

高濃度炭酸ガスと低濃度酸素条件が青果物の 呼吸活性に及ぼす影響

久保康隆・稲葉昭次・喜安英伸・中村怜之輔

(園芸利用学研究室)

Received November 1, 1988

Effect of High CO₂ plus Low O₂ Condition on Respiration in Several Fruits and Vegetables

Yasutaka KUBO, Akitsugu INABA, Hidenobu KIYASU
and Reinosuke NAKAMURA

(Laboratory of Postharvest Horticulture)

The respiration rates of several fruits and vegetables, based on O₂ uptake, were measured by using automated system for determining respiration under high CO₂+low O₂ conditions. The respiration rates of sweet corn and peaches were significantly reduced under 80% CO₂+20% Air and 90% CO₂+10% Air condition, respectively. Cucumbers and satsuma mandarins also showed a respiratory inhibition by a treatment with high CO₂. No significant changes in respiration under 80% CO₂+20% Air condition were not seen in Japanese persimmons and green bananas. The respiration of lettuce and spinach gradually increased when exposed to high CO₂.

The treatment with gas consisted of 60% CO₂, 20% O₂ and 20% N₂ did not inhibit respiration in satsuma mandarins, but stimulated in lettuce.

These results led us to doubt the theory that high CO₂ has an inhibitory effect on respiration in fruits and vegetables, which has been accepted among most researchers. Respiratory responses to gas treatment were weak or none in the most case at 15°C, compared with ones at 25°C. Responses of horticultural crops in respiration to high CO₂+low O₂ condition seem to be dependent on temperature.

緒 言

高濃度 CO₂ (以下高 CO₂) と低濃度 O₂ (以下低 O₂) 及び低温の組合せによる CA 貯蔵やポリエチレン包装による MA 貯蔵についての研究は数多くなされてお^{3,4,8,15,18)}り、リンゴやセイヨウナシを中心として実用にも生かされている。また、イチゴ¹⁶⁾ やトマト等⁵⁾ を一定濃度以上の高 CO₂ で短期間処理すると、いわゆる‘ショック効果’を示し、鮮度保持に有効であることが報告されている。

KIDD と WEST¹⁰⁾ は、1930 年に空気中に貯蔵したリンゴの呼吸による炭水化物の損耗は 10% CO₂ 下に置いたものの 1.35-1.55 倍であることを示した。それ以来、CO₂ の追熟抑制や鮮度保持効果の生理学的根拠の一つは、呼吸活性の抑制にあると考えられてきた。しかし、彼らの用いた、貯蔵前後の炭水化物含量の対比から呼吸活性の程度を評価する方法では、精度が低い上に、呼吸活性の変化を動的に追跡することは出来ない。

呼吸活性は青果物の内的状態を示す最も適切な指標の一つと考えられており、その測定方法については上記の方法の他に古くから種々考案されている。代表的なものとしては、呼吸によって生成した CO₂ 量をアルカリ吸収法やガスクロマトグラフ法で測定する方法、生成した CO₂ をアルカリで吸収しながら呼吸によって消費された O₂ 量を測定する方法(ワールブルグ検圧法) があげられる。これらの方法は、高 CO₂ 存在下の呼吸活性測定には適用できず、

この技術的困難さのために、CO₂の呼吸抑制作用の生理学的重要性にもかかわらずそれを実証した事例はすくない。

稲葉ら⁷⁾はマイクロコンピュータとガスクロマトグラフを組み合わせて、青果物からのCO₂排出量を自動的に計測する装置を開発した。筆者ら⁸⁾はこの装置をさらに改良し、空気中ではもとより高CO₂条件下できさえも、青果物の呼吸活性をCO₂排出とO₂吸収の両面から測定できるようにした。この装置を用いて種々の青果物の高CO₂に対する呼吸反応を調査したところ、従来から考えられてきた高CO₂の呼吸抑制作用にはかなり疑問が生じる測定結果を得たのでその結果を報告する。

