

[タイトル] 植物体の簡単な電氣的等価回路モデルV

ー トマト植物体における果実の肥大ー

Simple electrical equivalent circuit model of plants V

-Hypertrophic growth of fruit in a tomato plant with physiological macronutrients uptake circuit-

[抄録(要旨)] トマト植物体の果実の肥大を非常に単純な電氣的等価回路でシミュレートしてみた。この電氣的等価回路に主要栄養素の取り込み回路を追加した場合としなかった場合で果実の肥大成長パターンが異なることを示した。

[著者名] 奥島 里美 (Okushima Limi)

[所属機関] 農研機構 九州沖縄農業研究センター 研究推進部

(Department of Research Promotion, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO)

[責任著者と電子メールアドレス] 奥島里美, green@zy.sunnyday.jp

[キーワード] 電氣的等価回路モデル(electrical equivalent circuit model), トマト植物体(tomato plants), 果実の肥大成長(hypertrophic growth of fruit)

[利益相反] 示すべき利益相反関連事項はありません。

[著者の貢献] 全部

植物体の簡単な電氣的等価回路モデルⅤ
— トマト植物体における果実の肥大生長 —

2024. 1. 23

奥島里美

[諸言]

これまで植物体を想定した非常に単純な電氣的等価回路モデルを作り、光合成や転流を植物体各部位への電氣的な流れ込みとしてシミュレートしてきた¹⁻⁴⁾。これらは光合成から転流までの過程をモデル化したものであるが、貯蔵や肥大等は含んでいない。そこで、これまでの電氣的等価回路モデルに果実の肥大生長を組み込んでシミュレートすることとした。具体的には果実肥大を表現するため果実部に分布定数回路（分布 RC 回路）⁵⁾を追加した。分布 RC 回路は抵抗とコンデンサを多段に接続したもので蓄電エネルギー量に応じて端子電圧が変動するので、これを果実肥大のアナロジーとして採用した。

果実の発育・肥大は光合成産物、水分、無機養分の転流によって行われる。前報⁴⁾において果実の肥大生長に関与すると考えられる果実のシンク能は果実部の活性度に関連付けできそうなことが示唆されたが、活性度はその部位が取り込んだ必須栄養素に影響されると推察される。

実際の各種栄養素の取り込みや輸送、同化過程は非常に複雑である^{例えば 6)}。本稿では、主要栄養素全般（特定しない）が道管流や師管流に乗って各部位へ取り込まれ、その量が活性度に反映されると仮定して、主要栄養素の取り込み回路を作った（詳細は「附」に記載）。

各部位に分布 RC 回路による肥大生長過程を追加した植物体の電氣的等価回路モデルにおいて、栄養素の取り込み回路を組み入れた場合と入れない場合で果実の肥大生長パターンが異なったことを報告する。

[方法]

植物体の電氣的等価回路モデルは根部、上位の葉部と莖部、下位の葉部と莖部および果実部で構成した（図 1）。果実の肥大生長を表すため果実部に分布

RC回路を付加し、また、茎部や葉部にも貯蔵生長機構があるとして類似の回路を付加した（図1のグレー部分）。この回路は果実部では抵抗とコンデンサを4段に接続したものとし、茎部と葉部は2段とした。

図2では、活性度として師管や道管の流れに応じて必須元素類の取り込みが変化するように維管束にインダクターを付け各部位へ接続する単純な栄養素取り込み回路（図2の紫部分）を追加した。

シミュレーションにあたって外部環境条件である光と温度はこれまでと同様、明期9時間と暗期15時間の24時間サイクルの方形波で毎日この変化を繰り返すとし、CO₂濃度は常時一定で変化しない設定とした。

なお、回路モデルにおける外部環境の入力値や抵抗、コンデンサ等のパラメータの設定値はすべて単なる仮想値であり、これまでの数値をほぼ踏襲した。

[結果]

