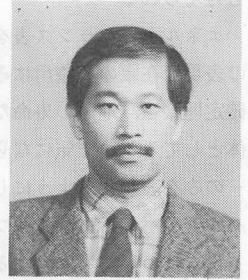


## ■ 展望・解説 ■

## グローバル資源バランス・テーブル

## Global Resources Balance Table



榎屋 治 紀\*

Haruki Tsuchiya

## 1. はじめに

エネルギーに関する長期的な問題は、資源の枯渇と環境負荷の問題としてとらえることができ、その対策は、効率的利用により需要量を減少し、太陽エネルギーなどの環境負荷の小さい永続的なエネルギーシステムの建設にあると考えられる<sup>1)</sup>。

最近では、地球規模の環境問題への関心が高まり、炭酸ガス、酸性雨、フロンガスなどの化学物質の放出等に関して長期的な影響が懸念されている。

筆者は、エネルギー問題をきっかけに、現代工業社会の大量の資源消費の問題に関心をいだくようになり、人類の長期的な生存の条件について考えるようになった。そして、地球上の資源やエネルギーの流れを理解するために簡単にわかりやすく全体像をつかめる方法を探してきた。そのひとつの解答として、一枚の表で地球上のエネルギー、材料、食糧、自然環境のもつ資源としての力などを表現できる、「グローバル資源・バランステーブル」が考えられた<sup>2)</sup>。ここでは、このグローバル資源バランス・テーブルについて紹介し、その内容に関連していくつかの項目をとりあげて述べることにする。

## 2. グローバル資源バランス・テーブルの構成

地球上の資源やエネルギーの流れは、人類の活動の増大によって大きく変化してきている。そこで、資源間の相互関係を記述し、次のような内容を表現できる表があれば様々な関係の考察に有益と考えられる。

- (1) 化石燃料消費と大気との関係
- (2) エネルギー消費と材料資源との関係
- (3) 人間と食糧資源の関係
- (4) 資源のリサイクル

## (5) 資源のストックとフローの関係

こうした資源間の関係を記述するために、既存の表現方法を比較検討してみると、国民経済計算、企業会計計算、エネルギーバランス表が参考になることがわかった。このうち、国民経済計算は、経済活動をフロー（一定期間の所得）、ストック（一定時点での資産の残高）、モノ（実物取引）、カネ（金融取引）の面から表示しようとするもので、表示単位は金額である。企業会計計算は、一企業の経済行動を記録するもので、損益計算（フロー）と貸借対照表（ストック）からなっていて、表示の単位は金額である。これに対してエネルギーバランス表は、ひとつの国のエネルギー需給状況を示す、タテヨコのマトリックスで、ヨコ方向には、各種の供給源（石油、石炭、天然ガスなど）、タテ方向には、トランザクションと呼ばれる資源の取り扱いが記入されるようになっている。トランザクションは3つのブロックに分かれており、第1のブロックは各々の資源の生産（自然界からの採取）、輸入、輸出、在庫があり、ここでひとつの国の一次エネルギー合計が決定される。第2のブロックでは、各々の資源の転換過程が記述され（精製、乾留、発電など）、ここで2次エネルギーが求められる。第3のブロックは最終消費であり、各々のエネルギーが農業、工業、民生、交通の各々の分野でどのように消費されたかを示すようになっている<sup>3)</sup>。

エネルギーバランス表の表示単位は、個別の資源ごとの固有単位（Kl, KWHなど）を使うこともあるが表の全体にわたって統一した単位として熱量換算値（Kcal, ジュールなど）を使用するのが一般的である。前記2種の計算法が金額を表示単位とするのに対して、熱量を基準にしているわけである。ここでは、地球規模の資源間の関係をエネルギーバランス表を拡張することによって考察してみた。将来は、こうした資源の貨幣価値に注目して別のアプローチが行われる可能性

