

バイオマス資源利用の生態系に及ぼす影響 に関する一考察

小林 久

正会員 茨城大学 農学部地域環境科学科 (〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央3-24-1)

E-mail: qkoba@mx.ibaraki.ac.jp

人間社会のバイオマス利用が生態系に対してどのような影響を及ぼす可能性があるのかを簡単なモデルを作成し、100年後までについて予想的に検討した。その結果、枯渇性燃料のバイオマス資源による代替が生態系の主要な構成要素である土壌、生産者、消費者の炭素量を初期の70%程度の水準にまで減少させる可能性があると推計された。検討に用いたモデルは厳密なものとはいえないが、本推計結果は気候システムに大きな影響を及ぼす化石燃料消費の問題解決を、安易に生態系サービスに依存することの妥当性を再考する必要があること、同時に人間社会の資源利用において化石資源や生態系に替わるサービス提供の「新たな系」の創出が求められることを示唆していると考えられた。

Key Words : ecosystem services, biomass, carbon cycle, food chain, GHG, energy consumption

1. はじめに

人間社会は住居、公共用地、工業生産用地などとして植物が光合成を行うことのできる空間を少なからず占有している。たとえば、中国では1990年代に全人口の3割を占めるようになった都市人口のための都市的土地利用の拡大が穀物栽培面積を大幅に減少させていたといわれている¹⁾。このような住居、公共用地等の占有率は人口密度や経済規模にもよるが、国土の10%を越えることも少なくない。バイオマス資源の利用は、エネルギー密度の薄いバイオマスを集積し、加工するために、このような人工的な土地利用と同様の用地を追加的に必要とする。

一方、生態系は食物連鎖により植物が生産（一次生産）する資源を多段的に利用することで成り立っている。各段階（栄養段階）の資源量（エネルギー量）は、一段上がるごとに1桁ずつ小さくなることが知られている²⁾。陸域では、植物が生産する有機物のおおよそ90%は分解者によって直接分解されてしまい、それらは土壌に一時貯蔵されるか、環境に逸散してしまう。したがって、残りの10%程度を消費者である動物が、数段階の栄養段階を構成しながら使うことになる。しかし、各段階で非常に大きなエネルギー損失があるため、ほとんどの食物連鎖は5段階以下となる²⁾。

このように、人間社会のバイオマス利用は、資源生産の場の縮小と資源の過度な調達により、生態系が利用できる資源量をより小さくする方向へ、二重のドライブを働かせる可能性がある。とくに、バイオマスの過剰な利用は、2～5段目の栄養段階に渡される資源量を、大幅に小さくしてしまう可能性がある。生態系が利用できる資源量を小さくするようなドライブは、食物連鎖を構成する限られた範囲において多大な影響を及ぼす危険性が高い。過剰なバイオマス利用の食物連鎖への影響は、温暖化のように地球レベルではなく、特定の地域において起こると考えられ、生産者から消費者に流れるエネルギー量の減少は、生態系の持続性を危うくしてしまうような場所を局所的につくり出してしまうかもしれない。

化石燃料は枯渇の恐れがあり、温室効果ガスの排出源であるから、バイオマスなどの再生可能な資源で置き換える必要があるといわれている。現代文明の存続を願い、バイオマス利用に関するさまざまな技術やシステム開発への関心や投資も急速に伸びている。しかし、常識のように見えるこのバイオマス利用のシナリオは、本当に化石燃料に依存する現代文明がとるべき次の正しい一手であろうか。ここでは、自然生態系に依存するバイオマス資源への期待に危うさがないかを、新たな用地利用についての検討は含めずに、利用量と

生産量の関係に着目して、生態系を維持する資源量への影響という観点から大局的・予察的に検討してみる。

2. バイオマス利用の影響モデル

人間社会のバイオマス利用がどのような影響を及ぼす可能性があるのかの見通しをつけるために、温暖化問題で明らかにされてきた炭素循環に関する知見や人間社会のバイオマス資源利用の現状を参考に、簡単なモデルを作成して予察的な検討を試みる。

