1E2-3

ポートフォリオ最適投資配分比率の発見手法

A study on asset allocation

大西 智之*1　　鷲尾 隆*1
Noriyuki Ohnishi　　Takashi Washio

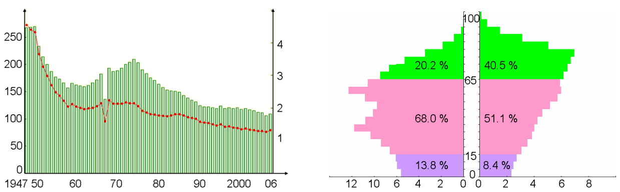
*1大阪大学産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

This paper asesses an investment strategy. Its performance is demonstrated through the real world stock market Data.

1. はじめに

近年, 我が国は，世界でも例を見ないほど急速に，少子高齢化時代を迎えている．図 1(a) [1] は，出生数及び合計特殊出生率の推移を表す．横軸は年次 (単位，年) である．棒グラフは左縦軸に対応し，出生数 (単位，100 万人)，実線は右縦軸に対応し，合計特殊出生率 (単位，人) である．図 1(a) より，1949 年において，出生数は 270 万人，合計特殊出生率は 4.32 人である．一方，2006 年において，出生数は 100 万人，合計特殊出生率は 1.29 人である．この人口減少が，今後も同様に続くと仮定したとき，若年層が老後を迎える 2055 年の日本人口は約 9000 万人，その年齢構成は，図 1(b) [1] のようになると予測されている．図 1(b) 左側は 2005 年の人口構成，図 1(b) 右側は 2055 年の人口構成を表す．横軸は人口数 (単位，万人)，縦軸は年齢 (単位，歳)，図 1(b) 中の数字は，子ども，働き盛り，高齢の各割合である．

少子高齢化社会の到来が見込まれる中で，従来型の経済成長が困難となっており，若年層が老後を迎えたときに，年金を現行制度で受給できる可能性は低い．従って，今後の日本経済を繁栄させる必要性と，国民一人一人が生涯を通じて資産を運用し，財産を形成する必要性は高い．日本経済を繁栄させるためには，企業が成長することが不可欠である．そのため，企業は，次の二つを行うべきである．一つ目は，日本国内の産業に投資し，その生産性を高め，少ない労働力でも十分な財やサービスを提供できるようにすることである．二つ目は，海外の産業に投資し，その投資収益で伸びた生産能力から豊富に生産される財やサービスを購入できるようにすることである．企業が



(a) 出生数及び合計特殊出生率　　(b) 人口構成比

図 1: 人口統計

連絡先: 大阪大学産業科学研究所
〒 567-0047 大阪不茨木市美穂ヶ丘 8-1
Email:ohnishi@ar.sanken.osaka-u.ac.jp

このように成長をするためには，投資資金調達が必要である．その調達方法の一つとして株式投資がある．個人の金融資産が株式投資に回ると，今後の日本経済を支えていく企業が，事業を拡大し，少しずつ成長していくことにより，利益を上げていき，最終的には日本経済が繁栄することにつながる．こうした経済発展に貢献できる株式取引において，限られた資金で長い期間にわたって安定した利益を上げるためには，いかにリスクを減らし，収益を増やすかを考察する必要がある．

本研究の目的は，限られた元手を不測の損失から守り，相場の方向性の影響を極力回避して長い期間にわたって確実に収益を上げるために，数ある株式銘柄の中で,「どのような株式」を「どのように売買」することが最適かを, リスクと収益を考慮した上で決定する手法を提案する．

2. ヘッジファンド戦略

ヘッジファンド [2] という投資形態が金融資本市場において，広がっている．ヘッジファンドとは，比較的よく使われる定義として，米国大統領金融市場ワーキンググループ [3] が提案する「私的に組成され，プロフェッショナルな投資マネージャーより運営される，一般投資家に広く購入されることがない，共同投資のための法的な商品」とする．また，市場の変動リスクを回避し，絶対収益の獲得を目標としている．このような投資戦略の例として，下記の３つの方法が提案されている．一つ目は，２つ以上の投資対象銘柄間の価格差が拡大したり収縮したりすることに着目し，割安と判断する銘柄を購入し，割高と判断する銘柄を空売りする．価格が適正水準に収束する過程において，収益の増大を目指すアービトラージ戦略である．二つ目は，株式の個別銘柄のうち，割安と判断する銘柄を購入し，割高と判断する銘柄を空売りする．株式市場の上昇局面では購入の比率を上げ，株式市場の下落局面では空売りの比率を上げることにより，収益の増大を目指す株式ロングショート戦略である．三つ目は，同一業種内の企業で，株価が一定の価格間で動く銘柄に対して，その時点で，割安と判断する銘柄の購入と，割高と判断する銘柄の空売りを同額ずつ行うことで，収益の増大を目指す株式マーケットニュートラル戦略である．

