

博士学位論文

コモディティ・デリバティブスにおける フォワード・ディスカウント・バイアス： 合理的期待平均リスク・プレミアムにおける構造変化

中野 聖子

NAKANO, Shoko

要旨

1. はじめに

2003年以降、ニューヨーク商業取引所（NYMEX）が上場する WTI 原油先物をはじめとしたコモディティ・デリバティブス価格は、最高値更新の繰り返しが顕著となり、上昇の一途を辿りました。これと同時に、コモディティ・デリバティブスは、ヘッジ手段としてのみではなく分散投資先としても注目を集めて、スワップ・ディーラーやインデックス・ファンド等を介した相対取引や取引所取引が盛んに行われるようになっていくようになりました。このようにコモディティ・デリバティブスの取引が活発化し、最高値の更新が繰り返される中、デリバティブ価格に含まれるリスク・プレミアムの額に対する関心が高まりました。

本論文では、コモディティ・デリバティブスに含まれるリスク・プレミアムについて、学術的概念の整理を行った上で、電力、原油、とうもろこし等のデリバティブスについて、合理的期待の下で発生しているリスク・プレミアムの平均値（以下、「合理的期待平均リスク・プレミアム」と言う。）の非連続的変化に焦点を当てて実証分析を行っています。

2. フォワード・ディスカウント・バイアス

フォワード・ディスカウント・バイアスとは、フォワード価格を将来の現物価格の予測値と捉えた上で、予測の不偏性テスト（アンバイアスドネス・テスト）を行うと存在する大きなバイアスのことをさします。このバイアスの存在は、フォワード・ディスカウント・バイアス（または、フォワード・ディスカウント・アノマリー）と称され、特に外国為替について多くの研究がなされ、その存在が報告されています（Hodrick(1987)、Lewis(1994)、Engel(1996)等を参照）。

フォワード価格、将来の現物価格の予測値、及び、将来の現物価格の実現値の関係は、次の恒等式によって示されます。

$$S_{t+\tau} - S_t = -(F_{t,t+\tau} - E_t[S_{t+\tau}]) + (F_{t,t+\tau} - S_t) + (S_{t+\tau} - E_t[S_{t+\tau}]) \quad (0)$$

$S_{t+\tau}$ は将来時点 $t + \tau$ 期において実現した現物価格の対数值、 S_t は現在時点 t 期において実現している現物価格の対数值、 $F_{t,t+\tau}$ は t 期における $t + \tau$ 期に満期を向かえるフォワード契約価格の対数值、 $E_t[S_{t+\tau}]$ は t 期において市場で入手可能な情報をもとに形成

された $t + \tau$ 期における現物価格の合理的期待値を表します。これにより、式 (0) の左辺は $t + \tau$ 期に実現した収益率、右辺第 2 項はデータ上にあらわれる現在のフォワード価格と現在の現物価格の乖離（つまり、フォワード・ディスカウント）となります。また、市場における期待形成が合理的であるとの仮定の下において、右辺第 1 項を合理的期待リスク・プレミアムと呼び、 $rp_t^{re} \equiv F_t - E_t[S_{t+\tau}]$ と定義します。また、この仮定の下、右辺第 3 項はランダムな予測誤差となります。

フォワード・ディスカウントにバイアスの存在を確認している多くの先行研究は、式 (0) の右辺第 1 項を定数項とした式 (1) を用いて、予測の不偏性テストを行っています。

$$S_{t+\tau} - S_t = \alpha + \beta * (F_{t,t+\tau} - S_t) + e_{t+\tau} \quad (1)$$

予測の不偏性テストでは、 $t + \tau$ 期に実現する収益率（左辺）に対して、フォワード・ディスカウントがバイアスを伴わない予測値であるかを、「 $\alpha = 0$ 」および「 $\beta = 1$ 」の帰無仮説によって検証します。

Froot (1990) は、フォワード・ディスカウント・バイアスの有無を外国為替について検証した 75 の文献を調査し、帰無仮説が「 $\beta = 1$ 」である推定値 (β) の平均が -0.88 であることを報告しています。フォワード・ディスカウント・バイアスの原因を検証する初期の研究は、推定値 (β) に焦点をあてたものが主でした。これらはバイアスの原因の想定のしたかによって大きく 3 つに分類されます。一つ目は、推定値 (β) を