(1) バイオマス利用の形態

人間社会の資源消費のうち、一次生産に関係する資源消費として、燃料、食料、建材・紙・容器などのその他のバイオマス利用^{3)・4)}を選定する。次に、一人当たり年間消費量(バイオマス炭素換算量)として、途上国、日本、アメリカの3タイプを想定し、現時点での消費量をそれぞれ炭素換算量で表1のように設定する。なお、食料のうち肉類・乳製品の消費は一次生産を10倍消費するものとし、途上国、日本、アメリカの各タイプで、それぞれ食料消費のうちの5%、25%、55%を肉類・乳製品が占めるものとする。

(2) 炭素循環のモデル化

植生と大気との関係をシミュレートするモデル、あるいは陸上生態系や土地利用が組み込まれた炭素収支モデルとしてはBAIM⁹⁾、Sim-CYCLE^{7)・8)}、TsuBiMo⁹⁾などが既に開発されている。また、バイオマスの需給を土地利用および生産・加工・利用に関して定量化することで、バイオマスエネルギーの供給可能性を世界レベルで評価するGLUE¹⁰⁾等のモデルも提案されている。

表1 バイオマス換算の一人当たり年間炭素消費量

	燃料 ³⁾ *	食料 ⁴⁾ **	その他の利用 ⁵⁾ ***
途上国	0.30	0.33	0.14
日本	0.08	0.46	1.39
アメリカ	0.16	0.70	3.14

注) 単位はtC・年⁻¹・人⁻¹。資源消費量の炭素換算は、炭素含有率をバイオマス燃料およびその他バイオマスが資源量(重量)の50%、食料が平均水分含有率60%として求めた乾物重の40%とした。

*Energy Statistics(IEA,2004)の原油換算消費量のうち、途上国は50%、日本・アメリカは3%をバイオマス由来と仮定した値。途上国の消費量はアジアの値。

** 途上国はインドネシアの値。

*** 日本、アメリカは、Resources flows(WRI, 1997)の再生資源製品(木材、紙、食品など)から食料を引いた値。アジアは日本の1/10(仮定値)。

しかし、ここでは植生や土地利用等の種類や分布については考慮せず、バイオマス資源利用の促進が総体としてどのような影響を及ぼすかを予察的に検討することとし、地球温暖化問題で明らかにされてきた図1のような地球レベル炭素循環の知見¹¹⁾に、一次生産から動物・人間社会に流れる資源量を組み込んだ簡易なモデルを作成して使用する。

モデルは図2のとおりで、原則として図1の状態の流出側ストック量に対するフロー量の割合を維持するようにそれぞれの炭素フロー量が決まるものとする。

ただし、1975年～2004年までの人口、大気中炭素量などの変化およびCO₂施肥効果や気温変化による陸域生態系の炭素固定増減などの研究成果^{12)・13)・14)・15)}を考慮して、光合成による生産(炭素固定)は大気中の炭素量が現在の2倍で20%～50%増加(20%～50%増/750GtC)するものと仮定する。同様に、海洋は産業革命以前の海洋・大気間の炭酸ガス交換と現在のその推計¹⁶⁾などを参考に、現在の大気中炭素量(750GtC)を基準とした増加分の10%～20%の炭素を初期値

