合，$a \in A$ を各試行での被験者の投資行動，$x \in X$ を各試行での清算価値する．n はある被験者を表す．

$f(x|a)$ を投資行動 a を取ったとき，清算価値が x となる確率を表す確率密度関数，q_1，$q_2\,(q_1 > q_2)$ を実験によって被験者が受け取る賞金額（実験では 10000 円か 7000 円），$U^{(n)}(q_1)$，$U^{(n)}(q_2)$ を賞金額に対する被験者の効用で，$U^{(n)}(q_1) > U^{(n)}(q_2)$ と仮定する．さらに，$P(q_1|x)$ を被験者が清算価値 x を得たときに賞金 q_1 を得る確率で，$P(q_2|x) = 1 - P(q_1|x)$ とする．$\alpha > 0, \beta > 0$ を定数として，$G(x) \equiv \alpha + \beta P(q_1|x)$ とすれば，被験者はあたかも選好が $G(x)$ であるかのように行動することを示すことができる．

被験者が解く問題は，

$$\max_a \int_X f(x|a)\left[P(q_1|x)\,U^{(n)}(q_1) + \left(1 - P(q_2|x)\,U^{(n)}(q_2)\right)\right]dx. \tag{1}$$

効用関数は正のアフィン変換に関して一意に決まるから，$U^{(n)}(q_1) = 1$，$U^{(n)}(q_2) = 0$ としても一般性を失わない．従って，被験者の問題は，

$$\max_a \int_X f(x|a)\,P(q_1|x)\,dx. \tag{2}$$

となる．さらに，$P(q_1|x)$ を $G(x)$ の正のアフィン関数として構成するので，被験者の問題は，

$$\max_a \int_X f(x|a)\,G(x)\,dx. \tag{3}$$

と同等な問題となる．すなわち，被験者は個々人の効用関数 $U^{(n)}(x)$ ではなく，あたかも効用関数 $G(x)$ を持っているかのように行動することになるはずである．ここで，$G(x)$ を x に関する凹関数（コンケイブ関数）とすれば，被験者はあたかもリスク回避的な選好をもっているかのように行動するはずである．

ファイナンス実験においても，被験者がリスク回避的な選好を持つように統制可能であろうか．実験 1 及び 2 では，被験者が年金と同じように長期的観点から，投資判断をしてもらうように，取引する証券を「年金」，取引時点を「35 歳」「50 歳」「65 歳」などと表示したり，実験に対する説明で長期的観点から投資するように説明したりして，リスク回避的行動をするように促した．これに対して，実験 3 及び 4 においては，上述の実験経済学の選好統制方法を利用して，実験を行った．

実験 3 及び 4 では，ポートフォリオの最終清算価値 x の範囲は $x \in [-80, 120]$ であ

る．各被験者の効用関数 $g(x)$ を，2次効用関数

$$g(x) \equiv x - \frac{\gamma}{2}x^2. \tag{4}$$

と仮定する．式3の $G(x)$ を

$$G(x) = P(q_1|x) \equiv a + bg(x). \tag{5}$$

と定義する．ここで，

$$a \equiv -\frac{g(80)}{g(120) - g(80)}, \tag{6}$$

$$b \equiv \frac{1}{g(120) - g(80)}. \tag{7}$$

とおくと，γ を適切に定めれば，$x \in [-80, 120]$ で，$G(x)$ は値域 $[0, 1]$ をとる凹関数となり（図6），式4を前提とすれば，被験者は清算価値 x を得た時に報酬 q_1 を得る確率を効用関数として持ち，リスク回避的に行動するはずである．

実験の謝礼は，試行毎にポートフォリオの最終清算価値より，$G(x)$ に従って点数（その試行における高い謝礼を得る確率）を計算する．この点数は試行毎に累積する．実験終了後，累積清算価値を実験回数で除して，高い謝礼を得る確率を算出する．$G(x)$ がコンケイブ関数であるから，被験者が相場を張って，0点，1点などの極端な点数を繰り返してとるよりも，リスク回避的行動をとり，0.6点などの中間の点数を取り続けたほうが，高い謝礼を得る確率は増えることになっている．従って，高い謝礼を受け取りたい被験者は，リスク回避的に行動するはずである．

3.1.2 被験者はリスク回避的であったか

実験3及び4においては，実験室内で被験者の選好をリスク回避的に統制する方法を用いて，実験を行ったが，被験者がリスク回避的であったか検証するために，資産価格とリスク回避度の関係を導出する．

