

**IMES DISCUSSION PAPER SERIES**

**ファイナンス・ワークショップ  
「金融危機後の金融工学の展開」の様**

**Discussion Paper No. 2010-J-5**

**IMES**

**INSTITUTE FOR MONETARY AND ECONOMIC STUDIES**

**BANK OF JAPAN**

**日本銀行金融研究所**

**〒103-8660 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1**

**日本銀行金融研究所が刊行している論文等はホームページからダウンロードできます。**

**<http://www.imes.boj.or.jp>**

**無断での転載・複製はご遠慮下さい。**

**備考：** 日本銀行金融研究所ディスカッション・ペーパー・シリーズは、金融研究所スタッフおよび外部研究者による研究成果をとりまとめたもので、学界、研究機関等、関連する方々から幅広くコメントを頂戴することを意図している。ただし、ディスカッション・ペーパーの内容や意見は、執筆者個人に属し、日本銀行あるいは金融研究所の公式見解を示すものではない。

## ファイナンス・ワークショップ 「金融危機後の金融工学の展開」の様

### 要 旨

日本銀行金融研究所は、2009年12月22日に「金融危機後の金融工学の展開」をテーマとした研究ワークショップを開催した。

米国のサブプライム住宅ローン問題に端を発した今次金融危機の経験は、実体経済や政策運営の面だけでなく、学術研究の領域にもさまざまな課題を投げかけた。特に、ファイナンス研究の分野は金融危機との関連が深かっただけに、学術的視点と実務的視点の双方から今後の方向性を検討する意義が大きいと考えられる。本ワークショップは、こうした問題意識のもと、金融の実務家と研究者が意見交換を行うことを目的として開催された。

本ワークショップは2つのセッションで構成された。第1セッションでは、信用リスクの計量、株式市場の分析、資産価格変動の相互依存関係という観点から、金融危機の経験を踏まえた3つの研究報告とそれらに基づく討議が行われた。第2セッションでは、「金融危機後の金融工学の展開」をテーマとしたパネル討論が行われ、3人のパネリストによる導入報告に続き、参加者による自由討議が行われた。パネル討論では、金融工学のこれまでの貢献や今後の課題についてさまざまな意見が呈示され、最後に、座長によりワークショップ全体が総括された。

キーワード：金融工学、金融危機、リスク管理、市場分析、証券化商品

JEL classification: G13、G14、G32、G33

本稿に示されている意見はすべて発言者ら個人に属し、その所属する組織の公式見解を示すものではない。

## (目次)

1.	はじめに.....	1
2.	開会挨拶.....	2
3.	論文報告1「信用ポートフォリオのリスク計量」.....	3
	(1) 金子・中川報告の要旨.....	3
	(2) 青沼コメントの要旨.....	5
	(3) リジョインダーと自由討議.....	6
4.	論文報告2「金融危機時における株式市場の期待変動」.....	8
	(1) 杉原・小田報告の要旨.....	8
	(2) 宮崎コメントの要旨.....	10
	(3) リジョインダーと自由討議.....	11
5.	論文報告3「金融危機時における資産価格変動の相互依存関係」.....	13
	(1) 新谷・山田・吉羽報告の要旨.....	13
	(2) 室町コメントの要旨.....	15
	(3) リジョインダーと自由討議.....	16
6.	パネル討論：パネリストによる報告.....	19
	(1) 大橋報告の要旨.....	19
	(2) 亀澤報告の要旨.....	20
	(3) 薄葉報告の要旨.....	22
7.	パネル討論：自由討議.....	24
	(1) 金融工学が果たした役割.....	25
	(2) 金融危機を踏まえた反省点.....	25
	(3) 今後の金融工学の展開.....	29
8.	座長総括.....	32

## 1. はじめに

日本銀行金融研究所は、2009年12月22日に「金融危機後の金融工学の展開」をテーマとした研究ワークショップを開催した。本ワークショップは、米国のサブプライム住宅ローン問題に端を発した金融危機の経験を踏まえ、金融工学の今後の方向性について実務家と研究者が意見交換を行うことを目的として開催された。

本ワークショップは、2つのセッションから構成された。第1セッションでは、日本銀行金融研究所の研究報告に対し、指定討論者のコメントのあと、参加者による自由討議が行われた。第2セッションでは、「金融危機後の金融工学の展開」をテーマとしたパネル討論が行われた。まず、3名のパネリストにより導入報告が行われ、その後、参加者による自由討議が行われた。自由討議では、金融工学の展開に関し、(1)これまでの役割、(2)金融危機の経験を踏まえた反省点、(3)今後の展望、などについてさまざまな意見が呈示され、最後に座長により全体の議論が総括された。全体のプログラムは以下のとおりである<sup>1</sup>。

### < プログラム > (敬称略)

開会挨拶 高橋 亘 (日本銀行 金融研究所長)

#### 第1セッション：研究報告

司会：小田信之 (日本銀行)

論文報告1 信用ポートフォリオのリスク計量：金利変化見通しと個別企業価値変動を考慮したトップダウン・アプローチ

執筆者：金子拓也\* (日本銀行)・中川秀敏 (一橋大学)

指定討論者：青沼君明 (三菱東京UFJ銀行)

論文報告2 金融危機時における株式市場の期待変動：インプライド・モーメントとジャンプ拡散過程を用いた分析

執筆者：杉原慶彦\*・小田信之 (日本銀行)

指定討論者：宮崎浩一 (電気通信大学)

<sup>1</sup> 第1セッションで報告された3つの論文については、本ワークショップでのコメント等を受けて改訂を行い、本年春を目処に日本銀行金融研究所ディスカッション・ペーパーとして公表する予定。

論文報告 3 金融危機時における資産価格変動の相互依存関係：コピュラに基づく評価

執筆者：新谷幸平・山田哲也・吉羽要直\*（日本銀行）

指定討論者：室町幸雄（首都大学東京）

\* が各論文の報告者

第 2 セッション：パネル討論「金融危機後の金融工学の展開」

座長：倉澤資成（横浜国立大学）

パネリスト報告 1 報告者：大橋和彦（一橋大学）

パネリスト報告 2 報告者：亀澤宏規（三菱東京 UFJ 銀行）

パネリスト報告 3 報告者：薄葉真哉（みずほ証券）

自由討議

座長総括 倉澤資成（横浜国立大学、日本銀行金融研究所顧問）

なお、本ワークショップには、民間金融機関等でリスク管理や金融商品開発などに携わっている実務家とファイナンス関連の研究者が約 60 名、日本銀行職員が約 30 名参加した（このうち、ラウンドテーブル参加者については後掲参考を参照）。以下では、本ワークショップにおける開会挨拶（2 節）、各論文報告（3 節、4 節、5 節）、パネル討論（6 節、7 節）、および座長総括（8 節）について、その概要を紹介する（以下、敬称略。文責：金融研究所）。

## 2. 開会挨拶

高橋は、開会挨拶として、今次金融危機の経験を踏まえ今後の金融工学を展望するうえでの問題意識を呈示した。

金融危機の経験は、政策運営の面だけでなく、経済やファイナンスなどの研究分野にもさまざまな課題を投げかけている。中でも、ファイナンス研究の分野は金融危機との関連が深かっただけに、学術的視点と実務的視点の双方から今後の方向性を検討しておく意義が大きい。また、金融危機に限らず、

それ以前の例えば「コナンドラム」などの現象を含め、ここ10年以上金融市場には解明すべきいくつかの問題があった。本ワークショップでは、活発な討議を通じて、そうした問題への理解を深めることを期待したい。

具体的な論点として、第1に、これまでの金融工学の発展や利用のされ方を巡る問題がある。「金融危機の責任は金融工学にある」といった意見を極論と切り捨てるのは簡単であるが、それでも、ここ2~3年の急激な市場変動やそれに先立つ極めて安定的な市場環境の経験は、金融工学を開拓する立場にも、利用する立場にも、新たな発見をもたらしたのではなからうか。特に、最も高度なリスク管理を具備しているとされていた欧米から今回の金融危機が生じたことは極めて意外であったが、そうしたリスク管理の視点で何らかの教訓を得られるとすれば興味深い。

第2に、今次危機からの教訓等を踏まえて、今後の金融工学の課題と方向性をどう考えるかという問題がある。金融工学は金融の機能を高めていくうえで不可欠なツールだと確信しているが、より良く発展させていく道筋についてあらためて議論しておくのは有益だろう。また、金融機能の将来像を語るには、法制度、規制・監督、会計など各種の制度的側面も視野に入れる必要がある。当研究所ではそれらを含むさまざまな分野の研究を進めており、金融工学に関する議論とともに、今後の当研究所全体の研究活動にも大きな示唆を頂けることを期待している。

### 3. 論文報告1「信用ポートフォリオのリスク計量」

#### (1) 金子・中川報告の要旨

金子は、信用ポートフォリオのリスク計量を行ううえで、金利の期間構造等から導出される経済の先行き見通しに関する情報を利用し、リスク評価の精度と即時性を高める手法を提案した。その概要は以下のとおりである。

