

## 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\*

大川 泰一郎・石原 邦

(東京農工大学農学部)

1992年10月30日受理

**要旨:** 耐倒伏性に関係する稈基部の曲げ応力が著しく異なる7品種の水稻を用いて、稈を構成するどのような構成成分が曲げ応力と関係し、品種間の曲げ応力の相違をもたらすかを検討した。稈の細胞壁構成成分の組成割合には品種間で数%の相違は認められたが、この組成割合と品種間の曲げ応力の相違との間に明確な関係は認められなかった。稈の構成成分の含有量と曲げ応力との関係を明らかにするため、単位組織体積当りの細胞壁構成成分含有量、すなわち、細胞壁構成成分密度を品種間で比較した。その結果、細胞壁多糖類構成単糖であるグルコース密度、キシロース密度および同じく細胞壁を構成するリグニン密度に大きな品種間差異があった。曲げ応力が大きいことによって葉鞘付挫折時モーメントが大きく倒伏抵抗性の大きい台中189号、台農67号では、曲げ応力の小さいコシヒカリ、フジミノリに比べてグルコース密度、キシロース密度、リグニン密度が大きかった。一方、これらの品種に比べて断面係数は約2倍大きい、曲げ応力はコシヒカリ、フジミノリ同様に小さい密陽23号では、グルコース密度、キシロース密度は大きかったがリグニン密度はコシヒカリ、フジミノリと同様に小さかった。実験に用いた7品種について、細胞壁構成単糖密度、リグニン密度それぞれと曲げ応力との偏相関係数を求めた結果、リグニン密度と曲げ応力との間に偏相関係数0.81の高い相関関係が認められた。以上の結果から、稈の細胞壁構成成分の1つであるリグニンの密度は、耐倒伏性に関係する稈の曲げ応力の品種間差異をもたらす主な原因であると推察した。

**キーワード:** 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。

**Varietal Difference of the Cell Wall Components Affecting the Bending Stress of the Culm in Relation to the Lodging Resistance in Paddy Rice:** Taiichiro OOKAWA and Kuni ISHIHARA (*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183, Japan*)

**Abstract:** We investigated which cell wall components of the culm affect the bending stress of the culm using seven rice cultivars. A small difference in the cell wall composition was noticed among the cultivars. The relationship between this composition and the varietal difference of the bending stress was not found. In order to clarify the relationship between the quantity of the culm materials and the bending stress, the densities of the cell wall materials (the cell wall contents of the culm per volume of the culm tissue) were compared among cultivars. There was a large varietal difference in the densities of glucose, xylose and lignin. In Tainung 67 and Taichung 189 with a large bending stress, the densities of glucose, xylose and lignin were higher than those in Koshihikari and Fujiminori with a small bending stress. On the other hand, in Milyang 23 with a large section modulus and a small bending stress, the densities of glucose and xylose were as large as those in Tainung 67 and Taichung 189, and the density of lignin in Milyang 23 was as small as those in Koshihikari and Fujiminori. Furthermore, the partial correlation coefficients were calculated among the bending stress, the density of lignin and the density of cell wall monosaccharides. The results showed that density of lignin of the culm was significantly correlated with the bending stress ( $r=0.81$ ) in the seven cultivars. The results of this study indicate that the density of lignin is the main factor responsible for the varietal difference in the bending stress which is related to the lodging resistance in paddy rice.

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

前報<sup>1)</sup>において、水稻品種の耐倒伏性の大小は主稈基部の挫折強度を表す葉鞘付挫折時モーメントと密接に関係し、このモーメントに大きな品種間差異のあることを認めた。葉鞘付挫折時モーメントが大きく倒伏しにくい品種は外国の品種に多く、これらの品種は日本の品種に比べて稈の挫折時モーメントあるいは葉鞘補強度が著しく大きかった。稈の挫折時モーメントを稈断面の組織の大きさを表す断面係

数と稈の材質を表す曲げ応力に分けて検討した結果、密陽23号は断面係数が著しく大きいことによって、また台中189号、台農67号は曲げ応力が大きいことによって稈の挫折時モーメントが大きかった。

