

銀行が保有する資産の毀損と同時倒産のリスク

Asset price fluctuation and multiple bank failures

前野義晴 *

Yoshiharu Maeno, Ph.D.

日本電気株式会社

NEC Corporation

Abstract: This study presents a probability theory and a computer simulation model to analyze the risk of multiple bank failures which are caused by an asset price fluctuation. The asset-side herding in the investment of banks is a potential cause of the instability of a bank system.

1 はじめに

2011年11月8日、欧州銀行監督機構（EBA）は、欧州の銀行に不足する自己資本の総額が1,147億ユーロに達すると発表した。8月以降、債務不安がギリシアからイタリア、スペインにおよび、銀行が保有する国債の価格が下落したためである。価格の下落がさらに進めば、複数の銀行が倒産に追い込まれるだろう。納税者の負担を意味する公的資金を投入する事態に陥いる懸念が膨らんでいる。そこで、金融監督当局は、世界規模での銀行の同時倒産を回避し、危機を収束させる手立てを見出す必要に迫られている [5], [9], [10], [12], [16]。

このような場面で、コンピュータ・シミュレーション・モデル [4], [11], [13], [14] を駆使し、多くの銀行を含む銀行システム全体の挙動を定量的に分析する新しい方法が活用され始めている。

本研究では、銀行が保有する資産の毀損が複数の銀行の同時倒産を引き起こすリスク [6] を定量的に分析する方法を述べる。個々の銀行のバランスシートを簡易なモデルで表現し、投資先となる複数の資産の価格が変動した時にバランスシートに現れる影響を調べる。特に、銀行の分散投資のパターンと同時倒産のリスク、倒産処理のコストとの関係を明らかにする。

2 銀行のバランスシート

バランスシートは、ある時点での銀行の財務状態を捕えたスナップショットである。銀行システムを構成する N 行の銀行のバランスシートをモデルで表現する。

銀行 i ($1 \leq i \leq N$) の資産額 a_i は、外部資産額 e_i 、銀行間貸出額（他の銀行の銀行間借入に対応） l_i を含む。外部資産とは、銀行間での運用以外の一般貸出や証券投資などのすべての資産を指す。外部資産には毀損する可能性がある。負債は、自己資本額 w_i 、銀行間借入額（他の銀行の銀行間貸出に対応） b_i 、預金額 d_i を含む。自己資本とは、返済の必要がなく直ちに損失の吸収に使える資本を指し、狭義の中核自己資本（コアティア 1）と位置付けられる。関係 $a_i = e_i + l_i = w_i + b_i + d_i$ が成り立つ。独立な変数は 4 つである。

定数 θ は、銀行システムの貸出額の特徴を表すパラメータである。これは、銀行間貸出額の合計値 $L = \sum_{i=1}^N l_i$ が資産額の合計値 $A = \sum_{i=1}^N a_i$ に占める割合である。与えられた外部資産額の合計値 $E = \sum_{i=1}^N e_i$ について、式 (1) の関係が成り立つ。

$$L = \theta A = \frac{\theta}{1 - \theta} E. \quad (1)$$

定数 γ は、すべての銀行に共通の自己資本比率を表すパラメータである。式 (2) で定義される。つまり、すべての銀行が同じ自己資本比率を持つと仮定する。規制で銀行に求められる自己資本比率の最低水準が γ だと解釈すれば、どの銀行も γ 程度の自己資本比率を確保していると想定できる。

$$\gamma = \frac{w_i}{w_i + b_i + d_i} = \frac{w_i}{a_i}. \quad (2)$$

すべての銀行のバランスシートを決める手順を述べる。インターバンク・マーケットでの資金調達により、銀行間に貸借の関係が発生する。銀行をノード、銀行間の貸借関係をリンクとするネットワークを銀行ネットワークと呼ぶ。銀行ネットワークのトポロジを行列 T で表現する。銀行 i から銀行 j への貸借関係があれば $T_{ij} = 1$ 、なければ $T_{ij} = 0$ とする。銀行 i から出るリンクの本数を ${}^{\text{out}}k_i$ (銀行 i が資金を貸し出す銀行の数)、

*連絡先：日本電気株式会社，〒 211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部，Email: y-maeno@aj.jp.nec.com. ソーシャル・デザイン・グループ，〒 112-0011 東京都文京区千石，E-mail: maeno.yoshiharu@socialdesigngroup.com.

