

日本・米国・英国での金融システムの不安定性

Instability of financial systems in Japan, US, and UK

前野義晴 *

Yoshiharu Maeno, Ph.D.

日本電気株式会社
NEC Corporation

Abstract: This study presents an ANSeR model (asset network systemic risk model) to compute a bankruptcy amplification ratio in analyzing the risk of bank failures in a financial crisis. With the model we compare the instability of financial systems in Japan, the United States, and the United Kingdom.

1 はじめに

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¹。ユーロ危機に伴う信用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、欧州の複数の銀行が倒産に追い込まれるだろう。国債市場の変調が欧州だけに留まらず、日本・米国・英国でも倒産に追い込まれる銀行が現れる危険性がある。多くの銀行が連鎖倒産に至る金融危機が訪れれば、納税者の負担を意味する公的資金を投入する事態に陥る懸念も膨らんでいる。

世界各国の金融監督当局は、銀行の経営不安が連鎖倒産に到る予兆がないか動向を注視している。金融危機の発生を未然に予防し、あるいは、最小限の被害で要求に金融危機を収束させる手立てを見出す必要に迫られている [4], [8], [9], [11], [17]。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 [3], [10], [13], [15] を駆使し、金融システムの不安定性を定量的に分析し、連鎖倒産リスクへの適切な対処方針を導くための新しい方法が活用され始めている。

金融危機では、銀行の投融资先の資産価格が下落して銀行の資産が毀損する財務的ショックとインターバンク市場での銀行間貸出の資金回収が不能となる財務的ショックが、複合的に金融システムを伝播する。重なり合った財務的ショックを資本で吸収できなければ、銀行の倒産が発生する。本研究では、資本の面からこのよう

な倒産の事象を分析するための ANSeR モデル (asset network systemic risk model) と、連鎖の強さを定量化した倒産増幅率 (bankruptcy amplification ratio) の概念を提案する。ANSeR モデルで計測した倒産増幅率によって、金融システムの不安定性を分析する。特に、銀行間貸出からなる銀行間ネットワークのトポロジに関わる平均銀行間貸出回数 (貸借関係の粗密度合い) と、偏りに関わる上位 5 銀行が銀行間貸出額に占めるシェア (寡占による集中度合い) に注目し、これらが倒産増幅率に与える影響を検討する。さらに、日本・米国・英国各国内の金融システムの倒産増幅率を算出し、比較検討する。

2 ANSeR モデル

2.1 バランスシート

ANSeR モデルを説明する前に、銀行のバランスシートを説明する。

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。金融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。市場での資産価格の変動に応じて、外部資産には毀損する可能性がある。負債・純資産は、自己資本額 c_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 $a_i = e_i + l_i = c_i + b_i + d_i$ が成り立つ。独立な変数は 4 つである。

*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, 〒 211-8666 東京都文京区千石, Email: maeno.yoshiharu@socialdesigngroup.com.

¹A. Enria, Results of bank recapitalization plan, <http://eba.europa.eu/capitalexercise/2011/2011-EU-Capital-Exercise.aspx>

定数 θ は、金融システムの銀行間貸借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。

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

ANSeR モデルにおいて、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間ネットワークと呼ぶ。銀行間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)、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。平均貸出先銀行数 K は、式 (3) で与えられる。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N {}^{\text{out}}k_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N {}^{\text{in}}k_i}{N}. \quad (3)$$

定数 θ, γ を与えると、行列 T から個々の銀行の銀行間貸出額や銀行間借入額が決まる。そして、銀行間貸借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 [6]。一般に、銀行間貸出先数が多い銀行ほど、1 行あたりの銀行間貸出額が多いことが知られている。銀行 i から銀行 j への銀行間貸出額の大きさ ω_{ij} には、式 (4) の法則が成り立つものと仮定する。銀行間ネットワークのトポロジ T が決まると、 ${}^{\text{out}}k_i, {}^{\text{in}}k_i$ が決まり、 ω_{ij} が決まる。

$$\omega_{ij} = \frac{T_{ij} {}^{\text{out}}k_i^r {}^{\text{out}}k_j^r}{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} T_{ij} {}^{\text{out}}k_i^r {}^{\text{out}}k_j^r} \frac{\theta}{1 - \theta} E. \quad (4)$$

