

## 生鮮農産物の呼吸量の測定\*

村田 敏\*\*・宮内樹代史\*\*・王 延耀\*\*

## 要 旨

生鮮農産物の呼吸量は、貯蔵に関する研究の基礎資料として大変重要であるが、広い温度範囲に渡って組織的に測定された例は少ない。特にわが国の農産物についての測定例は少ない。そこで本研究では、13種類のわが国の生鮮農産物について、温度と呼吸量の関係測定した。得られた結果は、温度依存式として Arrhenius 式及び Gore 式を用いて解析し、各農産物の温度係数を計算した。また、測定値から各温度毎の呼吸熱を計算したところ、今回の測定により得られた結果は一般に知られている値よりやや高い結果となった。

[キーワード] 呼吸, 呼吸速度, 生鮮農産物, 温度依存性

## Measurement of Respiration of Fresh Vegetables\*

Satoshi MURATA\*\*, Kiyoshi MIYAUCHI\*\*, Yanyao WANG\*\*

## Abstract

The respiration rate of fresh vegetables has the fundamental significance in storage, but there were few data available in wide range of temperatures.

In this study, the relationship between respiration rate and temperature of thirteen kinds of Japanese vegetables were measured by modern precise ventilatory method.

Because of respiration being a kind of chemical reaction, the relationships between respiration rate and temperature were fitted to Arrhenius' equation and Gore's equation (Modified Arrhenius' equation).

The heat of respiration in kJ per ton per day was obtained multiplying the respiration rate of milligrams of CO<sub>2</sub> per kilogram per hour by a factor of 10.61. The heats of respiration are all a little higher than the conventional values.

[Keywords] respiration, respiration rate, fresh vegetables, temperature dependency

## I 緒 言

農産物を貯蔵する上で、品質の保持は最も重要

な事項であるが、生鮮農産物においては、生命保持のために呼吸が行われ、エネルギーの供給を行うとともに物質の消耗による品質低下が起こり、また貯蔵条件に影響する呼吸熱の発生が行われる。したがって呼吸量を知ることや、それを支配する条件を明らかぼすることは、貯蔵と品質保持を考える上で最も重要である。さて、生鮮農産物の呼吸量の測定結果は多くある<sup>1)</sup>が、多くの種類

\* 農業機械学会第51回年次大会(平成4年4月, 東京農工大)にて講演

\*\* 九州大学農学部(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1 ☎092-641-1101内線6296) Faculty of Agriculture, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

について広い温度範囲に渡って組織的に測定した例は少ない。特にわが国の産物については資料に乏しいように思われる。そこで本研究では、13種類のわが国の生鮮農産物について、温度と呼吸量の関係を、赤外線式ガス分析計を用いて測定した。

呼吸は生物が営む代表的な生化学反応で、生物はこれにより、糖、酸および脂肪等を分解し、エネルギーを得て生きている。この化学反応速度は一般の化学反応と同様に、Arrhenius式に支配される<sup>2)</sup>。また、青果物の呼吸速度と温度の関係式として有名なGoreの式がある。本研究では、呼吸量の温度依存式としてこれら2つの式を用い、測定結果を解析した。これによって、合理的な貯蔵装置の設計や貯蔵中の品質評価および貯蔵生理の研究の基礎資料を提供せんとするものである。

## II 測定方法

### 1. 測定装置

図1に測定装置の概略図を示す。供試材料を入れたデシケータ(容量1.6L)を恒温槽(島津製作所製、小型環境創造装置、SCA-001H)内に置き、ポンプにより新鮮空気を送り込む。デシケータ内を通過したガスと、恒温槽内を通過したガスは、生物実験用CO<sub>2</sub>濃度/濃度差測定装置(島津製作所製、IRA-102)に導入され、濃度差が測定される。濃度差測定装置に導かれたサンプルガス