銀行 j に入るリンクの本数を ${}^{\text{in}}k_j$ (銀行 j が資金を借り入れる銀行の数) とする．リンクが存在する割合を r_L とする．関係 $r_L = \langle {}^{\text{out}}k_i \rangle / (N-1) = \langle {}^{\text{in}}k_i \rangle / (N-1)$ が成り立つ．

定数 θ, γ を与えると，行列 T から個々の銀行の貸出額や借入額が決まる．そして，貸借額に矛盾が起こらないよう，すべての銀行のバランスシートを組み上げられる [7]．銀行 i から銀行 j への貸出額の大きさ ω_{ij} は，式 (3) で与えられる．ここで，指数 ρ は，銀行間での貸借の偏りの大きさを決めるパラメータである．指数 ρ が大きいと，貸借が多くの貸借関係を持つ巨大銀行間に集中する．定数 $\rho = 0$ では偏りがなく，貸借額が均一となる．貸借関係あたりの貸借額が一定となる．

$$\omega_{ij} = \frac{T_{ij}^{\text{out}} k_i^\rho \text{out} k_j^\rho}{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} T_{ij}^{\text{out}} k_i^\rho \text{out} k_j^\rho} \frac{\theta}{1-\theta} E. \quad (3)$$

銀行 i の貸出額 l_i と借入額 b_i は， ω_{ij} を足し合わせて，式 (4), (5) で与えられる．

$$l_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ij}. \quad (4)$$

$$b_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ji}. \quad (5)$$

ここで，外部資産額が正味の銀行間借入額より小さくならない条件 $e_i \geq b_i - l_i$ を課す．外部資産額 e_i は式 (6) で与えられる．式 (6) の第一項で条件が満たし，これにすべての銀行で均等に分割した第二項を加える．これから， a_i, w_i, d_i の値が決まる．

$$e_i = \max(b_i - l_i, 0) + \frac{E - \sum_{i=1}^N \max(b_i - l_i, 0)}{N}. \quad (6)$$

銀行は，保有する外部資産を M 個の投資先に分散して投資して運用する．銀行 i が資産 j ($1 \leq i \leq M$) に投資する割合を x_{ij} とする．すべての銀行の投資パターンが x で表される．ここで， $\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1$ が成り立つ．資産 j への投資額は $e_i x_{ij}$ である．資産 j の価格が下落して，外部資産の毀損による損失を被る可能性がある．資産 j の 1 単位資産あたりの価格の下落額を v_j とする．下落額は確率変数で変動する．確率変数 v_j の確率密度関数を $P_L(v_j)$ とする．外部資産の毀損による損失の総額は， $e_i \sum_{j=1}^M x_{ij} v_j$ である．損失を自己資本で賄えなければ，銀行は倒産する．銀行 i が倒産する条件は，式 (7) で与えられる．倒産する銀行の数を F とする．

$$e_i \sum_{j=1}^M x_{ij} v_j > w_i. \quad (7)$$

銀行の分散投資のパターンを特徴付ける 2 つの大域的な指標を定義する．銀行間の投資パターンの違いを

表す指標として，式 (8) の D を用いる． $D = 0$ なら投資パターンは同じで，どの銀行も同じように投資する群行動を表す． $D = 1$ なら投資パターンはまったく異なり，銀行は独自に行動する．次に，投資パターンが完全に均等な分散投資パターンからずれる度合いを表す指標として，式 (9) の G を用いる．通常，完全に均等な分散投資パターンは，個々の銀行にとって最もリスクを減らす投資パターンになる． $G = 0$ なら完全に均等な分散投資であり， $D = 1$ ならば特定の投資先に投資を集中する偏った投資パターンになる．

$$D(x) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq k} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |x_{ij} - x_{kj}|. \quad (8)$$

$$G(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \left| \sum_{i=1}^N x_{ij} - \frac{1}{M} \right|. \quad (9)$$

