

森林伐採と環境問題 その2

Richards の式による樹木の成長速度

Environmental Load Evaluation of Deforestation No. 2

Adaptability of Richards' Equation to trees

鈴木 誠二
SEIJI SUZUKI

In these days we often hear that if deforestation is only the felling act, the form to be fixed of the carbon dioxide is maintained, and there is not the outbreak of the carbon dioxide unless we burn it up (carbon dioxide is not released by felling only by fixed form and place of the carbon dioxide changing), or because originally it was in the atmosphere, as for the carbon dioxide, quantity of the atmospheric carbon dioxide does not increase even if we burn wood. However, it is necessary to evaluate degree of the load that it gives in environment that fixed activity of the carbon dioxide due to the tree stops definitely, even if there is not the outbreak of the carbon dioxide by the growth of the tree, and it got a result to increase environmental load to repeat short-term felling. Absorption efficiency of the carbon dioxide due to the tree is good in the opportune time from a period of growth, therefore, we should avoid felling as much as possible at this time. For discussing the effect of felling we have proposed the equation how to estimate the rate of the growth trees, Here we study the adaptability Richards' equation well known for the growth of plants to the growth rate of trees. As a result we could fix it for trees by using the modified constants, and estimate the quantity of carbon dioxide quantitatively according to the growth.

words; Deforestation, Richards' equation, tree growth, growing rate, absorption of carbon dioxide.

はじめに

1997年に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締結国会議（COP3、京都会議）では、先進国及び市場経済移行国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。以来、地球の温暖化問題に対して人類が中長期的にどのように取り組むべきかという道筋が定められた。こうして、自動車業界はガソリン車からハイブリッド車への移行、化石燃料を使用している電力業界は、クリーンな再生エネルギーによる発電、そして、各種の電気部品ではエネルギー消費の効率化など、炭酸ガスの排出量の削減に対して様々な努力がなされてきた。そうした中で、大気中の炭酸ガスの濃度削減に寄与している森林の伐採が問題視されるようになったが、日本では、林野庁の主導で、森林資源の保護、効率的な間伐とその有効利用などがそれなりの成果を上げている。一方、日本では、木造建築が古くから伝統的に実施されており、これに使用される森林資源の量も決して少なくはない。そこで生まれてきたのがカーボンニュートラルという考え方だ。^{1),2),3),4)}

しかしながら、このカーボンニュートラルの中味を考えてみれば、炭酸ガスの濃度についての時間的スパンの考慮が抜けていることは確かだ。建築資材としての利用では、数十年スパンでの話である。しかしながら、炭酸ガス排出の問題は何十年、何百年の時間の問題ではない、現時点での問題なのである。^{5),6)} 森林資源の場合には、炭酸ガスがどのように排出されるかではなく、大気中の炭酸ガスを吸収し、その濃度を如何に下げるかである。従って、森林伐採を抑えることが、その濃度上昇のスピードを下げるという認識だ。つまり、今、われわれがしなければならないのは、文明化とともに急上昇している炭酸ガスの濃度上昇のスピードを押さえることであり、そして、炭酸ガスの濃度を下げるスピードを下げてはいけないということだ。自動車産業で取り組んでいる燃費の向上は前者の問題であり、森林の伐採を抑えることは、後者の問題なのである。

こうした視点にたち、森林資源の保護、ならびに、森林の破壊についてはこれまでも沢山の議論がなされてきた。^{7),8),9),10),11),12),13),14),15)} しかし、問題は、森林資源という観念から議論するだけでは不十分であり、他の産業、さらには、個々の産業行動と関連づけて議論する必要がある。そして、議論をするためには、共通の基盤の上に立つ必要があり、そのひとつの手段が、考える時間的なスパンを合わせることであり、そして、炭酸ガスの濃度の増減については、時間軸をしっかりと設けること

である。このようなことから、我々は、温帯林の1つである天城山のスギ林をモデルとし樹木の成長スピードを数式化し、炭酸ガス吸収による大気中の炭酸ガスの濃度削減を量的に議論できることを明らかにした。