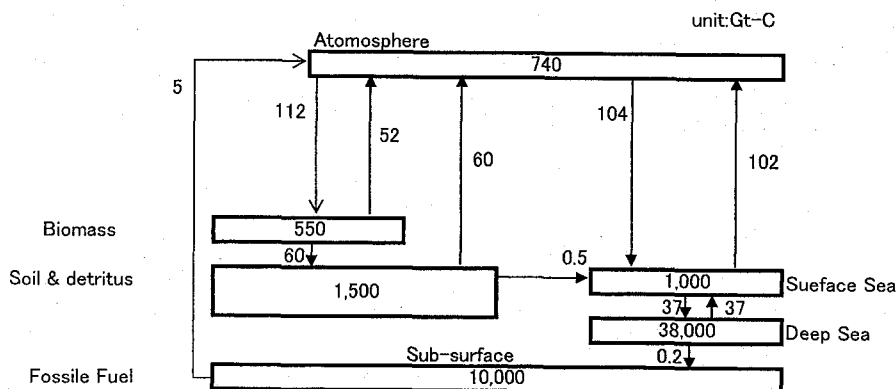
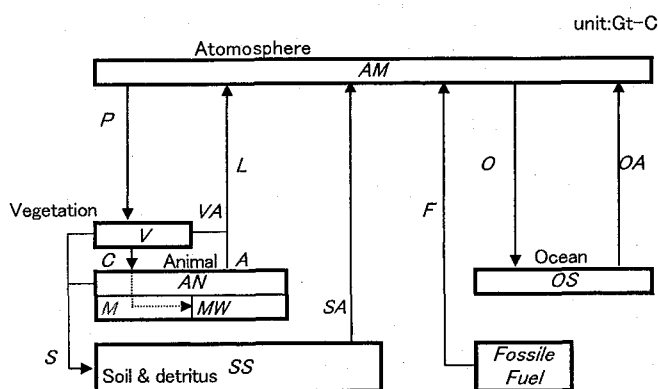


図1 地球の年間炭素サイクル¹¹⁾



・フロー

大気からの固定		
光合成 (P)	$(AM_t - AM_0) \times (20\% \sim 50\%) / AM_0 + P_{t-1}$	($P_0 = 112$)
海洋吸収・光合成 (O_t)	$(AM_t - AM_0) \times (10\% \sim 20\%) + O_0$	($O_0 = 104$)
大気への放出		
植物呼吸 (VA_t)	$P_t \times VA_0 / P_0$	($VA_0 = 49$)
消費者・人間から放出 (A_t)	C_t	
地表からの放出 (L_t)	$VA_t + A_t$	
土壌呼吸 (SA_t)	$SS_t \times SA_0 / SS_0$	($SA_0 = 55, SS_0 = 1500$)
海洋放出 (OA_t)	$(O_t - O_0) \times (50\% \sim 90\%) + OA_0$	($OA_0 = 102$)
化石燃料から放出 (F_t)	Fossil fuel use	
一次生産から消費者および土壌貯蔵		
人間社会の消費 (M_t)	Use of renewable materials by mankind	
生産者から消費者 (C_t)	$(P_t - VA_t) \times 10\% + M_t$	
生産者から土壌 (S_t)	$S_0 \times (V_t + P_t - VA_t) / (V_0 + P_0 - VA_0)$	($S_0 = 55$)

・ストック

大気 (AM_t)	$AM_0 - (P + Os) + La + Sa + Oa$	($AM_0 = 750$)
生産者 (V_t)	$V_{t-1} + P_{t-1} - (VA_{t-1} + S_{t-1} + C_{t-1})$	($V_0 = 550$)
消費者 (動物, AN_t)	$(V_t + P_t) \times AN_0 / (V_0 + P_0)$	($AN_0 = 3.0$)
消費者 (人間, MW_t)	$WP \times 50(kg) \times 20\%$	WP: World Population
土壌 (SS_t)	$SS_{t-1} + S_{t-1} - SA_{t-1}$	
海洋 (OS_t)	$OS_{t-1} + O_t - OA_t$	($OS_0 = 39000$)

注) 初期値等の単位は Gt-C, Gt-C/年

図2 人間社会のバイオマス利用を組み込んだ炭素循環モデル

より多く吸収し、その吸収増分の 50%~90%の炭素を初期値より多く大気に放出するように設定する。

なお、生産者から消費者 (動物・人間社会) へ流れる炭素量は、純生産量 (光合成量から植物呼吸量を減じた量, $P - VA$) の 10%と人間社会の消費量 (M) の和として求める。さらに、バイオマスのエネルギー価値を化石燃料の 50%とし、化石燃料をバイオマスで代替する場合は、代替する化石燃料から放出される炭素量の 2 倍の値を計上する。

