資源価格の周期的特性について

新　熊　隆　嘉

資源価格経路に関する理論研究を中心にレヴューするとともに、その中で資源価格の周期的特性、とくに資源価格の低下局面を説明しうる要因の特定化を試みた。その結果、競争的市場経済下で、価格の一時的な低下局面の説明要因となりうるのは、生産能力おける制約と、生産能力への投資における制約、および鉱山間における品位の非同質性であることが明らかになった。

1．はじめに

資源価格とくに金属資源価格には、次のような特徴があると指摘されてきた。一つは、長期的な特性であり、長期的に金属資源価格はU字型価格経路をもつといわれている。この長期的なU字型価格経路の説明を試みた理論研究として、Pindyck(1978)、Levhari and Pindyck(1981)、Slade(1982)がある。

金属資源価格がもつもう一つの特性は、約 10 年という周期で上昇と下降を繰り返すという周期的特性である。最も単純な Hotelling(1931)モデルでは、資源価格はつねに利子率で上昇し続けなければならないので、とくに周期的に表れる価格の低下局面を理論的に導出することは非常に困難である。したがって、この周期的特性を理論的に解明した研究はほとんど見当たらない。そこで本研究では、先行研究をレヴューするとともに、その中で価格の低下局面を説明しうる要因の特定化を試みる。

2．資源価格の低下局面を説明する諸要因

新熊・藤井・西山（1997）において、金属資源価格と鉱山の開山・閉山との関係を調査した結果、次のようなことがわかった。まず、鉱山の閉山と新規開山は時間軸上に一様に分布しているのではなく、それらには一個所に集中する傾向が存在する。次に、旧鉱山（群）の大量閉山と新規鉱山の開山ブームは連続的に生じ、開山ブームの中で価格の低下局面が現れる。

このように価格の低下局面は、現在稼働中の鉱山から新規に開発された鉱山への、主要供給源の新旧交代の時期に生じる可能性が高い。以下では、第一に、鉱山間での品位の非同質性と価格の低下局面との関係に着目し、第二に、生産過程における次のような技術的諸特性と価格の低下局面との関係に着目する。すなわち、(イ) 莫大な set up コスト (固定費用) の存在、(ロ) 生産能力における制約 (鉱業が資本集約的であるため、他の産業に比べて、生産能力をこえた大幅な増処理には困難が伴う)、(ハ) 投資における制約 (鉱業における生産拠点が地下に存在するため、単位時間あたりの投資額には上限が存在する) をとりあげる。したがって、主要供給源の新旧交代の時期に生じるであろう、価格の低下局面が上の (イ)、(ロ)、(ハ) のどの要因によって説明され、そこに鉱山間での品位の非同質性がどのように関係するのかを検討してゆく。

まず、上の (イ) から (ハ) の要素のいずれをも考慮しないが、鉱山間での品位の非同質性のみを考慮したケースを検討する。このケースは、Hartwick(1978)論文によって分析されている。そこでは、n 個の鉱山が存在し、鉱山 i は、品位 g_i と資源ストック量 S_i によって区別される。この場合、社会的最適化問題の観点からは、採掘費用が低い鉱山から順に開発していくのが最適であり、さらに、最適価格経路はつねに上昇していく。すなわち、(イ) から (ハ) のいずれをも考慮に入れない場合は、価格経路の低下局面を示すことはできない。

次に、(イ) の set up コストの存在を取り入れたモデルとして、Hartwick, Kemp and Long (1986)論文がある。ただし、ここでは鉱山間において品位は同質であると仮定される。以下で、set up コストの存在が価格の低下局面を導き得ないことをみよう。彼らのモデルは、社会的最適化問題の枠組みで記述されているが、そこで展開される論理から、完全競争市場の枠組みで set up コストが価格経路に与える影響を容易に推測することができる。彼らは、社会的効用関数 U の割引現在価値が最大になるように、複数の鉱山を順に開発する問題を考えた。ただし、社会的計画者は、各鉱山を開発する時点で各鉱山共通の set up コストを支払わなくてはならない。また、社会的効用関数 U は、単位時間あたりに採掘される資源フロー量 q のみに依存するものとし、採掘費用はゼロとする。そこで得られた結論は、限界効用 ($U'(q)$) が、次の鉱山を開発する時点において、不連続的に下落するというものである。その理由は以下の通りである。

