

植物組織培養研究における単位表記

古在 豊樹*

1. はじめに

最近の植物組織培養研究の進展には、著しいものがある。多くの先人の地道な努力の賜であると同時に、この分野への多分野からの新規参入者の努力に負うところも少なくないであろう。

研究の進展が著しかったり、多分野からの参入者が増加したりすると、単位表記や用語に混乱が生じ得る。他方、単位の誤用や混用は、研究内容の誤解にもつながる。

本稿では、植物組織培養分野で慣行的に使われている単位のうち、誤解、混用されやすいと思われるものについて、筆者の現段階での考え方を述べ、さらに若干の用語の問題についても触れる。ただし、本稿で示す推奨単位には、本誌投稿規程中の単位表記指定と異なる点もある。多くの方の批判をいただければ幸いである。

2. 単 位

数値を用いて物理量の大小を表現するときの基準の大きさを単位という。いくつかの基本単位を組み立てて、その他の物理量の単位を表現する体系を単位系という。1970年代以降、世界各国で、国際単位系(SI単位系)の導入が進められ、JIS(日本工業規格)の単位表現もSI単位に準拠している¹⁾。

植物組織培養研究の分野において慣行的に使用されている単位のうち、誤解、混用されやすいものを、第1表に示した。第1表において、推奨単位とは、SI単位に準拠した単位である。旧単位のうち、グループAは、単位記号は異なるものの、その数値は、推奨単位を用いた場合と同一になるものである。グループBは、それに一定の換算係数を乗ずることによって、推奨単位表記に換算できるもの、グループCは、特定の条件(たとえば、温

度や放射スペクトル特性など)を指定しなければ、推奨単位表記に換算できないものである。

なお、第1表において、たとえば、 mol l^{-1} は mol/l と同等、 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ は、 $\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ と同等である。 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を、 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ あるいは、 $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ とは表記しない。 $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を、 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と表記してもよい。また、単位に、m, μ , n が付くと、それぞれ、 10^{-3} , 10^{-6} , 10^{-9} 、また、k, M が付くと、それぞれ、 10^3 , 10^6 を意味する。

2.1 照度, 放射照度, および光子束密度²⁾

放射照度あるいは放射束密度とは、単位時間当たり、単位面積当りに入射する放射エネルギー量と言う。面が受けるエネルギー量を問題とする場合は放射照度を、面を通過するエネルギー量を問題とする場合は、放射束密度を用いる。放射束密度は、単に放射束と呼ばれることもある³⁾。光合成に有効な放射(photosynthetically active radiation)の波長域(400~700 nm)に関する放射束密度は、光合成有効放射束密度と呼ぶ。もちろん、紫外域や赤外域の放射に関しても、同じ単位で表示される。

SI単位では、エネルギー、熱量の単位として、J(ジュール)を用い、cal, kcal(1J=0.2390 cal)は用いない。なお、 $1\text{J s}^{-1}=1\text{W}$ (ワット)である。また、 $1\text{ly min}^{-1}=1\text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ である。

単位面積、単位時間当たりの光子数を光子束密度と呼ぶ。 1m^2 当り 1s 当りに、アボガドロ定数(6.022×10^{23})に等しい光子が通過した時の光子束密度が、 $1\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。光子束密度のことを、単に光子束と呼ぶことがある。 $\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (E; アイニシュタイン)を単位として用いていたことがあるが、現在では用いられない。

光合成に有効な波長域に関する光子束密度を、光合成有効光子束密度(photosynthetic photon flux density)または光合成有効光子束(photosynthetic photon flux)と言い、それぞれ、しばしばPPFD、またはPPFと略称される。

照度(単位 lx, ルックス)は、人間の眼に感じる明る

* Toyoki KOZAI: Unit Representation in Plant Tissue Culture Research
千葉大学園芸学部園芸環境工学研究室(〒271 松戸市松戸 648)
Laboratory of Horticultural Engineering, Faculty of Horticulture, Chiba University (648 Matsudo, Chiba 271 Japan)

