

イチジク果実の肥大・成熟に伴う水分含量の増加と細胞壁成分との関係

矢羽田第二郎・野方 仁
(豊前分場)

イチジク果実の肥大機構の解明を進めるため、'榊井ドーフィン' と '蓬莱柿' の秋果の成熟に伴う小果、果托内の水分含量と細胞壁のポリウロニド含量の変化を調査するとともに、水不溶性固形物 (WIS) の水中沈定体積と最大抱水量を測定して細胞壁の保水能の変化について検討を行った。両品種とも、収穫期の果重は結果 70 日後に比べて 4 倍近くに増加した。成熟に伴う重量増加量の 80~90% は水分の増加によるものであった。小果、果托の単位重量当たりのポリウロニド含量は、収穫前の 2 週間に熱水および EDTA 可溶性画分で急激に減少し、水可溶性画分で増加した。小果、果托の重量から換算した部位別のポリウロニドの総量は、収穫期に水可溶性画分で急激に増加するとともに EDTA 可溶性画分で減少した。WIS の小果、果托の単位重量当たり含量は、収穫期に急激に減少した。しかし、小果、果托の重量から換算した WIS の総量の成熟に伴う変化は小さかった。WIS の水中沈定体積と最大抱水量は、小果、果托とも収穫期に増加し、特に果托での増加が顕著であった。イチジク果実の肥大、成熟に伴う小果、果托内の急激な水分含量の増加には、細胞壁におけるペクチン質の可溶化と水不溶性成分のかさ形成能および保水能の増大が関係していることが示唆された。

[キーワード：イチジク果実、肥大、成熟、水分含量、細胞壁成分]

Relationship between Increase in Water Content and Cell Wall Composition in Fig *Syconia* during Enlargement and Ripening. YAHATA Daijirou and Hitoshi NOGATA (Fukuoka Agric. Res. Cent., Chikushino, Fukuoka 818 - 8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. Res. Cent.* 19 : 76 - 80 (2000)

To elucidate the mechanism of enlargement in fig *syconia*, changes in contents of water and cell wall polyuronides in fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi' (*Ficus carica* L. var. *hortensis* Shinn) second crops were investigated during ripening. Cell wall polyuronides were sequentially extracted from ethanol insoluble materials of each part with water, hot-water, EDTA and KOH solutions, then the content of uronic acid in each fraction was analyzed. Furthermore, changes in settling volume in water and water-holding capacity of water-insoluble solids (WIS) in each part were determined. In both cultivars *syconia*, the fresh weights of the fruitlets and fruit receptacles at harvest time showed an increase nearly 4 times as much as those at 70th day after bearing. Around 80~90% of the weights increased in each part during ripening were due to an increase in water. The polyuronides contents per unit weight in the fruitlets and fruit receptacles decreased rapidly in the hot-water- and EDTA-soluble fractions and increased in the water-soluble fractions in two weeks before harvest. The whole polyuronides contents, on fresh weight basis, in each part increased largely in the water-soluble fractions during ripening with reverse relationship of those in the EDTA-soluble fractions. The WIS contents per unit weight in the fruitlets and fruit receptacles decreased markedly at harvest time, while the whole WIS contents, on fresh weight basis, changed very little during ripening. The settling volume in water and water-holding capacity of WIS increased largely at harvest time, especially in the fruit receptacles. It was suggested that rapid increase of water in the fruitlets and fruit receptacles during enlargement and ripening of fig *syconia* was related to solubilization of pectic substances and increase in swelling and water-holding capacity of WIS in cell wall.

[Key words : fig *syconia*, enlargement, ripening, water content, cell wall composition]

緒 言

イチジク (*Ficus carica* L.) 果実の発育相は、細胞分裂の盛んな第 I 期とその後生長が緩慢となる第 II 期および果実が急激に肥大、成熟する第 III 期に区分され、果実の容積と重量の約 70~80% は第 III 期に増加する^{3,6)}。またイチジク果実の発育と果肉組織の変化について、平井⁶⁾ は '榊井ドーフィン' を用い、第 III 期に果実が急激に肥大する際、果実横断面積に占める果托 (花托) 内部の皮層組織の面積が急増するにもかかわらず、個々の細胞面積の増加は認められず、細胞間隙の面積が著しく増加