は、まず電子クーラーでガス中の水蒸気を除湿され、さらにメンブレンフィルタで除塵された後、ニードル弁、ポンプ、流量計を経て一定量(1.0 L/min)で赤外線式ガス分析計(島津製作所製、IRA-106)に送られる<sup>3)</sup>。このガス分析計は、試料セル、比較セルの両セルにガスを液すことができる。このときの試料側と比較側のCO<sub>2</sub>ガスの濃度差を検出し、記録した。尚、ここで用いた赤外線ガス分析計の測定精度は1 ppmである<sup>4)</sup>。

デシケータ内に送り込む新鮮空気は、試料から発生する純CO<sub>2</sub>発生量を知るために、予めソーダライムの層を通過させCO<sub>2</sub>濃度を下げ、かつ、除湿のためのシリカゲルを通過させた。両層通過前のCO<sub>2</sub>濃度は400~500ppmであったが、通過後には10ppm程度まで下げることができた。実際に試料が発生するCO<sub>2</sub>の濃度は、試料・温度にもよるが、概ね200ppm程度であるので、これにより試料が発するCO<sub>2</sub>濃度をかなり正確に測定することができたと考えられる。また、試料表面温度及びデシケータ内乾湿球温度をc-c熱電対により測定し、記録した。湿球温度は、デシケータ内に水を入れた試料ビンをおき、熱電対をくるんだガーゼを浸漬させることにより測定した。

温度制御は恒温槽を用いて、ステップ状に降温させる方法をとった。温度が設定値となった後、約20分でCO<sub>2</sub>濃度は安定するので、この時点での濃度を測定値とした。

### 2. 供試材料

測定に供試した材料は、表1に示す13種類である。試料は概ね福岡大同青果市場から、実験日当日搬入した。タマネギ、サツマイモ、サトイモについては、キューリング、温州ミカンを選果、ジャガイモ(メークイン)は冷蔵貯蔵等の処理が行われている。他の試料は収穫日の翌日に搬入しており、その間予冷倉庫で保存されていたものである。

測定に供試した量は1個体で、その重量は表1に併記した。測定は各農産物について3回行ったが、ここでは代表的な1回分のデータを記載した。

### 3. 呼吸速度の算出

混定値は、0°C~25°Cの間で測定時の温度に対するCO<sub>2</sub>濃度差(ppm)で記録されており、こ

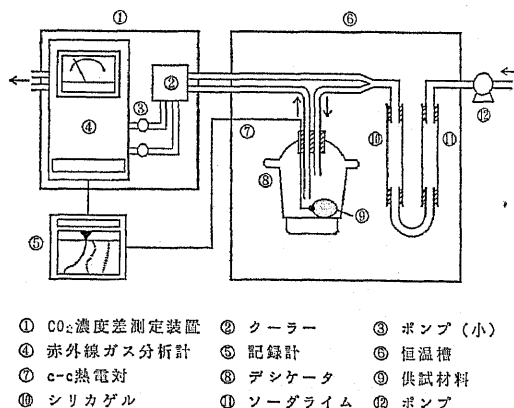


図1 測定装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of measurement apparatus

表1 供試材料

Table 1 Materials

供試材料	品 種	産 地	収穫日	供試量(g)
ハウレンソウ	アトラス	福岡市西区金武	'91.11.24	19.29
キクナ	中葉系	福岡県粕屋郡須恵町	'91.12.25	100.32
ハクサイ	新理想	大分県日田市	'92.1.04	1953.95
レタス	トップマーク	福岡県三井郡大刀洗町	'92.1.15	372.66
アスパラガス	ウェルカム	佐賀県佐賀市	'92.1.22	66.81
タマネギ	もみじ2号	香川県丸亀市	'91.6.	251.94
ニンジン	黒田五寸	長崎県諫早市	'91.12.16	75.98
カブ	耐病ひかり	福岡市西区金武	'91.12.15	110.44
馬鈴薯	メークイン	北海道河西郡芽室町	'91.9.	283.42
	出島	福岡県粕屋郡須恵町	'91.12.14	202.63
サツマイモ	宮崎紅	宮崎県串間市大東	'91.10.	169.74
サトイモ	運葉いも	熊本県阿蘇郡西原町	'91.11.	224.87
温州ミカン	温州遅手	福岡県山門郡山川町	'91.12.	109.04
カキ	富有	福岡県朝倉郡杷木町	'91.11.30	220.28