計算は、図 1 を参考に初期状態 (2005 年) を図 2 のように設定し、大気中の炭素量から光合成量 (P) と海洋の吸収 (O) を求めることから始め、全体のフローとストックを求めたところで 1 ステップ (1 年間) を終了する。この計算を繰り返すことで、生産者、消費者、土壌などの炭素量の変化を追跡できる。

ここでは、光合成と海洋・大気の交換を設定したそれぞれの増加率の範囲内でランダムに変化させ、2005 年を基準に 1 年を 1 ステップとして 100 ステップ (2006~2015 年) までの計算を 1000 回以上繰り返して、100 ステップ後の計算結果について検討する^{注1)}。

3. 計算の条件とケース

初期条件 (ステップ 0) となる 2005 年の世界人口は、64.7 億人とし、その 80%が途上国の消費タイプ、15%が日本の消費タイプ (ほとんどの OECD 国および旧ソ連)、5%がアメリカの消費タイプ (アメリカ、カナダなどの OECD 数カ国と産油国) にあるとする。

各年の世界人口は国連の世界人口予測を参考に、1.11% (2005~2015)、1.00% (2016~2020)、0.87%

表2 一次エネルギー供給の変化³⁾

	1973		2002		増加率 2002/1973
	PES (Mte)*	%	PES (Mte)*	%	
全世界	6,034	100.0	10,230	100.0	1.70
OECD	3,765	62.4	5,346	52.3	1.42
アフリカ	211	3.5	540	5.3	2.56
南米	223	3.7	455	4.4	2.04
アジア	368	6.1	1,184	11.6	3.22
中国	193	3.2	1,245	12.2	6.45

* PES: 一次エネルギー供給量 (原油換算)

(2021~2025), 0.73% (2026~2030), 0.63% (2031~2035), 0.57% (2036~2040), 0.46% (2041~2045), 0.40% (2046~2050), 0.30% (2051~2070), 0.20% (2071~2090), 0.15% (2091~2100), 0.10% (2101~) の年増加率を見込んで推計する。本推計による2050年および2105年の人口は、それぞれ90.8億人、99.7億人となる。

本検討では日本タイプとアメリカタイプの一人当たりエネルギー消費は、楽観的に増加しないものとする。ただし、途上国タイプのそれは表2のエネルギー消費の変化傾向³⁾を参考に2030年まで年率3%で増加し、2030年以降は増加率が0%になるものと仮定する。したがって、2030年の途上国タイプの一人当たりエネルギー消費は現在の約2倍となり、以降は増加しない。

計算対象は、各消費タイプの人口構成とエネルギー資源消費の内容が異なる次のような2ケースとし、ここでは生産者、消費者、土壌の炭素量の100ステップ後の計算結果がどのように変化するかを検討する。

ケース1: 初期(2005年)の各タイプの人口構成比および燃料消費の構造が維持され、人口だけが増加するケース。2105年の世界全体のエネルギー消費量は870EJ/年、そのうちバイオマス由来のエネ

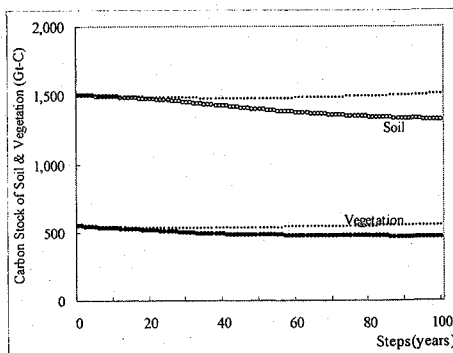
ルギー消費量は245EJ/年と見積もられ、2005年に対して、それぞれ2.25倍、3.5倍となる。

ケース2: 途上国タイプとアメリカタイプのバイオマスおよび燃料消費が次第に日本タイプに移行し、同時にエネルギーのバイオマス利用が促進されるケース。本ケースでは、途上国およびアメリカタイプの人口割合がそれぞれ0.5%/年、0.05%/年ずつ減少、日本タイプの割合が0.55%/年ずつ増加、さらに2055年まで日本とアメリカタイプの化石燃料の消費が0.2%/年ずつバイオマス資源の消費に転換し、2056年以降は燃料の53%がバイオマス由来、47%が化石燃料由来となるものとして計算する。2105年の途上国、日本、アメリカの各タイプの人口割合は、それぞれ30%、70%、0%となる。また、2105年の世界全体のエネルギー消費量は2005年の3.2倍(1,245EJ/年)となり、そのうちバイオマス由来のエネルギー消費量は、2005年の約9倍(620EJ/年)となる。

