慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	植物原料と炭素中立性
Sub Title	Plant raw materials and carbon neutrality
Author	大沼, あゆみ(Onuma, Ayumi) 鈴岡, 章黄(Suzuoka, Akihiro)
Publisher	慶應義塾経済学会
Publication year	2007
Jtitle	三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.100, No.2 (2007. 7) ,p.495(59)- 505(69)
JaLC DOI	10.14991/001.20070701-0059
Abstract	本論は, 植物原料の炭素中立性について考察するものである。植物の栽培・ 伐採のプロセスで大気中に残存する二酸化炭素量の基準として平均増加量という概念を導入し, 定式化を試み, 考察する。植物原料を栽培・ 伐採するサイクルで, 大気中に残存する平均CO2量は, 森林を伐採して栽培した場合でも, 植物のない場所に栽培した場合でも, 決してゼロにはならないことを示す。さらに, 財のリサイクルやライフサイクル面でのCO2排出を考慮した基準を提示し, 植物原料が炭素中立的であるための必要条件を導く。 This study observes the carbon neutrality of plant material. We introduce, formulate, and observe the concept of the average increase in carbon dioxide volume, using the volume of carbon dioxide remaining in the atmosphere as created in the process of cultivation and harvesting of plants as the standard. Moreover, this study shows that in the cycle of cultivation and harvesting of plant material, the average volume of CO2 remaining in the atmosphere, even if it is from deforestation and subsequent cultivation, or when it is cultivated in a location without plants, will never be zero. Furthermore, this study presents a standard for recycling and the lifecycle of goods in relation to CO2 emissions, leading to the necessary conditions for plant material to become carbon neutral.
Notes	論説
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20070701-0059

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

植物原料と炭素中立性

Plant Raw Materials and Carbon Neutrality

大沼 あゆみ(Ayumi Onuma)
鈴岡 章黄(Akihiro Suzuoka)

本論は，植物原料の炭素中立性について考察するものである。植物の栽培・伐採のプロセスで大気中に残存する二酸化炭素量の基準として平均増加量という概念を導入し，定式化を試み，考察する。植物原料を栽培・伐採するサイクルで，大気中に残存する平均 CO2 量は，森林を伐採して栽培した場合でも，植物のない場所に栽培した場合でも，決してゼロにはならないことを示す。さらに，財のリサイクルやライフサイクル面での CO2 排出を考慮した基準を提示し，植物原料が炭素中立的であるための必要条件を導く。

Abstract

This study observes the carbon neutrality of plant material. We introduce, formulate, and observe the concept of the average increase in carbon dioxide volume, using the volume of carbon dioxide remaining in the atmosphere as created in the process of cultivation and harvesting of plants as the standard. Moreover, this study shows that in the cycle of cultivation and harvesting of plant material, the average volume of CO2 remaining in the atmosphere, even if it is from deforestation and subsequent cultivation, or when it is cultivated in a location without plants, will never be zero. Furthermore, this study presents a standard for recycling and the lifecycle of goods in relation to CO2 emissions, leading to the necessary conditions for plant material to become carbon neutral.

「三田学会雑誌」100 巻 2 号（2007 年 7 月）

植物原料と炭素中立性*

大　沼　あゆみ
鈴　岡　章　黄

要　　旨

本論は，植物原料の炭素中立性について考察するものである。植物の栽培・伐採のプロセスで大気中に残存する二酸化炭素量の基準として平均増加量という概念を導入し，定式化を試み，考察する。植物原料を栽培・伐採するサイクルで，大気中に残存する平均 CO_2 量は，森林を伐採して栽培した場合でも，植物のない場所に栽培した場合でも，決してゼロにはならないことを示す。さらに，財のリサイクルやライフサイクル面での CO_2 排出を考慮した基準を提示し，植物原料が炭素中立的であるための必要条件を導く。

キーワード

植物原料，炭素中立性，平均二酸化炭素増加量，ライフサイクル・アセスメント

1.　はじめに

植物原料は，カーボン・ニュートラル（炭素中立）であるという一般的な認識がある[(1)]。これは，原料として伐採した植物を利用して燃焼させ二酸化炭素（CO_2）を放出しても，放出された炭素は，再度栽培することで吸収されるからである。たとえばプラスチックの場合，石油原料で製造されたものならば，燃焼させて放出された炭素は大気中に留まるが，植物原料の場合は，放出炭素は新たな原料の育成過程で吸収される。

