

水稻における耐倒伏性に関係する性質の地上部環境条件による 変化とその品種間差異*

大川 泰一郎・富所 康広・石原 邦

(東京農工大学農学部)

1993年4月30日受理

要旨 : 水稻の耐倒伏性と密接に関係している稈の断面係数および曲げ応力の異なる3品種(コシヒカリ, 台中189号, 密陽23号)を用いて, 地上部の環境条件を変化させたとき, 倒伏程度, 倒伏指数と稈基部の葉鞘付挫折時モーメントに関係する断面係数, 曲げ応力, 稈の細胞壁構成成分などがどのように変化するのか, この要因が品種によって異なるかどうか検討した. 地上部の環境条件を変化させる処理として, 最高分げつ期に南側数列を刈り取ることによって, 個体群内部の水稻を個体群周辺部にさらす処理区(周辺区), 最高分げつ期から出穂期まで遮光する処理区(遮光区)を設けた. 3品種の倒伏程度, 倒伏指数は, 対照区に比べて周辺区で小さく遮光区で大きくなった. この変化には稈基部の葉鞘付挫折時モーメントの変化が密接に関係し, 葉鞘付挫折時モーメントの主要構成要素である稈の挫折時モーメントは, 対照区に比べて周辺区で大きく遮光区で小さかった. その変化の程度には品種間差異があり, 稈の挫折時モーメントの小さいコシヒカリは周辺区で変化が大きく, 稈の挫折時モーメントの大きい台中189号, 密陽23号は遮光区で変化が大きかった. さらに, 稈の挫折時モーメントを断面係数と曲げ応力と分けて検討した. その結果, 断面係数が変化したのは密陽23号の遮光区のみで, 密陽23号の周辺区およびコシヒカリ, 台中189号の両区の稈の挫折時モーメントは, 曲げ応力によって変化したことがわかった. 3品種とも, 曲げ応力は細胞壁を構成するグルコース, キシロース, リグニン密度と密接に関係したが, この関係は品種によって異なった. すなわち, 断面係数の大きい密陽23号に比べて台中189号, コシヒカリではキシロース, リグニン密度の増加に伴う曲げ応力の増加程度は大きく, 台中189号は最も曲げ応力の増加割合が大きかった.

キーワード : 環境条件, 細胞壁構成成分, 水稻, 耐倒伏性, 品種間差異, 曲げ応力, リグニン.

Changes in Physical and Chemical Characteristics of Culm Associated with Lodging Resistance in Paddy Rice under Different Growth Conditions and Varietal Difference of Their Changes : Taichiro OOKAWA, Yasuhiro TODOKORO and Kuni ISHIHARA (*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183, Japan*)

Abstract : The present investigation was undertaken to examine which physical and chemical characteristics of the culm associated with lodging resistance changed under different growth conditions using three varieties. Three different conditions were prepared : (1) "Border" (Border of the rice population was made by reaping several rows in the south side at the maximum tiller number stage, and rice plants were grown under strong light intensity and low humidity compared with "Control".), (2) "Shade" (50% Shade of the population was treated from the maximum tiller number stage to heading time) and (3) "Control" (Untreated rice population). Change in the degree of lodging and the lodging index was largely dependent on variation in the breaking strength of the basal internode. The breaking strength was much larger in "Border" and much smaller in "Shade" than that in "Control" for all varieties. The degree of change in the breaking strength was more pronounced in Koshihikari which has a small breaking strength, however, the change was smaller in Taichung 189 or Milyang 23 which have large breaking strength. With the exception of "Shade" in Milyang 23 with a large section modulus, these changes in the breaking strength were not due to the section modulus but rather to the bending stress. The density of glucose, xylose and lignin were correlated with the bending stress in each variety, and their correlations were the closest on Taichung 189. The degree of the increase in bending stress accompanied by a concomitant increase in the densities of xylose and lignin was much larger in Taichung 189 and Koshihikari than in Milyang 23, and the efficiency of the increase in bending stress to the increase in density of lignin was the highest in Taichung 189.

Key words : Bending stress, Cell wall component, Growth condition, Lignin, Lodging resistance, Paddy rice, Varietal difference.

著書^{10,11)}は, 国内外多数の水稻品種を用いて耐倒伏性の品種間差異について検討した. その結果, 倒伏しやすい品種は, 稈基部の挫折強度を表す葉鞘

付挫折時モーメントが小さく, 倒伏しなかった品種は稈基部の葉鞘付挫折時モーメントが大きかった. 葉鞘付挫折時モーメントの大きい要因は品種によって異なっていた. すなわち, 密陽23号では稈が太く断面係数が著しく大きいことによって, 台中189号,

* 大要は, 第193回講演会(1992年4月)において発表. 本研究の一部は文部省科学研究費によった.

