

Graph Embedding 手法を用いた国際産業リンケージに基づく産業分析

○加藤弘祐（農研機構）

Analysis of International Industrial Linkages using Graph Embedding

* K. Kato (NARO)

概要— 本研究では、Graph Embedding 手法を用いて、国際産業連関表に基づき、国際産業リンケージの特徴と産業の異質性を含意する Endowment vector を獲得し、その結果を用いる形で、国際産業リンケージに大きな影響を与える産業を抽出した。抽出結果からは、アメリカ合衆国と中国の国際産業リンケージにおける影響力の大きさが示唆された。更に、Endowment vector を用いたクラス分類とクラスタリングの分析結果から、Endowment vector は国際産業リンケージの特徴を潜在的に有するものであると考えられ、本アプローチの有効性が示された。

キーワード: Graph Embedding, 国際産業連関表, 産業リンケージ

1 研究背景・目的

世界の貿易の舞台が自由貿易の促進を目的とするWTO体制となり久しいが、自由貿易の停滞を背景とした地域貿易協定の締結の増加など、近年、貿易を通じた国際的な産業の関係性、すなわち国際産業リンケージは、複雑化・多様化が進展する状況となっている。それに伴い産業構造にも変化が生じており、国際的な分業体制も深化している。

産業構造の分析に広く用いられるデータとして、産業連関表がある。産業連関表は様々な分析に使用することが可能なデータであり、産業構造の分析においても多角的な試みが行われている。したがって、産業リンケージの分析においても有用なデータと言える。

本稿での分析対象である国際産業リンケージは、以前から重要な研究トピックであるが、今般のCovid-19の世界的流行により、今後の世界の産業構造の変化が予想され、ますます国際産業リンケージに対する分析の必要性は高まっている状況にある。そういった面からしても、各産業の影響力を国際リンケージの観点から分析することは、今般のコロナ禍による影響を展望する上でも有益であろう。そこで、本研究は、ノードとリンクから成るグラフ形式のデータに対する分析手法の一つであるGraph Embedding手法を国際産業連関表に適用し、国際産業リンケージにおける各産業の影響力に関する推定を試みる。

2 先行研究

国際産業リンケージに関する研究は多くの蓄積が見られ、国際産業連関表を用いた研究事例としては、グローバルバリューチェーンに関する分析¹⁾や、ネットワーク分析によるアプローチ²⁾を試みたものなどを挙げることが出来る。他にも、海上輸送による貿易のネットワークについて予測モデルによる分析を行なったZuzanna (2020)³⁾の研究など、ネットワークという枠組みから国際的な関係性について分析する事例は少なくない。後述するように、産業連関表に対してはグラフ理論の適用が可能であるため、グラフ理論に基づいたアプローチが有効な手法として知られており、二部グラフという観点からの分析⁴⁾もある。

他方、グラフデータに対する分析として、近年では機械学習・深層学習分野の興隆も相まって、Graph

Embeddingを用いた手法が急速な発展を遂げており、幅広く利用されるようになってきている。代表的な手法として、DeepWalk⁵⁾、node2vec⁶⁾、LINE⁷⁾等が挙げられ、これらのフレームワークを利用した多数の研究事例が蓄積されている。

Graph Embedding手法を用いた研究事例として、González et al. (2020)⁸⁾は、国際的な違法取引に関する分析にnode2vecを駆使した研究を行なっている。

他にも、貿易関係の事例として、Kobby (2020)⁹⁾によるGraph Neural Networksを貿易データに適用した研究が挙げられる。この研究では二国間貿易に対する予測などを試みている。

以上、産業連関表やGraph embeddingに関連する多数の研究事例が存在していることを概観したが、産業連関表を対象としたGraph Embedding手法の適用事例は見当たらない。そこで、本研究では、Graph Embedding手法を産業連関表に対して用いるアプローチの有効性についても検討する。