樹木も植物の一種であり、植物の成長速度については、Richards の式が知られている。そこで、樹木の成長についても、さらなる裏づけを理解し、学術的な議論をしていくために、Richards の式の適合性を検討した。樹木の成長について、大隅らが Richards の式の適合性をスギ林を対象に検討したもの¹⁶⁾があるが、そこでは、樹木の成長の尺度を、樹木の樹高、幹の直径、断面積、並びにその体積などを取り上げ、Richards の式に導入されている定数を求めている。しかし、それぞれの成長の対象項目に対して、異なった定数が得られているに過ぎず、樹木の成長を炭酸ガスの吸収に関わるものとして数量的に取り扱うことが出来ない。また、樹木の成長と炭酸ガスの吸収量との関係を論じた研究もされているが、数式化がなされていない。¹⁷⁾

1. 樹木の成長速度

樹木の成長については、炭素固定量についての解析的手法としては、Charlene Watson¹⁸⁾や、Hirsch らの報告¹⁹⁾がある。また、Marhi らは、熱帯雨林、温帯森林、さらに、寒冷地の森林について炭素固定がどのような形でなされているかの詳しい研究をしている。たとえば、その結果は、図-1 に示したような形で、年間の炭素の蓄積量($\text{g/m}^2 \cdot \text{年}$)が数値化されている²⁰⁾。

また、Charlene Watson は、森林の状況により樹木の成長速度がそれぞれ異なること、そして、自然林の場合に、熱帯雨林の成長速度は温暖地域のおよそ2倍であることを指摘している。また、森林吸収源検討会²¹⁾、日本製紙連合会²²⁾、あるいは只木²³⁾によれば、木は、生息する気候帯、樹種によることなく、炭素固定能力が樹齢に応じてある一定の傾向をもって推移すること、そして、熱帯林は、杉林の1.7倍の炭酸ガスを吸収することを確認している。

表-1 炭素固定量から見た森林の成長速度¹⁸⁾

Climate Domain	Ecological Zone	AGB in natural forest (t/ha)	AGB in forest plantation (t/ha)	AGB growth in natural forest (t/ha/yr)	AGB growth in forest plantation (t/ha/yr)
Tropical	Tropical rain forest	300	150	7.0	15.0
	Tropical moist deciduous forest	180	120	5.0	10.0
	Tropical dry forest	130	60	2.4	8.0
	Tropical shrubland	70	30	1.0	5.0
	Tropical mountain systems	140	90	1.0	5.0
Subtropical	Subtropical humid forest	220	140	5.0	10.0
	Subtropical dry forest	130	60	2.4	8.0
	Subtropical steppe	70	30	1.0	5.0
	Subtropical mountain systems	140	90	1.0	5.0
Temperate	Temperate oceanic forest	180	160	4.4	4.4
	Temperate continental forest	120	100	4.0	4.0
	Temperate mountain systems	100	100	3.0	3.0
Boreal	Boreal coniferous forest	50	40	1.0	1.0
	Boreal tundra woodland	15	15	0.4	0.4
	Boreal mountain systems	30	30	1.0	1.0

source IPCC, 2006

k_1 : 成長期の炭酸ガス固定速度定数
 k_2 : 成長期の炭酸ガス固定速度定数
 t : 経過年数

である。ただし、樹木の成長は、樹木が発芽してから暫くの間は、成長が非常にゆっくりであり、この期間は、成長の準備期間であると考えられ、成長期のスピードとは異なる。そこで、この期間は、 $C_f = C_i$ となり、次式により成長するものとした。

$$C_i = A * K * e^{k_0 * t * \frac{10}{T_i}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