信用ポートフォリオのリスク計量方法の多くでは、過去のデフォルト・データや現在の格付け情報などに基づいてリスク指標が算出され、経済の先行き見通しに関する情報は用いられない。ところが、1996年以降のわが国のデータをみると、金利上昇局面では格上げ率が上昇し、金利下降局面では格下げ率が上昇するといった傾向が強く観察される。また、クレジット・イベントが

集中した時期<sup>2</sup>の前には、イールドカーブがフラット化する現象も観察される。このように、金利の期間構造は、将来の格付け変更やクレジット・イベントの可能性など、経済の先行き見通しに関する情報を包含していると考えられる。

そこで、本研究では、リスク評価時点における金利の期間構造から先行きの期待金利変動を導出し、その情報を勘案して信用ポートフォリオの格付け変更強度をモデル化する<sup>3</sup>。また、モデル化に当たっては、これまで CDO (collateralized debt obligation) の評価手法として発展してきたトップダウン・アプローチ<sup>4</sup>を応用する。従来のトップダウン・アプローチでは、最初に評価される事象(トップの事象)はポートフォリオ全体でみたデフォルト事象であるが、本研究では、ポートフォリオ内の格付け変更をトップの事象としてモデル化している。これは、実務において企業格付けが重視されている点を念頭においたものである。さらに、ポートフォリオの中で生じた格付け変更を個別の企業に割り当てる際には、各企業の信用状態に応じた確率を利用する。具体的には、マートン・モデルにより得られる各企業のデフォルト率をその時点の信用状態と捉え、それが当該企業の格付けに対応する信用状態からどの程度乖離しているかに応じて別の格付けに遷移する確率を割り振る。

このようにリスク計量モデルを構築し、サンプル・ポートフォリオに対してモンテカルロ・シミュレーションを適用したところ、各種設定条件と整合的な損失分布が得られた。また、経済の先行き見通しを考慮する場合としない場合のリスク量を比較すると、特にクレジット・イベントが発生し始めた局面で、前者の方がリスクを大きく評価しており、本モデルの有効性が示唆された。なお、リスク評価の過程では各企業のデフォルトの期間構造も同時に得られるため、それに基づきローン債権をプライシングすることも可能である。この場合、信用ポートフォリオのリスク評価と個別ローンのプライシングを統一に行うことができる。

---

<sup>2</sup> 具体的には、国内外で主要金融機関の経営危機・破綻が発生した 1997年11月~98年12月、2003年3月~5月、2008年5月~9月の3つの時期を想定した。

<sup>3</sup> 市場金利情報は日々更新されるため、これに基づく経済見通しを将来の格付け変更予測に織込む方法は、マクロ経済指標に基づく予測に比べ、評価の即時性という点で優れている。

<sup>4</sup> トップダウン・アプローチは、信用リスクを評価するうえで、まずポートフォリオ全体のクレジット・イベントを評価し、それを個別債権のクレジット・イベントへ割り当てて損失の可能性等を分析する手法である。これに対し、従来の信用リスク管理では、まず個別債権の評価を行い、その情報を積み上げてポートフォリオの評価を行うボトムアップ・アプローチが一般的である。



## (2) 青沼コメントの要旨

指定討論者の青沼は、実務の観点から、経済の先行きシナリオに基づく与信管理が求められている現状を説明し、本報告で示された枠組みは実務での活用に繋がる有益なものであると評価した。そのうえで、本モデルを実用化していくうえでの課題を整理した。また、米国についての分析事例を示しながら、本モデルとは異なる形で格付け推移確率を表現する方法を紹介した。

実務の観点からは、将来の経済シナリオを反映した格付け推移行列を得て、個社の現時点の格付けを出発点として将来の格付けを表現し、それらを基に全体のリスクを評価したいというニーズがある。本モデルはこうした手法の1つであり、応用性に優れていると思われる。

ただし、細かい点において実用化上の課題も残されている。第1に、金利の期間構造に経済見通しが十分正確に反映されているかという問題がある。長期金利は先行きの短期金利の水準だけでなく、その不確実性なども反映しており、それらをどう識別するかが問題となる。また、マクロ的な経済・物価環境の変化に伴う金融政策の変更が金利水準に影響する面もある。したがって、マクロ経済指標も直接モデルに取り込んだ方がよい可能性がある。第2に、本報告で取り上げられた3つのクレジット・イベントはいずれも金融機関に発生したクレジット・イベントであり、それらと金利の連関性を検証しただけではマクロ経済全体と金利の連関性の証左としては不十分かもしれない。第3に、本モデルでは格付け水準によらない形で格付け変更強度をモデル化しているが、実際には格付け水準によって変更強度は異なり、低格付けの方が経済変動に敏感であると考えられる。また、格付け変更の頻度は決算期の存在などに伴う季節性を持っている。こうした細かな点での対応が今後実務に適用していく際に課題となると考えられる。

なお、本報告とは分析手法も対象も異なるが、1ファクター・ロジットモデルを用いて、米国企業を対象に、デフォルト率の予測に有効なマクロ経済指標を考察した分析がある。それによると、結果は時期によって区々であるが、1970年4月から2009年10月までの期間を通じた傾向として、GDPや失業率といった指標の説明力が高いとの結果を得ている。一方、金利に関しては中期の金利の説明力はある程度高いものの、長期金利の説明力は低いとの結

果であった。

また、格付け推移行列の扱いについては、本報告のような方法のほかに、マートン・モデルのような構造モデルに基づき、以下のように把握することも可能である。まず、企業の信用力を格付けで把握し、同じ格付けの企業は同じレンジの企業価値を持つとする。格付けごとに企業価値の境界値が設定されており、その境界値は時点に依存せず一定であるが、企業価値は時点に依存し変動する。企業価値が境界値を超えたときに格付けの変更が生じる。格付け推移行列を推計する過程では各格付けの平均的な企業価値、ボラティリティ、境界値を推定することも可能である。こうしたアプローチと前述のロジットモデルによるデフォルト率予測を組み合わせれば、各格付けについて平均的な企業価値やボラティリティが各時点のマクロ経済指標に依存しつつ変化していくモデルを構築できる。このように、さまざまなモデル化の方向性がある中で、どのようなアプローチが最適であるか、といった議論も重要である。

### (3) リジョインダーと自由討議

金子は、青沼が論じた本報告の3つの論点について、以下のように応じた。

第1に、金利の期間構造に反映される経済の見通しについては、過去のわが国の金利データによって検証する限り、クレジット・イベントの前からイーロードカーブのフラット化が発生していることを確認でき、十分に経済の先行きを把握可能であると思われる。第2に、本報告で取り上げた3つのクレジット・イベントはいずれも直接的には大手金融機関に関するものであるが、その影響は一般企業にも波及しており、これらのイベントがマクロ経済全体にストレスを与えたと考えることもできる。第3に、格付け水準別に格付け変更強度を推定することは重要な課題であり、今後対応を検討したい。

続く自由討議においては、本モデルの理論に関する質疑応答と、実務への応用可能性についての議論が行われた。

#### (本モデルの理論に関する質疑)

本モデルの理論に関して、以下のような質問が寄せられた。

- ・ 格付け変更強度とマートン・モデルによる参照デフォルト確率は、格付け変化が生じたときに整合的になるようにリセットされているのか。
- ・ バリュース・アット・リスク (value at risk; 以下 VaR) の計算は通常、収益率が独立同分布に従うという前提のもと、その分布を過去のデータで特定したうえで、収益率分布の分位点を算出するという手続きになる。本モデルでは、経済の先行き見通しを取り入れることに伴い、そうした手続きがどのように変更されるのか。また、それにより、通常の VaR を利用する場合とは異なるリスク管理が可能となるのか。

これらの質問に対して金子は以下のように回答した。

- ・ 本モデルでは、格付けと企業価値が完全に整合性を保つように企業価値をリセットはしていない。しかし、格付けと企業価値の不整合性が高まると、格付け変更が割り当てられやすくなり、結果的に両者の整合性が保たれていくことになっている。
- ・ VaR の計算については、まず、金利変動と格付け変更強度の関係が線形モデルとして推計されている。そのうえで、現時点の金利の期間構造からキャリプレートされた平均回帰水準、平均回帰速度、ボラティリティなどのパラメータに基づくシミュレーションにより、先行き 5 年間の金利変動のサンプルパスを発生させ、これを上記線形モデルに適用して格付け変更強度を得る。各サンプルパスに応じて、格付け変更やデフォルト事象が得られ損失が計算されるため、シミュレーションにより満期時点の損失分布が得られ、VaR が算出される。
- ・ また、VaR は、現時点の金利の期間構造に基づく格付け変更強度から導出されるため、市場金利に将来のストレスの可能性が織り込まれていれば VaR は高めに算出され、それに応じて信用ポートフォリオのポジションを圧縮するといったリスク管理が可能となる。

(実務への応用可能性)

