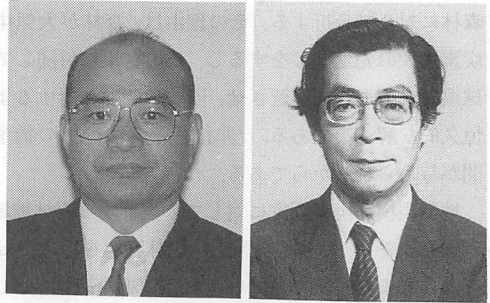


## ■ 展望・解説 ■

# 汚泥の有機肥料化による植物成長促進と 二酸化炭素固定化への効果の考察 (I) 植林への有機肥料効果の期待



Studies of Effects on Plants Growth and Carbon  
Dioxide Fixation by Organic Matter Derived from Sludges.

(I) Effective Utilization of Organic Fertilizers  
Produced from Sludges.

上野 勲\*・小林 達治\*\*

Isao Ueno

Michiharu Kobayashi

## 1. はじめに

二酸化炭素の地球規模での循環はまだ完全には解明されていないが、その大気中での増加が、現在観測されている地球温暖化の一因であるという認識は定着しつつある。

このような背景から、大気中二酸化炭素濃度の抑制、並びに低減対策に関しては種々の提案がなされており、多角的な研究も開始されている。しかし現在のところ、このような新しい技術の開発には種々の不確定な要因が介在し、解決すべき課題も多く、かなり長期間を要すると思われる。さらに、二酸化炭素の低減が図れても、現実に温暖化抑制効果が現れるまでにはある程度の期間を必要とする。従って恒久的な対策としては、エネルギー源の転換や二酸化炭素の人為的分離、並びに回収の新技术を開発することが望ましい。しかし、それを効果あるレベルまでに普及させるには、社会、経済、エネルギー等々のシステムを抜本的に改革する必要がある、その上長期間を要することが危惧される。そこで、比較的早期の効果が期待できるような、前段階の対策を講じることが肝要である。

このような観点から、植物の光合成による二酸化炭素の固定化は重要なポイントとなり得る。すなわち、地球大気規模での二酸化炭素の循環においては、植物による光合成はほぼ海洋に匹敵する二酸化炭素吸収源となっている。また、海洋に比較して固定化の機構と寄与がより明確に把握されている。植物の生長は必ず

しも迅速であるとはいえないが、対策次第では十分な効果が期待できる。この種の固定化においては、植物生長の促進が速やかな効果の発揮と、所要面積の低減に直接ひびいてくる。さらに森林伐採と、砂漠化に伴う地域間のバランスの崩壊は、結果として生じる地球規模の気候変動も、大規模な緑化によって減速しうる可能性がある。その上に農業、畜産の基盤の回復、並びに確保を通じ、食料問題の解決にも寄与し得る。

以上のような対策を推進するためには、従来の化学肥料に依存した植林、並びに農耕の発想を転換することが不可欠である。すなわち、疲弊した土壌を回復し、植物成長に最も適した環境を確保するためには、有機肥料による土壌改良が有効である。汚泥を有機肥料化する技術は地球規模での緑化促進対策の研究開発課題の中心である。また、資源のリサイクル、あるいはその処理に対するエネルギー浪費の回避という観点からも、汚泥を有機肥料化し、緑化を促進し、大気中二酸化炭素の低減を図るというシナリオは、自然の摂理を最大限に利用するゆえんである。

従って、種々の汚泥に適用できる有機肥料化の技術を開発すること、並びにこの種の有機肥料による植物生長の促進効果を検証することが急務である。

本解説並びに展望は、前編 (I) 植林への有機肥料効果の期待、と後編 (II) 汚泥の有機肥料化への期待、で完結されており、両編の植林に関しては、Solomon等の報告を礎としている<sup>1)</sup>。

