

## 立木の幹木部組織試料の呼吸速度測定

橋本良二\*・白旗 学\*・森 茂太\*\*・伊藤京平\*\*\*

Measurement of respiratory activity for stem xylem samples from trees

Ryoji HASHIMOTO, Manabu SHIRAHATA, Shigeta MORI and Kyohei ITO

### 1. はじめに

老木や大木などでよく見られる大枝落ち、幹折れ、根返りなどを総称して樹木の倒壊と呼ぶとすれば、多くの場合それは樹勢の衰退と結びついているであろう。こうしたことから、都市の公園や緑地、寺社境内林など、人が集まるところに立つ樹木については日頃から樹勢をチェックしておく必要がある。最近、樹勢の衰退をさまざまな方法で診断する試みが盛んにおこなわれている（日本緑化センター、2006）。

幹の維管束形成層は、細胞分裂と分化により形成層内側に仮道管、道管要素、木部繊維などの木部細胞とともに軸方向および放射方向の木部柔細胞をつくる。前者の木部細胞のほとんどは早くに細胞内容物の分解と消失が起こり死細胞となるのに対し、後者の木部柔細胞はかなりの年数生き続けるようである。木部柔細胞は葉群の光合成に由来する栄養物質の貯蔵や供給の場であるとともに、さまざまな樹体生理と結びついた物質代謝の場としても機能しているが、これらの機能は樹勢の衰えとともに明らかな低下を示す(Kramer and Kozlowski, 1979; Pruyn et. al, 2002)。

木部組織の生理活動の規模は、木部柔細胞におけるミトコンドリアの呼吸代謝にともなうATP生成と強く結びついていることから、木部組織の呼吸量をマーカーとして推定できると考えられる。立木の幹組織の呼吸量を調べるには、非破壊的に樹皮表面からのCO<sub>2</sub>放出量を測定するのが望ましいが、測定システムが大型化、複雑化する難点があり、また呼吸で生じた

---

Received January 15, 2008

Accepted February 13, 2008

\* 岩手大学環境科学系

\*\* 森林総合研究所東北支所育林技術研究グループ

\*\*\* 岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

CO<sub>2</sub>が樹液流に溶け込んで相当量移動する点も無視できない (Negisi, 1978; Mcguire and Teskey, 2004)。これに対し、木部組織の一部を採取して測定する方法は、組織破壊による“傷害呼吸”を併発するが (大島ら, 1967; 根岸, 1970), 実行は容易である (Kramer and Kozlowski, 1979; Pruyn et. al, 2002)。樹木個体の生理診断ではできるだけ採取する試料の量はできるだけ少ないのが望ましいが、少量の試料では生理活性の時間的変化が顕在化しやすい。以上のことから、現地で簡単に、そして迅速に測定できる方法を検討することは重要である。

最近、赤外線CO<sub>2</sub>分析器で、分析ユニットのエア・サンプル室を開放状態にした、CO<sub>2</sub>プローブ (拡散式CO<sub>2</sub>プローブ) が考案され市販されている。本研究では、この拡散式CO<sub>2</sub>プローブの分析ユニットのエア・サンプル室を、木部組織試料を入れる呼吸室の中に取り込んだ“呼吸量測定器”を試作した。実際に現地で本器を用いて測定をおこない、本器のCO<sub>2</sub>濃度応答性や測定精度、また本器を用いた測定の作業性や能率について検討をおこなった。

## II. 呼吸量測定器の試作

### 1. CO<sub>2</sub>プローブ

呼吸量測定器に用いた拡散式CO<sub>2</sub>プローブ (GMP343, VAISALA Oyj, Finland) は円筒形 (直径 (基部) 55mm, 長さ181mm) で重量は360gである (図-1)。本プローブでは、先端部に光学系分析ユニットがあり、測定空気が自由に拡散して入り込めるようにエア・サンプル室が開放状態になっている。フィラメントランプから放射される赤外線が干渉計で2つの異なる



