

一次エネルギーの利用率

柳井 浩, 高嶋 隆太

いろいろな一次エネルギーの中には、目的によっては、互いに他のもので代替できるものがある。一次エネルギーのほぼ全量を輸入に頼らなければならないわが国としては、総購入費用が少なくなるような購入率を目指すことが求められる。自由市場経済においても、そのような購入率は経済的な意味における“吸引力”の中心として働くはずだ。一方において、地球環境の面からは、CO₂排出の少ないエネルギーへの移行が求められる。本稿は、総購入費用を最小にする購入率をモデルと実際のデータから推定し、三角座標上で現状の利用率と比較、さらに改善のためのヒントを得ようとするものである。

キーワード：各種一次エネルギーの輸入・使用率、総購入費用最小、環境、三角座標表示

1. はじめに

わが国で用いられる一次エネルギーは、原子力、石炭、原油、LPG、LNG等々多様であるが、そのほとんどを海外から輸入しなければならない。どのような割合で購入・使用すれば、総費用を少なくできるだろうか？ いいかえれば、各種のエネルギーの最適購入率はどのようになるだろうか？

わが国は自由市場経済制度のもとにあるので、国全体から見た最適を市場に強制することはできない。それでも、全体としての最適は現状をそちらに引きつける“ある種の吸引力”をもつことが期待される。

その一方において、今日、化石燃料の使用によるCO₂の排出が地球温暖化の原因となるという説が主流を占め、ためにCO₂排出の少ない燃料への移行が求められている。

それでは現状はどうか？ また、CO₂低排出燃料への移行を促進するにはどのような方法が考えられるかが問題になる。本稿では、これらの問題を議論するためのモデルを組み立て、問題の状況を把握し、それにもとづく試論を示す。

モデルでは、エネルギーの量と価格を“kcal”と“円”という共通の尺度の上でとらえ、“購入費用関数”を設定、総支出が最小になるような“最適購入

率”を算定し、その性質を調べ、特に代替可能なエネルギーが3種類の場合については詳しい図解を与える。これによって、さらに多数の種類エネルギーについて論ずる場合にも必要な“直観”も生まれてこよう。

次に、現実のデータとの対比だが、これには本稿の範囲をこえる問題が残っている。例えば、どのエネルギーをどの範囲を代替可能と考えるのかについては、技術的な可能性に加えて、政策的な制約も課せられる。そのための費用もかかる。このような議論に立ち入るためには、多くのデータや、異なる考え方によるモデルの修正も必要になろう。本稿では、それには踏み込まず、むしろそのための準備となる方法の提案にとどめる。

2. モデルによる最適購入率

2.1 購入費用関数

わが国が、あるエネルギー I を x [kcal] 購入するのに要する費用 (外貨) を

$$p_I(x) : \text{エネルギー } I \text{ の購入費用 (円)} \quad (1)$$

として、これを購入費用関数とよぶ (図1)。

購入費用関数の形状に関する仮定：本稿の後半で、この関数のグラフの推定を試みるが、ここでは、

$$“p_I(x) : \text{原点を通る凸増加関数}” \quad (2)$$

と仮定として話を進める。

理由：まず、設備、および、その償却費を別途の費用として取り扱うことにする。このような条件のもとでは、関数が原点を通ることはほぼ自明であろう。今日世界中のエネルギーに対する需要は大きい。一方、限られた生産地が世界の各地に分布し、それぞれ年間産出量には上限がある。仮に、生産地渡しの価格が世