A : 樹林に特有の定数
 K : 樹林地帯に特有の定数
 T_i : 成長期までの年数
 k_0 : 幼年期の炭酸ガス固定速度定数

で表される。これが鈴木 の提案した数式である。

これに対し、植物の成長を表現した式としてよく知られたものに **Richards** の式と言うものがある。**Richards** の式を植物の成長について適用する場合には、問題となるのは成長の度合いを求める尺度だ。先に述べたように、樹木の高さ、幹の太さなどを成長の程度として測定した報告があるが、炭酸ガスの量として、把握している報告はない。森林の炭酸ガスの固定量も、これが成長に関わるものであるので、この式が適用できると考え、この式を用いて森林の炭酸ガス固定量を表現した。

$$Y(t) = A + \frac{K - A}{(1 + Qe^{-B(t-M)})^{1/\nu}} \dots\dots\dots(5)$$

Richards の式中の定数の解釈

ここで、 A は、幼年期の漸近線値で在り、 0 である。
 K は、成長の限界を示すものであるが、成長限界までの許容能力として、マイナスで表現されている。
 B は、成長期の成長速度
 Q は、成長初期の速度に関するもの
 ν は、成長初期の速度に関するもの
 M は、成長期立ち上がりまでの期間
 と理解される。
 炭酸ガスの固定量の限界は K により、固定の速度は B で把握することができる。

2.2 杉林の場合

Richards'の式における樹木の成長の程度を表すデータとして、樹木の成長にともなう具体的な炭酸ガス吸収量が考察された天城地方の杉林での観測値を採用した。

ここでは、一本の樹木についての炭素固定量を算出する方法として次のようなものを採用している。

$Total-C = V \times K_b \times C_c$
 但し、
 $Total-C$: 1本の木が貯蔵している炭素の量[ton-炭素]

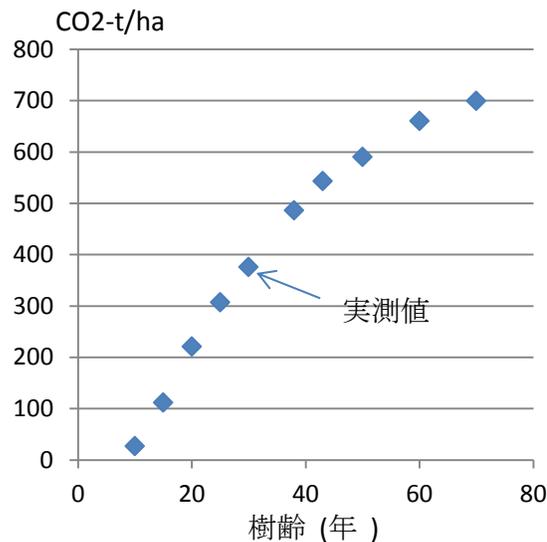
- V : 体積 x バイオマス係数 x 炭素含有率
 Kb : バイオマス係数
 (幹体積を木全体の乾燥重量に換算する係数
 針葉樹=0.5970、広葉樹=0.8443
 Cc : 炭素含有率 (=0.5)

このようにして得られた値を表一2に示した。

計算に必要なそれぞれの定数は、森林の炭酸ガスの固定量が実測された天城山のスギ²⁾のデータをもとに求めた。ただし、ここでは、炭酸ガスの量として、1本の木辺りではなく、スギ林の広さの本数辺りとして、t/haで表されている。この炭酸ガス量に換算した累積結果を表一2に示した。

表一2 森林における炭素固定量の推移 天城地方スギ林

林令(年)	主材木 幹材質	副材木 幹材質	幹材質合計(m ³)	炭酸ガス 換算 累積(t/ha)
10	18.8	0	18.8	26.44
15	74	5.4	79.4	111.68
20	137.8	18.9	156.7	220.4
25	195.8	22.4	218.2	306.91
30	244	23.1	267.1	375.69
35	287.3	20	307.3	432.23
40	328	19.4	347.4	488.63
45				
50	397.5	22.4	419.9	590.18
55				
60	450	19.2	469.2	659.95