社会的最適化の立場からは、一つの鉱山を完全に採掘してから、次の鉱山を開発するのが最適となる。というのは、そうすることで、コミュニティーの利害を代表する社会的計画者が支払うコスト (set up cost のみ) の割引現在価値を最小にできるからである。一つの鉱山が採掘されている間は、$U'(q)$ が利

子率で上昇するのが最適となる。そうでなければ、社会的計画者は、その鉱山から引き出しうる便益のフローの価値を増加させることができる。問題は次の鉱山の採掘に移行する時点である。その時点においては、set up コストを支払わなければならないが、金融市場との裁定条件から、その利払いが補償されなくてはならず、そのためには、$U-qU'$で表される効用単位の消費者余剰は不連続的に上昇しなければならない。U は q の凹関数なので、$U-qU'$は q の増加関数である。したがって、次の鉱山の採掘に移行する時点においては、限界効用$U'(q)$は、不連続的に下落する。この論理を競争市場の枠組みに適用すれば、$U'(q)$は、資源価格と考えられるので、ある鉱山の採掘が開始される時点において、価格は不連続的に下落せねばならない。ところが、その時点において、金融市場との裁定条件から、set up コストの利払いが補償されるためには、競争市場においては、価格はむしろ不連続的に上昇しなければならない。というのは、社会的計画問題における目的関数が、効用関数の割引現在価値であるのに対し、競争市場でのそれは、各鉱山の利潤のそれであるからである。このことは、set up コストが存在する場合、社会的最適化問題の解と競争市場均衡解が一致しないことをも意味している。

次に、(ロ)生産能力における制約をいれた Olsen(1989)論文をみよう。Olsen は、投資制約（一時点において可能な投資の上限）がないかわりに、生産能力において制約がある場合について、複数の鉱山における、社会的に最適な投資・採掘計画問題を考えた。ただし、ここでも鉱山間において品位は同質であると仮定されている。生産能力にのみ依存する投資費用について、収穫逓減を仮定すれば、初期時点（ｔ＝０）において、すべての鉱山に生産能力を分散させることが社会的に最適となる。Olsen(1989)論文での主要な関心は、ｔ＞０における、生産能力の拡張にある。生産能力拡張への投資が生じるとともに、価格が一時的に低下するのではないかと思われるが、そうはならない。以下でそれをみよう。

q を現在時点における、すべての鉱山からの採掘量とし、そこから得られる便益を B(q)とし、限界便益を M(q)とする。すなわち、$M(q)=B'(q)>0$、かつ、$M'(q)<0$とする。q^iを鉱山 i の採掘量、Q^iをその生産能力とし、v^iをその追加的生産能力とする。$C_i(Q^i)$を鉱山 i において、Q^iを設置する費用とする。さらに、$C_i(Q^i)$は凸で、$C_i(0)=0$ とする。すると、生産能力 $Q^i(1)$から $Q^i(2)$への拡張にかかる投資費用は、$C_i(Q^i(2))-C_i(Q^i(1))$と表すことができる。したがって、もし、生産能力が連続的に時間区間 J において拡張されるならば、投資費用の割引現在価値は、

$$\int_J C_i'(Q^i(t))\dot{Q}_i(t)e^{-rt}dt$$

と表される。また、採掘費用はゼロとする。すると、社会的最適化問題は、v^i と q^i を制御変数として、次のようになる。

$$\max \int_0^{\infty} [B(\sum q_i(t)) - \sum C_i'(Q^i(t))v^i(t)]e^{-rt}dt - \sum C_i(Q^i(0))$$

$$s.t.\dot{Q}^i(t) = v^i(t) \geq 0, \dot{R}_i(t) = -q^i(t), 0 \leq q^i(t) \leq Q^i(t), i = 1, \ldots, n \tag{1}$$