時刻 $t+1$ での，第 i 証券のペイオフを $x_{i,t+1}$ とする．この証券の理論価格は，Cochrane(2001)[4] より，

$$P_i = E\left[\beta U'(y_{t+1})x_{i,t+1}\right], \tag{8}$$

ここで，β は主観的割引率，y は総消費，U は投資家の効用関数で $U' > 0$，$U'' < 0$ を

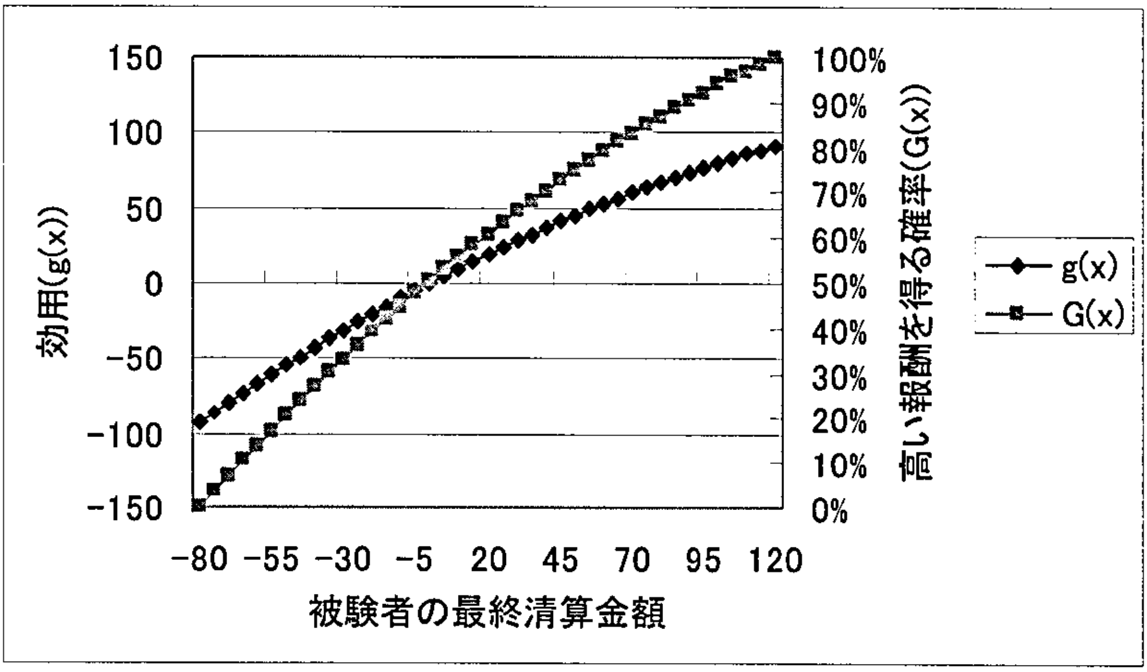

図 6: 関数 $g(x)$ と $G(x)$：$g(x)$ は被験者のポートフォリオの最終清算価値 x を効用かえる関数，$G(x)$ は x を点数にかえる関数．各被験者，各試行ごとに最終清算価値から，$G(x)$ を利用して点数を算出し，これを累積する．実験終了後に累積点数を実験回数で除して，高い謝礼を得る確率を計算する．

満たすものとする，期待値は主観的確率での期待値である．効用関数を，

$$U(y) \equiv y - \frac{\gamma}{2}y^2, \tag{9}$$

と仮定する．γ は市場全体のリスク回避度を表す定数である．実験では，金利ゼロであるから $\beta = 1$ と仮定する．また，総消費 y は，実験は1期間モデルであるから，マーケット・ポートフォリオのペイオフと同じである．なお，実験では予め各証券の発行済み株式数が分かっているので，マーケット・ポートフォリオのペイオフも既知である．

限界効用は，

$$U'(y) = 1 - \gamma y, \tag{10}$$

であるから，式8は，

$$P_i = E\left[(1 - \gamma y_{t+1}) x_{i,t+1}\right]. \tag{11}$$

実験3及び4では，証券は「証券A」と「証券B」の2つである．取引時点 t における，それぞれの取引価格を $\tilde{P}_{A,t}, \tilde{P}_{B,t}$ とする．また，1期間3項モデルであるから，ペイオフ時の状態数は3つある．証券Aの各状態でのペイオフを $x_A^{(1)}, x_A^{(2)}, x_A^{(3)}$，同様に，証券Bのペイオフを $x_B^{(1)}, x_B^{(2)}, x_B^{(3)}$，マーケット・ポートフォリオのペイオフを $y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}$ とする．ここで各変数の右肩の添え字は，実現した状態を表す．各証券の理論価格は，式11より，

$$P_A = \frac{1}{3}\left[\left(1 - \gamma y^{(1)}\right) x_A^{(1)} + \left(1 - \gamma y^{(2)}\right) x_A^{(2)} + \left(1 - \gamma y^{(3)}\right) x_A^{(3)}\right], \tag{12a}$$

$$P_B = \frac{1}{3}\left[\left(1 - \gamma y^{(1)}\right) x_B^{(1)} + \left(1 - \gamma y^{(2)}\right) x_B^{(2)} + \left(1 - \gamma y^{(3)}\right) x_B^{(3)}\right]. \tag{12b}$$

取引が成立した時刻を t とすると，理論価格と取引価格は

$$\tilde{P}_{k,t} = P_k + \varepsilon_{k,t}, \quad k = A, B. \tag{13}$$

の関係があると仮定する．ただし，$\varepsilon_{k,t}$ はプライシング・エラーで，平均ゼロ，分散 σ_k^2 の正規分布に従うと仮定する．一つの証券の取引が成立した際，もう一つの証券は直近に成立した価格を利用するとすれば，式13より

$$E_T\left[\frac{1}{3}\left[\left(1 - \gamma y^{(1)}\right) x_A^{(1)} + \left(1 - \gamma y^{(2)}\right) x_A^{(2)} + \left(1 - \gamma y^{(3)}\right) x_A^{(3)}\right] - \tilde{P}_{A,t}\right] = 0, \tag{14a}$$

$$E_T\left[\frac{1}{3}\left[\left(1 - \gamma y^{(1)}\right) x_B^{(1)} + \left(1 - \gamma y^{(2)}\right) x_B^{(2)} + \left(1 - \gamma y^{(3)}\right) x_B^{(3)}\right] - \tilde{P}_{B,t}\right] = 0, \tag{14b}$$

ただし，T を取引時間における総取引回数で，

$$E_T[\cdot] \equiv \frac{1}{T}\sum_{n=1}^{T}[\cdot]. \tag{15}$$

GMM (Generalized Method of Moments) の手法を利用して，試行ごとに市場全体のリスク回避度 γ を推定する．GMMに関しては Hayashi(2000)[6] を参照．取引時刻 t におけるプライシング・エラーを

$$u_t^{(k)}(\gamma) \equiv \varepsilon_{k,t} = E[(1-\gamma y)x_k] - \tilde{P}_{k,t}, \quad k = A, B. \tag{16}$$

$u_t(\gamma)$ を 2 行 1 列のプライシング・エラーを表す行列

$$u_t(\gamma) \equiv \begin{bmatrix} u_t^{(A)}(\gamma) \\ u_t^{(B)}(\gamma) \end{bmatrix}. \tag{17}$$

とする．また，プライシング・エラーのサンプル平均を表す 2 行 1 列の行列 $g_T(\gamma)$ を，

$$g_T(\gamma) \equiv \frac{1}{T}\sum_{n=1}^{T}[u_t(\gamma)] = E_T[u_t(\gamma)]. \tag{18}$$

として定義する．

第一段階の $\hat{\gamma}_1$ 推定は，プライシング・エラーのサンプル平均に関する 2 次形式を最小化する

$$\hat{\gamma}_1 = \arg\min_{\{\gamma\}} g_T(\gamma)^T W g_T(\gamma). \tag{19}$$

を選択する．W はウエイトを表す 2 次の正方行列で，ここでは単位行列 I を利用する．次に，$\hat{\gamma}_1$ を用いてプライシング・エラーの共分散行列

$$S \equiv E_T\left[u_t(\hat{\gamma}_1)\, u_t(\hat{\gamma}_1)^T\right]. \tag{20}$$

