

特別寄稿:資料

植物工場研究に関する用語と単位

古在豊樹

日本生物環境工学会名誉理事長・千葉大学名誉教授

Technical Terms and Units in Studies on Plant Factory

Toyoki KOZAI

Professor Emeritus of Chiba University

1. はじめに

近年、植物工場に関する研究開発に多分野の人々が関わり、本学会の大会や学術誌での研究発表が増加している。最近では、生活者・ビジネスの視点からの研究発表もある。これら研究開発者の学術的背景は化学、生物、物理など様々であり、出身学部は農学部、理学部、工学部、生活科学部、教育学部など多岐にわたり、さらには主とする所属学会や論文投稿先の学術誌も多様である。このような領域横断的分野においては、共通の用語と単位の利用が研究開発者間のより良いコミュニケーションのために欠かせない。

自然科学分野で用いられる単位は世界的に国際 (SI) 単位系に統一されているものの、その実際の運用は分野毎に少しずつ差異がある (SI 単位系そのものについては他書を参照されたい)。日本語および英語で表記される学術用語に関してもその分野毎に少しずつ意味が異なることがある。英語の用語に対応する日本語の用語が分野毎に異なることも少なくない。

植物工場は、本学会では、大別すると、①植物、②環境、③装置および④それらの相互関係の立場から研究される。例えば、光に関しては①植物の光応答、②光環境、③光源 (照明装置) および④それらの相互関係の立場から研究される。このような状況においては、それぞれの学術分野で単位と用語が異なると、異なる学術分野間での研究内容の正確な理解がしにくくなり、また関係者同士の正確なコミュニケーションに支障をきたし得る。さらには、互いに誤解していることに気

づかないことさえある。

そこで、本稿では、植物工場に関する用語と単位について筆者が感じている事項に関連する基礎的事項と共に述べ、植物工場関係者間のより良いコミュニケーションに向かったの第一歩としたい。この試論への読者の建設的批判を期待している。自身が習い覚え、長年にわたり所属してきた研究室や学会で使い慣れている用語と単位を変更するのは、たとえそれが合理的だと理解していても、心理的・習慣的に抵抗を感じるであろう。その心理・習慣から脱却して、用語と単位をより広い視野で前向きに再考する機会の1つに本稿がなれば幸いである。

2. 状態変数と速度変数

変数は状態変数 (state variable) と速度変数 (rate variable) に大別される。状態量を表わす前者の単位には時間が含まれない。状態量の時間変化を示す速度変数の単位には時間 (s, h, d など) が含まれる。例えば、蒸散速度 (transpiration rate) すなわち植物の葉面または植物群落面などにおける水蒸気フラックスまたは水蒸気東 (water vapor flux) の単位は、 kg h^{-1} 、 mol s^{-1} などである。また、電力の単位は J s^{-1} (毎秒あたりのジュール) すなわち W (ワット) である。なお、国際単位としては、days, hr などとは表記はしない。また、同一の論文の中で用いる時間単位 (s, h, d) の数は少ない方が変数間の数値の比較がしやすい。

速度変数を面積当たりで表現する場合は、たとえば、水蒸気フラックスの単位を $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ などとして、水

蒸気フラックス密度または水蒸気束密度 (water vapor flux density) と呼ぶ。ただし、蒸散、光合成、呼吸などに関しては、例えば、蒸散束密度とは呼ばずに、単に蒸散速度と呼び、それが面積あたりのフラックスかどうかは、単位に面積が含まれているかどうかで判断している場合が多い。なお、密度 (density) は面積あたりでなく、立方体あたりの意味で用いることがある。

状態変数は示量変数 (extensive variable) と示強変数 (intensive variable) に大別される。示量変数の例は、質量 (kg)、長さ (m) などで、(均一な系では) 全体の量は部分の和で表される。すなわち、相加性を有し、1 kg と 3 kg の和は 4 kg である。示強変数の例は、温度 (K または $^{\circ}\text{C}$)、圧力 (Pa)、濃度 (g kg^{-1}) などで、それらは相加性を有しない。10 $^{\circ}\text{C}$ (の水) と 20 $^{\circ}\text{C}$ (の水) を加えても、一般には、(その水は) 30 $^{\circ}\text{C}$ にはならない。この意味で、暖房を意味する際には「加温」より「加熱」が合理的である。熱 (エネルギー) は相加的だが、温度は相加的でないからである。