しかし，こうした単純な理解は，はたして正しいのであろうか。製造過程で廃棄した不要な部分や，植物原料で製造された財を，消費後に廃棄・燃焼させるとき，CO_2 は一瞬にして大気中に放出される。しかし，それがすべて吸収されるまでには一定の時間がかかる。すなわち，最終的に炭素が吸収されるまで，放出された炭素は大気中で温室効果ガスとして働き続ける，ということになる。一方で，植物の存在していなかった土地に原料を栽培し利用した場合は，栽培過程では，大気中の CO_2 を吸収し続け，放出した時点でのみ，栽培していない場合と大気中の炭素量が一致する。この

＊　本論の作成にあたって，三枝信子氏（産業技術総合研究所），彦坂幸毅氏（東北大学），坂上紳氏（慶應義塾大学）および本誌のチェッカーの方より非常に貴重なご教示とコメントを頂戴した。ここに感謝を申し上げる。

（1）　たとえば，金子・吉岡（2006）を参照せよ。

観点に立って，植物の栽培・伐採のプロセスで，一定期間大気中に残存する（あるいは大気中から吸収される）CO_2 量の基準として平均増加量という概念を導入し，定式化を試み，考察するのが本論の 1 つの目的である。

もう 1 つの考察は，財生産プロセスでの CO_2 排出を加え，さらに消費後のリサイクルの側面も加えた場合，どのように CO_2 排出を評価するのか，という点である。これを明確に定めることができれば，他の原料・生産方式で産出される財との，CO_2 排出量の点での比較が可能となる。

本論では，植物原料を栽培・伐採するサイクルで，大気中に残存する平均 CO_2 量は，森林を伐採して栽培した場合でも，植物のない場所に栽培した場合でも，決してゼロにはならないことを示す。前者は，正であり，後者は負となる。さらに，一定量の原料を供給しようとするとき，少ない量を多い回数で栽培する方が，平均増加量の絶対値は小さくなることが示される。したがって，森林を伐採して栽培した場合は，回数を多くするほど，また，植物のない場所に栽培した場合は，一回ですべての量を栽培することが，地球温暖化緩和の観点からは好ましいことになる。さらに，本論では，経済学的に最適な栽培回数を考察している。

また，この平均 CO_2 量を，定常状態の概念からフロー量に変換し，財を生産する過程で排出される CO_2 量を定式化する。第 2 節では，モデルを定式化する。第 3 節では，平均 CO_2 増加量をモデルをもとにして導出する。第 4 節では，財のライフサイクルで発生する CO_2 量に平均 CO_2 増加量をフロー化して加え，他の財との比較評価の基準を提示する。最後に，結論を述べる。

2. モデル

植物を栽培し，伐採して原料として使える部位を取り出して，さらに原料に加工するためのエネルギーと必要物質を付加して，原料を作成することを考える。このときの，植物栽培によって吸収・固定化される炭素量に着目してモデル化を行う。

今，原材料としての需要量が D だけある植物を考える。この需要を満たすために，生産者は植物を植える。この植物は，簡単化のため，季節によらず栽培でき，栽培したあと時間 T で伐採するものとする。栽培後 t の植物の重さは $W(t)$ で表される。ここで，$W'(t) > 0$ $(t \in [0, T])$ である。なお，$W(0) = 0$ である。さらに，この栽培・伐採のプロセスを無限に続けるものとする。

植物は，生育する過程で二酸化炭素を吸収する。時間当たりの吸収量 $a(t)$ は，植物の重量の増加分に比例するものとする。[(2)] したがって，

---

(2)　植物の二酸化炭素の放出・吸収には，光合成だけではなく，土壌からの炭素放出面も考慮する必要がある。本論では，この側面は考慮していない。土壌からの放出による森林再生過程での，森林の二酸化炭素純吸収量については，たとえば，Thornton et al.（2002）および Amiro et al.（2006）を参照のこと。