指数 r は、銀行間での貸借額の偏りの大きさを決めるパラメータである。指数 r が大きいと、貸借が多くて貸借関係を持つ大銀行間に集中する。定数 $r = 0$ では偏りがなく、銀行間貸出額が均一となる。貸借関係あたりの銀行間貸出額が一定となる。上位 5 銀行が銀行間貸出額に占めるシェアを R とする。 R は r の単調

増加関数である。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 (5), (6) で与えられる。

$$l_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ij}. \quad (5)$$

$$b_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ji}. \quad (6)$$

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ものとする。つまり、 $e_i \geq b_i - l_i$ とする。外部資産額が正味の銀行間借入額より小さい銀行は、すでに破綻状態にあるためである。外部資産額 e_i は式 (7) で与えられる。式 (7) の第一項で上記を満たし、これに銀行間貸出額の大きさに比例する第二項を加える。これから、 a_i, c_i, d_i の値が決まる。

$$e_i = \max(b_i - l_i, 0) + \left\{ E - \sum_{i=1}^N \max(b_i - l_i, 0) \right\} \frac{l_i}{\sum_{i=1}^N l_i}. \quad (7)$$

銀行は、保有する外部資産を M 個の投融資先に分散して投資して運用する。銀行 i が投融資先 k ($1 \leq k \leq M$) に投資する割合を x_{ik} とする。ここで、 $0 \leq x_{ik} \leq 1$ 、 $\sum_{j=1}^M x_{ik} = 1$ が成り立つ。すべての銀行の投資パターンは、投融資ポートフォリオ行列 x で表される。投融資先 j への投資額は $e_i x_{ik}$ である。

2.2 モデル

ANSeR モデルにおける連鎖倒産のシナリオを述べる。まず始めに、投融資先 j の市場での資産価格が下落すると、銀行が外部資産の毀損による損失を被る可能性がある。投融資先 k の 1 単位資産あたりの価格の下落額を v_k とする。外部資産の毀損による損失の総額は、 $e_i \sum_{k=1}^M x_{ik} v_k$ 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 (8) で与えられる。

$$e_i \sum_{k=1}^M x_{ik} v_k > c_i. \quad (8)$$

この時点で倒産した銀行の数を F^0 とする。次に、銀行が倒産すると、その銀行への銀行間貸出が回収不能となり貸し出した銀行が損失を被る。損失の合計を自己資本で賄えなければ、銀行は連鎖倒産する。銀行 i が倒産する条件は、式 (9) で与えられる。 Δ は、倒産した銀行の集合を表す。最終的に倒産した銀行の合計数を F^∞ とする。

$$e_i \sum_{k=1}^M x_{ik} v_k + \sum_{j \in \Delta} \omega_{ij} > c_i. \quad (9)$$

ANSeR モデルにおいて、連鎖倒産リスクの計測する方法を述べる．与えられた N, θ, γ, M のもので、銀行間ネットワーク、投融資ポートフォリオ、投融資先の価格をランダムに無数に生成する．銀行間ネットワーク、投融資ポートフォリオ、投融資先の価格は相互に独立とする．与えられた平均貸出先行数 K のもとで、ランダムに生成する銀行間ネットワークのトポロジ \mathcal{T} は、不均一で偏りの大きな Barabási-Albert モデル²とする．与えられたシェア R のもとで、銀行間ネットワークのトポロジからすべての銀行のバランスシートを決める．投融資については、投融資の割合をランダムに決めるものとする． $M = 2$ であれば、 x_{ik} は一様乱数から生成する．価格の下落額 v_j を確率変数とし、その確率密度関数は自由度 $\nu = 1.5$ の t-分布とする．自己資本比率 0.07 の銀行の単独倒産確率が $p_D = 10^{-3}$ となるよう、価格の変動スケールを調整する．サンプルごとに、式 (9) から倒産件数を計算する．サンプル全体にわたって倒産件数を計算し、倒産件数の頻度分布を集計する．