本研究では，リスクの少ない投資配分ポートフォリオを設計するためのモダン・ポートフォリオ理論と，リスクを減らすためのアービトラージ戦略，限られた資金の運用効率を高めるための株式マーケットニュートラル戦略を混合利用し，株式銘柄を対象に，購入する総金額と空売りする総金額が等しい条件のもとで，価格が適正水準に収束する過程において，収益の増大を目指す投資を行う．

3. 投資問題の定式化

本章では，前述の投資戦略の定式化について述べる．購入する銘柄の集合を B，その中の各銘柄を $b_i\,(i=1,\ldots,m_b)$ とする．同様に，空売りする銘柄の集合を S，その中の各銘柄を $s_j\,(j=1,\ldots,m_s)$ とする．時刻 t の銘柄 $b_i \in B\,(s_j \in S)$ の 1 株当たりの価格を $p\,(b_i,t)\,(p\,(s_j,t))$，時刻 t の銘柄 $b_i \in B\,(s_j \in S)$ の株数を $v\,(b_i,t)\,(v\,(s_j,t))$，ただし空売りの場合は負の株数とする．時刻 t の購入銘柄と空売り銘柄の合計資産価値を $Value\,(B,S,t)$ とする．最適な投資対象銘柄と投資額を選択する決定手法の先行研究として，モダン・ポートフォリオ理論 [5] がある．この理論の目的は，投資開始時期を t_k，t_k の将来における時刻を t_{k+1} とし，時刻 t_{k+1} の投資収益率 $R_{t_{k+1}}$ を $\frac{Value\left(B,S,t_{k+1}\right)-Value(B,S,t_k)}{Value(B,S,t_k)}$ とした時，それと $R_{t_{k+1}}$ の分散との重みつきの差を効用として最大化することである．一方，我々が採用を検討する株式マーケットニュートラル戦略では，時刻 t_k において，集合 B の銘柄と集合 S の銘柄を同じ金額だけ売り買いした時，購入金額と空売り金額を等しくし，時刻 t_k の資産価値 $Value\,(B,S,t_k)$ を，

$$Value\,(B,S,t_k)=\sum_{i=1}^{m_b}p(b_i,t_k)v(b_i,t_k)+\sum_{j=1}^{m_s}p(s_j,t_k)v(s_j,t_k)=0$$

とする．このとき，前述の投資収益率 $R_{t_{k+1}}$ は，分母が 0 となり無限大に発散するので，$R_{t_{k+1}}$ を測ることは不可能である．従って，本研究では，時刻 t_{k+1} の収益絶対額の期待値とリスクを合わせた効用が最大となる B と S の組み合わせを導出することを目的とする．即ち，時刻 t_{k+1} の資産価値 U は，

$$U=E\left(Value\,(B,S,t_{k+1})\right)-c_p\sigma_p^2$$

とする．$E\left(Value\,(B,S,t_{k+1})\right)$ は時刻 t_{k+1} に予測される収益の期待値，c_p は人間が与えるリスク効用係数，σ_p^2 は $Value\,(B,S,t_{k+1})$ の分散とする．

ここで，株価 $p\,(b_i,t)$ がトレンド成分とウイナー過程揺らぎ成分で構成されると仮定した場合，金融工学における標準的表記法 [4] より，

$$\frac{dp(b_i,t)}{dt}=\mu_i p(b_i,t)+\sigma_i p(b_i,t)\frac{dw\,(b_i,t)}{dt} \tag{1}$$