$$a(t) = sW'(t) \tag{1}$$

で表される。よって，植物が生育し終わるまでに吸収される CO_2 は，

$$\int_0^T a(t)dt = s(W(T) - W(0)) = sW(T) \tag{2}$$

となる。この CO_2 は，伐採されると同時に放出されるものとする。植物は収穫されると，葉・根の部分は原料にならないためただちに焼却され，幹の部分のみが用いられる。幹の部分は，現実には原料に加工された後，最終商品として使われ，その後廃棄・焼却されるのであるが，簡単化のためにこのタイムラグを考えないものとする。伐採されると同時に栽培を行う方法をとれば，放出された CO_2 量 $sDW(T)$ が完全に吸収されるのには，時間 T だけかかることになる。つまり，放出された CO_2 は時間 T が経過しないと栽培植物に完全に吸収されず，大気中に残ることになる。

つぎに，期間 T でこの植物を N 回に分けて栽培するとする。したがって，一回の栽培量は D/N となるため，伐採時の放出量は，

$$\frac{sDW(T)}{N} \tag{3}$$

となる。また，栽培・伐採のサイクルは T/N である。

この栽培方法において，時点 T に存在している植物には，栽培された時間に従って N 種類のタイプがある。それぞれの重量は，

$$(\frac{DW(0)}{N}, \frac{W(T/N)}{N}, \frac{DW(2T/N)}{N}, \cdots, \frac{DW((N-1)T/N)}{N}) \tag{4}$$

と表される。これらが，1 サイクル（時間の長さが T/N）で吸収する CO_2 量は，

$$\begin{aligned} & \frac{D}{N}(s\int_0^{T/N} W'(t)dt + s\int_{T/N}^{2T/N} W'(t)dt \\ & + \cdots + s\int_{(N-1)T/N}^{T} W'(t)dt) \\ = & \frac{sD}{N}(W(T) - W(0)) \\ = & \frac{sDW(T)}{N} \end{aligned} \tag{5}$$

である。$W(T)$ まで生育した植物が伐採され放出された CO_2 量は，1 サイクルですべて吸収されることになることが確認される。

3. 平均 CO_2 増加量

つぎに，以上の栽培・伐採サイクルにより，大気中の CO_2 は変化する。この場合，次の二つのケースを考える。(1) すでにある森林を原料採取用の植物に転換する場合。(2) 植物が育っていなかった場所に，全く初めて植物を植え育てる場合。

(1) の場合は，原料採取活動に着手することで，最初に CO_2 が放出される。簡単化のため，森林伐採による放出 CO_2 量は，栽培する植物の吸収量 sDW と同一と考える。これに対して，(2) の場合は，栽培し $W(T)$ まで育成が終了した時点で，はじめて CO_2 が放出される。h を，上のいずれのケースに該当するかを表すインデックスとする。(1) であるならば，$h = 1$，(2) であるならば，$h = 0$ とする。

まず，放出された CO_2 量のうち，時間 t において，いまだ吸収されていない量を $X(t)$ で表す。まず，1 サイクルが T $(N = 1)$ のケース（一度に伐採し，一度に栽培した時）では，

$$X(t) = hsDW(T) - \int_0^t sDW'(v)dv = sD(hW(T) - W(t)) \tag{6}$$

である。すなわち，森林伐採の場合は，放出された CO_2 が時間とともに吸収され，ゼロになると同時に新しいサイクルが始まり，再び CO_2 が放出される。非植生地に栽培を行う場合は，大気中の CO_2 を吸収し，吸収量が $sDW(T)$ となると同時に伐採され，CO_2 が初めて排出され，同時に新しいサイクルが始まる。したがって，いずれのケースでも，大気中の CO_2 量に変化を与えている。

大気中の CO_2 量の変化は一定ではなく，時間によって異なる水準となる。変化の大きさを表すために，CO_2 の平均増加量という概念を導入する。これは，各時点の CO_2 増加量 $X(t)$ の平均値のことである。平均増加量は，平均的な各時点での炭素放出量ではない。ここでは，初期時点で平均増加量に等しい炭素が 1 回だけ放出され，その放出量が永続的にそのまま大気中に留まり続けることを想定されたい。[(3)] $N = 1$ の場合の平均増加量を $A(1)$ と書くと

$$A(1)T = \int_0^T X(v)dv = shDW(T)T - s\int_0^T W(v)dv \tag{7}$$

であることより，

$$A(1) = shDW(T) - \frac{sD\int_0^T W(t)dt}{T} \tag{8}$$

である。[(4)] なお，ここでの平均 CO_2 増加量は，貨幣の取引需要分析における，Baumol (1952) や Tobin (1956) の定義した「貨幣の平均保有残高」と概念的に同一である。