図-1. 幹木部組織片用呼吸量測定器  
プローブ先端部にある分析ユニットのエアサンプル室が呼吸室に取り込まれている。



図－２．測定システムの概要

中央のボードは指示制御器，奥のバッテリーは呼吸量測定器の呼吸室内に取り付けたファン用。

る波長に分離され，それぞれが交互に赤外線検知器にかけられCO<sub>2</sub>濃度が測定される。一連のCO<sub>2</sub>濃度測定と演算処理は，2秒以下でおこなわれる。また，CO<sub>2</sub>濃度測定と同時に，サンプル室内の気温が測定される。CO<sub>2</sub>プローブの基部底面からは電源および通信ケーブルが指示制御器（M170，VAISALA Oyj, Finland）につながり，測定データは指示制御器を経てPCに転送され，ディスプレイにモニターされるとともに記録される（図－２）。

## 2. 呼吸室

呼吸室は，水道配管の継ぎ手として使われる硬質塩化ビニール製T字管（直径（呼）50mm）をベースに自作した（図－１）。T字管の元側の長さは6cm，分岐側の両端の長さは12cmとした。T字管の元側にCO<sub>2</sub>プローブの光学系分析ユニット部を挿し込み，分析ユニットのエア・サンプル室がT字管内の交差部にくるようにした。水道配管で掃除口として使われる硬質塩化ビニール製ねじ蓋付き管（直径（外）50mm）を短く切って，T字管の分岐側の両端の内側に接合した。ねじ蓋付き管は，蓋が二重になっており，ねじ付きの外蓋を圧着してふさぐようになっている。T字管の分岐側の一方の端から深さ4cmの管内にステンレス製の金網を張り，試料皿とした。T字管の分岐側のもう一方は，内蓋の内側にブラシレスファン（DC12V，25×25×10mm）を取り付けた。呼吸室の容積は，分析ユニットのエア・サンプル室を含め0.138Lであった。

## 3. 呼吸速度の算定

試料からのCO<sub>2</sub>放出速度が一定の状態では，呼吸室内のCO<sub>2</sub>濃度は時間とともに直線的に上昇する。試料の呼吸速度（ $R$ ， $\mu\text{mol CO}_2\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）は，以下の式で得られる。

$$R = \Delta C \cdot (V/22.4) \cdot Q_{10}^{(20-T)/10}$$

$\Delta C$ は上昇速度 (ppm s<sup>-1</sup>) で、ここでは蓋を閉めた後に得られるCO<sub>2</sub>濃度の直線の上昇部分(後述の上昇相I)を直線回帰し、回帰係数より求めた。Vは呼吸室(光学系ユニットのエア・サンプル室を含む)の容積(L)、Tは呼吸室の温度(°C)、 $Q_{10}$ は生理作用における温度係数である。ここでは $Q_{10}$ を2.0とし、Rは20°Cの値に温度補正した。

### III. 材料と方法

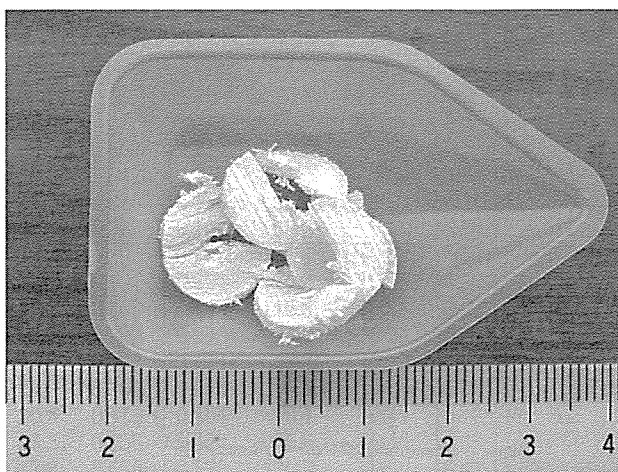
#### 1. 試料

岩手大学上田キャンパス(盛岡市上田)の北東1kmにある、盛岡市高松公園内のニセアカシア(*Robinia pseudoacacia* L.)林で、上述の呼吸量測定器を用いて立木の幹木部組織試料の呼吸量を測定した。本ニセアカシア林は、公園中央部に位置する高松の池(本池)の北にある芝水園(小池)の西方緩斜面に広がっており、かつて果樹園や畑地として利用した跡地に成立したものである。ほぼニセアカシアの純林で、ニセアカシア上層木の樹齢は40~45年で、上層木としては他にコナラ、クリ、カスミザクラなどが見られた。立木密度(胸高直径 $\geq 5$ cm)は995本ha<sup>-1</sup>、胸高断面積合計は43m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>であった(橋本・斎藤, 2006)。林内には胸高直径50cm、樹高40mに達するニセアカシア立木が見られ、風に煽られての幹折れ、根返りが各所で起こっていた。一方、上層木に被圧され枯死したと見られる、あるいは瀕死の状態のニセアカシア立木も少なくなかった。