れより呼吸速度R（試料単位重量が1時間当りに排出するCO<sub>2</sub>量）を次式により算出した。

$$R = 10^3 \cdot M \cdot \frac{60 \cdot q \cdot x \cdot 10^{-6}}{22.40 \cdot \frac{T}{273.15} \cdot W}$$

$$= 0.7317 \cdot \frac{M \cdot q}{T \cdot W} \cdot x \quad (1)$$

ここで、R：呼吸速度 (CO<sub>2</sub>mg/kg/h)  
 M：CO<sub>2</sub>の分子量 (=44)  
 q：流量 (L/min)  
 x：CO<sub>2</sub>の濃度差測定値 (ppm)  
 T：試料表面温度 (K)  
 W：試料重量 (kg)

### III 測定結果及び考察

#### 1. 呼吸量の温度依存性

測定結果を整理する産物呼吸量の温度依存式としては、Arrhenius式及びGore式を用いた。Arrhenius式は化学反応速度式としてよく用いられる<sup>2)</sup>。

$$R = R_a \cdot \exp(-\alpha/T) \quad (2)$$

R：呼吸速度 (CO<sub>2</sub>mg/kg/h)  
 R<sub>a</sub>：産物固有の係数  
 α：産物固有の温度係数  
 T：温度 (K)

また、Goreの式は、青果物の呼吸量の温度依存式として有名である<sup>3)</sup>が、これはArrhenius式の近似式として求められる。

$$R = R_0 \cdot \exp(\beta t) \quad (3)$$

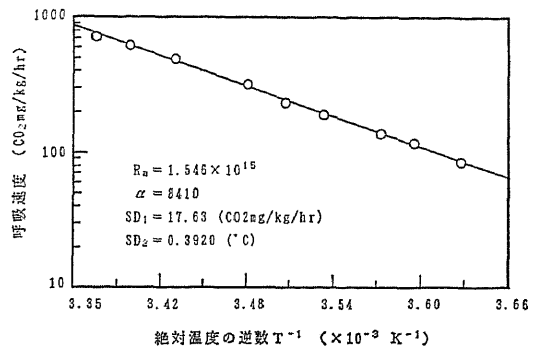


図2 アスパラガスの呼吸速度の温度依存性 (Arrhenius式)

Fig. 2 Temperature dependency of respiration rate for asparagus (Eq. Arrhenius)

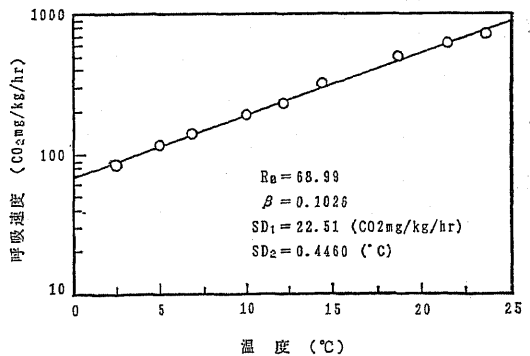


図3 アスパラガスの呼吸速度の温度依存性 (Gore式)

Fig. 3 Temperature dependency of respiration rate for asparagus (Eq. Gore)