やない ひろし

慶應義塾大学名誉教授

たかしま りゅうた

千葉工業大学 社会システム科学部

〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1

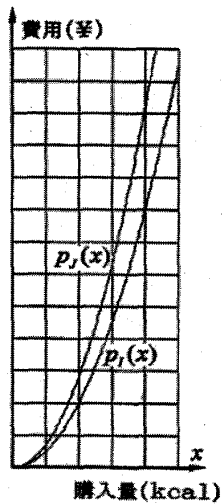


図1 購入費用関数

界共通であるとしても、輸送に要する費用を考えれば、日本で使うエネルギーとしては費用に差が出るのは当然である。もちろん、それも含めて割安なものから購入するにしても、ある一定量以上を一カ所から購入することは不可能であるから、その量を上回れば、スポット買いなど、割高なものの購入に移行せざるを得ない。したがって、購入費用関数の勾配は次第に増加していくことになる。よって、購入費用関数は凸増加関数と考える。□

購入費用関数の独立性に関する仮定：購入費用に関しては、

“各エネルギーの購入費用関数が、他の一次エネルギーの購入量に対して独立”

という仮定をおく。

理由：一次エネルギーの市場は基本的に売り手市場であり、少なくとも短期間で考えれば、それほど激しい値下げ競争は行われまいだろうと考えるからである。□

2次関数の仮定：ところで、このような購入費用関数として、2次関数、

$$p(x) = mx^2 + bx \quad m > 0 \quad b \geq 0 \quad (3)$$

を仮定する。

理由：この関数は、数学的にも単純で、上の条件を満たしているばかりでなく、特に

$$b = 0 \quad (4)$$

の場合が、後述するように実際上との対応も見られるからである。□

2.2 エネルギーの最適配分

どの種類のエネルギーも代替可能であり、エネルギー

の総需要量が x [kcal] であるものとしよう。このとき、各エネルギーを、それぞれ、どれだけ輸入すれば、購入のための総費用が最小になるのかをモデルにもとづいて計算する。モデルの構造をわかりやすくするため、エネルギーの種類が2種類、3種類の場合について述べたのち、 N 種類の場合に話を進める。

代替エネルギーが2種類の場合：いま、エネルギーの総需要量 x が、 I と J という2種類のエネルギー ξ_I, ξ_J によってまかなわれている場合、すなわち、

$$\xi_I + \xi_J = x \quad 0 \leq \xi_I, \xi_J \leq x \quad (5)$$

を考える。購入費用関数を、それぞれ、

$$p_I(\xi_I) = m_I \xi_I^2 + b_I \xi_I \quad m_I > 0 \quad b_I \geq 0 \quad (6)$$

$$p_J(\xi_J) = m_J \xi_J^2 + b_J \xi_J \quad m_J > 0 \quad b_J \geq 0 \quad (7)$$

とすれば、購入のための総費用は

$$p_I(\xi_I) + p_J(\xi_J) \quad (8)$$

となる。したがって、総費用の最小は

$$q_U(x) = \min_{0 \leq \xi_I \leq x} [p_I(\xi_I) + p_J(x - \xi_I)] \quad (9)$$

となる。この関数 $q_U(x)$ を最小総支出関数とよぶことにしよう。また、これを實現する

$$\check{\xi}_I(x) = \arg \min_{0 \leq \xi_I \leq x} [p_I(\xi_I) + p_J(x - \xi_I)] \quad (10)$$

および

$$\check{\xi}_J(x) = x - \check{\xi}_I(x) \quad (11)$$

は、それぞれエネルギー I と J の最適使用量であるが、これらは、簡単な計算によって、

$$\check{\xi}_I(x) = \frac{2m_J x - b_I + b_J}{2(m_I + m_J)}, \quad \check{\xi}_J = \frac{2m_I x - b_J + b_I}{2(m_I + m_J)} \quad (12)$$

$$q_U(x) = \frac{2(m_I m_J)^2}{(m_I + m_J)^2} x^2 + \left[\frac{(m_J b_I - m_I b_J)}{m_I + m_J} - \frac{m_I m_J (m_J - m_I)(b_J - b_I)}{(m_I + m_J)^2} \right] x + \frac{(m_I^2 + m_J^2)(b_I - b_J)^2}{4(m_I + m_J)^2} - \frac{(b_J - b_I)^2}{2(m_I + m_J)} \quad (13)$$