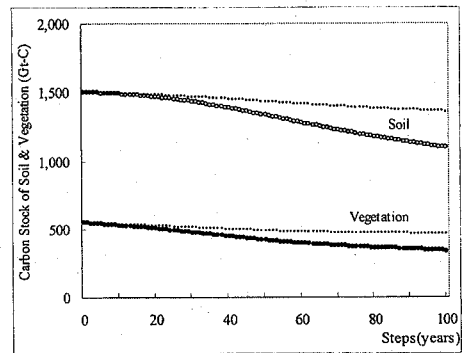
4. 計算結果と生態系の維持

計算による2005年~2010年までの大気炭素量は、1年当たり3.5~4.5GtC(平均4.0GtC)増加する。これは、1990年~2000年を対象としたIPCC推計値¹⁰⁾より若干大きな値といえる。

土壌および生産者(植物)の1100回の1~100ステップの計算結果は、それぞれ図3の上限と下限で示される範囲となる。また、「ケース1」および「ケース2」の1100回の100ステップ後の計算値の範囲を10等分して作成した、生産者の炭素量の度数分布は図4のとおりで、それぞれ512GtC以下、405GtC以下に75%



ケース1: 現在の各タイプの人口構成比、消費構造が維持される。



ケース2: 途上国とアメリカタイプの消費が日本タイプに移行し、エネルギーのバイオマス利用が進む。

図3 土壌および生産者の炭素量の計算結果

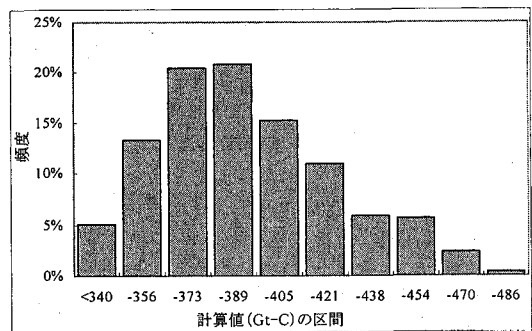
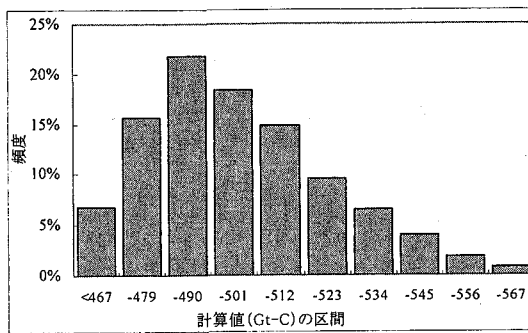


図4 100ステップ後の生産者の炭素量度数分布 (左: ケース1, 右: ケース2)

以上が分布する。大気、土壌、消費者（人間を除く動物、以下同じ）の計算結果も類似の度数分布パターンを示し、最小値～最大値の範囲の小さい側半分に 75%～80%の計算値が分布する。

各消費タイプの人口構成比とバイオマス消費の構造が現状で推移する「ケース1」の100年後の大気中炭素量は初期の10%～48%増（加重平均21%増）となり、土壌、生産者、消費者の100年後の炭素量は、それぞれ1,302Gt-C～1,541Gt-C（加重平均1,393Gt-C, 93%：初期値に対する割合、以下同様）、456Gt-C～567Gt-C（平均496Gt-C, 90%）、2,59Gt-C～3.19Gt-C（平均2.80Gt-C, 93%）と計算される。

このような「ケース1」の計算結果は、バイオマス資源を燃料として活用する、しないに関わらず、人間社会は生態系から既に過剰な資源調達を行なっている可能性があることを暗示している。