台中 67 号ではリグニンなどの細胞壁構成成分の密度が大きく曲げ応力が大きいことによって、アケノホシでは葉鞘補強度が大きいことによって、それぞれ稈基部の葉鞘付挫折時モーメントが大きいことが明らかとなった。

水稻の倒伏は、環境条件によって大きく影響されることが報告されている^{5,14,15}。生育期間中の日照の多い年には、収量が高く穂重が重いのに倒伏はあまり認められないが、一方日照の少ない年は、収量が低く穂重が軽くても倒伏の多いことが知られている¹³。また、光がよく当たる畦際の水稲は、穂重が重いのに倒伏しにくいことが報告されている^{3,5,15}。このような倒伏程度の相違には、稈基部の挫折強度の違いが関係していることが指摘されている¹⁵。

地上部の環境条件によって、倒伏程度が変化したときに、稈基部の葉鞘付挫折時モーメントやそれに関係する断面係数、曲げ応力および稈の細胞壁構成成分などが変化するかどうか、その変化の相違に品種差異があるかどうかについての研究は少ない。

そこで本研究では、前報^{10,11}において供試した品種の中で断面係数、曲げ応力の異なる 3 品種を用いて、地上部の環境条件を変えるため、最高分げつ期に水田南側の畦畔から個体群内部に向かって刈り取り、個体群内部の水稲を個体群の周辺部にさらす処理と、最高分げつ期から出穂期まで遮光する処理とを行い、このような処理を行った水稲と行なわなかった水稲の倒伏程度、倒伏指数と稈基部の葉鞘付挫折時モーメントを比較した。さらに、葉鞘付挫折時モーメントに影響する断面係数、曲げ応力と稈の構成成分の相違を処理間で比較検討した。

材料と方法

本実験に用いた品種は倒伏しやすいコシヒカリ、曲げ応力は大きくリグニン密度の大きい台中 189 号および曲げ応力、リグニン密度は小さいが断面係数の大きい密陽 23 号の 3 品種であった。栽培方法は前報¹¹の通りで、1991 年に東京農工大学農学部附属農場に箱育苗した苗を栽植密度 22.2 株/m² で移植し、慣行に従って常時湛水状態で生育させた。

各品種についてそれぞれつぎの 3 区を設けた。すなわち、①第 V 節間が伸長を開始する直前の最高分げつ期に、水田南側の畦畔から個体群内部に向かって 10 例刈り取り、個体群内部に生育した水稲を収穫

期まで個体群の周辺部にさらした区（以下、周辺区という）、②個体群内部に生育した水稲を最高分げつ期に遮光率 50% の黒寒冷紗で覆い、出穂期まで遮光した区（以下、遮光区という）、および ③個体群内部に生育した水稲で、このような処理を行わない区（以下、対照区という）を設けた。これらの処理は、コシヒカリが 7 月 1 日、密陽 23 号と台中 189 号は 7 月 9 日より開始した。なお、出穂日は、対照区および周辺区ではコシヒカリが 8 月 12 日、密陽 23 号が 8 月 19 日、台中 189 号が 8 月 20 日であり、遮光区では 3 品種とも出穂がこれより 2 日遅れた。

登熟中期(それぞれの品種、処理区の出穂後 15 日)に、この 3 区に生育した水稲の株から主稈 10 本を採取し、稈長、節間長、穂重を測定し、直ちに万能材料試験機テンシロン（オリエンテック社製）を用いて、田原ら¹⁵の方法により支点間距離 4 cm とし稈基部の第 V 節間（穂首節間を第 I 節間とする）の挫折荷重を測定した。挫折荷重を測定後、挫折部近くの稈横断面を中空楕円とみなし組織断面積を求めた。測定に用いた第 V 節間を 105°C の定温乾燥機で乾燥し、乾物重を測定した。乾物密度は、第 V 節間の乾物重を節間長と断面積との積で除して求めた。倒伏指数、葉鞘付挫折時モーメント、葉鞘補強度、稈の挫折時モーメント、断面係数および曲げ応力は、前報¹⁰と同様な計算式より算出した。

乾物重を測定した 10 本の稈の第 V 節間を振動ミルで 100 メッシュ以下に粉碎し、95% アルコール・ベンゼン混液で脂肪、可溶性糖類を除いた。得られた脱脂試料は、細胞壁構成糖類、デンプンおよびリグニンの分析に用いた。細胞壁構成糖類、デンプン、リグニンは、前報¹¹と同様の分析方法で行った。すなわち、細胞壁構成糖類の分析は Bochar dt ら¹¹に準じる方法で、脱脂試料 350 mg を硫酸で加水分解し、単糖をアルディトール・アセテート誘導体とした後、これをガスクロマトグラフィー (GC、島津製作所製 GC 9-A) により、アラビノース、キシロース、マンノース、ガラクトース、グルコースに分けて定量した。デンプンは、Dekker ら²¹によるアルカリ抽出—グルコアミラーゼ—グルコースオキシダーゼ法に準じて定量した。なお、細胞壁構成多糖類由来のグルコースは、Bochar dt ら¹¹の方法によって得られたグルコース値から、デンプン由来のグルコース値を差し引いて求めた。リグニンは、クラークソン法²²により定量した。

注) 図表では、対照的、周辺区、遮光区をそれぞれ “Control”, “Border”, “Shade” とした。

結 果

各区の倒伏程度、稈長および穂重を第1表に示した。対照区は前報¹⁾の結果と同様で、稈長の長いコシヒカリは著しい倒伏が認められ倒伏程度は5、長稈の台中189号と短稈の密陽23号は倒伏せず倒伏程度は0であった。周辺区は、3品種ともに対照区に比べて穂重は重かったが、稈長が約10 cm 短く倒伏

程度は0であった。一方、遮光区は3品種とも対照区に比べて穂重は小さく稈長も短かったが、倒伏程度はコシヒカリが5で著しく倒伏、台中189号が3で中程度の倒伏、密陽23号は倒伏しなかった。