することを明らかにしている。新居⁹⁾ は、イチジク果実が可食期に達する最後の 10 日間で、内部皮層における細胞間隙の拡大は顕著であり、横断切片でみると約 65% にも達し、部位によっては細胞壁が膨潤して非常に厚くなることを観察している。これらの報告から、イチジク果実の成熟期における急激な肥大には、細胞間隙の拡大や細胞壁の変化が大きく影響していることが考えられる。

また、イチジク果実の果重増加は水分含量の増加に伴って進行し⁴⁾、成熟期には果実内の自由水の割合が増加して水の運動性が高くなり⁸⁾、果重の増加とともに 1 果

当たりの水溶性ペクチン質含量が急増する¹⁴⁾ ことなどが報告されている。しかし、イチジク果実の水分含量の増加と細胞間隙および細胞壁成分との関係についての研究事例は少なく、成熟期の急激な果実肥大に伴う水分吸収の機構は明らかではない。

そこで本研究では、イチジク果実の果肉組織を小果と果托に区分して、成熟期における水分含量と細胞壁内のポリウロニド含量の変化を調査し、さらに小果および果托から抽出した水不溶性固形物の水中沈定体積と最大抱水量を測定^{12, 13)} することにより、細胞壁の保水能の変化について検討を行った。

材料および方法

1 サンプリングおよび前処理

果実のサンプリングは、1997年に福岡県農業総合試験場豊前分場のほ場で行った。品種は、場内で栽植中の樹齢10年生の‘柗井ドーフィン’と‘蓬萊柿’を各3樹供試し、両品種の結果枝第3節の秋果を結果70日後および出荷適熟となった収穫期にそれぞれ1樹から5果、計15果ずつ採取した。結果日は、果実横径が4mmに達して外部形態が果実と認められた日とした。結果枝第3節の秋果の結果日、結果70日後および収穫日は、‘柗井ドーフィン’はそれぞれ5月23日、8月1日、8月15日、‘蓬萊柿’は5月30日、8月8日、8月23日であった。果実の果径、果重、果皮色を調査し、はく皮後に小果と果托に分け、それぞれ新鮮重と水分含量を測定した後、 -40°C で凍結保存した。果皮色は色彩色差計(ミノルタ社製CR300)を用いて果実赤道部を測定し、水分含量は試料の重量が恒量になるまで 80°C で通風乾燥して求めた。

2 ポリウロニドの定量

ポリウロニドの抽出は後藤⁵⁾の方法に準じて行い、凍結保存した試料から小果、果托をそれぞれ2g採取して4倍容のエタノールを加えてポリトロン(KINEMATICA社製PT3000)でホモジナイズし、 80°C で30分間加熱処理した。遠心分離(3500rpm, 10分間)後の残渣に80%熱エタノールを加えて再度遠心分離を行い、この過程を2回繰り返した後、残渣に脱イオン水を加えて室温で一晩静置し、遠心分離後の上清と脱イオン水による沈殿洗液を合わせて水可溶性画分とした。その後、残渣にグルコアミラーゼ溶液(0.1mg/ml, 0.1M酢酸ナトリウム-酢酸緩衝液中, pH4.5)40mlを加えて 37°C で3時間反応させた。遠心分離後に脱イオン水で2回洗浄を行った後、残渣に熱水を加えて 80°C で2時間ずつ、2回抽出を行い、遠心分離後の上清を合わせて熱水可溶性画分とした。さらに、残渣に0.05M EDTA(2Na塩, 0.05M酢酸ナトリウム-酢酸緩衝液中, pH4.5)を加えて 80°C で30分間抽出を行い、遠心分離後の上清と沈殿洗液を合わせてEDTA可溶性画分とした。その後、残渣に10%水酸化カリウムを加えて室温で24時間、2回反復抽出し、次に24%水酸化カリウムで24時間抽出して、10%および24%水酸化カリウム抽出液を合わせ、水酸化カリウム可溶性画分とした。各画分は脱イオン水で100mlに定容した後、メタヒドロキシジフェニル法²⁾によりウロン酸の定量を行った。なお、分析は小果、果