3. 光

3.1 波長と振動数

光は広義には紫外放射から赤外放射までの電磁波 (electromagnetic wave) を指し、狭義には可視光 (visible light) の範囲の電磁波を指す (理化学事典の定義)。光は電磁波であると同時に光量子 (photon, 光子, 量子とも言う) の性質を持つ。前者の特徴は波長 (wavelength) で、後者の特徴は波長振動数 (= 光速 / 波長, frequency) で表される。ただし、実際には、両者とも波長で表記することが多い。なお、周波数 (単位: Hz) は毎秒の振動数を意味するが、英語では振動数も frequency と呼ばれる。

光が有するエネルギーの単位は、J である。他方、光量子の数 (量) が 6.022×10^{23} のとき、光量子数 1 mol であるという。なお、光量子が有するエネルギーはその振動数に比例するので、波長 450 nm (青色) の光量子が有するエネルギーは波長 650 nm (赤色) のその 1.44 (= $650/450$) 倍である。

3.2 光源と光環境および植物と人間に関する用語と単位

植物照明用の LED (Light Emitting Diode) が普及する以前は、LED そのものの特性を論じる文献・研究発表 (以下、文献) の数に比して、植物の光環境が植物の成長・生理への影響を論じる文献の数がかなり多かった。ところが、

LED の普及以降、多様な分野からの研究者の参入により、LED そのもの、および LED の特性、植物の光環境および植物の成長・生理の 3 者を関連させて論じる文献が増えている。さらには、人工光型植物工場では、人工照明下で長時間の作業をする人が増え、照明が作業者の健康 (心理・生理) に及ぼす影響に着目した文献が出始めた。上述の事情から、専門分野の異なる関係者間の用語と単位の誤解や混乱をなくすための努力が必要となっている。

3.3 放射強度、放射フラックス (束) および放射フラックス密度

国際単位系にもとづく、放射、光量子および可視光に関する用語・単位およびそれらの関係を表 1 に示す。以下では、光量子、可視光および放射を「放射」と総称する。光合成や光形態形成は光化学反応なので光量子がより直接的に関係する。植物工場全体やその一部 (例えば、植物体) におけるエネルギー収支に関する場合の光エネルギーや熱エネルギーは J 単位で表記される。

国際単位系では、放射強度 (radiant intensity) と光量子強度 (photon intensity) は、それぞれ、放射エネルギーと光量子を射出する側に関して用いられ、立体角 (steradian) あたり・時間あたりである。また光源が時間あたりに全方位に射出する量はフラックス (束) と呼ばれる。

ある面 (例えば、植表面) に時間あたりに到達する放射もフラックス (束) と呼ばれる。さらに、時間あたり面積あたりに到達する放射をフラックス密度または束密度と呼ぶ。ルーメン (lumen, 単位記号: lm) は、人間の目の網膜の波長別感度 (明所視標準比視感度) を考慮した「可視光」に関するフラックスの単位であり、ルクス (lux, 単位記号: lx) はフラックス密度すなわち照度の単位である。

園芸学分野の論文では、フラックスを意味する光強度 (light intensity) をフラックス密度の意味で用いている例が散見されるが、この用語の使用は、互いの誤解を避けるために、やめるべき時期に来ていると考えられる。

3.4 照明器具の特性

照明器具 (光源と付属物) の特性に関する、代表的な用語と単位ならびに数値例を表 2 に示す。照明設計には表 2 の値がすべて必要である。人工光源を製造販売している企業および人工光源と植物の関係に関する文献では、分光 (スペクトル) 曲線に加えて、表 2 の数値を必要に応じて示すことが求められる。

表中の効率に対応する英語は、分母・分子の単位が等し

表1 光合成有効放射 (photosynthetic radiation), 光合成有効光子 (photosynthetic photon) および可視光 (visible light) に関する用語と単位およびそれらの関係¹⁾. PPFとPPFDの違いに注意.