(1) 各部位に栄養素取り込み回路を組み込まないモデル（図1）における果実の肥大成長パターン（図3）

葉部と茎部における分布RC回路の電位差は上位葉部が最も大きく、上位葉部>上位茎部>下位葉部>下位茎部の順となった。各部位とも20~30日ではほぼ一定値に達し、その後は変化しなかった。果実部の分布RC回路の電位差が果実肥大を表しているとすれば70~80日まで果実が肥大し続け最大となり、その後は変化しなかった。

(2) 各部位に栄養素取り込み回路を組み込んだモデル（図2）における果実の肥大成長パターン（図4）

茎部と葉部の分布RC回路の電位差は、35~80日の間を除き栄養素取り込み回路を組み込まない場合(1)と同様に上位葉部>上位茎部>下位葉部>下位茎部の順であったが、(1)のように一定値に収束することはなく、波が見られた。いずれの葉部も茎部もいったん電位が低下する。下位の茎部では30日目頃、

上位の莖部で 40 日目頃、下位の葉部で 50 日目頃、上位の葉部で 160 日目頃に最も低下し、その後徐々に回復する。果実部の分布 RC 回路の電位差は 40 日目頃まで増加した後、微増を続け、170 日以降徐々に低下するパターンが見られた。

Sun ら⁷⁾はトマトの生長（莖、葉、果実の重さ）を実際に測定して、莖、葉、果実の生重量比（分布指数）の推移を算出している（図 5）。それによれば 莖分布指数は積算温度の増加とともに減少した。葉分布指数ははじめ増加し、次に 積算温度の増加に伴って減少し、トマトの成熟の段階の終わりに最も低くなった。（開花期後の）果実分布指数は積算温度の増加とともに増加し、成熟段階の終わりに最高となった。本シミュレーションは Sun らの測定条件に沿ったものではないので比較することは困難であるが、果実が急速に肥大した後、成熟段階に切り替わるあたりで莖部と下位葉部が最も低下する傾向は似ているように思われる。ただし、上位葉部については検討が必要である。

(3) トマト果実の肥大実測値（Almanza-Merchán らの文献⁸⁾）とのパターン比較（図 5）

Almanza-Merchán ら⁸⁾はトマト果実の生長を計測している。この実測データ（果実の新鮮重、乾物重）と本シミュレーション結果（果実部の分布 RC 回路の電位差）を比較した。実測値では開花後の暖房デグリーデーを横軸にとっていたが、10 デグリーデーが本シミュレーションの 1 日とほぼ対応していた。本シミュレーションは定性的なものであるため、便宜的に 550 デグリーデー（開花から 55 日後）において実測もシミュレーションも果実の肥大生長が最大に達すると仮定して、Almanza-Merchán らの図にシミュレーション結果を追記した（図 5）。

Almanza-Merchán らの実測では 550 デグリーデー以降のデータはなく、それまでの比較であるが、新鮮重、乾物重については栄養素取り込み回路を組み込んだ場合も組み込まなかった場合も実測値の方が S 字生育曲線の立ち上がり