---

(3)　平均増加量を，吸収を考慮して平均放出量に転換することを，第 4 節で行っている。

(4)　$W''(t) = 0(\forall\ t)$ なら，$W(t)$ は t に関して線形となることより，$\int_0^T W(t)dt = W(T)T/2$ より，

$$A(1) = shDW(T)/2$$

である。

平均増加量は放出炭素量が大きいほど，その絶対値が大きい。なお，栽培・伐採のサイクルを繰り返しているとき，異なる 2 つの植物原料において，生育終了までの時間（$= T$）が異なる場合であっても，放出炭素量が同じであるならば，平均増加量も同一となる。ただし，サイクルが 1 回限りで終

つぎに，サイクルを T/N（栽培を N 回に分ける）にしてみよう。このとき，時点 T においては，(4) より，過去に栽培した植物は，$N-1$ だけの異なるタイプが存在する。また，時点 T に新たに栽培した植物もある。したがって，$T<t<T+(T/N)$ に対して，

$$X(t)=\frac{sD}{N}(hW(T)-\sum_{i=0}^{N-1}\int_0^t W'(v+\frac{iT}{N})dv),\ (h=0,1) \tag{9}$$

となる[(5)]。右辺カッコ内の第 2 項は

$$\sum_{i=0}^{N-1}(W(\frac{iT}{N}+t)-W(\frac{iT}{N})) \tag{10}$$

であるから，

$$\begin{aligned}&\int_0^{T/N}\sum_{i=0}^{N-1}(W(\frac{iT}{N}+t)-W(\frac{iT}{N}))dt \\ &=\sum_{i=0}^{N-1}\int_0^{T/N}W(\frac{iT}{N}+t)dt-\sum_{i=0}^{N-1}W(\frac{iT}{N})\frac{T}{N}\end{aligned} \tag{11}$$

である。さらに

$$\sum_{i=0}^{N-1}\int_0^{T/N}W(\frac{iT}{N}+t)dt=\int_0^T W(t)dt \tag{12}$$

であることに注意する。これを用いると，

$$\begin{aligned}A(N)T &= N\int_0^{T/N}X(t)dt \\ &= sD(\sum_{i=0}^{N-(1-h)}W(\frac{iT}{N})\frac{T}{N}-\int_0^T W(t)dt),\ (h=0,1)\end{aligned} \tag{13}$$

となる。第 1 項が $\sum_{i=0}^{N-(1-h)}W(\frac{iT}{N})$ と書き改められていることに注意しよう。

さて，$h=1$ のケースを考える。このとき，$\sum_{i=0}^{N}W(\frac{iT}{N})\frac{T}{N}$ は，$W'>0$ であるならば，N が大きくなるほど小さな値になる。さらに，N が 1 だけ増えたときの増加分は，N とともに減少する。

了する場合は，サイクルの時間が短いほうが，放出炭素量が同一でも平均増加量の絶対値は小さい。たとえば，放出量が $shDW$ で一定だが，サイクルが $T_1, T_2 (T_1<T_2)$ である 2 つの植物原料を考えると，期間 T_2 での平均増加量 A_1, A_2 は，$A_1=shDWT_1/2T_2=A_2T_1/T_2$ である。

(5)　$0<t<T$ については，やや複雑である。$t=0$ で森林を伐採し，T/N ごとに，D/N だけ栽培すると，森林伐採により sDW だけ放出された CO_2 は，時点 T ではすべてが吸収されずに，