\* システム技術研究所長

〒103 東京都中央区東日本橋2-8-11 第3成島ビル4F

も考えられる。

エネルギーバランス表を検討してみると、ストックの表現は在庫の調整用のみで、化石燃料の確定埋蔵量、地熱の寿命などは考慮されていない。全体としてこれまで気にならない数字であったのでフローのみを表現するようにしているようである。グローバル資源バランス・テーブルでは、資源の廃棄やリサイクルについても考察することが必要であり検討を必要とする。

グローバル資源バランス・テーブルのフレームの例を表1に示す。表の構成はヨコ軸に各種の資源（大気、水、エネルギー、材料、生物資源）をとり、タテ軸にはこれらの資源のストック、利用、廃棄などの状況を表現するようになっている。ヨコ軸に記入される資源の例としては表2に示したような項目がある。ここでは主として大規模な資源を重点的にとりあげている。将来は鉛、水銀、PCB、フロンなどのように量は少ないけれども環境に負担をかける物質の扱いを検討する必要があると思われる。ここでは量として大きな資源に注目し、その重量を共通単位にすることが第一に考えられている。

表1 グローバル資源テーブルのフレーム

		大気	水	エネルギー	材料	生物
ストック						
一次利用	採取					
	リサイクル					
二次利用	エネルギー転換					
	素材生産					
最終消費	人間					
	民生					
	産業					
	交通					
処分	ストックへの追加					
	廃棄					
	リサイクル					

### 3. グローバル資源バランス・テーブルの例

そこで、ひとつの例として1985年のデータをもちいてグローバル資源バランス・テーブルの例を作成して

表2 グローバル資源テーブルの扱う項目（例）

資源の項目	詳細な項目
大気	酸素 (O <sub>2</sub> ) 炭酸ガス (CO <sub>2</sub> ) 窒素 (N <sub>2</sub> ) メタン (CH <sub>4</sub> ) 硫黄酸化物 (SO <sub>x</sub> ) 窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> ) 一酸化炭素 (CO)
エネルギー	石油 石炭 天然ガス 水力 原子力 地熱 太陽光・熱
材料	鉄鉱石 鉄 銅鉱石 銅 石灰石 セメント アルミナ アルミ プラスチック その他各種金属資源 その他 " 非金属資源
生物	穀物 動物 (肉・乳製品となる) 食糧 森林 (パルプ・材木となる)

みた。表3がその例である。以下、各々の項について簡単に説明する<sup>(4),(5),(6)</sup>。

#### (1) 大気

大気は標準状態で $3.96 \times 10^9 \text{ km}^3$ の体積を有し、その重量は、 $46 \times 10^6$ 億トンになる。このうち酸素は $12 \times 10^6$ 億トンである。年間消費される酸素は150億トンであり、ストックに対して0.0012%である。

炭酸ガスは現在350ppmvを占めており、これは27000億トンに相当する。1ppmvの増加は77.1億トン(C換算で21.3億トン)となる。

CH<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>Oは、炭酸ガスよりも単位量あたりの温暖化寄与の大きいガスである。CH<sub>4</sub>は1.6ppmvで46.6億トン、N<sub>2</sub>Oは0.3ppmvで23.3億トンがストックとして存在する。CH<sub>4</sub>の発生源は水田、家畜(はんすう