急であった。この違いはモデルの定量的な考察も含めて検討を要する。

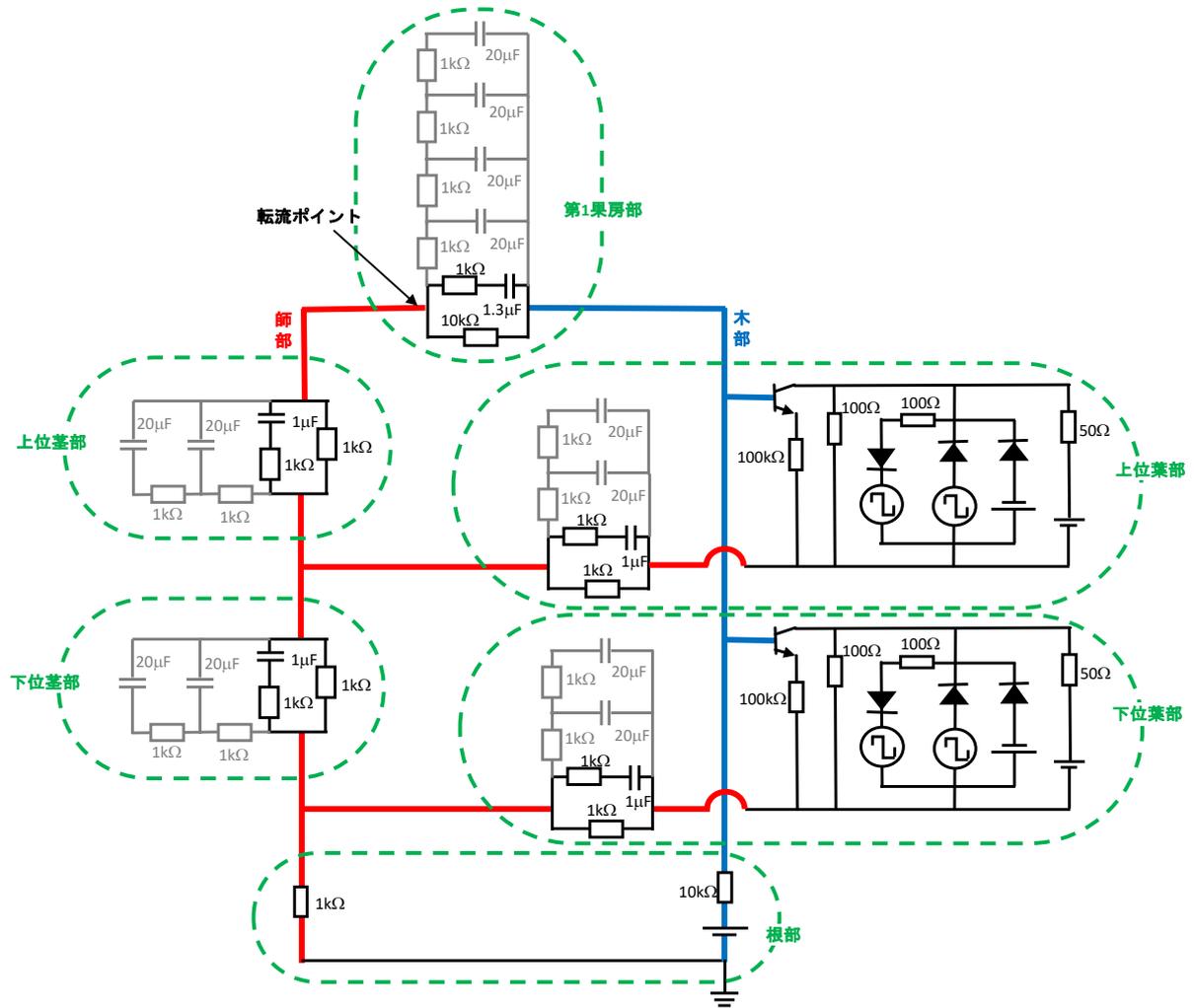


図 1. 貯蔵・肥大を含む植物体の電氣的等価回路モデル

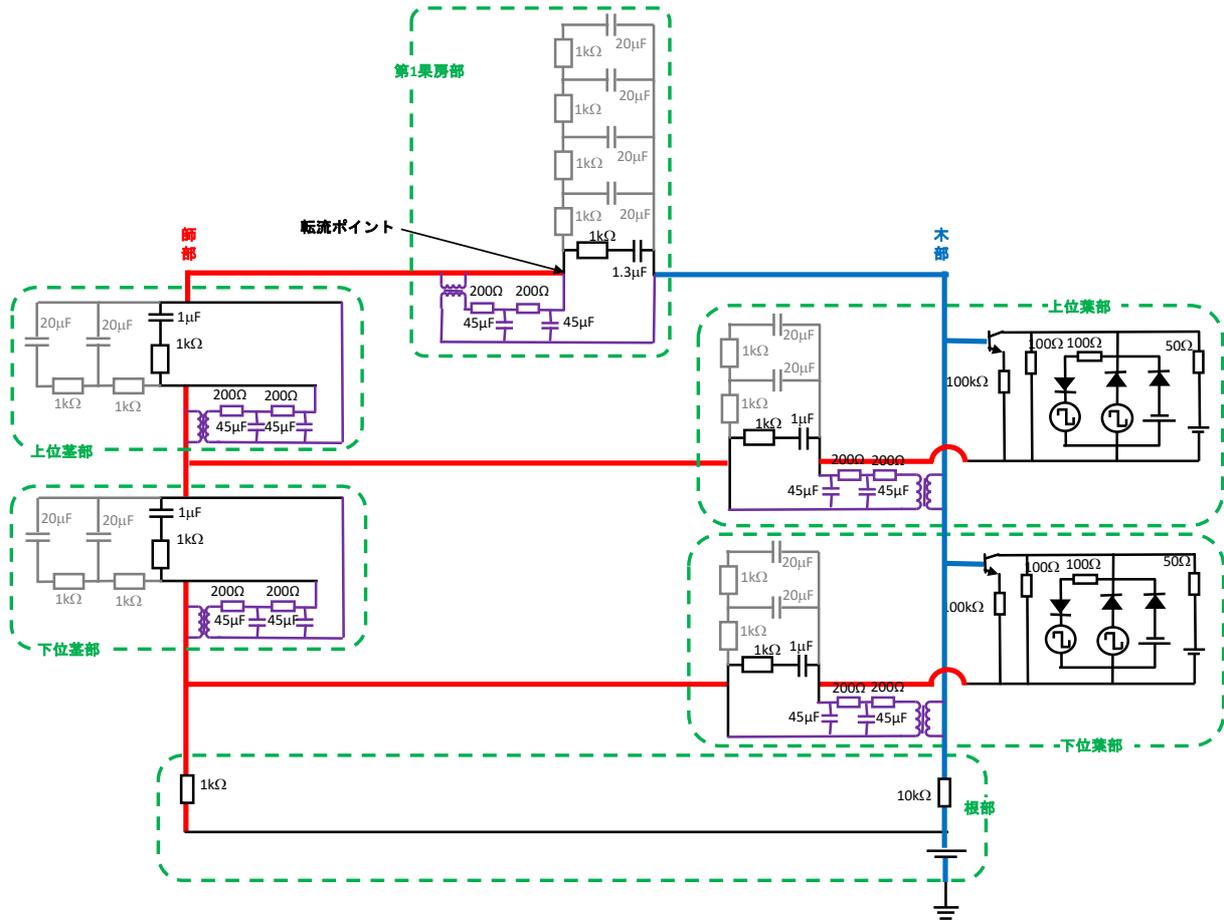


図 2. 貯蔵・肥大および栄養素取り込み回路を含む植物体の電氣的等価回路モデル