3 同時倒産のリスクとコスト

銀行数 $N = 2$ ，投資先数 $M = 2$ の簡単なケースにおいて，銀行が倒産する確率を解析的に求める．2 つの銀行の規模は等しく，外部資産についての関係 $e_i = (1-\theta)a_i = e_j = (1-\theta)a_j$ ，自己資本についての関係 $w_i = \gamma a_i = w_j = \gamma a_j$ が成り立つと仮定する．確率変数 v_1 と v_2 は，相互に独立と仮定する．確率密度関数 P_L は，式 (10) の指数分布とする．平均的な資産の価格の下落の大きさは， λ で決まる．自己資本比率が γ_D の銀行が，1 つの資産に集中して投資した場合の倒産確率を p_D とする．関係 $2p_D = e^{-\lambda \gamma_D / (1-\theta)}$ が成り立つ．例えば， $\gamma_D = 0.07$ ， $\theta = 0.1$ で $p_D = 0.1$ とするには， $\lambda = 20.6$ である．

$$P_L(v_j) = \begin{cases} \frac{\lambda}{2} e^{\lambda v_j} & v_j < 0 \\ \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda v_j} & v_j \geq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

F 行の銀行が倒産する確率を $P_F(F)$ とする．この値は，投資パターンを表す x_{11}, x_{21} の関数となる．2 つの銀行が同時に倒産する条件 Δ_2 は，式 (11) で与えられる．これは， (v_1, v_2) 平面上で 2 本の直線を境界とする開集合を表す．

$$\Delta_2 = \{v_1, v_2 | e_1 \{x_{11} v_1 + (1-x_{11}) v_2\} > \frac{\gamma}{1-\theta} e_1, \\ e_2 \{x_{21} v_1 + (1-x_{21}) v_2\} > \frac{\gamma}{1-\theta} e_2\}. \quad (11)$$

2 つの銀行が倒産する確率 $P_F(2)$ は，式 (12) で与え

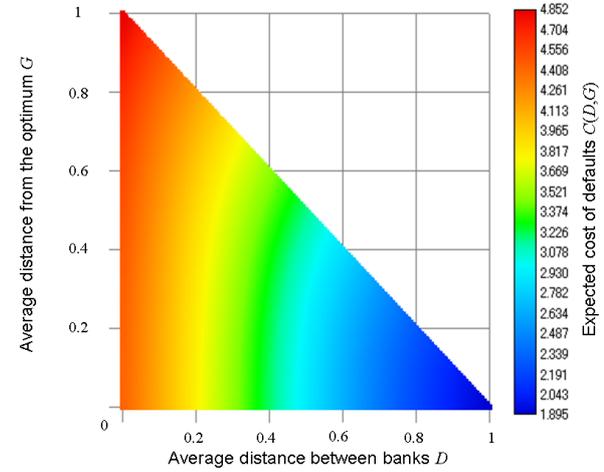
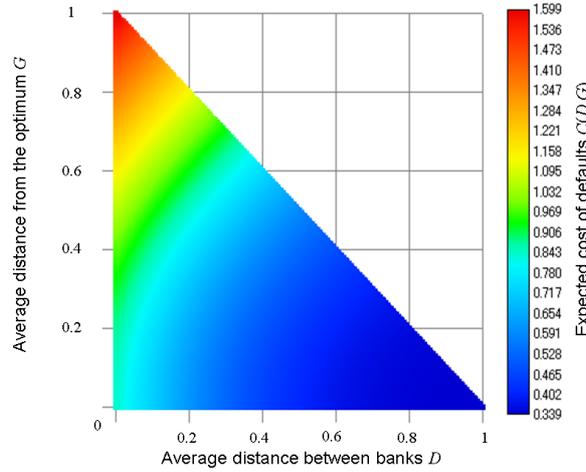
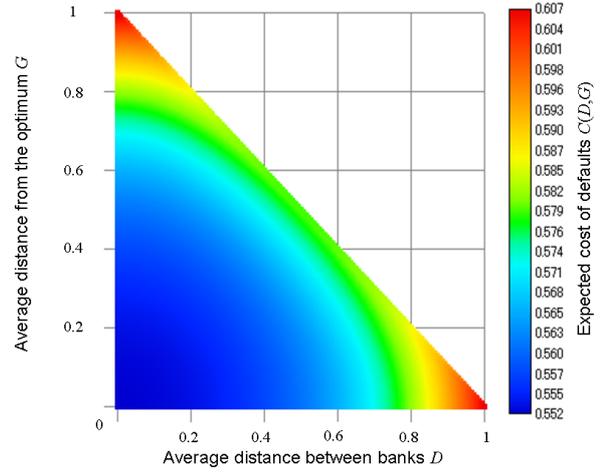
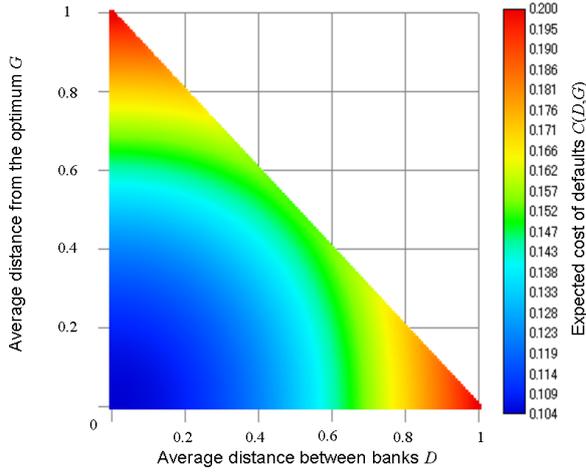