表3 グローバル資源バランス・テーブル

		大 気						水				エネルギー						材 料						生物・食糧						
1985年 単位(億トン) 10 <sup>9</sup> トン		O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	粒 子	大 気 水 分	陸 上	海 洋	石 油	石 炭	ガ ス (10 <sup>11</sup> m <sup>3</sup> )	水 力 他 10 <sup>12</sup> Kwh	マ キ	電 力 (10 <sup>12</sup> Kwh)	発 熱 (10 <sup>12</sup> Kcal)	鉄 鉱 石	鉄	石 灰 石	セ メ ン ト	紙	プ ラ ス チ ック ス	肥 料	森 林	穀 物	農 産 物	家 畜	魚 類
ストック量 ストック割合(PPMV)		12×10 <sup>6</sup>	1.8 45μg/m <sup>3</sup>	0.06 ~	23.3 0.3	27000 350	46.6 1.6	3.5 90μg/m <sup>3</sup>	0.13×10 <sup>6</sup>	100×10 <sup>6</sup>	13500×10 <sup>6</sup>	940	13400	855					15300							880				
光合成 自然のサイクル		±2700		0.2	0.6	±3700	1.3		±0.4×10 <sup>6</sup>	±1×10 <sup>6</sup>	±4×10 <sup>6</sup>						±950													
一 次 利 用	採取 リサイクル									30000		29.5	30.8	15.0	2.0				8.9	1.8	12					12.6	18.4	18.9	0.8	
二 次 利 用	エネルギー転換 精製他 発電	-48.9	0.5	0.2		67.2						-0.2 -6.3	-0.2 -19.5	3.6	-2.0	6.6		9.8	13.3							-6.6				
	素材生産																													
	鉄鋼	-1.6	0.1	0.1		9.4							-3.7					-0.6	2.7	-8.9	7.1									
	紙	-1.3				1.8						-0.6						-0.4	0.9				2.7			-2.8				
	セメント	-2.7				3.7						-0.6	-0.8					-0.1	1.5		-12	9.6								
	プラスチック											-0.5											0.5							
	肥料																							1.3						
最 終 利 用	生物的 農業 人類 家畜	-14.0 -19.6				19.3 26.9	0.9	1.2		-21900 -45 -90								4.3 5.9							-1.3	-1.0	-11.0 -7.4	-18.9	-2.2	2.2 -0.8
	工業的 民生 産業 交通	-18.4 -31.8 -13.5	0.1 0.3 0.1	0.3 0.2 0.2	0.1	25.3 43.7 18.5	0.8	0.4 0.2		-1800 -6300		-4.1 -10.5 -6.6	-1.0 -5.6	-7.3 -11.3		-6.6	-1.9 -3.5 -0.2		-1.8 -2.5 -1.2		-2.4 -4.0 -3.2	-2.7				-2.0 -1.2				
処 分	ストックへの追加 廃棄 リサイクル	-151.8	-1.1	1.2	0.7	215.8	4.2	0.6		30000		-29.5	-30.8	-15.0				53.5	-8.9	0.3 1.8	-12	0.5	1.87 0.8	0.5		-13.6 1.3				

動物は飼料の8%のエネルギーをメタンとして排出する)、湿地である。N<sub>2</sub>Oの発生源は森林と化石燃料と見られている。

SO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>は大気汚染物質として知られており、ともに年間1億トン程度発生しているが大気中のストックは大きくなく降雨等によって地上へ降下しており、これは結局地上に堆積するか、川から海へ流れてゆくものと理解される。この他に、大気中に浮遊する粒子があり、平均90 μg/m<sup>3</sup>が計測されている。これは46.6億トンに達する。

## (2) 水

水は陸上に100×10<sup>6</sup>億トン、海中に13500×10<sup>6</sup>億トン、大気中水分として0.13×10<sup>6</sup>億トンがストックとして存在する。人間が利用している水は3×10<sup>4</sup>億トンであり、このうち73%を農業に、21%を産業用に利用している。人類50億が飲用に供しているのは正味で45億トンである。海、陸、大気中の水は互いに移動しているがその大きさは±0.4~4×10<sup>6</sup>億トンであり、ストック量に対して動いている水はごくわずかである。

## (3) エネルギー

石油、石炭、ガスについてはよく知られている。マキは6.6億トンがとり出され途上国を中心に利用されている。利用したエネルギーは結果としてすべて発熱の欄に記入される。この熱には、人類や家畜からの発熱も含まれるが、これは食糧生産時に吸収される。光合成は吸熱反応であり人工的な発熱量の20倍程度の規模になっている。

