

企業間取引データからの脆弱性抽出

The vulnerability of firms' transaction networks

郷古 浩道^{1*} 斉藤 和巳² 武藤 伸明²

Hiromichi GOKO¹, Kazumi Saito² and Nobuaki MUTO²

¹ 株式会社豊田中央研究所

¹ Toyota Central R & D Labs., Inc.

² 静岡県立大学経営情報イノベーション研究科

² Graduate School of Management and Innovation, University of Shizuoka

Abstract: This paper analyzes the vulnerability of firms transaction networks empirically. First we try to reproduce the product and money flows on the network using firms' attributes and input-output table. Then we apply the flows to large real transaction dataset. Finally, we identify the most critical firms and industries for the network vulnerability.

1 はじめに

災害その他の影響により、ある企業が機能不全（倒産、生産停止等）に陥り、それが取引関係を通じて多くの企業に影響を与える例は多い。最近の例では、東日本大震災によって、直接被災していない多くの企業の生産が停滞している。また、ルネサス（半導体メーカー）の経営危機は、多くの取引企業に危機感を抱かせ、官民挙げて援助することになった。企業の機能不全は、その企業と直接取引する企業だけでなく、取引先の取引先、またその先の取引先へと、影響が伝播する。企業をノード、取引関係をリンクとするネットワークととらえれば、あるノードにおこったことが、他のノードへと伝播していく現象と捉えることができる。

企業（ノード）ごとに、ネットワーク全体に与える影響力は、異なると考えられる。たとえば、多くの企業と取引している企業や、ネットワークのハブになっている企業が倒産した場合の影響は、かなり大きなものになるだろう。また、ある企業 A は企業 B としか取引をしていなくても、取引先 B が、企業ネットワークのハブになっている場合にも、A の倒産の影響は、B を通じてネットワーク全体に大きな影響を与えることがあり得る。このように、企業の機能不全の影響は、その企業と直接取引する企業との関係だけでなく、取引ネットワーク全体におけるその企業の役割によって検討されるべきものである。

本論文の目的は、上記の論点を考慮しつつ、企業の機能不全が取引ネットワークに与える影響度を定量化し、どの企業、どの業種が、ネットワーク上で重要な

役割を果たしているのかを分析する手法を提示し、その手法を実データに適用することである。

本論文に関連する過去の研究として、以下の 3 つが挙げられる。a. 企業取引の大規模な実データを用いた研究、b. サプライチェーンの頑健性を調べた研究、c. ネットワークにおける特定のノードの重要度を調べた研究。

a について。企業間取引の大規模なネットワークについての研究は、近年、増えつつある。本論文に関連した研究として、例えば、ネットワーク全体の特徴を様々な観点から調べた研究 [1] や、連鎖倒産について分析した研究 [2] がある。これらの研究では、日本の企業の大部分を含むデータを用いて、日本の企業間取引ネットワーク全体の数理的な特徴について分析している。また、企業間取引ネットワークのページランクについても、分析されている [3]。

本論文では、より具体的に、自動車産業に関連した取引ネットワークに焦点を当てる。そのために、自動車産業に関連性の高い業種だけで、取引ネットワークを構成する。その理由は、特定の企業の機能不全の影響の伝わり方は、取引態様によって異なるからである。例えば、自動車を製造する企業が、自動車部品を製造する企業と、文房具を製造する企業の 2 つの企業と取引している場合、前者の倒産の影響は、後者の倒産の影響に比べて遥かに大きいであろう。

また、製造業間の取引でも、業種の組み合わせによって、取引規模が大きくなるということが知られている。例えば、自動車を製造する企業が、自動車部品を製造する企業と、潤滑油を製造する企業と取引をしている場合、一般的には、前者との取引額の方が多いただろう。本論文では、産業連関表（業種間の取引高を記載してい

*連絡先：株式会社豊田中央研究所
〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1
E-mail: hiromichi-goko@mosk.tytlabs.co.jp

る) や取引相手の売上高データを用いて、より実際の取引規模を考慮した、企業間取引ネットワークの分析を行う。

b) について。サプライチェーンの頑健性については、東日本大震災やタイの洪水等の経験から、近年、大きな注目が集まっている。自動車産業に関連して、例えば、国内自動車製造メーカーを中心とした、自動車産業の取引構造についての分析 [4] や、東日本大震災による多くの被災事例についての分析 [5] がある。