式 (10) の投融資先の資産価格が下落した時点で倒産した銀行の数と最終的に倒産した銀行の合計数との比で、倒産増幅率を定義する．

$$A = \frac{F^\infty}{F^0}. \quad (10)$$

A が大きいと倒産が連鎖しやすく、金融システムは不安定になる．頻度分布から、平均倒産件数での倒産増幅率、最悪ケースの代表値としての第 999 千分位点 (the 999th 1000-quantile) での倒産増幅率を求める．

3 連鎖倒産リスク

3.1 倒産増幅率

本節では、ANSeR モデルを用いて、さまざまな N, γ, θ の条件のもとで、上位 5 銀行が銀行間貸出額に占めるシェア R と平均貸出先行数 K の関数としての倒産増幅率 $A(R, K/N)$ の大きさを分析する．

図 1 は、 $N = 500, \gamma = 0.07, \theta = 0.1$ での第 999 千分位点での倒産増幅率を示す．図 2 は、同じ条件での平均倒産件数での倒産増幅率を示す．縦軸は、 K ではない

²Barabási-Albert モデル [20] は、成長と選択的接続のふたつを生成規則とする簡単なアルゴリズムから、スケールフリー性を持つネットワークを生成する数学的モデルである．生成規則：成長するネットワークでは、新しい頂点を次々と追加して既存の頂点群に接続していく．その際に、既存の頂点群のなかからひとつを選択して新しい頂点を接続する．ある既存の頂点を選択される確率は、その既存の頂点を持つ辺の数に比例する．スケールフリー性：スケールフリー性とは、頂点を持つ辺の数 k の分布が冪乗法則に従うことを指す ($p(k) \propto k^{-\beta}$)．Barabási-Albert モデルの冪は、 $\beta = -3$ である．一般化 Barabási-Albert モデル [19] の冪は、 $\beta < -2$ となる任意の値に調節することができる．冪乗法則に従う分布は裾野が長く、平均値から外れた巨大な数の辺を持つ頂点が現れる可能性がある．このような頂点をハブと呼ぶ．

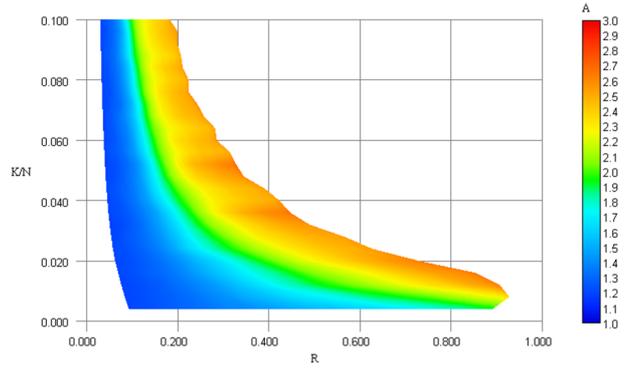


図 1: $N = 500, \gamma = 0.07, \theta = 0.1$ で、上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R 、平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$ ． $M = 2$ 、投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数)．