## 2. 炭素固定と森林

二酸化炭素による地球の温暖化を緩和する方法として、地球上の炭素吸収源とその規模を拡大することを考える。ここではまず第一に地球規模における現存の

\* 東京大学融合サイエンスグループ代表

〒113 東京都文京区本郷7-3-1 工学部電気工学科内

\*\* 京都大学農学部農芸化学教室助教授

〒606 京都市左京区北白川追分町

森林に対して分析する。その理由は、森林が大気中の炭素増大の先延ばしをするし、その結果に付随して地球温暖化の進行を遅延させ、温暖化問題に対するより恒久的な解決策である、非化石燃料移行への猶予期間が与えられるからである。

地球規模の炭素固定に対して、現存する森林地域の管理を改善し、伐採を抑制し、森林資源を増大させることはあまり有望ではない。また、気候変化に応じて生じる新たな自然誘発される森林も、長期間を要するのでさほど有望とは思えない。そこで本論では、人為的に定着させる植林した森林に的を絞ることとする。

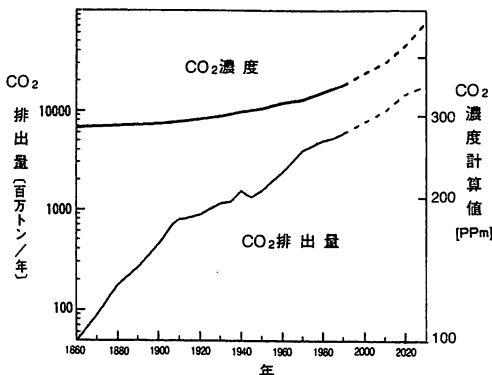
従って、その内容は温暖、並びに熱帯地域における植林した森林を定着させるために必要な経費を試算し、さらに新規に得られた森林資源の利用についても考察する。

## 2.1 問題点

大気中の炭素含有量は図-1に見るように、毎年約29億トン上昇している。これは二酸化炭素の形で、主として化石燃料の燃焼とセメントの生産に起因し、年当り48億～58億トンを放出する環境システムによって生じている。この排出量が指数関数型に増大していることは、地球規模でのエネルギー消費が前年度比当り何%か増大しているので、当然のことでもある。

このデータを基礎に地球上に人間が生理学的に生存できなくなる、含有量が3%になるのは何年か試算すると、現在大気中に0.035%として約300年であるという報告もある<sup>2)</sup>。この二酸化炭素の増大には、特に熱帯林を大量に伐採し、植物内に閉じ込められていた炭素を大気中に遊離させていることもこの傾向に寄与している。

そこで、予期されている地球温暖化に対処する方策



(出典：日本エネルギー経済研究所)

図-1 二酸化炭素排出量とその濃度計算値

として原理的に三通りが考えられる。(1) 脅威となる水準まで温暖化が進行しないよう阻止あるいは抑制する。(2) 温暖化が生じることは容認し、それに対応する経済的に安上りな方策を見出す。(3) 両者の折衷案がある。

二酸化炭素増大の抑制対策に対して、現在、生長途上にある森林は、問題とされている大気中濃度の増加を抑制し、二酸化炭素吸収源となっている。しかし、温帯地域の森林は、二酸化炭素に関しほぼ平衡状態で、僅かながら吸収源となっているが、熱帯地域の森林面積は減少途上にあり、二酸化炭素量の増大源となっている。結果として、森林バイオマスの蓄積率が正味の増大を保持すれば、遊離した二酸化炭素の増加分を相殺する方向に働く。

森林資源の総量を実質的に増大させ、それに付随した炭素固定化能力を実質的に増大させる具体的な方策としては、(1) 植林した成長が速い森林に大規模投資し、森林バイオマスの総量を拡大させる。(2) 現存する森林地帯の管理を改善し、伐採を抑制し、森林資源量を増大させる。そして、(3) 高い二酸化炭素レベルによる生長促進効果が期待できる、温暖で、多降雨で、これまで植林を実施していなかった地域に植林し、森林面積とバイオマスの総量を拡大することにある。