表2 温度係数  
Table 2 Temperature coefficient

供試材料	$R=R_a \cdot \exp(-a/T)$ (CO <sub>2</sub> mg/kg/h)				$R=R_0 \cdot \exp(\beta t)$ (CO <sub>2</sub> mg/kg/h)			
	R <sub>a</sub>	α	SD <sub>1</sub>	SD <sub>2</sub>	R <sub>0</sub>	β	SD <sub>1</sub>	SD <sub>2</sub>
ハウレンソウ	2.144×10 <sup>14</sup>	8006	11.50	0.5784	41.83	0.09808	13.22	0.6643
キクナ	9.355×10 <sup>15</sup>	8962	15.20	0.4033	55.74	0.1092	20.26	0.5205
ハクサイ	3.836×10 <sup>6</sup>	3418	1.366	1.147	14.41	0.04175	1.270	1.0498
レタス	1.893×10 <sup>6</sup>	2282	1.168	0.6451	45.08	0.02795	1.315	0.7246
アスパラガス	1.546×10 <sup>18</sup>	8410	17.63	0.3920	68.99	0.1026	22.51	0.4460
タマネギ	1.327×10 <sup>6</sup>	3166	0.7701	0.8939	12.56	0.03844	0.8247	0.9608
ニンジン	2.284×10 <sup>6</sup>	4883	4.732	0.6648	40.47	0.05953	5.356	0.7411
カブ	8.732×10 <sup>12</sup>	7138	7.316	0.7547	33.24	0.06951	7.345	1.044
馬鈴薯(出島)	2.224×10 <sup>8</sup>	4496	1.688	1.033	16.11	0.05569	1.760	1.091
(メークイン)	1.194×10 <sup>4</sup>	2104	0.2289	1.2219	5.47	0.02569	0.2391	1.309
サツマイモ	2.404×10 <sup>10</sup>	5833	2.039	0.8040	13.26	0.07122	2.281	0.9109
サトイモ	1.123×10 <sup>10</sup>	5794	1.223	0.8514	7.07	0.07142	1.296	0.8482
温州ミカン	6.230×10 <sup>12</sup>	7401	4.898	1.094	11.23	0.08976	5.273	1.178
カキ	5.773×10 <sup>10</sup>	6214	0.7537	0.4212	7.75	0.07705	0.8925	0.4912

R:呼吸速度 (CO<sub>2</sub>mg/kg/h)

R<sub>0</sub>: 0°CにおけるRの値

β: 産物固有の温度係数

t: 温度 (°C)

今回測定した各農産物の温度別呼吸量をこれらの式に当てはめ、最小自乗法により各係数を決定した。図2, 3は、アスパラガスの呼吸速度の温度依存性を Arrhenius 式及び Gore 式を用いて解析した結果である。このように、測定値は両式によく近一致した。実際の計算に際しては、目的に応じて、どちらか適切な式を選択することが望ましい。

## 2. 各農産物の温度係数

表2に各農産物の温度係数及び標準偏差の計算結果を示す。測定は各試料について3回行ったが、個体差があるため、ここでは各試料の中で代表的なデータを記載した。一般に生長が盛んで貯蔵力の弱いものほど呼吸量は著しく、植物の栄養体はその生産の目的となる葉菜類は、貯蔵器官であるイモ類と比較してR<sub>0</sub>の値はかなり大きく、根菜類、果実類はその間に位置する結果となった。また、茎であるアスパラガスも成長が著しいため、葉菜類と同様高い値を示した。

標準偏差を見ると、Gore式に比べて Arrhenius 式の方がやや低い値となっており、測行値との適合性が良いようである。SD<sub>1</sub>は呼吸速度の標準偏差 (CO<sub>2</sub>mg/kg/h), はSD<sub>2</sub>呼吸速度から