構成する合理的期待リスク・プレミアムの分散等の大きさが原因とする説明で、Mark (1985)、Kaminsky and Peruga (1990)、Backus et al. (1993)等が含まれます。しかし、この説明については、Lewis(1994)等が指摘しているとおりに、リスク回避度が極端に高い状況を想定しない限り、合理的期待リスク・プレミアムの分散が期待収益率の分散よりも大きい状況を説明することができないなど、フォワード・ディスカウント・バイアスを完全に説明することは困難とのコンセンサスがあります。二つ目は、期待は合理的であるものの、分析者が用いているサンプルが有限であるために、実際に期待を形成している市場参加者と推定を行う分析者との間に情報の差異が生じて、推定値 ($\bar{\beta}$) が 1 から乖離するという、ラーニングやペソ・プロブレムと呼ばれる説明です。この説明における研究には、Lewis (1989a, b)、Evans and Lewis (1995)等があります。三つ目は、市場参加者の主観的期待に基づく期待値と数学的期待値である合理的期待値は必ずしも等しくないと想定した研究で、Frankel and Rose (1994)等があります。しかし、想定されたいずれの原因も、フォワード・ディスカウント・バイアスを完全に説明することはできていません。

これら初期の検証は、フォワード・ディスカウント・バイアスの原因説明を試みるにあたり、合理的期待リスク・プレミアム (rp_t^{re}) は一定、または、少なくともその平均値はサンプル期間を通じて一定であるとしています。つまり、式 (0) の右辺第 1 項であらわされる合理的期待リスク・プレミアムの平均値 (合理的期待平均リスク・プレミアム ($\overline{rp^{re}} \equiv \bar{F} - \overline{E[S]}$)) は、サンプル期間を通じて一定であるとの前提を置いています。本論文では、合理的期待平均リスク・プレミアムに構造変化が存在する場合も考慮に入れてフォワード・ディスカウント・バイアスの原因についての検証を行っています。

3. 合理的期待平均リスク・プレミアムにおける構造変化

式（1）の定数項（ α ）に着目してフォワード・ディスカウント・バイアスの原因説明が試みられるようになったのは、Baillie and Bollerslev (1994, 2000)、Maynard and Phillips (2001)、Diebold and Inoue (2001)、Granger and Hyung (2004)等によって、式（1）を構成する変数の時系列的特性に着目した研究が始まってからです。彼らは、式（1）の左辺の現物価格収益率は定常であるが、右辺のフォワード・ディスカウントには高い持続性（persistence）があることを指摘しています。このように右辺と左辺の変数の持続性が大きく異なる回帰式は、アンバランス回帰（unbalanced regression）と称され、予測の不偏性テストの帰無仮説「 $\alpha = 0$ かつ $\beta = 1$ 」を棄却し、かつ、誤差に系列相関をもたらす要因となります。これら一連の研究を受けて、Sakoulis and Zivot (2001)、Choi and Zivot (2007)等は、フォワード・ディスカウントにおける構造変化を考慮した上で、フォワード・ディスカウント・バイアスの説明を行っています。特に、Choi and Zivot (2007)は、式（0）の右辺第1項の合理的期待平均リスク・プレミアムに構造変化が存在することを確認し、定数項 α の構造変化を適切にコントロールすることで、合理的期待のもとで、実証上、予測が不偏であることを示す帰無仮説（ $\beta = 1$ ）の棄却可能性を軽減できるとしています。これら一連の研究は、フォワード・ディスカウント・バイアスを説明する際には、フォワード価格に含まれるリスク・プレミアムの段階的な変動を、定数項 α によって適切にコントロールすることが重要であることを示唆しています。

先に紹介したとおり、初期のフォワード・ディスカウント・バイアスの原因説明のための研究は、合理的期待平均リスク・プレミアム（ \overline{rp}^{re} ）を、サンプル期間を通じて一定の値と仮定しています。これは、合理的期待リスク・プレミアム（ rp_t^{re} ）の分散や他