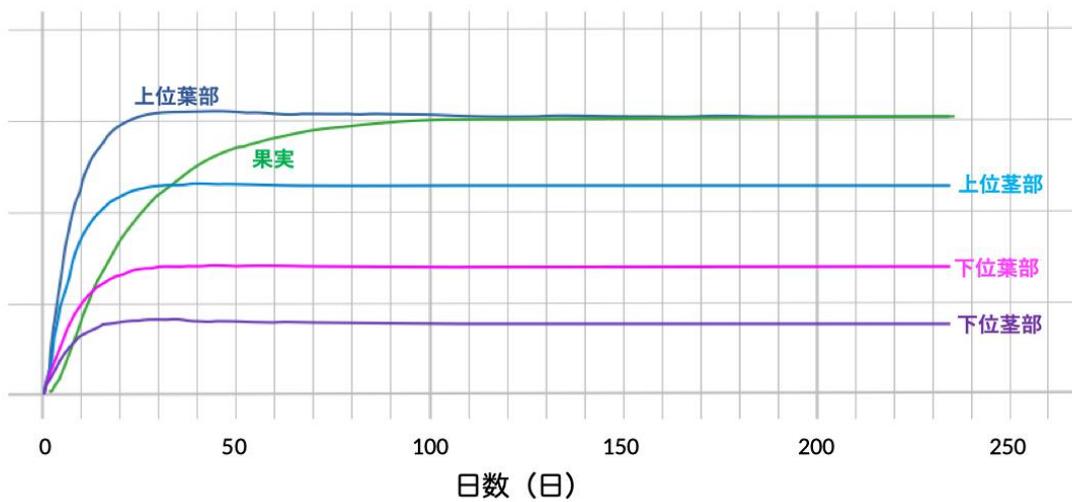


図 3. 栄養素の取り込みを考慮しないモデルにおける果実の肥大成長と葉部茎部の貯蔵成長パターン

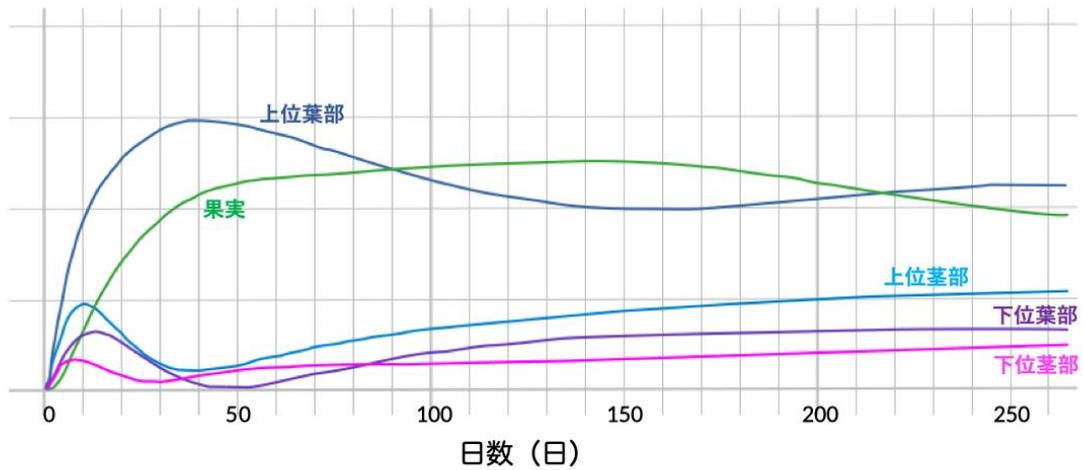


図 4. 栄養素の取り込みを考慮したモデルにおける果実の肥大成長と葉部茎部の貯蔵成長パターン

1034 S. SUN ET AL.

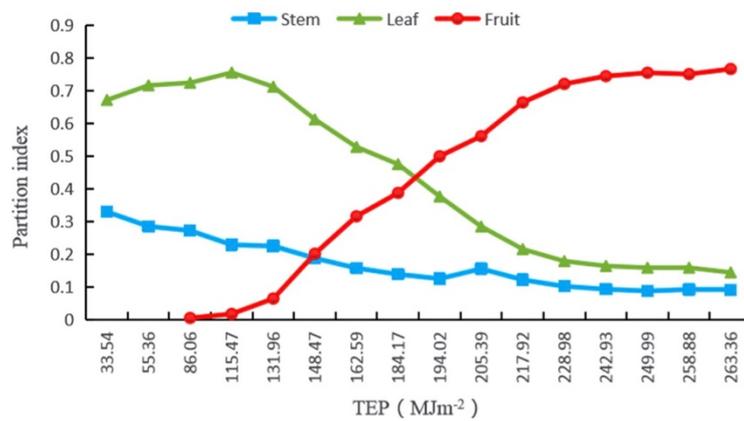


Figure 8. Relationship between the fresh weight distribution index and the TEP of the aboveground parts (stems, leaves, and fruits) of greenhouse tomato in 2016.