## (4) 材料

鉄8.9億トン、セメント9.6億トン、紙2.7億トン、肥料1.3億トンが主要な材料として利用されているがこの他に木材が4億トン利用されている。金属資源を考える場合には、鉱石を考慮する必要があり、鉱滓の発生は量的に無視できない規模に達する。ここでは扱っていないが金属は最終用途で利用されているうちに、空気中の酸素を吸収して錆びてゆく。あるいは将来は、SO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>によって金属が減耗してゆくことをこの表で扱わねばならなくなるかも知れない。

## (5) 生物・食糧

森林は41億haあり、その減少は毎年、アフリカで127万ha、南米で319万ha、アジアで176万haと推定される。切り出される木材は年間32億m<sup>3</sup>(約12.6億トンと推定した)でこのうち16.6億m<sup>3</sup>が燃料として使われ、残りが産業用に利用されている。この一部分から2.7億トンの紙が生産されている。

穀物生産は18.4億トンあり、このうち60%が人類に40%が家畜に供給され、家畜は2.2億トンの肉類となる。魚類は8千万トン捕獲されている。

以上は、各々の資源をヨコ軸方向に見た場合であるが、次にタテ軸方向に見ていくつかの補足をする。

光合成は太陽エネルギー(ここには記述されていない)を利用して炭酸ガス3700億トンを酸素2700億トンと炭素1000億トンに分解する。ただし同時に有機物の崩壊で反対方向の反応が生じていてバランスが保たれている。

一次利用と二次利用についてはエネルギーバランス表と同じ扱いであるが、材料資源からの素材生産がここで扱われている。そのため最終用途の産業部門の一部が二次利用のブロックに移動している。

最終用途のところでは、生物的活動としての農業、生物的存在としての人類と家畜を扱っている。人類は穀物11億トン、農産物18.9億トン、肉類2.2億トン、魚類0.8億トンを食糧として、酸素を14億トン吸入して、炭酸ガスを19.3億トン放出する。この計算は、体重70kgの人間が1日に、酸素0.862kgを吸入し、炭酸ガス1.056kgを放出することから計算した。なお、さらに食料水2.51kg、食物中の水分1.01kgをとり入れ、尿1.61kg、呼吸と汗中の水分2.131kg、糞(乾量)0.09kgを放出する<sup>7)</sup>。これに50億人と365日かけると、人類の生物学的活動もかなり大きいことがわかる。

家畜としては、牛12.8億頭、豚8.4億頭、鶏9.4億羽、羊11.6億頭がいる。各々の平均体重を450、60、2、40kgと仮定し、基礎体謝量が体重の0.7乗に比例するとして炭酸ガス放出量を計算してみた。結果は、人類の約1.4倍になっている。

上記の二次利用、最終利用の各々の欄の数値は、投入をマイナスで、産出をプラスで表現している。

最下段のブロックは最終処分であるが、ストックへの追加を符号つきで表わし(マイナスはストックの減少)、廃棄は資源として利用できなくなったものをまとめ、再利用されるものはリサイクルの欄に記入して翌年には一次利用の欄のリサイクルへもどされるようにした。(ここでは同じ数値が入っている)

こうして、一枚の表にして地球上の人類の活動をながめてみると、人間が豊かに生き、文化を生み出し、コミュニケーションを行うために、大量の化石燃料が消費され、大気中の酸素を吸収して、鉄や紙をつくり出し、そのうちのごくわずかをリサイクルして、あとは地球上にゴミの山を築いているという悲しい現実が