であることがわかる。図2および図3には、最小総支出関数と最適購入量のグラフが示されている。

もっとも、厳密に言えば、最適購入量の値が0と x の間にあるのは、

$$x \geq \max \left[\frac{b_I - b_J}{2m_J}, \frac{b_J - b_I}{2m_I} \right] \quad (14)$$

という条件が成立する場合に限られる。いいかえれば、0と x の間にないということは、全体のエネルギー需要が“きわめて”少ないときに（購入費用関数の一次の項が効いて） I, J いずれか一方のエネルギーだけが専ら用いられるということに対応する。このような状況を含めた数学的な取り扱いも可能ではあるが、煩雑

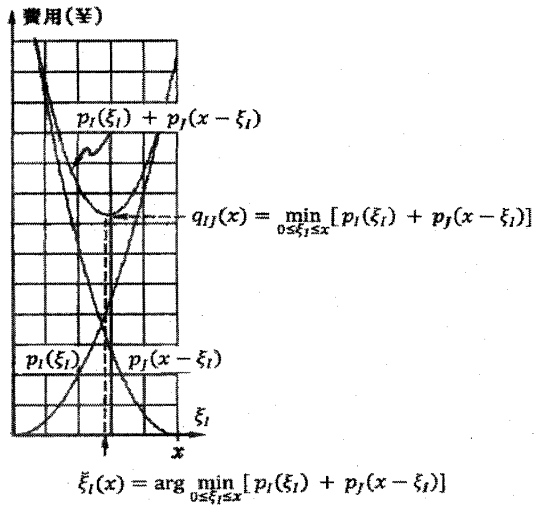


図2 最小総支出

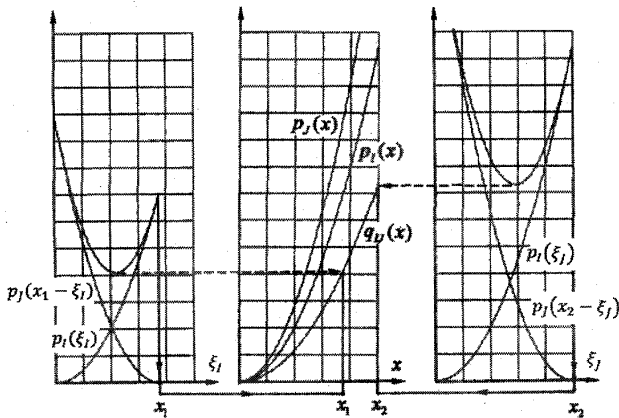


図3 各エネルギーの最小総支出関数
(代替エネルギーが2種類の場合)

になるだけだし、現実にもあまり考えられないことから、ここでは、条件(14)がみたされる範囲で考えることにする。

代替エネルギーが3種類の場合：エネルギー I, J および K の購入費用関数が、それぞれ、2次関数

$$p_I(\xi_I) = m_I \xi_I^2 + b_I \xi_I \quad m_I > 0 \quad b_I \geq 0 \quad (15)$$

$$p_J(\xi_J) = m_J \xi_J^2 + b_J \xi_J \quad m_J > 0 \quad b_J \geq 0 \quad (16)$$

$$p_K(\xi_K) = m_K \xi_K^2 + b_K \xi_K \quad m_K > 0 \quad b_K \geq 0 \quad (17)$$

であるものとしよう。このとき、最小総支出関数は

$$q_{IJK}(x) = \min [p_I(\xi_I) + p_J(\xi_J) + p_K(\xi_K)] \quad (18)$$

$$\xi_I + \xi_J + \xi_K = x \quad 0 \leq \xi_I, \xi_J, \xi_K \leq x$$

である。ラグランジュ乗数法を用いればこれに最小を与える ξ_I, ξ_J, ξ_K が

$$\check{\xi}_I = \frac{1}{2m_I} \left[2x + \frac{b_J - b_I}{m_J} + \frac{b_K - b_I}{m_K} \right] / \left[\frac{1}{m_I} + \frac{1}{m_J} + \frac{1}{m_K} \right] \quad (19)$$