を推定する．この S を用いて，第二段階の $\hat{\gamma}_2$ 推定は，プライシング・エラーのサンプル平均に関する 2 次形式を最小化する，

$$\hat{\gamma}_2 = \arg\min_{\{\gamma\}} g_T(\gamma)^T S^{-1} g_T(\gamma), \tag{21}$$

を選択する．γ_2 の分散は，

$$var(\hat{\gamma}_2) = \frac{1}{T}\left(d^T S^{-1} d\right)^{-1}, \tag{22}$$

ただし，

$$d \equiv \left. \frac{dg_T(\gamma)}{d\gamma} \right|_{\gamma=\hat{\gamma}_2}. \tag{23}$$

効用関数を式 9 とすれば，市場全体のリスク回避度の推定値が $\hat{\gamma}_2 > 0$ であれば，市場がリスク回避的であると考えることができる．また，$\hat{\gamma}_2 = 0$ の場合はリスク中立的，$\hat{\gamma}_2 < 0$ の場合はリスク愛好的と考えられる．

式 21，22 を用いて，

$$t \equiv \frac{\hat{\gamma}_2}{\sqrt{var(\hat{\gamma}_2)}} \sim N(0,1), \quad as\ T \to \infty. \tag{24}$$

であることを利用して，帰無仮説：$\hat{\gamma}_2 = 0$ を検定する．

実験 3 及び 4 について市場全体のリスク回避度に関して推定した結果が，図 7 である (実験 1 及び 2 に関しても，ほぼ同様なこといえる)．実験 3 では，9 回の試行のうち 5 回で，$\hat{\gamma}_2 > 0$ でかつ，有意水準 5 %で帰無仮説が棄却された．市場全体のリスク回避度がプラスで，リスク回避的に証券価格が付けられたと分析できる．しかし，3 回がリスク愛好的 ($\hat{\gamma}_2 < 0$) で有意となり，1 回（試行 4）では帰無仮説が棄却されなかった．

これに対して，実験 4 では，9 回の試行のうち 2 回で，$\hat{\gamma}_2 > 0$ でかつ，有意水準 5 %で帰無仮説が棄却され，市場がリスク回避的であったと考えられるが，それ以外の試行では，市場全体のリスク回避度が中立的か愛好的な価格が付けられた．ただし，ここでの結論は，効用関数を式 9 を仮定した場合の検証結果であって，別の効用関数（例えば，べき型効用関数や指数効用関数）を利用した場合には，異なる結果となる．

上述した実験経済学における選好統制を，ファイナンス実験に応用したが，期待された成果は得られなかった．その理由として，以下のようなことが考えられる．

1. 式 5 で表される効用関数のコンケイブの度合い（歪曲度）が緩かったため，被験者がリスク回避的か中立的かについて，式 5 の効用関数によってコントロールできなかった．歪曲度を強くすれば，運用に失敗した場合のペナルティーが大きくなり，また，運用に大きく成功しても，そこそこ成功しても，得られる点数が同じ程度であるから，被験者はリスク回避的になるはずである．従って，効用関数の歪曲度を強くして再実験を行う必要がある．

2. 高い謝礼 1 万円と，低い謝礼 7 千円とでは，被験者にとって大きな差がなかった．そのため，被験者は，7 千円さえ獲得できれば，1 万円か得ても得なくても，効用がそれほど変わらないので，リスク回避的な資産配分を行わないで，実験市場でギャンブル性の高い投資行動をとった可能性がある．被験者にリスク回避的な

実験	試行	γ	Std(γ)	t	5%有意
3	1	−0.0000077052	0.000000644	−11.97	*
3	2	0.0000055681	0.000000423	13.16	*
3	3	0.0000019882	0.000000364	5.47	*
3	4	0.0000001401	0.000000439	0.32	
3	5	0.0000008423	0.000000173	4.87	*
3	6	0.0000024031	0.000000390	6.17	*
3	7	0.0000005067	0.000000138	3.68	*
3	8	−0.0000000941	0.000000024	−3.97	*
3	9	−0.0000000572	0.000000006	−8.87	*

実験	試行	γ	Std(γ)	t	5%有意
4	1	−0.0000003	0.0000015	−0.17	
4	2	−0.0000015	0.0000009	−1.61	
4	3	0.0000066	0.0000005	12.32	*
4	4	−0.0000072	0.0000013	−5.63	*
4	5	−0.0000029	0.0000008	−3.58	*
4	6	0.0000016	0.0000005	2.97	*
4	7	−0.0000019	0.0000009	−2.13	*
4	8	−0.0000006	0.0000008	−0.76	
4	9	−0.0000036	0.0000010	−3.77	*

図 7: 市場全体のリスク回避度γに関する検定：実験で取引された「証券A」と「証券B」の価格を用いて，効用関数のリスク回避度を推定．実験3では，概ねリスク回避的な価格で取引されたが，実験4ではリスク回避的価格で取引されたのは，試行3と6だけであった．

投資行動をとらせるためには，2つの謝礼に，もう少し格差をつけたほうが，実験者の意図した投資行動となるのではないかと考えられる．あるいは，行動ファイナンスの参照点などの考え方を応用して，1万円，7千円の謝礼の組み合わせでも，最初に被験者に1万円を渡し，実験での点数が低ければ，3千円を返してもらうような謝礼の支払い方を行うと，得られる結果が変わる可能性がある．

3. 以下に記述するように，実験4での市場では，裁定取引ができる可能性が多く存在した．そのため，被験者がリスク回避的に行動するより，裁定機会を追求するためにリスク中立的や，リスク愛好的な行動をとった可能性がある．市場に裁定の機会がない（少ない）ならば，あるいは，被験者のうち誰かが，積極的に裁定取引を行って市場より高い利益を得ることができたならば，大多数の被験者は，リスク回避的な投資行動をとったかもしれない．しかし，今回の実験では，裁定取引をできる可能性が続いたため，被験者のリスク回避度に何らかの影響を及ぼした可能性が考えられる．実験を行う際には，実験市場で裁定の機会が少ないような環境を整えないと，実験結果の解釈が難しくなる．

4. 1期間3項モデルを利用し，各状態が発生する確率を1/3としたため，各証券の期待値を算出することが容易になり，被験者が各証券の期待値のみに着目して取引を行った可能性が高い．そのため，リスク回避的な価格形成がうまくいかなかったのではないか．