倒伏程度5,3以上の品種の倒伏指数は1.4以上であったので、倒伏指数の構成要素である地上部モーメントと葉鞘付挫折時モーメントについて品種間で比較した(第2表)。周辺区では、3品種とも地上部

Table 1. Comparison of the degree of lodging, the culm length and the ear weight of the main stem immediately after typhoon hitting during the ripening stage.

| Variety | Plots | Degree of lodging | Culm length (cm) | Ear weight (g F. W.) |
|--------------|-----------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Koshihikari | Control ²⁾ | 5 ¹⁾ | 106.6 | 3.2 |
| | Border ³⁾ | 0 | 98.1*** | 3.9* |
| | Shade ⁴⁾ | 5 | 96.2*** | 1.4*** |
| Taichung 189 | Control | 0 | 102.0 | 4.7 |
| | Border | 0 | 93.0*** | 5.6*** |
| | Shade | 3 | 98.9 | 1.4*** |
| Milyang 23 | Control | 0 | 78.4 | 4.8 |
| | Border | 0 | 65.4*** | 6.7*** |
| | Shade | 0 | 69.5*** | 2.4*** |

1) 0 : no lodging, 5 : the most severe lodging.

2) No treated rice population.

3) Border of rice population was made by reaping several rows in the south side at 40 th day before heading, and rice plants were grown under strong light intensity and low humidity compared with control.

4) 50% shade of rice population by cheese cloth was treated from 40 th day before heading to heading time.

*, **, *** Significantly different from the control at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Table 2. Comparison of the lodging index and the physical characteristics related to the lodging resistance.

| Variety | Plots | Lodging index | WP ¹⁾ (g·cm) | MLS ²⁾ (g·cm) |
|--------------|---------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| Koshihikari | Control | 1.8 | 2135 (100) ³⁾ | 1183 (100) |
| | Border | 1.1*** | 2263 (106) | 2096 (177)*** |
| | Shade | 1.5*** | 1249 (59)*** | 860 (73)*** |
| Taichung 189 | Control | 1.2 | 2864 (100) | 2356 (100) |
| | Border | 1.1 | 3207 (112)* | 2946 (125)*** |
| | Shade | 1.4* | 1792 (63)*** | 1318 (56)*** |
| Milyang 23 | Control | 1.1 | 2605 (100) | 2503 (100) |
| | Border | 1.1 | 3459 (133)** | 3169 (127)* |
| | Shade | 1.0* | 1508 (58)*** | 1590 (64)*** |

1) WP: Bending moment by whole plant added to the basal internode.

2) MLS: Bending moment of the basal internode with leaf sheath at breaking.

3) Percent values relative to the control.

*, **, *** Significantly different from the control at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

モーメント、葉鞘付挫折時モーメントともに対照区に比べて大きかった。台中 189 号と密陽 23 号では、地上部モーメントと葉鞘付挫折時モーメントの大きくなる割合がほぼ等しかったので、倒伏指数はほとんど変わらなかった。コシヒカリでは地上部モーメントが大きくなる割合よりも葉鞘付挫折時モーメントが大きくなる割合が 2 倍と著しく大きかったので、倒伏指数は小さくなり、台中 189 号、密陽 23 号の対照区、周辺区とほぼ等しくなった。遮光区では、3 品種とも地上部モーメント、葉鞘付挫折時モーメントともに対照区に比べて小さかった。密陽 23 号では地上部モーメントと葉鞘付挫折時モーメントの小さくなる割合がほぼ等しかったので、倒伏指数は変わらず、コシヒカリでは地上部モーメントが小さくなる割合が大きかったので、倒伏指数はやや小さくなった。台中 189 号では、葉鞘付挫折時モーメントは、地上部モーメントが小さくなる割合よりも約 2 倍小さくなり、倒伏指数は 1.4 となり、コシヒカリの対照区、遮光区に近い値を示した。

以上の結果をまとめると、葉鞘付挫折時モーメントが小さいため倒伏しやすいコシヒカリでは、周辺区の葉鞘付挫折時モーメントが大きくなる割合が大きかったので倒伏せず、一方、コシヒカリとは対照的に葉鞘付挫折時モーメントが大きい台中 189 号の遮光区では、葉鞘付挫折時モーメントが小さくなったので倒伏程度が大きくなった。密陽 23 号の周辺区、遮光区ともに、地上部モーメントと葉鞘付挫折時モーメントとが同じ割合で変化したので、倒伏指数は変わらず倒伏しなかった。

処理区の間で葉鞘付挫折時モーメントは変化し、その相違の程度は品種によって異なったので、葉鞘付挫折時モーメントの主たる構成要素である稈の挫折時モーメントを比較した(第 3 表)。周辺区では 3 品種ともに対照区に比べて大きくなったが、大きくなる割合は品種によって異なり、対照区の稈の挫折時モーメントが 864 g・cm と小さいコシヒカリで最も大きかった。一方、遮光区の稈の挫折時モーメントは、3 品種ともに対照区に比べて小さく、小さくなる割合は対照区の稈の挫折時モーメントがそれぞれ 1550, 1669 g・cm と大きい台中 189 号、密陽 23 号で大きく、コシヒカリでは小さかった。