と表される．$\mu_i\,(\mu_j)$ は銘柄 $b_i\,(s_j)$ の株価変化のトレンドを表すパラメータ，$\sigma_i\,(\sigma_j)$ は銘柄 $b_i\,(s_j)$ の株価揺らぎの大きさを表すパラメータである．$w\,(b_i,t)=\int_0^t \frac{dw(b_i,t)}{dt}dt$ は，時間幅 $[0,t]$ の標準ウイナー過程揺らぎの積算を表し，正規分布 $N\,(0,t)$ に従う．式 (1) を $[t_1,t_{k+1}]$ の時間区間で積分し，$p\,(b_i,t_{k+1})$ について解くと，

$$p(b_i,t_{k+1})=p(b_i,t_k)\exp\left(\mu_i\left(t_{k+1}-t_k\right)\right)\exp\left(\sigma_i e\left(b_i,t_k\right)\right) \tag{2}$$

となる．$e\,(b_i,t_k)=w\,(b_i,t_{k+1})-w\,(b_i,t_k)$ であり，正規分布 $N\,(0,t_{k+1}-t_k)$ に従うので，集合 B と S に含まれる全銘柄の確率密度が互いに独立として，
$x_i=\exp\left\{\mu_i\left(t_{k+1}-t_k\right)\right\}$，$y_i=\exp\{\sigma_i e\left(b_i,t_k\right)\}$，

$$z_i=e^{-\frac{\{e(b_i,t_k)\}^2}{2\left(t_{k+1}-t_k\right)}},\ w=\sqrt{2\pi\left(t_{k+1}-t_k\right)} \tag{3}$$

$A_i=x_iy_i$，$B_i=\frac{z_i}{w}$，$E_i=\int_{-\infty}^{\infty}A_iB_ide\,(b_i,t_k)$，
S に関する項についても同様とした時，以上より，

$$\begin{aligned}U=&\sum_{i=1}^{m_b}p\left(b_i,t_k\right)E_iv\left(b_i,t_k\right)+\sum_{j=1}^{m_s}p\left(s_j,t_k\right)E_jv\left(s_j,t_k\right)\\&-\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\sum_{i=1}^{m_b}p\left(b_i,t_k\right)\left(A_i-E_i\right)v\left(b_i,t_k\right)\right\}^2\\&\times c_p\prod_{i=1}^{m_b}B_ide\left(b_1,t_k\right)\cdots de\left(b_{m_b},t_k\right)\\&-\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\sum_{j=1}^{m_s}p\left(s_j,t_k\right)\left(A_j-E_j\right)v\left(s_j,t_k\right)\right\}^2\\&\times c_p\prod_{j=1}^{m_s}B_jde\left(s_1,t_k\right)\cdots de\left(s_{m_s},t_k\right)\end{aligned}$$

となる．$Value\,(B,S,t_k)=0$ の下で，この U を最大化する最適な各銘柄の購入株数 $v\,(b_i,t)$ と空売り株数 $v\,(s_j,t)$ を求める．

4. 提案する最適投資決定手法

上記の最大化のために，ラグランジュ未定乗数法を用い，束縛条件を $g=Value\,(B,S,t_k)=0$ とし，関数 $U+\lambda g$ の $v\,(b_i,t)$，$v\,(s_j,t)$，λ に関する極値を求める．

$$\begin{aligned}&F_i=\int_{-\infty}^{\infty}A_i^2B_ide\,(b_i,t_k)\,,\ M_i=\int_{-\infty}^{\infty}y_iB_ide\,(b_i,t_k)\\&N_i=\int_{-\infty}^{\infty}y_i^2B_ide\,(b_i,t_k)\end{aligned} \tag{4}$$

と置換すると，U の極値は，

$$U=\frac{1}{4c_p}\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{m_b}\frac{M_i^2}{N_i-M_i^2}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{M_j^2}{N_j-M_j^2}\\+\frac{\left\{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{M_i}{x_i\left(N_i-M_i^2\right)}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{M_j}{x_j\left(N_j-M_j^2\right)}\right\}^2}{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{1}{x_i^2\left(N_i-M_i^2\right)}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{1}{x_j^2\left(N_j-M_j^2\right)}}\end{array}\right]$$