変数との共分散を算出する際に用いる合理的期待リスク・プレミアムの平均値が、サンプル期間を通じて一定であると仮定していることにあたります。式(2)は、推定値(β)を、合理的期待リスク・プレミアムに起因する項(右辺第2項)、有限サンプルであることに起因する項($\overline{\beta_{ss}}$:右辺第3項)及び期待が主観的であることに起因する項($\overline{\beta_{ie}}$:右辺第4項)に分解したものです。右辺第2項より、合理的期待リスク・プレミアムの分散や他変数との共分散が過大に推定されると、推定値(β)に下方バイアスがかかることがわかります。

$$p \lim(\beta) = 1 - \frac{Cov(E_t[S_{t+\tau}] - S_t, rp_t^{re}) + Var(rp_t^{re})}{Var(F_{t,t+\tau} - S_t)} - \overline{\beta_{ss}} - \overline{\beta_{ie}} \quad (2)$$

真のモデルが、合理的期待平均リスク・プレミアム(rp^{re})に構造変化を伴うものである場合、構造変化で区切られたレジーム毎にそれぞれ存在する平均値からの乖離として、合理的期待リスク・プレミアムの分散($Var(rp_t^{re})$)や他変数との共分散を算出しない限り、合理的期待リスク・プレミアムの分散や共分散を過大に推定してしまいます。初期の検証は、合理的期待平均リスク・プレミアムはサンプル期間を通じて一定と仮定されているため、合理的期待リスク・プレミアムの分散や他の変数との共分散を過大に推定し、推定値(β)に下方バイアスがもたらされている可能性があります。つまり、フォワード・ディスカウント・バイアスを過大に評価している可能性があります。この過大評価の可能性を排除するために、フォワード価格に含まれるリスク・プレミアムの段階的な変動を、定数項 α によって適切にコントロールすることが必要となります。

本論文は、コモディティ・デリバティブスについて、合理的期待平均リスク・プレミ

アムの構造変化を式 (3) の定数項 ($\overline{rp_j^{re}}$) の非連続的変化として捉えます。

$$S_{t+\tau} - S_t = -\overline{rp_j^{re}} + \beta * (F_{t,t+\tau} - S_t) + e_{t+\tau} \quad (3)$$

for $j = 1, \dots, m+1$ and $t = T_{j-1} + 1, \dots, T_j$

式 (3) の定数項のサブスクリプト j は、合理的期待平均リスク・プレミアムに m 回の構造変化 ($m+1$ のレジーム) があることを示しています。また、 T_1, \dots, T_m は、それぞれの構造変化の時点を示しています。推定方法としては、Sakoulis and Zivot (2001) や Choi and Zivot (2007) と同様に、Bai and Perron (1998) の複数構造変化テストを用いています。

4. 様々なコモディティ・デリバティブに含まれるリスク・プレミアム

本論文の第2章以降は、合理的期待平均リスク・プレミアムの非連続的な変化を考慮に入れて、様々なコモディティ・デリバティブに対して、フォワード・ディスカウント・バイアスの分析を行っています。

第2章では、電力先渡し取引について分析を行っています。電力先渡し取引の原資産である電力は貯蔵不可能な財であるため、予期せぬ需給逼迫によって、現物価格にスパイクが発生しやすいコモディティです。第2章では、現物価格のスパイクを潜在的に軽減可能な政策の導入が、先渡し価格に含まれる合理的期待平均リスク・プレミアムに如何なる影響を及ぼしたかを検証しています。具体的には、NYISO (the New York Independent System Operator (ニューヨーク独立電力管理機構)) によって締結された EET 合意 (the Emergency Energy Transaction Agreements (非常時の電力融通に

関する合意))、及び、PRLプログラム (the Price Response Load programs (価格弾力的電力需要プログラム)) の実施に焦点を当てて検証しています。EET 合意とは、近接しあう電力市場において、突発的な電力需給の逼迫が生じた場合に、迅速に電力を融通しあえるよう予め発動要件や金銭的条件を定めるものです。PRL プログラムとは、配電が危機的状況となる可能性のある特定の時間の間、大口電力需要者に対し、経済的インセンティブを与えた上で、自発的節電を働きかける政策です。

