

# ベイジアンネットワークを用いた高齢者の社会参加の因果関係の探索

○山中宏幸 田口尚樹 中井豊 (芝浦工業大学)

## Searching for causal relationships of elderly social participation by Bayesian networks

\* Hiroyuki.Yamanaka Naoki.Taguchi Yutaka.Nakai (Shibaura Institute of Technology)

**概要一** 社会参加によって社会関係保障費の削減が期待できる。また、社会参加において個人の属性や生活スタイルなどの様々な要因が関係していることが指摘されている。本稿では、アンケート調査を分析することにより社会参加の発生機序を明らかにし、社会参加の障害となっている問題を特定することで高齢者の社会保障関係費の削減に寄与することを目的とする。

**キーワード:** 社会保障関係費 社会参加 ベイジアンネットワーク

### 1. 研究背景・目的

今日の日本において、高齢化の進行に伴う医療費や介護費等の社会保障関係費の増加は国の財政に大きな負担となっている。特に医療費・介護費の増加は著しく、2012年度では35.1兆円・8.4兆円が2025年度には54兆円・19.8兆円になると見込まれている。これらの費用の削減は急務であるが、現在の国の施策である自己負担率の増加などでは根本的な解決になっていない。超高齢化社会を間近に控えている日本では戦略的な対策が必要である。

社会参加によって、健康維持や認知症のリスクの減少などが認められている。これらは直接的に医療費・介護費に関係する。社会参加の活性化により、間接的に社会保障関係費の削減につながることは多数の文献でも指摘されている。また、社会参加において、個人の属性・親族や知人関係・運動などとの関係が多数の先行研究において指摘されている。しかしながら、現時点において社会参加の発生機序は明らかになっていない。これらを解明することにより、社会参加の障害となっている問題を特定し、適切な順序でアプローチをすることが可能になると考えられる。

本稿では、高齢者の社会参加メカニズムを男女での違いに着目し、分析・可視化することを目的とする。アンケート調査を用いて社会参加と様々な要因を抽出し、それらの因果関係を探索する。手法として、確率的なネットワークとしてモデル化することができるベイジアンネットワークを用いることにする。

### 2. ベイジアンネットワーク

#### 2.1 ベイジアンネットワークとは

ベイジアンネットワークは、因果関係を確率により記述するグラフィカルモデルの1つで、複雑な因果関係の推論を有向非巡回グラフ構造により表すとともに、個々の変数の関係を条件つき確率で表す確率推論のモデルである。不確実性を含む事象の予測や意思決定、具体的には、疾病の診断や消費者行動のモデリングなど、分野を問わず幅広く応用されている手法である。

グラフィカルモデルとは、グラフが確率変数間の条件つき依存構造を示しているような確率モデルである。グラフを構成する確率変数  $X = X_1, \dots, X_n$  をノード (node) と呼ぶ。ノード同士の確率的な依存関係は、アーク (arc) と呼ばれる矢印で結ばれることによって表現される。原因を示すノード  $X_1$  と、 $X_1$  の結果のノード  $X_2$  の関係を  $X_1 \rightarrow X_2$  と表現し、条件つき確率を用

いて  $P(X_2|X_1)$  と表記する。アークの元になるノードを  $X_2$  にとつての親ノード、アークの先になるノード  $X_2$  を  $X_1$  にとつての子ノードと呼ぶ。またベイジアンネットワークは、閉路をもたない有向非循環グラフ (directed acyclic graph: DAG) として表される。例として、ノード  $X = X_1, X_2, X_3$  で構成されたベイジアンネットワークを Fig. 1 に示す。グラフを構成する確率変数が互いに独立であるとき、同時確率分布をベイズの定理を用いて確率変数の条件つき確率の積で表現することができる。Fig. 1 の場合、それぞれの確率変数の依存関係は条件つき確率を用いて、 $X_2$  については  $P(X_2|X_1)$ 、 $X_3$  については  $P(X_3|X_2)$  と定義される。したがって、Fig. 1 のベイジアンネットワークにおける確率変数の同時分布は、以下のように表現することができる。