報告されたモデルの実務への応用可能性は総じて高いという評価がなされ、具体例として以下のような指摘がなされた。

- ・ バーゼル銀行監督委員会[2009]<sup>5</sup>は、市場リスクと信用リスクを統合的に管理しないとリスク評価の正確性が損なわれると指摘している。金利の期間構造と格付け変更強度を結び付けた本モデルは、こうした指摘に応えたモデルの一例である。ALM ( asset liability management ) の観点からは、金利の期間構造を共通のリスク・ファクターとして捉えたモデルとなっている。例えば、金利下落時に信用状態が悪化する傾向があることを反映しているため、信用ポートフォリオの価値が下落する効果と債券ポートフォリオの価値が上昇する効果がナチュラル・ヘッジとして作用する点を織り込めている。
- ・ サンプル・ポートフォリオの分析では、10 個の企業からなるポートフォリオを考えているが、民間金融機関でのリスク管理においては数千から数万の企業貸出からなるポートフォリオを考える必要があり、計算負荷の問題がある。一方で、格付けや業種等によって数十個程度にグループ化した企業群に対して、その格付け推移や必要自己資本推移を分析するといったマクロの信用分析には、このままでも有効なツールになると考えられる。

こうしたコメントに対して金子は、リスク管理への実用化に必要な計算の効率化は今後の課題であると述べた。

#### 4. 論文報告 2 「金融危機時における株式市場の期待変動」

##### ( 1 ) 杉原・小田報告の要旨

杉原は、今次金融危機を含む 2005 年から 2009 年の期間を対象に、日独英米の各株式市場のオプション価格から導出されるインプライド・モーメントとジャンプ拡散過程<sup>6</sup>のパラメータを用いて、市場で形成された期待を分析した結果を報告した。その概要は以下のとおりである。

金融危機時には、株価の顕著な変動が観察されただけでなく、インプライド・ボラティリティで計測される将来の株価水準の不確実性に関する市場の期待も大きく変化した。本研究では、そうした市場の期待の詳細をインプラ

<sup>5</sup> バーゼル銀行監督委員会、“Findings on the Interaction of Market and Credit Risk,” BCBS Working Papers No 16, May 2009. ( 日本銀行仮訳、「市場リスクと信用リスクの相互作用に関する研究」、2009 年 6 月、<http://www.boj.or.jp/type/release/adhoc09/data/bis0906a.pdf> ) を参照。

<sup>6</sup> 連続な確率過程である拡散過程 ( ブラウン運動 ) に、不連続で大きな価格変動であるジャンプを加えた価格過程のこと。

イド・モーメントによって分析した。インプライド・モーメントとは、オプション市場が想定する将来の株価分布であるインプライド確率分布の平均や分散といった量であり、分布の形状の推移を分析する場合などに有効である。

本研究では、まず、2005年初から2009年9月末までの日独英米の主要株価指数と同指数を原資産とするオプションを用いて、4次までのインプライド・モーメントを日次で算出した<sup>7</sup>。その結果、2007年夏に市場で米国サブプライム住宅ローン問題の再燃が認識されて以降、2次モーメントが増大し、3次モーメントのマイナス幅が幾分拡大したことがわかった。また、2008年秋のリーマンブラザーズの経営破綻以降では、2次・4次モーメントが顕著に増大するとともに、3次モーメントのマイナス幅が極端に拡大した。こうした特徴は、日独英米に共通して観察され、またその変化の大きさも似通っていた。

こうした市場の期待の変化を正規分布からの乖離として捉えると、2007年夏以前の平時には、歪度が負で尖度が3を大きく超えており、分布は負の方向に裾が厚く、その分中心部分が正規分布より尖った急尖的な形状をしていた。しかし、2007年夏以降、特にリーマンブラザーズの破綻以降には、分散が極端に増大したことに伴い、歪度のマイナス幅はむしろ縮小し、尖度は3に近づくなど、インプライド確率分布は分散が非常に大きい正規分布に近い形状となったことがわかった。

次に、こうしたインプライド・モーメントの動きの背後にある株価変動の確率過程を調べるため、ジャンプ拡散過程を仮定してパラメトリックな分析を行った<sup>8</sup>。その結果、各国とも、ジャンプ幅の平均値を表すパラメータは、分析期間を通して負に推定されていること、そのパラメータは平時にはそれほど大きく動かないが、リーマンブラザーズの破綻以降には、ジャンプ平均のマイナス幅が急拡大するとともに、ボラティリティが上昇し、少し間をおいてジャンプ幅の標準偏差を表すパラメータが上昇するという特徴的な動きが各国で共通に観察されたこと、その後、2009年9月にかけて、いずれのパラメータもリーマンブラザーズ破綻直前の水準に徐々に戻ったことが

---

<sup>7</sup> インプライド・モーメントの推計は、Bakshi, Kappadia and Madan [2003]による手法を一部改良して行った。Bakshi, Gurdip, Nikunj Kapadia, and Dilip Madan, "Stock return characteristics, skew laws, and the differential pricing of individual options," *The Review of Financial Studies*, 16(1), 2003, pp.101-143 を参照。

<sup>8</sup> 具体的には、ジャンプ幅が正規分布あるいはラプラス分布（両側指数分布）に従うジャンプ拡散過程を想定し、オプション価格からインプライド・パラメータを推定した。

わかった。

こうしたパラメータの動きについて、正規分布からの乖離を発生させているジャンプ成分(インプライド・ジャンプ)の推移として評価したところ、3ヶ月先までの期待リターンに含まれるジャンプは、各国とも平時は-1%から-4%程度で推移したが、2007年夏以降は-5%程度に拡大し、2008年秋には米欧で-15%、日本では-25%と、マイナス幅が顕著に拡大したことが確認された。また、インプライド分散(2次のインプライド・モーメント)をジャンプ成分とボラティリティ成分に分解したうえでジャンプ成分の寄与をみたところ、日独では、平時に5~6割がジャンプ成分であったが、金融危機時にはその割合が7~8割に拡大したことが判明した。また、米英では、平時より7~8割と日独より高い割合がジャンプとして認識されており、金融危機時のジャンプ成分の拡大は日独に比べ小さかったこともわかった。

## (2) 宮崎コメントの要旨

指定討論者の宮崎は、杉原・小田報告の分析手法と結果を整理したうえで、金融実務への含意について、いくつかの論点を呈示するとともに、それらに付随する課題を指摘した。

インプライド・パラメータを推定する先行研究では、オプション価格(あるいはボラティリティ)の理論値を市場価格にキャリブレートするアプローチがとられてきたが、本報告では、ノンパラメトリックにモーメントないし特性関数を求め、それをもとにパラメータを推定するアプローチを採用している点が特徴的であり、分析手法として興味深い。分析の結果をみると、金融危機時にどのように市場の期待が変化したかが明確に表れている。

金融実務への含意に繋がる論点としては、まず、金融商品のプライシングに関連する問題を指摘できる。すなわち、今次金融危機時には、単純な拡散過程ではなくジャンプ拡散過程を用いて株価変動をモデル化していたとしてもパラメータが大きく変化したわけであり、これは危機時のモデル・リスクが大きいことを示唆している。この問題への対応としては、ボラティリティを確率的に変動させ、かつ、原資産価格だけでなくボラティリティにもジャンプを取り入れるといった拡張が考えられる。その場合、プライシング・モデル

がより広範な価格変動を描写できるようになるため、インプライド・パラメータの急激な変化は起きにくくなり得る。また、本報告で利用されている「複製の原理<sup>9</sup>」あるいはインプライド確率分布を用いて、ノンパラメトリックに価格付けを行うアプローチについても検討の余地がある。ただし、この場合には、金融商品価格がオプション市場から得られる情報に過度に依存してしまう可能性があり、そうした点をどう乗り越えるかが課題となる。

また、金融機関におけるリスク管理の実務に応用する際の論点としては、リスク管理で必要となるのが原資産価格（ここでは株価）の変動特性であるのに対し、本報告のようなアプローチで得られるのはオプション価格にインプライされた価格変動であって、両者は厳密には相異なるためどう関係付けを行うか、という課題がある。この点については、市場にインプライされるリスク回避度を推定する、あるいは、ボラティリティやジャンプのリスクプレミアムを推定するといったアプローチが考えられる。

### （3）リジョインダーと自由討議

杉原は、宮崎がモデル・リスクを低減させるために示したボラティリティにもジャンプを取り入れる案に対し以下のように応じた。

ジャンプは発生頻度の低いイベントであるため、市場が平穏な時期に過度にジャンプを踏まえてプライシングを行うと、価格がリスクを考慮しすぎた値となる可能性がある。どの程度までの価格変動を想定したモデルを使うべきであるかは、結局は個々の市場参加者の選択の問題であると思われる。

続く自由討議においては、インプライド確率分布と原資産価格の変動分布との関連、金融実務への応用可能性、分析手法の詳細について議論された。

---

<sup>9</sup> 市場取引が活発でないなどの理由から時価が得られにくい金融商品について、その価格やヘッジ戦略を求めたい場合などに、当該商品と全く同じペイオフを持つように、他の複数の金融商品を組み合わせたポートフォリオを考えることを「複製の原理」と呼ぶ。無裁定条件が成立する場合には、元々関心があった金融商品の価格は、複製されたポートフォリオの時価に一致する。

### (インプライド確率分布と原資産価格の変動分布との関連性)

本報告のような手法を金融機関のリスク管理に応用するには、指定討論でも指摘されたように、インプライド確率分布と原資産価格の変動分布との関係を考察する必要がある、この点に関心が集まった。