$q_t = \sum q^i(t)$ であるので、(1)のハミルトニアンおよびラグランジアンは、

$$H_t = [B(q_t) - \sum C_i'(Q^i(t))v^i(t)]e^{-rt} - \sum \lambda^i q^i(t) + \sum \theta^i(t)v^i(t) \tag{2}$$

$$L_t = H_t + \sum \gamma^i(t)(Q^i(t) - q^i(t)) \tag{3}$$

次に、最適化の必要条件は、

$$\theta^i(t) - C_i'(Q^i(t))e^{-rt} \leq 0, v^i(t) \geq 0, i = 1, \ldots, n \tag{4}$$

$$M(q_t)e^{-rt} - \lambda^i - \gamma^i(t) \leq 0, q^i(t) \geq 0, i = 1, \ldots, n \tag{5}$$

$$q^i(t) - Q^i(t) \leq 0, \gamma^i(t) \geq 0, i = 1, \ldots, n \tag{6}$$

$$\dot{\theta}^i(t) = -\partial L/\partial Q_i = C_i'(Q^i(t))v^i(t)e^{-rt} - \gamma^i(t), i = 1, \ldots, n \tag{7}$$

また、初期時点における、最適な初期生産能力 $Q^i(0)$ を決定するための条件として、

$$\theta^i(0) - C_i'(Q^i(0)) = 0, i = 1, \ldots, n \tag{8}$$

が必要である。双対変数 λ^i, $\theta^i(t)$, $\gamma^i(t)$ は、それぞれ、資源ストック量、追加された生産能力一単位、即戦力としての生産能力一単位の現在価値シャドウ・プライスである。

今、ある鉱山 k において、区間 J_k で、生産能力の拡張 ($v^k(t)>0$) が生じるものとする。そのとき、(4)を t で微分して、(7)を用いると、

$$\gamma^k(t) = rC_k'(Q^k(t))e^{-rt} \qquad t \in J_k \tag{9}$$

となる。$\gamma^k(t)$ は、即戦力としての生産能力一単位の現在価値シャドウ・プライスなので、(9)は、生産能力の拡張が行われる限り、この限界価値が次の生産能力一単位の投資を限界的に前倒しすることの費用に等しくなることを意

味する。明らかに、生産能力の拡張が行われるときには、生産能力の制約は顕在化しており、かつ、(5)より、

$$M(q_t) = \lambda^k e^{rt} + rC_k'(Q^k(t)), \qquad t \in J_k \tag{10}$$

を得る。$C_k'' > 0$なので、(10)の右辺はtの増加関数で、したがって、総生産量q_tは、拡張が行われている限り、減少していなければならない。このとき、生産が減少している鉱山が少なくとも一つ存在していなければならない。これを鉱山jとする。jにおいては、生産能力の制約は顕在化しておらず、かつ、(5)と(6)より、

$$M(q_t) = \lambda^j e^{rt} \tag{11}$$

が言える。したがって、任意のある鉱山において生産能力の拡張が行われている限り、「資源価格が利子率で上昇するという」Hotelling定理は成立している。このように、社会的最適化の枠組みにおいては、生産能力の拡張は、資源価格（資源一単位から得られる限界便益、M(q)）が利子率で上昇しているときのみ生じる。

Cairns and Lasserre(1991)は、上のOlsen(1989)論文における、限界便益（M(q)）の時間経路を分析している(Cairns and Lasserre(1991)論文の付録2)。すなわち、生産を行っているすべての鉱山iについて、(5)より、$\gamma^i = M(q_t)e^{-rt} - \lambda^i$が成立し、したがって、$\dot{\gamma}^i = (\dot{M} - rM)e^{-rt}$となる。もし、生産を行っている任意の鉱山iに対して、$\gamma^i = 0$ならば、$\dot{M}/M = r$（(11)と同じ)が成立する。逆に、もし、生産を行っているすべての鉱山に対して、$\gamma^i > 0$ならば、上のOlsen(1989)の議論によって、いかなる鉱山においても生産能力の拡張は生じない。この場合、生産を行っているすべての鉱山において、$q^i = Q^i$。よって、$\dot{M}/M = 0$。すなわち、社会的最適化の枠組みにおいては、資源価格は、利子率で上昇するか、一定にとどまるかのどちらかである。