図一2 天城地方スギ林の炭素固定量の推移

これを、樹木の炭酸ガスの吸収量として表現すると図一2のようになる。そこで、この図に適合するような(5)式で表現される各変数に伴う定数を、数学的手法である Runge-Kuta method により求める。

Richards の式で、定数 A の値は、ゼロであり、K の値は、成長の限界であるので、炭酸ガスの累積蓄積量の上限となる。ただし、ここで求めているものは、成長の度合いであるので、その値は、大気中の炭酸ガスの削減量となり、従って、マイナス値とする。スギ林の場合、60 年後で 660 トン/ha であるので、その値を -700 とした。また、成長までの幼年期は、10 年とした。ちなみに、夫々の定数の値をいろいろと変えて、成長カーブの整合性を検討した。ここで、適用した値の代表的なものを表-3 に示す。

表-3 Richards の式の定数

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7
A	0	0	0	0	0	0	0
K	-700	-700	-700	-700	-700	-700	-700
B	0.075	0.07	0.1	0.07	0.075	0.07	0.075
Q	0.15	0.065	0.065	0.08	0.065	0.05	0.065
v	0.05	0.025	0.025	0.025	0.03	0.01	0.01
M	10	10	10	10	10	10	0

Case 2 から case 7 の値を導入した場合の Richards の式から得られた成長の状況を示すカーブを図-3 に示す。ここで、夫々の定数を変化させていくと、このカーブが変化する (図-3) が、この状況から、