托とも3反復で行った。

3 水不溶性固形物の水中沈定体積と最大抱水量の測定

水不溶性固形物(以下、WISとする)は凍結保存した小果と果托の新鮮試料を用い、ポリウロニドの抽出と同様にエタノールおよび脱イオン水による抽出を行った後、残渣をエタノール、次いでエーテルで脱水後に 60°C で通風乾燥して調整した。得られたWISは重量測定後、50mgを採取して60%過塩素酸でデンプンを抽出し、フェノール硫酸法で定量した。WISの水中沈定体積と最大抱水量の測定はTakeda・Kiryama¹²⁾の方法に準じて行った。すなわち、WISの乾燥試料0.5gに50mlの脱イオン水を加え、攪拌後に減圧条件下で十分に脱気を行った。100mlメスシリンダーに移した後、脱イオン水を100mlになるまで加え、24時間静置後に水中でのWISの体積を測定し、水中沈定体積とした。その後、ガラスろ過器(直径41mm×高さ60mm, 底面ろ過部の孔径160~250 μm)に移して10分間静置し、過剰な水分を自然落下させた後に重量を秤量し、ガラスろ過器と試料の重量を差し引いて得られた値を最大抱水量とした。なお、水中沈定体積と最大抱水量の測定は小果、果托とも2反復で行った。

結果

1 果実の肥大・成熟と水分含量の変化

‘柗井ドーフィン’、‘蓬萊柿’の結果70日後と収穫期における果径、果重および果皮色を第1表に示した。両品種とも果実の横径、縦径は結果70日後に比べて収穫期には1.5倍近く大きくなり、果重も結果70日後は33~38gであったが、収穫期には4倍近くに増加して130~139gに達した。果皮色は収穫期にL*値とb*値が低下してa*値が急激に上昇した。

小果と果托の重量も収穫期に40~50g程度増加したが、重量の増加量は品種によって異なり、‘柗井ドーフィン’は果托、‘蓬萊柿’は小果の重量が大きくなった(第2表)。水分含量は、収穫期に‘蓬萊柿’でやや少なくなったが、両品種の小果、果托ともおおむね85%前後で、成熟に伴う変化は小さかった。小果、果托の重量から換算した部位別の水分の総量は両品種とも収穫期に急激に増加し、‘蓬萊柿’は小果と果托の水分の総量の差が大きくなった。また成熟に伴う小果、果托の重量増加量の80~90%は、水分の増加によるものであった。

2 果実の肥大・成熟とポリウロニド含量の変化

単位重量当たりのポリウロニド含量は、‘柗井ドーフィン’、‘蓬萊柿’の小果および果托とも結果70日後は熱水、EDTA可溶性画分で著しく多かったが、収穫期に急激に減少して水可溶性画分で増加した(第3表)。収穫期の小果は、果托に比べて水可溶性画分のポリウロニド含量が多く、熱水可溶性画分のポリウロニド含量が少なくなった。水酸化カリウム可溶性画分はポリウロニド含量が少なく、成熟に伴う変化も小さかった。小果、果托の重量から換算した部位別のポリウロニドの総量は、収穫期にEDTA可溶性画分で減少して水可溶性画分で急激に増加し、とくに‘蓬萊柿’の小果で著しく多くなった。熱水可溶性画分のポリウロニドの総量は、両品種と

Table 1. Changes in diameter, weight and peel color of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi' syconia during ripening.

Cultivar	Stage of development	Fruit diameter		Fruit weight (g)	Color score of peel		
		Breadth (mm)	Length (mm)		L*	a*	b*
Masui Dauphine ¹⁾	70th day after bearing	46.6	47.5	38.1	59.9	-25.8	43.5
	Harvest time	67.7 ** ³⁾	71.0 **	138.9 **	42.0 **	14.6 **	19.4 **
Houraishi ²⁾	70th day after bearing	45.9	42.3	33.4	61.1	-25.2	38.6
	Harvest time	68.7 **	59.4 **	129.9 **	50.1 **	7.5 **	23.0 **

1) Bearing time :23 May, 70th day after bearing :1 Aug., Harvest time :15 Aug., in 1997.

2) Bearing time :30 May, 70th day after bearing :8 Aug., Harvest time :23 Aug., in 1997.

3) ** is significant by t-test, 1% level.

Table 2. Changes in weight and water contents in the fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi' syconia during ripening.