このように、挫折強度が大きくなるためには稈の断面係数が大きいことに加えて曲げ応力が大きいことが重要であった。曲げ応力は材料力学的には材質の強度を表す指標であるが、水稻の稈の曲げ応力と構成成分との関係を品種間で比較した研究例はなく、稈を構成するどのような構成成分が曲げ応力と

\* 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る。

密接に関係し、品種間の曲げ応力の相違をもたらすかは明らかにされていない。

水稻の稈の機械組織には、大維管束、小維管束と稈の最周辺部にある皮層繊維組織とがある。これらの組織を構成する細胞の厚壁化、リグニンの沈着の程度および細胞壁を構成する物質の組成割合とその含有量が曲げ応力に大きな影響を及ぼすことが考えられる。水稻、オオムギを用いた従来<sup>5,6)</sup>の報告では、稈の細胞壁を構成するセルロース、リグニンなどの成分が曲げ応力と関係のあることが示されている。

本研究は、前報で明らかとなった品種による曲げ応力の違いが稈の構成物質のいかなる成分の違いと密接に関係しているのかを比較検討することによって、耐倒伏性の大きい品種が備えるべき稈の化学的性質を明らかにすることを目的として行ったものである。

### 材料と方法

本実験にはコシヒカリ、フジミノリ、台中189号、台農67号、中国117号、密陽23号、南京11号の7品種を用い、栽培方法は前報<sup>1)</sup>に示した通りで、1990年に東京農工大学農学部附属農場水田に、栽植密度22.2株/m<sup>2</sup>で箱育苗した苗を移植し、常時湛水状態として栽培した。

出穂後20日目に生育中庸な株から主稈8本を採取し、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<sup>15)</sup>の方法により支点間距離4cmとして稈基部の第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。挫折荷重測定後、節間長を測定し、挫折部近くの稈横断面を中空楕円とみなし、長直径、短直径それぞれの外径および内径を測定し、組織断面積を求めた。この第V節間を105°Cの定温乾燥機で乾燥し、乾物重を測定した。稈の挫折時モーメント、断面係数および曲げ応力の計算方法は、前報<sup>1)</sup>と同様であった。乾物密度は、第V節間の乾物重をその体積すなわち節間長と断面積との積で除して求めた。

乾物重を測定した8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および可溶性糖類を除いた。得られた脱脂試料は、以下の細胞壁構成糖類、デンプンおよびリグニンの分析に用いた。

細胞壁構成糖類の分析は、Borchardtら<sup>2)</sup>の方法に準じて行った。試料350mgを硫酸で加水分解し、分解液に内部標準としてイノシトールを加えた。単

糖をアルディオール・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GC9-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。GCの測定条件は、ガラスカラム0.3×210cm、充填剤3%ECNSS-M、カラム温度190°C、キャリアガス窒素90ml/minとし、糖の検出には水素炎イオン化検出器を用いた。

デンプンは、Dekkerら<sup>3)</sup>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。脱脂試料に含まれるデンプンを0.2N NaOHで抽出し、グルコアミラーゼでグルコースに分解し、このグルコース量をグルコースオキシダーゼ—ペルオキシダーゼ—ABTS系による定量法<sup>14)</sup>により測定し、これにデンプン換算係数0.9を乗じてデンプン量とした。なお、細胞壁構成多糖類由来のグルコースは、Borchardtらの方法<sup>2)</sup>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<sup>18)</sup>により定量した。試料350mgを72%硫酸で30°C、1時間インキュベートし、硫酸が3%となるように希釈した後、2時間煮沸して加水分解し、熱蒸留水で洗浄しながら1G4のガラス濾過器で濾過した。ガラス濾過器中の不溶残渣のリグニンを105°Cの定温乾燥器で乾燥後秤量した。

### 結 果

登熟期における7品種の稈基部第V節間の物理的性質の相違を第1表に示した。台中189号と台農67号では、断面係数はコシヒカリ、フジミノリと同様に小さかったが、曲げ応力は約1400g/mm<sup>2</sup>で他の品種より大きかった。そのため、稈の挫折時モーメントは1600~1650g・cmと大きかった。一方、中国117号、密陽23号では曲げ応力はコシヒカリ、フジミノリと同様に小さかったが、断面係数がかなり大きいので、稈の挫折時モーメントは大きかった。