3 手法とデータ

3.1 国際産業連関表

産業連関表は、投入と産出からなる各産業間の中間取引額、付加価値、最終需要などが記録されたデータであり、中間取引はマトリックス形式となっている。投入の関係性を示す産業間の中間取引は、グラフ理論における隣接行列としてみなすことが出来る。隣接行列はノードとリンクの関係性を示したデータとして取り扱うことが可能であり、したがって、Graph Embeddingの手法を適用することも出来る。本研究においては、産業連関表の内、マトリックスを構成している中間取引の部分分析対象として用いる。本稿の枠組みでは、各産業がグラフ理論におけるノードであり、中間取引がリンクに相当する。

産業連関表には地域レベルでの取引を集計したものなど、様々な粒度のデータがあるが、本研究では、国際的な産業間のリンケージを分析の対象とすることから、国境を超えた産業の取引が記録されている国際産業連関表を用いる。国際産業連関表には、アジア経済研究所が提供しているアジア国際産業連関表¹⁰⁾や、WIOD (World Input-Output Database)¹¹⁾の提供する

Table 1 : ADB-MRIO の集計対象国

オーストラリア (AUS), オーストリア (AUT), ベルギー (BEL)
ブルガリア (BGR) ブラジル (BRA), カナダ (CAN), 中国 (PRC)
キプロス (CYP), チェコ (CZE) ドイツ (DEU), デンマーク (DNK)
スペイン (ESP), エストニア (EST) フィンランド (FIN), フランス (FRA)
イギリス (GBR), ギリシャ (GRC) ハンガリー (HUN)
インドネシア (IDN), インド (IND), アイルランド (IRL)
イタリア (ITA), 日本 (JPN), 韓国 (KOR), リトアニア (LTU)
ルクセンブルク (LUX) ラトビア (LVA), メキシコ (MEX), マルタ (MLT)
オランダ (NLD), ポーランド (POL), ポルトガル (PRT), ルーマニア (ROM)
ロシア (RUS), スロバキア (SVK), スロベニア (SVN)
スイス (SWE), トルコ (TUR), 台湾 (TAP), アメリカ合衆国 (USA),
バングラデシュ (BAN), フィリピン (PHI), マレーシア (MAL),
タイ (THA), ベトナム (VIE), Rest of the World (RoW)

WIOT (World Input-Output Tables) ¹²⁾などが存在しているが、本稿では、その集計対象国の豊富さから、アジア開発銀行が WIOD のホームページにて公表している ADB-MRIO (Asian Development Bank-Multi-Regional input-output table) ¹³⁾を分析対象のデータとして用いることとした。ADB-MRIO は WIOT と比較して多数のアジア諸国が集計の対象となっており、より多くの国家間の産業リンケージを分析の対象とすることが可能である。集計対象の 45 カ国を Table 1 に示す。

3.2 Graph Embedding と Endowment vector

本研究では、分析に用いる Graph Embedding 手法として、Yuan et al. (2018) ¹⁴⁾が提案した、リンクを形成するノードであるエージェント、すなわち本稿においては各産業、に関する異質性を考慮可能な枠組みである Endowment vector によるアプローチを使用する ¹⁵⁾。ここでの Endowment vector は、ミクロ経済学における Endowment の概念を援用したものであり、そのエージェントの持つ特性を潜在的に含意したベクトルのことを意味する。各エージェントは互いの Endowment vector を参照し、比較することでリンクを形成するかどうかを決定する。

ここで、エージェント i の効用を U_i とすると、式 (1) に示す通り、 U_i は近傍のエージェントの Endowment vector により決定される。なお、ベクトルは太字として表記している。

$$U_i(S; \mathbf{W}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) = F_i(S; \mathbf{W}, \mathbf{b}) - G_i(S; \mathbf{W}, \mathbf{c}), \quad (1)$$

$$\forall S \subset \mathcal{I}\{i\}$$

ここで、 S はエージェント i 自身を除く近傍エージェントの集合を示しており、エージェント i は自身の効用 U_i を最大化するように近傍のエージェントを選択する。 U_i は交換利益 F_i (benefits of exchange) と調整コスト G_i (costs of coordination) から構成される。

