンプリングをまとめた場合，相関係数は0.715**とあまり高くなかった。分げつ数は最高分げつ期（今回の実験では7月10日頃）以降減少するのに対して，DWはこのころ盛んに増加するからであろう。

減数分裂期ごろ（今回の実験では8月5日前後）になると株体積はそれほど増加しないのにDWの増加は進むので，4回のサンプリングを合わせた回帰式（ $DW = 0.0268 \pi r^2 H + 3.21$ ）の相関係数（0.908**）より，最後のサンプリングを除いた3回のサンプリングの回帰式（ $DW = 0.0220 \pi r^2 H + 5.16$ ）の相関係数（0.926**）の方が高くなった。

相関係数は両者の間の関係の強さを示すだけである。予測のために回帰式を用いたときには予測の精度を見積もる必要がある。そこで島根県の慣行栽培に近いV区の幼穂形成期の株体積(約1100, 草丈75cm, 株周13.5cm, 分けつ数30程度の稲株)から予測したDWの95%信頼区間を求めた。その結果, 地上部DWは4回のサンプリングから得た回帰式の場合, $32.65 \pm 10.44\text{g}$, 3回のサンプリングから得た回帰式の場合, $29.41 \pm 7.04\text{g}$ となった。誤差率はそれぞれ16.2%, 10.9%である。幼穂形成期のDWの誤差率は10~20%ぐらいあるので, 株周によるDWの予測は多様な施肥法にも対応でき, 十分な精度を持つと結論できる。

3. SPADあるいは葉色による地上部N%の逆推定

(1) SPADと地上部N%の関係

4回のサンプリングをまとめた場合, 完全展開第2葉のSPADは葉身N%との間に高い正の相関関係($r=0.916^{**}$)があった(第4図)。完全展開第3葉のSPADと葉身N%との間の相関関係($r=0.845^{**}$)は, 完全展開第2葉の場合に比べると低くなった。稲田¹²⁾によると水稻の栄養診断を目的とした葉色測定の場合, 一部で完全展開第3葉を用いる以外は, 完全展開第2葉を用いている。これは完全展開第2葉がイネの光合成をはじめとする生理的機能の大半を担っている上位3葉のもっとも平均的な葉身であるからである。

しかし, 両者の関係を直線よりも対数曲線の方がよく

近似した。すなわち対数曲線で表すと，完全展開第2葉の S P A D と葉身 N % の寄与率は $R^2=0.894^{**}$ となった。完全展開第3葉についても同じ結果を得た。しかし，その寄与率 ($R^2=0.751^{**}$) は完全展開第2葉に比べると低かった。

地上部 N % は葉身の N % に強く支配されているので，4回のサンプリングをまとめた場合，完全展開第2葉の S P A D と地上部 N % には高い正の相関関係 ($r=0.921^{**}$) が認められた (第5図)。葉身の場合と同様に対数曲線の方が両者の関係をよく近似した (寄与率 $R^2=0.915^{**}$) 。

(2) 群落葉色と地上部 N % の関係

4回のサンプリングをまとめた場合，群落葉色は葉身 N % との間に高い正の相関関係 ($r=0.720^{**}$) にあった (第6図)。これは完全展開第2葉の S P A D との相関係数よりは低くなった。

群落葉色と葉身 N % との間関係は直線よりも対数曲線で近似する方がよかった。対数曲線で近似したときの寄与率は $R^2=0.564^{**}$ となった。群落葉色は完全展開第2葉の S P A D に比べると，葉身の N % の予測精度が低いようである。

群落葉色と地上部 N % との関係は直線 ($r=0.703^{**}$) よりも対数曲線 ($R^2=0.547^{**}$) の方がよく近似した (第7図)。

4. 株体積と S P A D あるいは葉色による地上部 N g の

逆推定

地上部 N_g は，地上部 DW と地上部 $N\%$ の積であるから，1. と 2. の結果から株体積と $SPAD$ あるいは群落葉色の積から地上部 N_g を逆推定できると考えた。完全展開第 2 葉の $SPAD$ と株体積の積と地上部 N_g との間の相関係数（第 8 図）は 0.888^{**} ，群落葉色と株体積の積と地上部 N_g との間のそれは 0.872^{**} とかなり高い値を得た。

