

金融システムを安定化する最適な投融資ポートフォリオと銀行間ネットワーク

Optimal investment portfolio and interbank credit network for a robust financial system

前野義晴

Yoshiharu Maeno, Ph.D.

日本電気株式会社

NEC Corporation

Abstract: This study presents an ANWSER model (asset network systemic risk model) to compute a bankruptcy reproductive ratio in analyzing the risk of bank failures in a financial crisis. We present the bankruptcy reproductive ratio as a function of the average number of interbank loans, the share of big banks, the risk exposure and diversity of investments which banks make.

1 はじめに

世界各国の金融監督当局は、金融システムの不安定性が銀行の経営不安、さらには、銀行の連鎖倒産に到る兆候が見られるか注視している。金融危機の発生を未然に予防し、あるいは、最小限の被害で早急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 [8], [15], [16], [18], [23]。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 [12], [17], [19], [21] 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、銀行の投融資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 ANWSER 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 reproductive ratio) の概念を提案する。ANWSER モデルで計測した倒産増幅率を連鎖倒産リスクの尺度として、金融システムの不安定性を分析する。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的な銀行間貸出行数、つまり、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、つま

り、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。銀行間の投融資ポートフォリオの違いを表す投融資ポートフォリオの多様性と、金融システム全体での完全均等分散の投融資ポートフォリオからのずれ、つまり、投融資ポートフォリオの不均等性に注目し、これらが倒産増幅率に与える影響を検討する。

2 ANWSER モデル

2.1 バランスシート

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 n ($1 \leq n \leq N$) の資産額 a_n は、外部資産額 e_n 、銀行間貸出額 (他の銀行の銀行間借入に対応) l_n 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_n 、銀行間借入額 (他の銀行の銀行間貸出に対応) b_n 、預金額 d_n 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 $a_n = e_n + l_n = c_n + b_n + d_n$ が成り立つ。独立な変数は 4 つである。

ANWSER モデルでは、ふたつの定数を所与とし、個々の銀行のバランスシートを決めていく。定数は、金融システムの銀行間貸借の特徴を表すパラメータで

連絡先: 日本電気株式会社, 〒 211-8666 神奈川県川崎市中原区, 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, Email: maeno.yoshiharu@socialdesigngroup.com.

ある．これは，銀行間貸出額の合計値 $L = \sum_{n=1}^N l_n$ が資産額の合計値 $A = \sum_{n=1}^N a_n$ に占める割合である．与えられた外部資産額の合計値 $E = \sum_{n=1}^N e_n$ について，式 (1) の関係が成り立つ．

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

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) の関係がある．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．

$$\gamma = \frac{c_n}{c_n + b_n + d_n} = \frac{c_n}{a_n}. \quad (2)$$

2.2 銀行間ネットワーク

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表 T で表現する．銀行 n から銀行 n' への貸借関係があれば $T_{nn'} = 1$ ，なければ $T_{nn'} = 0$ とする．銀行 i から出るリンクの本数を $^{\text{out}}k_n$ (銀行 n が資金を貸し出す銀行の数)，銀行 n' に入るリンクの本数を $^{\text{in}}k_{n'}$ (銀行 n' が資金を借り入れる銀行の数) とする．銀行間取引数 K は貸出先銀行数の平均値で，式 (3) で与えられる．

$$K = \frac{\sum_{n=1}^N ^{\text{out}}k_n}{N} = \frac{\sum_{n'=1}^N ^{\text{in}}k_{n'}}{N}. \quad (3)$$

ANWSEER 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．定数 γ を与えると，行列表 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 [11]．一般に，銀行間貸出先行数が大きい銀行ほど，1 行あたりの銀行間貸出額が大きいことが知られている．銀行 n から銀行 n' への銀行間貸出額の大きさ $\omega_{nn'}$ 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， $^{\text{out}}k_n$ ， $^{\text{in}}k_{n'}$ が決まり， $\omega_{nn'}$ が決まる．

$$\omega_{nn'} = \frac{T_{nn'} ^{\text{out}}k_n^r ^{\text{out}}k_{n'}^r}{\sum_{n=1}^N \sum_{n' \neq n} T_{nn'} ^{\text{out}}k_n^r ^{\text{out}}k_{n'}^r} L. \quad (4)$$