2007年10月15日に、33本のニセアカシア立木から幹木部組織試料を採取した。試料木は、樹勢、サイズなどの面でさまざまな構成になるように選んだ。試料木の胸高直径は12~48cm、樹高は7~26mの範囲にあり(表-1)、どれもすでに落葉を終えていた。なお、試料木のNo.13, 18, 20は外観上枯死木と見られた立木、No.19, 23, 30は瀕死の状態にあると見られた立木であった。試料の採取は、地際から高さ30~40cmの位置で、ハンドドリルを用いておこなった。木工用ショートビット(直径8mmまたは12mm)を幹に直角にあて、旋回挿入にともなって内部から螺旋状に繋がって切り出される輪片のうち、形成層から深さ1~2cmからのものを試料とした(図-3)。採取に要した時間は1分以内で、試料の量は生重でおおよそ0.3~0.7gであった。

#### 2. 測定方法

呼吸量測定器の呼吸室内のCO<sub>2</sub>濃度と気温は、最初の試料木の測定前から最後の試料木の測定後まで、5秒間隔に測定し、時刻を付けてPCに記録した。採取した試料は、直ちに呼吸量測定器の試料皿にのせ、蓋を閉めて測定を開始した。PCのディスプレイ上でCO<sub>2</sub>濃度の直線



図－3．木工用ショートビットで採取した幹木部組織試料  
定規の数字はcm。試料は全体で生重約0.6g。

的上昇が見られ2～3分以上続いたことを確認した後、蓋を開けて試料を取り出し、次の試料の測定に取りかかった。測定を終えた試料は、それぞれビニール袋に入れて実験室に持ち帰り、生重を測定した後、恒温乾燥機で80℃で24時間乾燥して乾重を測定した。

## IV. 結 果

### 1. CO<sub>2</sub>濃度の上昇

呼吸量測定器の呼吸室に試料を入れた後のCO<sub>2</sub>濃度の上昇について、3本の試料木を例に示したのが図－4である。No.24の試料木では、測定室の蓋を閉めてから約20秒後にCO<sub>2</sub>濃度の明らかな上昇が見られた。その上昇は直線的であり、2分以上にわたり続いた（図中の上昇相I）。No.13の試料木では、CO<sub>2</sub>濃度の上昇はきわめてわずかであった。No.4の立木では、No.24の試料木と同様、蓋を閉めてから数十秒してCO<sub>2</sub>濃度の上昇が見られ、2分以上にわたり直線的な上昇（図中の上昇相I）が続いたが、その後上昇率は低下した（図中の上昇相II）。

試料木33本のうち、CO<sub>2</sub>濃度の上昇が明らかでなかった6本の試料木（No.13, 18, 19, 20, 23, 30）を除けば、残り27本のすべての試料木で、蓋を閉めてから数十秒から1分の間にCO<sub>2</sub>濃度のほぼ直線的な上昇が見られ2分以上にわたって続いた。そのうち、上記のNo.4のようにCO<sub>2</sub>濃度の上昇率が明らかに低下したのは（I＋II）、6本であった（表－1）。

### 2. 立木による呼吸速度のちがい

各試料木で得られた呼吸速度を試料木の幹胸高直径との関係でプロットしたのが、図－5である。外観して枯死木と見られた立木の呼吸速度はほぼゼロであり（No.13, 18, 20）、瀕死の状態と見られた立木の呼吸速度はきわめて低かった（No.19, 23, 30）。これら6本の試料木を

