

SPICE(PCBsim™)による植物の光合成シミュレーション

シグナル工房： www.signalkhobho.com

野田 敦人

SPICE によるシグナルインテグリティ解析や電源解析、基板の温度上昇解析の例をこれまで紹介してきました。他にも機械的な解析を SPICE で行う例などもあります。1996 年に植物の光合成のシミュレーションを SPICE で行った文献[1]を見つけました。そこでこの文献の解析を PCBsim で再現してみました。

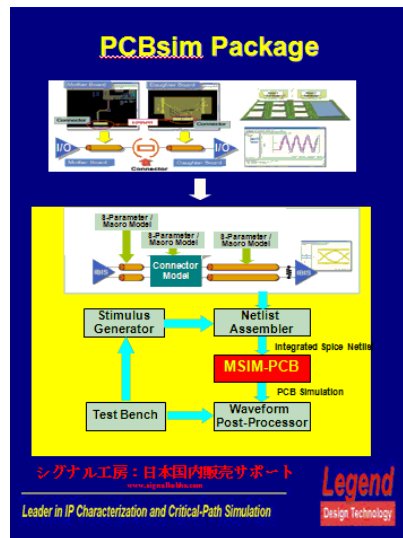


図 1 PCBsim

1) バイオロジカルモデルと電気回路モデル

バイオロジカルモデルと SPICE 電気回路モデルは下のような関係になります。電気回路ではビヘイビアモデルとして使われる電圧制御電流源 (G) や電流制御電圧源 (E) がバイオロジカルモデルでは多用されます。

バイオロジカルモデル		SPICE 電気回路モデル
炭水化物の備蓄 (m^{-2})	=	容量 (C)
炭水化物の含有量 ($mol C m^{-2}$)	=	電圧 (V)
炭素フラックス密度 ($mol C m^{-2} s^{-1}$)	=	電圧制御電流源 (G)
解析用生成関数 ($mol C m^{-2}$)	=	電流制御電圧源 (E)
キルヒホッフの法則用関数 (s)	=	抵抗 (R)

光合成で生成される炭素Cは、図1のようにでんぷん、非可溶性残渣、可溶性中間物に区分（パーティショニング）されます。可溶性中間生成物はスクロース（しょ糖）とソルビトールのどちらかの物質として師部（phloem）を通して搬出されます。この炭水化物の搬出量は Michaelis_Menten の関数（式1）としてモデル化されます。

$$L=L_{max}*(S-S_{min})/(K_m+(S-S_{min})) \quad (式1)$$

ここで S は考慮される全総数の葉中の炭水化物の量です。また S_{min} は搬出されないと予想される炭水化物の量です。L_{max} は最大の搬出量です。そして K_m は Michaelis 定数です。S_{min} はコンパートメンテーションという作用により、葉全体の炭水化物含量の全部は師部に搬出可能でなかったという事実を考慮に入れたものです。