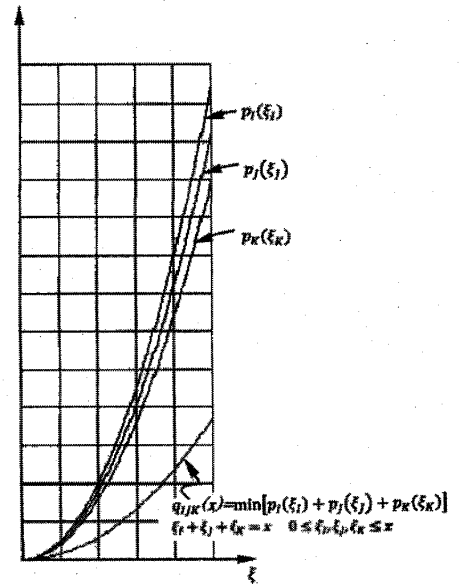


図4 総支出関数と最小総支出関数
(代替エネルギーが3種類の場合)

$$\check{\xi}_J = \frac{1}{2m_J} \left[2x + \frac{b_I - b_J}{m_I} + \frac{b_K - b_J}{m_K} \right] / \left[\frac{1}{m_I} + \frac{1}{m_J} + \frac{1}{m_K} \right] \quad (20)$$

$$\check{\xi}_K = \frac{1}{2m_K} \left[2x + \frac{b_I - b_K}{m_I} + \frac{b_J - b_K}{m_J} \right] / \left[\frac{1}{m_I} + \frac{1}{m_J} + \frac{1}{m_K} \right] \quad (21)$$

となることが分かる。この場合にも、これらの値が計算上、負の値や、 x を超える値になることもあり得るが、これは、エネルギーの少なくとも一種類が全く購入されない場合に対応するので、問題はエネルギーが2種類の場合に帰着するから、除外して考えることにする。

さらに、これらの $\check{\xi}_I, \check{\xi}_J, \check{\xi}_K$ を

$$p_I(\check{\xi}_I) + p_J(\check{\xi}_J) + p_K(\check{\xi}_K) \quad (22)$$

に代入すれば最小総支出関数が得られる。これらを示したのが図4である。

代替エネルギーが N 種類の場合：この場合も、計算は上と同様である。結果だけ示しておくことにしよう。すなわち、エネルギー I の購入費用関数が

$$p_I(\xi) = m_I \xi^2 + b_I \xi \quad m_I > 0 \quad b_I \geq 0 \quad (23)$$

$$I = 1, 2, 3, \dots, N$$

であれば、総使用量が x であるときの最適購入量はやはりラグランジュ乗数法をもちいて計算すれば、

$$\check{\xi}_I = \frac{1}{2m_I} \left[2x + \sum_{L=1, L \neq I}^N \frac{b_L - b_I}{m_L} \right] / \sum_{L=1}^N \frac{1}{m_L} \quad (24)$$

$$I = 1, 2, 3, \dots, N$$

となる。厳密に言えば、この場合にも計算上の最適購入量が区間 $[0, x]$ の外に出ることもあるが、現実的でないので、考察の対象から省くことにする。

2.3 エネルギーの最適購入率

次に、わが国全体として見たとき、どのエネルギーをどのような割合で購入すれば費用が少なくて済むのか？ すなわち、最適購入率という点から見てみよう。エネルギーが N 種類の場合の最適購入率 s_I ($I=1, 2, 3, \dots, N$) は

$$s_I = \frac{\xi_I}{x} \quad (25)$$

で定義されるが、特に(25)式において

$$b_I = 0 \quad I=1, 2, 3, \dots, N \quad (26)$$

の場合には、

$$s_I = \frac{\xi_I}{x} = \frac{1}{m_I} / \sum_{I=1}^N \frac{1}{m_I} \quad (27)$$