5. 実験においては，目前の取引に興味を奪われ，本来の目的である，老後の備えのようなリスク回避的行動をとる環境ではなかった．この問題は，取引ソフトウエアに大きく関係すると思われる．取引ソフトウエアが資産配分を検討するためのものではなく，証券取引による価格の変動性に着目するタイプのものであるため，被験者が資産配分決定よりも取引を重視し，投資家というよりトレーダー感覚で実験に参加した可能性がある．

6. ここでは詳細に示さないが，実験1及び2では，上述に実験経済学における選好統制法を利用しないで，実験の説明によって，被験者のリスク回避的行動を促したが，実験3及び4と同様に，実験者が期待した成果は得ることができなかった．説明によってリスク選好を管理することは，非常に難しいと思われる．

当分析からの公的年金の通知に関するインプリケーションとして，

1. 加入者は，将来の期待値について重視し，リスクを軽視する可能性がある．今回の実験では，被験者が将来のペイオフやリスクについて，十分な情報を持ってい

たにもかかわず，価格形成は期待値を中心としたものとなり，リスク回避的ではなかった．仮に，公的年金の通知が期待値のみを通知するのであれば，リスクを軽視し，単に期待リターンが高い投資に向かう可能性があることを示唆している．

2. 通知は，取引や価格を示唆するものではなく，資産配分を考えさせるものであるべきであろう．そうでなければ，眼前の取引に注意が向き，将来に備えた適切な資産配分ができなくなる可能性がある．従って，取引を誘発するような通知ではなく，将来の必要資金や，証券の期待リターン・リスクと，資産配分の影響などを含んだ，教育的な通知が望ましいのではないかと考えられる．

3.2 市場では適切な価格で証券が取引されたか

3.2.1 ストキャスティック・ディスカウント・ファクターと状態価格

実験市場で裁定取引の可能性があったか検証するために，ストキャスティック・ディスカウント・ファクターと状態価格を導出する．実験3及び4のように1期間モデルを考える．1期間後の離散の状態を s で表す．1期間後の各状態での総消費を $y(s)$，第 i 証券のペイオフを $x_i(s)$ とすると，第 i 証券の価格を P_i は，式8より，

$$P_i = E\left[\beta U'(y(s)) x_i(s)\right], \tag{25}$$

で表せる．β は主観的割引率である．ここで，

$$m(s) \equiv \beta U'(y(s)). \tag{26}$$

と定義すると，式25は，

$$P_i = E\left[m(s) x_i(s)\right], \tag{27}$$

と表せる．$m(s)$ はストキャスティック・ディスカウント・ファクター（状態価格デフレータとも呼ばれる）である．

リスクフリー証券は，いつでも1円のペイオフを得られる証券である．その価格は，式27より，

$$1 = E\left[m(s) \cdot 1\right]. \tag{28}$$

同様に，各状態での証券Aのペイオフを $x_A(s)$，証券Bのペイオフを $x_B(s)$ とすると，

各証券の価格は，

$$P_A = E\left[m(s)\,x_A(s)\right], \tag{29a}$$

$$P_B = E\left[m(s)\,x_B(s)\right]. \tag{29b}$$

と表せる．

実験３及び４は１期間３項モデルであったので状態を $s = 1,2,3$ で表し，各状態 s が発生する確率を

$$\pi(s) = \frac{1}{3}, \quad s = 1,2,3. \tag{30}$$

と仮定する．

実験３及び４において，ストキャスティック・ディスカウント・ファクター m を求める．式 28，29a，29b より，m は以下の連立方程式の解である．

$$\begin{cases} \frac{1}{3}\left[m(1) + m(2) + m(3)\right] = 1, \\ \frac{1}{3}\left[x_A(1)\,m(1) + x_A(2)\,m(2) + x_A(3)\,m(3)\right] = P_A, \\ \frac{1}{3}\left[x_B(1)\,m(1) + x_B(2)\,m(2) + x_B(3)\,m(3)\right] = P_B. \end{cases} \tag{31}$$

この式を行列表示を行うと，

$$\frac{1}{3}FM = P, \tag{32}$$

ただし，

$$F \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_A(1) & x_A(2) & x_A(3) \\ x_B(1) & x_B(2) & x_B(3) \end{bmatrix}, \quad M \equiv \begin{bmatrix} m(1) \\ m(2) \\ m(3) \end{bmatrix}, \quad P \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ P_A \\ P_B \end{bmatrix}. \tag{33a}$$

実験による証券価格 P_A, P_B は，被験者間の取引で決まる．この価格を利用して m を逆算する．F に逆行列が存在すれば，ストキャスティック・ディスカウント・ファクターは，

$$M = 3F^{-1}P \tag{34}$$

として算出できる．

ステイトプライス（状態価格）とは，ある状態 s が発生した時のみ１円が支払われ，それ以外の状態 s' の時はゼロ円が支払われる条件の価格である．$P(s)$ を状態価格とす

る．状態価格は，式 27 より，

$$P(s) = E[m(s)1(s)], \tag{35}$$

ただし，$1(s)$ はインディケータ関数で，

$$1(s) \equiv \begin{cases} 1 & if \quad \text{状態が } s \text{ の場合,} \\ 0 & if \quad \text{それ以外.} \end{cases} \tag{36}$$

状態 s が実現する確率を $\pi(s)$ であったので，上式は，

$$\begin{aligned} P(s) = E[m(s)1(s)] &= \sum_s \pi(s)m(s)1(s) \\ &= \pi(s)m(s). \end{aligned}$$

実験 3 及び 4 においては，各状態が発生する確率が $\pi(s) = 1/3$ であったので，状態価格は，

$$P(s) = \frac{m(s)}{3}. \tag{37}$$

となる．

3.2.2 実験市場に裁定の機会はあったか

リスク回避的な投資行動を調べるための実験市場で裁定取引の機会が多く観察できるとしたなら，その実験結果に基づいた主張は説得感を欠くものとなろう．その主張が，適切な実験により得られた結果か，あるいは，裁定機会が多く見られる"特殊"な市場であったために得られた結果かが，よくわからないからである．ファイナンスの実験においては，市場が無裁定（に近い）かどうかは，非常に重要な条件であると考えられる．そこで，今回の実験においても，実験市場が無裁定であったか検証を行った．以下，実験 3 及び 4 の検証結果を例として示す（実験 1 及び 2 においても，ほぼ同様な結果が得られた）．検証には，Duffie(2001)[5] にある以下の理論を利用した．