測定法	強度	フラックス (束)	量	フラックス密度
光合成有効放射測定 Photosynthetic radiometry	光合成有効放射強度 Photosynthetic radiant intensity [W sr ⁻¹]	光合成有効放射フラックス Photosynthetic radiant flux [W] = [J s ⁻¹]	光合成有効放射エネルギー Photosynthetic radiant energy [J]	光合成有効放射フラックス密度 Photosynthetic radiant flux density [W m ⁻²]
光合成有効光子測定 Photosynthetic photonometry	光合成有効光子強度 Photosynthetic photon intensity [mol s ⁻¹ sr ⁻¹]	光合成有効光子束 Photosynthetic photon flux (PPF) [mol s ⁻¹]	光合成有効光子数 Photosynthetic photon number [mol]	光合成有効光子束密度 Photosynthetic photon flux density (PPFD) [mol m ⁻² s ⁻¹]
可視光測定 Photometry	光度 Luminous intensity [cd]	光束 Luminous flux [lm]	光量 Quantity of light [lm s]	照度 Illuminance [lx] = [lm m ⁻²]
関係	A	A · sr = B	A · sr · s = B · s	A · sr · m ⁻² = B m ⁻²

注) photosynthetic radiation は、通常、photosynthetically active radiation, PARと表記されている。しかし、光合成有効光子 (photosynthetic photon) との表記の一貫性を高めるために、本表では、PARをphotosynthetic radiationと表記した。なお、英語表記には「有効」に直接的に対応する単語が含まれていないが、日本語では加えてある。繰り返し使用する場合などには「有効」を省略し得る。

¹⁾ Fujiwara K, Kozai T, Fujiwara K, Runkle E. Springer. Singapore. 367–376. 2016.

表2 照明設計に必要な照明器具 (光源と付属物) の光特性に関する用語, 単位および数値例。LED メーカーが公表すべきと考えられるデータ²⁾を一部改変。植物付近の光環境は本表の光特性に加えて栽培空間および植物の形状と光特性に影響される。

用語 (日本語)	用語 (英語)	単位	数値例
光特性	<i>Light characteristics</i>		
分光分布	Spectral distribution (300–800 nm)	μmol m ⁻² s ⁻¹ nm ⁻¹	–
配光曲線	Angular distribution	mol s ⁻¹ rad ⁻¹	–
光合成有効光子束	Photosynthetic photon flux	μmol s ⁻¹	48.0
光合成有効放射束	Photosynthetic radiant flux	W (=J s ⁻¹)	8.0
光束	Luminous flux	lm	4160
色温度	Color temperature	K	3,000
演色性評価数	Color rendering index	Ra	87.0
効率	<i>Efficiency/efficacy</i>		
光合成有効放射エネルギー効率	Photosynthetic radiant energy efficiency	J J ⁻¹	0.25
光合成有効光子数効率	Photosynthetic photon number efficacy	μmol J ⁻¹	1.50
発光効率 (ランプ効率) (全光束 / 消費電力)	Luminous efficacy	lm W ⁻¹	130

²⁾ Goto E, Kozai T, Fujiwara K, Runkle E. Springer. Singapore. 395–402. 2016.

い場合は efficiency を用い、両者の単位が等しくない場合は efficacy を用いる。Efficiency は最大値が 1 (100%) となる場合に用いるのが好ましい (慣習的にそうでない場合がある

ので注意が必要である)。植物工場で使用される照明器具では、光合成有効光子数効率が重要である。luminous efficacy は、発光効率、ランプ効率、総合効率などと呼ばれ

ることがあり、他方、発光効率（光束 / 全光束）を意味することがあるので、これらの関する計測数値の表示に際してはそれらの効率の定義と測定法の付記が求められる。なお、表2の効率を計測する際の消費電力は、光源そのものの消費電力だけではなく、電源装置などを含めた消費電力の方が実用的である。できれば、両方の計測値を示すのが好ましい。