第1表 植物組織培養に関連する物理量の推奨単位と旧単位・慣行単位の関係

名 称	推 奨 単 位	旧単位, 慣行単位		
		グループA	グループB	グループC
光量子束 (密度) photon flux (density)	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$		
放射照度, 放射束 (密度) irradiance radiant flux (density)	W m^{-2}		$\text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ ly min^{-1} $\text{kcal m}^{-2}\text{h}^{-1}$	
モル濃度 molar concentration	mol l^{-1}	M		
イオンの当量濃度 equivalent concentration of ion	mol l^{-1} mol m^{-3}	eq l^{-1}		
百万分率 parts per million	$\mu\text{mol mol}^{-1}$ $\mu\text{g g}^{-1}$	vppm, vpm ppm (w/w)		ppm (w/v) mg l^{-1}
質量百分率 mass percentage	wt %	%		
体積百分率 volume percentage	vol %	%		
浸透圧 osmotic pressure	Pa		bar, atm	Osm kg^{-1}
水ポテンシャル water potential	Pa		bar, atm	Osm kg^{-1}
相対湿度 relative humidity	%			

注) グループA: 数値は, 推奨単位と同一となる。

グループB: 一定の換算係数を乗じることによって, 推奨単位表記に変換できる。

グループC: 特定の条件 (温度など) を指定しなければ, 推奨単位に変換できない。

さを表す物理量であり, 植物の光環境の表示には不適である。人間の眼は, 波長域 380~760 nm に感じるが, 緑黄色光に関しては, 青色光や赤色光よりも, 約 10 倍も明るく感じる。照度計のセンサの波長感度特性は, 眼の標準比視感度特性に対応するように作られているので, 一般に, 照度は, 同一の波長分布を有する放射源に対してのみ, 光量子束や放射束に比例する。

すなわち, 照度, 光合成有効放射束密度, 光合成有効光量子束密度のいずれか 1 つから他へ換算する, 換算係数は, 放射源・光源の波長分布特性によって異なる。たとえば, 白色蛍光灯を放射源とした場合, 換算係数は, およそ, $3.4(\text{W m}^{-2})/\text{klx}$, $13(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})/\text{klx}$ である。

植物の光環境を, 光合成, 光形態形成などとの関連で問題とする場合は光量子束密度で, また熱 (エネルギー) 収支との関連で問題とする場合は放射束密度で表示するのが適切である。いずれの場合も, その波長範囲を明確に指定しなければ意味がない。

2.2 モル濃度, イオンの当量濃度, 百万分率, 質量百分率¹⁾

溶液の単位体積当りに含まれる溶質の物質質量を示すモル濃度 (容積モル濃度) の単位は, 1 mol l^{-1} ($=10^3 \text{ mol m}^{-3}$) である。ただし, 化学の分野などでは, モル濃度の

単位記号を M と表記することが許されている。また, liter (litre) は, dm^3 の特殊名であるが, その重要性から使用が許されており, JIS では英小文字 l, アメリカ化学会などでは英大文字 L で表記される⁴⁾。JIS では, 英小文字 l が, 数字の 1 と紛らわしい場合には, 「ltr」を用いてもよいとされている。

溶液のイオンの電荷数にモル濃度を乗じた物理量が, イオンの当量濃度である。 1 mol l^{-1} を 1 eq l^{-1} (当量濃度) $=10^3 \text{ meq l}^{-1}$ (ミリ当量濃度) と表記している場合がある。培地中の多量要素のイオン成分バランスを検討する場合は, イオンの当量濃度で表記するのが適切である。ちなみに, pH (水素イオン指数) は, 水素イオンの当量濃度 (正しくは, 相対活量) の逆数の常用対数である。

培地中の微量元素, 植物生長調節物質, あるいは培養器内空気の二酸化炭素濃度, エチレンガス濃度などの希薄濃度の物質の濃度表示には, しばしば, ppm を単位として百万分率で表記されている。通常, 前 2 者を ppm で表示した場合は, mg l^{-1} と同等であり, 後 2 者を ppm で表示した場合は, $\mu\text{mol mol}^{-1}$, $\text{cm}^3 \text{ m}^{-3}$ と同等である。上記 2 種の ppm の意味を明確に区別するには, 前者を ppm (w/v), 後者を vppm, vpm, ppm (v/

v)などと表記する必要がある。ここで、vは容積 (volume) を、wは重(質)量 (weight) を意味する。SI単位では、ppm を使用しないで、 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 、 mg l^{-1} などを使用する。

