

研究論文

水素エネルギーシステムが及ぼす水循環への影響

Evaluation of Influence of Hydrogen-based Energy System on Water Cycle

藤井 光 貴*・石原 顕 光**・光島 重 徳***

Mitsutaka Fujii

Akimitsu Ishihara

Shigenori Mitsushima

神谷 信 行****・太田 健一郎****

Nobuyuki Kamiya

Ken-ichiro Ota

(原稿受付日2004年4月23日, 受理日2004年10月1日)

Abstract

In order to attain the sustainable growth of human society, the clean energy system should be constructed in the future. The global carbon cycle is changing by the emission of CO₂ due to large consumption of fossil fuels. The global environment including human society should stand on harmonizing with the Earth where the global recycles of materials are important. The hydrogen-based energy system using renewable energy is expected to be an ideal energy system based on global water cycle. In this paper, the hydrogen-based energy system has been considered in three areas with different sizes of the energy consumption (Earth, Japan and Tokyo) and the influence of produced water on natural water cycle was evaluated. The amount of water produced from hydrogen was estimated by the total energy consumption at the time when the hydrogen replaces the fossil fuel. The ratio of estimated amount of water produced from hydrogen to amount of evapotranspiration of Earth, Japan and Tokyo was 0.05-0.07, 0.6 and 11.8%, respectively.

1. はじめに

21世紀になり地球規模で考えると環境破壊, 人口爆発, 資源枯渇と人類は大きな課題を抱えている。中でもクリーンエネルギーシステムの確立は緊急の課題である。現在, 一次エネルギーとして化石燃料が主に用いられている。しかし, 地球が過去数億年かけて蓄積した化石エネルギーを数百年の単位で消費し尽くすことは資源の有効利用の面から許されない。また, 化石エネルギーの大量消費は空気中のCO₂濃度の上昇をもたらし, 地球温暖化に結びつくと考えられている。人類の持続的成長を考えると脱化石エネルギーは, いずれは達成しなければならない課題である。

一方, エネルギーシステムを考えるにあたり, エントロピーやエクセルギーの観点が重要であることが指摘されている¹⁻³⁾。エントロピーの観点からみると, 現在の化石エネルギーを用いたエネルギーシステムは, 高エントロピー状態としてCO₂, H₂Oおよび熱を放出している。その中で大気中のCO₂は増加し続けており, そのエントロピーは減少することはない。すなわち, このシステムは, エネルギー

供給に伴い生成した物質のエントロピーを, 熱に変換して地球外に定常的に廃棄する機能を持っていないシステムである。地球上の活動が, 定常状態を維持するためには, 活動に伴って生成したエントロピーを全て熱として宇宙空間へ放出することが必要である。

水素エネルギーシステムは, 地球上に大量に存在する水から生成される水素をエネルギー媒体とし, 水の循環を利用できる。筆者らは, すでに水循環と炭素循環を比較し, 水循環に基づく水素エネルギーシステムが, エントロピーの立場から優れていることを明らかにした⁴⁾。しかし, 定常的なエントロピーの廃棄と能動的な活動の維持における物質循環の役割は定性的には議論されてきているが⁵⁾, 定量的な議論は少ない。一方, 水循環に基づく水素エネルギーシステムは全体としては優れているが, それが局所的な環境に及ぼす影響は明らかではない。そこで本研究では, まず持続的な能動的活動における物質循環を定量的に議論する。さらに地球, 国, 都市とエネルギー消費密度の異なる3つの環境下において, 水素エネルギーシステムを導入した場合, それが現在の水循環に及ぼす影響を評価・検討することを目的とした。

2. 物質循環とエントロピー

2.1 エントロピーの廃棄における物質循環の役割

人類社会も含めて, 内部で能動的な活動を行う系の目的

*横浜国立大学大学院工学研究科物質工学専攻

**独科学技術振興機構研究員

***横浜国立大学大学院工学研究院助手

****教授

E-mail: ken-ota@ynu.ac.jp

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1

表1 光合成と生物の代謝における反応式と
エントロピー変化量

反応式	全エントロピー 変化量	エネルギーに 伴うエントロ ピー変化量	物質によるエ ントロピー変 化量
① 太陽光→赤外線	+235	+235	0
② $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O$	+9.6	+9.4	+0.2
③ $36ATP + 36H_2O \rightarrow 36ADP + 36H_3PO_4$	+3.7	+2.5	+1.2

298K, 1 atm 単位: kJ/K (1 mole of $C_6H_{12}O_6$ 当たり)

は, まずその定常状態の維持にあるといつてよいであろう. 熱力学第二法則に基づき, 地球上における全ての活動は必ずエントロピーを生成する. したがって, 定常状態を維持するためには, 活動に伴って生成したエントロピーを定常的に廃棄することが必要となる. そこで, 能動的な活動の持続とエントロピーの定常的な廃棄において物質が果たす役割を, 具体例をもとに考察する. 具体的な系として生物の代謝および光合成を考える. これらに関連した反応と, それに伴うエントロピー変化を表1に示した^{6), 7)}.