更に、 S_i^* をエージェント i を選択可能な近傍エージェントの集合とすると、エージェント j がエージェント i にもたらす限界効用は式 (2) として定義される。

$$\Delta u_i(j) = \begin{cases} U_i(S_i^*; \mathbf{W}, \mathbf{b}) - U_i(S_i^* \setminus \{j\}; \mathbf{W}, \mathbf{b}), & \text{if } j \in S_i^* \\ U_i(S_i^* \cup \{j\}; \mathbf{W}, \mathbf{b}) - U_i(S_i^*; \mathbf{W}, \mathbf{b}), & \text{if } j \notin S_i^* \end{cases} \quad (2)$$

エージェント j から生じるエージェント i にとっての調整コストは、式 (3) の通りに示される。なお、調

整コストの Scaling Parameter である c_k はコストにおける k 番目の次元の重要性を示すものである。

$$G_i(S; \mathbf{W}, \mathbf{c}) = \sum_{i \in S} g(\mathbf{w}_j, \mathbf{w}_i, \mathbf{c}) = \sum_{i \in S} \|\mathbf{c} \circ (\mathbf{w}_j - \mathbf{w}_i)\|_2 \quad (3)$$

次に、 F_i は式 (4) のように表される。 $\mathbf{w}_{jk} - \mathbf{w}_{ik}$ はエージェント i にとっての k 番目の次元におけるエージェント j に対する優位性である。 b_k は k 番目の次元に関する利益にとっての重要性を示している。

$$F_i(S_i^*; \mathbf{W}, \mathbf{b}) = \sum_{i \in S} \sum_{k=1}^K b_k \max(\mathbf{w}_{jk} - \mathbf{w}_{ik}, 0) \quad (4)$$

以上により、限界効用は式 (5) の形で表すことが出来る。

$$\Delta u_i(j) = \sum_{k=1}^K b_k \max(\mathbf{w}_{jk} - \mathbf{w}_{ik}, 0) - \|\mathbf{c} \circ (\mathbf{w}_j - \mathbf{w}_i)\|_2 \quad (5)$$

Endowment vector の学習の際には、損失関数 $Loss(b, c, W|D)$ を最小化するような $\mathbf{W}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ のパラメータを求めることとなる。

そして、学習においては、Endowment vector を利益に寄与する beneficial dimensions と costly dimensions とに分割する。Endowment vector の次元を K とすると、利益に寄与するベクトルの次元を K_{bnf} 、コストに関する次元を K_{cst} とし、 $K = K_{bnf} + K_{cst}$ が成り立つ。

3.3 産業の影響力の推定

Endowment vector を用いた Graph Embedding のアプローチが持つ利点は、ベクトルに含意された特徴に対する解釈性であり、Yuan et al. (2018) では Endowment vector の beneficial dimensions と対応させる形で、Social Power を定義した。本稿では、この Social Power を産業リンケージにおける各産業の影響力として再定義し、産業が有する影響力を表した Industrial Influence とし捉える。

ここで、産業 i の影響力 Industrial Influence は、Endowment vector の内、先述した利益に寄与するベクトルと、Scaling Parameter である \mathbf{b} との内積で算出される。したがって、産業 i が有する影響力 Industrial Influence は式 (6) のように計算される。

$$Industrial\ Influence(i) = \mathbf{b} \cdot \mathbf{w}_i \quad (6)$$

4 分析の枠組み

4.1 学習対象のデータ

国際産業連関表には、国際間の中間取引のみでなく、自国内の産業間の中間取引についても記録されており、自国内の取引は他国との取引と比較して密な関係、すなわち密なリンケージを形成していることが通常であ

る。本稿では分析を国際リンケージに限定するため、これら自国内の中間取引については分析対象のデータから除外した。他に、RoW (Rest of the world) に対する各国の中間取引についても分析対象から除外することとした。

更に、本稿でのアプローチでは、産業間のリンクは無向となり、重みについても加味されず、リンクが存在するか否かのみが分析の対象となる。そこで、全体の中でも、より重要な国際産業リンケージを抽出するため、中間取引額が10億USドル以上となる中間取引のみを分析の対象とした。なお、分析の対象として含める産業は、本稿での分析が重みを加味しないことから、投入と産出の両面において少なくとも1つ以上の取引がある産業に限定した。すなわち、投入のみ取引が存在し、産出(需要)側では取引が無い産業は学習の対象外となる。また、対象年度は公開されている中で最新である2011年度とした。Table 2に、最終的に学習の対象となった産業数などの情報を整理した。