$$sD(W-\frac{\sum_{i=0}^{N-1}W(T-\frac{iT}{N})}{N})$$

だけ残ることになる。この性質は，時点 T までだけ起こるので，以下では無限に続くサイクルの中で考慮しない。

また，積分の定義より，$N \to \infty$ で $\int_0^T W(t)dt$ と一致する。したがって，A は N の減少関数で，

$$A(N) > 0 \ (\forall N \geq 1), \ \lim_{N \to \infty} A(N) = 0 \tag{14}$$

が得られる。一方で，$h = 0$ のケースでは，$\sum_{i=0}^{N-1} W(\frac{iT}{N})\frac{T}{N}$ は，$\int_0^T W(t)dt$ より小さいが，N が大きくなるほどその差は縮小し，やがてゼロとなる。すなわち，

$$A(N) < 0 \ (\forall N \geq 1), \ \lim_{N \to \infty} A(N) = 0 \tag{15}$$

である。図 1 および 2 では，$h = 1$ のケースで，$N = 1$ および $N = 2$ の場合の平均増加量をグラフで表している。また，図 3 では，$h = 0$，すなわち，植物のない場所に栽培する場合の，$N = 2$ のときの平均増加量を表している。

以上の結論を次の形でまとめることが出来る。

結論 1　植物原料を栽培・伐採することによる平均 CO_2 増加量は以下の性質を持つ。（1）森林を伐採し，そこに栽培を行うならば，平均増加量 $A(N)$ は常に正である。またその水準は，N とともに減少し，$\lim_{N \to \infty} A(N) = 0$ である。（2）植物のない場所に栽培する場合，平均増加量 $A(N)$ は常に負である。またその絶対値は，N とともに減少し，$\lim_{N \to \infty} A(N) = 0$ である。

カーボン・ニュートラルを CO_2 の平均増加量がゼロであると定めれば，以上より，植物原料供給はカーボン・ニュートラルではない。特に，既存の森林・農地を転換して植物栽培を行うならば，CO_2 平均増加量は正であり，環境負荷が生じている。また，その環境負荷の程度は何回栽培を行うかに依存し，回数を多くするほど負荷は軽減する。[(6)]

しかし，環境負荷を減らすために栽培回数を増やせば，総栽培量が同じであっても，費用は一般に増加すると考えられる。なぜならば，たとえば，運搬や労働者の管理，加工・生産には規模の経済が存在するだろうからである。では，何回に分けて栽培するのが望ましいのであろうか。いま，栽培・伐採の費用 C を次のように表す。

$$C = C(N, D), \tag{16}$$

C は N の増加関数で，N に関する限界費用は逓増するものと仮定する。また，CO_2 の環境負荷を $Z(A(N))$ で表す。ここで，$Z' > 0$，$Z'' > 0$ である（A の定義域は R_- も含むことに注意されたい）。すると，D を所与とすると，最適な栽培・伐採回数 N^* は，

$$N^* = \arg\min_N (C(N, D) + Z(A(N))) \tag{17}$$

---

(6)　一年中栽培できるものであれば，1 人の生産者の栽培が 1 回だけであっても，多くの生産者が栽培時期をずらすことで，実質的に栽培回数を十分大きくすることも可能である。しかし，熱帯地方であっても，雨期や乾期で栽培時期が限定されやすい。