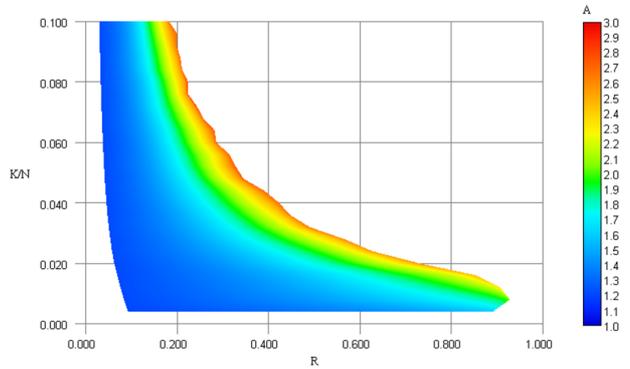


図 2: 図 1 と同じ条件 $N = 500, \gamma = 0.07, \theta = 0.1$ で、上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R 、平均貸出先行数 K の関数としての平均倒産件数での倒産増幅率 $A(R, K/N)$ ． $M = 2$ 、投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数)．

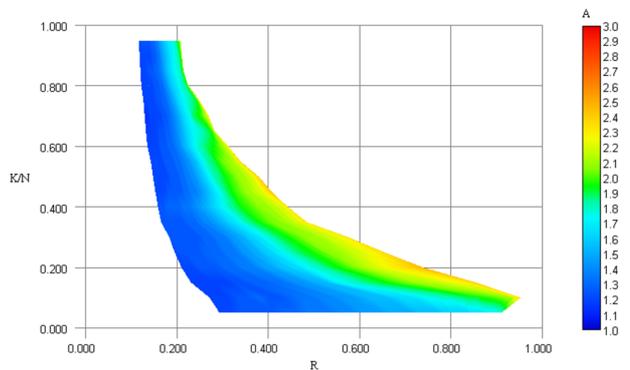


図 3: $N = 50, \gamma = 0.07, \theta = 0.1$ で、上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R 、平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$ ． $M = 2$ 、投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数)．

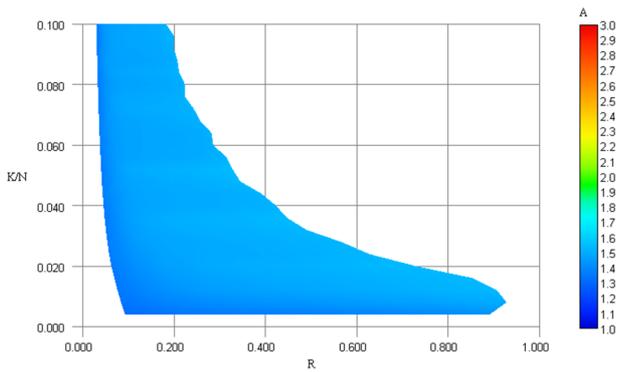


図 4: $N = 500$, $\gamma = 0.04$, $\theta = 0.1$ で, 上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R , 平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$. $M = 2$, 投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数).

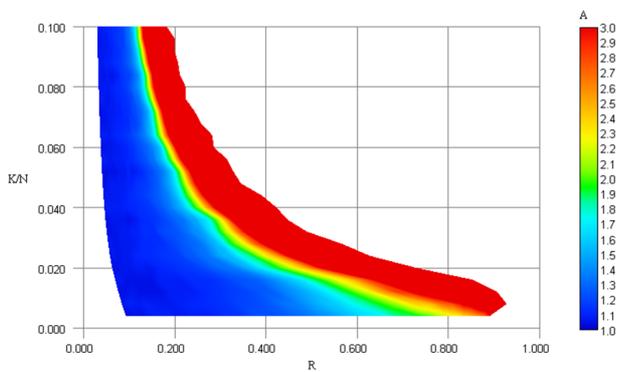


図 5: $N = 500$, $\gamma = 0.1$, $\theta = 0.1$ で, 上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R , 平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$. $M = 2$, 投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数).