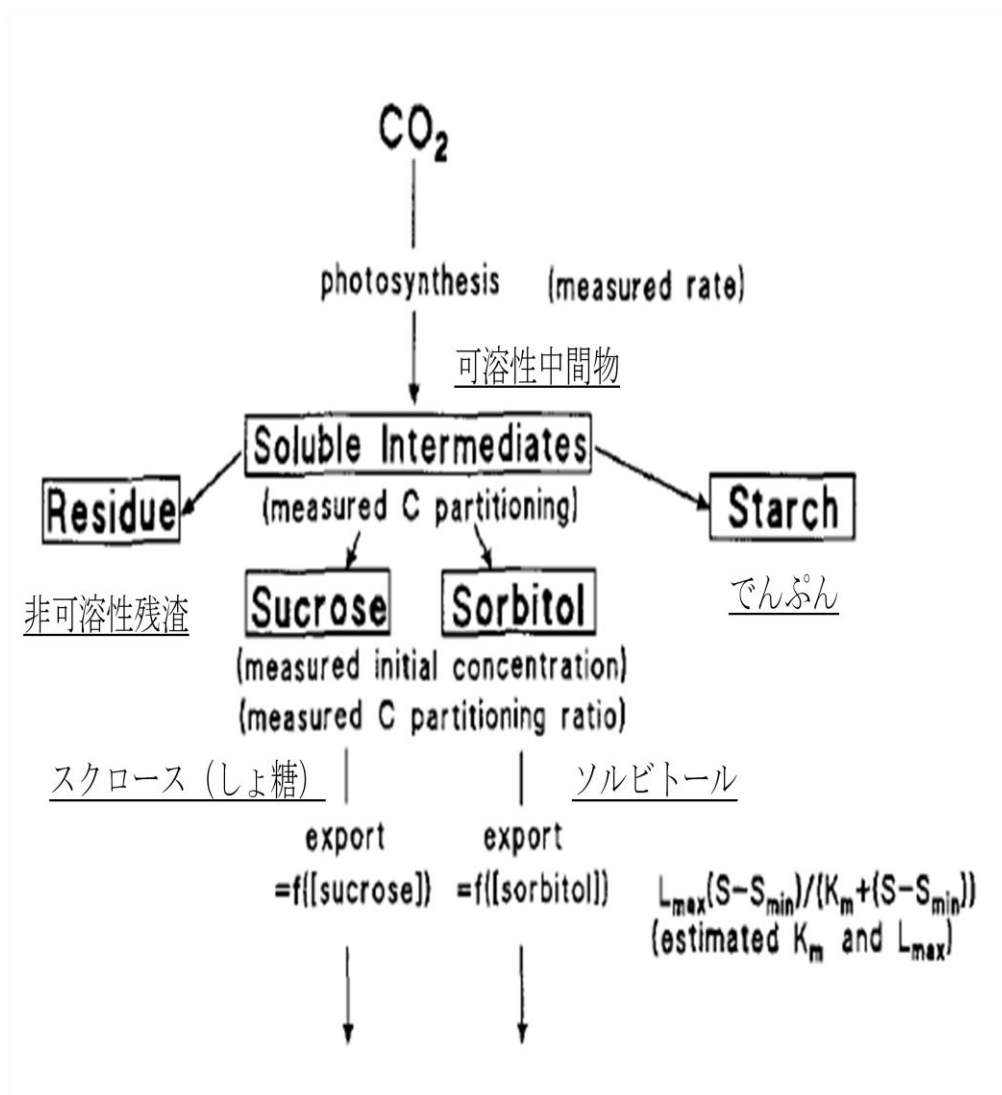


図1 光合成による炭水化物の生成

この光合成の搬出モデルは図2のようなSPICE等価回路として表わすことができます。回路中のそれぞれのデバイスのパラメータはTable-1にまとめられています。

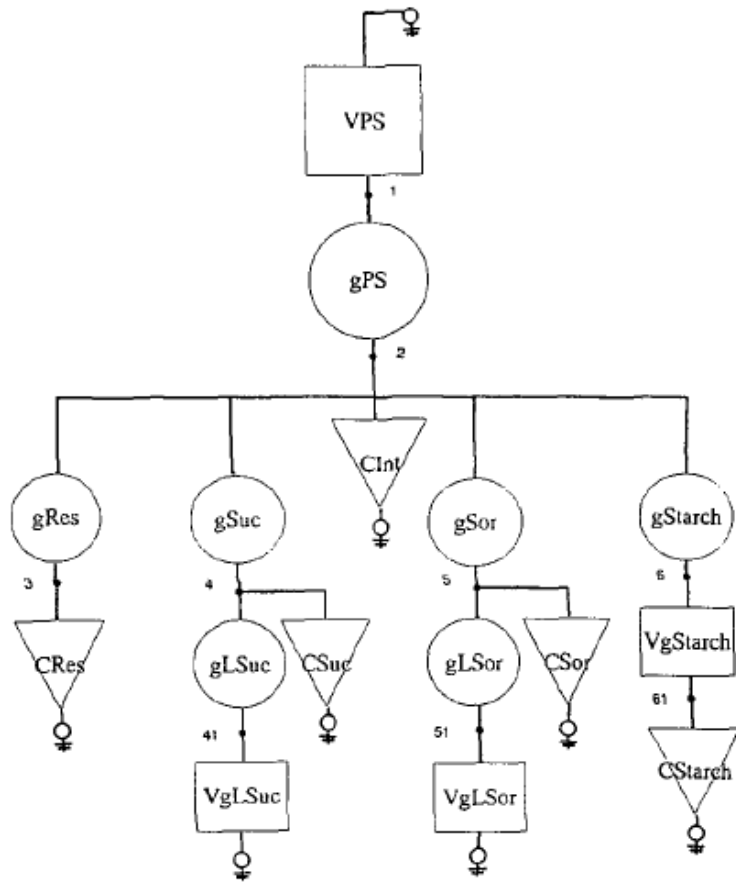


図2 光合成のバイロジカル等価回路

解析は、それぞれ controlled, shaded, girdled の3つの処理条件について行われました。良い解析結果を得るために Km としてスクロース（しょ糖）用には 4 mol m^{-3} 、ソルビトール用には 6.6 mol m^{-3} の値が選択されました。Smin の値は スクロース用には 28 mmol C m^{-2} とソルビトール用には 36 mmol C m^{-2} に設定しました。スクロース（しょ糖）の師部への流入量 Lmax として、controlled, shaded, girdled の処理条件にそれぞれ $3.2, 5.0, 1.2 \mu \text{ mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を設定しました。またソルビトールの師部への流入量 Lmax として、controlled, shaded, girdled の処理条件にそれぞれのために値が $6.4, 6.0, 1.9 \mu \text{ mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の値に設定しました。

----- S P I C E 電気回路のパラメータとデバイス(Table-1)-----

Soluble intermediate pool	可溶性中間物のプール
Insoluble residue pool	非可溶性残渣のプール
Sorbitol pool	ソルビトールのプール
Starch pool	でんぶんのプール