図 1　h=1, N=1 **のケース**

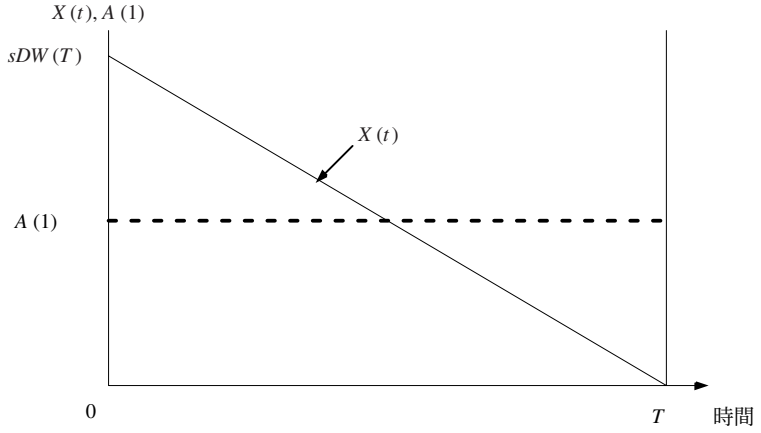


図 2　h=1, N=2 **のケース**

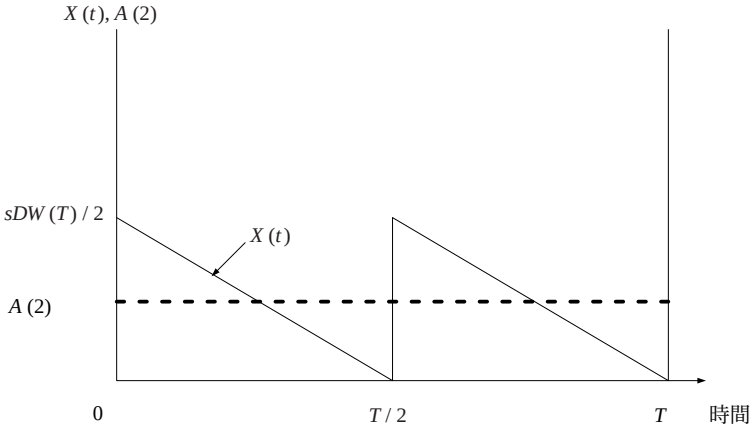
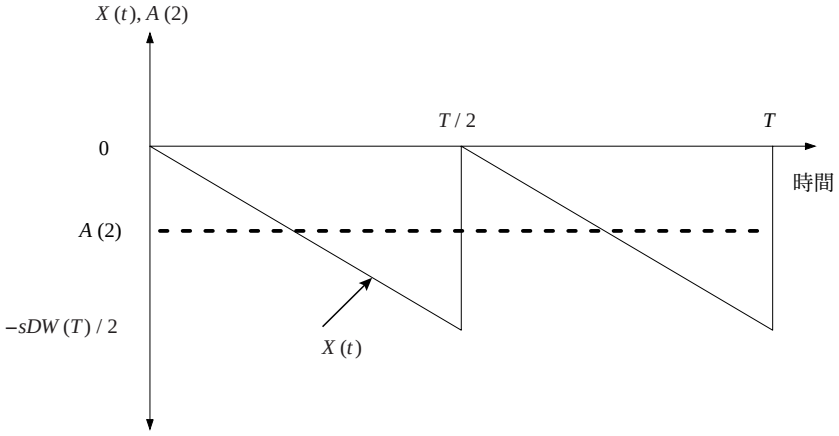


図 3　h=0, N=2 **のケース**



で表される。C の N に関する限界費用は逓増する。また，$|A(N+1)-A(N)|$ は N に関して減少する。したがって，Z は A に関して増加するので，N に関して減少するが，その減分の大きさは $Z''>0$ より減少する。

以上より，森林伐採を行って原料を栽培する場合，N^* は，以下のように定まる。まず，次のように N_1^*, N_2^* を定義する。

$$
\begin{aligned}
N_1^* &= \arg_N(C(N+1,D)-C(N,D)=Z(A(N))-Z(A(N+1))) \\
N_2^* &= \min\{N|C(N+1,D)-C(N,D)>Z(A(N))-Z(A(N+1))\}
\end{aligned}
$$

N_1^* が存在しなければ，N^* は，N_2^* にただ 1 つ決定される。N_1^* が存在する場合，最適栽培・伐採回数は，N_1^* および N_2^* と，複数のものとなる。$A(N)$ の性質と，C, Z に関する仮定より，N_1^* は，存在するならば，その数はただ 1 つである。$C(1,D)-C(0,D)$ が十分小さく，また，$Z(A(0))-Z(A(1))$ が十分大きい場合，N^* は 1 より大きなものとなる。

植物のない場所に栽培するケースにおいては，$Z(A(N))-Z(A(N+1))$ が常に負であるので，明らかに $N^*=1$ である。そこでは，栽培・伐採費用が最小化され，また，CO_2 吸収も最大となる。したがって，次の結論が成り立つ。

結論 2　経済的に最適な栽培・伐採回数 N^* は，次のように定まる。(1) 森林を伐採し，そこに栽培を行うならば，N^* は N_2^*，および，N_1^* が存在する場合，N_1^* でもある。(2) 植物のない場所に栽培する場合，$N^*=1$ である。