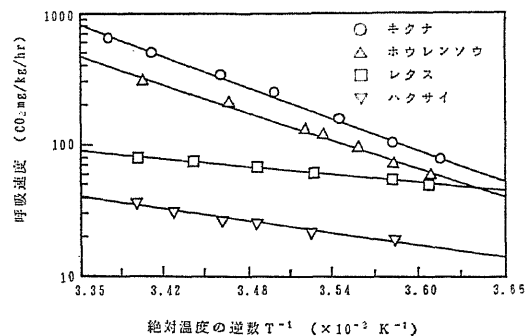


図4 葉菜類の呼吸速度の温度依存性

Fig. 4 Temperature dependency of respiration rate for leafy vegetables

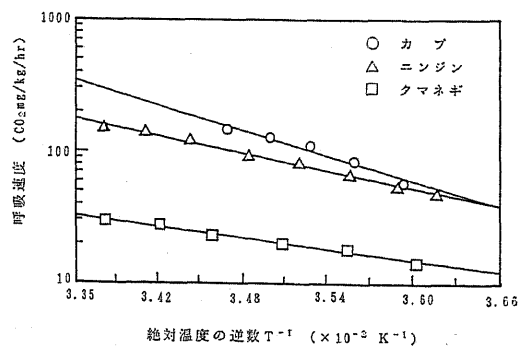


図5 根菜類の呼吸速度の温度依存性

Fig. 5 Temperature dependency of respiration rate for root vegetables

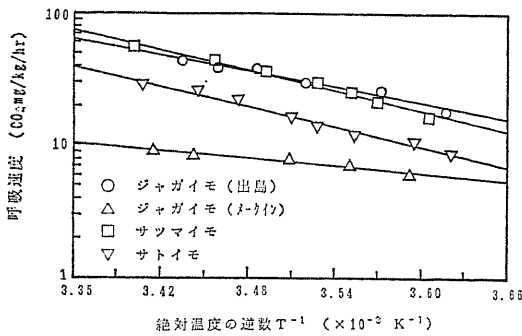


図6 イモ類の呼吸速度の温度依存性  
Fig. 6 Temperature dependency of respiration rate for potatoes

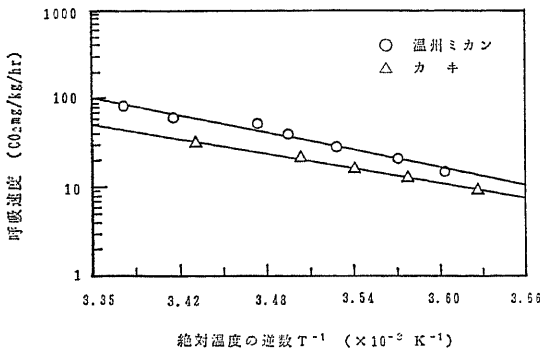


図7 果実の呼吸速度の温度依存性  
Fig. 7 Temperature dependency of respiration rate for fruits

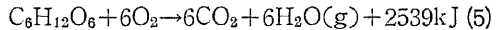
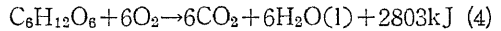
計算した温度の標準偏差 (°C) である。呼吸速度の標準偏差は試料毎の呼吸量の大小よりややばらつきがあるが、温度の標準偏差は 1°C 前後であり、両式の適合性の良さが認められる。

図4～図7に Arrhenius 式による各農産物の呼吸速度の温度依存性を示す。葉菜類においては、ホウレンソウやキクナ等の非結球性のものは、レタス、ハクサイ等の結球性のものに比して呼吸速度が大きく、温度上昇による呼吸速度の増加も大きい結果となった。根菜類では、カブとニンジン (共に葉なし) についてはよく似た傾向となり、タマネギを上回った。イモ類は、他の野菜類に比べて呼吸速度が低く、傾向が酷似した。ただし、馬鈴薯 (メークイン) は他に比べて明かに低い結果となったが、この試料は収穫後、長期にわたって冷蔵貯蔵していたためと考えられる。また、果実においては温州ミカンとカキ共に同様の

傾向を示した。

### 3. 各農産物の呼吸熱

農産物の低温処理等の際、呼吸熱は冷蔵負荷として考慮すべき大きな要素であるが、直接正確に測定することは困難である。一般によく知られている呼吸熱の値は呼吸量の測定値から推算していることが多い<sup>6),7)</sup>。そこで、本研究においても、測定結果から、ブドウ糖の酸化に関する次式を用いて、各農産物の呼吸熱を算出した。