Stage of development	Part of fruit	Fresh weight of part(g)	Water content (% FW)	Water content ¹⁾ (g/part FW)
'Masui Dauphine'				
70th day after bearing	Fruitlet	11.9c ²⁾	85.6b	10.2c
70th day after bearing	Fruit receptacle	16.3c	88.1ab	14.4c
Harvest time	Fruitlet	54.0b	86.5b	46.7b
Harvest time	Fruit receptacle	62.7a	89.4a	56.1a
'Houraishi'				
70th day after bearing	Fruitlet	14.7c	84.0b	12.3c
70th day after bearing	Fruit receptacle	10.8c	87.5a	9.5c
Harvest time	Fruitlet	67.0a	81.0c	54.3a
Harvest time	Fruit receptacle	45.7b	82.2bc	37.6b

1) Whole water content in each part of fruit.

2) Mean separation within columns by Tukey's multiple range test, 5% level.

も収穫期に小果で減少したのに対して果托では増加傾向となり、また水酸化カリウム可溶性画分では、小果、果托とも収穫期に増加した。各画分のポリウロニドの合計量は単位重量当たり含量でみた場合、小果、果托とも収穫期に急激に減少したが、部位ごとの総量は収穫期に多くなり、'榊井ドーフィン'は果托、'蓬萊柿'は小果での増加が顕著であった。

3 WISの水中沈定体積と最大抱水量の変化

両品種のWISの単位重量当たり含量は、結果70日後は果托より小果の方が多かったが、収穫期には小果、果托とも急激に減少した(第4表)。しかし、小果、果托の重量から換算したWISの総量は収穫期に小果でやや減少したものの、成熟に伴う変化は小さかった。また、'蓬萊柿'の小果は、WISの総量が多かった。WIS中のデンプン含量は小果が10~15%、果托が20%前後で、果托より小果の方が少なかったが、両部位とも結果70日後と収穫期の間有意な差は認められなかった。

WISの水中沈定体積と最大抱水量は、両品種の小果、果托とも収穫期に増加し、とくに果托での増加が顕著であった(第1図、第2図)。

考 察

今回、調査を行った結果70日後から収穫期にかけては、イチジク果実の発育相における第Ⅲ期に相当し、'榊井ドーフィン'、'蓬萊柿'の両品種とも収穫期までの約2週間で果実が急激に肥大して果皮の着色が進行し、収穫果重の70%以上がこの時期に増加した。小果、果托の重量もこの間に急増したが、その重量増加量の80~90%は水分の増加によるものであった。一般に、果実の大きさを決める要因は果肉の細胞数と細胞容積および細胞間隙の容量とされ、多くの果樹類では果実の拡大成長には、個々の細胞の容積拡大が大きく関係するとされている⁹⁾。しかし、イチジク果実では成熟期に細胞数と細胞容積がほとんど増加せず、細胞間隙が著しく拡大する^{6,9)}。

本研究では、'榊井ドーフィン'と'蓬萊柿'の果実が第Ⅲ期に急激に肥大する際に、水分含量の増加とともに小果、果托内で水可溶性のポリウロニド含量が急激に増加することが明らかになった。同時に、EDTA可溶性画分のポリウロニド含量が急激に減少したことから、果実内の細胞壁ではペクチン質の可溶化が進行して水溶性ペクチン質が急増したと推察される。とくに、果托に比

Table 3. Changes in polyuronides contents in the fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi'syconia during ripening.

Stage of development	Part of fruit	Polyuronide content(mg/g FW)					Polyuronide content(mg/part FW) ¹⁾				
		Water soluble	Hot-water soluble	EDTA soluble	KOH soluble	Total	Water soluble	Hot-water soluble	EDTA soluble	KOH soluble	Total
'Masui Dauphine'											
70th day after bearing	Fruitlet	0.56c ²⁾	6.03a	9.20a	0.62a	16.41a	6.7b	71.8b	109.5b	7.4c	195.4b
70th day after bearing	Fruit receptacle	0.61c	3.56b	9.03a	0.65a	13.85b	9.9b	58.0c	147.2a	10.6c	225.7b
Harvest time	Fruitlet	2.22a	0.64d	0.63b	0.39b	3.88c	119.9a	34.6d	34.0d	21.1b	209.6b
Harvest time	Fruit receptacle	1.54b	1.40c	1.05b	0.56ab	4.55c	96.6a	87.8a	65.8c	35.1a	285.3a
'Houraishi'											
70th day after bearing	Fruitlet	0.44c	4.29a	8.42a	0.59a	13.74a	6.5c	63.1a	123.8a	8.7c	202.1b
70th day after bearing	Fruit receptacle	0.97c	3.59b	9.01a	0.82a	14.39a	10.5c	38.8b	97.3b	8.9c	155.5c
Harvest time	Fruitlet	3.33a	0.52d	0.57b	0.55a	4.97b	223.1a	34.8b	38.2c	36.9a	333.0a
Harvest time	Fruit receptacle	2.53b	1.01c	1.12b	0.49a	5.15b	115.6b	46.2b	51.2c	22.4b	235.4b

1) Whole content of polyuronide in each part of fruit.