$$P(X_1, X_2, X_3) = P(X_3|X_1, X_2)P(X_2|X_1)P(X_1)$$

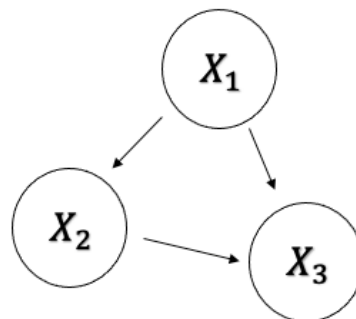


Fig. 1 ベイジアンネットワークの例

#### 2.2 ベイジアンネットワークのモデル構築

ベイジアンネットワークのモデル構築は、大きく分けて構造学習とパラメータ推定に分けられる。本稿では、Rのパッケージである `bnlearn` を用いる。

構造学習のアルゴリズムでは、スコアベースの一つである山登り法 (Greedy Hill-Climbing) を用いる。山登り方とは、現在の解の近傍の中で最も成績の良い解を近傍解として選び、「現在の解より近傍解の成績の方が良い場合」に近傍解と現在の解を入れ換える局所探索法の方法である。極値を見つけ出すことがゴールであり、極値を見つけ出したら探索終となる。局所探索法の最も単純かつ代表的なものであり、しばしば用いられる。

構造学習によってベイジアンネットワークのグラフ

構造を構築した後、条件付き確率表を推定するパラメータ推定が行われる。

パラメータ推定の方法には、最尤推定 (maximum likelihood parameter estimation) とベイズ推定 (Bayesian parameter estimation) がある。本稿では、ガウス分布を用いたので最尤推定を採用することとする。

### 2.3 事前情報について

ベイジアンネットワークの構造学習では、専門家の知見や事前に明らかになっている因果関係を事前情報としてモデルに組み込むことができる。社会参加を例とすると、確率変数として、性別、年齢、収入、配偶者の有無、社会参加経験の有無を確率変数とする。このような場合、収入→性別といった収入から性別に影響を与えるということは考えにくい。そのため、構造学習の際に収入→性別のアーキが出現しないように制約条件を加えることが可能である。これによってより現実的なモデル構築が可能になり、解釈が容易になる。

### 2.4 モデル平均化とアーキ間の関係

ベイジアンネットワークの構築において、モデル平均化を行うことでより堅牢なモデルとなる。モデル平均化はブートストラップ法を用いて生成された複数の標本から、それぞれに対応した DAG を作成し、その平均をベイジアンネットワークとする手法である。以下のプロセスでベイジアンネットワークを構築する。

Step1) 学習データからブートストラップ法によってサブデータセット  $D_i (i = 1, \dots, M)$  を作成する。

Step2)  $M$  個のサブデータセット  $D_i$  それぞれに対して、構造学習アルゴリズム (山登り法) を用いて DAG を学習する。

Step3) DAG に出現したアーキの数  $m$  を記録し、 $m/M$  をアーキの出現割合 (arc strength) として算出する。また、そのアーキの向き (arc direction) として記録する。

Step4) アーキの出現割合が指定した閾値を上回るアーキを平均化 DAG として採用する。

DAG に出現したアーキ毎の出現割合を信頼性指標とし、その値が大きければ大きいほどアーキの信頼性が高いと評価する。また、アーキの向きは因果関係の方向を評価している。例として、表 2 のような場合を考える。 $X_1 \rightarrow X_2$  のアーキは  $X_1 \rightarrow X_3$  と比較して arc strength が大きいと、信頼性の高いアーキであると考えられる。一定以上の arc strength が存在するときに、有意であるとみなすことができる。この arc strength の値を閾値とする。なお、本稿で用いる閾値は bnlearn で自動推定されたものを採用することとする。また、 $X_1 \rightarrow X_2$  のアーキは arc direction が 1.00 であり、 $X_2 \rightarrow X_1$  は 0.00 であるため、完全に  $X_1 \rightarrow X_2$  の因果関係が成立している。反対に、 $X_1 \rightarrow X_3$  のアーキは arc direction は 0.60 であり、 $X_3 \rightarrow X_1$  は 0.40 であることから  $X_1 \rightarrow X_3$  の因果関係が強いが、 $X_3 \rightarrow X_1$  の因果関係も認められる。

Table 1 arc strength と arc direction の例

from	to	arc strength	arc direction
$X_1$	$X_2$	1.00	1.00
$X_1$	$X_3$	0.73	0.60
$X_2$	$X_1$	1.00	0.00
$X_2$	$X_3$	0.03	1.00
$X_3$	$X_1$	0.73	0.40
$X_3$	$X_2$	0.03	0.00

## 3. データと変数

### 3.1 アンケートデータ

本稿では、世田谷区在住の 60 歳-69 歳の男女 500 人を対象にインターネット上でアンケート調査を行った。各年齢・性別毎に 25 人ずつで標本は対称である。調査期間は 2020 年 12 月 2 日から 2020 年 12 月 7 日であり、主に新型コロナウイルスの流行前(2020 年 2 月以前)について調査した。