多くの生物は, ②式で表される好気呼吸によって内部での活動のエネルギーを得ている. そして②式の反応を利用して③式の逆反応を進行させる. これはエントロピー生成の補償効果(カップリング反応)により可能となる. そして, ③式の反応に伴うエネルギーを利用して, 生合成・能動輸送・機械的仕事を行い, 生命活動を維持する. ATPとADPは生成と消費が交互に行われる. つまり循環しており, この過程で生成したエントロピーは全て熱として外部に放出される.

好気呼吸に伴い生物内で生成したエントロピーは定常的に外部(環境)に放出する必要がある. これは具体的には CO_2 , H_2O 及び熱の放出によって行われる. 環境もまた, 生物から放出されたエントロピーをさらに外部に廃棄することによって, 定常状態を維持する必要がある. 環境にエントロピーが蓄積されると, その内部の系の定常性も維持できないためである. 地球はエネルギーに関しては, 宇宙空間に対して開かれており, 低エントロピーの太陽光が常に供給され, 地表で高エントロピーとなった赤外線を輻射熱として廃棄できる.

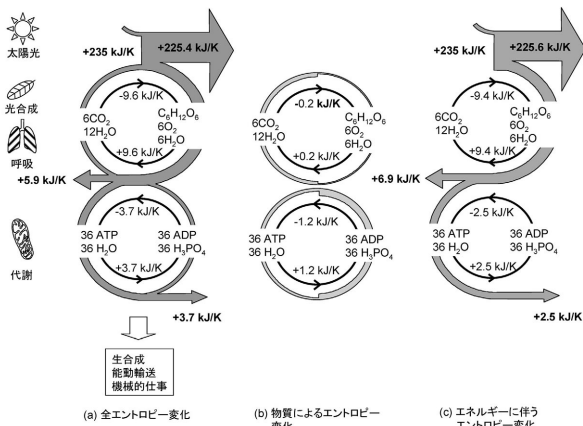


図1 植物・生体中での物質循環とエントロピーの流れ

一方, 地球は物質に関してはほぼ閉じている. すなわち, 廃物として放出された物質に付随するエントロピーを, 物質に付随させたまま廃棄することは不可能である. 好気呼吸を定常的に維持するためには, 環境が CO_2 と H_2O をグルコースと O_2 に戻す機構を持っている必要がある. これは①式の変化を利用して②式の逆反応を進行させる, すなわち光合成により可能となる. 結局, 光合成によりグルコースと O_2 が再生され, エントロピーは全て熱となる. これら一連のプロセスの結果として, 物質は循環し, 活動によって生成したエントロピーは全て輻射熱の形態で宇宙空間に廃棄することになる. この様子を図1に模式的に示した. 図1(a)は全エントロピーの流れを表しているが, そのうち熱の形態をとるエントロピーのみが廃棄され, 物質がもつエントロピーは循環する. (a)で表される変化に対応する物質のエントロピーの流れを(b)に示す. 物質循環とともに, 物質のエントロピーも循環し, 外部に廃棄されていないことが明らかである. また, (a)で表される変化に対応する熱の形態をとるエントロピー変化を(c)に示した. (c)の中で, 太字で表されている環境に放出されているエントロピー変化が, 各々のプロセスで外部に熱として廃棄しているエントロピーである. これは, 各々のプロセスにおいては, 全エントロピー変化の値とは異なる. しかし, 入力 of 太陽光が赤外線に変化する際のエントロピー変化はグルコース1モルあたり+235.0kJ/Kであるから, 各々のプロセスにおける全エントロピー変化と熱として廃棄するエントロピー変化の総量は等しい.

これらのことから, 能動的な活動には物質循環が必要であること, それは物質循環を利用することにより太陽光の低エントロピーを輸送・移動させることができるためであることが明らかとなった.