以上のように、Olsen(1989)は、社会的最適化の枠組みにおいて、資源価格が一定となる局面を導出した。ところが、Hartwick, Kemp and Long(1986)論文でみたように、set upコストが存在する場合や、資本制約等の制約が存在する場合、社会的最適化問題の解と、競争市場を仮定した問題の解とは必ずしも一致しない。また、Olsen(1989)論文では、最も価格の低下局面が現れやすいと思われる、ある鉱山から次の鉱山へ採掘が移行する期間の分析がなされていない（すべての鉱山は、t＝0において開発されてしまう)。

３．資源価格の低下局面の導出―Cairns and Lasserre(1986)論文とその拡張―

次に競争市場を仮定した、Cairns and Lasserre(1986)論文をみよう。Olsen(1989)は、(ロ) 生産能力における制約をいれた場合に、資源価格が利子率で上昇する局面とそれが一定となる局面が存在することを社会的最適化の枠組みで示したが、Cairns and Lasserre(1986) (以下では、Ｃ―Ｌとする) は、(ロ) に加えて、(ハ) 投資制約をいれたモデルを考えた。また、鉱山間での品位の非同質性が仮定されている。さらに、そこでは、競争市場の仮定がおかれている。

Ｃ―Ｌは、(鉱山間において品位が) 非同質なｎ個の鉱山を仮定し、資源価格経路に関して、次の結論を得た。すなわち、任意の価格上昇期間のあとに価格の非上昇期間が存在する (Ｃ―Ｌ論文の命題Ⅳ. 3. (b))。後に、この命題の経済的意味を考察するが、その考察を簡単にするため、以下では、この命題をn=2のケースについて示す。

各鉱山は、それが所有する鉱石の品位g_iによって、区別され、平均採掘費用は各鉱山共通のｃ (一定) である。鉱山ｉにおける生産能力拡張への投資を$I_i(t)$、採掘量をq_iとする。また、その生産能力をK_iとし、投資額の上限をＪとする。さらに、それが保有する資源量を$M_i(t)$とする。また、通常の右下がりの需要曲線が仮定される。一単位あたりの投資費用をＹ (一定) とする。すると、各鉱山の所有者は、割引現在利潤が最大になるように次の変数を決定しなければならない。すなわち、S_i(投資開始時点)、A_i (採掘開始時点)、T_i (採掘終了時点) および、$q_i(t)$と$I_i(t)$を各時点で決定する。すると、鉱山ｉの直面する問題は、次のように表すことができる。

$$Max\int_0^\infty e^{-rt}\{[pg_i-c]q_i-YI_i\}dt$$

s. t.

$$-q_i=\dot{M}_i,\qquad \int_{A_i}^{T_i}q_i(t)dt\le M_i(0)$$

$$I_i=\dot{K}_i,\qquad K_i(0)=0$$

$$0\le q_i\le K_i,\qquad 0\le I_i\le J,\qquad i=1,2$$

この問題の時価ラグランジアンは、

$$L_i=(pg_i-c)q_i-YI_i-u_iq_i+v_iq_i+w_i(K_i-q_i)+x_iI_i+y_iI_i+z_i(J-I_i)$$

最適化のための必要条件は、次のようになる。

$$0 = \partial L_i / \partial q_i = pg_i - c - u_i + v_i - w_i \tag{12}$$

$$0 = \partial L_i / \partial I_i = -Y + x + y - z \tag{13}$$

$$\dot{u}_i - ru_i = -\partial L_i / \partial M_i = 0 \tag{14}$$

$$\dot{x}_i - rx_i = -\partial L_i / \partial K_i = -w_i \leq 0 \tag{15}$$

u_i は、鉱山 i における資源（鉱石）一単位の時価シャドウ・プライスである。(14)より、$u_i=u_i(0)e^{rt}$ となり、Hotelling 定理が成立する。x_i は、鉱山 i における追加された生産能力一単位の時価シャドウ・プライス、w_i は、鉱山 i における即戦力としての生産能力一単位の時価シャドウ・プライスを表す。

