

博士学位請求論文要旨

エネルギーマーケットへのファイナンス理論の適用

金村 宗

1. 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第1章 イントロダクション

- 1.1 本論文の目的
- 1.2 本論文の構成

第2章 電力価格スパイクの構造型モデル

- 2.1 イントロダクション
- 2.2 構造型モデル
- 2.3 電力価格の実証的分析
- 2.4 最適発電政策への応用
- 2.5 レジームスイッチングの遷移確率
- 2.6 結論と今後の課題
- 2.7 補論

第3章 エネルギー価格に関する時間変動型ボラティリティーモデル

- 3.1 イントロダクション
- 3.2 モデル
- 3.3 天然ガス価格の実証的研究
- 3.4 供給曲線形状と均衡需要量
- 3.5 需要・供給曲線の同時方程式推定と需要曲線の価格非弾力性
- 3.6 結論と今後の課題
- 3.7 補論

第4章 エネルギー価格に関する拡張シュワルツモデル

- 4.1 イントロダクション
- 4.2 エネルギー価格の拡張シュワルツモデル
- 4.3 エネルギー価格の実証的研究

4.4 結論と今後の課題

4.5 補論

第5章 天候デリバティブによる電力会社のリスク管理

5.1 イントロダクション

5.2 モデル

5.3 天候デリバティブ価格の実証的研究

5.4 電力会社のリスクヘッジと天候デリバティブ(その1)

5.5 電力会社のリスクヘッジと天候デリバティブ(その2)

5.6 結論と今後の課題

5.7 補論

第6章 結論と課題

6.1 本論文の結果と含意

6.2 今後の課題

参考文献

2. 本論文の目的

本論文の目的は、エネルギー市場での観察から得られた需要供給関係に基づき、エネルギー価格特有の現象を適切に表現できる価格モデルを提案し、このモデルとファイナンス理論を基礎としてエネルギー市場でのリスク管理について検討することである。

自由化後のエネルギー市場での観察によると、価格が消費動向や生産形態といった需給の影響を強く受けることから、エネルギー価格は株式などの金融市場の資産価格と異なる性質を持つことが知られている。スパイクと呼ばれる急激な価格の上昇、季節毎に特有の挙動を示す価格の季節性、価格リターンの変動率が大きい高ボラティリティーが主なエネルギー価格特有の現象である。そこで本論文で行うエネルギー価格のモデル化では、市場での観察結果から得られた需要供給関係に着目する。具体的には、エネルギー市場において、供給曲線が短期的に安定的で需要曲線が価格に非弾力的であるとの仮定のもと、需要量が確率的に変動することで価格が求まるモデルを提案する。そして、この需給に基づくエ

エネルギー価格モデルを用いることで、エネルギー価格特有の現象を適切に表現でき、その結果、価格スパイクの正確な把握といったリスク管理上のメリットが得られることを示す。

3. 第2章 電力価格スパイクの構造型モデル

第2章の目的は、価格スパイクを適切に表現できる需給に基づいた電力価格モデルを提案し、電力市場への参加者がリスク管理を行う上でのモデルの有益性を例証することである。

まず、電力需要の平年からの乖離を平均回帰過程で表現することで電力需要をモデル化し、それを Hockey-Stick 回帰モデルで表される固定的な供給曲線によって変換することで電力価格が求まるという構造型モデルを提案する。

このモデルを用いることで、例えばジャンプ・ディフュージョンモデルといった既存の電力価格モデルに比べ、電力市場特有の価格スパイクについて、タイミングと大きさの点から適切に表現できることを、米国の PJM 電力市場のデータを使って実証的に検証する。また、その際、電力需要に見られる季節性を明示的にモデル化することの重要性を示す。

さらに、構造型モデルの応用例として、発電による電力市場への売電と発電機会に備えた揚水による市場からの買電によって生じる損益の現在価値を最大化する揚水発電所の最適運用に構造型モデルを適用する。その結果、価格スパイクが生じる直前の電力需要領域では、収益機会となる価格スパイクに備えた揚水が最適運用であるという直感に近く、かつジャンプ・ディフュージョンモデルでは適切に捉えられない結果を得ることができる。

そして最後に、電力価格のレジームスイッチング現象について、需給に基づく電力価格モデルを用いることで、レジーム間の遷移確率が電力需要量を使って適切に表現できることを示す。このモデル化は、電力価格が電力需要量に依存しており、需要量がある閾値を超えることで価格のレジームスイッチが起こるため、遷移確率は一定ではなく需要量と伴に変動するという市場の観察結果と一致している。加えて、この結果は、レジームスイッチング現象を表現する上で遷移確率一定のレジームスイッチングモデルを用いることに対する一つの反例となっている。