2.2 人類社会における理想のエネルギーシステム

人類社会も内部に能動的活動を有する系のひとつであるから, 人類社会も地球環境を含めて物質循環を満たし, 内部で生成したエントロピーは全て輻射熱の形態で宇宙空間に廃棄することが望ましい. この様子を模式的に図2に示

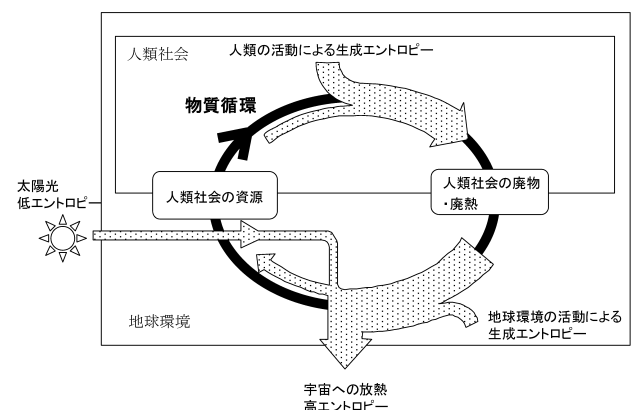


図2 物質とエントロピーの流れ

した。

人類のエネルギーシステムもまた、物質循環に依拠していることが望ましい。現在、一次エネルギーとして化石エネルギーの中でも主に石油が使用されている。この化石燃料の消費の結果、廃物として二酸化炭素が大気中へ年間 $5.5 \times 10^9 \text{t}$ (炭素換算) 放出され、大気中の二酸化炭素は年間 $3.2 \times 10^9 \text{t}$ (炭素換算) 増加している。つまり、化石燃料を消費する社会は、エネルギー変換に利用する物質のエントロピーを定常的に宇宙空間に廃棄する機構を持っていないシステムである。この大気中の二酸化炭素の増加が地球温暖化に結びつくかどうかは必ずしも明らかでないが、地球環境の定常性を乱していることは間違いないであろう。

筆者らは既に水循環と炭素循環を比較し、その存在量や地表と大気との交換量などから、水循環の方が炭素循環より優れていることを示した⁴⁾。エネルギー媒体として水から生成した水素を用いる水素エネルギーシステムは、理想的には太陽光エネルギーを元とする自然エネルギーを一次エネルギーとして利用し、水から水素と酸素を作り、その水素を二次エネルギーとして利用することである。太陽光エネルギーのみでは、その季節・時間変動性、地域的偏在性により安定的な電力供給は困難であると思われる。しかし、太陽光エネルギーから得られた電力を用い、水電解によって得られる水素は貯蔵・輸送可能である。その水素を用い、燃料電池で安定的に発電可能であると考えられる。発電後は水あるいは水蒸気が生成される。この水は、大気上空で凝結し水や水になり地上に戻り、その過程で水は浄化され、低エントロピー資源となる。この水素エネルギーシステムは、水素製造時に消費した水が再び水（低エントロピー資源）に戻ることができる機構を持ったシステムである。

3. 水素エネルギーシステム導入時の水循環に及ぼす影響

水素エネルギーシステムは、水循環に依拠した理想のエネルギーシステムとなりうるが、その導入に伴う局所的な環境に及ぼす影響は明らかでない。そこで、本節では水素エネルギーシステムを導入した場合に、現在の水循環に及ぼす影響をエネルギー消費密度の異なる3つの環境下（地球、日本、東京都区部）について評価する。具体的には、各々の全エネルギー消費量を求め、それを水素で供給した場合に生成する水の量を算出する。このとき、水素の燃焼熱を 141.86kJ/g とする。生成する水とその地域での自然の水の蒸発散量との比を求める。

3.1 地球

人類の全消費エネルギーは2000年において $1.9 \sim 2.6 \times 10^{10} \text{kW}$ であった。この全人類の消費エネルギーを水素で供給した場合、水素使用後に生成される水の量は、 $38 \sim$

