

大気湿度が水稻の生育ならびに生理に及ぼす影響

第 10 報 ^{13}C の挙動からみた光合成速度ならびに
光合成産物の転流に及ぼす大気湿度の影響

平井源一・奥村俊勝*・竹内史郎*

田中修**・中條博良***・田中尚道****

(大阪学院大学・*近畿大学農学部・**甲南大学理学部・

関西女子短期大学・*近畿大学動物発生工学研究所)

1995 年 10 月 31 日受理

要 旨: 大気湿度が水稻幼苗の光合成速度と光合成産物の転流に及ぼす影響を、 ^{13}C トレーサー法を用いて調べた。生育適温下で 1 時間 $^{13}\text{CO}_2$ feeding 処理を行なった場合、 ^{13}C の植物体への取り込み量は、個体当たり、各個葉当たり、あるいは、根部当たりのいずれにおいても、高湿度条件の方が低湿度条件より大であった。葉で取り込まれた ^{13}C は、明条件で 10 時間後に、高湿度条件の植物では、根部に多く転流しており、低湿度条件の植物では、先端葉に多く分布していた。これらの結果は、大気湿度が光合成速度に影響を及ぼすだけでなく、光合成産物の転流にも関与することを示している。

キーワード: 光合成産物、重炭素トレーサー法、水稻、大気湿度、転流。

Studies on the Effect of the Relative Humidity of the Atmosphere on the Growth and Physiology of Rice Plants X. Effect of ambient humidity on the translocation of assimilated ^{13}C in leaves: Gen-ichi HIRAI, Toshikatsu OKUMURA*, Shiro TAKEUCHI*, Osamu TANAKA**, Hiroyoshi CHUJO*** and Naomichi TANAKA*** (Osaka Gakuin University, Suita 564, Japan; *Faculty of Agriculture, Kinki University, Nara 631, Japan; **Department of Biology, Faculty of Science, Konan University, Kobe 658, Japan; ***Kansai Women's College, Kashiwara 582, Japan; ****Institute of Animal Biotechnology, Kinki University, Eniwa 061-14, Japan)

Abstract: ^{13}C -labelled CO_2 was fed to rice seedlings for 60 min in the light under low (60%) or high (90%) humidity. The amount of ^{13}C assimilated by the leaves under high humidity was much greater than that by the plants under low humidity. The ^{13}C -labelled CO_2 was fed to the plants for 60 min at 75% humidity and then the plants were kept at 60 or 90% humidity under illumination. In 10 hours after the end of ^{13}C feeding, the amount of ^{13}C and ^{13}C content increased in the roots of the plants kept under high humidity. On the other hand, they increased in the 6th leaf and the transfer of ^{13}C to the roots was very low in the plants kept under low humidity. These results support our previous observations that dry matter production of the plants grown under high humidity was higher than that of the plants grown under low humidity, that the dry matter increase of roots in the plants grown under high humidity was higher than that of the plants grown under low humidity and that the stress caused by low humidity increased the partition of dry matter to the top of plants.

Key words: $^{13}\text{CO}_2$ feeding study, Photosynthetic product, Relative humidity, Rice, Translocation.

水稻における光合成産物の転流については、すでに多くの研究があり^{9,12,13,16,17)}、生育時期、栄養状態、品種、光強度あるいは気温等により影響を受けることが知られている^{1,7,8,14,18)}。しかし、これらの知見を得た研究は、いずれも大気湿度条件を考慮して行われたものではない。

著者らは、大気湿度が水稻の光合成速度ならびに乾物生産に及ぼす影響について研究してきた²⁻⁶⁾。その結果、生育の適温域では高湿度条件の植物は、低湿度条件の植物に比べて、乾物生産が大きく、特に、根部の乾物重が顕著に増加し、T-R 率が低下することを明らかにした。これらの結果は、大気湿度が光合成速度に影響するだけでなく、光合成産物の転流にも関与することを示唆している。そこで、本研究では、 ^{13}C トレーサー法^{10,11)}により、大気湿度が生育