地上部 $N\%$ と完全展開第 2 葉の $SPAD$ との間の相関に比べて地上部 $N\%$ と群落葉色との相関は低かったにもかかわらず，完全展開第 2 葉の $SPAD$ と株体積の積と地上部 N_g との間の相関係数と群落葉色と株体積の積と地上部 N_g との間のそれにはほとんど差がなかった。これは DW と地上部 N_g との間に高い正の相関関係があったからである。すなわち今回の実験の範囲では，地上部 $N\%$ の範囲が狭いので， DW を精度高く予測できれば地上部 N_g も精度高く逆推定できたものと考えた。

考察

従来の研究^{2,7,10)}から株体積を用いて高い精度で地上部 DW を予測できることが知られている。しかし，これらの研究では施肥方法が明らかにされていないので，多様な施肥方法のもとでも株体積から精度高く地上部 DW を予測できるかわからなかった。今回の実験では基肥だけしか与えない場合から後期重点追肥区まで非常に幅広

い施肥法の間で，株体積の有効性を示せた。

しかし，穂ばらみ期にはいると幼穂の充実が株周に反映しないので，すべての発育段階で回帰式をひとくくりにするのは無理があった。そのため出穂前 35～15 日までをひとまとめにした回帰式から地上部 DW を予測するのが実用的である。この結果は熊谷ら²⁾の結果と同じである。窒素施肥の時期と量を決定するための生育診断は，日本晴では出穂 25 日前頃に，コシヒカリでは出穂 20 日前頃に行うのが一般的であるので，出穂前 35～15 日でひとまとめにして地上部 DW を予測できることで実用的には十分である。

従来の研究を比較すると，株体積と地上部 DW の関係を表す回帰式の傾きに地域差がみられた。すなわち山形県のササニシキでの調査²⁾では，回帰式の傾きは出穂前 35～23 日の 2 回の調査では 0.0280，出穂前 22 日～穂ぞろい期では 0.0251 であった。一方，山形の結果に対して，鳥取県のコシヒカリ¹⁰⁾では幼穂形成期の調査において，0.013 となった。今回の実験では 4 回のサンプリングそれぞれについての傾きは 0.0138～0.02043 と大きく変化した。しかし，最後の減数分裂期のサンプリングを除いた 3 回をまとめた回帰式の傾きは 0.0220 となり，山形での回帰式の傾きに近くなった。山形県での調査では，回帰式は 2 回のサンプリングをまとめている。鳥取での調査は幼穂形成期の 1 回限りである。今回の調査でも幼穂形成期に近い 7 月 16 日の調査での傾きは 0.016 と鳥取の調

査に近かった。このことから1つの発育段階だけの調査の傾きといくつかの発育段階をまとめた傾きの違いが、山形と鳥取の調査での傾きの違いになったのではないかと考えた。このことから、いくつかの時期をまとめることで精度があがるだけでなく、予測の安定さも向上するので、株体積でDWを予測する予測式を求めるときは、出穂前35～15日の間でなるべく幅広い時期について調査するのが望ましいと考える。しかしながら、品種によって株体積と乾物重の関係に違いがある可能性は否定できない。鳥取の場合、コシヒカリを用いており、それよりも耐肥性の強いササニシキ、日本晴と同じ回帰式になるとは今回の実験だけからは必ずしもいえない。コシヒカリでいくつかの発育段階において調査をし、傾きを求める実験をする必要があるだろう。

葉身N%さらに地上部N%をSPADあるいは群落葉色から逆推定できた。群落葉色よりは完全展開第2葉のSPADの方がより精度の高いN%の逆推定法であった。どちらの場合でも対数曲線でよく近似できた。SPADあるいは群落葉色と葉身N%の関係は生育ステージによって大きく変化する¹²⁾。両者間の相関関係は分けつ期から幼穂形成期までは高いが、穂ばらみ期には一時的に低下し、登熟期間に再び高くなる¹²⁾。回帰式からみると生育期間を特徴的な3つの相に分けることができ、N%が3%以下になる幼穂形成期から登熟初期までの期間では回帰係数はかなり小さくなる¹²⁾。今回の調査は幼穂形成期