図 1: $N = 2, M = 2$ での倒産コストの期待値 $C(D, G)$. パラメータ $\gamma_D = 0.07, p_D = 0.1, \theta = 0.1$. (上図) $s = 1$, (下図) $s = 4$.

図 2: $N = 2, M = 2$ での倒産コストの期待値 $C(D, G)$. パラメータ $\gamma_D = 0.07, p_D = 0.3, \theta = 0.1$. (上図) $s = 1$, (下図) $s = 4$.

られる . ここで , $\Lambda \equiv \lambda\gamma/(1-\theta)$ である .

$$\begin{aligned}
 P_F(2) &= \iint_{\Delta_2} P_L(v_1)P_L(v_2)dv_1dv_2 \\
 &= -\frac{(x_{11}-1)^2}{2(2x_{11}-1)}e^{\frac{\Lambda}{x_{11}-1}} + \frac{x_{21}^2}{2(2x_{21}-1)}e^{-\frac{\Lambda}{x_{21}}} \\
 &\quad -\frac{1}{4}\left(\frac{x_{11}-1}{2x_{11}-1} - \frac{x_{21}-1}{2x_{21}-1}\right)e^{-2\Lambda}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

同様の計算で , どちらか 1 つの銀行が倒産する確率 $P_F(1)$ は , 式 (13) で与えられる .

$$\begin{aligned}
 P_F(1) &= \frac{(x_{11}-1)^2}{2(2x_{11}-1)}e^{\frac{\Lambda}{x_{11}-1}} + \frac{x_{11}^2}{2(2x_{11}-1)}e^{-\frac{\Lambda}{x_{11}}} \\
 &\quad -\frac{(x_{21}-1)^2}{2(2x_{21}-1)}e^{\frac{\Lambda}{x_{21}-1}} - \frac{x_{21}^2}{2(2x_{21}-1)}e^{-\frac{\Lambda}{x_{21}}} \\
 &\quad +\frac{1}{2}\left(\frac{x_{11}-1}{2x_{11}-1} - \frac{x_{21}-1}{2x_{21}-1}\right)e^{-2\Lambda}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

倒産が起こらない確率 $P_F(0)$ は , 式 (14) で与えられる .

$$\begin{aligned}
 P_F(0) &= 1 - P_F(2) - P_F(1) \\
 &= -\frac{x_{11}^2}{2(2x_{11}-1)}e^{-\frac{\Lambda}{x_{11}}} + \frac{(x_{21}-1)^2}{2(2x_{21}-1)}e^{\frac{\Lambda}{x_{21}-1}} \\
 &\quad -\frac{1}{4}\left(\frac{x_{11}-1}{2x_{11}-1} - \frac{x_{21}-1}{2x_{21}-1}\right)e^{-2\Lambda} + 1. \quad (14)
 \end{aligned}$$

F 行の銀行が倒産した際に , 経済全体で負担する倒産処理のコストを F^s とする . 倒産コストの期待値 C は , 式 (15) で与えられる . 指数 $s = 1$ なら , 倒産 1 件あたりの倒産コストは一定である . 指数 s が大きいと , 同時倒産の確率が倒産コストの大きさを支配する . 倒産コストは , x_{11}, x_{21} の関数になる . または , $D = |x_{11} - x_{21}|$, $G = |x_{11} + x_{21} - 1|$ の関数になる . ここで , $G \leq -D + 1$