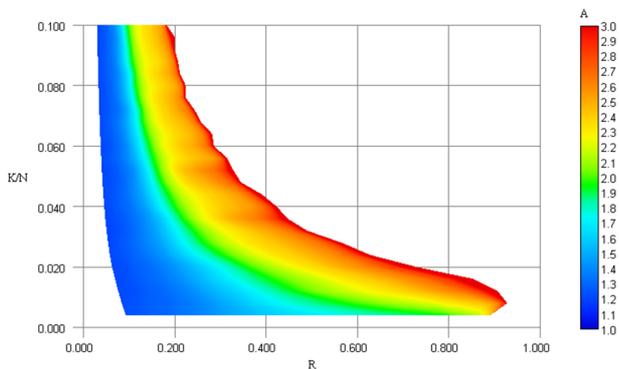


図 6: $N = 500$, $\gamma = 0.07$, $\theta = 0.3$ で, 上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R , 平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$. $M = 2$, 投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数).

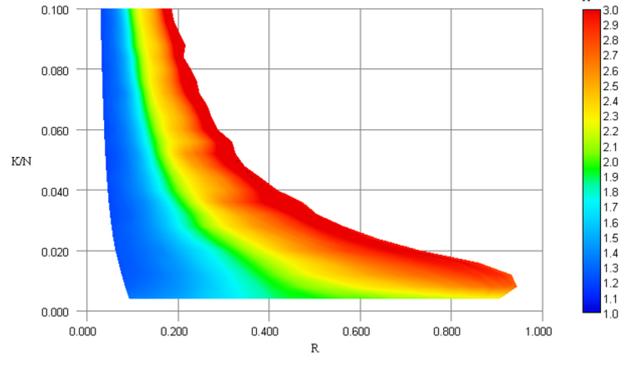


図 7: $N = 500$, $\gamma = 0.07$, $\theta = 0.5$ で, 上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R , 平均貸出先行数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$. $M = 2$, 投融資はランダム (x_{ik} は一様乱数).

く比率 K/N である。 R, K が大きくなると, A が大きくなる傾向がある。銀行間ネットワークが密で上位銀行への集中が高いと, 連鎖倒産のリスクは大きくなる。倒産増幅率の最大値は 3 を越え, 連鎖によって倒産件数が 3 倍以上に増えることを示している。また, 平均倒産件数での倒産増幅率では, 最悪ケースを評価するのに不十分であることが分かる。

第一の条件である銀行数 N を変化させ, 倒産増幅率の変化を分析する。図 3 は, $N = 50$, $\gamma = 0.07$, $\theta = 0.1$ での第 999 千分位点での倒産増幅率を示す。図 1 と比べると, 倒産増幅率の値は小さくなる。金融システムの規模が大きいほど, 連鎖倒産のリスクは大きくなる。

第二の条件である自己資本比率 γ を変化させ, 倒産増幅率の変化を分析する。図 4 は, $N = 500$, $\gamma = 0.04$, $\theta = 0.1$ での第 999 千分位点での倒産増幅率を示す。自己資本比率が小さいと, 銀行の単独での倒産が支配的となり, 連鎖倒産のリスクはかえって小さくなる。図 5 は, $\gamma = 0.1$ での倒産増幅率を示す。自己資本比率が大きいと, 連鎖倒産のリスクが高い領域と連鎖倒産のリスクが低い領域とがはっきり別れる。銀行間ネットワークが粗で, 上位銀行への集中が低いと, 連鎖倒産のリスクはほとんどない。自己資本比率を高めることで, 金融システムは安定する。一方, 銀行間ネットワークが密で, 上位銀行への集中が高いと, 銀行の単独での倒産は起きにくくなるが, 連鎖倒産がかえって支配的となる。自己資本比率を高めることが, 金融システムの安定化につながらない。

第三の条件である銀行間貸出比率 θ を変化させ, 倒産増幅率の変化を分析する。図 6 は, $N = 500$, $\gamma = 0.07$, $\theta = 0.3$ での第 999 千分位点での倒産増幅率を示す。図 7 は, $\theta = 0.5$ での倒産増幅率を示す。銀行間貸出比率が高いほど倒産増幅率が大きく傾向が見られるものの, 連鎖倒産のリスクに大きな影響を与えるわけではない。