今、$g_2<g_1$ とする。C―L の命題 I における議論により、鉱山 1 と鉱山 2 の採掘経路は、図 1 のようになる。したがって、T_2 までに鉱山 1 は枯渇している。また、T_1、T_2 における横断面条件（transversality condition）より、$w_1(T_2)=w_2(T_2)=0$ となる。よって、T_2 においては、(12)式より、$pg_1 - c - u_1 \leq 0$、かつ、$pg_2 - c - u_2 = 0$ でなければならない。これより、$0 < c/g_2 - c/g_1 \leq u_1/g_1 - u_2/g_2$ が成立する。よって、$u_2/g_2 < u_1/g_1$ を得る（C-L 論文の命題 II. (A)）。今、$t \in (S_2, T_1)$ において、$\dot{q}_2 < 0$ となるとしよう。その区間の t において、(12)式は、$pg_1 - c - u_1 = 0$、かつ、$pg_2 - c - u_2 = 0$ となる。これを t で微分すると、$\dot{p} = ru_1/g_1 = ru_2/g_2$ を得る。ところが、これは上の結果に矛盾する。よって、$t \in (S_2, T_1)$ において、$\dot{q}_2 < 0$ となることはない。したがって、その区間において、(12)式を微分すると、

$$\dot{p} = ru_1/g_1 = ru_2/g_2 + \dot{w}_2/g_2 - \dot{v}_2/g_2 \tag{16}$$

を得る。$u_1/g_1 > u_2/g_2$ なので、(16)より、鉱山 2 が生産している限り（$\dot{v}_2 = v_2 = 0$）、$\dot{w}_2 > 0$ である。よって、$t \in (S_2, T_1)$ においては、$w_2 > 0$ となる。したがって、$w_2 = pg_2 - c - u_2$ の連続性より、$t=T_1$ において、$\dot{q}_2 < 0 (w_2 = 0)$ となることはなく、T_1 以降の、T_1 を含むある区間において、価格の非上昇期間が存在する（C―L の命題 IV. 3. (b)）。C―L では、価格経路に関する分析はここで終わっているので、以下では、価格が厳密に低下するのは、どのような場合であるかが、著者において考察される。

$t \in (S_2, T_1)$ においては、(16)より、つねに価格は上昇する。したがって、価格の低下局面が存在しうるのは、T_1 以降であり、図 1 において、q_2 が経路 2 をもてば、総生産量が区間 (T_1, B'_2) において増加するので、その区間において価格は減少する（$\dot{p} < 0$）。ここで、B_2 と B'_2 は、それぞれ経路 1 と経路 2 における、投資終了時点を表す。

以下では、次のような線形の需要関数を仮定する。すなわち、

$$p = b - aQ \tag{17}$$

ここで、$Q = g_1 q_1 + g_2 q_2$ は市場へのメタル供給量を表わし、また、b と a は定

数である。

今、q_2が、経路２をもつものと仮定する。区間(T_1, B'_2)において、(12)式をｔで微分すると、$\dot{w}_2 = \dot{p}g_2 - \dot{u}_2 = \dot{p}g_2 - ru_2$となる。よって、その区間では、$\dot{p} < 0$なので、$\dot{w}_2 < 0$である。また、上の(16)によって、区間($S_2$, T_1)においては、$\dot{w}_2 > 0$となる。したがって、$w_2(t)$は、T_1より前においては増加し、T_1より後においては減少する。すなわち、

$$\dot{w}_2 = ru_1 g_2 / g_1 - ru_2 > 0, \quad \dot{p} > 0 \quad \text{if} \quad t \in (S_2, T_1) \tag{18}$$

$$\dot{w}_2 = \dot{p}g_2 - ru_2 < 0, \quad \dot{p} < 0 \quad \text{if} \quad t \in (T_1, B'_2) \tag{19}$$