図 5. Sun らによるトマトの茎、葉、果実の生重量比（分布指数）の推移⁷⁾（転記）

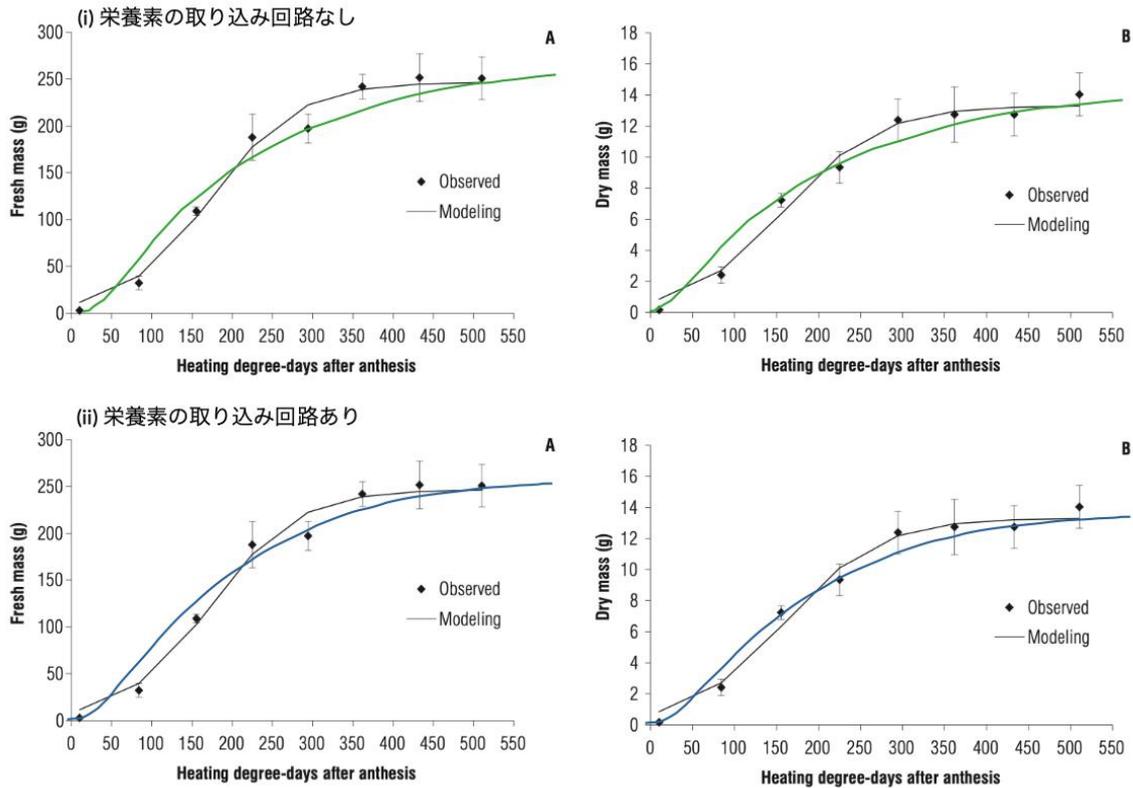


図 6. Almanza-Mercáhn らによるトマト果実肥大の重量実測値⁸⁾とのパターン比較

- (i) 栄養素の取り込み回路がない結果を緑で表示。
 - (ii) 栄養素の取り込み回路がある結果を青で表示。
- A: 果実の生鮮重、B: 果実の乾物重

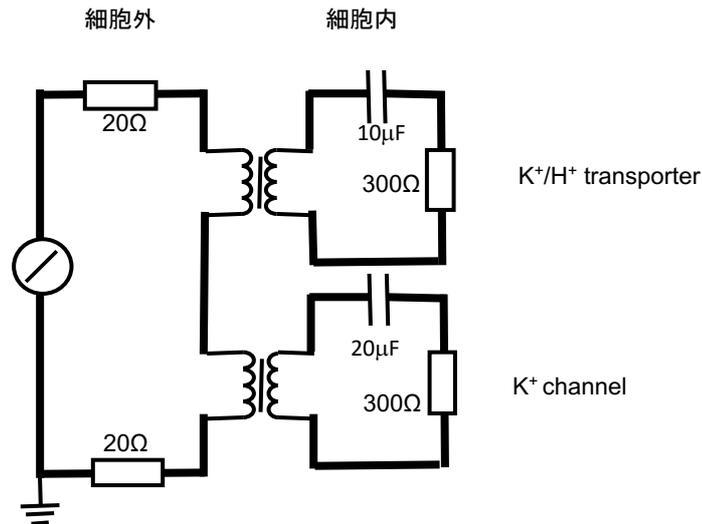
附：主要栄養素の取り込み回路について