培地中における寒天などのゲル化剤濃度や糖濃度の単位には、% (パーセント) が用いられることが多い。これは、単位容積の液体培地に加えたゲル化剤などの重量の百分率であり、質量百分率とも体積百分率とも異なる。この表記法は、他の学問分野の研究者には誤解され易いので、将来的には、質量百分率 (wt%)、混合物の全質量に対する成分の質量の百分率)などの表記に変更すべきであろう。

2.3 浸透圧、水ポテンシャルおよび相対湿度⁵⁾

1) 浸透圧

培地中に溶解している物質に起因する浸透圧は、浸透圧調整剤として加えられるマンニトールやソルビトールだけによるのではない。炭素源として加えられる糖類、栄養塩類として加えられる無機イオンなども浸透圧を発生する。

そこで、単位表記上の問題が生じる。第一に、浸透圧を問題とするからには、浸透圧調整剤を加えたことによる浸透圧の変化は、モル濃度でなく、圧力単位 Pa (パスカル)、kPa, MPa ($=10^6 \text{ Pa}=10 \text{ bar}$) で表記するのが適切である。第二に、植物組織に影響を及ぼす培地の浸透圧は、浸透圧調整剤に起因する浸透圧だけでなく、糖類、無機イオンなどに起因する浸透圧を含めた全浸透圧であるから、全浸透圧を表記しなければならない。なお、浸透圧濃度と浸透圧との間には、およそ、 $1 \text{ MPa}=0.41 \text{ Osm kg}^{-1}$ の関係がある³⁾。また、 $1 \text{ atm}=101.325 \text{ kPa}$ である。

Heller (1953), Murashige & Skoog (1962), White (1963), B5 (Gamborg, Miller & Ojima; 1968), Nitsch (1969), Schenk & Hidebrandt (1972) の培地基礎成分に起因する浸透圧は、それぞれ、およそ、89, 212, 37, 143, 106, 153 kPa である³⁾。また、ショ糖、グルコース、フラクトース、マンニトール、ソルビトールに起因する浸透圧は、 10 g l^{-1} (1% (w/v)) 当り、それぞれ、およそ、80, 154, 154, 150, 154 kPa 程度である³⁾。植物生長調節物質、ビタミン類などに起因する浸透圧は無視し得るほど小さい。

したがって、たとえば、Murashige & Skoog (1962) の培地基礎成分、ショ糖モル濃度 $0.0876 \text{ mol l}^{-1}$ (30 g l^{-1})、マンニトールモル濃度 0.164 mol l^{-1} (30 g l^{-1}) からなる培地の全浸透圧は、およそ、 902 kPa ($=212+240+450 \text{ kPa}$) となり、全浸透圧中のマンニトールに起因する浸

透圧の寄与率は、たかだか約 50% ($=100 \times 450/902$) となる。

2) 水ポテンシャル

浸透圧にマイナスの符号を付けた物理量を浸透ポテンシャルと呼ぶ。単位は浸透圧と同じである。大気圧下においては、液体培地の水ポテンシャルは、その浸透ポテンシャルに等しく、またゲル化培地の水ポテンシャルは、その浸透ポテンシャルにほぼ等しいと推察される。一般には、培地の水ポテンシャルは、浸透ポテンシャル、マトリック (毛管) ポテンシャル、および圧ポテンシャルの総和である。

3) 空気の水ポテンシャルと相対湿度

空気の水ポテンシャル Ψ は、次式で表される。

$$\Psi = (RT/V) \ln (P/P_0)$$

ここで、 R は気体常数 ($8.3144 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 T は絶対温度、 P は問題とする湿り空気の水蒸気圧、 P_0 は温度 T K の空気の飽和水蒸気圧、 V は水の部分モル容量 ($\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$)、 \ln は自然対数である。 $T=298.13 \text{ K}$ (25°C) のとき、 $V=18.068 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ である。また、上式において、 $100 (P/P_0)$ を空気の相対湿度 r. h. (%) と呼ぶ。上式から、r. h. = 99.9, 99.5, 99.0, 90%, $T=298.13 \text{ K}$ の時、 $\Psi = -0.137, -0.688, -1.38, -14.5 \text{ MPa}$ となる。