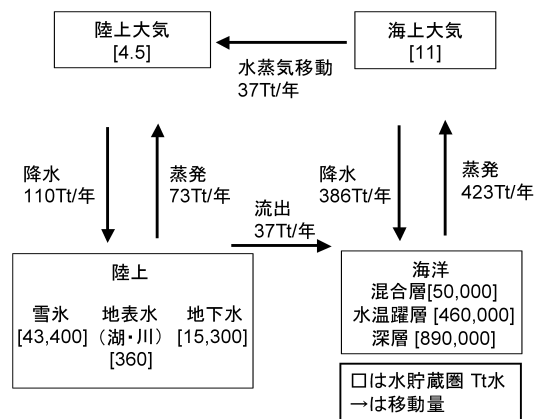


図3 地球上での水循環の模式図

$52 \times 10^9 \text{t/年}$ となる。図3に地球上での水循環の模式図を示す^{8), 9)}。この水の生成量と地球上での水循環を比較すると、陸地の蒸発散量 $7.3 \times 10^{13} \text{t/年}$ の $0.05 \sim 0.07\%$ 、大気中に存在する水蒸気量 $1.55 \times 10^{13} \text{t}$ の 0.3% で、水の循環は、人類活動の影響は受けにくいと考えられる。つまり、人類活動によって水を廃物として廃棄し、その水が蒸発したとしても、それらは地球環境における水循環の一部として取り込まれ、定常性は保証され则认为られる。

また、人類のエネルギー消費量が、全て熱に変換され宇宙空間に廃棄された場合、そのエントロピー量 S は $0.76 \sim 1.04 \times 10^9 \text{kW/K}$ で、太陽光エネルギーによる地表での熱が宇宙空間に廃棄される場合のエントロピー量 $3.3 \times 10^{11} \text{kW/K}$ の $0.02 \sim 0.03\%$ と極めて微小な値となる。

3.2 日本

現在、石油の可採年数は数十年と言われている。この石油消費量のうち、工業原料となる分を水素で代替することは難しい。まずは、エネルギーとして利用されている分を水素で代替していくことが現実的であろう。一次エネルギー国内供給のうち石油の占める割合は約 50% で $1.1 \times 10^{16} \text{kJ/年}$ である。その石油供給量の半分以上は、エネルギーの供給に使用されており、そのうち自動車用燃料は最も大きく、全体の 30% を占めている。この自動車用燃料のエネルギー消費量は $3.72 \times 10^{15} \text{kJ/年}$ である¹⁰⁾。水素で供給した場合に生成する水の量は、 $2.34 \times 10^8 \text{t/年}$ で、日本の水の蒸発散量は $2.3 \times 10^{11} \text{t/年}$ であるから¹¹⁾、生成水は蒸発散量の 0.1% である。地球の場合と同様に水素を利用した場合に生成する水が、環境に及ぼす負荷は小さいと思われる。

次に、全一次エネルギーを水素で代替できた場合を検討する。日本の一次エネルギー供給は、原子力発電、水力・地熱・新エネルギー、天然ガス、石油、石炭で占められており、その供給量は2000年で $2.24 \times 10^{16} \text{kJ/年}$ であった¹⁰⁾。これから生成する水の量は $1.4 \times 10^9 \text{t/年}$ となる。一方、日本の蒸発散量は $2.3 \times 10^{11} \text{t/年}$ であるから¹¹⁾、水の生成量は、この 0.6% である。

表2 水素エネルギーシステムが水循環に及ぼす影響

	地球	日本	東京都区部
年間のエネルギー消費量	$6.0 \sim 8.2 \times 10^{17} \text{ kJ}$	$2.2 \times 10^{16} \text{ kJ}$	$4.6 \times 10^{14} \text{ kJ}$
年間のエネルギー消費密度	$4.0 \sim 5.5 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2$	$6.1 \times 10^4 \text{ kJ/m}^2$	$7.4 \times 10^5 \text{ kJ/m}^2$
年間のエネルギー消費量から換算した水生成量	$3.8 \sim 5.2 \times 10^{10} \text{ t}$	$1.4 \times 10^9 \text{ t}$	$2.9 \times 10^7 \text{ t}$
年間のエネルギー消費密度から換算した水生成量	$2.5 \sim 3.5 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$	$3.9 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$	$4.6 \times 10^{-2} \text{ t/m}^2$
水の蒸発散量	$7.3 \times 10^{13} \text{ t}$	$2.3 \times 10^{11} \text{ t}$	$2.5 \times 10^8 \text{ t}$
単位面積当たりの水の蒸発散量	$4.9 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$	$6.4 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$	$4.0 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$
水の生成量と水の蒸発散量の比	0.05~0.07%	0.6%	11.8%