### 3.2 変数

使用した変数について Table 2 にまとめている。値は 1 か 0 の 2 値で設定した。また、未記入、わからない、その他を選択している回答は削除し、男女合計で 337 のサンプル数で分析を行う。収入や友人の数などの比例尺度の変数は、論文調査<sup>4)</sup>と経験的知識により設定した。

Table 2 変数

変数	内容	値	該当者
SEX	性別	1:男性	175
		0:女性	162
Invited	社会参加活動に誘われたことがあるか	1:はい	71
		0:いいえ	266
Join	社会参加活動に参加したことがあるか	1:はい	123
		0:いいえ	214
Start_Living	世田谷区にいつから住み始めたか	1:40歳以上から	114
		0:39歳以下から	223
Education	学歴	1:大卒以上	217
		0:大卒未満	120
Income	年収	1:350万円以上	151
		0:350万円未満	186
Working	働いているか	1:はい	138
		0:いいえ	199
Go_Out	外出習慣	1:週2日以上	312
		0:週1日以下	25
Partner	配偶者の有無	1:いる	249
		0:いない	88
Children	子供の有無	1:いる	237
		0:いない	100
Friends	友人・知人の数	1:10人以上	179
		0:10人以下	158
Neighborhood	近所(徒歩10分以内)に友人・知人は住んでいるか	1:はい	194
		0:いいえ	143

## 4. 高齢者の社会参加モデル

### 4.1 男女全体

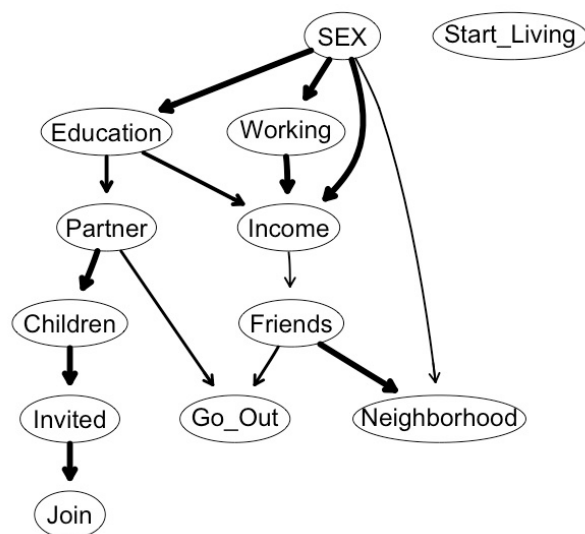


Fig. 2 男女のベイジアンネットワーク

Table 3 男女のブラックリスト一覧

No.	from	to	No.	from	to
1	Education	SEX	27	Friends	Working
2	Working	SEX	28	Neighborhood	Working
3	Income	SEX	29	Invited	Working
4	Start_Living	SEX	30	Join	Working
5	Children	SEX	31	Start_Living	Income
6	Go_Out	SEX	32	Children	Income
7	Partner	SEX	33	Go_Out	Income
8	Friends	SEX	34	Partner	Income
9	Neighborhood	SEX	35	Friends	Income
10	Invited	SEX	36	Neighborhood	Income
11	Join	SEX	37	Invited	Income
12	Working	Education	38	Join	Income
13	Income	Education	39	Invited	Start_Living
14	Start_Living	Education	40	Join	Start_Living
15	Children	Education	41	Invited	Children
16	Go_Out	Education	42	Join	Children
17	Partner	Education	43	Invited	Go_Out
18	Friends	Education	44	Join	Go_Out
19	Neighborhood	Education	45	Invited	Partner
20	Invited	Education	46	Join	Partner
21	Join	Education	47	Invited	Friends
22	Income	Working	48	Join	Friends
23	Start_Living	Working	49	Invited	Neighborhood
24	Children	Working	50	Join	Neighborhood
25	Go_Out	Working	51	Join	Invited
26	Partner	Working			

男女 337 人に対して実際に Fig. 2 のベイジアンネットワークを構築した。

事前情報として、Table 3 のアークをブラックリストとして設定し、制限した。これは経験則からして明らかにおかしい因果関係とアークを制限せずに構築したベイジアンネットワークから因果関係がおかしいものを排除する形で設定した。