一方、バイオマスの利用を促進する「ケース2」の100ステップ後の大気中の炭素量の計算値は初期値に対して15%～71%（加重平均32%増）となる。土壌、生産者、消費者の炭素量の平均値は、それぞれ1,061Gt-C～1,403Gt-C（平均1,199Gt-C, 80%）、324Gt-C～486Gt-C（平均385Gt-C, 70%）、1.99Gt-C～2.88Gt-C（平均2.33Gt-C, 78%）となる。「ケース2」の計算結果は、生態系の主要な構成要素である生産者、消費者の炭素量が「ケース1」に比較して15%以上多く減少し、初期値の2/3程度となる場合も少なくない。さらに、それらの減少は100ステップの段階でも継続している。

この減少量と減少傾向の生態系に及ぼす影響は、決して小さいとはいえない。とくに、生産者の初期値に対する減少は、局所的に食物連鎖の栄養段階を一段以上低くしてしまう地域を出現させる可能性がある。栄養段階の減少は多段構造として維持されている地域の生態系を確実に不安定にするような大きな変化であり、

そのような変化は限界地だけでなく、各地域の生態系において二度と回復ができないほどのダメージを与えるかもしれない。「ケース2」の計算結果は、バイオマス利用を促進した場合、われわれのすべてが100年後に現在と同じように生態系サービスを楽しむことができるのかを怪しいことを示していると捉えることもできる。

5. おわりに

人間社会のバイオマス利用が生態系に対してどのような影響を及ぼす可能性があるのかを考えるために、簡単なモデルを作成して予察的な検討を試みた。ただし、モデルには温暖化による気候システムへの影響、土壌圏の反応、光合成の環境条件、海洋と大気との交換、人間社会でのストックによる分解の遅れなどについてのメカニズムを詳細に組み込んだものではないので、ここでの検討は厳密なものとはいえない。

しかし厳密ではないが、結果は人間社会のバイオマス消費の拡大が生態系に小さくない影響を及ぼす可能性があることを示している。さらに、今回の試算には、バイオマス利用自体が必要とする集積分配・加工のための追加的用地利用や避けられない住居・公共用地の拡大による生産者の土地利用減少の影響は考慮されていない。したがって、ここでの検討は人間社会の資源消費に関して、資源の枯渇、地球温暖化などの問題の他にも近未来に無視できない問題があること、同時に気候システムに大きな影響を及ぼす化石燃料消費の問題解決を、安易に生態系が提供するバイオマスという再生可能資源に依存することの妥当性についても十分な確認が必要であることを示していると考えてよい。

生態系サービスに問題解決を求めることが妥当でないとすれば、大量にモノを移動させ、使い、捨てる人間社会に対して、化石資源や生態系に替わるサービス提供の「新たな系」の創出を、人間社会は考える必要

があるのかもしれない。「新たな系」とは、たとえば太陽エネルギーを 10^3 の水準で固定する一次生産よりも一桁大きい 10^2 の水準で取り込む更新性のある資源生産系を、化石資源などの効率的な投入を前提として、既存の地表システムに整合するという条件で人間社会が整備・運転することなのかもしれない。

バイオマス利用を推進する一方で、われわれが今後どのような道をたどるべきかを知るためにも、「新たな系」の可能性は早急に確かめられなければならないことの重要な一つと考えられる。

付録:

注1)同じモデルを用いて、初期条件(1975年)を①世界人口40.7億人(以降、5年ごとの人口から各年の人口を推計)、②途上国:日本:アメリカの各タイプの人口割合を74:19:7(以降、途上国,日本,アメリカの各タイプの人口割合を毎年それぞれ0.2%増,0.13%減,0.07%減させて2005年時点の割合が80%,15%,20%となるように設定)、③各タイプのエネルギー消費を表2を参考にそれぞれ2005年時点の1/3,1/1.5,1/1.5(以降、2005年が1975年のそれぞれ3倍,1.5倍,1.5倍となるように年率3.8%,1.4%,1.4%で消費が増加すると仮定)、④大気/生産者/消費者/土壌の炭素ストックをそれぞれ650GtC/555GtC/300GtC/1,500GtCに設定して、2005年までの計算を行なった。1000回の計算を行った結果、2005年の大気,生産者,消費者,土壌の炭素量平均値はそれぞれ749GtC,549GtC,300GtC,1,497GtCとなり、2005年以降の100ステップ計算に用いた初期値とほぼ等しくなった。