Sucrose pool	スクロース(しょ糖)のプール
Elsuc	V(4) < SminSucの時gLSucを0にする
Elsor	V(5) < SminSorの時gLSorを0にする
Esol	光合成のCのパーティショニングから可溶性化合物の生成
ESorSuc	SUC (スクロース「ショ糖」)のCのパーティショニングからソルビットの生成
gLSor	ソルビットの師部への流入率
gLSuc	SUCの師部への流入率
gps	ネットの光合成の量
gRes	非可溶性残渣への光合成炭素の流入
gSor	ソルビットプールの中への光合成炭素の流入
gStarch	でんぶんへの光合成炭素の流入
gsuc	SUC プールの中への光合成炭素の流入
KSor	Km、ソルビット師部への流入
KSuc	SUC 師部への流入のための KM
LmaxSor	ソルビットの最大の師部への流入率
LmaxSuc	SUC の最大の師部への流入率
pRes	不要残渣中のCの%
pStarch	でんぶん中のCの%
R devices	R デバイスはSPICEをエラーなしに実行させるためのユーティリティでCの流入量には無影響
SminSuc	葉中で Suc の流入が全く起こらない SUC の量
SminSor	葉中でソルビット流入が全く起こらないソルビトール量
VPS	大気中の CO2 の任意のユニットのプール
Vg devices	すべてのデバイスは最初の Vg につながる炭素Cの流入量を電流として測定される
Vt	s時間発生用の電圧源
V(3)	葉中の残渣の量
V(4)	葉中のスクロース(ショ糖)の量
V(5)	葉中のソルビトールの量
V(6)	葉中のデンプンの量
V(70)	時間
V(80)	可溶性化合物へ流入する炭素Cの%
V(81)	ソルビトール/スクロース(しょ糖)中の炭素Cの比率

-----Table-1-----

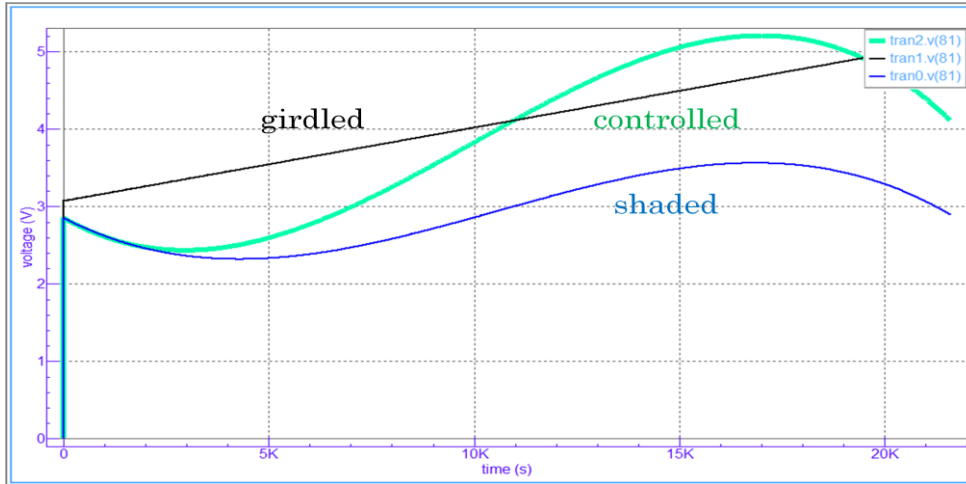


図3 解析結果 V(81)(ソルビトール/スクロース(しょ糖)中の炭素Cの比率)