このように、曲げ応力は断面係数とともに稈の挫折時モーメントに大きく影響し、品種間で大きな相違があったので、曲げ応力に関係する稈の化学的成分の組成割合を比較した。

第2表に、稈のアルコール・ベンゼン不溶性物質構成成分の組成割合を示した。細胞壁多糖類構成単糖では、いずれの品種もグルコース含有率が約35%と最も高く、この中でフジミノリが32%と小さく台

中189号が約37%と大きかった。その他の単糖含有率は、キシロースが約15%、ついでアラビノースが約3%、ガラクトースが約2%、マンノースが約1%で、それぞれの含有率の品種間差異は小さかった。

Table 1 Physical properties of the basal(5th) internode.

Variety	Bending moment of the culm (g·cm)	Section modulus (mm <sup>3</sup> )	Bending stress (g/mm <sup>2</sup> )
Koshihikari	815 a	7.6 a	1081 a
Fujiminori	973 a	11.0 b	894 ab
Taichung 189	1655 c	12.3 b	1342 d
Tainung 67	1572 c	10.8 b	1469 d
Chugoku 117	1450 c	17.8 c	823 a
Milyang 23	2118 d	21.8 d	976 bc
Nanjing 11	1239 b	12.9 b	969 abc

\* Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.01 level of probability according to the Duncan's multiple range test.

これらの構成単糖を合計した含有率は、平均で約55%で、フジミノリが約51%と小さく台中189号が約57%と大きかった。

また、リグニン含有率は平均で約19%であった。その中で台中189号が21%と大きく、密陽23号と南京11号が約17%と小さかった。なお、デンプン含有率はいずれの品種も0%に近く、出穂後20日目には稈内にデンプンはほとんど含まれていなかった。

これらの結果から、細胞壁構成成分の組成割合と品種間の稈の曲げ応力の違いとの間に密接な関係は認められなかった。

つぎに、稈を構成する物質の量と稈の曲げ応力との関係を見るため、単位組織体積当り乾物重、すなわち乾物密度を品種間で比較した(第3表)。長稈品種では曲げ応力の小さいコシヒカリ、フジミノリ、中国117号の乾物密度は約150  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$  であるのに対して、曲げ応力の大きい台農67号と台中189号の乾物密度は200  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$  であった。なお、コシヒカリなどと同様に曲げ応力の小さい短稈品種の密陽

Table 2 Composition of the cell wall materials in the fifth internode.

Variety	Cell wall monosaccharide					Starch	Lignin
	Arabinose %	Xylose %	Mannose %	Galactose %	Glucose %		
Koshihikari	2.98±0.09	14.52±0.31	0.95±0.22	1.62±0.37	35.53±0.82	0.0 ±0.0	18.90±0.04
Fujiminori	2.63±0.04	13.55±0.13	0.68±0.06	1.62±0.09	32.04±0.04	0.33±0.23	19.20±0.30
Taichung 189	2.98±0.02	15.41±0.03	0.62±0.01	1.49±0.06	36.80±0.10	0.23±0.20	20.90±0.56
Tainung 67	2.73±0.02	13.61±0.08	0.84±0.09	1.77±0.12	34.50±0.17	1.62±0.03	19.11±0.21
Chugoku 117	2.50±0.03	13.81±0.14	0.79±0.10	1.74±0.02	34.06±0.20	0.06±0.05	19.06±0.18
Milyang 23	3.45±0.01	15.17±0.16	0.84±0.09	1.70±0.09	35.06±0.26	0.11±0.10	16.97±0.88
Nanjing 11	3.46±0.10	14.23±0.23	0.80±0.01	2.14±0.01	33.89±0.82	0.82±0.36	17.06±0.45

Table 3 Comparison of the length, transverse section area, volume, dry matter weight and dry matter density in the fifth internode.

Variety	Length (mm)	Section area (mm <sup>2</sup> )	Volume (mm <sup>3</sup> )	Dry matter weight (mg)	Dry matter density <sup>#</sup> ( $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ )
Koshihikari	73.8 c	9.4 a	689.4 a	106.9 a	155.8 b
Fujiminori	74.5 c	12.1 b	897.7 b	134.6 b	150.8 b
Taichung 189	67.5 bc	12.8 b	863.8 b	171.2 c	199.5 c
Tainung 67	71.1 c	11.6 b	823.1 ab	173.9 c	213.1 c
Chugoku 117	68.0 bc	15.5 c	1053.0 c	164.6 c	157.0 b
Milyang 23	49.3 a	17.5 d	857.3 b	162.8 c	191.0 c
Nanjing 11	56.1 ab	12.6 b	705.3 a	124.6 ab	124.6 a

\* Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.01 level of probability according to the Duncan's multiple range test.