森林バイオマスの増大に結び付くことは、大気中に放出された“余剰炭素”の固定化に役立ち、そして、森林破壊を減速させれば、大気中の炭素蓄積量を軽減する。

## 2.2 固定化とその背景

森林地帯の面積は過去数世紀にわたり、人口の増大に伴って減少し、その減少した面積は多目的用途であるが、特に農地に転用されてきている。地球規模での森林面積の減少は約100万ヘクタール(以下、haとする)で、総森林面積の約15%に相当する。従って、大半が森林である、植物の中に蓄積されている炭素量は50%も減少していると試算する人もいる。中でも、熱帯地域の森林面積は特に減少を続けている。温帯地域での森林は開拓が主な原因で減少してきたが、現在はその減少を停止し、むしろ増大傾向に転じている。

しかしながら、森林資源のその量は樹齢、種類、地域、場所、並びにその特性により変化するので、森林面積の変化が直ちに森林に固定化される炭素の変化につながらない。管理の及ばない森林は、主として樹齢の永い大木で形成されると思われがちであるが、実際



図-2 焼き払われた原生林（ブラジル， Rondônia州）  
（稲葉氏の写真より）

には若木から老木までに亘っている。森林は老化するし、火災、害虫、病気によっても枯死する。特に火災の影響が著しく、通常米国では、平均50～500年の周期で枯死と生長を繰り返している。森林面積の初期の減少は人間による開拓が原因であった。図-2に見る、焼畑などで森林を燃やしてしまえば、植物に固定化されていた二酸化炭素は再び大気に還元され、人間が木材として使用したものは炭素固定化状態で維持される。

この30年間、全世界で商工業用途の資材として伐採した、木材の四分の一が固体の木材として維持されていると仮定すると、その量は100億 $m^3$ になり、別の試算では過去35年間に60億 $m^3$ とも計算をしている。この量は、全米で商工業用途の森林資源として、生長中の総木材量の半分に匹敵しており、炭素換算で、ほぼ28億トン进行貯蔵していることになる。

森林バイオマスと炭素固定化との関係は、本質的に衝撃波伝搬の問題と類似である。森林バイオマス資源量の正味の変化は、固定化されている炭素の動的な存在を意味しており、森林の総資源量は炭素固定化容量に相当する。地球上の炭素が最終的に固定化されているか、放出されているかの問題は、森林バイオマスのエコシステムだけでなく、商工業等の用途に利用されて残存している資材をも含めた、総炭素固定化存在量に依存する。しかし、過渡的な状況を考える場合には、

森林エコシステムと大気間の二酸化炭素の正味の流れが問題となる。森林とバイオマスが大気中の二酸化炭素レベルを低減させるには、固体の木材利用を含む、森林バイオマスの量を拡大しなければならない。従って、一般的に可能な対策手法は、森林面積の拡大か、森林バイオマスの単位面積当たりの増大か、あるいはその両方ということになる。

### 3. 植林

#### 3.1 植林面積の所要条件

米国の太平洋側北西部、並びに南部の比較的肥沃な地域では、商工業用途に植林された森林で木材の幹の部分の成長量は、植林以外の林業的保守を最小限にとどめた場合で、毎ha・年当り15 $m^3$ 程度である。根や枝を含めた木材のバイオマス量は木材の幹の部分の毎 $m^3$ 当り1.6倍に相当するので、1 $m^3$ のバイオマスが0.26トンの炭素を含有すると仮定すると、新しい森林の毎ha・年当り、固定化可能な炭素の量は6.24トンになる。従って、年当り29億トンの大気中の炭素増加量を固定化するには、新たに4.65億haの植林面積を必要とする計算になる。この値は、米国の既に植林された森林面積の約50%に相当し、全世界の現森林面積の15%を超える。図-3はこの所要面積を理解しやすいように米国地図に重ねて示したものであり、米国の非森林国土の約75%に相当する。1982年に国連食料農業機構FAOが計画し、1985年までに熱帯地域に植林した総森林面積は、僅か1700万haに過ぎなかった。また過去の試算によれば、1980年代半ばに商工業用途の目的に植林した、その総面積は9200万haで、この植林面積の大半は北半球の温帯地域にある工業国に存在する。