適温域における光合成速度と光合成産物の転流に及ぼす影響を調べた。

材料と方法

供試品種に日本晴を用い、育苗は、既報⁶⁾と同様の方法で、気温 $28 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $75 \pm 5\%$ 、光強度 55 Wm^{-2} (陽光ランプ東芝 LD 400 型) 12 時間日長のもとで、水耕法 (木村氏 B 液使用) により行った。

大気湿度が水稻の光合成速度に及ぼす影響に関する実験は、アクリル製の同化箱 ($13 \times 13 \times 35 \text{ cm}$) 内に 5.0~5.1 葉期の水稻 15 個体を収容して行った。大気の相対湿度としては 60% 区 (低湿度区) と 90% 区 (高湿度区) の 2 試験区を設けた。同化箱内の $^{12}\text{CO}_2$ 濃度を $280 \pm 40 \text{ ppm}$ 、 $^{13}\text{CO}_2$ 濃度を $80 \pm 20 \text{ ppm}$ となるように $^{13}\text{CO}_2$ アナライザー (日本分光工

業 KK, EX-130 S 型)を用いて調整し, $^{13}\text{CO}_2$ feeding 処理 (以下 $^{13}\text{CO}_2$ 処理と略す) を 1 時間行った。 $^{13}\text{CO}_2$ 処理中における同化箱内の気温は $28 \pm 2^\circ\text{C}$, 光強度は 55 Wm^{-2} であった。同化箱内の湿度は, 植物が常に蒸散を行っているので上昇する。そこで, 還流中の空気を湿度計 (神栄 KK, TPH-CZ 型) でモニターし, 湿度が所定以上になると, 空気をシリカゲルをつめた細管の中に還流させて水分を吸収し, 所定の湿度を維持するようにした。

光合成産物の転流に関する実験には, アクリル製同化箱の容積を前実験より大きくし ($30 \times 30 \times 40 \text{ cm}$), 5.2~5.3 葉期の水稻 80 株を用いた。相対湿度 75% 下で 7 時から 8 時までの 1 時間, $^{13}\text{CO}_2$ 処理を行い, 処理終了後, 植物を相対湿度 $60 \pm 3\%$ と $90 \pm 3\%$ の 2 区に分け, 8 時から 18 時までの 10 時間を明条件においた。両湿度区ともに温度 $28 \pm 1^\circ\text{C}$, 光強度 55 Wm^{-2} であった。

サンプリングは $^{13}\text{CO}_2$ 処理開始時, 処理終了時, 処理終了後 10 時間目に 5 個体ずつ 4 反復で行った。これらを各葉位葉ならびに根部とに分け, 直ちに液体窒素で体内酵素反応を失活させた後, 常法により乾物重を求めた。 ^{13}C の定量は, $^{13}\text{CO}_2$ アナライザー (前掲) を用いて, 赤外分光法^{10,11)} によって行った。

結果と考察

1. 光合成速度に及ぼす大気湿度の影響

植物体の各部分が $^{13}\text{CO}_2$ 処理により取り込んだ ^{13}C 量を示したものが, 第 1 表である。高湿度条件の植物は, 低湿度条件の植物より, 個体当たり ^{13}C 取り込

み量が多く, 植物体各部 (各葉位葉, 根部) の ^{13}C 含有量も増加していた。 $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了時の植物体各部の ^{13}C 含有率を示したものが, 第 1 図である。 $^{13}\text{CO}_2$ 処理前における植物体各部の ^{13}C の含有率は, 約 $4 \mu\text{g mg}^{-1}$ (D.W.) で, 各葉位葉ならびに根部間の差はほとんどなかった。 $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了時においては, 高湿度条件では低湿度条件の場合に比べて, すべての部位の ^{13}C 含有率は高くなった。植物体内への ^{13}C 取り込み量の多少は光合成速度を示すものである^{7,16)}, これらの結果は, 高湿度条件では低湿度条件より光合成速度が高いという既報の研究結果を支持している^{2,3)}。