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，貸借が多くての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上位行シェアを R とする． R は r の単調増加関数である．銀行 n の貸出額 l_n と借入額 b_n は， $\omega_{nn'}$ を足し合わせて，式 (5)，(6) で与えられる．

$$l_n = \sum_{n' \neq n} \omega_{nn'}. \quad (5)$$

$$b_n = \sum_{n' \neq n} \omega_{n'n}. \quad (6)$$

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， $e_n \leq b_n$ 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_n 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_n ， c_n ， d_n の値が決まる．

$$e_n = \max(b_n - l_n, 0) + \left\{ E \sum_{n'=1}^N \max(b_{n'} - l_{n'}, 0) \right\} \frac{l_n}{\sum_{n'=1}^N l_{n'}}. \quad (7)$$

2.3 投融資ポートフォリオ

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 n が投融資先 m ($1 \leq m \leq M$) に投資する割合を X_{nm} とする．銀行 n の投融資先 m への投資額は $e_n X_{nm}$ である．投融資先をインデックス m で識別する．インデックスとは，信用リスクの評価に用いられる複数ファクターのモートン型モデルにおける，インデペンデント・ファクタを指す．インデペンデント・ファクタは，投融資先の価格の変動を表す変数の組み合わせで得られる，独立な確率変数群である．ここで， $0 \leq X_{nm} \leq 1$ ， $\sum_{m=1}^M X_{nm} = 1$ 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表 X で表される．

投融資ポートフォリオの特徴を表す 2 つの指標 [9] を導入する．ひとつは，投融資ポートフォリオを比較した際に見られる銀行と銀行の違いの度合い，つまり，銀行の多様性を表す指標 D である．式 (8) で D を定義する．

$$D(X) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{n \neq n'} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |X_{nm} - X_{n'm}|. \quad (8)$$

以後， D を多様性と呼ぶことにする． D は，投融資ポートフォリオの違いを距離として測った際に，すべての銀行間での平均的な距離に相当する．第 n 銀行と第 n' 銀行との差 $|X_{nm} - X_{n'm}|$ を投融資先と銀行の組について平均した値である． $D = 0$ なら，すべての銀

行が同じ投融資ポートフォリオを持つ。 $D = 1$ なら、すべての銀行が別々の投融資先へ投融資を行うポートフォリオを表す。

もうひとつは、金融システムでの完全均等分散のポートフォリオからのずれを表す指標 G である。式 (9) で G を定義する。

$$G(\mathbf{X}) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \left| \sum_{n=1}^N X_{nm} - \frac{1}{M} \right|. \quad (9)$$

以後、 G を不均等性と呼ぶことにする。 G は、すべての銀行での、完全均等分散を表す投融資ポートフォリオの重心からの距離 $X_{nm} = 1/M$ の平均値に相当する。 $G = 0$ なら完全均等分散、 $G = 1$ なら完全均等分散と最も異なる集中的な投融資ポートフォリオを表す。

2.4 連鎖倒産シナリオ

ANSWER 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 m 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 m の 1 単位資産あたりの価格の下落額を v_m とする。外部資産の毀損による損失の総額は、 $e_n \sum_{m=1}^M X_{nm} v_m$ 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 (10) で与えられる。

$$e_n \sum_{m=1}^M X_{nm} v_m > c_n. \quad (10)$$

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 n が倒産する条件は、式 (11) 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。

$$e_n \sum_{m=1}^M X_{nm} v_m + \sum_{n' \in \Delta} \omega_{nn'} > c_n. \quad (11)$$

2.5 リスク計測

ANSWER 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。連鎖倒産リスクの尺度は倒産増幅率である。式 (12) 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。与えられた N , M , γ のもので、銀行間取引数 K , 上位行シェア R ,

多様性 D , 不均等性 G の関数として倒産増幅率を計測する。

$$A(K, R, D, G) = \frac{F^\infty}{F^0}. \quad (12)$$

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、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。与えられた N , M , γ 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。

銀行間ネットワークについては、与えられた銀行間取引数 K と上位行シェア R を満たすトポロジ T をランダムに生成するものとする。トポロジからすべての銀行のバランスシートを決める。ただし、トポロジは、不均一で偏りの大きな Barabási-Albert モデルとする。Barabási-Albert モデル [27] 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。ある既存の頂点が選択される確率は、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 [26] 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。