つぎに、稈の挫折時モーメントを構成する断面係数と曲げ応力に分けて、処理区による相違を品種間で比較した。断面係数は、遮光区ではコシヒカリに比べて 2 倍以上大きい密陽 23 号のみ変化し、対照区の 85% となった。曲げ応力は、3 品種とも周辺区で大きく遮光区で小さくなった。品種間で比較すると、周辺区で大きくなる割合は台中 189 号に比べて、曲げ応力の小さいコシヒカリ、密陽 23 号で大きく、一方、遮光区で小さくなる割合は曲げ応力の大きい台中 189 号で最も大きかった。

以上のように地上部の環境条件の相違によって変化するのは密陽 23 号を除けば曲げ応力なので、曲げ応力の相違を細胞壁構成成分に着目して検討した(第 4 表)、まず稈のデンプンについてみると、3 品種とも対照区にはほとんどその存在は認められないが、曲げ応力の大きい周辺区、曲げ応力の小さい遮光区ではともに 10~20% デンプンが稈に蓄積され

Table 3. Physical properties of the basal (5th) internode.

| Variety | Plots | Bending moment of the culm (g・cm) | Section modulus (mm ³) | Bending stress (g/mm ²) |
|--------------|---------|---|--|---|
| Koshihikari | Control | 864 (100) [#] | 7.7 (100) | 1130 (100) |
| | Border | 1666 (190) ^{***} | 8.0 (104) | 2080 (184) ^{***} |
| | Shade | 595 (69) ^{***} | 7.5 (97) | 808 (72) ^{***} |
| Taichung 189 | Control | 1550 (100) | 10.3 (100) | 1515 (100) |
| | Border | 2282 (147) ^{***} | 10.4 (101) | 2207 (146) ^{***} |
| | Shade | 920 (59) ^{***} | 11.0 (107) | 844 (56) ^{***} |
| Milyang 23 | Control | 1669 (100) | 19.8 (100) | 848 (100) |
| | Border | 2588 (155) ^{***} | 19.0 (96) | 1361 (161) ^{***} |
| | Shade | 985 (59) ^{***} | 16.8 (85) ^{**} | 586 (69) ^{***} |

*, **, *** Significantly different from the control at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

#: Percent values relative to the control.

ていた。このように、曲げ応力とデンプン含有率との間に関係がないので、不溶性成分からデンプンを除いた細胞壁構成成分を100%としたときの成分割合を含有率とし、処理間で比較した。アラビノース、マンノース、ガラクトースなどの構成単糖の含有率は、3品種の各処理区とも小さく、その相違は小さかった。含有率の高いグルコース、キシロースおよび

リグニンについてみると、キシロースの含有率は密陽23号の対照区と周辺区でほぼ等しいことを除けば、対照区、周辺区、遮光区の順で小さくなった。グルコース、リグニンの含有率は周辺区で最も大きく、対照区、遮光区は小さい傾向があったが、台中189号のリグニンのように周辺区で最も小さく、また、コシヒカリ、密陽23号のグルコースのように対

Table 4. Composition of the cell wall materials in the fifth internode.

| Variety | Plots | Cell wall monosaccharide | | | | | Lignin | Starch |
|--------------|---------|--------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | | Arabinose % | Xylose % | Mannose % | Galactose % | Glucose % | | |
| Koshihikari | Control | 2.45±0.01 (2.46)* | 12.82±0.70 (12.89) | 1.37±0.30 (0.68) | 0.68±0.24 (1.38) | 34.33±0.71 (34.58) | 16.56±0.04 (16.65) | 0.60±0.42 |
| | Border | 1.93±0.05 (2.41) | 8.91±0.15 (11.13) | 1.57±0.17 (1.12) | 0.90±0.14 (1.96) | 30.47±0.03 (40.85) | 13.17±0.29 (16.46) | 22.20±0.80 |
| | Shade | 1.60±0.03 (2.04) | 8.20±0.47 (10.45) | 1.79±0.41 (0.59) | 0.46±0.02 (2.28) | 27.18±0.90 (37.67) | 10.90±0.22 (13.89) | 23.89±0.16 |
| Taichung 189 | Control | 2.03±0.10 (2.15) | 10.60±0.07 (11.22) | 1.84±0.26 (1.10) | 1.04±0.34 (1.95) | 32.26±0.59 (34.79) | 17.58±0.18 (18.61) | 6.12±0.11 |
| | Border | 1.42±0.06 (1.95) | 6.26±0.40 (8.59) | 1.72±0.23 (1.18) | 0.86±0.58 (2.36) | 22.77±0.88 (35.38) | 10.51±0.87 (14.42) | 30.15±0.05 |
| | Shade | 1.88±0.46 (2.35) | 6.03±0.01 (7.42) | 1.62±0.06 (1.12) | 0.90±0.06 (2.02) | 18.48±1.55 (25.80) | 13.05±1.01 (16.28) | 22.04±0.43 |
| Milyang 23 | Control | 2.33±0.18 (2.34) | 10.54±0.32 (10.58) | 1.90±0.06 (1.19) | 1.19±0.33 (1.91) | 28.19±0.81 (28.77) | 15.96±1.04 (16.03) | 0.46±0.46 |
| | Border | 2.26±0.16 (2.55) | 10.18±0.64 (11.48) | 1.87±0.12 (1.05) | 0.93±0.08 (2.11) | 29.47±1.65 (34.66) | 13.98±0.10 (15.77) | 12.59±0.64 |
| | Shade | 1.46±0.24 (1.88) | 5.12±0.52 (6.60) | 1.45±0.01 (1.30) | 1.01±0.05 (1.87) | 24.02±1.58 (34.14) | 9.85±0.45 (12.69) | 24.85±0.37 |

*Percent values relative to the cell wall materials (insoluble materials except starch).