大気湿度条件にかかわらず, $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了時には, 他の部位に比べて第 4 葉, 第 5 葉に ^{13}C が比較的多く取り込まれていた (第 1 表)。また, 含有率においても, 各部位間に差が生じ, そのうち第 4 葉と第 5 葉 (第 6 葉を含む) が根部や第 1~3 葉に比べて高くなった (第 1 図)。この結果は, これらの上位葉の光合成活性が高かったことを示している。

高湿度条件の植物では, 根部の ^{13}C 含有量が増加し (第 1 表), ^{13}C 含有率も上昇したが (第 1 図), 低湿度では上昇の程度は小さかった。根部が直接 $^{13}\text{CO}_2$ を同化することは考えられないので, これらの上昇は $^{13}\text{CO}_2$ 処理中に葉から転流してきた ^{13}C によるものであろう。それ故, 高湿度条件は, 光合成産物の根への転流を促すことが示唆される。

2. 光合成産物の転流に及ぼす大気湿度の影響

植物体内に取り込まれた ^{13}C の各部位への転流が, 大気湿度によって, どのような影響を受けるか

Table 1. Effect of humidity on amount of ^{13}C assimilated in leaves and ^{13}C distribution in various parts of $^{13}\text{CO}_2$ -fed rice plant.

Humidity (%)	Part of plant	Amount of ^{13}C ($\mu\text{g P}^{-1}$)		Amount of assimilated ^{13}C ($\mu\text{g P}^{-1}$)	Distribution of ^{13}C (%)
		Before feeding	After feeding		
60	Root	22.0	22.1	0.1	0.1
	1st-3rd leaves	34.9	48.7	13.8	15.1
	4th leaf	42.4	73.2	30.8	33.8
	5th leaf	51.6	98.1	46.5	51.0
	Total	150.9	242.1	91.2	100.0
90	Root	22.0	25.6	3.6	2.9
	1st-3rd leaves	34.9	58.6	23.7	19.7
	4th leaf	42.4	82.1	39.7	32.9
	5th leaf	51.6	105.5	53.9	44.5
	Total	150.9	271.8	120.9	100.0

The plants were fed with ^{13}C -labelled CO_2 for 60 min under 60 or 90% humidity.

を, $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了後, 明条件のもとで, 高湿度と低湿度で10時間を経過した植物で調べた (第2表).

$^{13}\text{CO}_2$ 処理により植物体に取り込まれた個体当りの ^{13}C 含有量は, 第1表の高湿度条件の場合よりも多かった. これは, 実験に供した植物の葉齢の微妙な違い (第1表, 第2表は, それぞれ葉齢 5.0~5.1, 5.2~5.3 の植物で得られた結果である) によるものと思われる. $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了時に比べて10時間後には, 両湿度条件とも個体の ^{13}C 含有量が増加してい

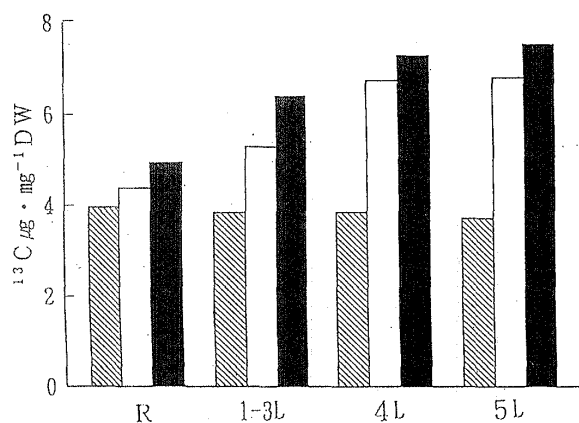


Fig. 1. Effect of humidity on ^{13}C content in various parts of $^{13}\text{CO}_2$ -fed rice plant. For experimental conditions, see the legend to Table 1. ^{13}C content was determined immediately after the termination of $^{13}\text{CO}_2$ feeding.