本稿において、「社会参加」を表す変数として「Join」を用いる。

社会参加へのメインパスとしては、性別→学歴→配偶者の有無→子供の有無→誘われたか→社会参加とな

っている。性別において学歴が関係しているのは、大学進学率を一つの基準とすると男性の場合は 1984 年が約 36%に対して女性の場合は 1984 年が約 13%と性別によって調査対象者の大学進学率に大きな差があることが考えられる。また、配偶者の有無や友人の有無は外出習慣に影響を与えている。外出による運動や活動は生活機能維持においても効果が認められている。子供の有無によって誘われたかどうかに影響を与えているのは、地域コミュニティにおいて子供を介した付き合いというものによってと考えられる。しかしながら、子供が小学生頃に到達する 40 歳を境に設定した住み始めた時期は独立した。どの要素にもアークの信頼度は低く、社会参加において住み始めた時期は重要でないように考える。

Table 4 男女のアーク間の関係

from	to	arc strength	arc direction
Invited	Join	1	1
Education	Income	0.83	1
Education	Partner	0.81	1
Income	Friends	0.65	1
Working	Income	1	1
Go_Out	Partner	0.7	0.23928571
Go_Out	Friends	0.735	0.28911565
Partner	Join	0.495	1
Partner	Go_Out	0.7	0.76071429
Partner	Children	1	0.86
Children	Invited	0.97	1
Children	Partner	1	0.14
Friends	Go_Out	0.735	0.71088435
Friends	Neighborhood	1	0.7225
Neighborhood	Invited	0.5	1
Neighborhood	Join	0.485	1
Neighborhood	Friends	1	0.2775
SEX	Join	0.5	1
SEX	Education	1	1
SEX	Income	1	1
SEX	Working	1	1
SEX	Neighborhood	0.515	1

次に、弱い関係ではあるが無視できないアークについて言及する。これらについては、今回の分析では有意とはされていないが、サンプル数を増やすことによって有意と認められる見込みがある。Fig.2 のベイジアンネットワークでは arc strength の閾値を 0.525 より大きいと設定した。Table 4 では閾値が 0.4 以上となったアークをまとめたものである。近所に友人が住んでいるかは誘われることと社会参加に閾値にかなり近い値であり、重要であると考えられる。実際に、記述統計の分析では有意であるとみなせた。

Table 5 男女のパラメーター一覧

目的変数/説明変数	SEX	Invited	Join	Start_Living	Education	Income	Working	Go_Out	Partner	Children	Friends	Neighborhood	(Intercept)	残差標準偏差
SEX														
Invited										0.2000422			0.07	0.3986069
Join			0.5546966										0.2481203	0.4262418
Start_Living													0.3382789	0.4738275
Education	0.3722399												0.4506173	0.4425621
Income	0.3448973				0.1597167		-0.3339551							0.3915929
Working	-0.3407055												0.5864198	0.4627123
Go_Out									0.10124218		0.08825142			0.2557588
Partner					0.2286098								0.5916667	0.4266581
Children									0.4750365				0.3522727	0.4075916
Friends						0.1775262							0.4516129	0.4926211
Neighborhood	-0.1598684										0.3175629		0.3386742	0.4666331

4.2 男性のみ

男性と女性では、生活様式や地域コミュニティへの参加の仕方も違う。特に寡夫の高齢者に関しては、そうでない者と比較して鬱の傾向が高い<sup>5)</sup>などと認められている。