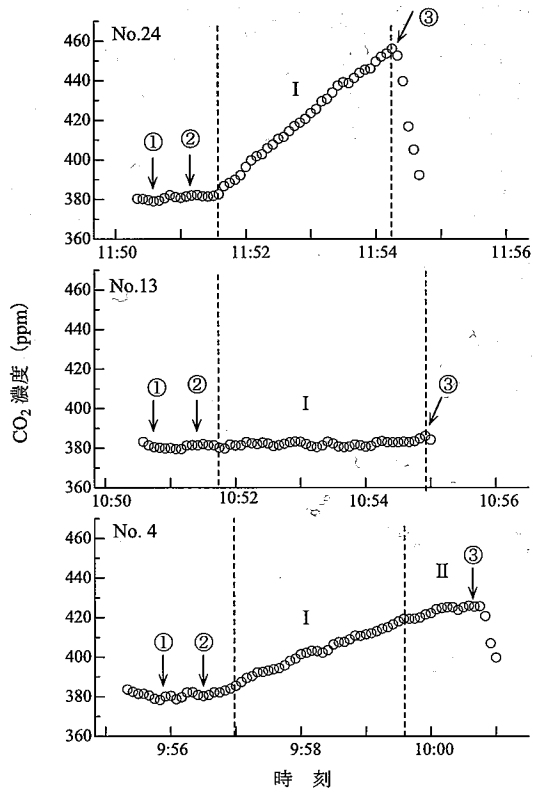


図-4. 呼吸量測定器によるCO<sub>2</sub>濃度上昇の測定例

No.は試料木の番号。①で呼吸室の蓋を開け試料を入れ始め、②で試料を入れ終わり蓋を閉め、③で測定が終わり蓋を開けた。Iは②以降、CO<sub>2</sub>濃度の直線の上昇が見られた上昇相、IIはその後CO<sub>2</sub>濃度上昇が緩やかになった上昇相。