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

23号の乾物密度は、台農67号、台中189号と同様に大きかった。

このように密陽23号を除けば曲げ応力と乾物密度との間に関係が認められたので、乾物密度に稈の細胞壁各構成成分の含有率をかけて各成分の密度を求め、どの細胞壁構成成分密度と曲げ応力とが密接

に関係しているか検討した。

細胞壁多糖類構成単糖の中では、曲げ応力の小さいコシヒカリ、フジミノリはこれら密度がいずれも小さいのに対して、曲げ応力の大きい台農67号、台中189号は主成分であるグルコース密度が約68  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ 、キシロース密度が27-28  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と大き

Table 4. Density of the cell wall monosaccharides in the fifth internode.

Variety	Cell wall monosaccharide					
	Arabinose $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Xylose $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Mannose $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Galactose $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Glucose $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	Total $\mu\text{g}/\text{mm}^3$
Koshihikari	4.3	21.0	1.4	2.4	51.6	80.7
Fujiminori	3.6	18.6	0.9	2.2	44.0	69.3
Taichung 189	5.5	28.4	1.1	2.7	67.8	105.5
Tainung 67	5.4	26.8	1.7	3.5	67.9	105.3
Chugoku 117	3.6	19.7	1.1	2.5	48.5	75.4
Milyang 23	6.3	27.6	1.5	3.1	63.9	102.4
Nanjing 11	5.9	24.4	1.4	3.7	58.0	93.4

Table 5. Density of the insoluble materials in the fifth internode.

Variety	Cell wall mono-	Lignin	Starch	Other	Total
	saccharides $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	$\mu\text{g}/\text{mm}^3$	$\mu\text{g}/\text{mm}^3$	components $\mu\text{g}/\text{mm}^3$	$\mu\text{g}/\text{mm}^3$
Koshihikari	80.7	27.5	0.0	37.1	145.4
Fujiminori	69.3	26.4	0.5	41.1	137.2
Taichung 189	105.5	38.5	0.4	39.7	184.1
Tainung 67	105.3	37.6	3.2	50.8	196.7
Chugoku 117	75.4	27.2	0.1	39.9	142.5
Milyang 23	102.4	30.9	0.2	48.7	182.2
Nanjing 11	93.4	29.2	1.4	47.2	171.2