投融資ポートフォリオについては、与えられた多様性 D と不均等性 G を満たす投融資ポートフォリオ \mathbf{X} をランダムに生成するものとする。これがひとつのサンプルとなる。価格の下落額 v_m 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 (11) から倒産件数を計算する。ランダムに生成した無数の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。

3 連鎖倒産リスク

3.1 銀行間ネットワークの最適性

ANSWER モデルを用いて、与えられた投融資ポートフォリオのもとで、上位 5 銀行が銀行間貸出額に占

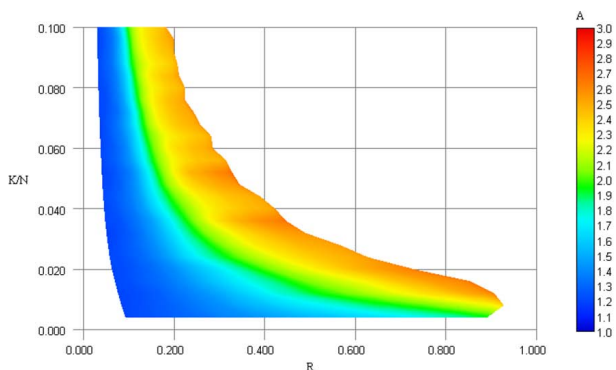


図 1: ANWSER モデルで分析した，銀行間ネットワークの上位行シェア R と銀行間取引数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$ ．銀行数 $N = 500$ ，投融資先数 $M = 2$ ，自己資本比率 $\gamma = 0.07$ ，銀行間貸出比率 $= 0.1$ ．投融資はランダム，すなわち， X_{nm} は一様乱数．この場合， $D = 0.33$ ， $G = 0.02$ となる．

める上位行シェア 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， $N = 500$ ， $\gamma = 0.07$ ， $= 0.1$ での第 999 千分位点での倒産増幅率を示す．縦軸は， K ではなく比率 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．図 2 は， $N = 50$ ， $\gamma = 0.07$ ， $= 0.1$ 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くほど，連鎖倒産のリスクは大きくなる．

3.2 投融資ポートフォリオの最適性

与えられた銀行間ネットワークのもとで，投融資ポートフォリオの多様性 D と不均等性 G の関数としての倒産増幅率 $A(D, G)$ の大きさを分析する．図 3 は， $N = 500$ での A の D と G への依存性を示す． A の値を青色から赤色までのグラデーションで示す．青色の領域では $A = 1$ となり，連鎖倒産が発生しない．赤色の領域で A は最大値の 4 に達し，連鎖によって倒産件数が 4 倍に増幅される．図の右半分で倒産増幅率が小さく，左半分で大きい．銀行間の多様性が小さく投融資ポートフォリオが類似していると，連鎖倒産リスクが大きくなる．ただし，多様性が非常に小さな金融システムでは，連鎖の概念が意味を失う．多様性が非常に小さいと，銀行間で投融資ポートフォリオがほぼ一致する．このような場合に初期ショックが伝播すると，すべて

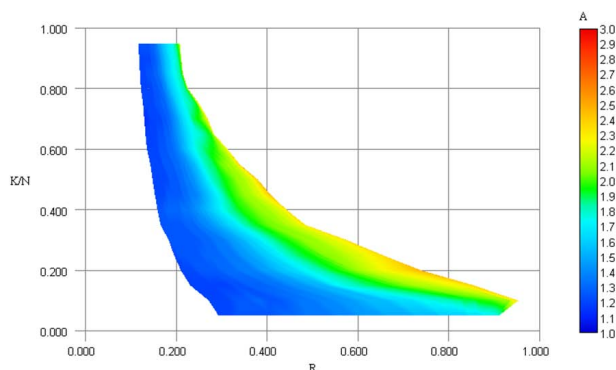


図 2: ANWSER モデルで分析した，銀行間ネットワークの上位行シェア R と銀行間取引数 K の関数としての第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(R, K/N)$ ．銀行数 $N = 50$ ，投融資先数 $M = 2$ ，自己資本比率 $\gamma = 0.07$ ，銀行間貸出比率 $= 0.1$ ．投融資はランダム，すなわち， X_{nm} は一様乱数．この場合， $D = 0.33$ ， $G = 0.02$ となる．