本論文では、自動車部品に関連した取引 (サプライチェーン) より広い範囲の取引企業を扱う。その理由は、自動車部品に関連した取引ではなくても、取引関係を通じて、ある企業の機能不全が、自動車産業に大きな影響を与えることがあり得るからである。上記のルネサスの例では、最近ルネサスが経営不振に陥ったのは、電機メーカーとの取引低迷の影響など、直接自動車産業とは関係がない取引関係によるものも影響している。しかし、それが、ルネサスの経営不振を招き、結果として、ルネサスの取引先である自動車産業に影響を与えかねない事態に陥った。

c) については、本稿では、ページランク [6] を拡張した手法を用いる。ページランクの手法は、例えば生態系の脆弱性 [7] など、さまざまな分野に応用がされている。

本論文では、この手法を拡張する。また、ネットワークの脆弱性を調べるために、ノードである企業が機能不全に陥る確率をモデルに組み込む。つまり、ある企業が、取引ネットワーク全体に与える影響度を、その企業が機能不全になる確率と、機能不全になった場合の影響度、という 2 つの要素から捉える。

以降の構成は以下の通り。2 章では、本論文で扱う企業間取引データについて述べる。3 章では、企業取引ネットワークの脆弱性を分析するための手法について述べる。4 章では、分析結果について述べる。最後の 5 章はまとめである。

2 データ

トヨタ自動車を始点として、取引ネットワークを構築する。そのために、帝国データバンクの保有する、2008 年と 2012 年の企業間取引データを用いる。このデータには、ある企業の属性 (売上高、業種等) と、その取引先企業が記載されている。

具体的には、以下のステップでデータを構築した。

1. トヨタの取引先のうち、以下の産業分類 (業種) に属する企業を 1 次先、2 次先、3 次先の順番で抽出 (括弧内の数字は、帝国データバンクの業種分類コード)

染色整理業 (2260)、プラスチック製造業 (2836)、石油製品・石油製品製造業 (29)、ゴム製品製造業 (30)、皮革・同製品・毛皮製造業 (31)、板ガラス製造業 (3211)、鉄鋼業、非鉄金属製造業 (33)、金属製品製造業 (34)、一般機械器具製造業 (35)、電気機械器具製造業 (36)、輸送用機械器具製造業 (3711-3719)、時計・同部品製造業 (3870)、卸売業 (4011-4024)

2. 帝国データバンクでは、各社の事業内容を記したデータベースを持っているが、この中に「自動車」という単語が含まれる企業については、上記分類に入っていない場合も抽出

3. これとは別に、本論文の著者から、「この企業は入っているはず」という企業を提示し、1 と 2 の作業で抽出されていない場合、データベースに追加。なお、追加された企業のほとんどは、1 次先である。

構築されたデータは、一般のサプライチェーンの用語では、トヨタ自動車の Tier3 までのサプライヤーを含むものになっている。ただし、1. はじめに述べた意図から、サプライヤー以外の企業も多く含んでいる。2008 年のデータには、49203 社 (ノード)、192933 の取引関係 (リンク)、2012 年のデータには 51895 社、229990 の取引関係が含まれている。

3 手法

3.1 機能不全になる確率

本論文で「機能不全」とは、生産停止や倒産など、取引先に影響を与える事象であり、それが起こる確率を正確に定式化することは難しい。ここでは、簡単のため、企業 i の売上高が s_i であるとき、機能不全に陥る確率 p_i を

$$p_i = s_i^{-\alpha} \quad (1)$$

で定義する。企業の売上高と、その企業が機能不全になる確率との関係は、明らかではないし、経済環境や時代によって異なると予想されるので、 α は固定せず、変化させてシミュレーションを行う。 α が大きい場合、売り上げの大きな企業ほど、より機能不全に陥りにくい設定になる。

3.2 取引量の推定

A. 業種間での取引量の特定

産業連関表 [8] を用いる。まず、帝国データバンクの産業分類は、産業連関表の分類 (日本標準産業分類) と

は異なるので、両分類の対応関係を、著者が規定した。これにより、本論文で用いる業種間の取引比率（ある業種の全産出中、特定の産業へ納入される比率）が求まる。ただし、数社の企業については、分類の対応関係の決定が困難であった。これらの企業（未分類企業）は、以降の計算で別途の扱いをする。