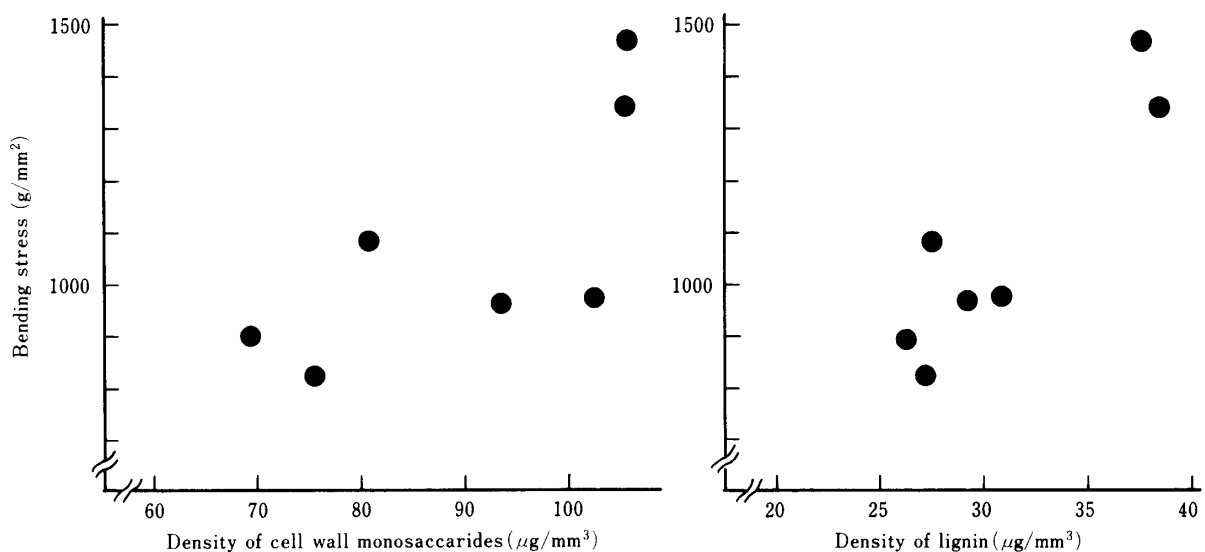


Fig. 1. Relationship between the bending stress and the density of cell wall materials (cell wall monosaccharides and lignin) in the fifth internode among seven cultivars.

かった。一方、これらの品種に比べて断面係数は約2倍大きいコシヒカリなどと同様に曲げ応力の小さい密陽23号では、曲げ応力の大きい台農67号、台中189号と同様にキシロース密度、グルコース密度が大きかった。5つの構成単糖を合計した密度も、曲げ応力の大きい台中189号と台農67号で約105  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と最も大きく、曲げ応力の小さいコシヒカリとフジミノリで70-80  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と小さかったが、密陽23号は曲げ応力が小さいのに密度は102.4  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と大きかった(第4表)。

リグニン密度は、曲げ応力の大きい台中189号と台農67号で約38  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と大きく、曲げ応力の小さいコシヒカリとフジミノリで約27  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ と小さかった。注目すべきは、細胞壁構成単糖密度が大きいの曲げ応力が小さかった密陽23号では、曲げ応力の小さいコシヒカリなどと同様にリグニン密度が小さいことであった(第5表)。

実験に用いた7品種について、細胞壁多糖類構成単糖密度と曲げ応力との関係、およびリグニン密度と曲げ応力との関係をみたのが第1図である。単相関係数を求めた結果、細胞壁構成単糖密度と曲げ応力との間の相関係数は0.74(10%で有意)、リグニン密度と曲げ応力との間の相関係数は0.91(1%レベルで有意)であった。いずれの密度が曲げ応力に大きく影響するかを明らかにするため、曲げ応力と細胞壁構成単糖密度およびリグニン密度との間の偏相関係数を求めた。その結果、リグニン密度を一定とした時の細胞壁構成単糖密度と曲げ応力との間の偏相関係数は-0.27で有意な関係はなかった。一方、

細胞壁構成単糖密度を一定とした時のリグニン密度と曲げ応力との間には、偏相関係数0.81(5%レベルで有意)の正の相関係数があった。

このように、曲げ応力は細胞壁を構成する物質と密接な関係があるので、曲げ応力の異なる品種のIIからV節間における曲げ応力と単位長さあたり乾物重を測定した(第2図)。その結果、曲げ応力の品種間差異は第II節間ではほとんどなく、倒伏ともっとも関係の深い第V節間で最も大きく、単位長さあたり乾物重の相違もこれに対応していることがわかった。

## 考 察

コムギ、オオムギでは、稈の強い品種は弱い品種に比べて細胞壁多糖類、リグニン含有率が高いという報告例<sup>4,5)</sup>がある。本研究では、細胞壁多糖類については測定していないが、多糖類を構成するグルコースなど多糖壁構成単糖、リグニンの含有率の高い品種で曲げ応力が大きいという関係は認められなかった。したがって、イネではムギ類とは違って、これらの成分の含有率が稈の物理的性質の違いをもたらす要因とはなっていないと考えられる。なお、河野ら<sup>6)</sup>は肥料条件を変え生育させた水稻で、リグニン含有率と曲げ応力との間に関係はないが、ホロセルロース含有率と曲げ応力との間には関係があることを認めている。