となる．これを実現する各銘柄の売買株数は，

$$\begin{aligned}v(b_i,t_k)&=\frac{E_i+\lambda}{2c_pp(b_i,t_k)\left(F_i-E_i^2\right)}\\v(s_j,t_k)&=\frac{E_j+\lambda}{2c_pp(s_j,t_k)\left(F_j-E_j^2\right)}\end{aligned} \tag{5}$$

であり，λ は，

$$\lambda=-\frac{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{E_i}{F_i-E_i^2}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{E_j}{F_j-E_j^2}}{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{1}{F_i-E_i^2}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{1}{F_j-E_j^2}} \tag{6}$$

によって与えられる．売買株数は，c_p を小さくすると，相場変動の大きさを表すリスクを許容し，売買に各々投資する金額が大きくなる．逆に，c_p を大きくすると，リスクを重視し，投資する金額が小さくなる．U の値を最大化するための各パラメータが満たすべき条件は，

$$\mu_i=\frac{1}{t_{k+1}-t_k}\left[\begin{array}{l}\log\left\{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{M_i}{x_i\left(N_i-M_i^2\right)}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{M_j}{x_j\left(N_j-M_j^2\right)}\right\}\\-\log M_i\\-\log\left\{\sum_{i=1}^{m_b}\frac{M_i}{x_i^2\left(N_i-M_i^2\right)}+\sum_{j=1}^{m_s}\frac{M_j}{x_j^2\left(N_j-M_j^2\right)}\right\}\end{array}\right] \tag{7}$$

$\sigma_i\rightarrow 0$，$\sigma_j\rightarrow 0$ となる．

5. 提案手法の実データ適用評価

本章では，対象データについて説明し，さらに４章で述べた評価基準を対象データに適用した結果を述べる．

5.1 対象データ

本研究では，自動株式売買ロボット・カブロボ [6] が提供するデータを用いる．カブロボは，全自動で株を売買するコンピュータのプログラムで構成されるロボットである．登録者は，自分のロボットを作ることが可能であり，登録料や利用料などは無料である．日々の株価や単元株数，出来高データ，企業業績や日本市場が開く直前の米国市場の状況などは，実際のデータを用いて投資判断を行うことができる．カブロボが投資の対象としている銘柄は，原則として東証１部の売買高・出来高上位から選んだ 300 銘柄である．売買注文は，成行，指成，指値，逆指値の注文が可能で，信用取引（空売り注文のみ）も可能である．空売りは，レバレッジを効かす事ができず，保証金維持率 100 %の範囲内の取引となる．売買手数料は，１注文毎に約定代金の 0.1%が一律にかかる．また，信用取引を行う場合，毎日市場が終わったあとに金利・口座管理料の計算が行われる．金利は，約定代金の年利 2%が営業日毎に一律引かれる．口座管理料は，信用取引銘柄の保有期間が 1ヶ月を超えると 1ヶ月毎，1 株あたり 10 銭，最低 100 円・最大 1000 円が建玉毎に引かれる．ロボットは，買いや空売りを含め初期総投資額 5000 万円を上限にスタートし，1 日 2 回（前場と後場の前に）自動で自分の設定に従い，シミュレーション取引をカブロボシステムのサーバ上で行う．また，日々の運用を始める前に，過去の実際のデータで，自分のロボットのパフォーマンスを確認することができる．

カブロボの運用成績評価期間は，3ヶ月間を単位としている．本研究では，今後の 3ヶ月間における株価の推移は，直近 3ヶ月における株価の推移と同じ統計的性質を有すると仮定する．そして，それよりも過去の長い期間では，経営業績の変化のみならず種々の社会情勢の変化により，直近の株価の推移とは全く異なる統計的変動を行う可能性があるので，直近 3ヶ月の株価の推移に基づいて，裁定投資ポートフォリオを設計する．ここでは，カブロボで提供されている最新 3ヶ月の 2006 年 10 月 1 日から 2006 年 12 月 29 日まで 62 営業日期間のデータを用いた．図 2 は，この期間における日経 225 の推移を表す．横軸は年月，縦軸は株価 (単位, 円) である．この期間の対象銘柄の株価を，トレンド成分とウイナー過程揺らぎ成分で構成されると仮定し，式 (1) に従うものとして扱う．カブロボの初期総投資金額 5000 万円の制限と，購入金額と空売り金額を等しくする本研究の採用戦略より，$\sum_{i=1}^{m_b} p(b_i,t_1)v(b_i,t_1) = -\sum_{j=1}^{m_s} p(s_j,t_1)v(s_j,t_1) = 25{,}000{,}000$ とする．また，本研究では，前述の売買手数料・金利・口座管理料をゼロとし，単元株数の制約も考慮しないものとする．