参考文献

- 1) 土居晴洋(2000) 経済成長・都市人口の増加にともな市街地・野菜生産地域の外縁の拡大(LU/GECプロジェクト報告-アジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測III-), 環境庁国立環境研究所, 45-47.
- 2) E.F.K. Watt (伊藤監訳) (1972) 生態学と資源管理 (Ecology and Resources Management) (上), 築地書館, 42-46.
- 3) IEA (2004) Energy Statistics of OECD Countries, 1960-2003, 2005 Edition

- 4) FAO (2005) Food balance sheets (<http://faostat.fao.org/site/554/default.aspx>)
- 5) WRI (1997) Resources flows: the material basis of industrial economies, 65 p.
- 6) Mabuchi, K., Y., Sato H. Kida, N. Saigusa & T. Oikawa (1997) A biosphere-atmosphere interaction model (BAIM) and its primary verifications using grassland data, *Papers of Meteorology and Geophysics* 47, 115-140.
- 7) Ito, A. & T. Oikawa (2000) The large carbon emission from terrestrial ecosystem in 1998: a model simulation, *J. of Meteorological Society of Japan* 78(2), 103-110.
- 8) 井口敬雄・木田秀次 (2005) 数値モデルを用いた植生起源CO₂フラックスのシミュレーション, 京大防災研年報 46 B, 361-372
- 9) G. Alexandrov & T. Oikawa (2002) TsubiMo: a biosphere model of the CO₂-fertilization effect, *Climate Res.* 19, 265-270.
- 10) 山本博巳・藤野純一・山地憲治 (1999) 多地域型世界土地利用エネルギーモデルによるバイオエネルギー供給可能性の評価, 電研研究報告 Y98023, p.51
- 11) T.G. Spiro & W.E. Stigliani (岩田・竹下訳) (2000) 地球環境の化学 (Chemistry of the Environment), 学会出版センター, 103-117.
- 12) 伊藤昭彦・市井和仁・田中克典・佐藤永・江守正多・及川武久 (2004) 地球システムモデルで用いられる陸域モデル: 研究の現状と課題, 天気 51, 227-239.
- 13) 三原義秋 (編) (1985) 農業気象, 地人書館, 56-58.
- 14) Wullschlegel, S.D., Post, W. M. & King, A.W. (1994) On the potential for a CO₂ fertilization effect in forests: Estimates of the Biotic Growth Factor based on 58 controlled-exposure studies. In: *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Increase the Warming?* G.M. Woodwell and F.T. Mackenzie (eds.), Oxford University Press, New York, pp. 85-107.
- 15) Baker, J.T. & Allen, L.H. Jr. (1994) Assessment of the impact of rising carbon dioxide and other potential climate changes on vegetation. *Environ. Pollut.* 83: 223-235.
- 16) Siegenthaler, U. & Sarmiento, J. L. (1993) Atmospheric carbon dioxide and the ocean, *Nature* 365, 119-125.
- 17) IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/)

A PRELIMINARY EXAMINATION ON A RISK TO ECOSYSTEM DUE TO AN ACCELATION OF BIOMASS UTILIZATIONS

Hisashi KOBAYASHI

To consider the possibilities of how the utilization of biomass in human society has influence on ecosystem, the inferential examination had preliminary studied by applying a simple carbon cycle model. The results of the examination indicate possibility of existing serious problem of which biomass use by human society impacts to ecosystem. It may suggest us to consider the adequacy to dependence on ecosystem service as the problem solution of fossil fuel consumption which affects climate system. If it is not appropriate to count on ecosystem service as a solution for resources use in future, we who do mass transportations, mass consumptions and mass wastes, might be demanded to create "an innovative system" to provide a service in the place of fossil fuel resources or ecosystem.