現在大気中に存在する遊離炭素を、すべて固定化するのに必要な、新たな植林面積の規模を考えると、これまで払って来た植林に対する努力は細やかなものでしかなかった。このような大規模な植林を実現する



図-3 米国地図に重ねて示した4.65億haの植林所要面積<sup>1)</sup>

表1 毎年当たりの増加分29億トンの炭素固定化に必要なA, B, C方式の面積と経費評価

記号	固定化の方式	固定化に必要な面積
A	温暖化に依存した自然誘発される森林の北側面積の拡大	35億ha
B	現在の地球規模での森林の成長による増大 地球規模で2.5年・m <sup>3</sup> /ha 米国実績で3.15年・m <sup>3</sup> /ha	30億ha
C	新, 速, 生長用植林とその初期投資経費 温帯地域 3720億米ドル 熱帯地域 1860億米ドル	4.65億ha

に足りる十分な土地は、地球上のどこに存在するのでしょうか。所要生産力を備えた森林地帯の大半は、北半球の温暖地域よりも南側の熱帯地域に存在するが、このような土地の殆どは既に、植林地となっている。

そこで一つの代案として、多少生産性が低くなると考えても、もっと北の地域に植林地を用意することにある。しかし、この場合、樹木の生長はさほど速くないと考えるので、所要面積に付随した植林経費は上昇し、さらに、低生産地域を活用する場合には、その所要面積は前述の試算の数倍になるであろう。

表1は、大気中の二酸化炭素を固定化するのに必要な、新たな、より成長が速い森林の面積を、(A) 二酸化炭素とその温暖化に依存した自然誘発される森林の拡大、(B) 現存する森林管理の改善と、伐採を抑制した森林資源量の増大、並びに、(C) 新規の植林について、それぞれ総括したものである。

### 3.2 植林経費

表1の規模での、植林事業に対する経費は実に莫大な額になる。植林経費は場所によって毎ha当り230～1,000ドル（以下、ドルは米ドルを意味する）の間で変動する。熱帯地域に最小面積4.65億haを植林するのに、土地購入費をふくめず、植え付け終了までの平均経費を毎ha当り400ドルで計算すると、その初期投資経費は1,860億ドルになる。地価は場所に依存するので一概に言えないが最低毎ha当り1,000ドル程度と評価されている。従って、仮に米国内に炭素固定化用の植林を新たに立上げるとすれば、その経費は毎ha当り800から1,400ドルの範囲になるであろう。

温帯地域に対しても同様に4.65億haで計算した、最低の見積もり経費は3,720億ドル程度になるが、このような広大な面積を、温帯地域に植林地帯として固定化することは、貴重な農地までがここに食われ、より高価なものにつく。

このように計算し検討をしていくと、総額は益々上昇し高価な値になる。土地取得経費を低減するためには、植林は生産性の低い森林地帯となる。従って、植

林経費は、より広大な面積を必要とすることになり、土地価格、並びに植えつけ経費が上昇し、総合的に植林経費が上昇する。場合によっては、土地取得経費は寄付か徴収かが可能な場合があるので、その計算は単純ではない。

炭素固定化用の植林用地は作物や家畜のような、社会的に有用な物産を生産しないので、この経費は一見負の利得に思える。しかし、そのような森林は野生の動植物、リクリエーション、浸食防止、分水嶺安定化等の形で、炭素固定化以外の利益をもたらすものである。

熱帯地域の地力の疲弊した土地は、大型の植林地として好適地に思える。それは疲弊した熱帯地域の土地が、多目的用途の使用に耐えないので、土地の買入経費を最小にする可能性がある。疲弊した草原のインドネシアでの、植林経費は毎ha当り400ドル位であると報告されている。熱帯地域での不毛地の生産性は低いことが多いが、植林の生長率は毎ha当り15m<sup>3</sup>、あるいはそれ以上になる。