「市場に裁定が存在しない（無裁定）ための必要十分条件は，$0 < P(s) < 1$ となる状態価格 $P(s)$ が存在することである」

式 37 で表される状態価格を求める．実験 3 及び 4 における式 33a にあるペイオフ行

列を $F^{(3)}, F^{(4)}$ とすると，

$$F^{(3)} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 8 & 10 & 12 \\ 15 & 10 & 5 \end{bmatrix}, \quad F^{(4)} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 7 & 10 & 12 \\ 15 & 10 & 5 \end{bmatrix} \tag{38a}$$

ここで，各行列の行列式を計算すると，

$$\left|F^{(3)}\right| = 0 \tag{39a}$$

$$\left|F^{(4)}\right| = -5 \neq 0 \tag{39b}$$

より，実験 4 では $F^{(4)}$ に逆行列が存在する．市場は完備であり，各証券の価格 P_A 及び P_B の価格が実験により決まれば，式 34 より，ストキャスティック・ディスカウント・ファクター m や，式 37 の状態価格 $P(s)$ を一意に決めることができる．実験 4 における各試行ごとの状態価格を，図 8〜図 16 に示す．

グラフを観察することにより，以下のように分析できる．

1. 実験取引当初は，裁定の機会を多く見受けられる．状態価格は，市場が無裁定であれば，$0 < P(s) < 1$ でなくてはならないが，1 円を大きく超えるものや，0 円を下回るものがあり，裁定の機会が観察できる．

2. しかし，実際に裁定取引が可能であったかは一概に言えない．状態価格は証券 A と証券 B の直近価格をもとに算出しているが，裁定取引が可能な価格で証券 A と証券 B が同時に売買できたとは限らないと考えられる．

3. 試行回数が進むにつれて，状態価格が $0 < P(s) < 1$ の間に収まるようになり，裁定の機会は減少する．被験者が取引に慣れ，市場での価格形成を見ながら取引するようになるからだと推測される．しかし，取引開始直後においては，依然，裁定取引の機会が存在している．取引開始直後は，様子を見ている被験者も多く，価格形成が不安定であるが，取引時間が経過するに従って，多くの被験者が取引に参加するからだと推測される．

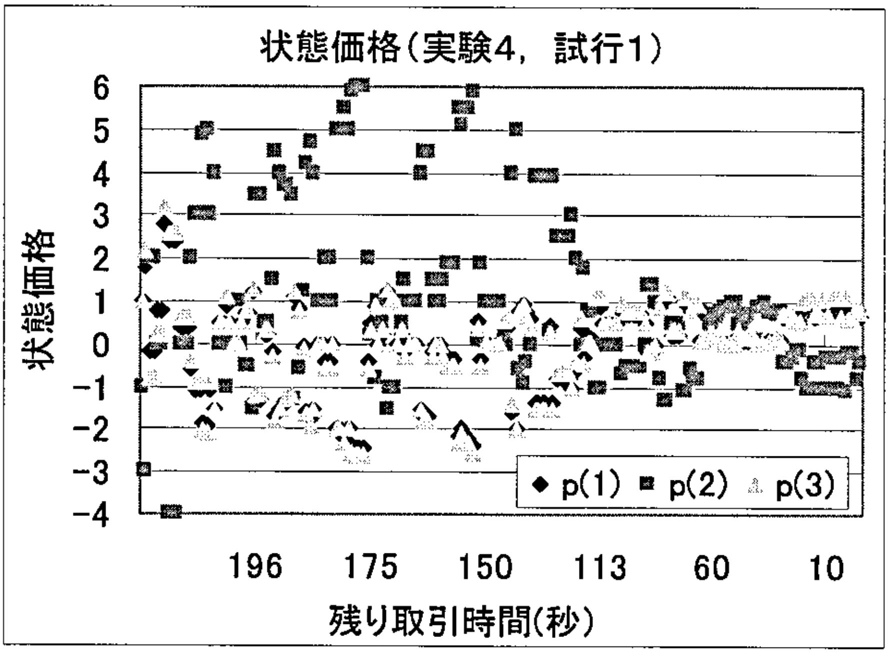

図 8: 実験４，試行１の状態価格：ｘ軸は残り取引時間（１回の取引は２４０秒），ｙ軸は状態価格を表す．$P(1)$ は状態１が出現した場合に１円を支払い，その他の場合では０円を支払う証券の価格（状態価格）である．このペイオフの最大値は１円であるから，価格が１円以上になることは裁定の機会を示している．同様に，０円以下であれば，買うときに，お金を支払わず，逆にお金をもらえることを意味するので，裁定の機会である．

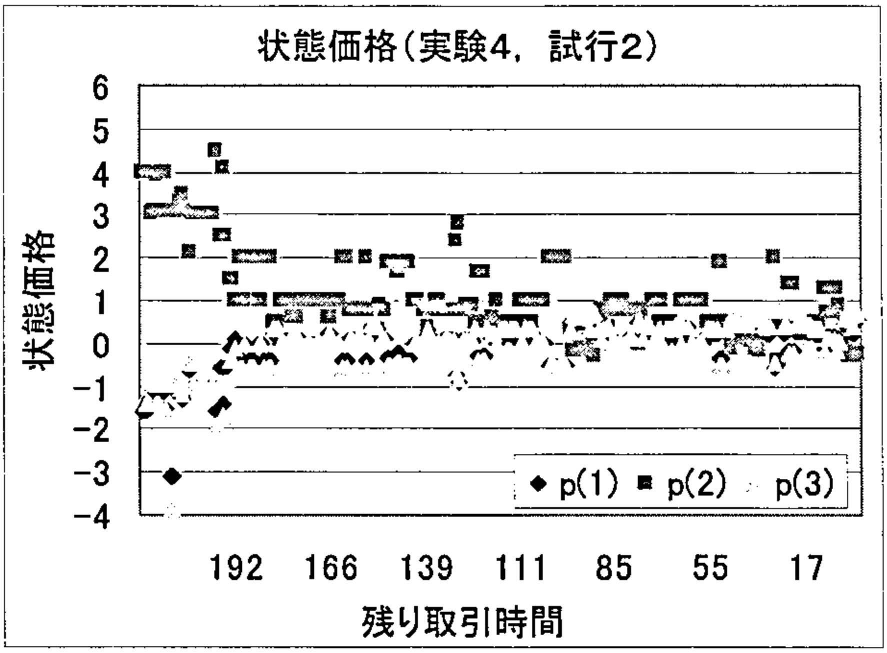

図 9: 実験 4，試行 2 の状態価格：取引時間が経過すると，状態価格は 0 から 1 の間に集まるようになる.