3.3 東京都区部

東京都区部での全エネルギー消費量は、電力、自動車用燃料、都市ガスの使用量の和となる。そこで、電力使用量、自動車用燃料消費エネルギー量、都市ガス販売量を調査した。東京都の電力使用量は $2.86 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ （2001年）である¹²⁾。東京都内の自動車総走行キロは $5.35 \times 10^{10} \text{ km/年}$ ¹³⁾で、燃費を 10 km/dm^3 と仮定すると、燃料消費量は $5.35 \times 10^9 \text{ dm}^3/\text{年}$ となる。現在、自動車用燃料は、ガソリン、軽油が主なものであるが、その割合はガソリン63.9%、軽油36.1%である¹⁰⁾。この割合から、燃料消費量はガソリン $3.42 \times 10^9 \text{ dm}^3/\text{年}$ 、軽油 $1.93 \times 10^9 \text{ dm}^3/\text{年}$ となる。ガソリンの標準発熱量は、 34.6 MJ/dm^3 、軽油の標準発熱量は 38.2 MJ/dm^3 である。ガソリンの消費エネルギーは $1.18 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ 、軽油の消費エネルギーは $7.37 \times 10^{13} \text{ kJ/年}$ 、合計 $1.92 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ となる。東京都区部の人口（2000年）は8,134,688人で、東京都人口の69%である¹⁴⁾。東京都区部での電力使用量、自動車用燃料消費エネルギー量が人口に比例すると仮定すると、それぞれ $1.97 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ 、 $1.32 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ となる。また、東京都区部における都市ガスの販売量は、 $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ （2001年）である¹⁵⁾。都市ガスの標準燃焼熱を 41.1 MJ/dm^3 とすると、都市ガスの消費エネルギー量は、 $1.35 \times 10^{14} \text{ kJ}$ と試算される。東京都区部での電力使用量、自動車用燃料消費エネルギー量、都市ガスの消費エネルギー量の合計は $4.64 \times 10^{14} \text{ kJ/年}$ となり、それから求められる水の生成量は、合計 $2.94 \times 10^7 \text{ t/年}$ となる。東京都区部の蒸発散量は $2.49 \times 10^8 \text{ t/年}$ であるから¹⁶⁾、水の生成量は、この11.8%に相当する。

表2に水素エネルギーシステムが水循環に及ぼす影響を示す。地球、日本、東京都区部でのエネルギー消費密度は、それぞれ $4.0 \sim 5.5 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2$ 、 $6.1 \times 10^4 \text{ kJ/m}^2$ 、 $7.4 \times 10^5 \text{ kJ/m}^2$ である。また、地球、日本、東京都区部の単位面積あたりの水の蒸発散量は $4.9 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$ 、 $6.4 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$ 、 $4.0 \times 10^{-1} \text{ t/m}^2$ である。このようにエネルギー消費密度の異なる（地球・日本・東京都区部）状況下において水素エネルギーシステムを導入した場合に生成する水の量と蒸発散量との比は、エネルギー消費密度に比例して大きくなる。特に、東京都区部の場合、他の環境と比べ大きく、地球に比べて約200倍、日本に比べて約20倍と試算された。局所的に大量のエネル

ギーを消費する東京都区部のような大都市での水素エネルギーシステムの導入により生成する水によって、自然の水循環は、空間的構造に変化を引き起こし、また現在とは異なる新たな定常状態に移行すると思われる。しかしながら、環境にどの程度の影響があるかは未知であり、今後詳細なシミュレーションを行う必要がある。

4. 生成水の利用の可能性

都市の温暖化を意味するヒートアイランド現象は、アスファルト、コンクリート等の道路舗装による地表表面の被覆、多量のエネルギー消費に伴う人工排熱の増加等によるものと言われている。その内、自動車排熱はすべての人工排熱の約40%と言われている¹⁷⁾。水素を燃料とする燃料電池車からの生成水がすべて水蒸気となるとすれば、それは大気上空に運ばれ、最終的に、廃熱は宇宙空間へ放出される。都市空間中の蓄熱は、水の蒸発熱を利用することで減少し、ヒートアイランド現象を抑える可能性があるかもしれない。

また、道路舗装等の地表面の改変による蒸発量の減少のため、都市の乾燥化が進んでいる。東京都の相対湿度は1945年には71.3%であったが、2003年には61%と約40年間に10%程度低下している^{18), 19)}。2001年度の東京都区部の道路等面積は 133 km^2 で、東京都区部面積 628.5 km^2 の21.1%に相当する²⁰⁾。また、宅地面積は 356 km^2 で、東京都区部面積の55.9%である。東京都区部面積の77.8%は、宅地、道路で占められている。東京都心部においては、都心面積 5.4 km^2 の90.4%が宅地、道路で占められている²⁰⁾。エネルギー源を化石燃料から水素に代替した場合に生成される自然の水の蒸発散量の11.8%を占めると試算された水を用いることで、蒸発量の減少を抑え、都市の乾燥化を防ぐことが可能かもしれない。今後、このような生成水の利用も含めた都市計画が必要であろう。