Table 2 : 学習に用いたデータに関する概要。

対象年度	2011
分析対象の取引	RoWを除いた他国間での中間取引
分析対象の取引額	10億US \$以上
産業数(ノード数)	144
リンク数	431
ネットワークの有向性	無し
重み付け	無し

4.2 パラメータの設定とクラス分類による検証

学習の際の Endowment vector とその内の利益ベクトルの次元数およびコストベクトルの次元数については、任意で設定する必要がある。本稿では学習のエポック数を5000回とし、複数の次元について試行した結果、AUC (Area Under Curve) が99.04%と最も高い値が算出された次元数9, 利益ベクトルの次元数5 (コストベクトルの次元数4) を、パラメータとして採用し、その Endowment vector を分析に利用した。

5 分析結果

5.1 クラス分類

まず、学習結果の精度について確認するため、その産業がEUに属するか否かと、その産業が学習対象となった産業の総中間投入額の平均以上か否かという二つの2クラス分類を試みた。結果をTable 3に示す。クラス分類手法にはサポートベクターマシン(SVM)を用いた。SVMの実装にはscikit-learnを利用している¹⁶⁾。なお、ここでは分類精度を確かめるため、RoWを含めた中間投入額を用いた。また、トレーニングデータは全体の75%、テストデータは25%として設定した。

Table 3 : SVMを用いたクラス分類の正解率の結果。

分類問題	トレーニングデータ	テストデータ
EU	79%	89%
総中間投入額	84%	80%

5.2 産業影響力の測定

式(6)で示した産業影響力の指標 Industrial Influence と、それらの産業の総中間投入額を軸としたグラフをFig. 1に示す。また、Table 4に産業影響力の上位10産業について整理した。なお、ここでの総中間投入額はRoWも含まれた数値である。Fig. 1からも確認出来る通り、産業影響力と総中間投入額に一定の相関が存在することが示唆される結果となった。更に、ピアソンの相関係数は0.62 ($p < 0.001$)であり、一定の相関関係が認められる。

Table 4 : 産業影響力上位20産業。

産業	国	総中間投入額	産業影響力
Transport Equipment	DEU	384,147	0.41
Electrical and Optical Equipment	PRC	1,769,907	0.41
Basic Metals and Fabricated Metal	DEU	244,960	0.32
Renting of M&Eq and Other Business Activities	USA	993,865	0.29
Chemicals and Chemical Products	USA	433,790	0.28
Machinery, Nec	DEU	204,670	0.26
Financial Intermediation	USA	1,134,503	0.26
Electrical and Optical Equipment	DEU	172,287	0.26
Basic Metals and Fabricated Metal	PRC	1,545,957	0.26
Public Admin and Defence; Compulsory Social Security	USA	1,236,651	0.25
Transport Equipment	USA	489,790	0.25
Renting of M&Eq and Other Business Activities	PRC	376,422	0.25
Chemicals and Chemical Products	NLD	61,739	0.20
Electrical and Optical Equipment	USA	202,282	0.19
Machinery, Nec	PRC	764,900	0.19
Chemicals and Chemical Products	DEU	132,639	0.18
Textiles and Textile Products	PRC	761,313	0.18
Basic Metals and Fabricated Metal	JPN	474,868	0.15
Transport Equipment	PRC	664,479	0.14
Basic Metals and Fabricated Metal	ITA	147,578	0.14