4) 定常状態における水ポテンシャルの平衡

水は水ポテンシャルの高い方から低い方へ移動する。そして、暗期における一定温度下では、密閉培養器内の培地、細胞、および空気の水ポテンシャルは、たがいに、ほとんど等しくなる。通気性のある培養器では、外気、培養器内空気、培養体、培地の順に水ポテンシャルが大となる。以上のように、培養システムにおける水の流れの方向に関しては、水ポテンシャルの概念を導入すると、その理解が容易になる。

3. 率、速度および頻度

用語「率」は、通常、第一義的には、百分率 percentage (% , per cent) を意味する。たとえば、シュート再分化率は、カルス数 (あるいは置床外植片数) に対する、シュートが再分化したカルス数の百分率であり、英語表記では、percentage (of) redifferentiation とするのが普通であろう。

ところが、上記の意味でのシュート再分化率に対して、redifferentiation rate (%), frequency (of) redifferentiation (%) と英語表記されることがある。

たしかに、一般英語としての rate には、「率」、「割合」の意味がある。しかし、英語 rate は、学術分野では、通常、ある量の時間変化を言い、「速度」と訳され

る。たとえば, shoot redifferentiation rate は, シュート再分化速度と訳され, 単位時間に再分化するシュート数を意味する。光合成速度 (photosynthetic rate), 生長速度 (growth rate) など同様の意味を有する。rate を「速度」以外の意味 (率, 割合, 比など) で用い, あるいは, 率を「速度」の意味で用いると, 両者の区別がつかなくなる。

頻度 (frequency) は, 特定の階級 (類) に区分される度数, あるいは単位時間における度数または回数を意味するので, 単位が% と言うことはない。ただし, 全階級の合計頻度に対するある階級の頻度の百分率は, relative frequency (相対頻度) と呼ばれ, 単位は% となる。ただし, これは, 相対頻度などと呼ばずに, 単に, 「率」と呼べば済むことが多い。また, 再分化率の意味で, 再分化能 (%) という用語が用いられていることがある。「能」 (ability, capability, capacity, competence など) は, それぞれの学問分野で, さまざまな意味に使われるので, 誤解をさけるためには, その使用にあたっては, 明確な定義を付加する必要がある。

5. おわりに

研究成果の正確な表現, 確実な情報交換, あるいは妥当な考察には, 用語および単位の統一性, 一貫性が不可欠である。他方, 急激な進展をしている学問分野では, 用語や単位の不統一と変遷が避けられない面もある。

本来, 単位は, 計測値に付加されてはじめて実用的意味を有する。その意味で, 単位系の統一化は, 計測方法の標準化と密接な関係がある。植物組織培養学を, より定量的な学問にするためには, 生物学的, 化学的, 物理学的諸量の標準的計測方法の開発を推し進める必要がある。

本稿では, 植物組織培養関連の文献中で問題となる用語, 単位のいくつかについて, SI (国際) 単位と JIS に準拠しつつ, 若干の私見を加えて, 述べた。これがきっかけの一つとなって, より統一的な用語, 単位記号が本学会で検討されるようになれば, 筆者の望外の幸せである。

(1988年12月26日受理)

文 献

- 1) 飯塚幸三, 1977. 量記号・単位記号の使い方, オーム社, 東京.
- 2) Langhans, R. W. (ed.), 1978. A Growth Chamber Manual. Comstock Pub. Assoc., pp. 217
- 3) Holms, M. G., W. H. Klein, J. C. Sager, 1985. HortScience, 20: 29-31.
- 4) Dodd, J. S. (ed.), 1986. The ACS Style Guide. American Chemical Society, pp. 264.
- 5) 古在豊樹, 富士原和宏, 渡部一郎, 1986. 農業気象, 42: 1-6.