前後にかけて行ったので、このような指摘と同様の傾向がみられた。

以上のことから、株体積と完全展開第2葉のSPADあるいは群落葉色の積から、窒素施肥をする上で最も重要な情報である地上部N_gを逆推定できた。しかし、今回の実験ではDWとN_gの間には高い正の相関が見られたので、DWを高い精度で予測できれば十分であった。幼穂形成期の乾物増加が、窒素吸収を上回る条件ではN%が急速に低下することが多い。そのためDWが地上部N%に支配される傾向がある。したがって、寒地あるいは晩植で、DWが大きくなり、地上部窒素含有率が高いイネの場合には地上部N_gの逆推定精度が十分ではない可能性がある。このような水稲についても地上部N_gの逆推定精度を検討する必要があるだろう。

摘要

窒素追肥上、最も重要な幼穂形成期での稲体地上部窒素保有量(N_g)を株体積と葉緑素値(SPAD)あるいは群落葉色から診断する技術を多様な施肥方法間で応用できるかを調査した。

1. 株周(L)と草丈(H)から求めた株体積($L^2H/4\pi$)によって最高分げつ期から穎花分化後期までの地上部乾物重を精度高く予測できた。

2. 完全展開第2葉のSPADあるいは群落葉色から幼穂形成期の地上部窒素濃度を逆推定できた。

3. 株体積と完全展開第2葉あるいは群落葉色の積から幼穂形成期の地上部 N_g を逆推定できた。

引用文献

- 1) Wiegand, C., M. Shibayama, Y. Yamagata, and T. Akiyama: Spectral observations for estimating the growth and yield of rice, *Jpn. J. Crop Sci.*, 58(4):673-683, 1989.
- 2) 熊谷勝巳・中西政則・原田康信：非破壊的手段による水稻窒素吸収量の推定と窒素吸収パターンの類型化，山形農試研報，25:23-34, 1991.
- 3) 丹野文雄・武田敏昭・甲斐敬市郎：水稻の栄養診断と予測技術に関する研究，第4報 葉色による栄養診断手法の検討，福島農試研報，21:61-72, 1982.
- 4) 中鉢富夫・浅野岩夫・及川 勉：葉緑素計による水稻（ササニシキ）の窒素栄養診断，土肥誌，57(2):190-193, 1986.
- 5) 中鉢富夫・菊地 修・塩島光洲：ササニシキの簡易窒素栄養診断技術確立に関する研究，第1報 葉色板による窒素栄養診断，宮城農セ研報 49:69-77, 1982.
- 6) 中鉢富夫・菊地 修・塩島光洲：ササニシキの簡易窒素栄養診断技術確立に関する研究，第2報 葉色値および葉鞘染色比による生産形質，収量構成要素の推定，宮城農セ研報 49:79-85, 1982.
- 7) 佐藤俊夫：山形県における水田土壌の窒素肥沃性並び

に水稲の生育，窒素栄養診断，山形農試特別研報 18:1-57,
1990.

8) 松島省三・松崎昭夫・富田豊雄：水稲収量の成立原理
とその応用に関する作物学的研究，第101報 水稲個体
群の葉色表示法について(1)，日作紀 39(1):231-236,
1970.

9) 高橋保一：庄内・高橋式 イネの生育診断と多収栽培，
農山漁村文化協会，東京，141-195，1986.