注釈) 総中間投入額の単位は100万UD \$

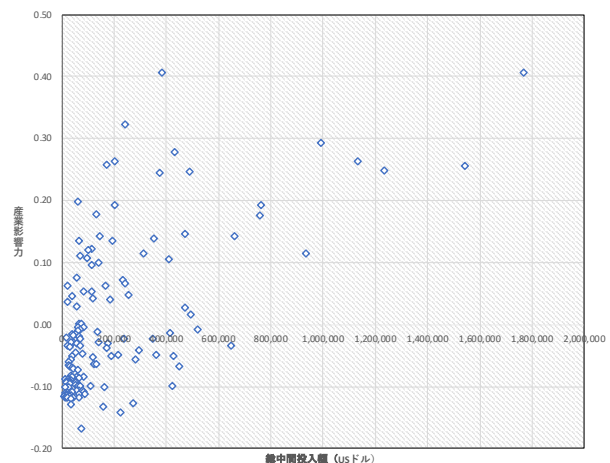


Fig. 1 : 分析対象の各産業の総中間投入額と産業影響力の関係。

5.3 クラスタリング

次に、Endowment vector に対して、k-meansを用いたクラスタリングを行った。クラスタリングの結果をTable 5に示す。クラスタリング数は、エルボー法や実行結果を参考とした上で16に設定した。実装にあたってはSVMと同じくscikit-learnを利用している。

Table 5 : クラスタリング結果一覧.

	Country	Sector	Country	Sector	
1	DEU	Basic Metals and Fabricated Metal	9	PRC	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing
	DEU	Transport Equipment		DEU	Food, Beverages and Tobacco
	MEX	Electrical and Optical Equipment		DEU	Chemicals and Chemical Products
2	BEL	Chemicals and Chemical Products		KOR	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel
	CAN	Rubber and Plastics		TAP	Electrical and Optical Equipment
	DEU	Rubber and Plastics		USA	Food, Beverages and Tobacco
	ESP	Chemicals and Chemical Products		USA	Rubber and Plastics
	FRA	Chemicals and Chemical Products		USA	Basic Metals and Fabricated Metal
	GBR	Chemicals and Chemical Products		10	CAN
	IDN	Food, Beverages and Tobacco	CAN		Renting of M&Eq and Other Business Activities
	IND	Hotels and Restaurants	PRC		Other Non-Metallic Mineral
	IRL	Chemicals and Chemical Products	PRC		Wholesale Trade and Commission Trade
ITA	Chemicals and Chemical Products	DEU	Financial Intermediation		
MEX	Chemicals and Chemical Products	DEU	Renting of M&Eq and Other Business Activities		
3	PRC	Basic Metals and Fabricated Metal	ESP		Renting of M&Eq and Other Business Activities
	NLD	Chemicals and Chemical Products	FRA		Renting of M&Eq and Other Business Activities
	4	AUT	Basic Metals and Fabricated Metal		GBR
AUT		Machinery, Nec	GBR		Renting of M&Eq and Other Business Activities
BEL		Basic Metals and Fabricated Metal	IRL	Financial Intermediation	
CZE		Machinery, Nec	JPN	Renting of M&Eq and Other Business Activities	
DEU		Pulp, Paper, Paper , Printing and Publishing	NLD	Renting of M&Eq and Other Business Activities	
ESP		Basic Metals and Fabricated Metal	USA	Wholesale Trade and Commission Trade	
FRA		Basic Metals and Fabricated Metal	USA	Post and Telecommunications	
FRA		Machinery, Nec	11	AUT	Transport Equipment
ITA		Basic Metals and Fabricated Metal		CZE	Basic Metals and Fabricated Metal
NLD		Basic Metals and Fabricated Metal		CZE	Transport Equipment
POL		Basic Metals and Fabricated Metal		ESP	Transport Equipment
SWE	Basic Metals and Fabricated Metal	FRA		Transport Equipment	
TUR	Basic Metals and Fabricated Metal	GBR		Basic Metals and Fabricated Metal	
5	BEL	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		HUN	Transport Equipment
	CAN	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		ITA	Transport Equipment
	ESP	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		NLD	Transport Equipment
	FRA	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		POL	Transport Equipment
	GBR	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		SVK	Transport Equipment
	ITA	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel	TUR	Transport Equipment	
	NLD	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel	12	PRC	Electrical and Optical Equipment
	USA	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel		13	CAN
6	BRA	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	PRC		Textiles and Textile Products
	CAN	Pulp, Paper, Paper , Printing and Publishing	PRC		Chemicals and Chemical Products
	CAN	Other Community, Social and Personal Services	PRC		Renting of M&Eq and Other Business Activities
	PRC	Rubber and Plastics	DEU		Machinery, Nec
	FRA	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	14		AUS
	IDN	Textiles and Textile Products		DEU	Electrical and Optical Equipment
	IND	Basic Metals and Fabricated Metal		MEX	Mining and Quarrying
	ITA	Textiles and Textile Products		USA	Public Admin and Defence; Compulsory Social Security
	JPN	Textiles and Textile Products		15	AUS
	JPN	Chemicals and Chemical Products	CAN		Basic Metals and Fabricated Metal
	JPN	Rubber and Plastics	CAN		Machinery, Nec
	JPN	Other Non-Metallic Mineral	CAN		Electrical and Optical Equipment
	KOR	Textiles and Textile Products	CAN		Transport Equipment
	KOR	Chemicals and Chemical Products	GBR		Transport Equipment
	MEX	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	IND		Manufacturing, Nec; Recycling
	NLD	Food, Beverages and Tobacco	ITA		Machinery, Nec
	TAP	Chemicals and Chemical Products	JPN		Basic Metals and Fabricated Metal
USA	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	JPN	Machinery, Nec		
USA	Pulp, Paper, Paper , Printing and Publishing	JPN	Transport Equipment		
USA	Other Community, Social and Personal Services	KOR	Machinery, Nec		
MAL	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel	KOR	Electrical and Optical Equipment		
7	JPN	Electrical and Optical Equipment	KOR	Transport Equipment	
	KOR	Basic Metals and Fabricated Metal	KOR	Water Transport	
	USA	Mining and Quarrying	MEX	Basic Metals and Fabricated Metal	
	USA	Machinery, Nec	MEX	Transport Equipment	
	USA	Electrical and Optical Equipment	TAP	Basic Metals and Fabricated Metal	
	USA	Financial Intermediation	TAP	Machinery, Nec	
	USA	Renting of M&Eq and Other Business Activities	TAP	Transport Equipment	
8	AUT	Electrical and Optical Equipment	16	USA	Manufacturing, Nec; Recycling
	CZE	Electrical and Optical Equipment		MAL	Electrical and Optical Equipment
	FRA	Electrical and Optical Equipment		PRC	Mining and Quarrying
	GBR	Electrical and Optical Equipment		PRC	Machinery, Nec
	HUN	Electrical and Optical Equipment		PRC	Transport Equipment
	ITA	Electrical and Optical Equipment		USA	Chemicals and Chemical Products
	POL	Electrical and Optical Equipment		USA	Transport Equipment