となり、総購入量 x にかかわらず一定である。また、どの I についても、分母が共通であるから、

$$s_1 m_1 = s_2 m_2 = s_3 m_3 = \dots = s_N m_N \quad (28)$$

すなわち、各エネルギーの最適購入率が購入費用関数の係数 m_I に反比例することがわかる。

三角図表表示

ここで、エネルギーが3種類の場合に、購入量や総支出をグラフ上に表示する方法を示そう。實際上、エネルギーを3種類に絞っても、ほぼ全体を見渡せる場合が少なくない。

これらのエネルギーの購入量 ξ_I, ξ_J, ξ_K によって総購入量 x が占められるとすれば、

$$\xi_I + \xi_J + \xi_K = x \quad 0 \leq \xi_I, \xi_J, \xi_K \leq x \quad ((18)再)$$

が満たされるから、 (ξ_I, ξ_J, ξ_K) は直交座標空間では図5に示すような3点

$$(x, 0, 0), (0, x, 0), (0, 0, x) \quad (29)$$

を頂点とする正三角形上の点に対応する。

図6はこの正三角形を切り取って、その上に総支出

$$s_{IJK}(\xi_I, \xi_J, \xi_K) = p_I(\xi_I) + p_J(\xi_J) + p_K(\xi_K) \quad (30)$$

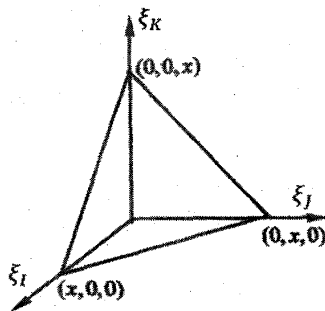


図5 $(x, 0, 0), (0, x, 0), (0, 0, x)$ を頂点とする正三角形

の最小点と、等高線のいくつかを示したものである。

つぎに、やはり三角座標上で最適購入率を求めてみよう。エネルギー I, J, K の最適購入率については、

$$s_I + s_J + s_K = 1 \quad 0 \leq s_I, s_J, s_K \leq 1 \quad (31)$$

が成立するから、3次元空間では、 $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$ の三点を頂点とする正三角形の上の点になる。さらに、(28)式からも導かれるように、 s_I, s_J, s_K の間には、

$$\frac{s_I}{s_J} = \frac{m_J}{m_I}, \quad \frac{s_J}{s_K} = \frac{m_K}{m_J}, \quad \frac{s_K}{s_I} = \frac{m_I}{m_K} \quad (32)$$

という関係が成立する。

このうち第2の関係を例に取ってみれば、 $\frac{s_I}{s_K} = \frac{m_K}{m_J}$ は図7において s_I 軸を含み2点 $(0, 1, 0), (0, 0, 1)$ を結ぶ線分を $m_K : m_J$ に内分する点を通る。したがって、 $\frac{s_I}{s_K} = \frac{m_K}{m_J}$ は三角座標の頂点 $(1, 0, 0)$ と底辺を $m_K : m_J$ に内分する点を結ぶ線分になる。(32)式の他の関係についても同様のことがいえる。そこで、平面