(18)は、(16)を書き換えたものである。ところが、w_2の経路は鉱山１と２の品位格差の大きさに依存する。このことを示すために、両鉱山で品位格差が大きい場合（このとき、鉱山２の品位が鉱山１のそれに比較してかなり劣る）をケースＬとし、品位格差が小さい場合（このとき、鉱山２の品位は鉱山１のそれに比較して遜色をとらない）をケースＳとする。また、上の二つのケースに対応する変数を、それぞれ、P_S, P_L, w_{2L}, w_{2S}, g_{2L}, g_{2S}, u_{2L}, u_{2S}, q_{2L}, q_{2S}とする。ただし、仮定より、$q_{2L}(t)=q_{2S}(t)$, $t \in (S_2, T'_2)$である。以下では、ケースＳとケースＬについて、$\dot{w}_2$を比較する。区間（S_2, T_1）においては、$\dot{w}_{2S}$と$\dot{w}_{2L}$の大小を判断することはできないが、区間（T_1, B'_2）においては、(19)をもとに、それらの比較が可能である。すなわち、区間（T_1, B'_2）においては、$\dot{p}(<0)$の絶対値の大きさについて、(17)のような線形の需要関数の下では、$|\dot{p}_S| > |\dot{p}_L|$となる。というのは、$g_{2S} > g_{2L}$なので、市場へのメタル供給量の増加率は、ケースＳの方がケースＬよりも大きいからである。また、Ｃ－Ｌ論文の命題Ⅱ.(A)より、$u_{2L} < u_{2S}$なので、 結局、(18)の右辺を両ケースにおいて比較すれば、$|\dot{w}_{2S}| > |\dot{w}_{2L}|$がいえる。したがって、鉱山１と２の品位格差が小さい場合（ケースＳ）、T_1以降、w_2は急激に下落する。以上の両ケースについてのw_2の経路は、図２のようになる。ただし、区間（S_2, T_1）については、$w_{2L}=w_{2S}$としているが、このことは、以後の結論にそれほど大きく影響しない。我々が知りたいのは、経路２と整合性をもつのは、上のどちらの場合かである。そのために、鉱山２における投資決定をみよう。

鉱山２は、投資一単位の限界価値が、その限界費用Ｙ以上のとき投資を行う。すなわち、

$$x_2(t) = \int_t^{T_2} w_2(s) e^{-r(s-t)} ds \geq Y \tag{20}$$

鉱山２は、S_2で投資を開始し、B'_2で投資を終了するので、

$$x_2(S_2) = x_2(B'_2) = Y \tag{21}$$

が成立し、x_2は、図３のような経路をもつ。

さて、経路２と整合性をもつのは、ケースＬとケースＳのどちらのであろうか。図２と(20)および(21)によって、鉱山１と２の品位格差が大きいならば（図２におけるw_{2L}）、(21)が成立することも可能であるが、鉱山１と２の品位格差が小さいならば、$x_2(S_2) > x_2(B'_2)$となり、(21)は成立しない。したがって、経路２が整合性をもつ、すなわち、価格が低下局面をもつのは、鉱山１と２の品位格差が大きい場合（ケースL）である。

この経済的意味は、両鉱山の品位格差が小さいならば、その採掘経路を投資期間（S_2, B'_2）を前倒しすることで、利潤の割引現在価値を増加させることができるが、品位格差が大きければ、その採掘経路を鉱山１の採掘経路と重ねることによる損失が、投資期間を前倒しすることによる割引現在利潤の増加分を上回るということである。

以上をまとめると次のようになる。第一に、品位の劣る鉱山２は鉱山１の開山後に開山される。第二に、両鉱山の品位格差が小さいならば、鉱山２は、その採掘経路を前倒しする（このとき、より長い期間、鉱山１と鉱山２が同時に生産を行う）ことで、利潤の割引現在価値を増加させることができる。第三に、両鉱山の品位格差が大きければ、鉱山２の採掘経路を前倒しすると、その採掘経路を鉱山１の採掘経路と重ねることによる損失が、投資期間を前倒しすることによる割引現在利潤の増加分を上回るために、鉱山２はできるだけ開山を遅らせようとする。このとき、鉱山１が枯渇してから後まで、鉱山２の生産能力の拡張が続き、その結果、価格の低下が生じる。

４．おわりに

本研究では、資源価格経路に関する理論研究を中心にレヴューするとともに、その中で資源価格の周期的特性、とくに資源価格の低下局面を説明しうる要因の特定化を試みた。その結果、競争的市場経済下で、価格の一時的な低下局面の説明要因となりうるのは、前節で挙げた三つの候補のうち、（ロ）生産能力おける制約と、（ハ）生産能力への投資における制約の両方を組み合わせ、かつ、それに鉱山間における品位の非同質性をいれたものであることがわかった。とくに鉱山間での品位の非同質性が資源価格に大きな影響を与えるという事実の認識は、実際の鉱山開発あるいは資源価格の将来予測に大きく貢献しうるものと考えられる。

参考文献

Cairns, R. D. and P. Lasserre (1986), 'Sectoral Supply of Minerals of Varying Quality,' *Scandinavian Journal of Economics* **88**, pp. 605-626.