Table 5. Comparison of the length, transverse section area, volume, dry matter and dry matter density in the fifth internode.

| Variety | Plots | Length (mm) | Transverse section area (mm ²) | Volume (mm ³) | Dry matter (mg) | Dry matter density (μg/mm ³) |
|--------------|---------|----------------|--|------------------------------|--------------------|--|
| Koshihikari | Control | 70.7 | 9.5 | 666.5 | 113.9 | 171.2 |
| | Border | 53.6*** | 9.9 | 523.6*** | 199.5*** | 383.6*** |
| | Shade | 70.3 | 9.8 | 686.4 | 131.0 | 194.4* |
| Taichung 189 | Control | 74.2 | 11.3 | 839.6 | 177.6 | 213.3 |
| | Border | 66.7* | 11.5 | 763.5 | 341.4*** | 452.2*** |
| | Shade | 85.9 | 12.0 | 1010.2** | 209.2* | 206.5 |
| Milyang 23 | Control | 55.2 | 16.3 | 898.6 | 154.4 | 173.6 |
| | Border | 42.6*** | 16.2 | 692.2*** | 204.1* | 309.5** |
| | Shade | 74.5*** | 15.1* | 1121.9** | 233.0** | 206.0* |

*, **, *** Significantly different from the control at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

Dry matter density of the fifth internode is divided the dry matter weight by the volume.

照区に比べて遮光区の含有率が高い場合もあった。このように、これらの単糖類、リグニンの含有率と曲げ応力との間に一定の関係は認められなかった。

そこで、稈の単位容積当たり乾物重、すなわち乾物密度を求め、曲げ応力との関係を品種間で比較した(第5表)。3品種ともに周辺区の乾物密度は対照区に比べて大きく、遮光区の乾物密度は対照区に比べて台中189号は小さかったが、コシヒカリ、密陽23号では大きく、この2品種間の曲げ応力の大小の関係は、遮光区と対照区とで異なった。つぎに各成分密度についてみると(第6, 7表)、周辺区では密陽23号のデンプンを除けば、すべての成分密度が対照区、遮光区に比べて大きく、遮光区ではデンプンを除けば以下の2~3の場合を除いて遮光区の成分密度が対照区より小さかった。すなわち、対照区と比べて遮光区の成分密度はほぼ等しいか大きいのは、密陽23号のマンノースとグルコース、コシヒカリのガラクトースで、台中189号はすべての成分密

度で遮光区が小さかった。

このように各成分密度はデンプンを除けば、曲げ応力の大小とほぼ対応して変化していたので、細胞壁構成成分の含有率および密度が大きいグルコース、キシロース、リグニンそれぞれについて、密度と曲げ応力との関係を品種間で比較検討した(第1図)。まず、グルコース密度と曲げ応力との関係をみるとコシヒカリと密陽23号では密度が高くなると曲げ応力は大きくなるが、約 $50 \mu\text{g}/\text{mm}^3$ と低い密度では、密度は曲げ応力には大きな影響を及ぼしていなかった。一方、台中189号ではグルコース密度が高くなるのに伴って曲げ応力は大きくなった。キシロース、リグニンについてみると、3品種ともこれらの密度と曲げ応力との間に密接な関係があったが、この関係は品種によって異なった。すなわち、断面係数の大きい密陽23号はコシヒカリ、台中189号に比べて密度が大きくなるのに伴う曲げ応力の増加程度は小さく、この傾向はとくにキシロース密度

Table 6. Density of the insoluble materials in the fifth internode.

| Variety | Plots | Cell wall monosaccharides | Lignin | Starch | Other component | Total |
|--------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| | | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | μ/mm^3 |
| Koshihikari | Control | 80.4 | 25.7 | 0.8 | 48.5 | 155.4 |
| | Border | 157.1 | 45.0 | 68.2 | 71.2 | 341.5 |
| | Shade | 71.2 | 18.7 | 36.8 | 44.5 | 171.3 |
| Taichung 189 | Control | 91.2 | 33.1 | 10.4 | 53.8 | 188.4 |
| | Border | 153.7 | 44.8 | 115.7 | 112.2 | 426.5 |
| | Shade | 57.5 | 22.3 | 33.9 | 57.2 | 170.9 |
| Milyang 23 | Control | 69.8 | 25.2 | 0.7 | 62.2 | 157.8 |
| | Border | 124.7 | 37.9 | 30.7 | 77.9 | 271.3 |
| | Shade | 66.5 | 18.4 | 41.8 | 60.3 | 187.0 |

* Other component indicates the other insoluble materials (insoluble proteins et al.).