▨ : before $^{13}\text{CO}_2$ feeding R: Root, 1-3L: 1st-3rd leaves,
 □ : 60% humidity 4L: 4th leaf, 5L: 5th leaf
 ■ : 90% humidity

た (第2表). これは, 処理後10時間の明条件における光合成により自然界に存在する ^{13}C が取り込まれ, 植物に固定された結果によるものである. なお, 第2表に示された高湿度条件の植物と低湿度条件の植物の ^{13}C の増加量の差は, 処理後10時間の光合成量の差に基づくものであり, 高湿度条件では光合成速度は低湿度条件より高いことがこの場合においても確認できた. さらに, 高湿度条件の植物においては, 低湿度条件の植物に比べて, 根部における ^{13}C の増加量が大きく (第2表), 先端葉への ^{13}C 分配率は低かった. それに対し, 低湿度条件の植物では, 先端葉における ^{13}C の分配率が高かった.

植物体各部の単位乾物重当たり ^{13}C 含有率を示したものが第3表である. 高湿度条件の植物の ^{13}C 含有率は, 低湿度条件の植物に比べて, 根部で著しく増加し, その増加量は有意差を示した. また, 先端葉である第6葉でも根部と同様, 有意な上昇を示した. 一方, 低湿度条件の植物では, 根部と先端葉の第6葉で上昇がみられ, その程度は, 根部で有意差はなかったが, 第6葉では有意差が認められた.

本実験では, $^{13}\text{CO}_2$ 処理終了後は, 明条件で $^{13}\text{CO}_2$ を人工的に付加しない大気中で, 10時間, 光合成と光合成産物の転流が同時に行われている. この光合成によって, 植物体各部の ^{13}C 含有量は増加したにもかかわらず (第2表), 第1~3, 4, 5葉の含有率は減少した. したがって, この間の根部ならびに先端葉の ^{13}C 含有率の増加は, $^{13}\text{CO}_2$ 処理中に取り込

Table 2. Effect of humidity on ^{13}C distribution in $^{13}\text{CO}_2$ -fed rice plant.

Humidity (%)	Part of plant	Amount of ^{13}C ($\mu\text{g P}^{-1}$)			Distribution of ^{13}C (%)
		At the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding	At the 10th hour after the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding	Amount of increased ^{13}C	
60	Root	34.1 ± 0.5	40.6 ± 1.8*	+ 6.5	13.7
	1st-3rd leaves	52.4 ± 5.4	54.6 ± 1.7	+ 2.2	4.7
	4th leaf	69.8 ± 2.4	71.8 ± 3.4	+ 2.0	4.3
	5th leaf	101.1 ± 7.4	106.9 ± 5.6	+ 5.8	12.3
	6th leaf	44.1 ± 6.2	74.9 ± 8.2*	+30.8	65.0
	Total	301.5 ± 8.5	348.8 ± 10.6	+47.3	100.0
90	Root	34.2 ± 2.2	51.0 ± 2.7*	+16.8	24.3
	1st-3rd leaves	53.9 ± 4.6	61.3 ± 7.1	+ 7.4	10.7
	4th leaf	69.7 ± 9.2	79.3 ± 7.9	+ 9.6	13.9
	5th leaf	104.4 ± 8.7	109.8 ± 16.6	+ 5.4	7.9
	6th leaf	56.9 ± 5.7	86.7 ± 12.9*	+29.8	43.2
	Total	319.1 ± 15.8	388.1 ± 17.9*	+69.0	100.0

The plants were fed with ^{13}C -labelled CO_2 for 60 min at 75% humidity and then kept at 60 or 90% humidity under illumination.

* shows significance between values at the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding and at the 10th hour after the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding, at the 5% level.

Table 3. Effect of humidity on changes of the ^{13}C content in various parts of $^{13}\text{CO}_2$ -fed rice plant.