B. 取引量の比率を計算

企業 i の業種 n のとき、企業 j （業種 m に属する）からの取引比率（企業 j の全生産量（額）のうち、 i に納入される比率）を x_{nm} とする。企業 j から、企業 i への取引比率 \tilde{q}_{ij} を

$$\tilde{q}_{ij} = x_{nm} \frac{s_i}{t_m} \quad (2)$$

で定義する。ここで、企業 i の産出（売上高）は s_i 、ある業種 m の全産出は t_m である。

未分類企業 i^* については、その取引比率を

$$\tilde{q}_{i^*j} = \frac{S_{i^*}}{S_j} \quad (3)$$

で定義する。ここで、 S_j は、企業 j から生産物を納入されるすべての企業の売り上げの和である。

C 規格化

B で求めた取引量の比率を、企業 i からそのすべての取引先への納入の総和が 1 になるように、規格化する。

$$q_{ij} = \frac{\tilde{q}_{ij}}{\sum_k \tilde{q}_{ik}} \quad (4)$$

ただし、右辺分母の和は、企業 j から生産物を納入される、未分類企業以外のすべての企業 k についてとる。

未分類企業 i^* については、

$$q_{i^*j} = \tilde{q}_{i^*j} \quad (5)$$

とする。

3.3 取引ネットワークへの影響

上記 C で計算した取引量比率で各リンクの重みを設定し、重み付き Pagerank 類似の手法で、ノード（企業） i が機能不全（消滅）したと言う条件の下での消失流入量 $f_i(t)$ を求める。具体的には、以下のステップで数値計算をする。

第 1 段階： 任意のノード j の初期値を、その売上高 s_j に比例する確率で設定する（総和が 1 となるよう規格化する）。

第 2 段階： 特定のノード i を消滅させる。つまり、ノード i への流入はすべて消失するものとする。

第 3 段階： リンクの重みを推移確率として、取引先企業に推移させる。ただし、当該企業からの出リンクがない場合には、その企業以外の全企業に、各企業の売上高に比例した確率で推移させる。

第 4 段階： 第 2 段階を、 t ステップのシミュレーションを実行し、ノード i の消滅による消失流入量 $f_i(t)$ を求める。

企業 i が取引ネットワークの脆弱性に与える影響度 $g_i(t)$ を、機能不全になる確率 p_i とその条件下での消失流入量 $f_i(t)$ の積で、

$$g_i(t) = p_i f_i(t) \quad (6)$$

と定義する。

ネットワークのすべてのノード（企業） i に対し、シミュレーション時刻 t での影響度 $g_i(t)$ が大きい順に、ランキング $r_i(t) \in \{1, 2, \dots\}$ を付与する。そして、各業種 n とその業種に属す企業の集合 C_n に対し、次式のスコア

$$R_n(t) = \sum_{i \in C_n} \frac{1}{r_i(t)} \quad (7)$$

を計算する。一方、各企業 i のランキングをランダムに設定してスコアの平均 μ_n と標準偏差 σ_n を計算する。これらを用いれば、次式で定義するランキング z -スコアを得ることができる。

$$Z_n(t) = \frac{R_n(t) - \mu_n}{\sigma_n} \quad (8)$$

$Z_n(t)$ が大きい業種ほど、ネットワークの脆弱性に与える影響が大きいと考えられる。

シミュレーションでは、 t を変化させることによって、ネットワークへの短期的な影響や、長期的な影響を分析する。また、逆方向へ推移するシミュレーションを逆方向に行うことで、企業の機能不全が「モノ」の流れではなく、「カネ」の流れに与える影響についても分析する。

4 結果

4.1 ネットワークの脆弱性に影響の大きい業種

図 1 に、「モノ」の流れのシミュレーションを行った、2008 年、2012 年におけるランキング z -スコア $Z_n(t)$ を示す。 α によって、業種別の脆弱性への影響力が大きい

く異なることがわかる。2008年と2012年ではあまり変化はない。

図2に、「カネ」の流れのシミュレーションを行った、2008年、2012年におけるランキング z -スコア $Z_n(t)$ を示す。「モノ」の流れの場合と、結果が大きく異なる。2008年と2012年ではあまり変化はない。