注釈) Wholesale Trade and Commission TradeはMotor Vehicles and Motorcycles を除く。

6 考察

まず、Table 3 に示したクラス分類の結果から、本稿で獲得した Endowment vector は、各産業の特徴が一定程度含意されていることが判明した。すなわち、学習に関係するパラメータには各産業の産出額や地域は含まれていないため、このクラス分類の結果は、本アプローチの有効性が示されたものとして捉えられる。

そして、クラスターリングの結果についても、クラス分類の結果と同様に、産業の特徴が含意される結果が示された。学習に関係するパラメータに産業分類は含まれていないが、Table 5 から確認出来る通り、同一の産業が同一のクラスターとして検出される傾向が見られた。以上の結果は、Endowment vector がノードである各産業の特徴を含意していることを示しており、したがって、本稿で用いたアプローチの有効性が示されたものと言えよう。

次に、産業影響力指標の結果からは、ドイツの輸送用機器産業が最も影響力の大きい産業として抽出される結果となった。これは、取引額の大きな産業に分析を限定したことと、分析に用いた ADB-MRIO のデータは EU 諸国が多数を占めることから、EU の産業リンケージの緊密さが現れた結果であると解釈出来る。しかしながら、一方で非 EU 国家である中国やアメリカ合衆国の複数の産業が影響力の大きな産業の上位として多数抽出されたことから、ここでの結果は、この二国が有する国際産業リンケージにおける影響力の大きさを示唆していると考えられる。