が成り立つ．

$$\begin{aligned}
 C &= \sum_{F=0}^N F^s P_F(F) \\
 &= P_F(1) + 2^s P_F(2). \quad (15)
 \end{aligned}$$

一般には， $s > 1$ だと考えられる [6]．仮に 1 行の銀行が倒産しても，他の銀行が倒産した銀行の果たしていた経済的機能を代替できる可能性が高い．しかし，複数の銀行が同時に倒産すると，それらの銀行が果たしていた経済的機能が失われ，経済全体への負の影響が甚大になると予想される．これは，倒産 1 件あたりの倒産コストが F とともに増大することを意味する．

図 1，図 2 は，倒産コストの期待値 C を D, G の関数として示す．指数 $s = 4$ の場合，倒産の確率が相対的に小さい $p_D = 0.1$ では， $D = 1, G = 0$ でコストが最小になる．一方， $D = 0, G = 1$ でコストが最大になる．倒産の確率が相対的に大きい $p_D = 0.3$ では，やはり $D = 1, G = 0$ でコストが最小になる．ところが， $D = 0$ で， G の値によらずコストがほぼ最大になる．投資パターンが似ていると，個々の銀行での投資パターンが最適でも，同時倒産による大きな倒産コストが発生する可能性がある．つまり，投資を分散させても，分散投資のパターンが類似した群行動をとると，同時倒産の可能性が高くなる．分散投資のパターンをさらに銀行ごとに分散させると，倒産コストが小さくなる．

4 同時倒産の件数

銀行数 $N = 500$ ，投資先数 $M = 2$ のケースについて，2 種類の分散投資のパターンごとに，自己資本比率 γ と倒産する銀行の数 F の関係をシミュレーションから求める．

アメリカの連邦準備制度が運営する即時グロス決済資金移動システム (Fedwire) や日本銀行金融ネットワークシステム (BOJ-Net) での資金移動の調査 [15], [17] から，銀行ネットワークの構造が明らかにされている．資金移動先が 1,000 行を超えるひと握りの巨大銀行と，資金移動先がわずか数行の無数の小規模銀行とが混在する．実際に資金移動の関係を持つ銀行の組の数は極めて少なく，可能なすべての銀行の組に占める割合は 0.5% にも満たない．巨大銀行と小規模銀行との間での資金移動が少なくない．資金移動先の銀行数が多い銀行では，資金移動先 1 行あたりの資金移動額がたいへん大きく，1% の銀行だけで全体の 75% もの資金を移動させる．銀行数 $N = 500$ の場合，トポロジ T を Barabási-Albert モデルとし， $r_L = 0.005$ ， $\rho = 2$ とすると，Fedwire とほぼ同じ特性を持つ銀行ネットワークとなる．すべての銀行のバランスシートが決まると，

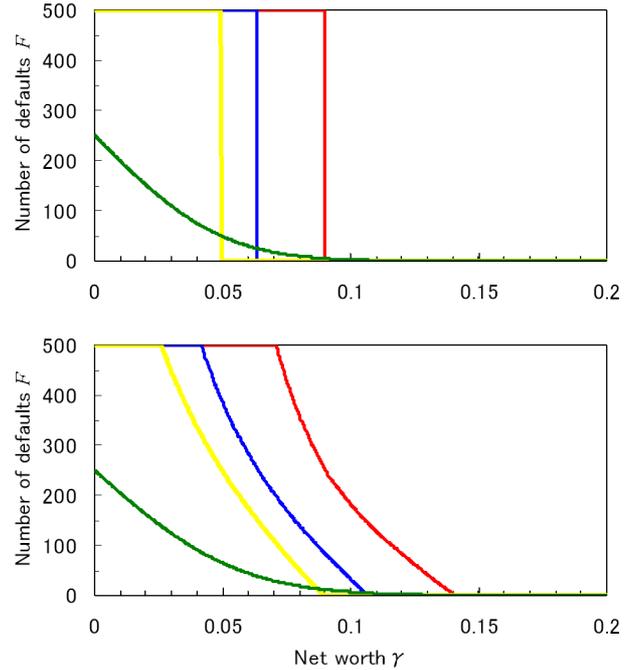


図 3: $N = 500, M = 2$ で，自己資本比率 γ の関数としての倒産件数 $F(\gamma)$ ．4 本の曲線は，第 99 百分位点 (99-percentile)，第 95 百分位点，第 90 百分位点，平均値 (μ) を表す． $P_L(v_j)$ は正規分布，パラメータ $\gamma_D = 0.07$ ， $p_D = 0.1$ ， $\theta = 0.1$ ．(上図) $x_{ij} = 0.5$ で固定，(下図) x_{ij} は一様乱数から生成された値．