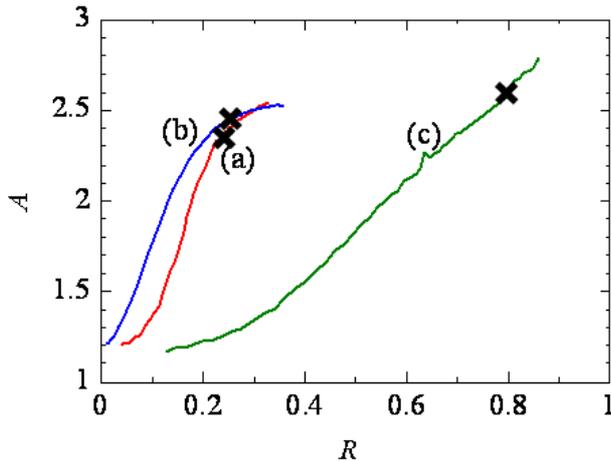


図 8: 日本・米国・英国 d での上位 5 銀行が銀行間貸出に占めるシェア R の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R)$. (a) 日本, (b) 米国, (c) 英国 .

3.2 日本・米国・英国の比較

本節では、ANSeR モデルを用いて、より現実的な条件のもとでの連鎖倒産のリスクを分析する。

図 8 は、日本・米国・英国の国内の金融システムに相当する N と K での倒産増幅率 A の上位 5 銀行が銀行間貸出額に占めるシェア R への依存性を示す。各国の資金決済システムで観測された資金移動の特徴を分析した文献から N と K の値を収集した。さらに、 R の値も推計することができる。

- 2001 年に、日本銀行金融ネットワークシステム (BOJ-Net) で観測されたデータの集計 [18] から、日本の金融システムでは銀行数 $N = 500$, $K = 25$ とした。上位 5 銀行が銀行間貸出額に占めるシェアは、 R は 25% 程度と推計される。
- 2004 年に、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) で観測されたデータの集計 [16] から、米国の金融システムでは銀行数 $N = 7000$, $K = 22$ とした。上位 66 銀行の銀行が銀行間貸出額に占めるシェアは 75% であり、本研究の銀行間ネットワークにあてはめると、 R は 25% 程度と推計される³。
- 2003 年に、英国の決済自動支払システム CHAPS で観測されたデータの集計 [14] から、英国の金融システムでは銀行数 $N = 120$, $K = 6$ とした。CHAPS には十数行の決済銀行と 300 以上の銀行が加盟している。相互に資金移動の関係を持つ中

³ R の実効的な値はもっと大きいだろう。米国では、少数の世界的に活動する銀行のみが参加する民間の大口資金移動向け支払システム CHIPS が Fedwire と並存して利用されるためである。

核的な銀行群に 120 程度の銀行が含まれることが観測されている。この数を銀行数の目安とした。上位 4 行が銀行間貸出額に占めるシェアは 75% であり、本研究のモデルにあてはめると、 R は 80% 以上と推計される。

日本と米国では R が 0.25 程度、英国では R が 0.8 程度である。これらの位置を図に \times で示す。日本・米国・英国ともに倒産増幅率は 2.3 倍から 2.7 倍程度になる。倒産増幅率が比較的大きく、どの国の金融システムも安定的とはいいがたい。ひとたび銀行の倒産が発生すると、大規模な連鎖倒産に到る危険性をはらんでいる。また、各国の金融システムの特徴は大きく異なるにも関わらず、連鎖倒産リスクの大きさが近い点も興味深い。

4 むすび

欧州銀行監督機構 (EBA) は、自己資本比率を 9% 以上とする基準を設け、この基準を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。しかしながら、一連の自己資本の強化策だけで連鎖倒産リスクを解消できるわけではない。比較的大きな倒産増幅率を持ち、必ずしも安定的とはいいがたい日本・米国・英国での金融システムで、国債市場の変調が大規模な連鎖倒産を引き起こすリスクを注視する必要がある。