5. おわりに

持続的な能動的活動における物質循環の役割を定量的に議論した。物質循環は、太陽光の低エントロピーから赤外線への高エントロピーへの流れを分岐させ、さらに循環の連鎖により受け渡し、能動的活動を行う空間まで輸送する役割を果たしていることがわかった。また、地球、日本、東京都区部とエネルギー密度の異なる環境下において水素エネルギーシステムを導入した場合に、自然の水循環に及ぼす影響を検証した。局所的に大量のエネルギーを消費する大都市では、システム導入により生成する水と自然の水循環との比は、他の環境（地球、日本）に比べ大きくなる傾向が見られ、東京都区部では11.8%で、他の環境の20~200倍と試算された。生成水は自然の水循環の一部に取り

込まれ定常性は保証されると思われるが、環境にどの程度の影響を及ぼすかは未知であり、今後さらに詳細な調査研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) Rosen M. A. and Scott D. S. ; Entropy production and exergy destruction : Part I-hierarchy of Earth's major constituencies, Int. J. Hydrogen Energy, 28 (2003), 1307.
- 2) Rosen M. A. and Scott D. S. ; Entropy production and exergy destruction : Part II-illustrative technologies, Int. J. Hydrogen Energy, 28 (2003), 1315.
- 3) Rosen M. A. and Dincer I. ; Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development, Exergy Int. J., 1 (2001), 3.
- 4) 藤井光貴, 石原顕光, 光島重徳, 神谷信行, 太田健一郎; 物質循環から考える水素エネルギーシステム, 水素エネルギーシステム, 28-2 (2003), 42.
- 5) 植田敦; 資源物理学入門, (1982), 日本放送出版協会.
- 6) 小島和夫; エネルギーとエントロピーの法則 - 化学工学の立場から -, (1997), 培風館.
- 7) J. A. Dean ; Lange's handbook of chemistry, (1999), McGraw-Hill, Inc.
- 8) 安田延壽; 基礎大気科学, (1994), 朝倉書店.
- 9) E. K. Berner and R. A. Berner ; Global water cycle, Geochemistry and Environment, (1987), Prentice-Hall, Inc., Englewood Chiggs, New jersey.
- 10) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課編; 総合エネルギー統計 (平成13年度版), (2002), 榊通商産業研究社.
- 11) 国土庁長官官房水資源部編; 日本の水資源 (平成12年版), (2000), 大蔵省印刷局.
- 12) 総務省統計局編; 第五十三回日本統計年鑑, (2003), 日本統計協会・毎日新聞社.
- 13) 国土交通省総合政策情報管理部編; 陸運統計要覧, (2003), 国土交通省総合政策局情報管理部.
- 14) 総務省統計局編; 東京都の人口, (2003), 総務省統計局.
- 15) 東京都総務局統計部統計調整課編; 東京都統計年鑑 (平成13年), (2001), 東京都総務局統計部.
- 16) 紀谷文樹・中村良夫・石川忠晴; 都市をめぐる水の話, (1992), 井上書院.
- 17) <http://www.env.go.jp/air/report/h15-02/>平成14年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書, 環境省.
- 18) 東京管区気象台編; 東京都の気候, (1957), 気象協会.
- 19) 気象庁編; 気象庁年報, 気象業務支援センター.
- 20) 東京都都市計画局都市づくり政策部土地利用計画課編; 東京の土地利用 (平成13年東京都区部), (2003), 東京都都市計画局都市づくり政策部土地利用計画課.

協賛行事ごあんない

バイオマス・廃棄物利用シンポジウム

100年先から見てみよう

「バイオマス・廃棄物利用 新たな仕組みと将来」

〔主 催〕東京農工大学大学院共生科学技術研究部

COE『新エネルギー・物質代謝と

「生存科学」の構築』

〔日 時〕2005年3月24日(木)

〔会 場〕科学技術館サイエンスホール

(東京都千代田区北の丸公園2-1)

〔内 容〕地域に根づくバイオマス利用に向けて

ドライ系バイオマスエネルギーの新展開 他

〔問合せ先〕COE『新エネルギー・物質代謝と

「生存科学」の構築』事務局

FAX 042-386-3303