2 つの資産の価格の下落額 v_1, v_2 が変動した際に，個々の銀行が倒産するか判定できる．本研究では，Fedwire と同じ特性を持つ 1,000 通りの異なる銀行ネットワークを生成し，自己資本比率 γ の関数として倒産件数 F の分布を求める．

図 3 は，確率密度関数 $P_L(v_j)$ が正規分布の確率密度関数であるケースでの倒産件数 F を示す．パラメータ $\gamma_D = 0.07$ ， $\theta = 0.1$ で $p_D = 0.1$ となるよう，正規分布の分散値を設定する．4 本の曲線は，第 99 百分位点 (99th percentile)，第 95 百分位点，第 90 百分位点，平均値を表す．上図では $x_{ij} = 0.5$ で，すべての銀行が完全に均等な分散投資を行う場合である．すべての銀行の投資パターンは同じで，倒産件数が 500 から 0 に急峻に変化する． $D = 0, G = 0$ である．下図では x_{ij} は一様乱数から生成された値とし，分散投資のパターンが銀行ごとに異なる． $D = 0.33, G = 0.02$ である． $N \rightarrow \infty$ で， $G \rightarrow 0$ の性質がある．上図と比較して，倒産件数の平均値は少し増える．しかし，自己資本比率を増やしていくと，より小さな自己資本比率の値で倒産件数が 500 から減りはじめる．同時倒産のリスクが減ったと考えられる．図 1 での分析から得られた結果と似た結果が得られる．分散投資のパターンが類似

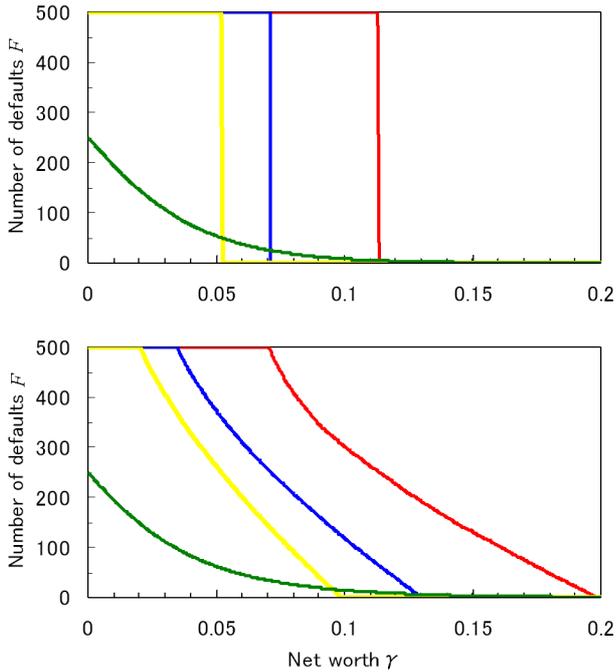


図 4: $N = 500, M = 2$ で、自己資本比率 γ の関数としての倒産件数 $F(\gamma)$. $P_L(v_j)$ は指数分布, パラメータ $\gamma_D = 0.07, p_D = 0.1, \theta = 0.1$. (上図) $x_{ij} = 0.5$ で固定, (下図) x_{ij} は一様乱数から生成された値.

した群行動は、同時倒産の可能性を高める。

図 4 は、 $P_L(v_j)$ が式 (10) の指数分布の確率密度関数であるケースでの倒産件数 F を示す。パラメータ $\gamma_D = 0.07, \theta = 0.1$ で $p_D = 0.1$ となるよう、式 (10) の λ の値を設定する。指数分布は正規分布よりも分布の裾野が長い特徴を持つ分布で、大きな価格の下落が起きる可能性がある。正規分布の場合と比較して、倒産件数が 500 から減りはじめる自己資本比率が大きくなる。自己資本比率を増やしても、倒産件数が減りにくい。