以上より、 α や t によって、脆弱性に大きな影響を与える業種は大きく異なることが分かった。また、 α が変化したときの、業種の影響度の変化は単調ではなく、特定の閾値を境に急激に変化することが注目される。 t による違いは、時間スケールによって、注目すべき業種を変えなければならないことを示している。本論文では自動車産業のネットワークを構築したが、その脆弱性に最も大きな影響を与えるのは、必ずしも輸送機械製造業（本論文のデータの取り方では、ほぼすべて、自動車産業に属する企業）とは限らないことも、非常に興味深い。

4.2 ネットワークの脆弱性に影響の大きい企業

図1に、「モノ」の流れのシミュレーションを行った、2008年、2012年における $g_i(t)$ が大きい上位3企業を示す。

図2に、「カネ」の流れのシミュレーションを行った、2008年、2012年における $g_i(t)$ が大きい上位3企業を示す。

α や t によって、脆弱性に最も大きな影響を与える企業は、業種・所在地域ともに、大きく異なることが分かった。

5 おわりに

本論文では、企業の機能不全が取引ネットワークに与える影響度を定量化し、どの企業、どの業種が、ネットワーク上で重要な役割を果たしているのかを分析する手法を提示し、実データを用いて検証を行った。その結果、ネットワークの脆弱性に影響を与える企業・業種は必ずしも自動車産業の企業であるとは限らず、また、パラメータ (α , t) の設定によって大きく異なることが分かった。このことは、何を「機能不全」と考え、どの程度の時間スケールの影響を考えるのか、すなわち、「脆弱性」をどのように考えるかによって、注目すべき企業や業種を変えるべきことを示している。

今後の課題は、以下の通り。

- より細分化した産業連関表を使って、「モノ」「カネ」の流れをさらに現実に近づける
- タイムステップと実時間の関係の明確化

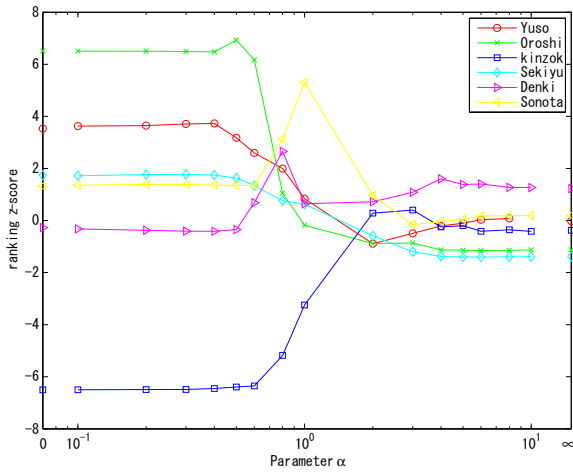
- 財務データ等により算出される各企業の倒産確率を考慮し、シミュレーションを精緻化する
- 本論文で示した影響力の大きい企業の業績が、ネットワーク上の各企業の業績にどのような影響を与えているのか実データで検証する

謝辞

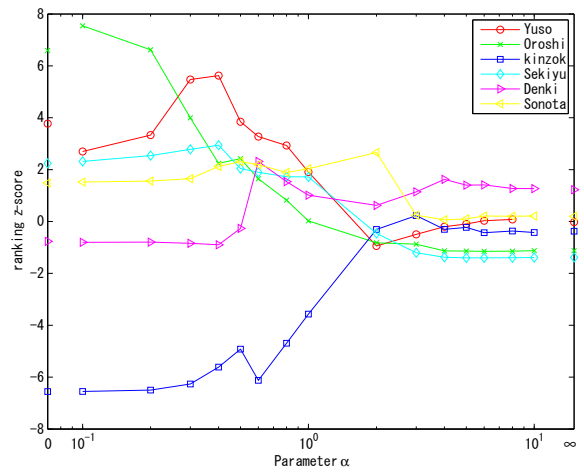
企業間取引データの作成については、帝国データバンク産業調査部産業分析課の協力をいただいた。