みえてくる。こうした資源間の効率のよい関係を築いてゆくことが今後の大きな課題になってよう。

#### 4. グローバルな資源間の関係の考察

以上簡単にグローバル資源バランス・テーブルについて述べたが、この表をもとに様々な検討をすることが次の課題である。

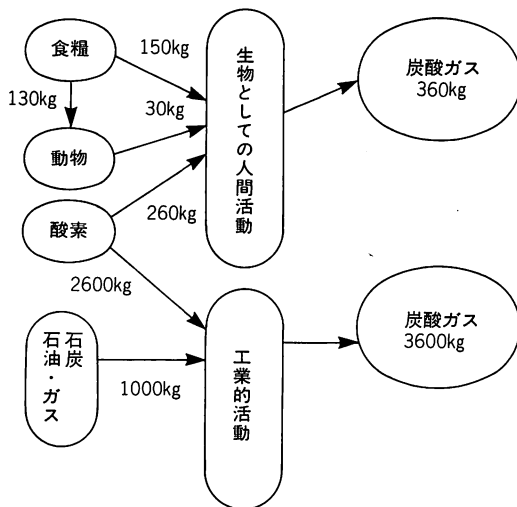
以下には、いくつかの考察について述べる。

##### (1)炭酸ガスの発生量

生物としての人間ひとりの活動をみると、図-1に示すように、一年間に食糧として穀物と肉類を各々150、30kgとり、酸素を260kg消費して、炭酸ガスを360kg放出していることになる。これに対して工業的な活動として、化石燃料を1000kg消費し、酸素を2600kg吸収して炭酸ガスを3600kg放出している。結局、生物的な水準の10倍の規模の炭酸ガスが工業的活動から排出されている。これは世界平均であり、米国では55倍になり開発途上国では限りなくゼロに近いところもある。日本は年間8.9億トンの炭酸ガスを化石燃料の燃焼によって放出しており、これはひとりあたりでみると生物学的放出量の25倍に相当する。

無視しがたいのは家畜であり、人類よりも炭酸ガス放出量は大きい。家畜の一部は宗教的理由から食糧の対象になっていない。また野性動物の発生する炭酸ガスもかなりの量になっていると推定されるが未知数である。ただし上記のような生物学的な活動は光合成による食糧生産によって維持されており、化石燃料のよ

図-1 ひとりあたりの1年間の活動（世界平均）



うに地中から単に掘り出してくるのと違って炭酸ガス濃度の上昇には寄与しない。ここでは、炭酸ガスという視点から人類の活動を比較しようとしたわけである。

##### (2)廃熱と直接的温暖化

エネルギー消費の結果は、そのほとんどが廃熱となって環境中に放出される。このエネルギー量は地球上に降り注ぐ太陽エネルギーの3万分の1程度であり無視し得るものと考えられてきた。ところで、この熱量を大気が吸収した場合にどの程度の温度上昇になるのかを試算してみると興味ある結果を得る。

1985年の世界のエネルギー消費量Eは

$$E=252 \times 10^{18} \text{J}$$

このうち5%は水力発電であり上記の95%は熱として、河川、海、大気中に放出されるが、多くの場合ほとんどが結果として大気中に吸収される。

地球上の空気の量Mは

$$M=4600 \times 10^{12} \text{トン} = 4600 \times 10^{18} \text{g}$$

またこの空気の比熱Cpは

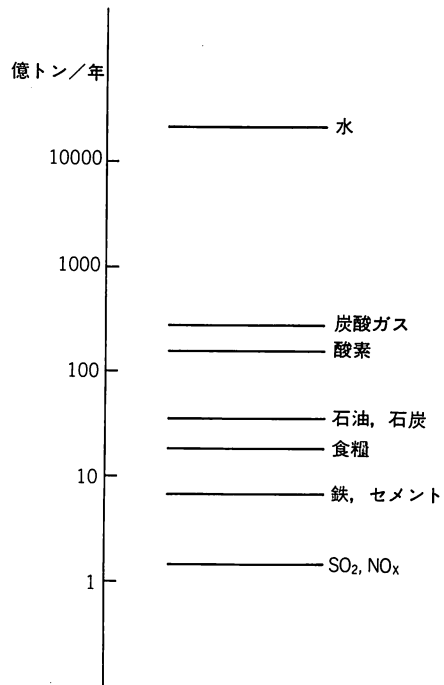
$$C_p = 1.006 \text{J/g} \cdot \text{K} \quad (273 \sim 323 \text{K})$$