材 料 と 方 法

材料として種々の青果物を用いたが、トウモロコシ、モモ‘清水白桃’、ウンシュウミカン は本学部附属農場から、ハウレンソウ、レタス、キュウリは岡山市内の青果卸売業者から、バナナ‘キャベンデッシュ’は倉敷市内の加工業者から緑熟段階のものをそれぞれ入手した。

いずれも約半日間室内に静置し、外観から判断できる限り均一な個体を選び出して測定用試料とした。試料約1kgを呼吸室(プラスチック製5.5l容)に入れ、数時間空気を通気した後、空気に対して所定のCO₂を混合し種々のCO₂濃度に調整したガスを約12時間通気し、これを高CO₂処理とした。この間、前述した自動呼吸計測装置を用いて連続的にO₂吸収量の測定を行った。温度は15°Cと25°Cを基本とし、通気量は100ml/minとした。処理CO₂濃度は80%を基本としたが、ウンシュウミカンとレタスについてはCO₂濃度を数段階変化させた場合及びO₂濃度を空気とほぼ同じ20%に保持した上で、N₂を用いてCO₂濃度を60%となるように調節した区も設けた。

本装置の詳細については別に報告したが⁶⁾、O₂濃度としては約0.01%程度の変化を測定することが可能であり、この値はガス流量100ml/min、青果物1kgの場合、呼吸活性に換算すると0.6ml/kg・hであった。また今回は10分ごとに1回の割合で呼吸活性を連続的に測定できるように設定した。

結 果

種々の青果物の高CO₂処理によるO₂吸収量の変化を一括してFig. 1. に示した。トウモロコシでは通気ガスを空気から80%CO₂+20% Air (O₂: 4%, N₂: 16%)に変えると、2時間以内にO₂吸収量は元の値の約30%に、5°Cでは約50%に低下し、以後はその水準で推移した。モモでは25°Cで処理前に約30ml/kg・hであったO₂吸収量が、90%CO₂+10% Air 処理により7時間以内に約10ml/kg・hとなった。その後さらに低下し、10時間後には最初の値の約30%に低下した。5°Cでもほぼ同様なO₂吸収量の低下がみられた。このように、トウモロコシとモモでは高CO₂+低O₂処理により、急速かつ顕著なO₂吸収量の低下が認められた。

キュウリでも高CO₂+低O₂処理によるO₂吸収量の低下がみられたが、その程度はトウモロコシやモモより小さかった。75%CO₂+25% Air 処理により25°CではO₂吸収量は徐々に低下し、10時間後には元の値の約50%に低下した。15°Cでも同様の傾向であり、最終的に約65%に低下した。

カキと緑熟バナナでは、80%CO₂+20% Air 処理により25°CでごくわずかなO₂吸収量の低下がみられたただけであり、15°Cでは処理による変化はほとんどみられなかった。