- B については、上昇カーブ
- Q については、カーブの立ち上がりの鋭さ
- v については、カーブの傾き

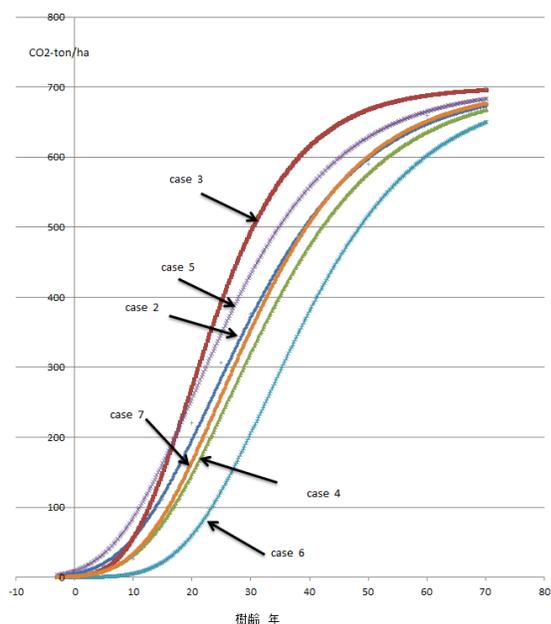


図-3 様々な定数の値を入れた時の、Richards の式から得られる成長曲線

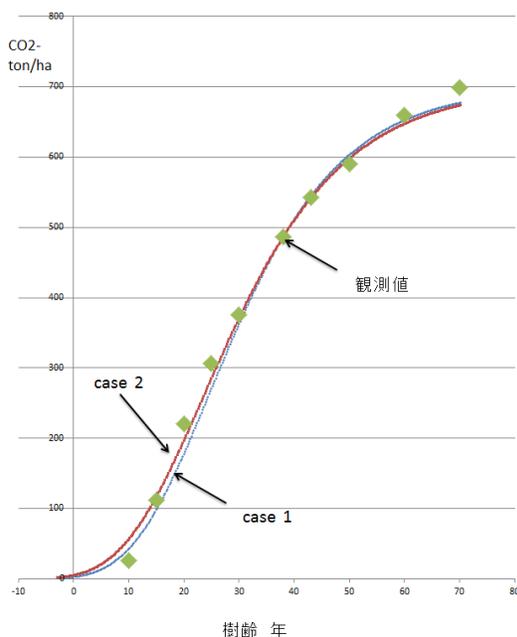


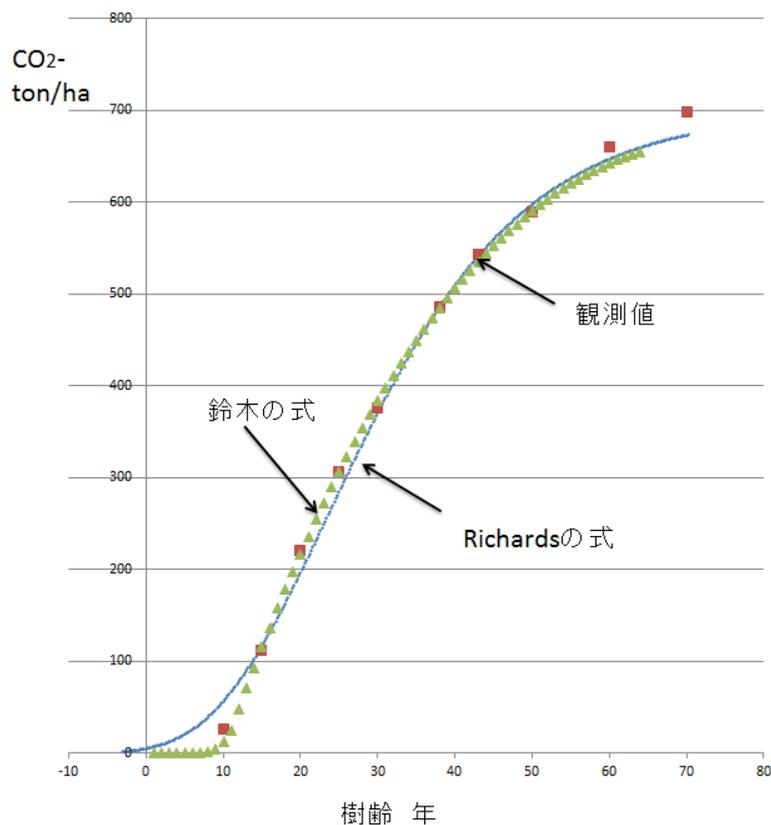
図-4 case 1,2 の定数の値を入れた時の、Richards の式から得られる成長曲線

に関するものであることが分かる。

Richards の式の各定数については、式を偏微分し、実際の観測値にあわせて、その数値を求めることができるが、ここでは、こうした考察から、実際に観測されたスギ林の吸収した炭酸ガスの量の観測値に合致するように 様々な B 、 Q 、 ν の値を代入させていく。その結果、case1、もしくは、case 2 のような数値を用いたときに、実際の観測値にかなり合致するような成長の度合を示す曲線が得られた。(図—4) 以後、便宜上 case 2 で得られたものを Richards の式から得られた成長曲線とする。

2.3 得られた成長曲線の比較

こうした得られたスギ林の成長曲線について、鈴木の式から得られたものと比較したものが図—5 である。



図—5 Richards の式と鈴木の式との成長曲線の比較

両者とも、観測から得られた値と非常によく一致している。とりわけ成長期（10年～50年）に関しては、ほぼ一致している。ただし、幼年期については、鈴木式では、この時期に別の式を用いている。こうしたことから、この時期における正確性という点においては、鈴木式の方が適当といえる。しかしながら、樹木の一生という観点からすれば、Richards の式が項目が少なく、簡潔であるので、この式を当てはめるほうが各変数の意味を植物学的に理解するには容易であると考えられる。従って、今後、樹木の成長を議論の対象とするときにはこの式を使用することが妥当とい