分析の結果、EET 合意の締結 (2000 年夏) 及び PRL プログラムの実施 (2001 年夏) と整合的な日付から、合理的期待平均リスク・プレミアムの低下を示す構造変化が有意に検出されました。2000 年夏に締結された EET 合意は、ISO New England との間のものであり、この合意と整合的な構造変化は、特にニューヨーク州の南東部に位置するニューヨーク・シティ及びロング・アイランド・ゾーンから多く検出されました。また、PRL プログラムと整合的な構造変化は、PRL プログラムに最も積極的に参加したニューヨーク州西部地域の、緩やかな価格スパイクを伴う時間帯から多く検出されました。この結果は、現物価格のスパイクを潜在的に軽減させることができる政策の導入が、予期せぬ電力需給の逼迫に伴う現物価格のスパイクを緩和させ、それによって、電力先渡し市場におけるヘッジ需要が低下したことを示唆するものといえます。

第3章では、ニューヨーク商業取引所 (NYMEX : New York Mercantile Exchange) に上場されている WTI (West Texas Intermediate) 原油先物価格について、Froot and Frankel (1989) に従い、サーベイ予測データを用いて、式 (1) の推定値 (β) が1から乖離する要因を明らかにしています。また、補論では、合理的期待平均リスク・プレミアムの存在について検証するとともに、合理的期待平均リスク・プレミアムが、段階

的に不連続な形で変化する要因が Keynes (1930)等によって示されたヘッジング・プレッシャーに起因するものであるかを分析しています。

1996年から2008年までのデータを検証した結果、(1) WTI原油先物価格は将来の現物価格のバイアスを伴った予測値であり、(2) そのバイアスの統計的に有意な原因は、システムティックな予測誤差(予測誤差とフォワード・ディスカウントの相関)であることが明らかになりました。また、サーベイ予測と事後的な現物価格の比較では、この期間において、将来の現物価格が継続的に過小予測されていたことが明らかになりました。将来の現物価格の継続的過小予測は、Froot and Frankel (1989)が行った外国為替の検証においては検出されておらず、本章で分析したサンプル期間の原油価格のデータにおいて特徴的に検出されたものです。また、補論における分析では、1995年11月から2003年5月までは、フォワード・ディスカウント($F_{t,t+k} - S_t$)とサーベイ予測データに基づく期待収益率($\hat{S}_{t+k}^e - S_t$)の差によって計られる合理的期待平均リスク・プレミアムが、約2パーセンテージ・ポイントであったが、2003年6月以降は8パーセンテージ・ポイントに拡大したことが明らかになりました。この拡大時期がサーベイ予測値における分散の拡大時期と重なっていることから、近年の原油価格の高騰は、将来の現物価格に対する不確実性の拡大によって投資家が要求する合理的期待平均リスク・プレミアムの水準自体が上昇したことや、将来のファンダメンタルズについて限られた情報しか有していない状況下で形成された期待自身を反映しているのではないかと考えられます。

第4章では、東京穀物商品取引所に上場されている大豆、とうもろこし、小豆、アラビカコーヒー及びロブスタコーヒーの先物価格について予測の不偏性テストを行って

います。分析の結果、一般大豆、とうもろこし及び小豆の1番限、アラビカコーヒーの全番限、並びに、ロブスタコーヒーの2番限を除く全番限において、先物価格が事後的に実現する現物価格の不偏予測値となっていることが確認されました。また、一般大豆においては、遺伝子組み換え食品に対する関心の高まりが、合理的期待平均リスク・プレミアム構造変化に影響を与えた可能性が伺われる結果が得られました。

これらの他、第1章の補論では、コモディティ・デリバティブスに関する先行研究として、在庫量と、ベイス（現在の現物価格と現在の先物価格の差）及びリスク・プレミアムの関係をモデル化した Gorton, Hayashi, and Rouwenhorst (2007)を紹介するとともに、ニューヨーク商業取引所 (NYMEX) に上場されている原油及び金の先物価格動向について概観しています。また、第2章の補論では、米国商品先物委員会 (CFTC : The Commodity Futures Trading Commission) が、相場操縦に対して行った法執行事例をまとめています。