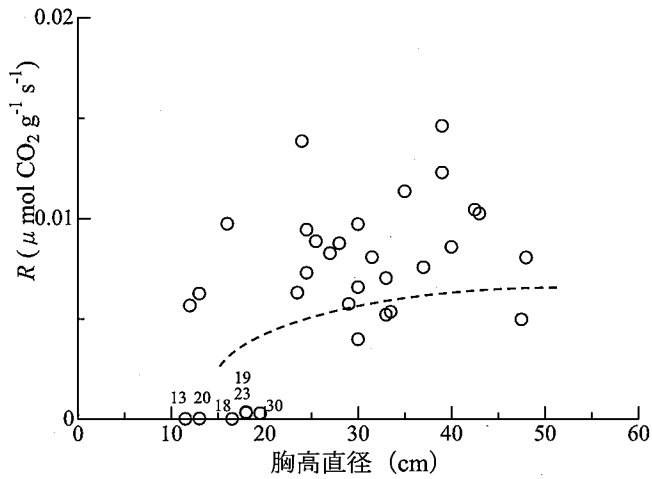


図-5. 試料木の幹木部組織呼吸速度と胸高直径との関係

図中の数字は試料木番号、表-1参照。破線は樹勢衰退木が下方に出現することを仮に示したものである。

表-1. 試料木, 試料および測定結果一覧

試料木 No.	DBH (cm)	H (m)	試料			測定		上昇区分	$\Delta C/s$ (ppm s <sup>-1</sup> )	呼吸速度 $\mu\text{mol g}^{-1}\text{s}^{-1}$
			生重 (g)	乾重 (g)	含水率 (%)	時刻 (時分)	気温 (°C)			
1	33.5	23.7	0.353	0.235	50.1	9:40	15.20	I	0.146	0.00534
2	39.0	25.6	0.541	0.269	101.9	9:46	15.37	I	0.389	0.01228
3	42.5	21.2	0.625	0.320	96.0	9:51	15.21	I	0.389	0.01042
4	24.5	23.1	0.320	0.191	68.0	9:56	15.29	I + II	0.211	0.00944
5	16.0	15.9	0.265	0.125	112.4	10:03	15.65	I + II	0.146	0.00973
6	25.5	23.6	0.501	0.294	70.9	10:13	16.08	I	0.322	0.00886
7	39.0	17.2	0.309	0.144	115.5	10:18	16.08	I + II	0.260	0.01460
8	12.0	10.9	0.382	0.243	57.5	10:24	16.04	I	0.170	0.00566
9	13.0	7.8	0.328	0.174	88.7	10:29	16.07	I	0.135	0.00626
10	30.0	21.9	0.364	0.216	69.6	10:34	16.35	I	0.108	0.00398
11	33.0	20.6	0.513	0.304	69.4	10:41	16.48	I + II	0.271	0.00702
12	33.0	23.2	0.656	0.452	45.6	10:46	16.33	I	0.296	0.00520
13	11.5	7.8	0.685	0.525	30.7	10:50	16.47	I	0.001	0.00002
14	30.0	22.9	0.514	0.287	79.8	10:58	17.84	I	0.264	0.00657
15	24.5	24.4	0.664	0.403	65.4	11:04	18.23	I	0.422	0.00729
16	28.0	20.7	0.555	0.326	71.6	11:10	19.01	I + II	0.433	0.00876
17	35.0	25.8	0.588	0.309	90.3	11:15	19.89	I	0.565	0.01135
18	16.5	13.4	0.724	0.623	16.2	11:20	20.89	I	0.001	0.00001
19	18.0	15.3	0.360	0.217	66.2	11:26	22.04	I	0.013	0.00031
20	13.0	6.5	0.706	0.536	31.8	11:32	22.48	I	0.003	0.00003
21	31.5	24.9	0.555	0.308	81.0	11:38	22.73	I	0.487	0.00806
22	29.0	23.3	0.458	0.254	80.4	11:42	23.04	I	0.292	0.00574
23	18.0	17.4	0.455	0.281	62.5	11:47	22.94	I	0.019	0.00035
24	43.0	16.4	0.511	0.238	115.3	11:52	21.97	I	0.454	0.01024
25	37.0	21.0	0.497	0.280	78.2	11:57	20.97	I	0.368	0.00757
26	47.5	19.2	0.534	0.326	64.1	12:02	20.73	I	0.276	0.00496
27	40.0	23.9	0.423	0.236	88.0	12:07	20.09	I	0.331	0.00857
28	27.0	19.9	0.447	0.250	80.6	12:12	19.52	I	0.324	0.00826
29	30.0	24.2	0.468	0.247	90.8	12:17	19.01	I + II	0.363	0.00971
30	19.5	18.8	0.329	0.161	105.3	12:21	18.94	I	0.007	0.00029
31	48.0	26.2	0.428	0.234	83.4	12:26	19.94	I	0.304	0.00804
32	23.5	24.3	0.534	0.315	70.2	12:32	19.46	I	0.310	0.00630
33	24.0	18.8	0.527	0.273	93.2	12:39	19.27	I	0.584	0.01385

DBHは胸高直径, Hは樹高。

上昇区分はCO<sub>2</sub>濃度上昇経過の区分, 上昇相 I, IIについては図-4を参照。

$\Delta C$ はCO<sub>2</sub>濃度上昇速度, Rは呼吸速度。

除くと, 呼吸速度は0.004~0.015  $\mu\text{mol CO}_2\text{g}^{-1}\text{s}^{-1}$ の範囲にあった。呼吸速度と胸高直径との間に有意な相関はなく, 胸高直径がほぼ同じでも呼吸速度は立木により大きく異なっていた。

## V. 考 察

### 1. 呼吸量測定器

従来の赤外線CO<sub>2</sub>分析器を用いた呼吸量の測定では, 呼吸室と分析ユニットが別々になっており, 呼吸室の空気を分析ユニットのエア・サンプル室に流し込む通気方式を採っているの

測定において定常値を得るのに数分以上かかるのが普通である。本呼吸量測定器(図-1)では、呼吸室の中に分析ユニットのエア・サンプル室を取り込んでいるので、呼吸室に試料を入れ蓋を開けてから20秒ほどで定常値を得ることができる(図-4)。

CO<sub>2</sub>プローブ(GMP343)の繰り返し測定精度(ノイズ)は、性能保証書では350ppmレベルで出力平均化なしで±3ppmとなっており、本プローブを採用するにあたっては測定精度の面で懸念されたが、CO<sub>2</sub>濃度上昇に対する直線回帰は測定値の平均化をとまうので(図-4)、ノイズは十分丸められ精度面で支障はないようである。今回の試料が成長休止期のものであることを考慮すると、本呼吸量測定器で必要とする試料の最少量は成長期では生重で0.3g以下で十分と見られる。