栄養の取り込みはさまざまなメカニズムで構成される複雑なシステムであるが、ここでは代表的な栄養素のひとつであるカリウムを吸収する K^+ チャネルとプロトン共役 K^+ トランスポーターによる輸送機構から単純な電気回路モデルを作成した。附図 1 に示したようにインダクターを介した類似の 2 回路をそれぞれ K^+ チャネルによる輸送とプロトン共役 K^+ トランスポーターによる輸送に見立てた。この 2 つの回路は同型でありコンデンサの静電容量の数値のみ異なる。

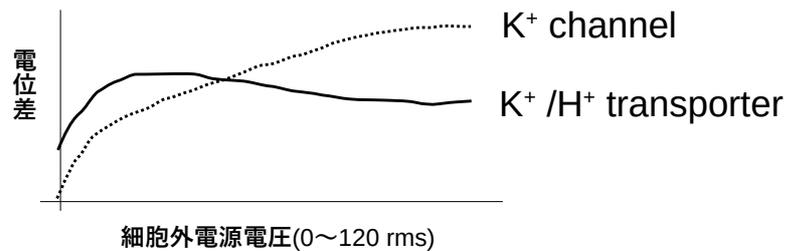
シミュレーション結果を附図 2 にプロットした。Dreyer と Michard⁸⁾によって計測された K^+ チャネルおよびプロトン共役 K^+ トランスポーターによる細胞へ