水稻においては、稈に蓄積されるデンプン含有率の多少が稈の強度に影響をもたらすとされている<sup>14)</sup>。しかしながら、出穂後20日目の稈内にはいず

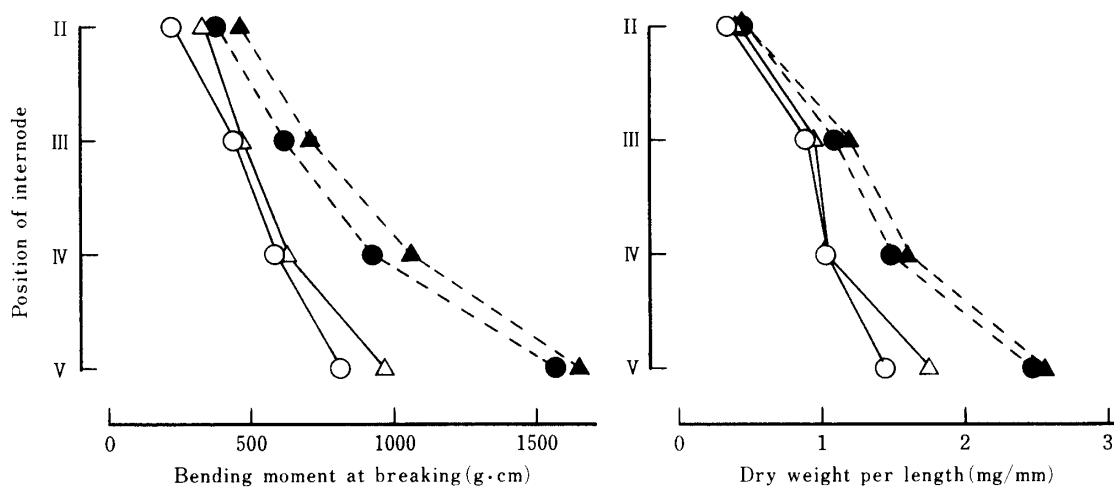


Fig. 2. Comparison of the bending moment at breaking and the dry matter weight per internode length among different internode positions of the culm.

○: Koshihikari, △: Fujiminori, ●: Tainung 67, ▲: Taichung 189.

れの品種もデンプンはほとんど蓄積されておらず、本研究でみられた品種間の曲げ応力の相違にはデンプンは関係していないといえることができる。デンプンと稈の物理的性質との関係については、出穂期以降の貯蔵デンプンの消長に伴う稈の物理的性質の変化などを通じてさらに検討する必要がある。

すでに述べたように、イネでは稈の曲げ応力は、細胞壁の組成割合の違いではなく、稈の細胞壁構成成分密度の違い、すなわち各構成成分の量的な違いと関係があった。すなわち、曲げ応力が大きい品種は細胞壁構成単糖のグルコース、キシロース密度およびリグニン密度が大きく、偏相関をとって検討したところ、これらの成分のうちリグニン密度が曲げ応力に密接に関係していた。このことは、グルコース、キシロース密度は曲げ応力の大きい台中189号と同様に大きいのに曲げ応力の小さい密陽23号のリグニン密度が小さいことから裏付けられる。なお、松田らは<sup>9)</sup> 遮光処理による挫折荷重の減少には、リグニンの含有率および含有量の低下が関係していることを報告している。

リグニンはその存在位置にも特徴があり、稈内では外周部に位置する皮層繊維組織、大維管束、小維管束に局在している<sup>9)</sup>。竹では稈の圧縮強度は稈の組織に占める外皮層および維管束鞘の割合が増加すると増加するが、基本組織および内皮層の割合が増加すると減少することが明らかにされている<sup>10)</sup>。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、このことを考慮すると、リグニンは細胞壁の強度を増加させるのに加えて、その分布する位置を通じて稈の曲げ応力を大きくしている可能性が考えられる。

イネ科植物のリグニン合成過程には、樹木で見られるフェニルアラニンから合成される系に加えて、チロシンから合成される経路が特異的にみられ、野村ら<sup>10)</sup> は、竹の節間伸長におけるリグニン量とチロシン量との関係を検討し、節間伸長の盛んな部位にはチロシンが多く、リグニンの前駆体としてプールされていることが報告されている。また、リグニン合成には光や植物ホルモンが関与するといわれている<sup>11,16)</sup>。リグニン合成を高めることを通じて稈の物理的強度を高め、耐倒伏性の大きい品種を育成する方向もあると考えられるので、イネにおけるリグニンの代謝とその調節機構についてさらに研究する必要がある。