2) Mean separation within columns by Tukey's multiple range test, 5% level.

Table 4. Changes in water-insoluble solids (WIS) and starch contents in the fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi'syconia during ripening.

Stage of development	Part of fruit	WIS content (mg/g FW)	WIS content ¹⁾ (mg/part FW)	Starch content in WIS(% DW)
'Masui Dauphine'				
70th day after bearing	Fruitlet	70.9a ²⁾	843.7a	15.3ab
70th day after bearing	Fruit receptacle	44.7b	728.6b	20.9a
Harvest time	Fruitlet	12.9c	696.6b	9.3b
Harvest time	Fruit receptacle	11.4c	714.8b	19.0a
'Houraishi'				
70th day after bearing	Fruitlet	92.3a	1356.8a	13.6bc
70th day after bearing	Fruit receptacle	48.1b	519.5c	23.7a
Harvest time	Fruitlet	16.7c	1118.9b	10.2c
Harvest time	Fruit receptacle	11.7c	534.7c	19.7ab

1) Whole WIS content in each part of fruit.

2) Mean separation within columns by Tukey's multiple range test, 5% level.

べて水分の増加が顕著であった'蓬萊柿'の小果では、水可溶性のポリウロニド含量が著しく多くなった。隈元ら⁹⁾はNMRスペクトロメータを用いた解析により、イチジク果実の成熟が進むと組織内の水の運動性が高まることを報告し、細胞壁の分解によって増加した水溶性ペクチン質と糖との相互作用によるゲル化の影響を示唆している。ペクチン質は、ゲル化することにより多量の水を保持できる^{10, 16)}。筆者らも、本研究に供試した小果、果托と同じサンプルを用いて糖分析を行い、収穫果では糖含量が急増することを報告している¹⁵⁾。これらのことから、イチジク果実の第Ⅲ期における小果、果托内の水分含量の増加にはペクチン質の可溶化が関係しており、糖と水溶性ペクチン質が同時に急増することによりゲル化が急速に進行し、水分の吸収、保持に関与していることが考えられる。

さらに本研究では、イチジク果実の肥大、成熟に伴って、小果および果托内のWISの水中沈定体積と最大抱水量が増加することが明らかとなった。中でも、収穫果の果托では水中沈定体積と最大抱水量が著しく大きくな

った。水中沈定体積と最大抱水量の測定は食物繊維の物性変化の調査に用いられる方法で、その値が大きいほど、かさ形成能と保水能が高いとされる^{12, 13)}。このため、第Ⅲ期のイチジク果実では、水不溶性成分のかさ形成能と保水能の高まりとともに水分含量が増加すると考えられる。その際、WISの単位重量当たり含量は収穫果で急減したが、部位ごとの重量から換算したWISの総量に大きな変化は認められなかった。今回の調査で用いたWISは、小果、果托のアルコール不溶性固形物を水抽出後に乾燥して調整したことから、主として水不溶性ペクチン質、ヘミセルロース、セルロースなどの水不溶性細胞壁多糖類とデンプン、タンパク質などが含まれていたと考えられる^{1, 10)}。この内、WIS中のデンプン含量は10~20%前後であったが、各部位ごとの結果70日後と収穫期の含量には有意な差がなかったことから、収穫期におけるWISの保水能の増大には、水不溶性細胞壁多糖類の組成および構造的な変化が影響を及ぼしている可能性が高い。ペクチン質などの多糖類は複雑な三次元の網目構造を持ち、水分吸収によってゲルを形成する

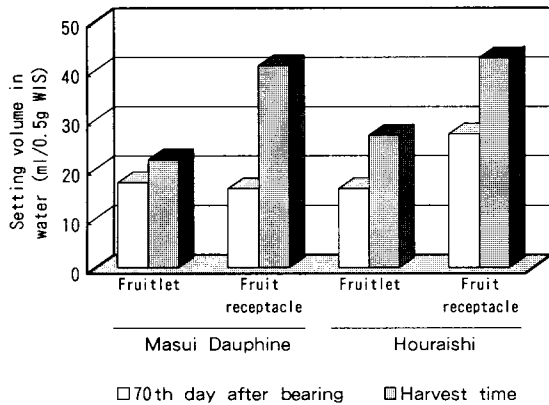


Fig.1. Changes in settling volume in water of water-insoluble solids (WIS) in the fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi' syconia during ripening.