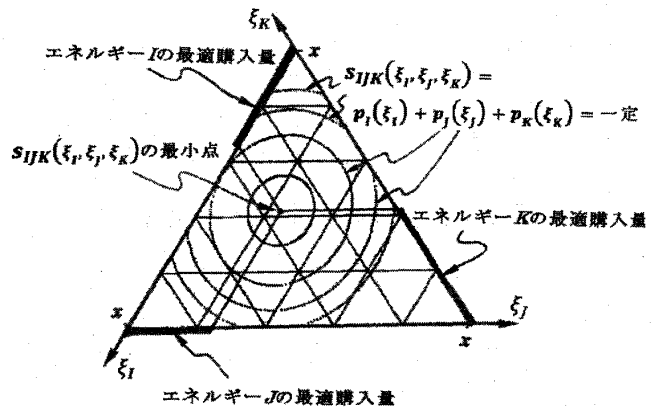


図6 総支出の等高線

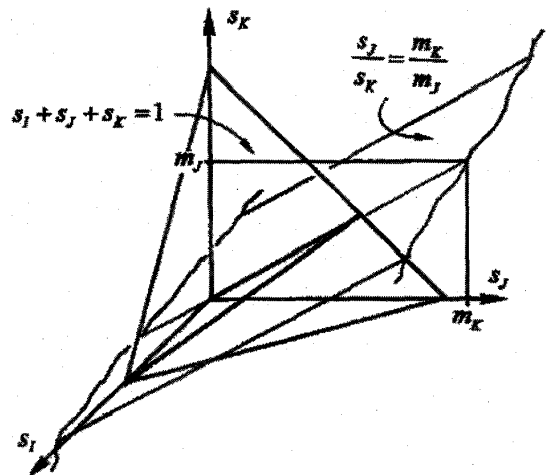


図7 $s_I + s_J + s_K = 1$ と $\frac{s_I}{s_K} = \frac{m_K}{m_J}$

上に移した三角図表上で(2)式の各関係に対応する線分を描いたのが図8である。最適購入率はこれらの線分の交点に対応する。

また、3種類のエネルギー中、一種類の価格だけが変化するときには、残る二者の購入費用関数の係数は不変であるから、三角図表上これに対応する線分上を最適購入率の点が移動する。例えば、 m_J だけが変化するものとすれば、最適占有率は頂点 $s_I=1, s_J=0$ を通る線分上を移動する。 m_I のいろいろな値についてこれを作図することも可能ではあるが、煩雑であるので計算機によって作図したものの一例を図9に示す。