4. 第3章 エネルギー価格に関する時間変動型ボラティリティーモデル

第3章の目的は、エネルギー市場の需給関係を柱として、市場で観察されるボラティリティーの特徴を適切に表現できる価格リターンの時間変動型ボラティリティーモデル (Time-Varying Volatility モデル: T.V.V. モデル) を提案し、このモデルを用いることで米国の天然ガス市場のボラティリティーを実証的に分析することである。

まず、急な傾き変化を持つ供給曲線と確率的に変動する需要量によって特徴付けられる T.V.V. モデルを提案する。そして、エネルギー市場でしばしば観察される、価格リターンのボラティリティーが価格とともに上昇する逆レバレッジ効果とエネルギー市場の価格リターンのドリフト項がボラティリティーによって変動する不均一分散モデルの Volatility-in-mean 効果の両方が、T.V.V. モデルの中で適切に表現されていることを示す。次に、不均一分散モデルと離散型 T.V.V. モデルの関係を検証した結果、ボラティリティーにおいて需要量の攪乱項の2乗項が支配的な場合、しばしばエネルギー価格のリターンのモデル化に用いられる (G)ARCH-M モデルと離散型 T.V.V. モデルが一致することを示す。

さらに、T.V.V. モデルに基づいて、米国天然ガス市場のボラティリティーに関する実証的分析を行う。まず、天然ガスの月次価格と月次需要量を用いて、T.V.V. モデルにおける逆 Box-Cox 変換型供給曲線のパラメーターを非線形回帰モデルによって推定する。推定結果によると、天然ガス市場の供給曲線の傾き変化が急であるとのインプリケーションが得られ、逆レバレッジ効果の原因となっていることを示す。次に、離散型 T.V.V. モデルから根拠を得た GARCH(1,1)-M モデルを月次価格に適用し、天然ガス価格に Volatility-in-mean 効果が存在することを確認する。

また、実証的分析では均衡需要量を消費需要量と貯蔵需要量の和で近似したが、近似の妥当性を検討するため、均衡需要量を観測不可能な変数、均衡価格を観測可能な変数として、拡張カルマンフィルターを適用し、供給曲線形状のパラメーター値を推定する。推定結果を非線形回帰モデルの推定結果と比較することで、均衡需要量を消費需要量と貯蔵需要量の和で近似することが一次近似的に有効であることを示す。

最後に、非線形2段階最小二乗法 (N2SLS) によって需要・供給曲線の同時方程式を推定することで、T.V.V. モデルが仮定する需要曲線の価格非弾力性と供給曲線の形状について実証的に検証する。その結果、需要

は価格について非弾力的であり，供給曲線形状は傾き変化が急であるとの推定結果が得られ，同時方程式として需要・供給曲線を決定する場合であっても，本章で提案する T.V.V. モデルの仮定が支持されることを示す．

5. 第4章 エネルギー価格に関する拡張シュワルツモデル

第4章の目的は，急激に傾きが変化する供給曲線を構造に持つエネルギー価格モデルとして拡張シュワルツモデルを提案するとともに，エネルギー価格を特徴付ける上での供給曲線形状の重要性を先物価格に基づいて実証的に検証することである．

天然ガス市場での観察によると，エネルギー市場の供給曲線は指数関数よりも急な傾き変化を持つ関数となる可能性が高い．そこで，このような供給曲線形状をモデル化でき，さらにパラメーター値がゼロのとき指数関数となる逆 Box-Cox 変換型供給曲線と，2種類の需要量の和で表現される需要量の確率過程を用いることで価格を表現する．その結果，価格リターンのドリフト項とボラティリティ項がともに，このパラメーターによって時間変動する価格モデルとなる．供給曲線の傾き変化が大きいとそれに応じてボラティリティも大きくなり，逆に傾き変化が小さいと小さなボラティリティとなる点がモデルの特徴である．特に，逆 Box-Cox 変換型供給曲線の変換パラメーターが指数型供給曲線と一致するゼロのとき，ボラティリティが一定で，Schwartz(1997)の2ファクターモデルと一致するため，本章で提案する価格モデルを拡張シュワルツモデルと呼ぶ．

次に，ニューヨーク商業取引所 (NYMEX) で取引される天然ガス先物・WTI 原油先物・暖房用油先物の3種類の先物価格を用い，先物価格を観測可能な変数，拡張シュワルツモデルのスポット価格とコンビニエンスイールドを観測不可能な変数として，拡張カルマンフィルターを適用することで，それぞれのエネルギー価格についてモデルのパラメーターを推定する．推定結果によると，Schwartz(1997)が提案するモデルとは異なって，供給曲線の急激な傾き変化を価格モデルに組込むことが，エネルギー価格のモデル化上重要であることを示す．