の流入量のグラフ（附図 3）と比べると、シミュレーションでも、その「高親和性および低親和性」輸送プロセスに似た挙動が得られた。

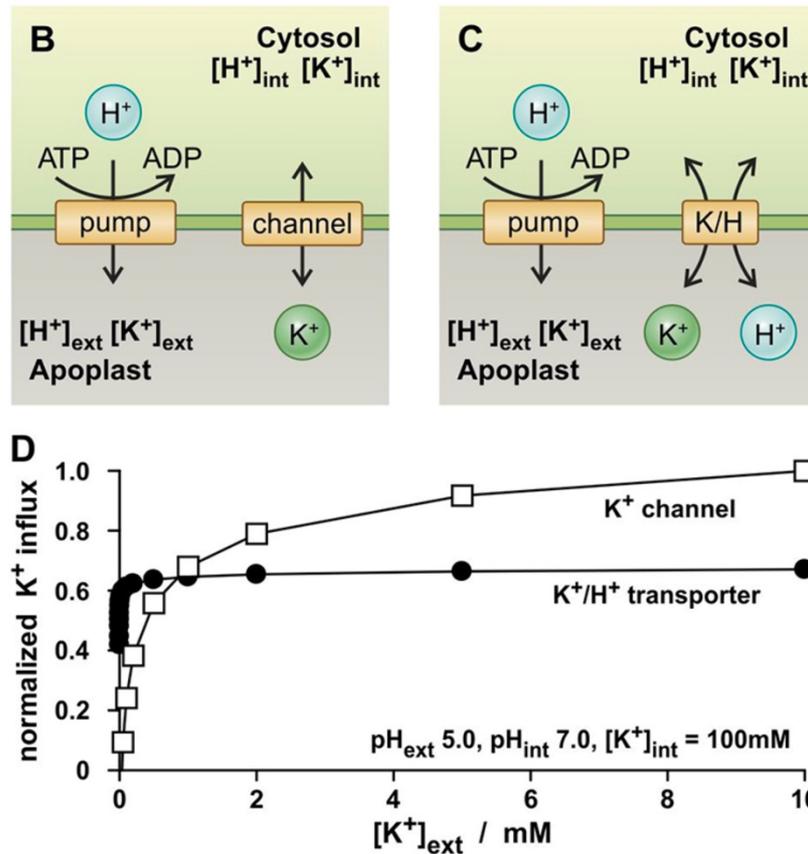
そこで、これを本稿の主要栄養素の取り込み回路とした。なお、植物体モデルではさらに単純化して 2 回路ではなく 1 回路とした。



附図 1. 細胞内への栄養素取り込み回路モデル



附図 2. 細胞内への栄養素取り込み回路モデルのシミュレーション結果



附図 3. Dreyer and Michard による単純な生理学的 K⁺ 取り込み回路⁹⁾ (転記)

B : プロトンポンプと K⁺チャネルによる取り込みモジュールの概略図

C : プロトンポンプと K⁺/H⁺1:1 共輸送体による取り込みモジュールの概略図

D : B, C のモジュールによって取り込まれる K⁺フラックスと外部 K⁺濃度との関係

引用文献 :

- 1) 奥島里美 (2022) 植物体の簡単な電氣的等価回路モデル I ,
<https://doi.org/10.51094/jxiv.128>
- 2) 奥島里美 (2022) 植物体の簡単な電氣的等価回路モデル II -非常に単純なモデルフレームによる光合成の振る舞い-,
<https://doi.org/10.51094/jxiv.141>
- 3) 奥島里美 (2023) 植物体の簡単な電氣的等価回路モデル III -単一果房トマト植物体における光合成産物の転流-,
<https://doi.org/10.51094/jxiv.356>
- 4) 奥島里美 (2023) 植物体の簡単な電氣的等価回路モデル IV -複数果房の植物体における光合成産物の転流-, <https://doi.org/10.51094/jxiv.361>

- 5) 永嶋 浩 (2011) 電気回路で考える経済現象：波形アナロジー，埼玉大学
大学紀要 経営学部篇 11, 145-158.
- 6) Mechthild Tegeder and Céline Masclaux-Daubresse (2018) Source
and sink mechanisms of nitrogen transport and use., *New
Phytologist* 217, 35-53.
- 7) Shaokun Sun, Xiaotong Wang, Jitong Xu, Hongdan Fu & Zhouping Sun
(2021) Study of tomato growth weight-distribution model based on
real-time plant weight in a solar greenhouse, *Journal of Taibah
University for Science*, 15:1, 1027-1037,
<https://doi.org/DOI:10.1080/16583655.2021.2014690>
- 8) Perdo José Almanza-Mercáhn, Yuly Alexandra Arévalo, Germán
Eduardo Cely R., Elberth Hernando Pinzón, and Pablo Antonio
Serrano C. (2016) Fruit growth characterization of the tomato
(*Solanum lycopersicum L.*) hybrid 'Ichiban' grown under cover.,
Agronomía Colombiana 34(2), 155-162.
- 9) Ingo Dreyer and Erwan Michard (2020) High- and Low-Affinity
Transport in Plants from a Thermodynamic Point of View.,
Frontiers in Plant Science 10, 1797(8p).