この化学反応で発生する熱量は、(4)、(5)式両辺における各物質の標準生成エンタルピーを計算することによって得られる<sup>8)</sup>。(4)式は、生成する H<sub>2</sub>O が液体、(5)式は気体の場合であるがここでは、(4)式を用いて換算係数を求めると、CO<sub>2</sub> 1g あたり、

$$2803 / (6 \times 44) = 10.61(kJ) \quad (6)$$

となる。これに呼吸速度 R を乗ずると、呼吸熱 Q<sub>R</sub>(kJ/ton/day) は、次式で表される。

$$Q_R = 10.61 \times R \times 24 \quad (7)$$

表3に、計算した各農産物の温度毎の呼吸熱の値を示す。計算結果は、一般に知られている値 (下段括弧内)<sup>6),7)</sup> と比較して、大きい結果となった。しかしどの農産物においても、0°C では3倍近い値であるのが、高温域になるにつれ、差が小さくなる傾向を示した。従来の値と今回の計算値の間に差が生じた理由としては、従来の呼吸量の測定が密閉系で行われ、試料から発生した CO<sub>2</sub> が、試料自身の呼吸を抑制することや測定精度等も原因と考えられる。今回用いた測定法は通気法で、赤外線ガス分析計を用いることにより、試料室内を通過したガスの CO<sub>2</sub> 濃度を瞬時に測定できるため、より正確な値が測定できたと考えられる。

### 4. 温度係数 Q<sub>10</sub>

温度が生物学的過程に及ぼす効果を評価する指標として、温度係数 Q<sub>10</sub> がある。Q<sub>10</sub> は通常 2 前後の値をとるが、低温域では大きく、高温域では小さくなるのが一般的である。ここでは、測定結果をあてはめた Arrhenius 式の温度係数から、各農産物の呼吸速度の Q<sub>10</sub> を計算した。表4にその結果を示す。Q<sub>10</sub> はどの農産物においても 2 に

表3 呼 吸 熱

Table 3 Heat of respiration

農産物	温度別の呼吸熱 (kJ/t/d)					
	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
ハウレンソウ	10170 (4430~5170)	17230 (8020~13400)	28640 —	46780 (31130~51910)	75140 (39990~66680)	118790 —
キクナ	13450	24250	42840	74190	126090	210540
ハクサイ	3590	4500	5580	6890	8430	10250
レタス	11330 (1370~3900)	13160 (3060~4640)	15220 —	17500 (7390~10450)	20030 (11820~13930)	22830 (16900~21210)
アスパラガス	16760 (6540~13930)	29150 (13720~24370)	49710 —	83230 (26910~54340)	136920 (40410~62460)	221520 (86310~110470)
ニンジン	10020 (2220~4750)	13810 (2950~6120)	18830 —	25400 (6010~12450)	33910 (10660~22050)	44840 —
タマネギ	3130 (1010~1680)	3850 (1340~2180)	4710 (1970~2930)	5720 (2720~3980)	6900 (3140~5020)	8270 —
カブ	8250 (2010)	11970 (2220~2320)	17130 —	24210 (4960~5590)	33820 (5590~5800)	46720 —
馬鈴薯(出島)	4020	5410	7200	9480	12370	16000
(メークイン)	1370 (920~2260)	1580 (1050~1680)	1800 (1420~1880)	2050 (1680~3140)	2320 (2090~3770)	2620 —
サツマイモ	3260 —	4780 —	6920 —	9900 (4540~5590)	13980 —	19510 —
サトイモ	1750	2570	3710	5290	7460	10390
温州ミカン	2710	4420	7070	11120	17240	26320
カキ	1920 —	2900 (1370)	4300 —	6290 (2740~3270)	9090 (4640~5590)	12960 (6750~9290)

表4 Q<sub>10</sub> 値Table 4 Values of Q<sub>10</sub>

供試材料	Q <sub>10</sub>			
	0°C~10°C	5°C~15°C	10°C~20°C	15°C~25°C
ハウレンソウ	2.815	2.715	2.624	2.539
キクナ	3.186	3.059	2.944	2.838
ハクサイ	1.556	1.532	1.510	1.489
レタス	1.343	1.329	1.317	1.304
アスパラガス	2.966	2.856	2.754	2.661
タマネギ	1.506	1.484	1.464	1.446
ニンジン	1.880	1.839	1.801	1.765
カブ	2.517	2.437	2.363	2.295
馬鈴薯(出島)	1.788	1.752	1.719	1.688
(メークイン)	1.317	1.300	1.288	1.277
サツマイモ	2.126	2.070	2.019	1.972
サトイモ	2.115	2.060	2.010	1.963
温州ミカン	2.604	2.518	2.439	2.367
カキ	2.233	2.171	2.114	2.061