3.5 白色LEDの意味

植物工場用のLED光源としては、青色LED、赤色LED、白色LED、紫色LEDおよびそれらの組み合わせが使用されている。青および赤のLEDは実際に青および赤の光がそれぞれのLEDから射出されるので、その発光のピーク波長と半値幅でその分光スペクトルの特徴が示される。しかし、白色LEDからは幅広い波長の光が射出され、特定の分光スペクトルを有する「白色光」が射出されているわけではない。元来は青色を射出するLEDのカバー樹脂に封入された蛍光体により青色が幅広い波長の光に変換される。その混色下で物体を見ると自然光下でのその物体を見る時の色と似ているときに、それを白色LEDと呼んでいる。この場合の青、緑、赤の比率あるいは分光スペクトルは白色LEDの種類毎に異なる。紫色LEDや蛍光灯に関しても同様である。白色LEDは、人間にとってはどれも白色だが、植物の生理作用に関しては光質（分光用スペクトル）が異なることになり、その効果も異なる場合が少なくないので注意が必要である。なお、植物の形態形成や生理作用に影響を与える紫外放射および遠赤放射を多少とも射出している光源が多い。

表2の演色性評価数は、自然光を基準として、自然光下と色ずれが無い場合の評価数値を100とし、色ずれは大きいほど評価数値が低くなる。他方、色温度は、その色を発する黒体の温度をおよそ意味する。蛍光灯は「電球色」「温白色」「白色」「昼白色」「昼光色」に分類されており、色温度は、順に、約3000 K、3500 K、4200 K、5000 K、6500 Kである。LEDの色温度に関しても同様である。光源の演色性評価数や色温度は、植物工場野菜の色あいや植物工場内の作業者の健康（心理や生理）に関係している。

3.6 光、光合成有効光子、光合成有効放射および可視光

上述の議論から、単に「光」と書かれている場合の「量」は、mol、J、lmのどれを意味しているかが不明であるので、単位の明記が必要となる。光合成に有効な光子は光合成有効光子（photosynthetic photon, 400–700 nm）、光合成に有効な放射は光合成有効放射

（photosynthetic radiation, 400–700 nm）、人間の目の網膜で認識し得る放射は可視光（visible light, 国際照明委員会では360–830 nm、一般には380–780 nm程度）と呼び、区別している。「photosynthetic radiation」は一般には、「photosynthetically active radiation (PAR)」と呼ばれてきたが、「photosynthetic photon」との用語統一性を優先したほうが良い時期だと考えられる。光合成有効放射の域外と定義されている紫外放射（ultraviolet radiation）の波長300～400 nmでは多少の光合成は行う。また、遠赤放射（far-red radiation）の波長700～800 nm付近でも多少の光合成を行う。さらに、遠赤放射の一部は光合成に関するEmerson効果に関連している。光合成とは別に、紫外放射と遠赤放射は、植物および人間の生理作用に影響を及ぼすことが多い。したがって、400～700 nmとされてきた光合成有効放射と光合成有効光子の波長範囲を再考する時期にあると考えられる。

3.7 光合成有効光子束、光合成有効光子束密度、積算光合成有効光子数

「光子（例えば、mol）」と書きながら、実際は、光合成有効光子束（photosynthetic photon flux, PPF）（ $\mu\text{mol s}^{-1}$ ）、光合成有効光子束密度（photosynthetic photon flux density, PPFD）（ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）などの速度変数を意味している文献がある。上述のPPFは光源の特性を示すフラックスであり、PPFDは光環境の特性であるフラックス密度である。米国園芸学会では、PPFDをPPFと表記するように求めているようだが、いずれ修正されるであろう。両者の混同は大きな誤解を呼ぶ原因となり得るからである。他方、PPFDの1日の積算値の単位は $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であるが、DLI（Daily Light Integral）の単位は、光合成有効光子の場合には mol m^{-2} 、光合成有効放射の場合には MJ m^{-2} となる（Dailyと明記されているので、 d^{-1} は不要）。今後、DLIがどちらを意味するかが明確な用語に変えるべきであろう。