- ・ 原資産価格の変動分布とインプライド確率分布の形状の相違について分析を行っているか。
- ・ インプライド確率分布は、原資産価格の変動の予測力を有するか。
- ・ インプライド・モーメントとリスクプレミアムから、リスク回避度の推定が可能ではないか。

これらの指摘に対し、杉原は、本研究はインプライド確率（リスク中立測度）の世界で閉じた分析であって、現実測度下での原資産価格を分析の直接的な対象としていないことを説明したうえで、今後の研究課題として、原資産価格の変動分布とインプライド確率分布を比較・考察する観点が重要であることに賛同した。また、リスク回避度の推定については、本研究の初期段階において、先行研究を踏まえつつ推定を試みたが<sup>10</sup>、安定した推計結果を得られなかったと述べた。

### (金融実務への応用可能性)

金融実務への応用可能性という観点からは、以下のようなコメントがあった。

- ・ 本報告の分析手法は、原資産価格のインプライド確率過程を求めている点で、金融商品のプライシング手法の 1 つであるインプライド・ツリー法と類似しており、市場期待の分析という目的以外にも利用できるかもしれない。
- ・ インプライド確率過程を用いればデリバティブ商品の理論価格が算出可能であるため、トレーディングを行ううえでの割高・割安商品の判別といった用途に本分析を利用できる可能性がある。また、インプライド確率分布の将来の変動可能性を評価することにより、オプション・ポートフォリオに対す

---

<sup>10</sup> 先行研究においてエッシャー変換を前提とした場合のインプライド・モーメント等とリスク回避度の理論的な関係が考察されている。その関係を応用し、ボラティリティ・リスクプレミアムと 3 次・4 次のインプライド・モーメントからリスク回避度を推定しようと試みた。



るストレステストを実行するうえでも、本分析を活用できるかもしれない。

(分析手法について)

分析手法については、以下のような質疑があった。

ノンパラメトリックな手法によるインプライド分布の推定量について、信頼区間を求めることはできないか。

高次モーメントの推計結果については、信頼性が低いのではないか。

実際の市場では、プット/コール・パリティが成立していないことが多いが、そうした市場の歪みにはどう対応しているのか。

これらの質問に対し、杉原は以下のように応じた。

インプライド・モーメント等の推定値の信頼区間は求めることができないが、一般化モーメント法を用いて推定したジャンプ拡散過程のパラメータについては信頼区間を求められる。

高次モーメントの推定精度を高めるために、市場価格が最低取引価格となっているディープ・アウト・オブ・ザ・マネーのオプションについては、価格の信頼性が低いとみなして分析対象から除外したほか、モーメントが極端に高い値となる異常値も分析から除外した。

プット/コール・パリティが成立しない場合を踏まえ、分析に当たっては、流動性が相対的に高いアウト・オブ・ザ・マネーのオプション価格を優先的に採用した。

## 5. 論文報告3「金融危機時における資産価格変動の相互依存関係」

### (1) 新谷・山田・吉羽報告の要旨

吉羽は、資産価格変動の相互依存関係を捉える手法としてコピュラ<sup>11</sup>とその比較指標を紹介したうえで、日米欧の株価変動の実証分析を行うとともに、コピュラを用いたCDOの評価のあり方を議論した。その概要は以下のとおりである。

---

<sup>11</sup> 複数の確率変数に関する同時分布と、個々の確率変数に関する周辺分布とを繋ぐ関数をコピュラと呼ぶ。

資産価格変動の相互依存関係を捉える指標として一般的に用いられているものは線形相関係数である。しかし、線形相関だけをみていると、平時には相関が弱くてもストレス時には相関が強まるといった現象を捉えられない。そこで、さまざまなコピュラを用いて、より多様な相互依存関係を表現する。コピュラの比較指標としては、変量間の全体の依存度合いを表す順位相関と、分布の裾における依存度合いを表す裾依存係数がある。代表的なコピュラとして、正規、ガンベル、フランク、クレイトン、 $t$ 、反転ガンベル<sup>12</sup>を挙げると、前者3つは下側に裾依存性が弱く、後者3つは下側裾依存性が強い。 $t$ コピュラは自由度が低いほど下側裾依存性が強い。

日米欧の株価の日次収益率について、2カ国の3つの組合せに関して、2000年1月から2009年9月のデータに基づき下側裾依存係数を計測すると、1%水準でも5%水準でも正規コピュラを基に計算される値より大きく、自由度の低い $t$ コピュラを基に計算される水準に近いことが示された。また、過去1年分のデータを用いたローリング推計で同係数を計測した場合は、平時には正規コピュラに基づく計算値程度であるが、ストレス時には下側裾依存性の強いコピュラでの計算値に近づく。次に、BIC (Bayesian information criteria) を評価基準として統計的に適合度の高いコピュラを調べたところ、日米欧どのペアでも、自由度の低い $t$ コピュラの適合度が最も高かった。また、ローリング推計を行ったところ、平時には正規コピュラの適合度が相対的に高いこともあるが、総じてみれば反転ガンベルの適合度が高く、ストレス時には自由度の低い $t$ コピュラの適合度が顕著に高かった。こうした結果は、適合するコピュラの種類という観点でも、ストレス時に資産価格間の下側裾依存性が強まることを示している。

次に、コピュラを用いたCDO評価の問題を取り上げる。まず、資産価格変動の間に想定されることが多い正規コピュラを他の種類のコピュラ(ただし、順位相関は一定に固定)に置き換えた場合に、CDOトランシェの期待損失率がどのように変化するかを分析した。その結果、下側裾依存性の強いコピュラを用いた場合は上位トランシェの期待損失率が大幅に大きくなることが示された。前述の株価変動に関する下側裾依存性の分析結果を踏まえると、正規コピュラでの上位トランシェの期待損失率は過小評価されている可能性が

<sup>12</sup> 戸坂 凡展・吉羽 要直、「コピュラの金融実務での具体的な活用方法の解説」、『金融研究』、第24巻別冊第2号、2005年、115～162頁を参照。

大きい。また、メザニン・トランシェを裏付け資産とした再証券化商品である CDO スクエアードを考え、そのトランシェの期待損失率を分析しても、同様の結果を得た。このほか、CDO スクエアードを構成する末端参照債務に重複がある場合を分析すると、下側裾依存性の弱い正規コピュラでは上位トランシェの期待損失率評価において重複度の影響を受けやすいことが示された。

## (2) 室町コメントの要旨

指定討論者の室町は、今次金融危機で確認されたことは、資産価格変動率の分布の裾が厚いことと、本報告で示されたように多数の資産価格が同時に下落したことであり整理し、後者の表現手法としてコピュラを用いた本報告の意義を評価した。そのうえで、本報告の詳細について、日米欧の株式日次収益率に関する下側裾依存性の分析、日米欧の株式日次収益率に対する各種コピュラの適合度の分析、各種コピュラを用いた CDO の価格感応度分析の 3 点に分け、それぞれについて以下のとおりコメントした。

株式日次収益率の下側裾依存性に関する分析については、その算出方法にやや違和感がある。具体的には、(1)ヒストリカル・データから線形相関を計算し、(2)線形相関を順位相関に変換したうえで、(3)下側裾依存性を計算しているが、(1)から(2)の作業は、暗に同時分布が正規コピュラに従っていると仮定してしまうことになるため、順位相関を直接求めたうえで下側裾依存性を計算する方が合理的である。

日米欧の株式日次収益率に対する各種コピュラの適合度の分析から得られた副次的な結果として、最尤法で推定されたコピュラのパラメータから計算された順位相関が、データから直接計算された順位相関とほぼ等しいことが判明した。この結果は、データから計算した順位相関から直接コピュラのパラメータを計算することで、最尤推定を行わずにパラメータを簡便に得られることを示唆している。これは、実務でコピュラを利用する場合に有用な方法の 1 つであるといえる。

CDO の価格感応度分析については、正規コピュラを含むいくつかのコピュラを用いて、順位相関の値の変化に伴う CDO の価格感応度を網羅的に分析した点に意義がある。また、反転ガンベルという選択肢を示した点にも意義がある。既存研究の大多数は、CDO の各トランシェの市場価格をうまく説明

できるコピュラを探すことを目的としてきたが、本報告は、市場価格の整合性に全面的に依拠した分析に走らず感応度分析に焦点を当てた点で、基礎研究として高く評価できる。

さらに、分析内容に直接関連する論点のほかに、実務で使用するコピュラが満たす条件、リスク管理にコピュラを利用する場合の論点、平常時とストレス時のモデルのあり方についても、以下のような見解を示した。

第 1 に、裾依存性を考慮しない既存のリスク管理手法では、ある信頼水準のもとで生じ得る非常に大きなリスクを見逃している可能性がある。このため、実務的にも、裾依存性を考慮したリスク管理を進めていく必要がある。

第 2 に、下側依存性の強いコピュラを実務で利用する際に考慮すべき点としては、モデルによる表現力、市場価格の説明力、推定パラメータの安定性などが挙げられる。

第 3 に、ストレス時と平常時の状態を同一のモデルで説明する必然性はない。平常時の説明力が高いモデルに、ストレス時にのみ発現するファクターを加えることで、両状態をうまく説明していくアプローチもあり得る。