図 5 は、 $P_L(v_j)$ が自由度 1.5 のスチューデントの t 分布の確率密度関数であるケースでの倒産件数 F を示す。この分布は、正規分布からずれた現実的な価格の変動を記述するのに適しており、経済学の諸分野で応用されている。パラメータ $\gamma_D = 0.07, \theta = 0.1$ で $p_D = 0.1$ となるよう、 t 分布に従う確率変数を定数倍してスケールを調整する。 t 分布は指数分布よりもいっそう分布の裾野が長い特徴（ロングテール）を持つ分布で、さらに一段と大きな価格の下落が起きる可能性がある。指数分布の場合と比較して、倒産件数が減りはじめる自己資本比率はさらに一段と大きくなる。

どの分布の場合でも、分散投資のパターンが分散すると倒産件数が 500 から減少しはじめる自己資本比率が小さくなる効果がある。この効果は、 t 分布の場合に

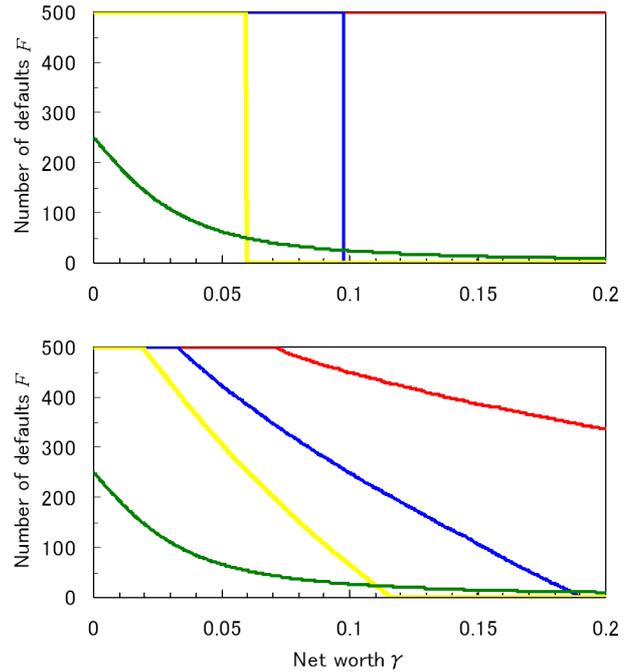


図 5: $N = 500, M = 2$ で、自己資本比率 γ の関数としての倒産件数 $F(\gamma)$. $P_L(v_j)$ は自由度 1.5 の t 分布, パラメータ $\gamma_D = 0.07, p_D = 0.1, \theta = 0.1$. (上図) $x_{ij} = 0.5$ で固定, (下図) x_{ij} は一様乱数から生成された値.

顕著に現れる。銀行システム全体から見ると、特に大きな価格の下落が起きる可能性がある場合に、銀行ごとに投資パターンを分散させる銀行経営やその方向に誘導する金融規制を実現することが望ましいだろう。

5 むすび

欧州銀行監督機構は、自己資本比率を 9% 以上とする基準を設け、この基準を 2012 年半ばまでに満たすよう欧州の銀行に求めている。また、金融安定理事会 (FSB) とバーゼル銀行監督委員会 (BCBS) がまとめて市中協議文書として公表した、世界的に活動する巨大銀行に対する規制強化策には、自己資本比率に最大 2.5% の資本サーチャージを課して追加的な損失吸収力を確保する内容が含まれている。

こういった一連の自己資本の強化策が、個々の銀行の損失吸収力を高めることは明白である。しかし、これらが、本研究で取り上げた群行動が引き起こすリスクへの防御として決定的に有効かどうかは明らかではない。特に、資産価格の下落にロングテールの特徴が現れる場合を想定すると、自己資本の強化だけで同時倒産を引き起こすリスクを十分に軽減できると考えるのは危険だろう。2008 年のアメリカでは、多くの金融機関が、金融監督当局の意向に沿って高い格付けを与え

られた同じ種類の不動産担保証券を保有していた。この群行動が引き起こすリスクが、その年の世界金融危機として発現したと考えられている [3]。現在、多くの銀行が債務不安に見舞われたギリシア、イタリア、スペインの国債を売却し、保有する資産を格付けの高いドイツやフランスの国債に分散する群行動に走ることが懸念されている。このようなリスクを十分に理解した上で、銀行経営や金融規制設計にあたる必要がある。