これらの経費、並びに生産性の数値が、熱帯地域の植林に対して、平均的な値であると仮定すれば、そして、更に土地が無料であると仮定すれば、4.65億haの植林の全経費は1,860億ドルまで下げることができる。この値は温暖地域における炭素固定化用植林経費のほぼ半分になるが、この植林した森林の、保守と保護にはかなり費用を必要とする。

植林の経済的可能性に関する他の考察は、生長した木材をどう処理するかにある。植林の目的が化石燃料等からの解放炭素の処理に対して、恒久的対策としてのエネルギー源転換までの時間かせぎであるならば、この問題は必要ない。それは植林による解決手法が森林の1周期を越える30～50年という時間に対して初めて重要事項になるからである。

仮に植林の目的が長期間に亘り、炭素固定化を継続させることにあれば、新しく、より速く、生長する次世代の樹木に代えるために立木を収穫しなければなら

ない。しかし、より短周期の世代交代は、炭素固定化の速度を持続するために必要であるが、収穫した木材の問題が無視できなくなる。仮に木材が産業用のみ単に処理されるなら、大量の木材は市場価格を崩壊し、その結果、更に多量の木材を残し、紙のようにすぐ分解する製品に使われ、炭素固定機能は失われる。

もし木材が収穫され、そのまま在庫として保存されるなら、炭素固定は継続されるがその経費はかなり上昇する。それらを上乗せした収穫経費は、収穫作業、輸送、貯蔵を含めて、毎ha当り450m<sup>3</sup>で、毎m<sup>3</sup>当り15ドルとして、毎ha当り6,750ドルの計算になる。30年後の収穫関連経費は、4.65億haに対してこの値で計算すると、31,387億ドルと概算される。

### 3.3 有機肥料効果

植林後自然にすべてを任せて、17年間生長をさせてきた縦の木の森林160ha以上に対して、1973～1982年までの9年間、下水処理の副産物である汚泥を放水車で与え続けた、ある米国の企業が行った研究結果がある。

一般的に植林した17年目の縦の木の森林を活用して、有機肥料効果を9年間に亘って調査した報告であるので、最初の植林時におけるその実験条件は密植し、活着生長につれて、貧弱なものは間伐し、最もよく生育したものを残す方法と手段をとっている。

これは米国の環境保護局EPAによって、既に承認されている実験で、生の汚泥を森林用地に有機肥料として活用した時、大変に価値のある資源になるという実験結果である。

それは葉と葉が重なり合わない程度の木々の間隔で、

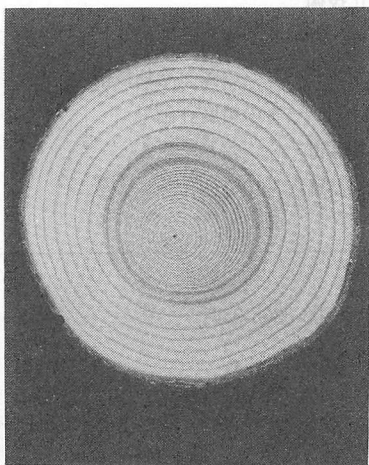


図-4 有機肥料効果による縦の木の年輪

十分な太陽の光を受けて成長した、この縦の木の森林を植林後の26年目に切り倒して、炭素固定化による生長を意味する年輪の幅を計測してみると、切り倒した木の年輪すべてに対して、自然に任せて生長させた年輪に較べて、1.5～5倍の範囲内に生長していたことが分り、大変に驚かされた実験報告であった。図-4に典型的なその年輪の成長の差と違いが分かる、縦の木の断面の年輪の写真を示す。

即ち、この研究は森林とバイオマスによって、大気中の二酸化炭素レベルを低減させることが、可能な対策手法の中の、森林バイオマスの単位面積当りの増大方法として、大変に期待が持てる一つの実験事実であった。