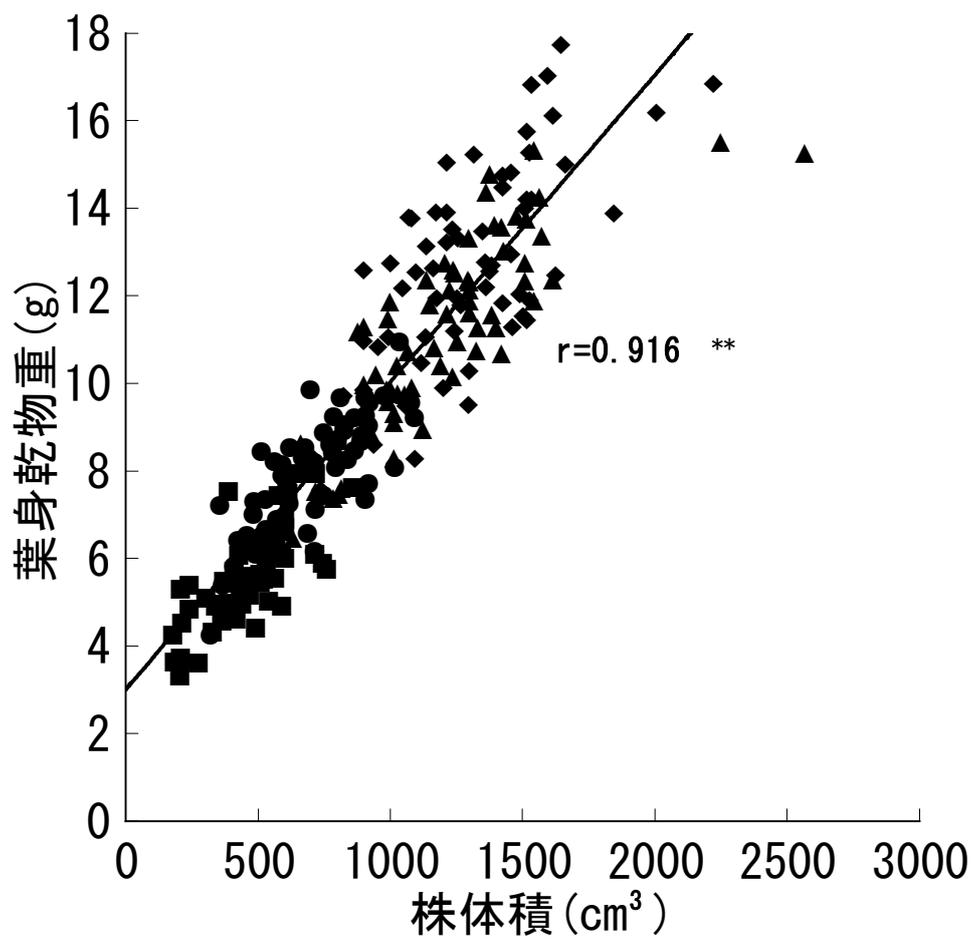
10) 湯谷一也・安養寺寿一：コシヒカリの幼穂形成期に
おけるヨード反応・株周測定による窒素保有量の簡易推
定法について，日作中支集録 32:10-11，1991.

11) Hasegawa, T., Y. Koroda, N.G. Seligman, and T.
Horie: Response of spikelet number to plant nitrogen
concentration and dry weight in paddy rice, Agron. J.,
86:673-676, 1994.

12) 稲田勝美：“緑を測る” [4] - 葉色の測定とその
栄養・生育診断への利用 - ，農及園 68(12):1308-1314,
1994.