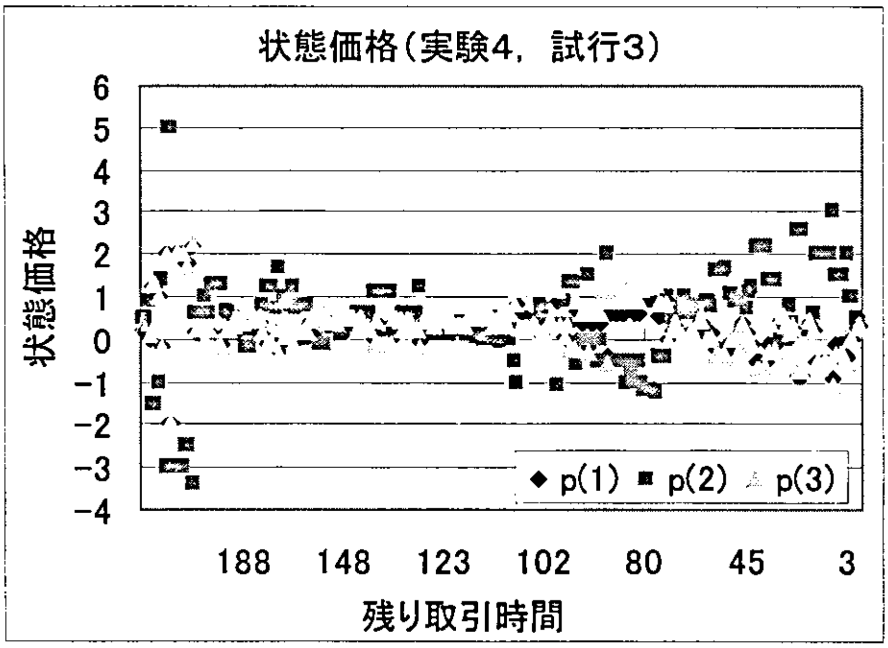

図 10: 実験 4，試行 3 の状態価格

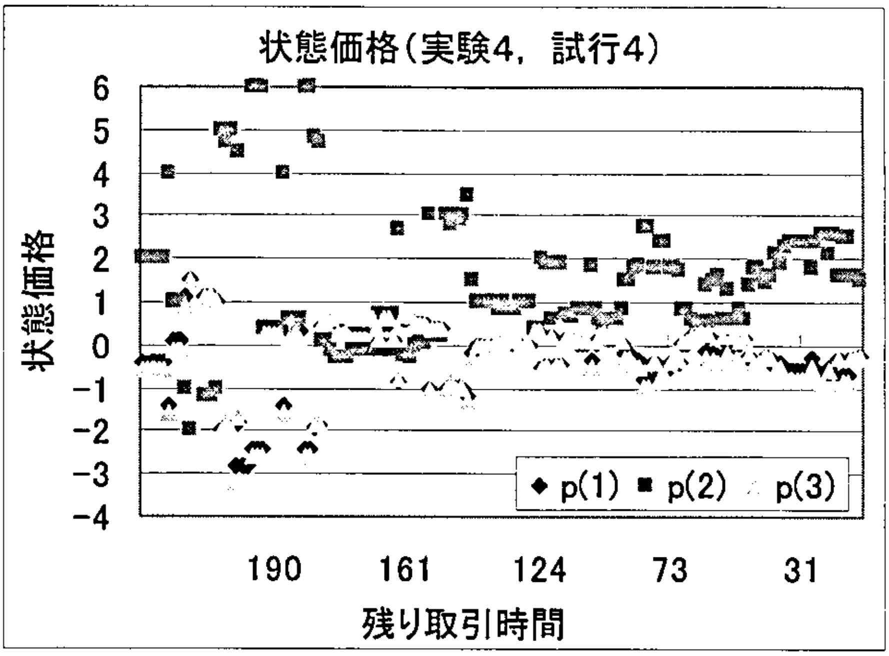

図 11: 実験 4，試行 4 の状態価格

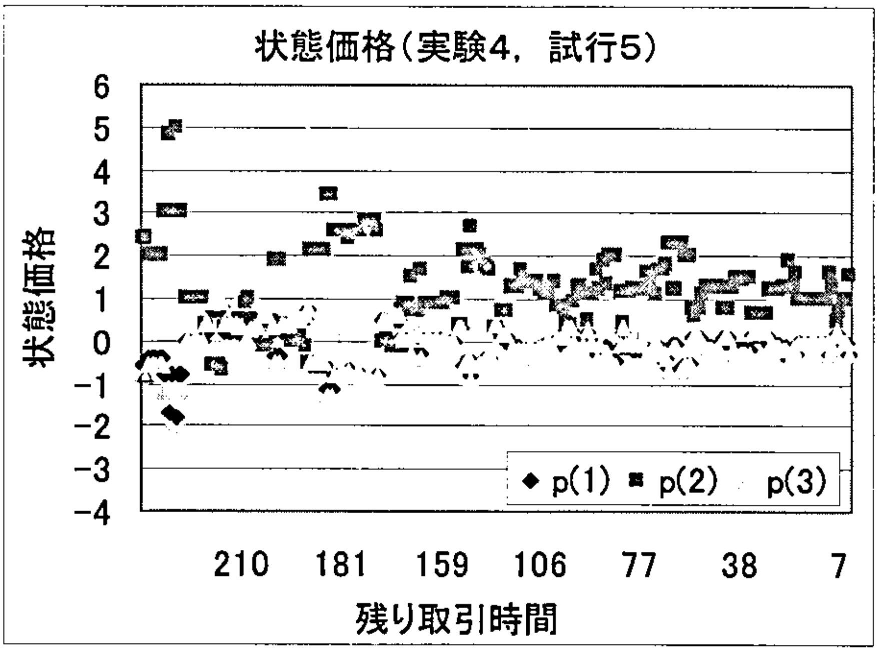

図 12: 実験 4，試行 5 の状態価格

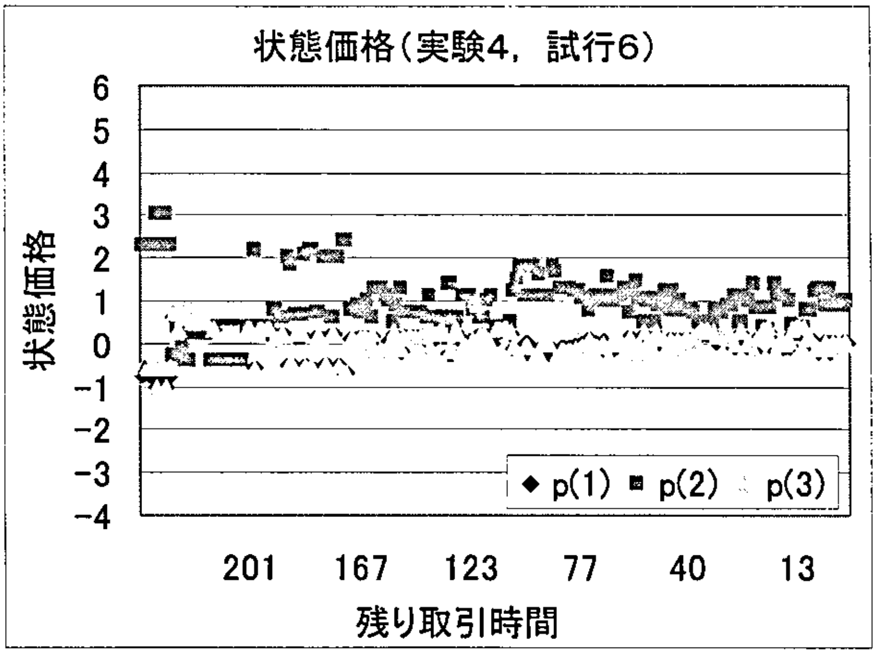