一方、ハウレンソウでは75%CO₂+25% Air により25°Cで処理開始後18時間までO₂吸収量が徐々に上昇して約50%増となった後、低下した。

ウンシュウミカンでは、CO₂濃度を種々に変えて処理を行ったが、その結果をFig. 2. に

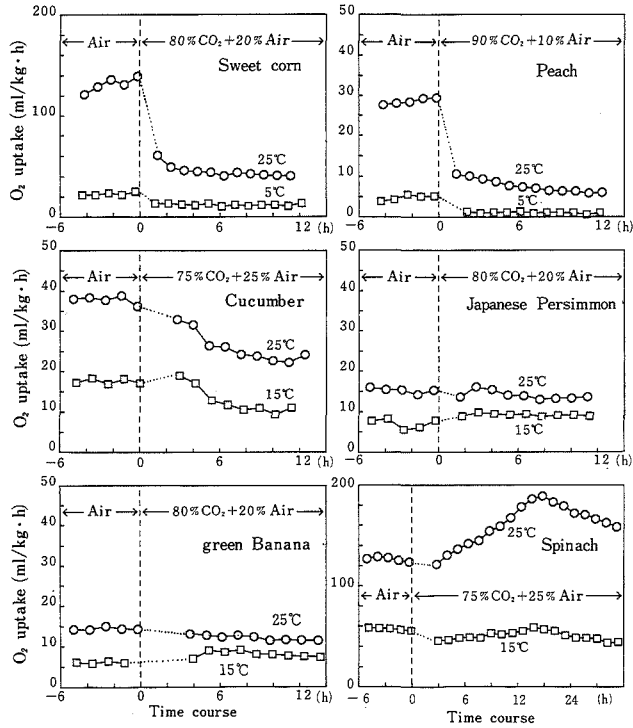


Fig. 1. Effect of high CO_2 + low O_2 condition on respiration rates of several fruits and vegetables.

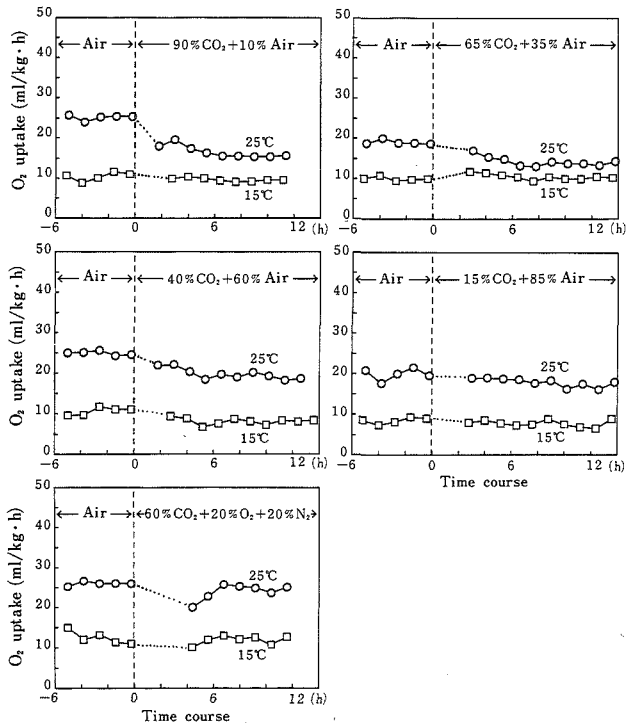


Fig. 2. Respiratory response of satsuma mandarin to various gas conditions.

示した。90%CO₂+10% Air 処理により 25°C では O₂ 吸収量が元の値の約 60% に低下した。処理 CO₂ 濃度の低下につれて、O₂ 吸収量の低下の程度は小さくなり、15%CO₂+85% Air になるとほとんど抑制作用はみられなくなった。15°C では、いずれの CO₂ 濃度でも O₂ 吸収量の低下はみられなかった。O₂ 濃度を空気中と同じ 20% に保つと 60%CO₂ が存在しても 25°C、15°C のいずれでも O₂ 吸収量の低下はみられなかった。

レタスで処理 CO₂ 濃度を種々に変えた場合を Fig. 3. に示した。65%CO₂+35% Air 処理により、顕著な O₂ 吸収量の増加がみられ、15°C、25°C いずれの温度でも最終的には処理前に比較して 2 倍以上になった。処理 CO₂ 濃度を下げると O₂ 吸収量の増加程度も低下し、CO₂ 濃度が 20% になると促進効果はほとんど消失した。60%CO₂+20%O₂+20%N₂ 処理のように O₂ が空気中とほぼ同じ 20% 存在しても、O₂ 吸収量は 25°C では増加するようであった。

レタスではいずれの CO₂ 処理によっても、処理終了時では外観的な変化はみられなかったが、その後空気中に 1～2 日放置すると CO₂ による障害と思われる維管束部の褐変が現れた。