の銀行が倒産する ($F^0 = N$ ， $F^\infty = N$) か，どの銀行も倒産しない ($F^0 = 0$ ， $F^\infty = 0$) がいずれかになる．どちらが起こっても，連鎖倒産は発生しない．倒産増幅率は，投融資ポートフォリオの不均等性にさほど依存しない．しかし，不均等性が小さく金融システム全体で完全均等分散に近いほど，連鎖倒産リスクが大きくなる傾向が見られる．

図 4 は， $N = 50$ での A を示す．倒産増幅率の最も大きな領域で $A = 2$ で，連鎖によって倒産件数が 2 倍に増幅される．図 3 での倒産増幅率の最大値は $A = 4$ であることから，金融システムの規模が大きいくほど連鎖倒産リスクが大きいくことが分かる．図の右側で倒産増幅率が小さく，中央部で大きい．左側で倒産増幅率が小さくなるのは，図 4 と同様にこの領域で連鎖の概念が意味を失うためである．金融システムの規模に関わらず，銀行間の多様性が小さく投融資ポートフォリオが類似していると，連鎖倒産リスクが大きくなる．不均等性が小さく金融システム全体で完全均等分散に近いほど，連鎖倒産リスクが大きくなる傾向が見られる．

4 むすび

連鎖倒産リスクが大きくなる条件をまとめる．

銀行間で投融資ポートフォリオが類似している

投融資ポートフォリオが完全均等分散に近い

銀行間貸借が上位行に集中する

銀行間貸借の関係を持つ銀行の組が増える

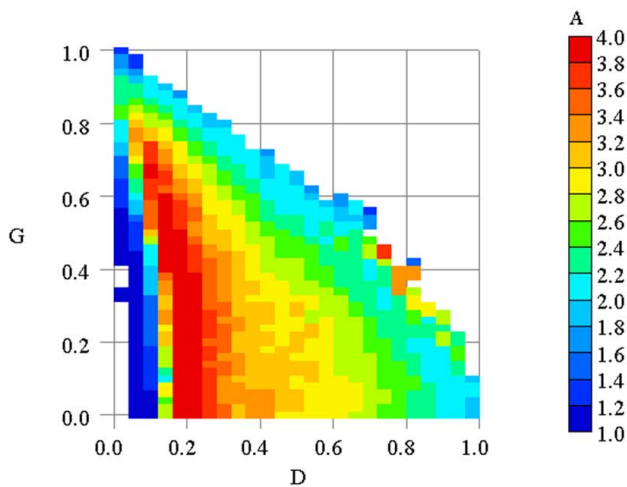


図 3: ANSWER モデルで分析した, 投融資ポートフォリオの多様性 D と不均等性 G の関数としての依存性第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(D, G)$. 銀行数 $N = 500$, 投融資先数 $M = 2$, 自己資本比率 $\gamma = 0.07$, 銀行間貸出比率 = 0.1. 上位行シェア $R = 0.25$, 銀行間取引数 $K = 25$ とする

資本の面から連鎖倒産リスクを分析する ANSWER 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的な外生的事象に対する金融システムの防衛理論につながるだろう. 金融システムの特性は, 財務的ショックが銀行から銀行へ伝播する原理的な側面だけでなく, 個々の銀行がそれぞれの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. これら投融資先や銀行間貸借関係は, 伝播の原理が作用する際の金融システム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ない, 金融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金融システムの特性を予測した上で, 予測の知見を金