したがって，植物のない場所で原料を生産する場合は，一挙に供給量を全部栽培することが望ましい。

4.　LCA とリサイクル，およびフローとしての排出量

以上の議論では，次の 2 つの仮定を置いていた。

1. 植物の栽培・育成・採取・伐採・運搬・加工・廃棄（処分）の過程で人為的に排出される CO_2 はゼロである。
2. 1 単位の植物製品のなかで，リサイクルされる部分は存在しない。

これらの仮定をゆるめるとこれまでの議論がどのように変化するだろうか。以下では，植物の栽培から廃棄までの過程とリサイクル過程で，エネルギーが使用され，CO_2 が排出されるものと仮定する。

4.1　ライフサイクル面

最初に，ライフサイクル面での CO_2 排出量がゼロであるのではなく，最終財 1 単位当たり $\theta > 0$ であるものとする。簡単化のため，これが栽培から加工まで，時間 T で平均的に一様に排出されるとすると，栽培から加工まで θ/T だけ毎時点で排出をすることになる。すると，全体では毎時点で，$\theta D/T$ だけ排出が増え続ける。

以上より，植物原料の生産によって，期間 T で θD だけ CO_2 を排出することになる。この排出量は，通常の経済活動の排出量とまったく同様の性質を持つから，CO_2 のストックの増大に寄与し続ける。

4.2　リサイクル

つぎに，使用済み製品のリサイクルを考慮する。D の供給量のうち，$\mu(0 < \mu < 1)$ だけが，リサイクルされるとする。このとき，新たな原料の供給は，$(1-\mu)D$ となる。リサイクルにもエネルギーが必要であり，1 単位当たり θ_r の CO_2 が排出されるものとする。この前提の下では，植物原料を調達するために排出される CO_2 は，$\theta(1-\mu)D$ である。

したがって，リサイクルを考慮した場合，期間 T で排出される CO_2 は，

$$(\theta(1-\mu) + \theta_r\mu)D \tag{18}$$

である。

4.3　評価基準

さて，最後に，他の原料での CO_2 負荷と比較するために，平均増加量 $A(N)$ を CO_2 排出量に足し合わせることが必要である。以上より，植物原料の CO_2 排出量は，期間 T で，

$$(\theta + (\theta_r - \theta)\mu)D + (1-\mu)A(N) \tag{19}$$

となる。(19) の第 1 項が正であるならば，炭素中立的であるためには，$A(N)$ は負であり，第 1 項を相殺するほどの絶対値を持たなければならない。この絶対値が第 1 項より大きければ，植物原料は，炭素中立的だけではなく，大気中の CO_2 を減らす役割を果たすことになる。

しかし，この評価には問題がある。排出された CO_2 は，生産プロセスを繰り返すにつれて大気中に蓄積されるが，$A(N)$ は蓄積されず，当初の $A(N)$ だけの水準を維持するからである。したがって，生産プロセスを繰り返すと考えると，(19) の評価は適切ではないかもしれない。

この問題に対処する方法は，排出された CO_2 が，毎時点，率 v で減少するものと想定することである。この想定のもとでは，時間 t だけ過去に排出された CO_2 排出量 x は，現時点で xe^{-vt} だけ残存している。すると，増加した $A(N)$ だけの CO_2 量が維持され続けるためには，どれだけの排

出量を毎時点で続けていくことになるのだろうか。この求めたい排出量を $a(N)$ とすると，

$$A(N) = \int_0^\infty a(N)e^{-vt}dt = \frac{a(N)}{v} \tag{20}$$

これより，

$$a(N) = vA(N) \tag{21}$$

となる。$a(N)$ は仮想的なものであり，実際の排出量ではない。これは，$A(N)$ を CO_2 排出量に関連づけるために導出されたものであり，炭素収支の観点からは正確なものではない。$A(N)$ が負であれば，$a(N)$ は吸収量となる。$a(N)$ を用いた評価指標は，

$$(\theta + (\theta_r - \theta)\mu)D + v(1-\mu)A(N) \tag{22}$$

となる。一般的に，（22）の値を他の原料や他の工程による財生産と比較して，CO_2 排出量の多寡を議論することができる。植物原料と生産が，環境負荷の低いものであるためには，他のすべての原料・工程に比して，この値が小さなものとならなくてはならない。(7)