今後、資産の毀損に起因する同時倒産とインターバンク・マーケットでの銀行間貸借関係を伝播する連鎖倒産との相互作用を組み合わせたコンピュータ・シミュレーション・モデルによるリスク分析の方法がいつそう進展するだろう。銀行システムの特性は、バランスシートに代表される銀行を共通的に記述する要素モデルだけでなく、個々の銀行が選択する投資先や銀行間貸借関係といった一様ではない構造にも依存して決まる。これらは、要素モデルが作用する構造的な境界条件と言える。この構造的な境界条件に依らず、銀行システムの特性を記述する普遍的な統計法則を容易に見出せるとは考えにくい。そこで、直接的には観測できない構造的な境界条件を推定して情報を補いながら銀行システムの特性を予測した上で、予測の知見を銀行システムの設計に活かす体系的な方法論、すなわち、システムズ・エコノミクスの方法論が求められるだろう。

謝辞

西口健二 日本総合研究所 理事，谷村英俊 新日本有限責任監査法人 シニアプリンシパル，松島和宏 国際社会経済研究所 主席研究員，天谷健一 国際社会経済研究所 主任研究員，森永聡 日本電気株式会社 主任研究員から多大なご助言を賜りました。

参考文献

- [1] 前野義晴，G - S I B s 資本サーチャージの銀行システムに及ぼす効果は限定的 ネットワーク理論に基づく連鎖倒産リスクのシミュレーション，週刊金融財政事情 2011 年 9 月 19 日，42 (2011)。
- [2] 前野義晴，銀行の資本強化と連鎖倒産リスク，第 7 回 ファイナンスにおける人工知能応用 研究会 講演予稿集 (2011)。
- [3] S&P and the ‘Regulator’s Dilemma’，Wall Street Journal REVIEW & OUTLOOK, Friday August 12 (2011)。
- [4] C. Upper, Simulation methods to assess the danger of contagion in interbank markets, J. Fin. Stab. **7**, 111-125 (2011)。
- [5] 谷村英俊，リビング・ウィル(回復・破綻処理計画)について，新日本有限責任監査法人ホームページ <http://www.shinnihon.or.jp/industries/financial-institutions/advisory/topics/basel3/pdf/2011-06-living-wills.pdf>。
- [6] N. Beale, D. G. Rand, H. Battley, K. Croxson, R. M. May, and M. A. Nowak, Individual versus systemic risk and the Regulator’s Dilemma, Proc. Nat’l. Acad. Sci. U.S.A. **108** 12647 (2011)。
- [7] A. G. Haldane, R. M. May, Systemic risk in banking ecosystems, Nature **469**, 351 (2011)。
- [8] D. Duffie, The failure mechanics of dealer banks, J. Econ. Pers. **24**, 51-72 (2010)。
- [9] 日本総合研究所(編)，金融システムの将来像 規制改革・地域戦略・アジア展開の新たな指針，第 4 章 森永聡，藤巻遼平，坂本達夫，マクロリスク管理に関する実証研究 I I。
- [10] 西口健二，リスク管理を中心とした金融ビジネスの将来展望，財務総合政策研究所 フィナンシャル・レビュー 平成 22 年第 3 号，141 (2010)。
- [11] R. M. May, N. Arinaminpathy, Systemic risk: The dynamics of model banking systems, J. R. Soc. Interface **7**, 823 (2010)。
- [12] B. P. Gai, and S. Kapadia, Contagion in financial stability, Proc. R. Soc. A **466**, 2401 (2010)。
- [13] 藤井真理子，高岡慎，金融システムの構造と伝染効果 ネットワーク・アプローチ，財務総合政策研究所 フィナンシャル・レビュー 平成 22 年第 3 号，98 (2010)。
- [14] E. Nier, J. Yang, T. Yorulmazer, A. Alentorn, Network models and financial stability, J. Econ. Dyn. Control **31**, 2033 (2007)。
- [15] K. Soramäki, M. L. Beck, J. Arnold, R. J. Glass, W. E. Beyeler, The topology of interbank payment flows, Physica A **379**, 317 (2007)。
- [16] D. Delli Gatti, M. Gallegati, B. Greenwald, A. Russo, J. E. Stiglitz, Business fluctuations in a credit-network economy, Physica A **370**, 68 (2006)。
- [17] 稲岡創，二宮拓人，谷口健，清水季子，高安秀樹，金融機関の資金取引ネットワーク，日本銀行ワーキングペーパーシリーズ 2003 年 7 月 30 日。