5.2 適用評価内容

前述の期間 62 営業日における 300 銘柄の株価を用いて評価を行った．この期間の投資開始時期を t_1，投資終了時期を t_{62} とし，$t_k = k\,(1 \leq k \leq 62)$ とする．はじめに，パラメータ μ_i，σ_i の実測値 μ_i^0，μ_j^0 及び σ_i^0，σ_j^0 の測定方法について述べる．μ_i^0，μ_j^0 は式 (2) より得られる $e\,(b_i,t_k) = \frac{1}{\sigma_i}v\left\{\log\frac{p(b_i,t_{k+1})}{p(b_i,t_k)} - (t_{k+1}-t_k)\,\mu_i\right\}$ の $t_k \in [t_1,t_{62}]$ に亘る 2 乗和が最小となるように決定する．σ_i^0，σ_j^0 は，μ_i を決定後，$t_k \in [t_1,t_{62}]$ に亘る $e\,(b_i,t_k)$ の 2 乗和が分散 $t_{k+1}-t_k\,(=1)$ と等しくなるように決定する．以上より，

図 2: 日経 225 の推移

$$\mu_i^0 = \frac{1}{61}\log\frac{p(b_i,t_{62})}{p(b_i,t_1)}$$
$$\sigma_i^0 = \sqrt{\sum_{k=1}^{61}\left(\log\frac{p\left(b_i,t_{k+1}\right)}{p(b_i,t_k)}\right)^2 - \frac{1}{61}\left(\log\frac{p(b_i,t_1)}{p(b_i,t_{62})}\right)^2} \tag{8}$$

となる．μ_j^0, σ_j^0 についても同様である．

次に，投資対象銘柄の選択方法について述べる．図 3 に選択アルゴリズムを示す．ここで c_p は，

$$v'(b_i,t_1) = \frac{E_i+\lambda}{2p\,(b_i,t_k)\,(F_i-E_i^2)} \tag{9}$$

とすると，

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^{m_b} p(b_i,t_1)v'(b_i,t_1)}{\sum_{i=1}^{m_b} p(b_i,t_1)v(b_i,t_1)} \tag{10}$$

によって与えられる．従って，図 3 で得られた投資対象銘柄の μ_i^0，σ_i^0 を式 (3)，(4)，(6) に代入し E_i，F_i，λ を求め，それらを式 (8) に代入し $v'(b_i,t_1)$ を求める．得られた $v'(b_i,t_1)$ を式 (9) に代入して c_p を求め，更に式 (5) を用いて $v(b_i,t_1)$ を求め，その正負により集合 B に含まれる銘柄と集合 S に含まれる銘柄を決定する．売買株数は，得られた $v(b_i,t_1)$ の小数第一位を四捨五入して整数とする．

Input. 対象 300 銘柄の μ_i^0，σ_i^0（ただし，以下 μ_i^0，σ_i^0 にも同様とする.）.

Output. B と S の和集合に含まれる銘柄とその μ_i^0，σ_i^0.

Step 1. σ_i^0 の値が 0 に近い銘柄を選択し，B と S の和集合とする．$\ell = 1$ と置く．

Step 2. 和集合に含まれる全銘柄の $\mu_i^{\ell-1}$，$\sigma_i^{\ell-1}(\ell \geq 1)$ を式 (4) の右辺に代入し，μ_i^ℓ を求める．

Step 3. 和集合に含まれる全銘柄の μ_i^ℓ が，$\left|\mu_i^\ell - \mu_i^{\ell-1}\right| < 0.001\left|\mu_i^\ell\right|$ を満たさない場合，ℓ を 1 増やして **Step 2.** に戻る．そうでなければ，**Step 4.** に進む．

Step 4. 和集合に含まれる全銘柄から，$\left|\mu_i^\ell - \mu_i^0\right| < \epsilon^0\left|\mu_i^0\right|$ を満たす銘柄を投資対象とし，和集合を更新する．ϵ^0 は定数とする．