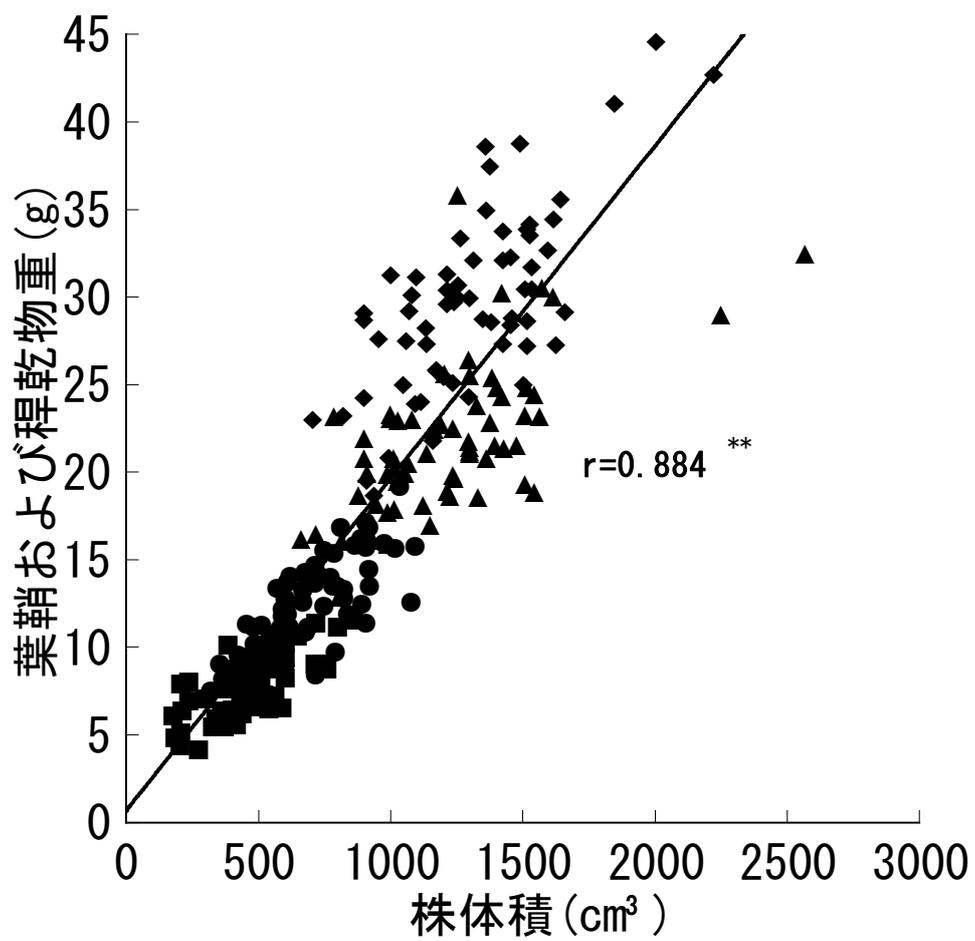
第1表 施肥量とその時期（単位 窒素成分g/m²）

処理区	施肥月日	基肥		分けつ肥		穂肥		実肥	
		5. 7	5. 29	7. 1	7. 8	7. 18	7. 28	8. 6	8. 16
基肥のみの区（B区）		8	—	—	—	—	—	—	—
V字稲作区（V区）		3	3	—	—	—	2	2	2
後期重点型追肥区（L区）		2	—	—	2	3	—	3	—
中間期追肥区（M区）		2	—	6	—	—	—	—	—