### (3) リジョインダーと自由討議

吉羽は、室町が論じた本報告の 3 つの詳細な論点について、以下のように応じた。

第 1 に、相関係数を經由して順位相関を求めたのはわかりやすさに重点をおいたためであるが、直接に順位相関を求めるように修正したい。第 2 に、いずれのコピュラについても最尤推定量から求められる順位相関がデータの順位相関と似ている点については、その性質を利用してデータの順位相関から逆にコピュラのパラメータを推計するという手法も実在しており、有用な推計法であることに同意する。第 3 に、反転ガンベルという選択肢があることに関連して、損失率についてガンベル・コピュラを想定していることになる点を付言したい。このガンベル・コピュラは極値コピュラというクラスに属しており、発生頻度の低いイベントなどを対象に極値分析を行ううえでも有効なコピュラである。

続く自由討議においては、まず、分析手法に関する留意点が指摘され、それを踏まえたうえで、実務への応用可能性についてさまざまな観点から議論が行われた。

#### (分析手法に関する留意点)

本研究の分析手法に関しては、以下のような留意点が指摘された。

- ・ コピュラを用いた CDO 評価については、CDO 発行時などに満期時点の状態を評価することで格付けを行うといった目的であれば、本報告のような手法を用いてよい。しかし、こうした手法は満期に至る過程の価格変動を記述していないという限界がある。そのため、市場においてプライシングや値洗を行ううえでは、本手法では時間の経過と統合的な評価ができないという問題がある。
- ・ 本報告のように多資産の収益率そのものをコピュラで表現するのではなく、収益率からシステムティックな要因を除き、個別要因についてコピュラで表現してもよいのではないか。

#### (実務への応用可能性)

以上で指摘された理論的な留意点を踏まえ、コピュラの実務での応用可能性についてさまざまな観点から議論が行われた。主な内容は以下のとおり。

- ・ 上記で指摘されたようにコピュラを CDO の価格評価に利用する際には注意が必要だが、リスク管理には十分応用できると思う。損害保険業界では、会社全体のリスク量を計測する際に、コピュラを利用しようという動きが既にみられる。保険商品は、その種類ごとに損失額が異なる分布に従うため、それらの線形相関だけをみてもあまり意味がない。このため、これらのリスクを合算して会社全体のリスク量を計測する方法としてコピュラが注目されている。銀行のリスク管理でも同様に役立つと思う。
- ・ CDO のプライシングに対しても、コピュラが全く使えないわけではない。プライシングの目的や立場によって、利用価値は次のように異なると思う。まず、市場価格に基づいて売買を行うトレーダーにとっては、モデルは市場価格を模倣するツールであるため、本報告のように市場価格との整合性を完

全には求めない分析では不十分かもしれない。一方、マーケット・メイカーのように自らがプライスを立てるプレーヤーにとっては、過去のデータからみてどのコピュラで価格を導出するのが適切かという本報告の研究は参考になる点が多い。ただ、全期間を通じて1つのコピュラに限定してプライシングするという点には限界もある。例えば、裏付資産が常時入れ替わるような証券化商品については、コピュラの適合度が変わっていく可能性がある。

- ・ 正規コピュラがリスクの過小評価を導くという点は事実だと思うが、CDO市場で現在も正規コピュラが利用されているのは、市場価格を表現する便宜的な共通言語としてであって、十分に正確な評価ツールとして利用されているのではない。この点は、オプション市場においてブラック＝ショールズの公式が現在でも共通言語として利用されているのと同様である。
- ・ 格付け会社が正規コピュラに基づくモデルを使っているのは事実だが、アレジャーはそれを踏まえて高格付けを取り得るような商品設計をしてきている。このような問題への対応として、下側裾依存性の強いコピュラを市場の共通言語として採用するのであれば、どのコピュラを基準とすべきかコンセンサスが形成されていく必要がある。
- ・ 学界やリスク分析の専門家の間では、随分前から単変量のリスクを計測する際でも正規分布でなく極値分布が必要といった議論がなされているが、金融機関の経営層を含めた理解は十分ではない。多変量のリスクについても、正規コピュラを用いると価格が過小評価される可能性がある点などについて、金融機関の経営層を含めて理解を広げていくべきである。

これらの意見に対し、吉羽からは、以下のように応じた。

- ・ 指摘された点には概ね賛同する。コピュラが時間の経過と整合的でないという理論的な論点については、原資産価格をジャンプ拡散過程として表現し、ジャンプの部分にコピュラを想定すれば時間の経過と整合的になると思う。本研究の要点は、リスク管理にしてもプライシングにしても、正規コピュラをむやみに仮定するのではなく、相互依存関係をしっかり分析していくことが肝要だということにある。

## 6. パネル討論：パネリストによる報告

第2セッションでは、「金融危機後の金融工学の展開」をテーマとしてパネル討論が行われ、まず、3人のパネリストから以下のような導入報告がなされた。

### (1) 大橋報告の要旨

大橋は、今次金融危機に対する金融工学の責任として、証券化商品の評価モデルの設計や運用においてミススペシフィケーションを深刻化させたことと、市場参加者の相互作用を十分に考慮していなかったことを指摘し、今後は、金融工学の分野を超えたモデルの修正を期待するとともに、問題発生メカニズムの解明と、再発防止のためのインセンティブ・メカニズムの設計が重要となると述べた。

今次金融危機に対して金融工学の責任があるとすれば、次の2点を挙げられる。第1に、証券化商品の評価において深刻なミススペシフィケーションを発生させる手助けをしてしまったこと、第2に、市場参加者の相互作用を十分に考慮してこなかったことである。

第1の深刻なミススペシフィケーションについて理解するには、今回の金融危機の主因である不良債権問題が発生した背景を振り返ることが有益である。すなわち、従来の危機時とは異なり、今回は、「本来高リスクであるはずの証券化商品を高格付けで大量に販売できる」という誤った情報が浸透していったことに特徴がある。こうした事態が起こった理由としては、証券化の過程ではオリジネータ、アレンジャー、投資家などさまざまなエージェントが関与しているため、情報を正しく伝えないことで自らの利益を最大化するというインセンティブが働くことを指摘できる。例えば、全く同じメザニンの商品に異なる名前を付けて再証券化しても、金融工学で使われる「大数の法則」が働くはずはないため、リスク分散の効果は得られない。しかし、どうしてもAAA格付けの商品を作って販売したいアレンジャーがいれば、「大数の法則が働く」と錯覚させて販売を行うかもしれない。新谷・山田・吉羽論文で報告されたような反転ガンベル・コピュラを用いて評価すればAAA格付けで販売できない商品でも、正規コピュラで評価することでAAA格付けとして販売していたかもしれない。こうしたミススペシフィケーションは、意図的にせよそうでないにせよ、広い意味でのモデル・リスクと解釈できる。こ

うしたモデル・リスクを黙認し、「モデル・リスクにベットしていた」ことに第 1 の問題があったと考えられる。

第 2 に、市場参加者の相互作用について考えると、今回の金融危機を深刻化させた原因として、ストレス事象が生じた際にそれまでのレバレッジ投資を一斉に巻き戻して流動化しようとしてもそれができないという事態が生じ、価格変動の拡大に拍車をかけたという点がある。誰もが似たような投資を行い、同質なリスク管理を採っていれば、当然起こりうる現象であるが、こうしたリスクは十分に考慮されていなかった。この点も広い意味のモデル・リスクと解釈できよう。流動性の問題が発生したのは、今次金融危機が初めてではなく、97 年の通貨危機や古くは 87 年のブラックマンデーでも全く同様のことが繰り返し起きている。そのような経験を振り返ると、こうした相互作用を定量的に把握するモデルが開発されているべきであったのではと思う。

以上の問題点を踏まえ、金融工学の今後の方向性について 3 点ほど提案したい。第 1 に、上述した 2 つの問題を補完するように評価モデルを修正してはどうか。その際には、金融工学の分野以外の知見も生かされると期待している。第 2 に、これはもはや金融工学ではなく経済学の範囲であるが、上述した問題が、どのような環境下で発生しやすくなるかを分析すべきである。第 3 は、そうした発生メカニズムを踏まえ、金融工学を正しく利用するインセンティブを保つような制度設計を行うことが重要である。

## (2) 亀澤報告の要旨

亀澤は、今般の金融危機時にクレジット商品で生じた現象を取り上げ、これまでの金融工学では対処できなかった問題について、ファンダメンタルズ、需給、その他要因という 3 つの側面から整理した。そのうえで、各側面における金融工学の課題と今後の役割を述べた。

クレジット商品のファンダメンタルズとしては、デフォルト率、回収率、期限前返済率、デフォルト相関といった要素がある。例えば、米国サブプライム住宅ローンに関してデフォルト関連データをみると、60 日超延滞率にしても期限前返済率にしても、2006 年以降に組まれたローンはそれ以前のローンと比べ経過月数に伴う変化が異なる特徴を有している。また、レバレッジ