Humidity (%)	Part of plant	Content of ^{13}C ($\mu\text{g mg}^{-1}\text{ DW}$)	
		At the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding	At the 10th hour after the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding
60	Root	4.29 \pm 0.38 (100.0)	4.48 \pm 0.03 (104.5)
	1st-3rd leaves	4.89 \pm 0.38 (100.0)	4.70 \pm 0.27 (96.0)
	4th leaf	5.22 \pm 0.35 (100.0)	4.58 \pm 0.30 (87.5)*
	5th leaf	5.49 \pm 0.48 (100.0)	4.87 \pm 0.27 (88.6)*
	6th leaf	5.40 \pm 0.20 (100.0)	6.00 \pm 0.26 (110.0)*
	Root	4.13 \pm 0.31 (100.0)	5.23 \pm 0.26 (126.6)*
90	1st-3rd leaves	5.35 \pm 0.53 (100.0)	5.32 \pm 0.32 (99.5)
	4th leaf	5.49 \pm 0.40 (100.0)	5.33 \pm 0.26 (97.0)
	5th leaf	5.56 \pm 0.55 (100.0)	5.01 \pm 0.55 (90.0)
	6th leaf	6.12 \pm 0.29 (100.0)	6.63 \pm 0.39 (108.3)*

For experimental conditions, see the legend to Table 2.

Numerals in the parentheses show the % of ^{13}C content at the 10th hour after the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding to those at the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding.

* shows significance between values at the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding and the 10th hour after the end of $^{13}\text{CO}_2$ feeding, at the 5% level.

まれた第1～3, 4, 5葉の ^{13}C が転流した結果である。なお、低湿度条件は高湿度条件の場合より第4, 第5葉の ^{13}C 含有率の低下が有意に大きかった。これは低湿度は高湿度より明条件における光合成量が少ないので、根部ならびに先端葉の生長を支えるために、これらの葉位葉から大きく ^{13}C が転流したことを示している。それ故、第3表に示された「植物体各部の ^{13}C 含有率は、高湿度条件の植物では根部で著しい上昇が見られ、低湿度条件の植物では、先端葉で上昇した」という結果は、高湿度条件では光合成産物が根部に多く転流したが、低湿度条件では先端葉に多く転流したことを明確に示すものである。

著者らは前報⁶⁾で、「高湿度条件の植物においては、低湿度条件の植物に比べて、根部の乾物重の増加が大きく、根径、平均根長、総根長などで示される生長が顕著にすぐれ、T-R率が低下する」ことを示した。本論文では、高湿度条件の植物は光合成産物の根部への転流が促される結果が得られた。それ故、高湿度条件での根部への転流の促進が、前報⁶⁾で示した「高湿度条件では根部の乾物重増加が大きく、生長もよくなり、T-R率が低下する」という生長特性をもたらしものと考えられる。

高湿度条件が光合成産物の根への転流を促す理由として、光合成量の多いことが考えられる。つまり本実験においては、高湿度条件あるいは低湿度条件でも、 $^{13}\text{CO}_2$ 処理後の植物は、明条件で10時間、光合成を行っている。この間の光合成量は、高湿度条件の方が多いため、葉のソース機能が大きくなる(第2表)。それ故、光合成量の多いことが根部への転流

を多くする可能性が考えられる。この場合には、高湿度は光合成速度を高めることを通して、光合成産物の根部への転流を間接的に促していることになる。一方、光合成が制限され、光合成産物が不足する条件では、光合成産物は、優先性の高い先端葉の生長に大きく利用され、根部では不足する^{9,15)}。本実験における低湿度条件では、 $^{13}\text{CO}_2$ 処理後10時間における水稻の光合成量が高湿度に比べて少ないので、生長に必要な光合成産物が不足し、先端葉への転流が促進されることが考えられる。しかし、第1表や第1図で示唆されたように、 $^{13}\text{CO}_2$ 処理中に、高湿度条件では、根部への転流が促されている。それ故、高湿度条件が光合成量の多少を問わず、根部への転流を直接促す可能性も考えられる。今後、大気湿度と転流の機構に関しては詳細に検討しなければならない。