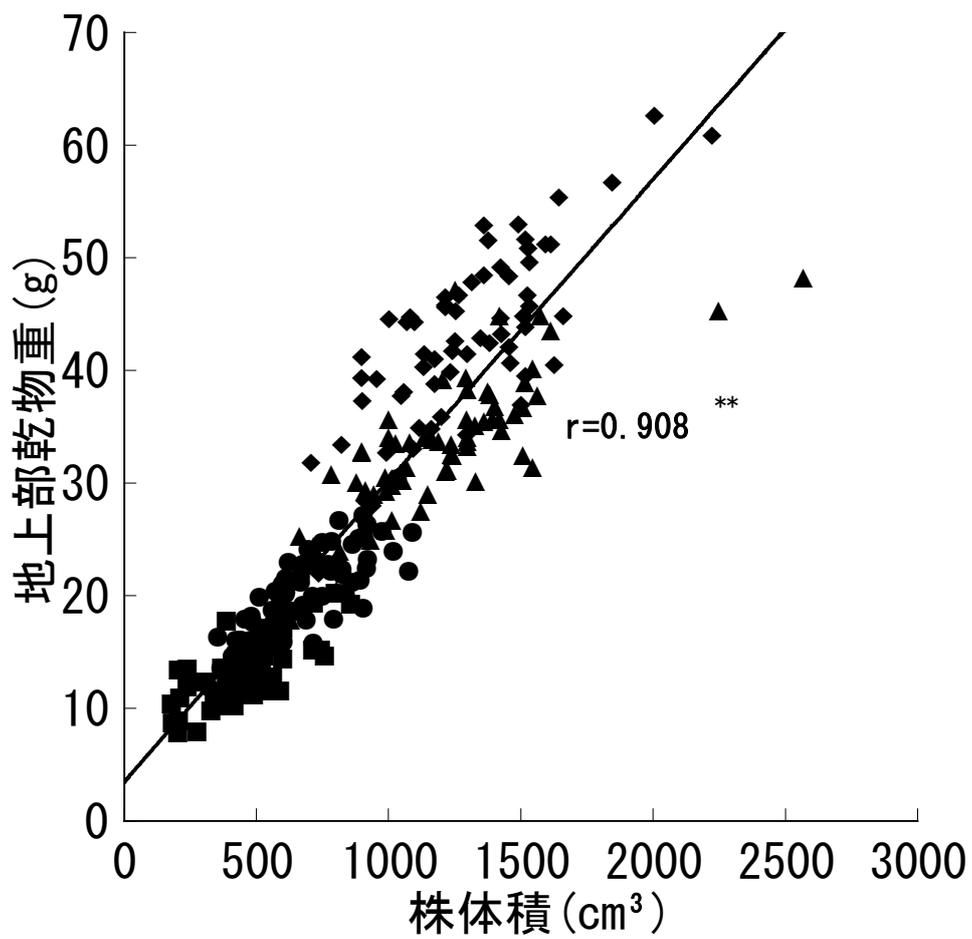


第1図 葉身乾物重と株体積の関係

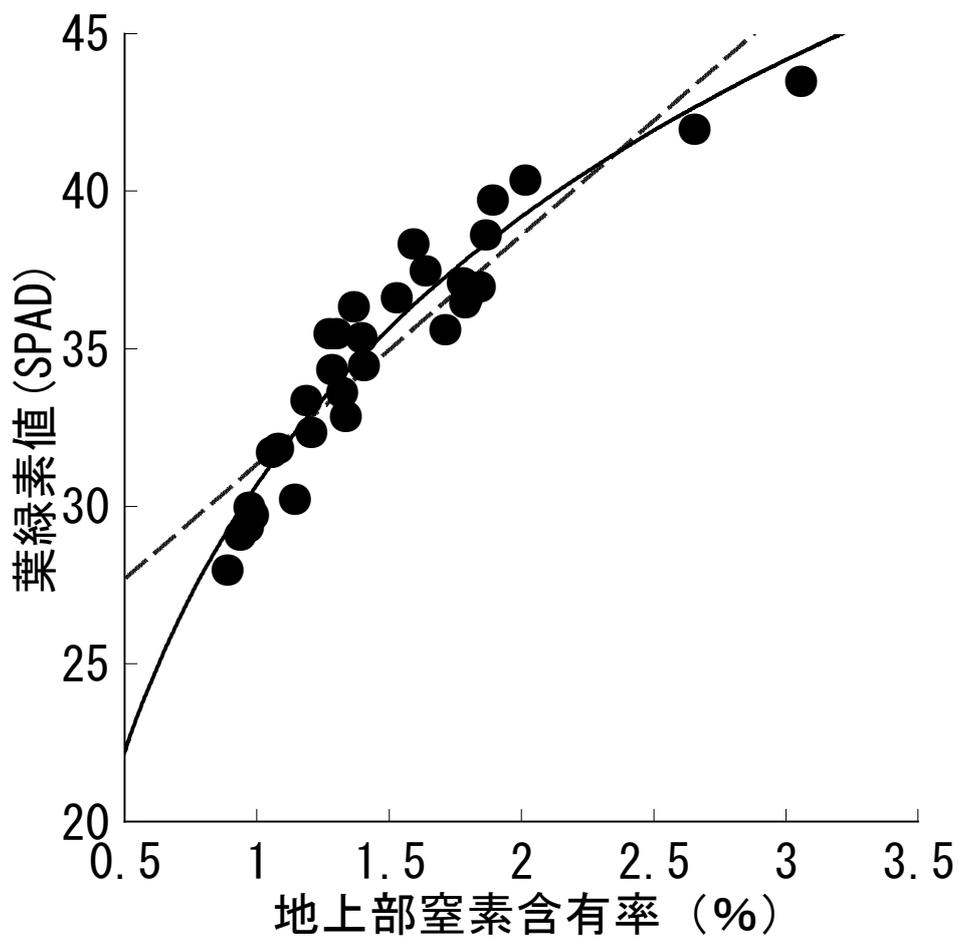
図中の記号は株体積を調査した日を表す：■ 7月6日，● 7月16日，▲ 7月27日，◆ 8月6日