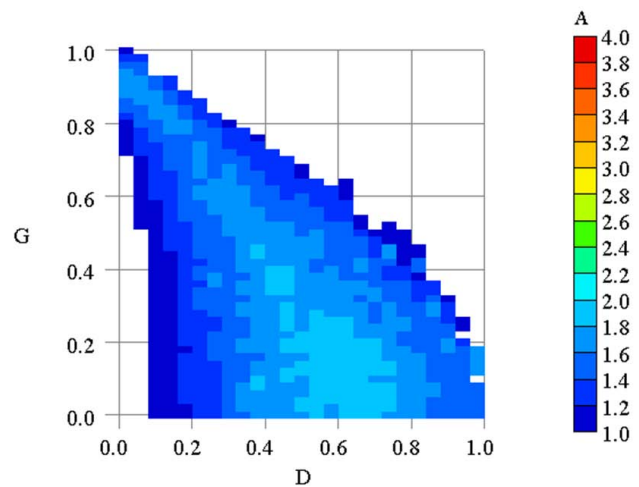


図 4: ANSWER モデルで分析した, 投融資ポートフォリオの多様性 D と不均等性 G の関数としての依存性第 999 千分位点での倒産増幅率 $A(D, G)$. 銀行数 $N = 50$, 投融資先数 $M = 2$, 自己資本比率 $\gamma = 0.07$, 銀行間貸出比率 = 0.1. 上位行シェア $R = 0.25$, 銀行間取引数 $K = 25$ とする

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] Y. Maeno, K. Nishiguchi, S. Morinaga, H. Matsushima, Optimal portfolio for a robust financial system, in Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics, Singapore (2013).
- [2] D. Fricke, T. Lux, Core-periphery structure in the overnight money market: Evidence from the e-MID trading platform, Kiel Institute for the World Economy Working Paper No.1759 (2012).

- [3] Y. Maeno, S. Morinaga, H. Matsushima, K. Amagai, Transmission of distress in a bank credit network, in Proceedings of the 4th World Congress on Social Simulation, Taipei (2012).
- [4] N. Arinaminpathy, S. Kapadia, R. M. May, Size and complexity in model financial systems, Proc. Nat'l. Acad. Sci. U.S.A. **109** 18338 (2012).
- [5] 前野義晴, 森永聡, 松島宏和, 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) .
- [6] 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) .
- [7] C. Upper, Simulation methods to assess the danger of contagion in interbank markets, J. Fin. Stab. **7**, 111 (2011).
- [8] 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>.
- [9] N. Beale, D. G. Rand, H. Battey, K. Crosson, 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).
- [10] B. P. Gai, A. Haldane, S. Kapadia, Complexity, concentration and contagion, J. Monetary Econ. **58** 453 (2011).
- [11] A. G. Haldane, R. M. May, Systemic risk in banking ecosystems, Nature **469**, 351 (2011).
- [12] C. Upper, Simulation methods to assess the danger of contagion in interbank markets, J. Fin. Stab. **7** 111 (2011).
- [13] D. Duffie, The failure mechanics of dealer banks, J. Econ. Pers. **24**, 51 (2010).
- [14] S. Martinez-Jaramillo, O. P. Perez, F. A. Embriz, F. L. G. Dey, Systemic risk, financial contagion and financial fragility, J. Econ. Dyn. and Control **34** 2358 (2010).
- [15] 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 .
- [16] 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) .
- [17] R. M. May, N. Arinaminpathy, Systemic risk: The dynamics of model banking systems, J. R. Soc. Interface **7**, 823 (2010).
- [18] B. P. Gai, and S. Kapadia, Contagion in financial stability, Proc. R. Soc. A **466**, 2401 (2010).
- [19] 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) .
- [20] C. Becher, S. Millard, K. Soramaki, The network topology of CHAPS Sterling, Bank of England Working Paper No.355 (2008).
- [21] E. Nier, J. Yang, T. Yorulmazer, A. Alentorn, Network models and financial stability, J. Econ. Dyn. Control **31**, 2033 (2007).
- [22] K. Soramaki, M. L. Beck, J. Arnold, R. J. Glass, W. E. Beyeler, The topology of interbank payment flows, Physica A **379**, 317 (2007).
- [23] D. Delli Gatti, M. Gallegati, B. Greenwald, A. Russo, J. E. Stiglitz, Business fluctuations in a credit-network economy, Physica A **370**, 68 (2006).
- [24] G. De Masi, G. Iori, G. Caldarelli, Fitness model for the Italian interbank money market, Phys. Rev. E **74** 066112 (2006).
- [25] 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 .
- [26] S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes, A. N. Samukhin, Structure of growing networks with preferential linking, Phys. Rev. Lett. **85**, 4633 (2000).
- [27] A.-L. Barabási, R. Albert, and H. Jeong, Mean-field theory for scale-free random networks, Physica A **272**, 173 (1999).