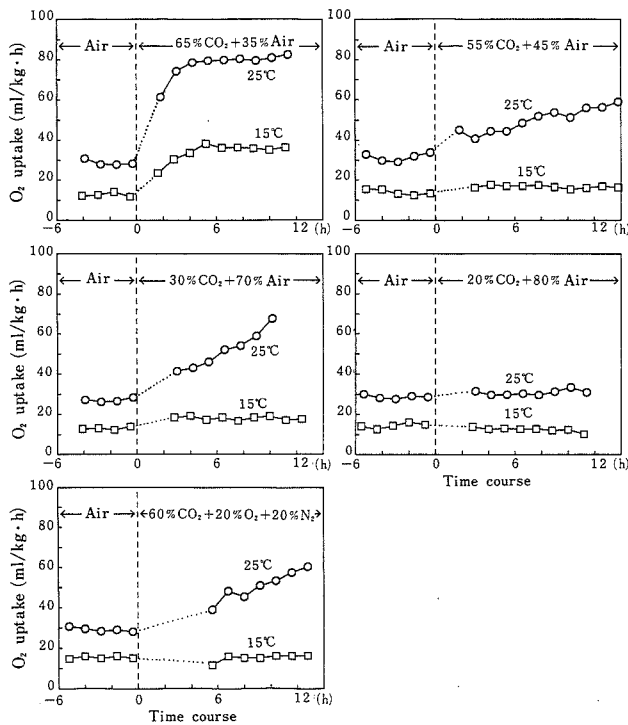


Fig. 3. Respiratory response of lettuce to various gas conditions.

考 察

現在のところ最も理想的な貯蔵方法であるとされている CA 貯蔵において、高 CO₂+低 O₂ 環境は青果物の呼吸活性を抑制することを通じて、鮮度保持効果を発揮していると考えられている。

CA 条件のうち高 CO₂ の呼吸代謝に対する作用性については、TCA サイクル内のコハク酸脱水素酵素活性の抑制¹⁴⁾、シアン耐性呼吸系の発達¹¹⁾、嫌気呼吸系の発達⁹⁾ など種々提案されている。しかしながら、前述したように CO₂ の呼吸活性抑制作用を実証した報告は少ない。

WILLSら²⁰⁾はニンジン、ジャガイモ及びズッキーニを5—25%のCO₂で2—4日間処理した後、10数日間のCO₂排出量を測定し、対照区に比べてCO₂処理区では呼吸活性の抑制がみられたと述べている。WANGら²¹⁾はセイヨウナシに2—4週間のCO₂処理をすると、その後の呼吸のclimacteric riseが遅れると報告している。しかし、これらの実験はいずれもCO₂処理終了後の呼吸活性しか測定していないので、CO₂の直接的作用かどうかは疑問である。一方、YOUNGら²¹⁾はアボカドとバナナに5—20%のCO₂処理を行い、CO₂処理中のO₂吸収量をパラマグネチックO₂アナライザーを用いて測定している。それによると、CO₂はいずれの果実でもclimacteric riseの発現を遅らせ、アボカドではclimacteric peak時の呼吸活性を抑制するという。McGLASSONら¹²⁾もバナナについて類似の結果を報告している。上述のYOUNGらの実験結果は広く引用され、CO₂の呼吸活性抑制作用の実証例として紹介されている。しかしながら、彼らは同時にpre-climacteric段階では、CO₂による呼吸活性の抑制はみられないことをも指摘しており、CO₂の呼吸抑制効果は対象となる青果物の発育段階や種類によって大きく異なることが考えられる。

今回の実験結果でも、高CO₂+低O₂処理はトウモロコシとモモの呼吸活性を顕著に抑制した。キュウリとウンシュウミカンでも高CO₂処理による呼吸活性の抑制がみられたが、カキや緑熟バナナではほとんど抑制がみられなかった。また、15°C程度の低温下では供試した青果物の多くで、処理による呼吸活性の変動はみられなかった。高CO₂による呼吸活性の抑制がみられた場合でも、今回の処理区設定では、高CO₂と低O₂条件が組合わさっていたため、低O₂の影響によるのかもしれない。実際、ウンシュウミカンではO₂濃度を空気圧と同程度に保持すると、60%という高CO₂下でも呼吸活性の抑制はみられなくなった。このことから、高CO₂条件単独では、従来から考えられているような呼吸活性抑制作用は発現されないのかもしれない。しかし、トウモロコシやモモでの呼吸活性の抑制程度はウンシュウミカンよりかなり大きかったので、これらについてはCO₂単独の呼吸抑制作用がある可能性もあり、更に検討する必要がある。