参考文献

- Backus, David, Allan W. Gregory, Chris I. Telmer (1993) Accounting for Forward Rates in Markets for Foreign Currency, *The Journal of Finance*, Vol. 48, No. 5, 1887-1908.
- Baillie, Richard and Tim Bollerslev (1994), The long memory of the forward premium, *Journal of International Money and Finance*, Volume 13, Issue 5, October 1994, Pages 565-571.
- Baillie, Richard and Tim Bollerslev (2000), The forward premium anomaly is not as bad as you think, *Journal of International Money and Finance*, Volume 19, Issue 4, August 2000, Pages 471-488.
- Bai, Jushan and Pierre Perron (1998), Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes, *Econometrica*, Vol. 66, No. 1 (Jan., 1998), pp. 47-78.
- Choi, Kyongwook and Eric Zivot (2007), Long memory and structural changes in the forward discount: An empirical investigation, *Journal of International Money and Finance* Volume 26, Issue 3, 342-363.
- Diebold, Francis and Atsushi Inoue (2001), Long memory and regime switching,

- Journal of Econometrics, Volume 105, Issue 1, 131-159.
- Engel, Charles (1996), The forward discount anomaly and the risk premium: A survey of recent evidence, *Journal of Empirical Finance* Volume 3, Issue 2, 123-192.
- Evans, Martin D. and Karen Lewis (1995), Do long-term swings in the dollar affect estimates of the risk premia?, *Review of Financial Studies* Volume 8, Number 3, 709-742.
- Frankel, Jeffrey and Andrew Rose (1995), An Empirical Characterization of Nominal Exchange Rates, in G. M. Grossman & K. Rogoff eds. *Handbook of International Economics* (North Holland).
- Froot, Kenneth (1990), Short Rates and Expected Asset Returns, NBER Working Paper No. 3247.
- Froot, Kenneth and Jeffrey Frankel (1989), Forward Discount Bias: Is it an Exchange Risk Premium?, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 104, No. 1, 139-161.
- Gorton, Gary B., Fumio Hayashi, and Geert Rouwenhorst (2007), The Fundamentals of Commodity Futures Returns, National Bureau of Economic Research, Inc, NBER Working Papers: 13249.
- Granger, Clive and Namwon Hyung (2004) *Journal of Empirical Finance*, Volume 11, Issue 3, 399-421.
- Hodrick, Robert (1987) *The Empirical Evidence on the Efficiency of Forward and Futures Foreign Market* (CRC Press).
- Kaminsky, Graciela and Rodrigo Peruga (1990) Can a time-varying risk premium explain excess returns in the forward market for foreign exchange?, *Journal of International Economics*, Volume 28, Issues 1-2, 47-70.
- Lewis, Karen (1994) Puzzles in international financial markets, in *Handbook of International Economics*, edited by R. Jones, P. Kenen, G. Grossman and K. Rogoff, (Elsevier).
- Lewis, Karen (1989a) Can learning affect exchange-rate behavior? The case of the dollar in the early 1980's, *Journal of Monetary Economics*, Volume 23, Issue 1, 79-100.
- Lewis, Karen (1989b) Changing Beliefs and Systematic Rational Forecast Errors with Evidence from Foreign Exchange, *The American Economic Review*, Vol. 79, No. 4, 621-636.
- Mark, Nelson (1985) On time varying risk premia in the foreign exchange market: An econometric analysis, *Journal of Monetary Economics*, Volume 16, Issue 1, 3-18.
- Maynard, Alex and Peter Phillips (2001) Rethinking an old empirical puzzle: econometric evidence on the forward discount anomaly, Volume 16, Issue 6 , Pages 671 - 708.
- Sakoulis, Georgios and Eric Zivot (2001) Time-Variation and Structural Change in the Forward Discount: Implications for the Forward Rate, Working Paper, Department of Economics, University of Washington.