4. 正味光合成量、蒸散量

状態変数と速度変数の区別の重要性は、光合成、蒸散、呼吸などの植物の生理生態に関しても同様である。正味光合成量（=総光合成量-暗呼吸量）は状態変数なので、単位は mol m^{-2} 、 g m^{-2} などであり、正味光合成速度（net photosynthetic rate）は速度変数なので、単位は $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ などである。フラックス密度に関しては、面積が

葉面積、栽培面積あるいは床面積なので数値が大きく変化するので、初出の場所で、 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (葉面積) のような明記が必須である。

なお、正味光合成速度、蒸散速度あるいは乾物重量を面積当たりではなく、植物体あたり、葉1枚当たりで表わすことがある。この場合の単位は、 $\text{mol m}^{-2} \text{leaf}^{-1}$ や $\text{mol m}^{-2} \text{plant}^{-1}$ 、 g leaf^{-1} などではなく、 $\text{mol m}^{-2}/\text{leaf}$ 、 $\text{mol m}^{-2}/\text{plant}$ 、 g/leaf などとする。指数で表示できるのは、国際単位系単位だけであり、leaf や plant は国際単位系単位ではないからである。

5. 濃度

空気中の CO_2 濃度、養液中の肥料要素濃度あるいは植物体中の成分濃度など、濃度表示は植物工場研究において欠かせない。他方、これらの濃度表示には悩ましい点が多い。

5.1 気体の濃度

大気中の平均 CO_2 濃度は、国際単位系では $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ などと表示されるべきであるが、実際には ppm (parts per million) で表示されることが多い (養液中の肥料要素の「濃さ」に関する ppm 表示に関しては後述する)。この場合、ppm の意味が誤解されることがほとんどないので、許容範囲とも考えられるが、ppm は国際単位系単位ではないことは肝に銘じるべきである。ppm を学術論文の原稿で使用した場合、編集者などに国際単位系単位に修正するように指摘されたら、素直に従うべきであろう。

5.2 content と concentration

Content は含有量 (g/leaf, g/plant) の意味でも濃度 (concentration, g kg^{-1} など) の意味でも使用されることがある。同じ論文の中で、含有量と濃度の両方のデータが示され、どちらも content と表示されると、混乱をきたす。濃度は concentration、含有量は content と明確に使い分けることが必要と思われる。なお、濃度表記では、分子と分母の単位は同一またはそのべき乗でなければならぬのが原則である。また、国際単位系では、単位の接頭語 (prefix) は先頭の単位記号にのみ付すよう求めている。たとえば、 mg mg^{-1} ではなく、 g kg^{-1} である。質量の基本単位は g ではなく kg であるので、 mg g^{-1} よりも g kg^{-1} の方が自然である。

当然、 $10 \text{ mg}/100 \text{ g}$ などの表記はやめ、 0.1 g kg^{-1} と表記するべきである。100 g は単位ではないので、 $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ とは表記できないのはもちろんである。

5.3 飽差

空気の飽差 (vapor pressure deficit, VPD) は、water vapor partial pressure deficit (水蒸気分圧差) を意味する。VPD は飽和水蒸気分圧と実際の水蒸気分圧の差を意味するので、単位は圧力 (Pa, パスカル) である (実際には、飽差の場合は kPa、大気圧の場合は hPa で表示されることが多い)。ところが、施設園芸分野では、飽差の単位を g m^{-3} としている場合が少なくない。空気中の水蒸気に関するこの単位は、一般には、比重量 (specific weight) と呼ばれる (分子と分母の単位が異なるので、水蒸気「濃度」差ではない)。

2つの空気塊の飽差が同じでも気温が変わると空気容積が変わるので、 g m^{-3} の値が変わり、飽差と比重量は比例関係にない。この単位は、1970年代にオランダの施設園芸研究者が、園芸施設内空気の湿度制御に使いはじめ、それが普及したことによる。使い慣れた単位を変えるのはそれなりの努力が必要ではあるが、非合理的な単位は研究者間のコミュニケーションを阻害するので再考の時期に来ている。なお、暖冷房などの空気調和の分野では、空気中の絶対湿度の単位として kg kg^{-1} (DA) を用いる。この分母は、空気重量から水蒸気重量を差し引いた、湿き空気 (dry air, DA) の重量であるので、湿き空気に関する水蒸気濃度を意味する。