6. 第5章 天候デリバティブによる電力会社のリスク管理

第5章の目的は、気温インデックスを原資産とする天候デリバティブの価格付け手法を提示するとともに、電力自由化後の電力会社の収益リスクに対し、天候デリバティブを活用したリスク管理について論ずることである。

本章ではまず、天候デリバティブの価格付けで問題となる市場の不完備性に対処するため、Cochrane and Saa-Requejo (2000) のグッドディールバウンズに基づいた天候デリバティブの価格付け手法を提案する。

実証的研究では、東京の気温と日経 225 のデータに基づいた気温と株価に関する確率過程の同時パラメーター推定値を用い、2種類の天候デリバティブの価格付けを行う。まず、天候デリバティブの株式市場への新たな導入がリスクの市場価格をもとの2倍もしくは3倍に拡大するとの設定のもと、6月の累積CDDを原資産とするヨーロッパ型コールオプション価格について、価格の上・下限値およびゼロ天候リスクプレミアム価格を算出する。さらに、同様の条件のもと、6月の気温のうち25以上の超過時間が5日を越えるとその分のペイオフが支払われるヨーロッパ型コールオプション価格を計算する。

次に、天候デリバティブを用いた電力会社のリスク管理について、電力市場から電力を調達し、固定価格で消費者へ販売する電力会社が、コストに相当する価格と需要量の積の増加リスクを天候デリバティブによってヘッジする場合のリスク管理手法について2通りのケースを検討する。まず、相対契約のように天候デリバティブのポジションを変更できないケースについて検討する。従来の天候デリバティブのペイオフではボリュウムリスクしかヘッジできないため、価格リスクも同時にヘッジできるように、通常CDDを供給曲線形状で変換する関数を導入することで、新たな天候デリバティブをデザインする。加えて、米国PJM市場のデータによるモデルパラメーターの推定値とCochrane and Saa-Requejo (2000) に基づいた数値計算手法を用いることで、デリバティブ価格を求める。

もう一つのケースとして、シカゴ商業取引所(CME)のような商品取引所で取引される天候デリバティブを用い、連続的にポジションを変えることで価格と需要量の積のリスクをヘッジする場合のヘッジ戦略について検討する。比較のため、価格モデルには市場の需給を適切に反映した構造型モデルと適切には表現できない誘導型モデルの2通りを採用すると、

最小のヘッジ誤差を与えるポジションがそれぞれ異なり，その違いは価格モデルが想定する市場の供給曲線形状から生じていた．従って，電力会社のコストの増加リスクをヘッジする上で，電力市場の需給関係，特に供給曲線形状が重要な役割を果たしていることが分かる．

7. 第6章 結論と課題

第6章の目的は，本論文で行った議論を総括した上でその含意を論じるとともに，本論文で扱うことができなかつた残された課題について言及することである．

各章で検討したエネルギー価格のモデル化およびそれに基づくリスク管理への応用について総括すると，これらの結果から二つの含意が得られた．まず，エネルギー価格特有の現象を適切に表現できる価格モデルを構築するには，市場の需給をその構造として直接的にモデルに織り込むことが重要である．また，エネルギー価格のリスク管理を行う上でも同様に，市場の需給関係を考慮することが重要である．

今後の残された研究課題として，第2章での電力価格のモデル化に関して，供給曲線を短期的に一定と仮定したが，長期的には時間の経過と共に変化する可能性があるため，電源構成の変化に伴う供給曲線の変動を考慮に入れた供給曲線のモデル化とその推定を行う必要がある．さらに，構造型モデルをより現実的なものとするため，電力需要に見られる土日効果をモデルに組込むことが考えられる．第3章での天然ガス市場のボラティリティの実証的分析について，本研究では月次データによる実証的研究を行ったが，より詳細に分析するため，例えば週次，日次といった頻度の高いデータによる実証的研究を行うことが挙げられる．第4章のエネルギー市場価格の実証的分析に関して，本章で分析した天然ガス先物，WTI原油先物，暖房用油先物以外のエネルギー先物，例えばガソリン先物，石炭先物のケースについても同様な分析を行うことが可能である．最後に，第5章での天候デリバティブを用いた電力会社のリスク管理に関して，まず天候デリバティブの価格付けでは，デйкаウントオプションをより精度の高いものとするため，デйкаウントを正確に確率過程で表現した場合のオプション価格の価格付けを行う必要がある．また，電力会社のリスク管理について，ヘッジ戦略を論じる上で，第2章と同様に，供給曲線は短期的に固定的であると仮定したが，供給曲線を変化させることも今後の研究課題として挙げられる．