もしこれが普遍的に実現可能であるとすれば、図-3に示した植林面積を五分の一以下にすることが可能になり、経済的にも、より実現可能な見通しが成り立つ。

## 4. むすび

地球温暖化問題に対し、30～50年程度の遅延で、この間に化石燃料から他のエネルギー源への転換や、二酸化炭素の人為的分離、並びに回収等の新技術が、開発されることを前提に、森林資源の総量を実質的に増大させ、それに付随した炭素固定化能力を実質的に拡大する具体的方策について、三通りの地球規模における森林に対して本編（I）で考察した。可能性がある三通りの検討結果から、大規模な植林のみが炭素固定化に対して大きな潜在能力を持っていることが明らかにされた。

年々29億トン増加している、大気中の炭素含有量の固定化に対して、新たに4.65億haの植林面積を、人為的に定着させるのに必要とし、この植林経費を最低に見積ると、熱帯地域で1,860億ドル、温帯地域で3,720億ドル必要であることが概算された。

森林による炭素固定化に対する考察から、植林に期待できそうであることが理解できたが、更に経済性の観点からも、植物生長の促進法の開発が強く期待される。それは生長促進が植林の速やかな効果の発揮と、所要面積の低減に直結するからである。

このような観点から、汚泥の有機肥料化による植物資源の拡大は自然の摂理を最大限に利用する大変に有効な対策と考える。これについては、後編（II）汚泥の有機肥料化への期待で考察するが、汚泥中の有機養分の利用は勿論であるが、これに含まれる有機栄養微生物、化学合成細菌、また炭素固定や、窒素固定を同時に行う微生物を資源として活用できる等<sup>3)</sup>、その効

果が大いに期待できそうである。

実験によると、汚泥を有機肥料として山林に適用した場合、図-4に見るように年輪の幅が自然に成長している従来のものに較べて、1.5～5倍になったという報告をした。もしこれが普遍的に実現すれば、図-3に示した植林面積を五分の一以下にすることが出来、経済的にも更に実現可能な見通しがつく。

汚泥中の有機養分等を利用した、植物資源の拡大は極めて有効な対策で、資源のリサイクル、あるいは、その処理のためのエネルギー浪費の回避という観点からも、汚泥を有機肥料化して、緑化を促進して、大気中二酸化炭素の低減を図るシナリオは、自然の摂理を最大限に利用するものであり、地球温暖化の解決に向けて、大変に明るい希望を抱けることになる。

現在の植林に対する経費評価の基準は、炭素固定経費がトン当たり1万円以下であれば大変に有望であり、10万円以下であっても検討の対象になることをここに付言する。

## 文 献

- 1) R. A. Sedjo and A. M. Solomon: "Climate and Forests" Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation, Proceedings of a Workshop "Resources for the Future" p. p. 105-120 (1988).
- 2) 西澤潤一: 「人類の将来と核融合」核融合研究67巻2号 頁105-107 (1992).
- 3) 小林達治: 「有機物の処理と資源化」エネルギー資源11巻5号 頁54-61 (1990).

### 協賛行事ごあんない

## 第21回ガスタービンセミナーについて

1. 日 時 平成5年1月21日(木)・22日(金)
2. 場 所 川崎産業振興会館  
(川崎市幸区堀川町66-20)
3. テーマ 「21世紀へ向けてのガスタービン開発」  
〔プログラム(仮題)〕
  - ・ 1月21日(木)
    - 1) 21世紀へ向けてのエネルギー・環境問題
    - 2) セラミックガスタービンの技術課題と開発動向
    - 3) ACT90におけるガスタービンによるコージェネレーションシステム
    - 4) 超音速輸送機用推進システムの開発展望
  - ・ 1月22日(金)
    - 5) 石炭ガス化複合発電システムの開発状況
4. 講演時間 70分(質疑応答10分込)

- ・事務局 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル  
(社)日本ガスタービン学会 TEL 03-3365-0095, FAX 03-3365-0387
- ・担当委員 (ガスタービン学会企画委員長)  
東京理科大学 酒井 俊道 TEL 03-3260-4271, FAX 03-3260-4291