Table 7. Density of the cell wall monosaccharides in the fifth internode.

| Variety | Plots | Cell wall monosaccharide | | | | | Total |
|--------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Arabinose | Xylose | Mannose | Galactose | Glucose | |
| | | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ | $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ |
| Koshihikari | Control | 3.8 | 19.9 | 1.1 | 2.1 | 53.5 | 80.4 |
| | Border | 6.6 | 30.4 | 3.1 | 5.4 | 111.6 | 157.1 |
| | Shade | 2.7 | 14.0 | 0.8 | 3.1 | 50.6 | 71.2 |
| Taichung 189 | Control | 3.8 | 20.0 | 2.0 | 3.5 | 61.9 | 91.2 |
| | Border | 6.1 | 26.7 | 3.7 | 7.3 | 109.9 | 153.7 |
| | Shade | 3.2 | 11.5 | 1.5 | 2.8 | 38.5 | 57.5 |
| Milyang 23 | Control | 3.7 | 16.6 | 1.9 | 3.0 | 44.6 | 69.8 |
| | Border | 6.1 | 27.6 | 2.5 | 5.1 | 83.4 | 124.7 |
| | Shade | 2.7 | 9.6 | 1.9 | 2.7 | 49.6 | 66.5 |

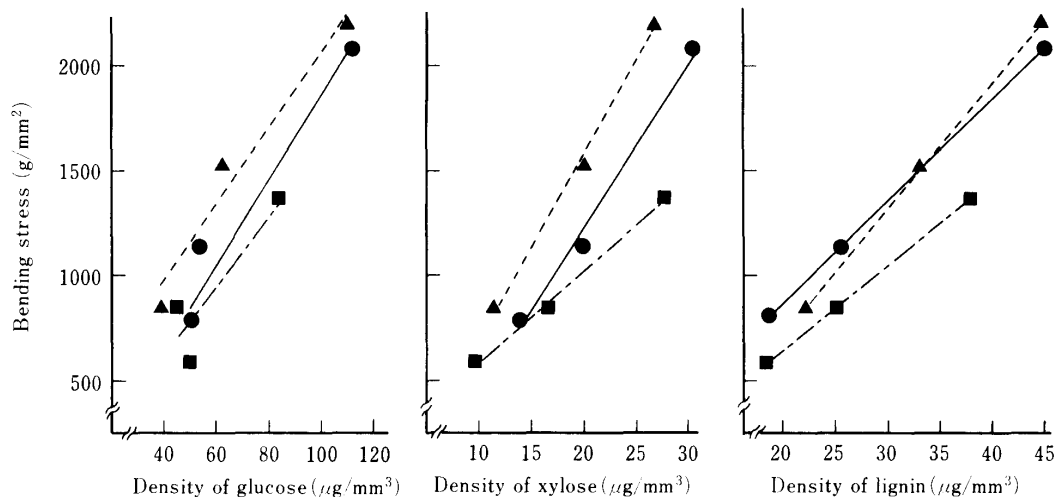


Fig. 1. Relationship between the bending stress and the density of the cell wall materials (glucose, xylose and lignin) in the basal (5th) internode.

●: Koshihikari, ▲: Taichung 189, ■: Milyang 23

で顕著であった。また、台中 189 号はコシヒカリに比べ同じキシロース密度では曲げ応力が大きく、また、リグニン密度の増加に伴う曲げ応力の増加割合が大きかった。

このように、台中 189 号は他の 2 品種に比べて、細胞壁構成成分密度が大きくなるのに伴う曲げ応力の増加割合が大きく、稈の強度を増すのに物質を効率的に利用しているという特徴のあることがわかった。

考 察

対照区に比べて周辺区の水稲は、従来の報告^{3,15)}と同様に 3 品種の水稲とも稈長が短く穂重が重くなり、遮光区では稈長が短く穂重は軽くなった。その結果、倒伏指数が変化したのは、コシヒカリの周辺区、遮光区と台農 67 号、密陽 23 号の遮光区であったが、この変化はいずれも稈基部の葉鞘付挫折時モーメントの変化の影響によるものであった。稈基部の葉鞘付挫折時モーメントの主要構成要素である稈の挫折時モーメントは、3 品種とも対照区に比べて周辺区で大きくなり、遮光区で小さくなった。この変化はそれぞれ光がよく当たる条件であると同時に蒸散が大きく水ストレスを受けやすい条件^{3,5)}と、弱光条件の影響と考えられるが、この変化には対照区で稈の挫折時モーメントの小さい品種が周辺区で変化が大きく、大きい品種が遮光区で変化が大きいという品種間差異があった。

稈の挫折時モーメントは稈の太さをあらわす断面係数と曲げ応力で構成される。まず断面係数につい

てみると、この変化が大きかったのは断面係数が高いことによって稈の挫折時モーメントが大きく、倒伏しにくい密陽 23 号の遮光区だけであり、周辺区では 3 品種ともに対照区とほとんど相違がなかった。このことから、節間伸長期に光条件が変化し乾物生産量が変化しても、稈径は大きく変化せず、品種によって遺伝的にかなりの程度決まっていると考えられる。ただ、断面係数が高いという特徴のある密陽 23 号だけが弱光条件で稈径が大きくならなかったことは興味深い。この原因については、稈の形成過程の観察を通じてさらに検討する必要がある。

曲げ応力は周辺区で大きく遮光区で小さくなり、稈の挫折時モーメントが処理区によって変化する主要要因であった。また曲げ応力の変化には品種間差異があり、周辺区では曲げ応力の小さい品種で大きくなる割合が大きく、遮光区では曲げ応力の大きい品種で小さくなる割合が大きかった。したがって、以下処理による曲げ応力の変化と稈の構成成分の変化との関係について考察することとする。