ド・ローンのデフォルト率については、2006～07年には健全な企業財務状況を反映してデフォルト率が低く、2008年以前に実施したストレステストでは、2008年以降の急激なデフォルト率の上昇までは想定出来なかった。シンセティックに組成されたABS (asset backed securities) -CDO や CDO スクエアードといった再証券化商品については、組成時のモラルの低さという問題もあり、今後淘汰されていく商品であると考えられるが、裏付け資産がはっきりとした証券化商品にまで影響が及んでいる点については対応を考える必要がある。

需給面に関連する重要な要素としては、流動性リスクなどがある。まず、2007年以後、証券化商品ということだけで過大な流動性リスクが生じている事例として、CLO (collateralized loan obligation) シニア債とそのプールを構成するレバレッジド・ローンの価格の関係が挙げられる。CLO シニア債はプールの上位トランシェであるため、理論的にはレバレッジド・ローンよりも価格は高くなるべきものである。しかし、証券化という包み紙で包んでいるだけで2009年春から夏にはこれらの価格の逆転現象が生じた。理論価格と比較しても、米国サブプライム住宅ローン問題が顕在化してきた2007年後半から2009年秋までは、こうしたCLO シニア債の市場価格が理論価格を大きく下回る状況が続いた。また、クレジットカードを裏付けとしたABS シニア債のスプレッドについても、2007年以前はLIBORのスプレッドと同程度の安定的な水準で推移していたのに対し、2008年にはスプレッドが急拡大した。その後、ターム物資産担保証券ローンファシリティ (term asset-back-securities lending facility; TALF) による流動性供給に伴いスプレッドは落ち着く方向になったが、今なお100bpを少し下回る程度の高水準で推移している。これは、過去にスプレッドの急拡大を経験したことを踏まえてリスクプレミアムが要求されていることや、金融規制の強化に対応したデュー・デリジェンスの厳格化に伴い管理コストが上昇していることが背景となっていると考えられる。

その他の要因としては、資金流動性、証券化の仕組みといった要素がある。証券化商品の相次ぐ格下げや価格下落は、商品を運用するSIV (structured investment vehicle) が保有する資産の質が悪化したという要因よりは、金融市場における流動性の枯渇といった要因が強く影響した。証券化の仕組みという観点では、CLO債については、各債務の組入れ比率などの運用ガイドライン、担保の十分性等のパフォーマンス・テストに関して、従来からしっかりと

した枠組みが安全装置として設定されており、これが証券化市場の発展に確かに寄与してきた。その一方で、こうしたガイドラインやパフォーマンス・テストには金融危機のような事象までは織り込まれておらず、更に言えば、多くのCLOで同じようなガイドラインが設定されていたことにより、市場全体に同じ影響が一斉に及ぶ結果になった。

クレジット商品市場の今後の発展に向けて、各側面についての課題をまとめると以下のとおりである。ファンダメンタルズの面では、過去のデータだけに頼らず、商品性の詳細などにも留意しながら、ストレステストの高度化を進めていくことが挙げられる。需給の面では、市場の限界を認識し、流動性リスクに見合ったディスカウント・マージンを織り込んで公正価値を算出することなどが挙げられる。その他の要因の面では、資金流動性の把握力の向上、証券化商品に組み込まれた安全装置の再検証、市場全体のリスク・テイクのキャパシティや市場間の相互連関の仕組みなどに関する研究を進めていくことが挙げられる。

また、証券化商品に限らず、より一般的な信用リスク管理の実務においてもいくつか課題がある。例えば、銀行の信用ポートフォリオの管理では、大企業向けと中堅中小企業向けで様相が異なり、大企業向けポートフォリオでは与信集中リスクや個別与信の影響に関する分析が重要である一方、中堅中小企業向けについては金子・中川報告でもモデル化されたようにポートフォリオ全体としてマクロ経済環境との連動性を見て行くことが重要である。更なる具体的な取り組みや研究が求められている。

最後に、金融工学の役割を整理すると、商品開発やリスク管理を支える共通言語として今後も大きな役割を担うと考えられるが、金融工学の限界を説明する役割も同時に求められるであろう。すなわち、モデルに過度に依存した商品設計を控え、モデルに基づくリスク管理が万能であるかの誤解を解いていくことが求められる。また、ファイナンス理論の世界に閉じこもらず、経営戦略的な側面にも積極的に関与し、情報発信していくことが求められる。

### (3) 薄葉報告の要旨

薄葉は、リスク管理の実務経験を通じて今般の金融危機と金融工学の役割を

振り返り、金融危機で顕在化したリスク管理上の課題を解決するためには、金融工学の中心的な領域よりも、むしろ境界領域の研究あるいは境界を超えた研究の発展が望まれると議論した。

一般の金融危機は、複合的な要因からもたらされたものであり、その主因が金融工学にあるわけではない。証券化の技術は、テール・リスクを積極的に取る手段を与えた面はあるものの、悪意を持った市場取引を促すように企図されていたわけではない。むしろ、共同幻想のもとでバブル的な現象が発生した面が強いと考えられる。代表的なリスク指標である VaR は“a false sense of security”（誤った安心感）を生み出したとの指摘がなされているが、それは VaR に対する過剰な期待である。そもそも VaR は通常の市場環境における最悪ケースを測るリスク指標であり、金融危機時を考慮したものではない。VaR は「将来の価格変動の性質が過去と同様である」という前提に基づくリスク指標である。

金融危機で顕在化したリスク管理上の課題や限界は、金融工学の中心的な領域というよりも、むしろ境界領域あるいは境界外の問題であったと整理できる。ストレステストでどれだけストレスをかけたらよいのかは、金融工学の理論からは示されない。また、危機的な状況が生じたとき、エクスポージャや時価の即時的な把握が求められるが、十分なシステム・インフラが整っていないという情報技術（information technology; 以下 IT）の領域における問題も大きかった。このほか、合成の誤謬あるいは群衆行動（herding behavior）に起因する問題も顕在化した。例えば、担保契約を交わすモノライン<sup>13</sup>が多く破綻した背景には、担保契約を交わすがゆえに値洗いに伴う担保の差入れ要請が相次いだことがある。一方、担保契約を交わさない CDPC（credit derivative products company）という金融会社もあり、担保契約を交わさないため本来はモノラインよりリスクが大きいと考えられるが、契約の満期まで値洗いがなく、いまだに破綻していない。これは合成の誤謬と考えられる現象である。こうした現象は金融工学では説明できないと考えられ、金融工学の領域外の対応に期待せざるをえない。

こうした金融危機で顕在化した課題や限界に対して、金融工学と IT との境界領域で対応できる事例、金融工学を超えた複雑系等の問題として扱う

---

<sup>13</sup> モノラインとは、金融保証業務に特化した米国の保険会社のことである。

可能性を示したい。

IT との境界領域では、グローバル化するエクスポージャ - や複雑化する金融商品など大量のデータを如何に効率よく計算処理するかが求められている。一例として、スワップ取引のポートフォリオの時価評価を考えると、各スワップ取引の割引価値を足し上げるのではなく、ポートフォリオ全体のキャッシュフローに対して割引価値を求めれば、大幅に計算の効率化を図ることができる。また、モンテカルロ法による VaR の計算についても、取引ごとにすべてを時価評価すると、「取引数×シミュレーション回数」という大規模な計算を要するが、ポートフォリオ時価を数個のパラメータによる関数で近似的に表現すれば、大幅な計算の効率化を実現できる。金融工学の実務家は、理論だけでなくこうした実装上の問題に対しても積極的に関与していくことが望まれる。

金融危機で経験した合成の誤謬、群衆行動や市場流動性の枯渇といった問題は、複雑系、創発、自己組織化といった金融工学を超えた理論で捉えられる可能性があると思われる。例えば、池谷[2009]<sup>14</sup>の動画サイト<sup>15</sup>では、(1)白のマスにやってきたら、そこを黒に変えて右に進む、(2)黒のマスにやってきたら、そこを白に変えて左に進む、という単純な 2 つのルールで、当初は無秩序な動きにみえても、ある時点から組織的な動きに変貌する創発と呼ばれる現象が生じることが動画で紹介されている。こうした理論などを用いれば、金融危機時における市場参加者の群衆行動も、比較的単純化された行動パターンとして捉えることができるかもしれない。さらに「人工市場モデル」を構築することができれば、市場参加者間の相互作用を掘り下げて調べることも可能になる。このように、金融工学の研究者は、領域を超えた研究にも取り組んでいって欲しい。

## 7. パネル討論：自由討議

導入報告に続き、自由討議では、(1)これまで金融工学が果たしてきた役割と(2)今次金融危機における反省点について議論が行われ、それらを踏まえたうえで(3)今後の研究の方向性について検討が行われた。

<sup>14</sup> 池谷 裕二、『単純な脳、複雑な「私」』、朝日出版社、2009 年を参照。

<sup>15</sup> URL は、[http://www.asahipress.com/brain/langton\\_regular/langton.html](http://www.asahipress.com/brain/langton_regular/langton.html)。

## (1) 金融工学が果たした役割

金融工学がこれまで果たしてきた役割については、学術的および実務的な視点から以下のように多様な意見が呈示されたが、総じてみれば、「金融工学は、副作用を伴うにせよ、有益なリスク・コントロール手段を提供し、金融業務の分業化・効率化を促進させるなど、社会のインフラとして重要な役割を果たしてきた」といった評価でコンセンサスが得られた。