図 13: 実験 4，試行 6 の状態価格

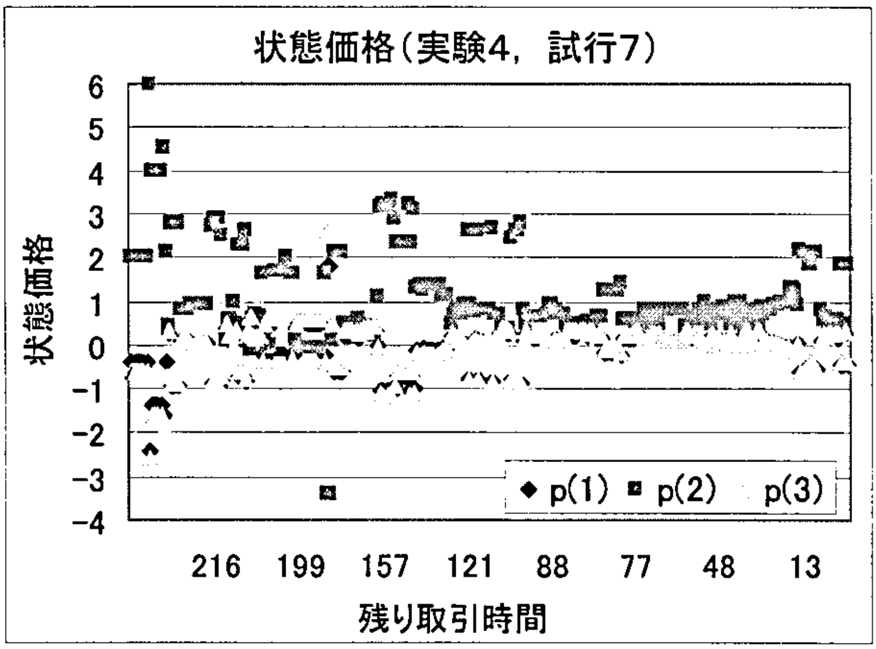

図 14: 実験 4，試行 7 の状態価格

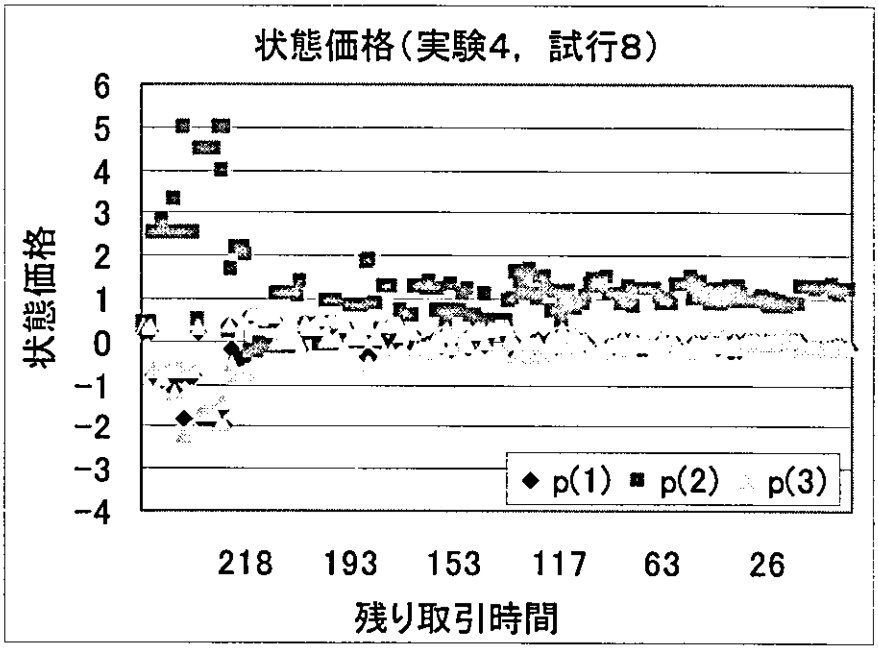

図 15: 実験 4，試行 8 の状態価格：試行が進むと，裁定の機会が減少していく．8 回目の試行でも，取引開始当初は裁定の機会が認められれるが，時間が経過するにつれ，状態価格は 0 から 1 の間に収まるようになる．