本呼吸量測定器を用いた呼吸量測定では、幹木部組織試料を採取するのに要した時間は1分以内、次に試料を呼吸量測定器の呼吸室に入れ蓋を閉めるまでが1分以内、そしてCO<sub>2</sub>濃度の直線的上昇(図-4の上昇相I)の開始が確認されるまでが全試料木を通じてやはり1分以内であった。したがって、得られた呼吸速度は、試料の採取を始めてから3分以内に発現した定常状態での値である。一部の試料では、CO<sub>2</sub>濃度の上昇率の低下(図-4の上昇相II)が見られたことから、試料の呼吸速度の定常状態はそれほど長くは続かないようである。したがって、試料採取開始後はできるだけ早く測定を終える必要があるが、こうした条件下での呼吸量測定に本器はきわめて有用と見られる。

本呼吸量測定器による測定では、1試料について採取を開始してから測定終了までに要する時間は5分程度である。測定の準備を含めすべての作業は1人でも十分可能であるが、限られた時間に多くの試料をこなす場合には、試料採取と呼吸量測定を2人で作業分担するのが望ましい。

## 2. 樹勢の衰退との関係

外観上枯死木あるいは瀕死木と見られた立木について、幹木部組織の呼吸速度の面から適確に区別することができた(図-5)。幹の円盤試料での測定によると、呼吸速度はごく最近の年輪成長と密接に関係している(橋本, 1985)。胸高直径30cm付近の中径木の一部に呼吸速度の低い立木が見られたが、これはおそらく隣接木との競合による樹勢の衰退を示していると思われる。また、大径木の一部に呼吸速度の小さいものが見られたが、衰退の予兆なのかもしれない。

樹木の倒壊危険度については、幹木部組織の内部から外側に向かって進行する“材腐朽”が大きく関与している(Mattheck, 2002; 日本緑化センター, 2006)。幹における木部組織の生理活性の低下は材腐朽の拡大進行と密接不可分の関係にあると見られることから、材腐朽の診断とあわせて、さらにさまざまな場所で多くの立木について本呼吸量測定器を用いて調査することになっている。



## 引用文献

- 橋本良二 (1985) スギ人工林の樹冠及び林分構造と光合成生産機構に関する数理解析的研究.  
岩手大学農学部演習林報告 16: 1-87.
- 橋本良二・斎藤博幸 (2006) 高松の池周辺の森林植生とニセアカシア林の組成・構造. (橋本良二編「高松公園自然環境調査報告書」). 41-51, 高松公園自然環境調査委員会, 盛岡.
- Kramer, P. J. and Kozlowski, T. T. (1979) *Physiology of Woody Plants*. 811pp, Academic Press, Inc., London.
- Mattheck, C. (2002) *Tree Mechanics—Explained with Sensitive Words by Pauli the Bear*. 136pp, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Germany
- Mcguire, M. A. and Teskey, R. O. (2004) Estimating stem respiration in trees by a mass balance approach that accounts for internal and external fluxes of CO<sub>2</sub>. *Tree Physiology* 24: 571-578.
- 根岸賢一郎 (1970) 樹木の非同化器官の呼吸—森林の物質収支と関連して—. *日本林学会誌* 52: 331-345.
- Negisi, K. (1978) Daytime depression in bark respiration and radial shrinkage in stem of a standing young *Pinus densiflora* tree. *Journal of Japanese Forestry Society* 60: 380-382.
- 日本緑化センター (2006) 最新・樹木医の手引き 改訂3版. 559pp, 財団法人日本緑化センター, 東京
- 大島誠一, 四手井綱英, 辻 英夫, 畠山伊佐男 (1967) 切り取り前後の樹木の呼吸変化について. *京都大学農学部演習林報告* 39: 100-109.
- Pruyn, M. L., Gartner, B. L. and Harmon, M. E. (2002) Respiratory potential in sapwood of old versus young ponderosa pine trees in the Pacific Northwest. *Tree Physiology* 22: 105-116.