図 3: 選択アルゴリズム

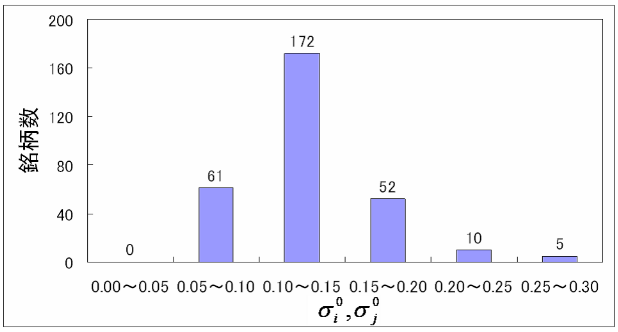


図 4: 各 σ_i^0，σ_j^0 区間の銘柄数

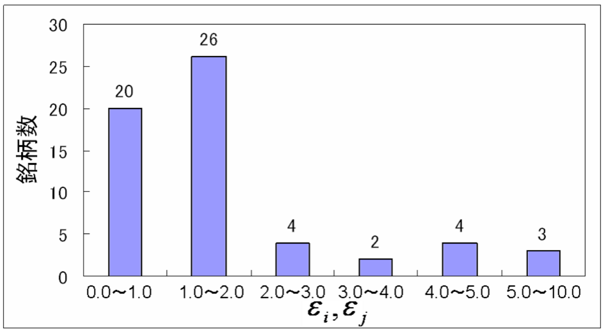


図 5: 各 ϵ_i，ϵ_j 区間の銘柄数

以上の方法により得られた結果について述べる．**Step 1.** で用いた対象 300 銘柄の σ_i^0，σ_j^0 の分布を，図 4 に示す．図 4 の結果より，4 章の最後に示された投資戦略に沿い，σ_i, σ_j がゼロに近い $\sigma_i^0 < 0.1$，$\sigma_j^0 < 0.1$ を満たす 61 銘柄を選択し，B と S の和集合とする．300 銘柄中の σ_i^0 及び σ_j^0 の最小値は 6.38×10^{-2}，最大値は 3.05×10^{-1} であり，選択のための閾値を σ_i^0，σ_j^0 として十分にその最小値に近い 10%の点を取った．これにより全体として十分に小さな σ_i^0，σ_j^0 を有する銘柄の選択が行われる．**Step 3.** は，61 銘柄に対して，わずか 2 回の反復計算で収斂し，非常に良い数値安定性を示した．次に，**Step 4.** で用いる ϵ^0 の決定方法について述べる．**Step 1.** で得られる 61 銘柄の $\varepsilon_i = \frac{|\mu_i^k - \mu_i^0|}{|\mu_i^0|}$ (添え字 j についても同様とする) の分布を図 5 に示す．これより，300 銘柄中で ϵ_i が取る範囲の最大値 9.67 より十分小さい，最大値の約 10%である $\epsilon^0 = 1.0$ を採用し，μ_i^0，μ_j^0 が式 (7) を満たす μ_i，μ_j に近い 20 銘柄を選択して B と S の和集合とした．また，c_p は，式 (9) と $\sum_{i=1}^{m_b} p(b_i, t_1) v(b_i, t_1) = 25,000,000$ より，$c_p = 4.091856 \times 10^{-8}$ となった．

表 1 に，以上より得られたカブロボの投資可能額範囲での，銘柄，購入株数 (単位，株)，配分金額 (単位，円)，配分割合 (単位,%)，μ_i^0，μ_j^0 及び σ_i^0，σ_j^0 の結果を示す．また，日経 225 について式 (8) で得られる μ_i^0，μ_i^0 を各々μ_N，σ_N とすると，$\mu_N = 9.52 \times 10^{-4}$，$\sigma_N = 6.22 \times 10^{-2}$ であった．これにより，μ_N が正なので，得られた投資対象銘柄に μ_i^0，μ_j^0 が正の銘柄が多く含まるのは妥当である．さらに，集合 B の μ_i^0 は μ_N より大きい銘柄が多く，逆に，集合 S の μ_j^0 は μ_N より小さい銘柄が多い．購入する銘柄の集合 B に一部 μ_i^0 が負の銘柄が，空売りする銘柄の集合 S には μ_j^0 が正の銘柄が含まれているが，購入する銘柄の集合 B は全体的に μ_i^0 が正であり，