資本の面から連鎖倒産リスクを分析する ANSeR モデルに加えて、流動性の面から連鎖倒産リスクを分析する方法も発展するだろう。流動性の分析では、銀行のバランスシートから必要な資金を調達できるか判定し、倒産の判断を行う。資金調達の際に担保となりうる資産からヘアカット分を差し引いて合計した調達可能資金額が、金融危機の際に他の銀行が引き上げると想定する借入を賄うために調達する必要がある資金額の合計を下回れば、資金の調達に失敗し倒産に到る。資本や流動性の面からリスクを総合的に分析することで、金融危機の発生を未然に予防し、あるいは、最小限の被害で要求に金融危機を収束させる手法が確立するだろう。

さらに、長期的には、金融システムの設計理論や突発事象に対する防衛理論につながるだろう。金融システムの特徴は、財務的ショックが伝播する原理だけでなく、個々の銀行が経営の意思決定の結果として選択する投融資先や銀行間貸借関係に依存して決まる。これらの関係性は、原理が作用する際の構造的な境界条

件と捉えることができよう。構造的な境界条件に依らず、金融システムの特徴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金融システムの特徴を予測した上で、予測の知見を金融システムの設計や防衛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に発展するだろう。

謝辞

本研究の構想から分析に到るすべての段階を通して、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 主任研究員から有益なご助言を賜りました。

参考文献

- [1] 前野義晴，森永聡，松島和宏，天谷健一，銀行間ネットワークの破綻リスク，人工知能学会論文誌 第 27 巻，338 (2012) .
- [2] 前野義晴，G - S I B s 資本サーチャージの金融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) .
- [3] C. Upper, Simulation methods to assess the danger of contagion in interbank markets, *J. Fin. Stab.* **7**, 111 (2011).
- [4] 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>.
- [5] N. Beale, D. G. Rand, H. Battey, 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).
- [6] A. G. Haldane, R. M. May, Systemic risk in banking ecosystems, *Nature* **469**, 351 (2011).
- [7] D. Duffie, The failure mechanics of dealer banks, *J. Econ. Pers.* **24**, 51 (2010).
- [8] 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 .
- [9] 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) .
- [10] R. M. May, N. Arinaminpathy, Systemic risk: The dynamics of model banking systems, *J. R. Soc. Interface* **7**, 823 (2010).
- [11] B. P. Gai, and S. Kapadia, Contagion in financial stability, *Proc. R. Soc. A* **466**, 2401 (2010).
- [12] S. Martinez-Jaramillo, O. P. Perez, F. A. Embriz, F. L. G. Dey, Systemic risk, financial contagion and financial fragility, *J. Econ. Dyn. Control* **34**, 2358 (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] C. Becher, S. Millard, K. Soramäki, The network topology of CHAPS Sterling, Bank of England Working Paper No.355 (2008).
- [15] E. Nier, J. Yang, T. Yorulmazer, A. Alentorn, Network models and financial stability, *J. Econ. Dyn. Control* **31**, 2033 (2007).
- [16] K. Soramäki, M. L. Beck, J. Arnold, R. J. Glass, W. E. Beyeler, The topology of interbank payment flows, *Physica A* **379**, 317 (2007).
- [17] D. Delli Gatti, M. Gallegati, B. Greenwald, A. Russo, J. E. Stiglitz, Business fluctuations in a credit-network economy, *Physica A* **370**, 68 (2006).
- [18] 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 .
- [19] S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes, A. N. Samukhin, Structure of growing networks with preferential linking, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 4633 (2000).
- [20] A.-L. Barabási, R. Albert, and H. Jeong, Mean-field theory for scale-free random networks, *Physica A* **272**, 173 (1999).