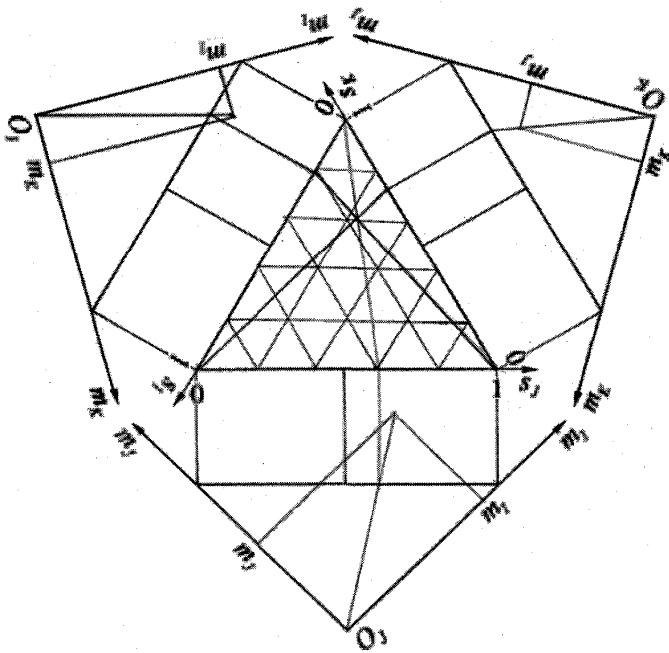


図8 最適購入率の作図

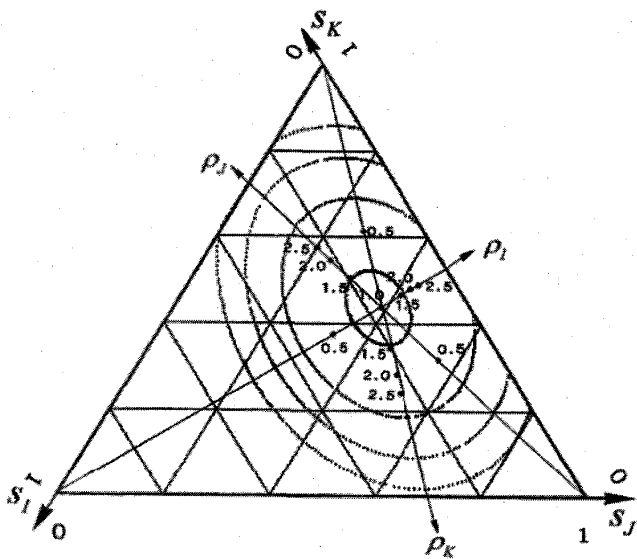


図9 三角座標上での最適購入率の変化

$m_I(m_J, m_K)$ だけが $\rho_I(\rho_J, \rho_K)$ 倍になったときの最適占有率が $\rho_I(\rho_J, \rho_K)$ と示されている直線上、その数値の位置に移動することが示されている。

3. 実状との対比・検討

わが国で用いられている一次エネルギーはさまざまではあるが、ここではCO₂排出の主要部分として、

石炭, LNG, 原油

の三種の化石燃料に絞って検討してみることにしよう。これらは、実質上、全量を輸入に頼っている。もちろん、これらすべてをCO₂排出のないものに変えるのが環境面での理想であるが、即時移行は当面無理であるから、この三者の間で考える。

3.1 購入費用関数の推定

上に述べたモデルにもとづいて現状を考察するには、購入費用関数の推定が必要である。財務省貿易統計[1] (2006年10月)に発表された、原料炭、一般炭、原油、LNG、LPGの輸入量とその購入費用に関する2003年09月から2006年08月までの3年間のデータにもとづいて、石炭(I)、原油(J)、LNG(K)の三者について購入費用関数を推定してみたのが図10である。なお、ここに“石炭”は、元のデータでは一般炭と原料炭に分けられていたものを合計したものである。

これらのグラフから、購入費用関数を、

$$p_I(\xi_I) = m_I \xi_I^2, p_J(\xi_J) = m_J \xi_J^2, p_K(\xi_K) = m_K \xi_K^2 \quad (34)$$