える。

3 まとめ

先に鈴木は、樹木の成長速度について、樹木の代表として、炭酸ガスの固定量の観測値に実績のある天城地方スギ林をモデルとして選択し、この数式化を検討した。樹木の成長は、炭酸同化作用であることを念頭に、その成長速度が大気中の炭酸ガスの吸収によるものであると仮定し、その律速段階は、炭酸ガスの吸着反応であると考え、Langmuirの吸着式に従い、樹木の成長をあらわす尺度として炭酸ガスの固定量を求めた。このようにして、老齢期に入ると誤差はあるものの、成長期においては観測値と非常によい一致をしている式を提案した。この報告では、この樹木の成長によく適合するといわれているRichardsの式を当てはめ、そこに表現されているそれぞれの定数を求めた。ここでは、炭酸ガスの吸収量を樹木の成長の尺度としているので、個々の樹木については、夫々の定数は異なるものと思われるが、このような形で樹木の成長を数式化することは、樹木がもつ炭酸ガスの吸収による大気中の炭酸ガスの濃度を削減する機能を論ずる上で極めて重要であるし、今後、森林伐採を議論するうえで多に役立つものと思われる。

文献

- 1) カーボンニュートラルについて 環境庁 www.env.go.jp/earth/ondanka/.../carbon.../ref03-5.pdf
- 2) 環境省 [カーボン・ニュートラル等によるオフセット活性化検討会について](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/carbon_offset/conf4.html)
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/carbon_offset/conf4.html
- 3) カーボン・オフセットとは http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/carbon_offset/cn-cs.html
- 4) カーボン・ニュートラルとは、森林学習館 www.shinrin-ringyou.com/carbon/carbon_n.php
- 5) 地球の自然環境問題 <http://eco.macanow.com/air/index.html>
- 6) 発電量ナビ <http://www.hatsudenryou-navi.com/expression/carbon-neutral.html>
- 7) Keneth J. Feeley, S.Joseph Wright, M.N.Nur Supardi, Abd Rahman Kassim and Stuart J. Davies Decelerating growth in tropical forest trees; *Ecology Letters*, (2007) 10: 451-469
- 8) How to calculate the amount of CO₂ sequestered in a tree per year
- 9) Nathan G. Phillips, Thomas N. Buckley and David T.Tissue; Capacity of Old Trees to Respond to Environmental Change, *Journal of Integrative Plant Biology* 2008, 50(11): 1355-1364
- 10) Pieter A. Zuidema The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species :Predicting timber yield
- 11) Robert Wieland and Dr. Donald E. Strecbel Valuing Timber and Carbon Sequestration in Maryland Using MD-Gord
- 12) Wiliam F. Laurance, Henrique E.M. Nascimento, Susan G.Laurance, Richard Condit, Sammya D'Angelo, Ana Andrade Inferred longevity of Amasonian rainforest trees based on a long -term demographic study *Forest Ecology and Management* 190 (2004) 131-143
- 13) Y. Malhi, D.D. Baldocchi & P.G. Jarvis *Plant, Cell and Environment* (1999) 22, 715-740
- 14) Simon L.Lewis, Tropical forests and the changing earth system; *Phnil. Trans. R. Soc. B* (2006) 361, 195-210
- 15) Christian Cossalter and Charlie Pye-Smith; 大田 精一、藤間 剛監訳「早生樹林業」
Center for International Forestry Research
- 16) 大隅真一・石川善朗、樹木の生長解析に対するRichards生長関数の適用性について、京都府立大学学術報告.農学 35号 49 (1983)
- 17) 家原ら、独立法人森林総合研究所報告 I-31 (平成 20)
- 18) Charlene Watson, “Forest Carbon Accounting: Overview & Principles”UNDP 2009
- 19) A.I.Hirsch ら、“The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amason; analysis using a process-based model”, *Global Change Biology* (2004) 10, p908~
- 20) Y. Malhi et.al. “The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests”, *Plant, Cell and Environment* (1999), 22, 715-740
- 21) 森林吸収源検討会 「森づくりにおける森林吸収源・生物多様性など評価基準」平成 21 年 12 月
- 22) 日本製紙連合会 「マレーシア国サラワク州におけるパルプ用材植林敵地調査報告書」平成 20 年 3 月
- 23) 只木良也 「森の生態」(1971) (生態学への招待) 共立出版

(2018. 5. 10)