__________ (1991), 'The Role of Investment in Multiple-deposit Extraction: Some Results and Remaining Puzzles,' *Journal of Environmental Economics and Management* **21**, pp. 52-66.

Hartwick, J. M. (1978), 'Exploitation of Many Deposits of an Exhaustible Resource,' *Econometrica* **46**, pp. 201-217.

Hartwick, J. M., M. C. Kemp and N. V. Long (1986), 'Set-up Costs and Theory of Exhaustible Resources,' *Journal of Environmental Economics and Management* **13**, pp. 212-224.

Hotelling, H. (1931), 'The Economics of Exhaustible Resources,' *Journal of Political Economy* **39**, pp. 137-175.

Levhari, D. and R. S. Pindyck (1981), 'The Pricing of Durable Exhaustible Resources,' *Quarterly Journal of Economics* **1006**, pp. 365-377.

Olsen, T. E. (1989), 'Capital Investments and Resource Extraction from Non-identical Deposits,' *Journal of Environmental Economics and Management* **17**, pp. 127-139.

Pindyck, R. S. (1978), 'The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources,' *Journal of Political Economy* **86**, pp. 841-862.

Slade, M. E. (1982), 'Trends in Natural Resource Commodity Prices: An Analysis of the Time Domain,' *Journal of Environmental Economics and Management* **9**, pp. 122-137.

新熊隆嘉・藤井秀樹・西山孝（1997),「金属資源の価格形成メカニズムとその銅価格への適用」,『資源と素材』 Vol. 113, pp. 805-810.

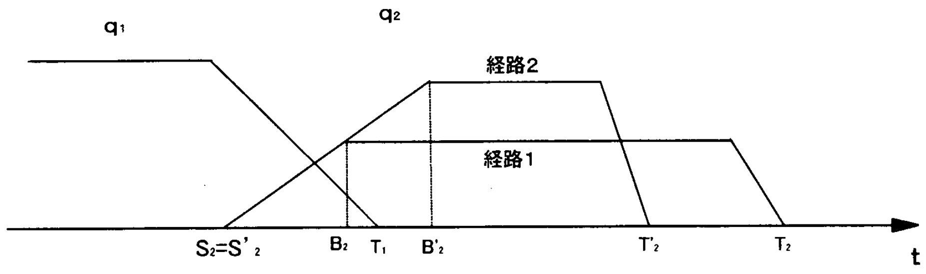

図1

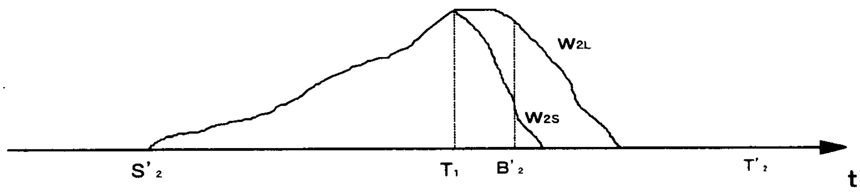

図2

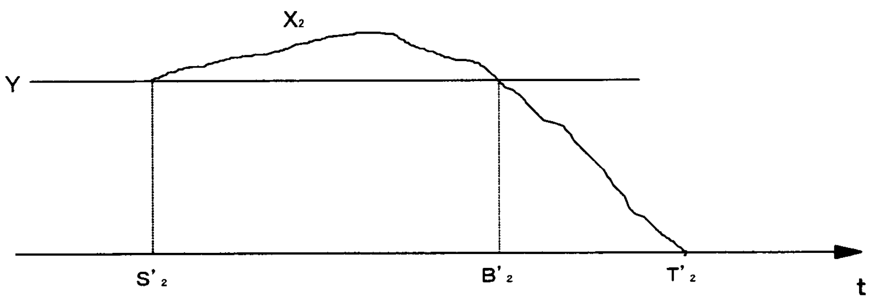

図3

(注)図1、図2、図3は、すべて、Cairns and Lasserre(1986)をもとに筆者において作成された。