- ・ 金融工学は、証券化やデリバティブ取引といったリスクのコントロールを効果的に実現する技術を生み出し、社会のインフラとして、金融システムや金融市場の土台を作ってきた。いまや、現代の金融にとって不可欠である。
- ・ 1970年代以前の金融システムは、1つの金融機関が多岐にわたる金融業務をすべて行うという点で、非効率的であった。しかし、1970年代以降、金融工学の発展とともに証券化やデリバティブ取引が金融実務に取り入れられ、金融業務の分業化、いわゆる「金融のアンバンドリング」が可能となり、金融システムの効率化が進んだ。
- ・ ブラック＝ショールズの公式の発表よりずっと前からシカゴのオプション市場では既に価格付けがなされていた。つまり、金融工学の貢献の本質は、デリバティブ取引の価格付けにあるのではなく、市場の価格とブラック＝ショールズの公式を組み合わせることなどにより、デリバティブ取引が内包するリスクの特性（原資産価格等の変化に対しデリバティブ価格がどう振る舞うか）を明らかにした点にある。
- ・ デリバティブ取引を通じて金融工学が社会に貢献したことは間違いなく、今次金融危機において主犯格扱いされたのは、それだけ社会に大きな影響を及ぼすインフラとして認識されたことの証左ではないか。

## (2) 金融危機を踏まえた反省点

今次金融危機に関して金融工学に責任があるとすればどのような点が挙げられるかについては、金融工学の理論というより金融工学の使い方の問題があったという見解と、金融工学の理論にも限界があったという見解がそれぞれ呈示された。

まず、金融工学の使い方に問題があったとする意見としては、「自己利益の追求の理由付けに金融工学が使われてしまった」、「金融工学を提供する側もモデルの前提について説明不足であった」という声が聞かれた。また、使い方を誤った背景としては、「資産価格が右肩上がりになっている局面では、同業他社が買っているのに自社だけ買わないという判断は難しい」、「金融の分業化が進んだ結果、エージェント間での情報格差が拡大し、これを悪用するインセンティブが働いた」との見方が示された。

#### （自己利益の追求）

- ・ 金融工学に基づくモデルを「正しく」使うのではなく「上手く」使うことで利益を得るといったインセンティブが発生した。特に高額な報酬体系の欧米金融機関でこうした傾向が強く、例えば、複雑な証券化商品のアレンジャーは、格付機関が証券化商品の格付けに利用しているモデルを予想することにより、高い格付けが得られると同時に利益を獲得できるモデルを設計したうえで商品を販売していた。
- ・ 金融工学のモデルには、欲しい結果に応じて数字を操作できてしまう面がある。市場価格が少し実感に合わないと感じても、モデルで説明が可能な範囲であれば、そうした価格を正当化する手助けをしてしまったのではないか。

#### （説明責任の不足）

- ・ ここ十数年で金融工学は顕著に発展し、平易な言葉では説明できないほどまでモデルは複雑化した。その過程で、モデルの開発者は、複雑なモデルを利用する際に注意すべき点を利用者十分に説明してこなかった。また、モデルは必ずしも開発者が予想したように使われるとは限らないため、想定外の利用に伴うリスクについても説明が必要だが、それも不十分であった。
- ・ 金融工学のモデルは、さまざまな仮定のもとで成立しているにも関わらず、常に万能であるかのような説明がなされることがあった。そうした説明は金融商品のセールスポイントとなることを研究者やモデルの開発者がもっと認識していれば、説明責任の果たし方が変わっていたのではないか。
- ・ 金融工学は、金融商品の内容や価格を考えるための1つのツールであって、

自然科学のように絶対的な真実を追求するツールではない。それにもかかわらず、あたかも自然現象を記述するツールであるかのような誤解を与えた面もある。

#### （投資家の群衆行動）

- ・ 金融工学が誤った使われ方をされる背景として、金融機関の過度な競争が挙げられる。資産価格が右肩上がりになっている局面では、価格が過大評価されていると感じても、同業他社が買っているのに自社だけ買わないという判断は難しい。
- ・ 高い収益が得られる環境下では、ハイリスク・ハイリターンという基本的なトレードオフを忘れがちになる。

#### （情報の非対称性）

- ・ 証券化やデリバティブ取引などの手段により金融業務の分業化が進展してきたが、その副作用として、1つの業務の流れに多くの人に関与するという「エージェンシー関係の重層化」が進んだ。このため、エージェンツ間で情報の非対称性が拡大し、大橋報告で指摘されたようなインセンティブ問題、すなわちモデルを恣意的に扱うインセンティブが強まった。
- ・ 先端的な金融取引の市場は、プロの市場であるため、買い手と売り手の双方が十分な情報を得たうえで取引を行うべきであるが、両者の情報格差、特に、売り手が買い手に情報のすべてを開示しなかったことに問題があった。例えば、証券化商品の売買では、裏付け資産に関する情報の開示が不足していたが、米国サブプライム住宅ローン問題が顕在化するまでは、売り手・買い手ともにそれを問題視する者は限られていた。

一方、「金融工学の理論にも限界があった」とする意見としては、「理論自体が未成熟であり、今後、他の研究分野の知見を取り込んで一段と発展させる必要がある」との意見のほか、「実務へ応用する際に、モデルが現実と適合しなくなるモデル・リスクを十分に認識すべきだった」との意見が聞かれた。

(理論面における金融工学の限界)

- ・ 経済学の立場からは、金融工学には2つの限界があると思う。第1に、即時的な判断を重視する一方で、現時点の判断が長期的にはどのような帰結を引き起こすかという視点が欠落している。第2に、市場価格との整合性を重視する一方で、現在の価格水準が経済全体にどのような影響を及ぼし、それが個々の市場価格へどのように影響するかという、一般均衡的な考察が不足しているように感じられる。
- ・ 金融工学は、市場参加者の合理的な行動を前提に理論が組み立てられているが、現実には市場参加者は合理的に行動するとは限らない。その対応としては、行動経済学のような要素を取り入れるべきであるが、これまで十分に勘案されてこなかった。
- ・ 金融工学は、価格変動過程の定常性や連続性を前提としているが、実際にはそれらが成立していない可能性があり、そうした点の検証が十分に行われていなかった。

(実用面における限界：モデル・リスク等)

- ・ モデルが現実を十分に表現できなくなるリスク、いわゆるモデル・リスクは、金融危機のたびに議論になるが、平時に戻ると忘れ去られ、十分に考えられてこなかった。
- ・ 近年、急ピッチでモデルが開発されたため、互いに整合性のない理論が同時に使われている場合がある。また、理論的な裏付けが不十分であるにもかかわらず、実務に応用されたモデルがあることも否めない。例えば、VaRは、確率分布の裾の分位点として推計されるため、そもそも計測誤差が大きくなりがちであるが、こうした精度の問題は軽視されてきたように思われる。
- ・ 過去に起きたことに強く依拠して将来発生し得ることへのリスク管理が行われてきた。それを補う目的でストレステストが行われてきたが、ストレスの与え方も過去の市場価格の急落時を再現する程度のものが少なくなかった。また、ポートフォリオの変化に伴って発生するリスクにも、十分に対応できていなかった。
- ・ いくら高度かつ精緻なモデルを開発しても必ず欠点はある、その欠点を逆



手にとって利益を得ようとする投資家が出てくる。そこで、さらに精緻なモデルを構築することになるが、結局、こうしたループには際限がないという根本的な問題がある。

### (3) 今後の金融工学の展開

以上で議論された反省点を踏まえ、今後、金融工学の使い方をどのように改善していくべきか、金融工学の限界を踏まえどのような研究が進められるべきか、といった議論が行われた。

#### (金融工学の使い方をどう改善するか)

前述のように、第1の反省点として、金融工学の限界が十分認識されず意図的かどうかに関わらず使い方に問題があったとの意見が示されたが、限界を十分認識し説明していけば今後は同じ問題を回避できるのか、それとも競争がある限り誤った使い方を続けてしまうのか、という論点が呈示された。

この論点に対しては、「競争や売り手と買い手の情報格差がある限り、恣意的な使い方はされうる」との意見でコンセンサスが得られた。その対応策については、「買い手を保護するため、新規金融商品に対する認可制などの規制を導入してはどうか」という意見もみられたが、「規制の強化ではなく、売り手のモラルハザードを抑制するインセンティブ・メカニズムの設計が重要」、「自然浄化が進む市場の設計が望ましい」といった意見が多く呈示された。

- ・ 今次金融危機では、証券化市場というプロ同士の市場でも買い手が騙されたということが起きている。こうした意味では、機関投資家と個人とで話は異なるが、毒入餃子事件や汚染米事件とも様相が似ている。これらの対策として消費者庁が設立されたように、プロ向け金融商品についても買い手を保護する政策が必要ではないか。例えば保険業界では、新規商品に対して監督官庁の認可が必要となっているが、そうした方式を適用するのも一案ではなかろうか。
- ・ 証券化商品の買い手と売り手の情報の非対称性を巡る問題については、約20年前から、セキュリティ・デザインと呼ばれる分野で研究がなされている<sup>16</sup>。