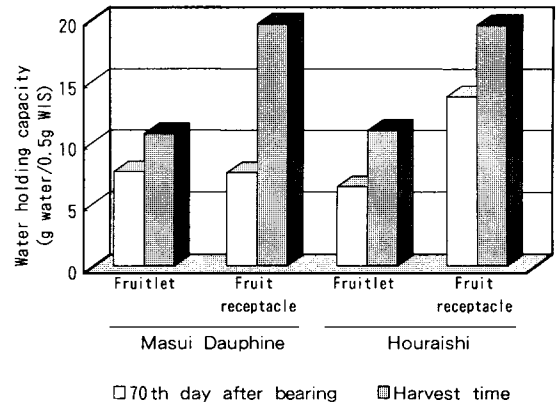


Fig.2. Changes in water-holding capacity of water-insoluble solids (WIS) in the fruitlets and fruit receptacles of 'Masui Dauphine' and 'Houraishi' syconia during ripening.

が、その架橋の結合方式は様々でゲル構造の生成過程や詳しい性質は明らかにされていない^{7,16)}。本研究で用いた'榊井ドーフィン'と'蓬莱柿'の果実では、成熟期における細胞壁成分の含量および物性変化が品種と部位によってかなり異なっていた。今後さらに、イチジク果実の急激な肥大機構を解明するためには、品種、部位ごとに細胞壁多糖類の結合方式を含めた構造的な変化と水分吸収に伴うゲル形成の過程を明らかにする必要がある。

引用文献

- 綾野雄幸(1995)食物繊維の化学. 食物繊維(改訂新版), (印南敏・桐山修八編著), 東京:第一出版, pp.16-38.
- Blumenkrantz, N. and G. Asboe-Hansen (1973) New method for quantitative determination of uronic acids. *Anal. Biochem.* **54**: 484-489.
- Crane, J.C. (1948) Fruit growth of four fig varieties as measured by diameter and fresh weight. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* **52**: 237-244.
- Crane, J.C. and J. G. Brown (1950) Growth of the fig fruit, *Ficus carica* var. Mission. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* **56**: 93-97.
- 後藤明彦(1991)'サンボウカン'の生理的す上がり果実の果肉砂じょうのペクチン質とヘミセルロースの分子量. *果樹試報* **19**: 29-38.
- 平井重三(1966)イチジク果実の発育に関する研究. *大阪府立大学紀要* **18**: 169-218.
- 弘津俊輔(1994)ゲルと生命科学-物性物理学の観点から-. 蛋白質核酸酵素 **39**: 2769-2777.
- 隈元保子・渡辺剛史・井上眞理(1997)イチジク果実の成熟に伴う水の動態変化のNMRによる解析. *園学雑* **66**(別2): 234-235.
- 新居直祐(1998)果実の成長と発育. 東京:朝倉書店, 132p.
- 桜井直樹・山本良一・加藤陽治(1991)植物細胞壁と多糖類. 東京:培風館, 260p.
- 佐藤公一(1953)農学体系=園芸部門 無花果・梅・杏・李編. 東京:養賢堂, 201p.
- Takeda, H. and S. Kiriyama (1979) Correlation between the physical properties of dietary fibers and their protective activity against amaranth toxicity in rats. *J. Nutr.* **109**: 388-396.
- 武田秀敏・桐山修八(1995)食物繊維の物理化学的性質. 食物繊維(改訂新版), (印南敏・桐山修八編著), 東京:第一出版, pp.59-79.
- 矢羽田二郎・粟村光男(1996)イチジク果実の細胞壁成分の品種間差異と成熟過程における変化. *園学雑* **65**: 41-47.
- 矢羽田二郎・野方仁(1999)イチジク果実の糖含量・糖組成比の品種、果実内部および結果節位間における相違. *園学雑* **68**: 987-992.
- 山内愛造・廣川能嗣(1990)機能性ゲル. 東京:共立出版, 104p.