6. 肥料要素の濃度表示

植物工場分野で最も悩ましいのは、養液栽培における肥料要素濃度に関する用語と単位である。

6.1 ppm

溶液中の各肥料要素の「濃さ」は低いので、ppm で表示されることが多い (モル等量 (equivalent, e) 表示については後述する)。ところが、これは、体積に対する質量の百万分率であり、除数と被除数の単位が等しくない。両者の単位が等しい時の百万分率を ppm とする一般的定義とは異なるので、化学分野以外の研究者には誤解されやすい。

6.2 liter か kg か

除数を質量ではなく体積とする「濃さ」の定義は、1リットルのメスシリンダに既知質量の肥料要素を投入するという溶液作成作業と一体となっているので、溶液作成の実用上は便利である。水1リットルの質量は、大気圧 101.3 kPa の下で、20℃では 0.9982 kg、30℃では 0.9957 kg であるので、実質的には1リットルは1kgと近似しても相対誤差は 0.1 ~ 0.2 %

なので構わないとすると、 1 g l^{-1} を 1 g kg^{-1} とする方便もあり得る。また、電子天秤の近年の精度向上と価格低下により、質量計測の方が体積計測より簡便かつ高精度であることが多い。

なお、国際単位系では、誘導単位（基本単位から誘導された単位）を大文字で表記するのは、J（ジュール）、W（ワット）など、人名の頭文字を用いた場合としている。ところが、化学の分野では、l（リットル）はl（イチ）と間違えやすいので、 mg l^{-1} を mg L^{-1} と表記する場合が多く、これも紛らわしい。この点からも、Lではなく、kgを使用する方が良いとも言える。

6.3 塩類の濃さ

さらに大きな問題は、肥料要素に関する濃さの定義である。水1リットルを1kgだと仮定したとしても、養液栽培分野では、溶液（=溶媒+溶質）の質量（ x_1 ）ではなく、水（溶媒）の質量（ x_2 ）で肥料要素の質量（ x_3 ）を除いた値を濃度（ x_3/x_2 ）としている。他方、濃度の一般的定義は溶液質量に対する溶質質量の比（ $x_3/(x_2+x_3)$ ）または比率だからである。両者の「濃度」には $x_3/(x_2+x_3)$ と x_3/x_2 の差が生じる。その差は数値的にはせいぜい数%だが、養液栽培システムあるいは植物工場に関する物質収支の解析や次元解析を行うときに、収支式中の「単位が一致しない」という基本的な問題が生じる。

上述のことは、養液栽培あるいは化学分野だけの間のコミュニケーションでは誤解されることはほとんどない。むしろ、便利この上ないと言える。しかし、他分野の人との間とのコミュニケーションにおいては問題が生じる。最近のように、養液栽培研究が植物群落あるいは植物工場栽培室におけるエネルギー・物質収支の研究と関連しはじめている状況では、用語と単位の共通性を図ることが必要とされる。

6.4 養液の総イオン濃度、モル等量、モル等量濃度およびECの関係

1) 総イオン濃度とモル等量の関係

養液栽培の分野では、養液に溶解している塩類の総イオン濃度に比例する値としてEC（electric conductivity, 電気伝導度, 単位： dS m^{-1} ）の値を用いている。そして、一般に、養液タンク内の養液のEC値を用いて総イオン濃度を制御している。

他方、養液中でイオン化されている各肥料要素のモル量をイオンの価数で除した値をモル等量（mole equivalent）と呼んでいる。記号は化学分野ではEqだが、養液栽培分野で