石炭 : $m_I = 0.0093$ $b_I = 0$

原油 : $m_J = 0.0144$ $b_J = 0$

LNG : $m_K = 0.0376$ $b_K = 0$

によって近似することにした。

これをもとに、最適購入率を計算すれば、

石炭 : 53%, 原油 : 34%, LNG : 13%

となる。これを三角座標上にとり、購入費用の等高線を描いたのが図11である。

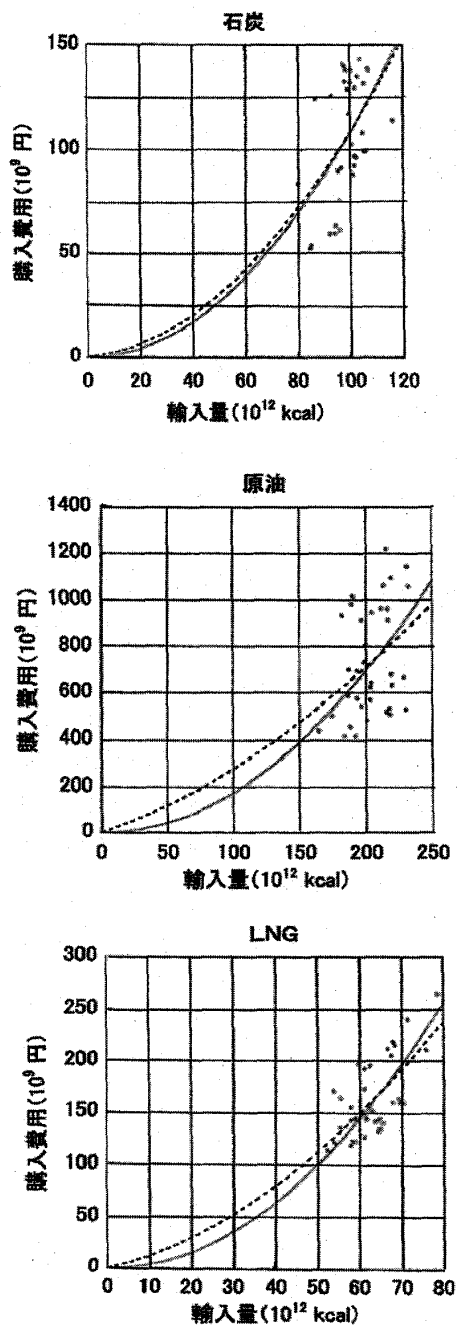
3.2 議論の例—最適購入率の計算と現状の比較

一方、2003年09月から2006年08月までの間の三者の購入率(kcalにもとづく)の実績を見ると、

石炭 : 27%, 原油 : 56%, LNG : 17%

となっている。図にも見るように、現状とモデルによる最適点は乖離しているが、これからどのようなことを読みとるのかにはいろいろな可能性があらう。

購入費用という点からすれば、現状は最適購入費用を30%上回っている。この議論は、上記3種のエネルギーが代替可能だという仮定のもとでなされているが、現実には、自動車、航空機、船舶および化学工



— 関数 $a\xi^2$ のあてはめ
 - - - 関数 $a\xi^2 + b\xi$ のあてはめ

図10 購入費用関数の推定

業用原料の場合のように今日の技術では直には変えられないものもあるし、計画経済の下で行われているわけではないのだから、この程度は致し方ないともいえる。経済性のために、そのような技術の開発を一層急ぐべきだとすることもできよう。

また、CO₂の排出量を削減したいという環境面から見れば、石炭より原油、原油よりLNGの方が炭素含有量が少ないだけに好ましい。図11の三角座標で

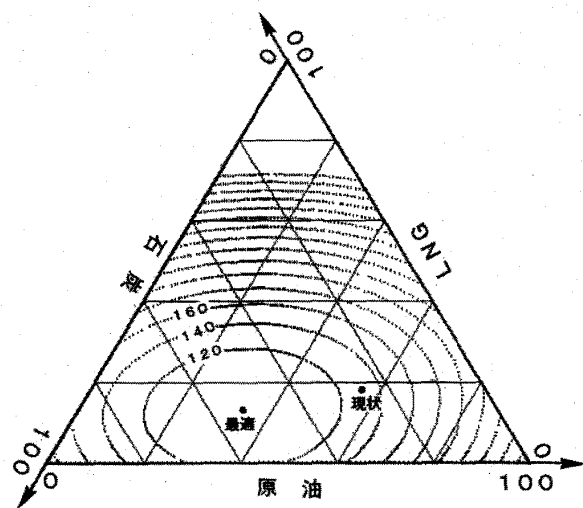


図11 最適購入率と利用率の現状

いえば、購入率が右上方にあるほど望ましい。それに対して、最適購入率というのは、購入費用を最小にする比率であるから、経済性からすれば、計画経済の下でなくても、“吸引力”の源になっているはずであろう。だから、環境面からすれば、現状はむしろ好ましい方向に向かっているともしえる。さらに、この最適点そのものを右上方に移動させることは、CO₂放出量の削減に対するインセンティブになるはずだ。

例えば、パイプラインによってLNGの輸送費用が削減されるならば、(34)式における係数 m_K が減少し、結果として最適点が三角座標の上の頂点に向かって引き上げられよう(図9参照)。もちろん、パイプラインの新設には莫大な費用もかかることであるから、いうまでもなく、それらに伴う問題もあわせて考えなければならない。

謝辞 本稿の作成にあたっては、「世界のインフラストラクチャー」研究会の参加者、特に、主査の栗田治教授からは積極的な御討議をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] <http://www.customs.go.jp/tokei/info/index.htm>
- [2] 総合資源エネルギー調査会 需給部会「2030年のエネルギー需給展望」要約版2004年06月。
- [3] <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/html/i2130000.html>
- [4] 経済産業省「資源・エネルギー統計年表」。