<sup>16</sup> 証券化商品を巡るセキュリティ・デザインの研究と同様に、銀行ローン債権の売買市場に

売り手がモラルハザードを起こさないための工夫としては、証券化した際にすべての証券を投資家へ売却するのではなく、一部の証券は売り手側が保有し続けることを義務付けるといった案がある。このほか、不適切な行為を企図した場合にペナルティーが課せられる仕組みも研究されている。

- ・ 複雑な金融商品のリスクを理解していないのは買い手だけとは限らず、売り手も理解していない場合がある。こうした場合への対処方法として、全く想定されていない種類の損失が発生した際には「リコール」が発動されるような仕組みを作っておくのも一案ではないか。
- ・ 規制の強化については、どこまでカバーすれば十分かという境界が不明確であるほか、副作用も伴う。したがって、市場への開示情報を増やすなど投資家の判断材料を多くする方向性が望ましい。モラルハザードを起こしている市場参加者が早めに淘汰されるような市場の設計を考えるべきであろう。

#### （金融工学の限界をどう克服するか）

第2の反省点としては、金融工学にはさまざまな限界があることが指摘されたが、それを踏まえ今後の学術研究および実務の方向性としてどのようなことが考えられるかという論点が呈示された。

これに対し、まず、学術的な視点からは、人工市場モデルからの接近や、行動経済学との融合などにより金融工学の限界を克服する挑戦が重要との意見が呈示された。

- ・ 薄葉報告で指摘されたような「人工市場モデル」は、金融工学が通用する点としない点の整理に役立つと思う。例えば、創発の動画の前半でみられたようなランダムな動きは、市場参加者が市場の価格が割安であるか割高であるか考えている段階を表しており、金融工学が通用する範囲だと解釈できる。その後、動画の後半では組織的な動きが現れるが、これは市場参加者が合理的な判断から離れ、皆が買うから自分も買うという群衆行動に変化したことを表していると解釈できる。

---

についても、1990年代には情報の非対称性の問題が分析され、今次金融危機で取り沙汰されたのと似通った問題について研究がなされていた。例えば、Gorton, Gary B, and George G. Pennacchi, “Banks and Loan Sales Marketing Nonmarketable Assets,” *Journal of Monetary Economics*, 35(3), 1995, pp.389–411などを参照。

- ・ 行動経済学のような投資家の行動心理を描写する理論と金融工学の融合は有望だと思う。最近の数理ファイナンスの国際学会でも、行動経済学を用いて投資家の収益に対する貪欲さが市場の価格へ影響するメカニズムを考察した報告があった<sup>17</sup>。また、投資家の心理を効用関数へ取り込んだプロスペクト理論は一定の成功を収めている。こうした研究分野から実務へ接近することにも期待したい。

これらの意見に対し、実務的な視点からは、金融工学をさまざまな経済モデルと融合させることには限界がある、問題が発生するたびにモデルを修正し続けるような対応は現実的でない、恣意性が入りやすいモデルは望ましくないといった意見も聞かれた。

- ・ どのような経済モデルにも前提はあるため、金融工学と何らかの経済モデルを融合させたとしても、予測が完全なものとなることはない。また、経済モデルで説明できるのは主に合理的な現象であり、金融危機のような現象の説明には限界があろう。
- ・ モデルの精緻化という方向性は間違っていないが、実際には相応の時間がかかる。また、問題が起こるたびにモデルをアドホックに修正するのは現実的でない。それよりは、モデル・リスクが存在することを予め考慮し、バッファーとしてリスク量を保守的に計測するといった対応の方が現実的だ。
- ・ モデルの利用者の立場からは、誰が使っても恣意性がなく間違いのないモデルの開発を目指して欲しい。利用者が手元でアドホックにモデルを修正することを許容すると、前述のようなインセンティブ問題が発生し、モデルが自己の利益を正当化する道具となってしまう恐れがある。

これらに関連し、実務家からは、「モデルの精緻化も重要だが、モデルで計測されたリスク指標の活用方法を一段と充実させることも重要な課題」との意見が述べられた。

- ・ 経営者へ定期的にリスク量の報告を行う立場からすると、モデルを精緻化することはもちろん重要だが、それに加え、リスク計測結果の背後にある金融情勢等を経営者に的確かつ平易に伝えることが重要である。こうした観点では、例えば、シナリオ分析やストレステストなど、原因と結果を明らかに

---

<sup>17</sup> Jin, Hanqing and Xun Yu Zhou, “Behavioral Portfolio Selection in Continuous Time,” *Mathematical Finance*, 18(3), 2008, pp.385–426 を参照。

する分析ツールを充実させることが期待される。

- これまでは、リスクの計測方法に重点が置かれる一方、リスクの動学的な制御に関する議論は少なかった。例えば、所要自己資本の算出においては、保有期間を1年間としてリスク量を計測することが多いが、これは、金融機関の資産や負債が1年間変化しないことを前提としているともいえる。動学的な視点を取り入れることで、こうした問題を改善していくべきである。
- 今後はより長期的な視点に立ったリスク管理が求められると思う。その場合、市場はランダムに動くという従来の金融工学の発想だけでなく、景気循環の影響などを考慮する必要も出てくるだろう。また、ストレステストの観点では、少し前に起きた悪いシナリオを取り入れるだけでなく、長い歴史の中で最悪なシナリオまで取り入れたより長期的なリスク評価も重要である。

## 8. 座長総括

座長の倉澤は、本ワークショップの報告・討論を通じて確認された論点を次のようにまとめた。

ワークショップの前半で報告された3つの研究は、今次金融危機の背後にあったリスク評価の問題や市場の動きを分析することによって、直接的ないし間接的に、金融危機からの教訓を引き出そうとする試みであった。また、ワークショップの後半のパネル討論では、「金融危機後の金融工学の展開」というテーマのもとで、学術的および実務的視点からさまざまな問題を討議することができ、有意義であった。

3人のパネリストによる報告の内容については、表現はそれぞれ異なっていたが、共通する主張や考え方も多かった。まず、金融危機を振り返った場合に金融工学に関連する問題として浮かび上がるのは、モデルやデータの正確性に限界があったということである。これを大橋報告はミススペシフィケーションと捉え、亀澤報告はファンダメンタルズやその他要因の評価の問題と捉え、薄葉報告は正確性に関する共同幻想の問題と捉えた。また、金融危機のような特殊な市場環境のもとでは、市場参加者の相互作用の影響が強まるため、そうしたメカニズムを分析・考慮することの重要性も共通に指摘された。

これらの報告を踏まえ、自由討議においては、金融工学によるこれまでの

貢献や今後の課題についてさまざまな意見が呈示された。その中で、次の点については概ねコンセンサスが得られたと思う。まず、金融工学の位置付けについては、金融の機能を高める重要な役割を担ってきており、今やそのテクノロジーを利用しない金融実務は考えられないという次元にまでプレゼンスを高めている。一方、金融工学を商品設計やリスク評価に活用していくうえでは、専門家と一般利用者間の情報の非対称性が無視できないという問題があり、これを完全に解消することは今後も不可能であろう。その場合、今後の課題としては、これらの限界や制約を所与としつつ、金融工学が的確に利用されるような枠組みをどう工夫するかが重要である。その際、金融工学の限界を過度に懸念した枠組みを考えると、逆にその機能を減殺してしまいかねない。そもそも、どのような研究分野にも強みと弱みがあり、金融工学は、経済学のように経済のメカニズムを抽出することにはさほど強みがない一方、金融市場の現実をわかりやすく描写できることには強みがある。したがって、金融のダイナミズムを損なわないような制度設計のもとで、細心の注意を払いながら、金融工学の利点を活用していくという姿が望ましいと考えられる。

以 上

## 参考：ラウンドテーブル参加者（敬称略）

### （座長）

倉澤 資成            横浜国立大学、日本銀行金融研究所顧問

### （招待参加者、五十音順）

青沼 君明	三菱東京 UFJ 銀行
荒川 研一	りそな銀行
池尾 和人	慶應義塾大学
池森 俊文	みずほ第一フィナンシャルテクノロジー
一條 裕彦	三菱 UFJ 証券
薄葉 真哉	みずほ証券
太田 智之	野村証券
大橋 和彦	一橋大学
亀澤 宏規	三菱東京 UFJ 銀行
楠岡 成雄	東京大学
久保田 幸長	みずほコーポレート銀行
小暮 厚之	慶應義塾大学
住友 謙一	みずほ証券
田中 周二	日本大学
出水 博章	三菱東京 UFJ 銀行
中川 秀敏	一橋大学
真鍋 裕司	三井住友銀行
三浦 良造	一橋大学
宮崎 浩一	電気通信大学
室町 幸雄	首都大学東京
森本 祐司	キャピタスコンサルティング

### （日本銀行からのラウンドテーブル参加者）

高橋 亘、白塚 重典、小田 信之、吉羽 要直、山田 哲也、杉原 慶彦、金子 拓也

このほかの参加者を含めた全体では、招待参加者が約 60 名、日本銀行職員の参加が約 30 名であった。