参考文献

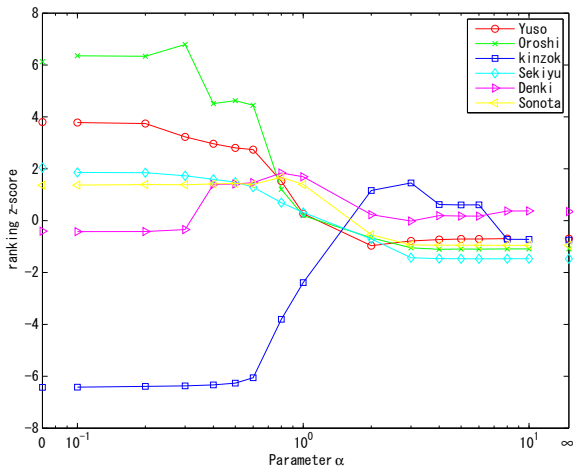
- [1] 大西立頭, 高安秀樹, 高安美佐子: 企業間ネットワークの数理構造, 応用数理, vol. 20, No. 3, pp. 223-235 (2010)
- [2] Yoshi Fujiwara and Hideaki Aoyama: Large-scale structure of a nation-wide production network, *Euro. Phys. Journal B*, vol. 77, pp. 565-580 (2010)
- [3] 大西立頭, 高安秀樹, 高安美佐子: 企業間取引ネットワークのページランク, *IPSJ SIG Technical Report*, vol. 2010-MPS-81 (2010)
- [4] 中小企業庁, 中小企業白書 2011年版, 第2部, "輸送用機械器具製造業の取引構造"
- [5] 藤本隆宏: サプライチェーンの競争力と頑健性, *MMRC DISCUSSION PAPER SERIES*, no. 354 (2011)
- [6] Lawrence Page, Sergey Brin, Rajeev Motwani and Terry Winogr: The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web, *Technical report, Stanford University* (1998)
- [7] Allesina, S., Pascual, M.: Googling food webs: Can an Eigenvector measurespecies' importance for coextinctions?, *PLoS Comput. Biol.* DOI:10.1371/journal.pcbi.1000494(2009)
- [8] 総務省統計局: 2005年産業連関表 108部門表