まずデンプンについてである。従来の研究^{13, 17, 20, 21)}では、稈基部に蓄積するデンプンと稈基部の強度との間に関係があることが認められている。山本ら²¹⁾は、倒伏稲の稈基部ではほとんどデンプンの蓄積が認められず、稈内の貯蔵物質が少ないほど倒伏程度が大きかったことを報告している。また、佐藤¹³⁾、八木²⁰⁾は倒伏抵抗性の大きい品種は多くのデンプンを稈内に残し、抵抗性の小さい品種はデンプンが少ない傾向のあることを認め、稈内のデンプン

蓄積量は倒伏の難易，すなわち稈の強弱と密接な関係があるとしている。佐藤¹³⁾は，稈の柔組織中にデンプン粒が蓄積することは，稈柔組織の機械的強度に影響を及ぼすと考察しているが，その機構については言及していない。

本研究ではデンプンの含有率およびその密度は，対照区に比べて周辺区で大きく，その結果，前述したのと同様，周辺区では挫折抵抗は大きく，曲げ応力は大きいので倒伏しなかった。一方，光合成による同化産物量は減少し貯蔵デンプン量は少なくなると考えられた遮光区では，挫折抵抗は小さく曲げ応力は小さいのに，デンプンの含有率および密度は大きかった。処理による曲げ応力の変化は稈の形成過程と密接に関係していると考えられる。瀬古¹⁴⁾は節間の伸長過程を検討し，稈基部の第V節間の伸長は出穂30日前より始まり，約9日間で伸長を完了としている。伸長完了後，2次細胞壁の肥厚が始まるが，川原ら⁴⁾は第V節間の皮層繊維組織の形成過程を観察し，節間の伸長停止以後に2次細胞壁の肥厚が始まり，20日目にはほとんど肥厚が完了することを報告している。このことから，第V節間が伸長を開始し細胞壁の肥厚を終了する時期は，出穂30日前から出穂期までの間と考えられる。本研究では出穂40日前にあたる最高分げつ期より処理を開始しているので，光条件がよく光合成産物が多い周辺区では，2次細胞壁の肥厚過程において細胞壁構成成分が多く生成され，その密度が高く，一方，弱光下で光合成産物が少ない遮光区では細胞壁構成成分の生成が少なく，その密度が低かった。さらに遮光区では，穂の発育中の遮光処理であるため穎花数が少なく，シンク容量が小さいために，出穂期以降遮光処理を止めた後，すでに形成が終了した稈基部にデンプンが蓄積された。すなわち，遮光区ではデンプンが多く蓄積されたが，細胞壁を構成するリグニンなどの密度は小さく，3品種とも稈の挫折時モーメント，曲げ応力は小さくなった。このことは，デンプンの蓄積の有無が必ずしも，直接曲げ応力の大小，挫折抵抗の大小に影響しない可能性が考えられる。すなわち，従来の研究で，デンプンと稈の強度との間に関係がみられたのは，稈内にデンプンが多く蓄積する条件では細胞壁構成成分密度が高いことにより稈が強くなり，デンプンの蓄積しない条件では細胞壁構成成分密度が少なくなることにより稈が弱くなっていたのではないかという推察が可能である。この推察については，今後さらに研究を行う必要がある。

従来の研究⁶⁾においても，環境条件の相違による曲げ応力の変化には，細胞壁構成成分の密度が関係することが報告されているが，本研究でも曲げ応力の大小に最も関係の深かったのは細胞壁構成成分の密度，とくにグルコース，キシロースとリグニンでそれぞれ周辺区で大きく，遮光区で小さかった。さらに，それぞれの成分の密度が増加するのに伴う曲げ応力の反応が品種の間で異なることが認められた。まず，台中189号ではグルコース，キシロース，リグニンのどの密度もその増加とともに曲げ応力は大きくなったが，コシヒカリと密陽23号では低いグルコース密度で曲げ応力にほとんど影響がなく，キシロース，リグニン密度の2成分とのみ密接な関係があった。このことは，グルコースで構成されるセルロース密度が小さいとき，曲げ応力に大きな影響を及ぼすのは，セルロース繊維の間を埋めて補強する効果がある¹⁸⁾リグニンとキシロースで構成されるヘミセルロースとであることを示している。また，断面係数の大きい密陽23号はコシヒカリ，台中189号に比べて，キシロース，リグニン密度が大きくなるのに伴う曲げ応力の増加程度が小さく，同じ曲げ応力を得るのに多くの物質の密度を必要とし，周辺区でも断面係数は大きくなるので曲げ応力が効率的に大きくなるという性質をもっていると考えられる。

台中189号はコシヒカリに比べて，同じキシロース密度で曲げ応力が大きく，リグニン密度が大きくなるのに伴う曲げ応力の増加程度が大きく，少ない物質で効率的に曲げ応力が大きくなる性質を備えていた。前報¹¹⁾において，リグニン密度は曲げ応力の品種間差異をもたらす主要因であり，台中189号の曲げ応力が大きいことはリグニン密度が高いことが関係することを明らかにしたが，環境条件の相違による曲げ応力の変化にもリグニン密度が密接に関係し，リグニンは曲げ応力に対して最も影響の大きい細胞壁成分であるといえる。

従来から，長稈品種では稈への物質分配量が大きいため収穫指数の低下を招き，収量をあげる上で不利であるといわれてきた¹⁹⁾。しかしながら，台中189号のような長稈品種では，前報¹¹⁾で明らかにしたように倒伏と関係する稈基部の物質の密度のみとくに大きいこと，また，リグニン密度に対して効率的に曲げ応力が大きくなる性質を備えていることが明らかとなった。さらに，川田ら⁵⁾は水田の周辺に生育した水稻の節間の後生導管側壁の斑紋がより特殊化し