したがって、1年間に放出されるエネルギーがもたらす温度上昇は次のようになる。

$$\Delta t = E \times 0.95 / (C_p \times M) = 0.05173 \text{K}$$

この計算結果は、もし大気温度の上昇によって地球

図-2 年間の資源フローの比較



から宇宙空間への熱放出が変わらなければ、毎年約0.052Kの温度上昇になることを示している。あるいは現状のエネルギー消費が19年間継続すると、大気温度は1℃上昇することを意味する。

そこで過去100年間のエネルギー消費 ( $E_{100}$ ) から同様の計算をしてみると

$$E_{100} = 10000 \times 10^{18} \text{ J}$$

$$\Delta t = E_{100} / (C_p \cdot M) = 2.053 \text{ K}$$

すなわちエネルギー消費が大気中に廃熱となって大気温度の上昇をもたらしたとし、これによって宇宙空間への熱放出が増大しなかったとすれば、約2℃の大気温度の上昇があったことになる。

過去100年間の気温の上昇は0.5~0.7℃とされており、これには長期的な地球の気象変化として気温降下の要因も含まれている。また気温が上昇すれば海洋や陸地との熱交換が増大し、海洋と陸地の温度もわずかが増大して気温上昇の程度を弱めていると考えられる。しかしながら、エネルギー消費が歴史的にみると急速に増大してきたこと、そしてこの廃熱が地球上に累積されることは無視できない。太陽エネルギーの入射量は毎年0.03%の統計的変動を示しているが、平均化されるので一方的に増大して蓄積されるものではない。

したがって、エネルギー消費が太陽エネルギーの入射量に比較して小さいからと無視することはできないと考えられる。

上記の計算は、エネルギー消費が増大してゆくと、炭酸ガスによる温暖化だけではなく、「人工的廃熱による直接的温暖化」も考えなければならないレベルにあることを暗示している。

### (3) 資源フローの量的比較

各々の資源が一年間にどの程度利用されているのかをみると、量的な比較を行うことができる。

まず、最も大きいのが水であり、3兆トン/年と推

定されている。次に大きいのが炭酸ガス、そして酸素となり、これに続くのが石油、石炭などのエネルギーであり、さらに食糧と材料がある。そして大気汚染物質とされるSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>は年間1億トンの規模に達しており、主要な工業材料である鉄やセメントの1/10のレベルにまで至っている。このように比較してみるとSO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>は、大気汚染物質というよりも未成熟な技術の使用により大気中に放出された大量の工業材料といえるほどの量であり、未知のまま進行する自然生態系への影響は想像を絶するものになると感じられる。以上の比較をまとめたのが図-2である。

## 5. おわりに

以上簡単にグローバル資源バランス・テーブルについて、その基本的概念といくつかの考察を紹介した。将来は、さらに詳細に資源間の関係を整理して充実したものになりたいと考えている。人類の活動の規模が拡大するにつれて、グローバルな視点に関連した話題が増大しているが、各々の個別の問題に対する対応という形で研究が組織化されているのが現状である。背景にあるデータの整備や個別の問題の相互関係にも注意を払った研究が必要であると考えられる。グローバル資源バランス・テーブルはこうした試みのひとつである。

## 参考文献

1. 槌屋, 「エネルギー耕作型文明」東経選書, 東洋経済新報社, 1980
2. 槌屋, 「グローバル資源テーブル」研究技術計画学会, Vol. 4, No. 2, 1989
3. 松井, 「エネルギー経済論」日本工業新聞社
4. 国際統計要覧, 総務庁統計局, 1988
5. World Resources, 1987, World Resources Institute, Washington
6. World Resources, 1988-89, World Resources Institute, Washington
7. 栗原, 有限の生態学, 岩波新書