表 1: 投資対象銘柄リスト

購入する銘柄の集合 B					
銘柄	株数	配分金額	配分割合	μ_i^0	σ_i^0
中外製薬	19	47785	0.09	-3.96×10^{-4}	9.68×10^{-2}
日立製作所	1159	804346	1.60	10.96×10^{-4}	8.25×10^{-2}
松下電工	2282	47785	5.71	14.92×10^{-4}	8.77×10^{-2}
トヨタ自動車	1008	6541920	13.00	33.47×10^{-4}	8.88×10^{-2}
トッパン	2097	3145500	6.25	16.62×10^{-4}	8.64×10^{-2}
日本郵船	8455	6104510	12.13	30.57×10^{-4}	8.81×10^{-2}
東京電力	183	627690	1.25	18.94×10^{-4}	7.05×10^{-2}
関西電力	1751	4859025	9.65	23.87×10^{-4}	8.79×10^{-2}
空売りする銘柄の集合 S					
銘柄	株数	配分金額	配分割合	μ_j^0	σ_j^0
7＆ＩＨＤ	-557	-2144450	4.26	-6.51×10^{-4}	9.12×10^{-2}
三菱ケミカル	-1595	1221770	2.43	-3.46×10^{-4}	9.13×10^{-2}
武田薬品工業	-237	-1760910	3.50	15.56×10^{-4}	6.93×10^{-2}
テルモ	-2	-9140	0.02	3.90×10^{-4}	8.80×10^{-2}
新日本石油	-2405	-2092350	4.16	-14.57×10^{-4}	9.81×10^{-2}
京セラ	-176	-1818080	3.61	13.55×10^{-4}	7.17×10^{-2}
ヤマハ	-246	-612540	1.22	1.96×10^{-4}	8.79×10^{-2}
JR 東日本	-5	-4210000	8.36	-9.42×10^{-4}	8.93×10^{-2}
全日本空輸	-9237	-4369101	8.68	-19.09×10^{-4}	9.53×10^{-2}
ＮＴＴドコモ	-10	-1850000	3.68	2.64×10^{-4}	8.32×10^{-2}
東宝	-1414	-3379460	6.71	-17.35×10^{-4}	9.65×10^{-2}
セコム	-316	-1861240	3.70	7.61×10^{-4}	7.83×10^{-2}

空売りする銘柄の集合 S は全体的に μ_j^0 が負なので，2 章最後に示した投資戦略に沿う銘柄選択になっていると考えられる．得られた投資対象全銘柄の σ_i^0，σ_j^0 は，σ_N より大きい．また，配分金額が大きくなると μ_i^0，μ_j^0 は増える傾向にあり，逆に，配分金額が小さくなると μ_i^0，μ_j^0 は減る傾向にある．配分金額と σ_i^0，σ_j^0 は無関係である．

6. まとめ

本研究では，将来時刻の収益絶対額の期待値とリスクを合わせた効用が最大となる買いと空売り銘柄の組み合わせ及びその投資配分を導出する手法を提案した．更に提案手法を実データに適用し，妥当な銘柄選択と投資配分を決定可能であることをを確認した．

今後の課題として，今回提案した手法のカブロボ実環境での適用検証，及び提案手法において更に最適な銘柄組み合わせを計算機探索する方法の確立，今回のモデルに金利や手数料を厳密に反映させたより精密なモデルへの拡張を検討することが挙げられる．

参考文献

[1] 国立社会保障・人口問題研究所，“ http://www.ipss.go.jp/ ”

[2] 有馬敏則，ヘッジファンドの構造変化とリスク管理，p.97-p.116，彦根論叢 (2006)

[3] The President's Working Group on Financial Markets, “ Hedge Funds, Leverage, and the Lessons of Long-term Capital Management ”, U.S. House (1999)

[4] Sergei Fedotov and Stephanos Panayides, “ Stochastic arbitrage return and its implication for option pricing ”, Department of Mathematics, UMIST (2004)

[5] David G. Luenberger, “ Investment Science ”, p.417-p.443, Oxford University Press, USA (1997)

[6] 自動株式売買ロボット・カブロボ，“ http://www.kaburobo.jp/ ”