一方、ハウレンソウとレタスでは高CO₂+低O₂処理により、明かな呼吸活性の促進が認められた。O₂濃度を20%に設定しても60%CO₂はレタスの呼吸活性を促進したことから、この反応は明かに高CO₂の作用によるものと思われる。青果物の種類によっては高CO₂が呼吸活性の促進作用をもつことは、CO₂の生理作用の特殊な事例としてわずかながら報告例がある。前述のYOUNGら²¹⁾は、レモンに5—10%CO₂処理をすると3—10週目にかけてclimacteric rise様の呼吸上昇を示したとしている。一定濃度以上のCO₂によって青果物が生理障害を引き起こす場合があることが知られており、一般的にはCA貯蔵やポリエチレン包装貯蔵の場合、CO₂濃度が10%以上になると危険であるとされている⁹⁾。ただし、青果物の種類によってCO₂耐性に大きな差異があるとされており、THORTON¹⁷⁾によるとレタスやハウレンソウは比較的耐性が低いとされている。CO₂による障害例としてはリンゴのbrown heartやcore flushがよく知られている。レタスでもbrown stainと呼ばれる障害が問題となっているが、今回みられたレタスの維管束部の褐変はCO₂障害であるかも知れない。レタスの外観的症候発生に先立つ呼吸活性の上昇は、CO₂による代謝の攪乱と関連していることも推察される。高CO₂に対する呼吸反応を調べることは、各種青果物のCO₂耐性を評価する一手段になるかも知れない。

低O₂下での青果物の呼吸活性測定は比較的容易に行えるため、古くから多くの報告例^{1,8)}がある。それらによると、5%以下のO₂濃度は明確に呼吸活性の抑制効果をもつという点で一致しているが、抑制程度やどの程度のO₂濃度から呼吸活性抑制が始まるかについては必ずしも一致していない。BURGとTHIMANN²⁾によると、リンゴは8%O₂では呼吸活性には

とんど変化はみられないが、それ以下の濃度では急速に低下するという。BIALE¹⁾は、バレンシアオレンジのCO₂排出量は100%から2.5%までのO₂濃度の低下により連続的に低下するが、2.5%以下になると発酵により逆に上昇するとしている。PLATENIUS²⁾は各種青果物の低O₂による障害発生の限界を調べ、ハウレンソウとインゲンマメは約1%、アスパラガスは2.5%、エンドウとニンジン4%であるとしている。今回の実験はCO₂と空気の混合ガスを用いたため、青果物の種類によってO₂濃度は2%から5%まで異なっており、同一に論じることはできない。しかしながら、モモは2%O₂下、トウモロコシは4%O₂下で呼吸活性が大きく抑制されたと考えられるのに対し、カキや緑熟バナナでは空気下と4%O₂下での明確な差異はみられなかった。また15°C以下の温度では、低O₂処理をしても多くの場合呼吸活性に大きな変化はみられなかった。したがって、低O₂に対する呼吸反応もまた青果物の種類や発育段階によって異なると考えられ、また温度が低くなるほど反応性が小さくなるものと思われる。CA貯蔵は低温という要素が加味されることが原則になっているので、低O₂による呼吸活性抑制効果についても、温度との関連においてより詳細に検討する必要がある。

以上のことを総合すると、青果物の種類によっては高CO₂条件が呼吸活性に対して抑制的に作用する場合と促進的に作用する場合があり、また温度によっても反応性が異なってくることが明らかになった。さらに、短期間の高CO₂+低O₂条件での呼吸活性の低下はCO₂よりむしろO₂濃度の低下に関連し、CO₂そのものには従来から考えられているような呼吸活性の抑制作用は存在しないかも知れないことが示唆された。