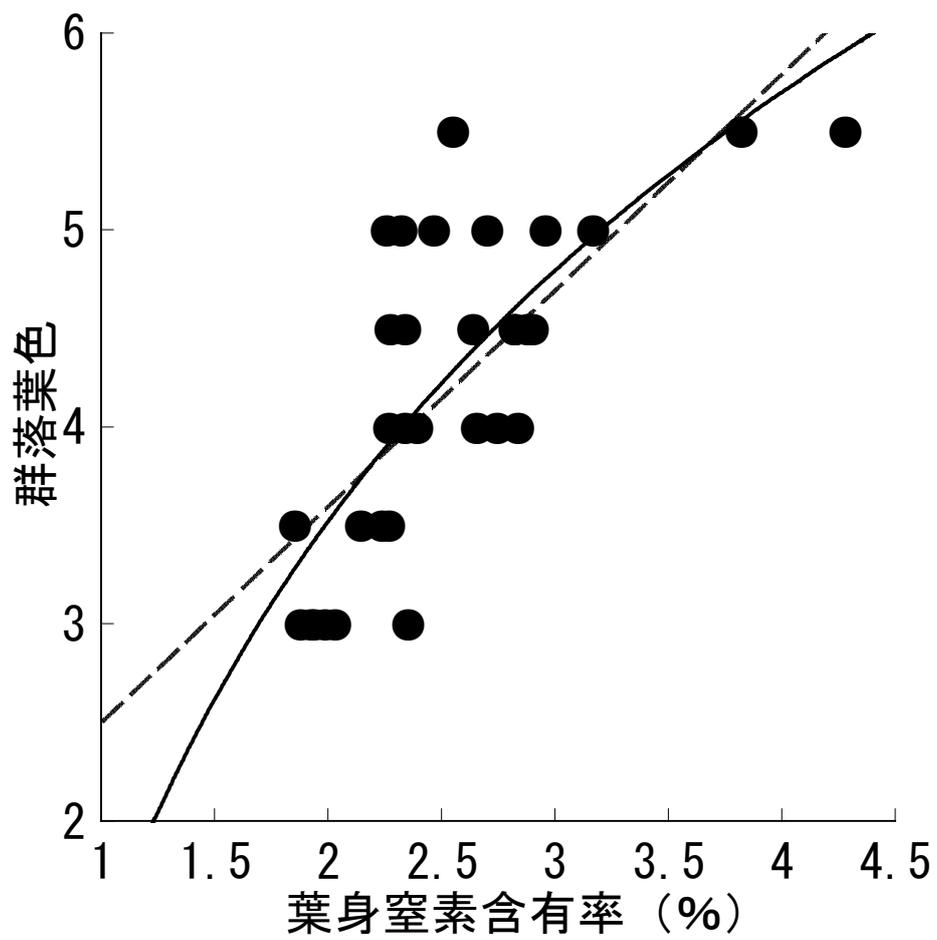
第2図 葉鞘および稈乾物重と株体積の関係
図中の記号は第1図と同じ



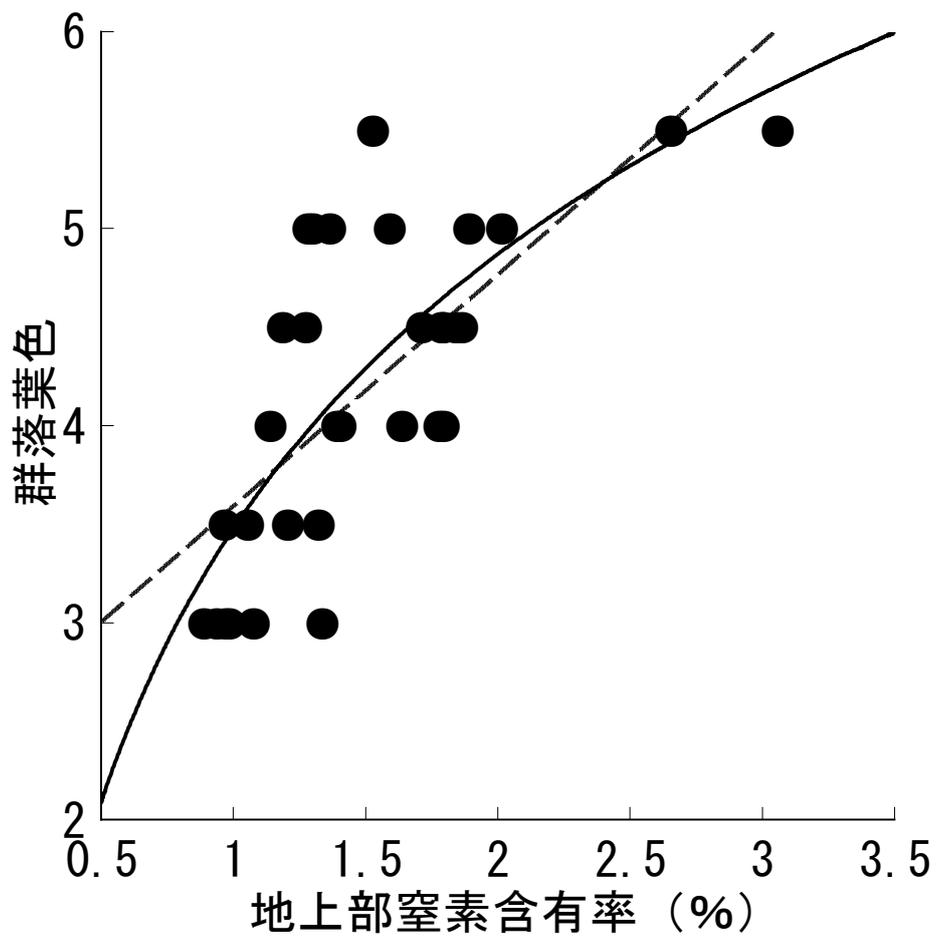
第4図 完全展開第2葉の葉緑素値と葉身窒素含有率の関係
 実線は対数による近似曲線，点線は回帰直線である。