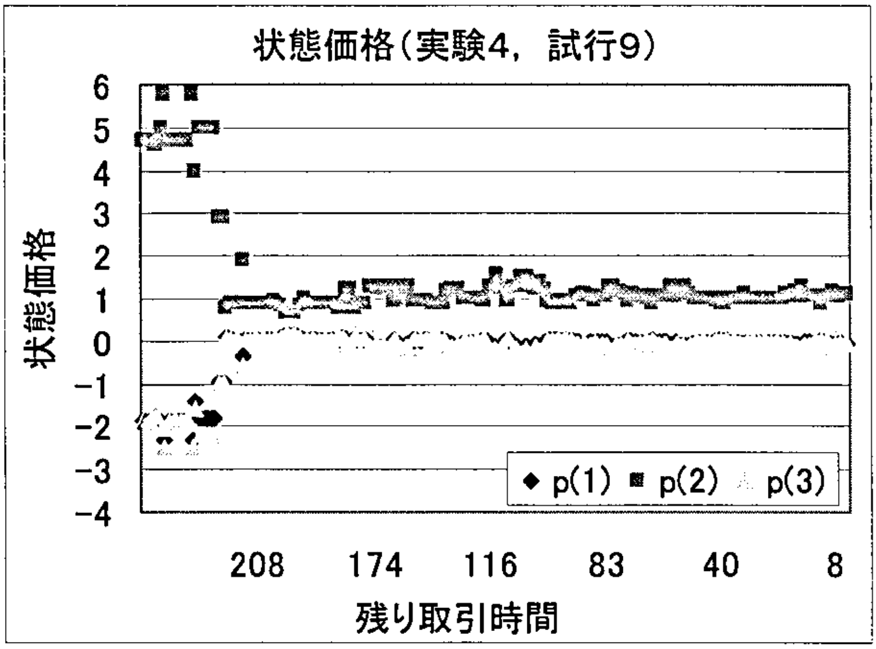

図 16: 実験４，試行９の状態価格：状態２の状態価格が１円，それ以外の状態価格が０円になっている．被験者は，期待値中心の価格形成をしたため，両端の状態（状態１と状態３）が実現することを軽視して，価値を認めていないようである．

4. 裁定の機会が収束したとしても，$P(2) = 1$，$P(1) = P(3) = 0$ となり，被験者が，状態２が発生することに対して価値を高く置き，両端の状態（状態１，状態３）が発生することに対しては，そのリスクを無視した価格形成となっている．

以上の結果となった要因には，以下のようなものが考えられる．

1. 被験者に対して裁定取引のできる可能性を実験開始前で説明不足であり，裁定取引の概念を知る被験者が少なかった．また，裁定の機会があっても，被験者が裁定取引を行って利益を追求するための投資戦略を考える時間が十分になかった．そのため，このような裁定の機会が市場に放置されたのではないか．

2. 1期間3項モデルを利用したので，各証券のペイオフと確率から，証券の期待値を算出することが容易であったため，期待値を中心に，リスクを考えない価格形成となった．そのため，状態２の状態価格が１円となり，それ以外がゼロ円となってしまったようである．リスクのない証券と，リスクがある証券が取引されている場合，リスクのある証券は，リスクプレミアムがある分，期待値以下で取引しなければならない理屈であるが，実際に取引を行う際には，期待値程度で取引できれば，それほど問題ないと考えた被験者が多かったようである．

3. 実験について説明する際に，被験者の価格形成を誤らせる情報があった．

4. 実験では，損失が発生しても，その範囲が限られているため，実際よりリスクを過少に評価する可能性もある．

公的年金の通知に対する示唆としては，以下のようなこと考えられる．

1. 加入者は，年金や証券価格の期待値を重視して，リスクを軽視する可能性がある．そのため，期待値のみの通知を行うと，リスク中立的な価格形成を招く可能性がある．仮にリスクに対する情報開示があったしても，それを軽視して，期待リターンが高い証券への投資に向かう可能性が考えられる．

2. 公的年金には，個人の資産運用の失敗や，長生きのリスクなどを軽減するなど，加入者にとって有利な点も多い．しかし，加入者が期待値による評価だけでは，期待リターンの高い代替金融資産の有利性が大きいことから，公的年金の魅力が低減したように考えるかもしれない．通知にあたっては，期待値だけでなく，そのリスクと，公的年金に加入することでそれらリスクにどのように対応可能かについて情報提供することを検討すべきであろう．

実験4に対して，実験3では，ペイオフ行列 $F^{(3)}$ に逆行列は存在しないので，ストキャスティック・ディスカウント・ファクターを一意に決めることはできない．しかし，実験3では，ペイオフ行列より，

$$5P_A + 2P_B = 70. \tag{40}$$

の関係が成立していることがわかる．つまり，証券Aを5単位，証券Bを2単位購入することは，リスクフリー証券の購入と同じペイオフとなる．例えば，証券Aの価格が１０である場合，証券Bの価格も１０でなければならないことを表している．仮に証券Aの価格が１０で，証券Bの価格が9である場合，証券Aを5単位，証券Bを２単位購入するポートフォリオの時価は６８であるが，1期間後，このポートフォリオは７０をリスクフリーで得ることができる．このポートフォリオを無限に組むことで，投資家は無限の利益を得ることができる．この関係を考慮すると，状態価格デフレータは，

$$\begin{cases} m(1) + m(2) + m(3) = 3, \\ m(1) + 3m(2) + 5m(3) = 21. \end{cases} \tag{41}$$

の関係を満たす $m > 0$ であればよいため，状態価格を一意に決めることはできない．しかし，実験3において裁定機会が存在したかを検討するには，式40が成立していたか検証すればよいはずである．グラフによって検証したのが，図17〜図25である．

グラフを観察することにより，以下のように分析できる．

1. 実験開始当初は，証券A，証券Bの価格の関係式40が認識されず，裁定の機会が多く見受けられるが，試行回数が進むにつれ，取引価格が式40を満たすようになり，裁定の機会はなくなった．

2. 裁定の機会が，存在するように見えても，証券Aと証券Bを裁定取引できる価格で同時に取引できたかはわからない．しかし，取引データを詳細に分析しても，被験者が裁定取引を行った形跡はない．

3. 式40の関係を満たすように価格が形成されたのではなく，単純に，3項モデルの期待値（証券A＝１０，証券B＝１０）で取引されたため，結果的に式40が満たされるような取引になったのではないかと推測される．

4. ただし，実験4と比較して，裁定の機会は非常に少ない．そのため，両実験とも期待値による価格形成が行われことは確かであろうが，別の要因も市場に存在したようである．