5. おわりに

石油が消費されるとともに枯渇する一方で，地球温暖化の進展が懸念される中，再生可能でしかも CO_2 排出面で中立的とされる植物原料は，将来的にエネルギーや財の原料調達面で中心的な役割を担うと期待されている。

しかし，植物原料が温室効果をもたらさない，とは一般には限らない。CO_2 排出面からいえば，2 つの点で検証が必要である。1 つは，植物に吸収され尽くすまでに大気中に残存する CO_2 の温室効果である。本論では，これを平均 CO_2 増加量という概念を用いて温室効果と結びつけている。植物原料は，消費後に放出された CO_2 を吸収するが，平均 CO_2 増加量は，従来の植生を伐採して栽培すれば，正となる。一方で，乾燥地帯のやせた土地でも生育する植物は，そうした場所に栽培すれば，平均 CO_2 増加量は負となる。たとえば，ジャトロファ・クルカスやキャッサバは，そういう性質を持った植物原料である。この場合は，植物原料は，炭素中立的であるにとどまらず，さらに環境面で優れたものとなる。したがって，植物原料であっても，栽培の形態により異なる評価を与えることが適切である。

もう 1 つの面は，LCA 的考察である。植物の栽培・伐採・原料化・生産プロセスで発生する CO_2 量を考慮すれば，他の原料・工程に比べて CO_2 発生量が小さいとは一概には言えない。本論は，CO_2 の放出・吸収を単純化したモデルにおいて，こうした点を考慮する必要性を確認した。

（7） ポリ乳酸を含むプラスチックを使ったノートパソコンの LCA で CO_2 排出量を評価すると，それほど大きな効果はないという結果がある。金子・吉岡（2006）参照。

なお，植物原料生産が，他の側面での環境破壊を生む場合もあることに注意すべきである。たとえば，オイルパーム油は，現在，カーボン・ニュートラルであるという認識から環境に優しい，と言われているが，その背後で熱帯雨林の転換も進んでいる。世界的な植物油の需要拡大から，オイルパームの世界生産は，1970 年代前半から 90 年代後半まで，6 倍弱増え，熱帯雨林の転換が進んでいる。[(8)] 熱帯雨林の転換は，生物多様性を減少させるから，植物油の生産が引き起こす環境問題にわれわれは留意しなければならない。この点を考慮した「環境に対するやさしさ」を表す指標も構築可能であろう。原料生産における環境被害を二酸化炭素排出による被害と足し合わせて，総被害費用を計算することは，その指標のひとつである。[(9)]

したがって，植物原料の環境面への影響は，さまざまな面から検証されなければならないものである。具体的な植物原料を取り上げた実証研究は，今後の課題である。

（経済学部教授）

（京都工芸繊維大学繊維リサイクル技術研究センター特任教授）

参 考 文 献

石井吉徳「拡大するバイオ燃料――石油を浪費し，食糧危機を深める愚策だ」『エコノミスト』2007 年 6 月 26 日号，p. 28–29。

金子憲治・吉岡陽（2006）『“脱石油”のものづくり　植物原料を使いこなせ！」『日経エコロジー』10 月号

Amiro, B. D., A.G.Barr, T.A.Black, H.Iwashita, N.Kljun, J.H. McCaughey, K. Morgenstern, S.Murayama, Z.Nesic, A.L.Orchansky and N.Saigusa (2006), “Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.136, 237-251.

Baumol, W. J. (1952), “The transactions demand for cash: an inventory theoretic approach,” *Quarterly Journal of Economics*, vol. 66, 545-56.

FAO (2003), *World Agriculture towards* 2015/2030 , Earthscan.

Thornton, P.E., B.E.Law, H.L.Gholz, K.J.Clark, E.Falge, D.S.Ellsworth, A.H. Goldstein, R.K. Monson, D.Hollinger, M.Falk, J.Chen and J.P.Sparks (2002), “Modelling and measuring the disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests,”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.113, 185-222.

Tobin, J. (1956), “The interest elasticity of transactions demand for cash,” *Review of Economics and Statistics*, vol. 38, 241-47.

---

(8)　FAO（2003）による。

(9)　さらに，バイオ燃料として穀物を利用することが，途上国の食糧危機を深刻化させている側面も重要である。こうした点での植物原料の問題点は，たとえば，石井（2007）を参照されたい。