謝辞: 本研究を行うにあたり、近畿大学農学部学生 深井健一、半田佳子、広野利樹の各位にご援助を賜った。ここに各位に対し厚くお礼を申し上げる。

引用文献

1. 秋田重誠 1984. 炭水化物の動態. 佐藤 庚他 共著, 作物の生態生理. 文永堂, 東京. 173—220.
2. 平井源一・高橋 誠・田中 修・嶋村直樹・中山 登 1984. 大気湿度が水稻の生育ならびに生理に及ぼす影響. 第3報 大気湿度が水稻の光合成速度に及ぼす影響. 日作紀 53: 261—267.
3. ———・中山 登・北宅善昭・稲野藤一郎・中條博良・湊 公美・田中 修 1989. ———. 第6報 大気湿度が水稻模擬個体群の光合成速度に及ぼす影響. 日作紀 58: 368—373.

4. ———・中條博良・田中 修・平野高司・大森雅代 1992. ———. 第7報 種々の気温における幼植物の生長と乾物生産に及ぼす大気湿度の影響. 日作紀 61: 364—368.
5. ———・———・———・奥村俊勝・竹内史郎・平野高司・大森雅代 1993. ———. 第8報 種々の気温における幼植物の乾物生産と窒素吸収に及ぼす大気湿度の影響. 日作紀 62: 395—400.
6. ———・———・———・———・——— 1994. ———. 第9報 大気湿度の低下およびポリエチレングリコール処理による水分ストレスが生育に及ぼす影響. 日作紀 63: 265—270.
7. Ho, L.O. 1976. The relationship between the rate of carbon transport and photosynthesis in tomato leaves. *J. Exp. Bot.* 27: 87—97.
8. 北条良夫 1971. 光合成産物の転流. 日作紀 40: 549—565.
9. 石井龍一 1976. 光合成産物の転流と蓄積. 村田吉男・玖村敦彦・石井龍一 共著, 作物の光合成と生態—作物生産の理論と応用—. 農山漁村文化協会, 東京. 87—96.
10. 河内 宏 1988. 植物における光合成産物の分配・利用過程・ ^{13}C トレーサー法による定量的解析. *化学と生物* 26: 254—259.
11. 河内 宏・木下耕一・国分信彦 1985. 植物体中微量代謝成分の ^{13}C 濃度の赤外線 $^{13}\text{CO}_2$ 分析計による測定. *RADIOISOTOPES* 34: 322—325.
12. Moriwaki, T. 1974. Physiological studies on the effects of soil temperature upon the vegetative growth of rice plants. *Memoirs of the college of agriculture, Kyoto university*. No. 105: 1—74.
13. 村山 登・大島正男・塚原貞雄 1961. 水稻の登熟過程における物質の動態に関する研究. 第6報 ^{14}C による基部蓄積炭水化物の標識とその移行ならびに分布. *土肥誌* 32: 261—265.
14. 大島正男 1962. 乳熟期における ^{14}C 光合成産物の種実への移行に及ぼす窒素栄養の影響. 第3報 水稻の窒素栄養に関する研究. *土肥誌* 37: 21—24.
15. Radin, J., W. Linad, L. Parker and C.R. Sell 1978. Partitioning of sugar between growth and nitrate reduction in cotton roots. *Plant Physiol.* 62: 550—553.
16. 田中 明 1958. 葉位別にみた水稻葉の生理機能の特性およびその意義に関する研究. 第11報 (完) 各葉位葉の同化作用力および同化産物の移動. *土肥誌* 29: 327—333.
17. 巽 二郎・岡野邦夫・河野恭広 1983. 節位を異にする水稻根への窒素と炭素の転流—葉に供与した ^{15}N と ^{13}C の追跡—. 日作紀 52: 220—228.
18. Tatum, J., N. Endo and Y. Kono 1992. Root growth and partitioning of ^{13}C -labelled photosynthate in the seminal root of corn seedlings as affected by light intensity. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 271—278.