はeを用い、通常は、その1/1000であるme（ミリイクイバalent, エムイー）を用いる。

2) 各イオンと総イオンのme等量濃度の関係およびEC値とme等量濃度の関係

1リットル中のme値をミリ等量濃度（me/L）と呼んでいる。以下では、その単位を me kg^{-1} と表記する。養液中の塩類濃度は低いので、塩類はほぼすべてイオン化していると仮定できる。そして、養液中の各イオンのme濃度の総和は全イオンのme（総me）濃度に等しい。（同時に、各塩類のモル量の総和は全塩類のモル量に等しく、養液中の各イオンのmeの総和は全イオンのme（総me）に等しい。）

つまり、EC値と総me等量濃度（総 me kg^{-1} ）は正比例関係にある。この比例係数は、純水に全肥料要素を溶解して、その溶液のEC値と総me等量濃度の関係を表す原点を通る直線の勾配として得られる。

他方、濃厚肥料液を希釈するために用いる原水（地下水、上水）には多少の無機イオンが含まれている。したがって、原水に濃厚肥料液を加えたとき、養液に投入した肥料に関する総me等量濃度とECの関係を示す直線は原点を通らず、y軸の切片は原水のEC値となる。この場合、直線の勾配の値は純水に肥料を溶解した場合に得られる直線の勾配の値とほぼ同一となる。なお、養液の総 me kg^{-1} には肥料要素ではないイオンに起因する等量濃度、例えば、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} などの等量濃度加えられている。これらの非肥料要素のmeの値は養液の初期調整時に計算で求められるので、肥料要素だけの総me等量濃度も求められることになる。

3) me等量濃度計

上述の議論から、現在のEC計を総me等量濃度表示にした方が、各肥料要素の me kg^{-1} と全肥料要素の総 me kg^{-1} との関係が直接的に明示されるので、合理的と考えられる。つまり、総イオンまたはいくつかのイオンの me kg^{-1} を表示し、ミリ等量濃度計と呼ぶことにして、表示切り替えによりECも表示可能なセンサーにすれば良い。

4) 養液栽培システムの養液量

養液の初期調整時には、養液タンクに投入する塩類の種類と質量・モル量を正確に知ることができる。したがって、養液全体の質量（または体積）と原水のEC値（総me等量濃度）が既知であれば、養液に加えられる肥料の総meを養液の質量で除することで、me等量濃度の上昇分が計算ではほぼ正確に求められる。計算法の詳細は別の機会に述べ

るが、今後、本節で述べた議論に基づいた養液管理法を考案し得る。同様な物質収支の考え方は、養液中の水素イオンにも適用できるので、養液の pH 管理にも応用し得る。

養液栽培への多くの新規参入者が上述の点のわかりにくさのために体系的な理解を途中で放棄している現状を考えると、養液栽培に関しても、自然科学一般で利用されている国際単位系の導入と体系化が期待される。

7. おわりに

最近の本学会の大会および学会誌における用語と単位に関して感じている事項を述べた。本稿での議論をさらに多くの関係者で深めることにより、用語と単位に関する共通理解が進み、領域横断型である植物工場に関する研究開発がより円滑に進展することが期待される。

謝 辞

本稿の「6.4 モル等量と EC」の部分の多くは、植物工場研究会（NPO）の下に組織された養液コントローラー調査

研究委員会の篠原温委員長、丸尾達、塚越覚、坂口俊輔、篠崎紀美子、清水浩、賀冬仙および堀場製作所（順不同）の各委員との討論の中で得られたアイデアである。各委員に謝意を表す。総イオン濃度、総イオン me 等量濃度および EC の間の理論的關係はこの委員会メンバーが別の機会に述べることになろう。なお、原稿中の「3. 光」の部分に関しては、富士原和宏氏から貴重な意見をいただいた。謝意を表す。

引用文献

- 1) Fujiwara K. Radiometric, photometric, and photonmetric quantities and their units (Chapter 26). In: LED lighting for urban agriculture, eds. Kozai T., K. Fujiwara, E. Runkle. Springer, Singapore. 367–376. 2016.
- 2) Goto E. Measurement of photonmetric and radiometric characteristics of LEDs for plant cultivation (Chapter 28). In: LED lighting for urban agriculture, eds. Kozai T., K. Fujiwara, E. Runkle. Springer, Singapore. 395–402. 2016.