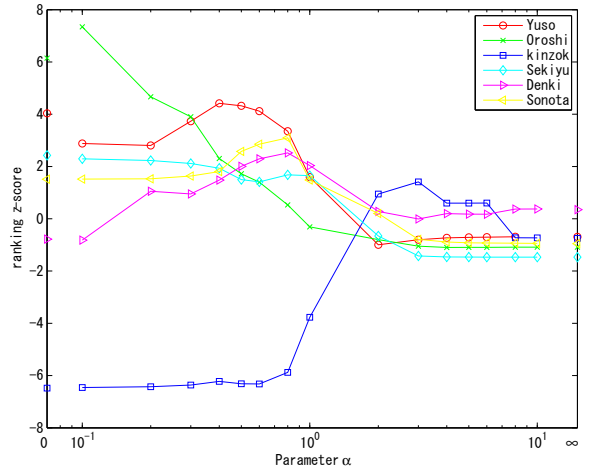
(a) 2008 年 $t = 10$



(b) 2008 年 $t = 100$



(c) 2012 年 $t = 10$



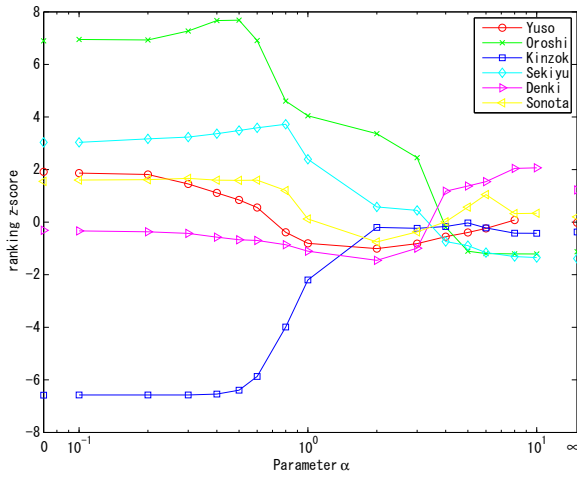
(d) 2012 年 $t = 100$

図 1: モノの流れでみた業種ごとのランキング z -スコア $Z_n(t)$

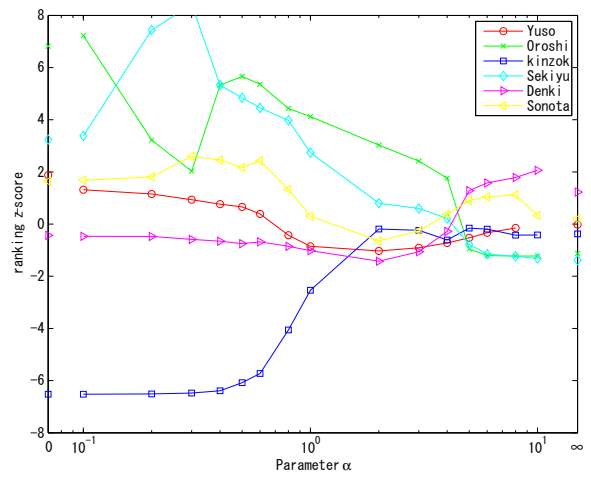
	2008				2012			
	$\alpha = 0.3$		$\alpha = 1$		$\alpha = 0.3$		$\alpha = 1$	
	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$
1	卸売 東京	輸送 広島	繊維 東京	一般 東京	卸売 東京	電気 愛知	電気 愛知	電気 愛知
2	輸送 愛知	卸売 愛知	電気 愛知	電気 東京	卸売 東京	卸売 愛知	一般 神奈川	一般 神奈川
3	卸売 東京	石油 東京	一般 宮城	電気 大阪	輸送 愛知	輸送 広島	一般 茨城	電気 東京

輸送: 輸送機械製造, 一般: 一般機械器具製造, 鉄: 鉄・非鉄金属製造,
石油: 石油石炭製品製造, 電気: 電気機械器具製造, 繊維: 繊維工業

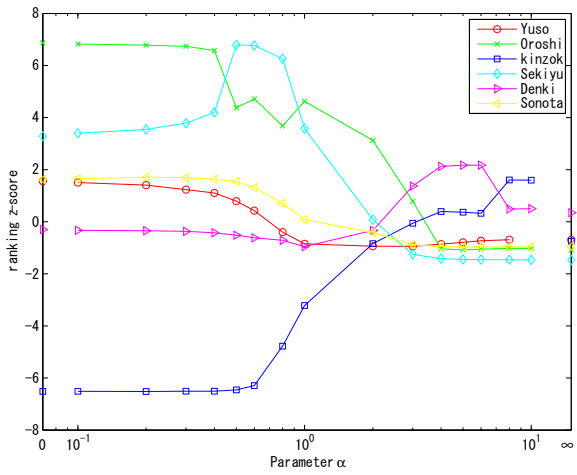
表 1: モノの流れでみたトップ 3 企業



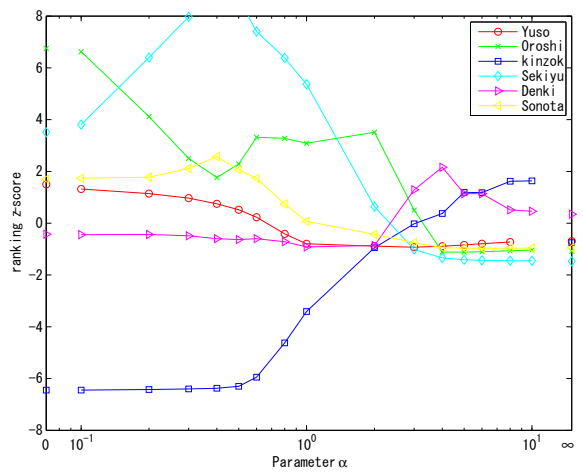
(a) 2008 年 $t = 10$



(b) 2008 年 $t = 100$



(c) 2012 年 $t = 10$



(d) 2012 年 $t = 100$

図 2: カネの流れでみた業種ごとのランキング z -スコア $Z_n(t)$

	2008				2012			
	$\alpha = 0.3$		$\alpha = 1$		$\alpha = 0.3$		$\alpha = 1$	
	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$	$t = 10$	$t = 100$
1	卸売 東京	鉄 兵庫	卸売 茨城	卸売 茨城	卸売 東京	鉄 兵庫	卸売 茨城	鉄 大阪
2	卸売 東京	石油 東京	一般 東京	一般 東京	卸売 東京	石油 東京	鉄 大阪	卸売 愛知
3	卸売 東京	卸売 茨城	卸売 東京	卸売 東京	石油 東京	鉄 東京	卸売 愛知	卸売 茨城

輸送: 輸送機械製造, 一般: 一般機械器具製造, 鉄: 鉄・非鉄金属製造,
 石油: 石油石炭製品製造, 電気: 電気機械器具製造, 繊維: 繊維工業

表 2: カネの流れでみたトップ 3 企業