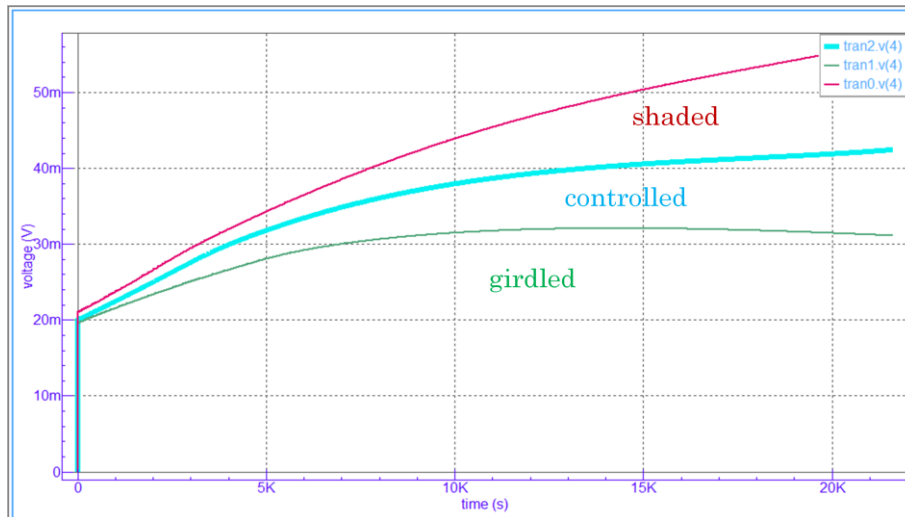


図4 解析結果 V(4)(葉中のスクロース(ショ糖)の量)

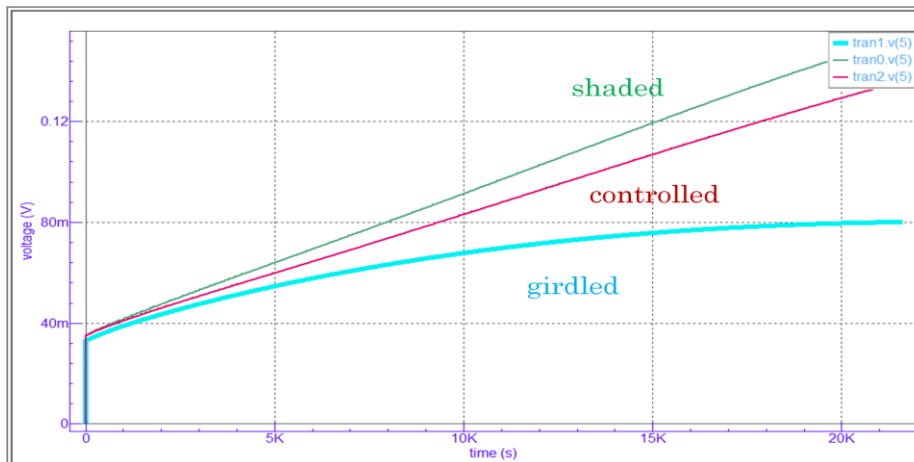


図5 解析結果 V(5)(葉中のソルビトールの量)

参考文献

[1] Modeling Carbon Export Out of Mature Peach Leaves

Annick Moing^{2*}, Abraham Escobar-Cutierrez³, and Jean Pierre Caudillère

Institut National de la Recherche Agronomique, Station de Recherches Fruitières, Centre de Recherches de Bordeaux, BP81 F-33883 Villenave d'Ornon, France (A.M.); and Station de Physiologie Végétale, Centre de Recherches de Bordeaux, BP81 F-33883 Villenave d'Ornon, France (A.E.-G., J.P.C.)

「ネットリストのダウンロード」

シグナル工場の Web (www.signalkhobho.com) で登録していただくところの光合成シミュレーションのネットリストをダウンロードできます。ネットリストは HSPICE™ 互換の MSIM-PCB 用には書かれています。原文に掲載されているネットリストは PSPICE 用ですが、教育用の PSPICE やフリーの LTSPICE では G や E のビヘイビアモデルの Value の値をうまく読み込めませんでした。それぞれの SPICE ツールのフォーマットに合わせて書き換える必要があるでしょう。

注：本資料はあくまでもネットリストのサンプルとして参考にしていただくもので、解析結果の精度についてはシグナル工場では責任を負いかねます。