たものになることを観察し、倒伏と関係して稈の組織形態の重要性を指摘した。松田⁹⁾らは、稈に加えられる圧縮および引張りの応力は稈の外周部において最大となるので、表皮および皮層繊維の厚さ、リグニンの沈積が稈の挫折抵抗力に対して重要な役割をもつことを指摘している。これらの結果は、稈への物質分配量を多くするだけでなく、稈基部の曲げ応力を効率的に高め、耐倒伏性を大きくすることが可能であることを示している。一方、断面係数の大きい密陽 23 号では、台中 189 号に比べて細胞壁成分の密度は 24%と小さいが、断面積は 44%大きく、節間の長さ当たりの細胞壁成分量で比較すると、同程度の稈の挫折時モーメントを得るのに約 10%多くの量の細胞壁成分が必要であった。

少ない密度で効率的に曲げ応力を増すために備えなければならない諸性質について、今後さらに検討する必要がある、このことは個体群内の CO₂ 拡散効率がよく各茎の葉身の光合成速度を高く維持するという長稈穂重型品種の物質生産上の有利な性質^{7,9)}を十分利用した多収性品種を育成するという点から重要であると考えられる。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、稈の構成成分の化学的分析についてご指導頂いた本学木質資源化学研究室の福田清春助教、セルロース材料工学研究室の岡山隆之助手に厚くお礼申し上げます。

引用文献

1. Bocharadt, L. C. and C. V. Piper 1970. A gas chromatographic method for carbohydrates as alditol-acetates. *Tappi* 53: 257-260.
2. Dekker, R. F. H. and G. N. Richard 1971. Determination of starch in plant materials. *J. Sci. Food Agric.* 22: 441-444.
3. 石原 邦・佐合隆一・小倉忠治 1978. 水稻葉における気孔の開閉と環境条件との関係. 第 6 報 水田の最周辺と内部に生育した水稻の気孔開度の日変化の比較. *日作紀* 47: 515-528.
4. 川原治之助・和田 清 1968. 稈の形態形成に関する研究. 第 4 報 稈の表皮および皮層繊維の形成について. *日作紀* 37: 384-393.
5. 川田信一郎・鎌田悦男・山崎耕宇 1963. 水田の最周辺ならびにそれ以外の部分に生育した水稻の茎葉部における後生導管節について. 千葉県大草町において採取した水稻を中心に. *日作紀* 31: 195-200.
6. 河野通佳・高橋治助 1961. 稈の強さとホロセルローズとの関係について. *土肥誌* 32: 461-465.
7. 黒田栄喜・大川泰一郎・石原 邦 1989. 草高の異なる水稻品種の乾物生産の相違とその要因の解析, とくに個体群内におけるガス拡散に着目して. *日作紀* 58: 374-382.
8. 松田智明・川原治之助・長南信雄 1983. 水稻下位節間の挫折抵抗力に関する組織形態学的研究. 第 4 報 挫折抵抗力に対する葉鞘および節間構成組織の役割. *日作紀* 52: 355-361.
9. 大川泰一郎・黒田栄喜・石原 邦 1991. 水稻における主茎と分げつ茎の同伸葉の光合成速度の相違. *日作紀* 60: 413-420.
10. ———・石原 邦 1992. 水稻の耐倒伏性に関する稈の物理的性質の品種間差異. *日作紀* 61: 419-425.
11. ———・——— 1993. 水稻稈基部の曲げ応力に影響する細胞壁構成成分の品種間差異. *日作紀* 62: 378-384.
12. 坂野好幸 1986. 澱粉の化学的および物理的分析法. 生物化学実験法 19 澱粉関連糖質実験法. 学会出版センター, 東京. 25-47.
13. 佐藤 庚 1957. イネの組織内澱粉に関する研究. 第 4 報 倒伏抵抗性に関する一要素としての澱粉含量. *日作紀* 26: 19.
14. 瀬古秀生 1961. 水稻の倒伏に関する研究. *九州農試彙報* 7: 419-495.
15. 田原虎次・藍 房和・渡辺直吉・下田博之 1967. イネの材料力学的性質に関する研究. 第 1 報 乳熟期における茎稈の強さについて. *農機誌* 29: 137-142.
16. 高橋治助 1960. 水稻の倒伏に関する考察. *農及園* 35: 19-23.
17. 高屋武彦・宮坂 昭 1983. 乾田直播水稻における倒伏防止に関する研究. 第 2 報 出穂期における稲体諸性質の推移と倒伏抵抗性との関係. *日作紀* 52: 7-14.
18. 寺島典二 1987. 樹木木部細胞壁の形成. *木材学会誌* 33: 615-622.
19. 角田重三郎 1987. 光合成からみたイネの進化 4. 多肥多収向きへの光合成態勢の調整. 草型育種. *農及園* 62: 247-253.
20. 八木忠之 1983. 水稻の強稈性に関する育種学的研究. 1. 強稈性および関連形質の品種間差異. *育種* 33: 411-422.
21. 山本健吾・氏家四郎 1958. 水稻倒伏の原因とその対策 [1]. *農及園* 33: 758-762.
22. 安田征一 1986. 木材分析. 木材科学実験書 II 化学編. 中外産業調査会, 東京. 145-161.