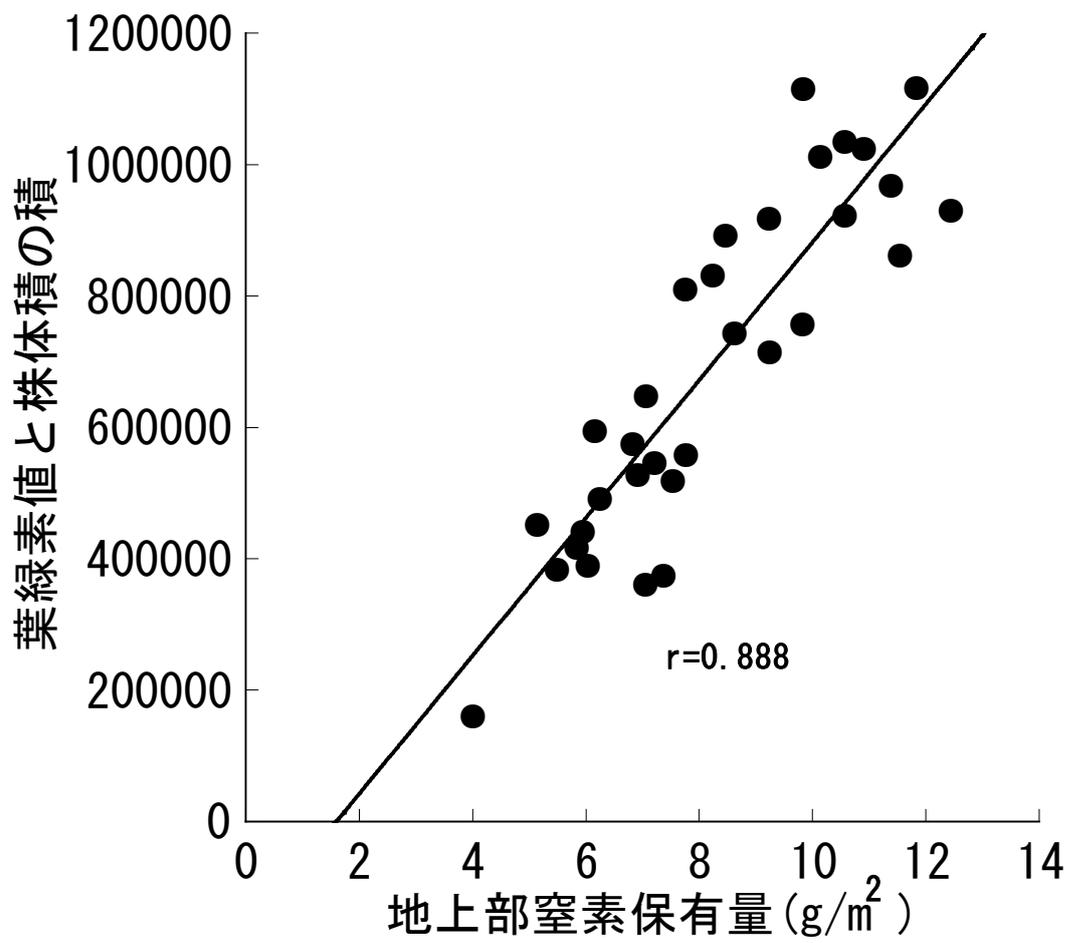
第5図 完全展開第2葉の葉緑素値と地上部窒素含有率の関係
 実線は対数による近似曲線，点線は回帰直線である。



第6図 群落葉色と葉身窒素含有率の関係
 実線は対数による近似曲線，点線は回帰直線である。



第7図 群落葉色と地上部窒素含有率の関係
 実線は対数による近似曲線，点線は回帰直線である。



第8図 完全展開第2葉の葉緑素値と株体積の積と地上部窒素保有量との関係