今後、O₂濃度を一定に保持した上で、CO₂濃度を変化させるなど、CO₂単独の生理作用を青果物の種類ごとにさらに検討していく必要がある。

摘 要

高CO₂+低O₂環境での各種青果物のO₂吸収量を自作のコンピュータ制御自動呼吸計測装置を用いて測定した。トウモロコシとモモでは、それぞれ80%CO₂+20% Airと90%CO₂+10% Air下で、空気下と比較して呼吸活性が顕著に抑制された。キュウリとウンシュウミカンでも高CO₂+Air条件による呼吸活性の抑制がみられた。カキと緑熟バナナでは、80%CO₂+20% Airによる呼吸活性の抑制はほとんどみられなかった。一方、レタスとハウレンソウでは高CO₂処理により、逆に呼吸活性が徐々に促進された。

O₂濃度を20%に保った状態で60%CO₂処理すると、ウンシュウミカンでは呼吸活性の抑制はみられなくなったが、レタスでは呼吸活性がやはり促進された。これらのことから、従来から考えられている高CO₂の呼吸抑制作用には疑問があるように思われた。

25°Cでは高CO₂+Air処理によって呼吸活性が変動する青果物でも、15°C以下の温度では変動しない場合が多かった。したがって、ガス環境に対する青果物の反応は温度依存性を持つように思われた。

引 用 文 献

- 1) BIALE, J. B. : *Advances Food Research* 10, 293-354 (1960)
- 2) BURG, S. P. and K. V. THIMANN: *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* 45, 335-344 (1959)
- 3) DO, J. Y. and D. K. SALUNKHE: *Postharvest physiology and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables* (E. B. PANTASTICO eds.), 175-185, AVI. Westport (1975)
- 4) HERNER, R. C. : *Postharvest physiology* (J. WEICHMANN eds.), 239-253, Marcel Dekker. New York (1987)
- 5) 東尾久雄・南出隆久・緒方邦安 : *日食工誌* 27, 192-198 (1980)
- 6) 稲葉昭次・久保康隆・中村怜之輔 : *園学雑*. 投稿中

- 7) 稲葉昭次・中村怜之輔：岡山農学報 **69**, 1-8 (1987)
- 8) ISENBERG, F. M. R. : Hort. Rev. **30**, 337-394 (1979)
- 9) KADER, A. A. : Postharvest Physiology (J. WEICHMANN eds.), 25-43, Marcel Dekker. New York (1987)
- 10) KIDD, F. and WEST, C. J. : Pomol. Hort. Sci. **8**, 67 (1930)
- 11) LANGE, H. : Planta **90**, 119-132 (1970)
- 12) McGLASSON, W. B. and R. B. H. WILLS: Aust. J. Biol. Sci. **25**, 35-42 (1972)
- 13) PLATENIUS, H. : Plant Physiol. **18**, 671 (1943)
- 14) RANSON, S. L., D. A. WALKER and I. D. CLARKE : Biochem. J. **66**, 57 (1957)
- 15) SMITH, W. H. : Advances in Food Research **12**, 95-146 (1963)
- 16) 田中喜久・佐藤治郎：愛知県農総試研報(園芸) **4**, 107-110 (1972)
- 17) THORNTON, N. C. : Contribs Boyce Thompson Inst. **3**, 219 (1931)
- 18) ULRICH, R. : Postharvest physiology and utilization of tropical and subtropical fruit and vegetables (E. B. PANTASTICO eds.), 186-200, AVI. Westport (1975)
- 19) WANG, C. Y. and W. M. MELLENTHIN: J. Amer. Soc. Hort. Sci. **100**, 492-495 (1975)
- 20) WILLS, R. B. H., P. WIMALASIRI and K. J. SCOTT: HortScience **14**, 528-530 (1979)
- 21) YOUNG, R. E., R. J. ROMANI and J. B. BIALE: Plant Physiol. **37**, 416-422 (1962)