近い値となり、高温域ではやや低い値となったが、Arrhenius 式は近似的に指数関数式として表されるので大きな差は認められなかった。ここでの計算値は、Platenius<sup>9)</sup> が測定した各種野菜についての 0~24°C の間での Q<sub>10</sub> 値より低い結

果となったが、農産物の呼吸量を知る上でのひとつの指標となるものと考えられる。

#### IV 摘 要

合理的な貯蔵装置の設計や貯蔵中の品質評価、

および貯蔵生理の研究の基礎資料を提供するために、13種類のわが国の生鮮農産物について、温度と呼吸量の関係を測定したところ、以下のことが明らかとなった。

- 1) 呼吸量の温度依存式として Arrhenius 式および Gore 式を用いて解析した結果、測定値は両式によく一致した。
- 2) 両式の各温度係数から、呼吸量は葉菜類、根菜類、果実、イモ類の順に大きい結果となった。
- 3) 測定値より求めた呼吸熱は、一般に知られている値より高い結果となった。
- 4) 温度係数  $Q_{10}$  は、どの農産物においても 2 前後の値となった。

以上より、今回の測定で得られた結果は、貯蔵生理をはじめ、種々の研究の基礎資料として、充分有用であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、供試材料の提供にご協力戴いた、福岡県園芸農業協同組合連合会の高武俊基氏、木下清登氏に深謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、本多靖、石黒修：果実と野菜の保存に関する研究（第1報）、果実と野菜の呼吸に及ぼす環境ガス組成の影響（その1）、園芸学雑誌、36(3)、101—110、1967
  - 2) Sutcliffe, J. F. (佐藤夷訳)：植物と温度、朝倉書店、25—26、1981
  - 3) 島津島津製作所編：生物実験用島津高感度  $\text{CO}_2$  濃度/濃度差測定装置 (IRA-102) 取扱説明書、p.4
  - 4) 島津製作所編：赤外線式ガス分析計 (URA-106) 取扱説明書、4—6
  - 5) 緒方邦安：青果保蔵汎論、建邦社、52—53、1977
  - 6) The Commercial Storage of Fruits, Vegetables and Florist and Nursery Stocks, U. S. D. A. Agr. Handbook 66, 8—9, 1954
  - 7) 加藤舜郎：青果物のコールドチェーン(17)、低温処理における基本的な知見、農業及び園芸、43(5)、139—142、1967
  - 8) 日本化学会編：化学便覧(改訂第3版)基礎編Ⅱ、丸善、305—315、1984
  - 9) PLATENIUS, H.: Plant Physiol, 17, 179—197, 1942
- (原稿受理平成4年3月27日・質問期限平成5年5月31日)

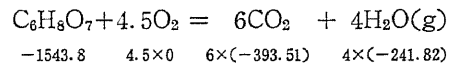
## コ メ ン ト

### 〔閲読者のコメント〕

呼吸基質には糖以外に有機酸、脂肪なども使われ、呼吸商 ( $\text{CO}_2/\text{O}_2$ ) により、どの基質が主に使われるかが予測されます。温州ミカンなどではクエン酸が主な基質と考えられ、このような農産物の呼吸熱推算に糖の化学反応式を一律に適用することには疑問が残ります。このことを考慮した今後の改善指針を込めて下さい。

### 〔コメントに対する著者の見解〕

お説の通りで恐縮です。クエン酸の1モル当りの燃焼におけるエンタルピーの変化を計算しますと(下段は標準生成エンタルピー)



1,785kJ/Molの減少があります。すなわち、1,785kJ/Molの発熱があります。ブドウ糖の場合は、これが2,539kJ/Molでしたから、同じ6 $\text{CO}_2$ の発生に対して、30%弱小さいこととなります。桁違いに小さくはないし、ブドウ糖も燃焼するので、実際はこの中間だろうと推定されます。この場合は、測定結果に対する一つの試算として、ご了解願います。今後の課題と致したいと存じます。