従来の研究<sup>11)</sup> と本研究の結果から、水田における

出穂後20日の耐倒伏性と密接に関係する主稈基部の挫折強度の大きい品種が備えるべき性質として、次の2点が明らかになった。すなわち、1)密陽23号のように稈基部が太く組織断面積が大きいこと、また、2)台農67号、台中189号のように曲げ応力に影響する稈の細胞壁構成成分、とくにリグニン密度が大きいことである。このことは稈により多くの物質が分配されることにつながるため、収穫指数の低下を招くなど収量をあげる上で不利になるといわれている<sup>17)</sup>。確かに水稻で短稈化の方向で育種が行われたのは、耐倒伏性を高めることに加えて、稈への同化産物の分配量を少なくし収穫指数を高めることにあった。長稈の台農67号、台中189号では倒伏と密接に関係する稈の基部への物質の分配量を多くし、収穫指数の低下を少なくするように対応していた(第2図)。台農67号では、葉が直立し受光態勢がよいことに加えて、葉面積密度が小さいことによって個体群内のCO<sub>2</sub>濃度が高く維持され、乾物生産量が著しく多くなり、結果として収穫指数は日本晴とほぼ同じとなり収量は著しく多かった<sup>7,12)</sup>。このことから、長稈品種の特徴である乾物生産量が著しく大きいことを利用して、倒伏と密接に関係する稈基部の乾物重をとくに大きくして、稈基部の挫折強度を増し、長く重い地上部を支えて倒伏しにくい多収性品種を育成することは可能であると考えられる。すなわち、物質生産量の大きい長稈品種の特徴を再評価し、今後の多収性育種の方向として、耐倒伏性が大きい長稈極穂重型品種の育成が考えられる。

本研究では、品種間の比較から稈の構成成分と曲げ応力との関係を検討した。さらに、細胞壁のどの構成成分が曲げ応力の大きさを規定しているかは、栽培条件などによって曲げ応力を変化させ、稈の構成成分などがどのように変化するかを通じて検討することが可能である。今後、追究したいと考えている。

**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授、セルロース材料工学研究室の岡山隆之助手に厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

1. Aloni, R., M. T. Tollier and B. Monties 1990. Role of auxin and gibberellin in controlling lignin formation in primary phloem fibers and in xylem of *Coleus blumei* stems. *Plant Physiol.* 94: 1743-1747.
2. Borchardt, L.C. and C.V. Piper 1970. A gas chroma-

- tographic method for carbohydrates as alditol-acetates. *Tappi* 53: 257-260.
3. Dekker, R. F. H. and G. N. Richard 1971. Determination of starch in plant materials. *J. Sci. Food Agric.* 22: 441-444.
  4. Gaikovskaya, L.T. and S.V. Baltaga 1970. Quantitative characters of cell wall components in stems of winter wheat strains resistant to lodging. In *Plant Polysaccharides*. Akad. Nauk Moldav. SSR, Kishinev. 97-108.
  5. 北條良夫・小田桂三郎 1965. 大麦の強稈性に関する研究. 第4報 稈の物質的組成について. *日作紀* 33: 268-271.
  6. 河野通佳・高橋治助 1961. 稈の強さと化学成分との関係について. *土肥誌* 32: 149-152.
  7. 黒田栄喜・大川泰一郎・石原 邦 1989. 草高の異なる水稲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. 水稲下位節間の挫折抵抗力に関する組織形態学的研究. 第2報 下位節間の2次壁肥厚過程に関する光学および電子顕微鏡観察. *日作紀* 52: 84-93.
  9. ————・—————・————— 1984. ————. 第6報 異なる環境条件下で生育した水稲の下位節間の構造と挫折抵抗力. *日作紀* 55: 71-78.
  10. 野村隆哉 1980. 竹の生長について. *木材研究* 15: 6-33.
  11. 大川泰一郎・石原 邦 1992. 水稲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.
  12. ————・黒田栄喜・石原 邦 1991. 水稲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.
  13. 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.
  14. 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.
  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. 寺島典二 1987. 樹木木部細胞壁の形成. *木材学会誌* 33: 615-622.
  17. 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.
  18. 安田征一 1989. 材木分析. *木材科学実験書 II 化学編*. 中外産業調査会, 東京. 145-161.