更に、Fig. 1 の総中間投入額と産業影響力の関係性に関する結果及び両者の相関係数算出の結果から、総中間投入額が大きい産業ほど、大きな影響力を持つ傾向にあることが確認された。この結果は一般的結果として捉えられるが、本アプローチの妥当性を示す結果と捉えることも出来るであろう。

7 結論と今後の課題

本稿では、Graph Embedding 手法を用いて、国際産業連関表に基づき、国際産業リンケージの特徴と産業の異質性を含意した Endowment vector を獲得し、その Endowment vector を用いる形で、国際産業リンケージに大きな影響力を持つ産業を抽出した。更に、本稿の結果から得られるインプケーションとして、アメリカ合衆国と中国の国際産業リンケージにおける影響力の大きさが示唆された。

そして、Endowment vector を用いたクラス分類とクラスターリングの結果からは、本稿で得た Endowment vector は国際産業リンケージの特徴を潜在的に有していることが示され、本研究のアプローチの有効性が示された。

本研究の分析においては、取引額の大きさと、投入と産出という非対称な関係性については捨象している。しかし、投入と産出という非対称な関係性は、グラフ理論の枠組みにおいては有向性として捉えられ、それだけでなく、取引額は重み付けという重要な特徴を有している。したがって、今後の課題としては、産業連関表に対する分析のための拡張として、重みと有向性を考慮可能となるような Graph Embedding 手法へと、本稿でのアプローチを発展させることが挙げられる。

謝辞

千葉大学小林弘明教授には本研究に関する有益な助言を頂いた。ここに謝意を表す。また、本研究は JSPS 科研費 17H03875 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Cerina F, Zhu Z, Chessa A, Riccaboni M : World Input-Output Network : PLoS ONE, **10-7**, e0134025 (2015)
- 2) Florian Blöchl, Fabian J. Theis, Fernando Vega-Redondo, and Eric O’N. Fisher : Vertex centralities in input-output networks reveal the structure of modern economies : Physical Review E, **83-4**, 046127 (2011)
- 3) Zuzanna Kosowska-Stamirowska : Network effects govern the evolution of maritime trade : PNAS, **117-23**, 12719/12728 (2020)
- 4) Guan J, Xu X, Wu S, Xing L : Measurement and simulation of the relatively competitive advantages and weaknesses between economies based on bipartite graph theory : PLoS ONE **13-5**: e0197575 (2018)
- 5) Bryan Perozzi, Rami Al-Rfou, Steven Skiena : DeepWalk: Online Learning of Social Representations : Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, 701/710 (2014)
- 6) Aditya Grover, Jure Leskovec : node2vec: Scalable Feature Learning for Networks : ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD) (2016)
- 7) Jian Tang, Meng Qu, Mingzhe Wang, Jun Yan, Qiaozhu Mei : LINE: Large-scale Information Network Embedding : WWW '15: Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web, 1067/1077 (2015)
- 8) González Ordiano J.Á., Finn L., Winterlich A., Moloney G., Simske S. : A Method for Estimating Driving Factors of Illicit Trade Using Node Embeddings and Clustering : Pattern Recognition. MCPR 2020. Lecture Notes in Computer Science, **12088**, 231/241 (2020)
- 9) Kobby Panford-Quainoo : Bilateral Trade Modeling with Graph Neural Networks ilateral trade : Practical ML for Developing Countries Workshop, ICLR 2020 (2020)
- 10) <https://www.ide.go.jp/Japanese/Data/Io.html>
- 11) <http://www.wiod.org/home>
- 12) Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G. J. : An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: the Case of Global Automotive Production : Review of International Economics, **23**, 575/605 (2015)
- 13) <http://www.wiod.org/otherdb>
- 14) Yuan Y., Alabdulkareem A., Pentland A : An interpretable approach for social network formation among heterogeneous agents : Nature communications, **9-4704** (2018)
- 15) <https://github.com/yuany94/endowment>
- 16) Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, Jake Vanderplas, Alexandre Passos, David Cournapeau, Matthieu, Brucher, Matthieu Perrot, Édouard Duchesnay : Scikit-learn: Machine Learning in Python : Journal of Machine Learning Research, **12**, 2825/2830 (2011)