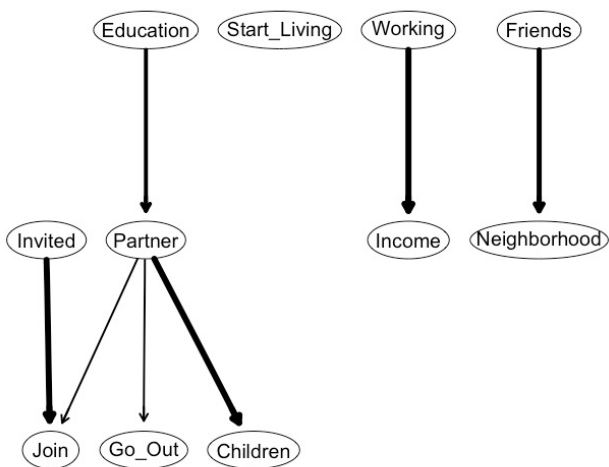


Fig. 3 男性のみのベイジアンネットワーク

Table 6 男性のみのブラックリスト一覧

No.	from	to	No.	from	to
1	Partner	Education	26	Invited	Go_Out
2	Go_Out	Education	27	Join	Go_Out
3	Start_Living	Education	28	Working	Start_Living
4	Children	Education	29	Income	Start_Living
5	Friends	Education	30	Invited	Start_Living
6	Neighborhood	Education	31	Join	Start_Living
7	Working	Education	32	Working	Children
8	Income	Education	33	Income	Children
9	Invited	Education	34	Invited	Children
10	Join	Education	35	Join	Children
11	Go_Out	Partner	36	Working	Friends
12	Start_Living	Partner	37	Income	Friends
13	Children	Partner	38	Invited	Friends
14	Friends	Partner	39	Join	Friends
15	Neighborhood	Partner	40	Working	Neighborhood
16	Working	Partner	41	Income	Neighborhood
17	Income	Partner	42	Invited	Neighborhood
18	Invited	Partner	43	Join	Neighborhood
19	Join	Partner	44	Income	Working
20	Start_Living	Go_Out	45	Invited	Working
21	Children	Go_Out	46	Join	Working
22	Friends	Go_Out	47	Invited	Income
23	Neighborhood	Go_Out	48	Join	Income
24	Working	Go_Out	49	Join	Invited
25	Income	Go_Out			

男性 175 人に対して Fig. 3 のベイジアンネットワークを構築した。

事前情報として Table 6 のアークをブラックリストとして設定し、制限した。

Fig. 3 を見ると男性の場合、社会参加をするには配偶者の影響が大きいことがわかる。また、配偶者は外出習慣にも影響を与えている。裏を言えば、配偶者のいない高齢独身男性は社会参加をすることが難しいともみて取れる。また、男性の場合は友人や近隣住民との関わりも社会参加へ影響を与えていない。これは男性の定年退職まで生活のほとんどが労働であることから地域コミュニティに入ることが難しいことと見受けられる。

Table 7 男性のみのアーク間の関係

from	to	arc strength	arc direction
Invited	Join	1	1
Education	Partner	0.89	1
Income	Working	0.985	0
Working	Income	0.985	1
Go_Out	Partner	0.59	0
Go_Out	Friends	0.455	1
Partner	Join	0.535	1
Partner	Income	0.525	1
Partner	Go_Out	0.59	1
Partner	Children	1	1
Friends	Income	0.425	1
Friends	Neighborhood	0.935	0.71925134
Neighborhood	Friends	0.935	0.28074866

閾値は arc strength が 0.525 より大きいものが採用されている。Table 7 では、閾値を 0.4 以上となったアークをまとめたものである。外出習慣がある人は友人の有無に影響を与えるなど男性においては、配偶者の存在が大きく関係することがみて取れる。

Table 8 にパラメータをまとめておく。

Table 8 男性のみのパラメータ一覧

目的変数/説明変数	SEX	Invited	Join	Start_Living	Education	Income	Working	Go_Out	Partner	Children	Friends	Neighborhood	(Intercept)	残差標準偏差
Invited										0.26550079			0.05882353	0.4119151
Join		0.0.45461964777986									0.1853164		0.2357147	0.4459706
Start_Living													0.345679	0.4770638
Education				0.1846361									0.3867925	0.4927968
Income					0.1428387		-0.2517342						0.2622687	0.3585647
Working													0.5864198	0.4940021
Go_Out													0.9259259	0.2627035
Partner													0.654321	0.4770638
Children									0.2830189				0.5	0.4472795
Friends													0.4691358	0.5005939
Neighborhood											0.3454712		0.3255814	0.4720966

4.3 女性のみ

女性 165 人に対して Fig. 4 のベイジアンネットワークを構築した。

事前情報として Table 9 のアークをブラックリストとして設定し、制限した。

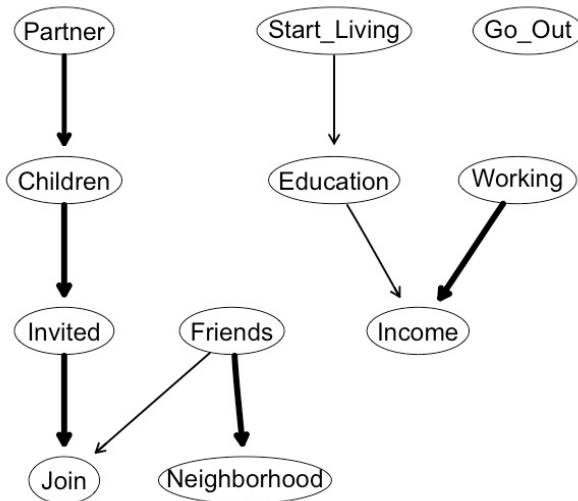


Fig. 4 女性のためのベイジアンネットワーク

Table 9 女性のためのブラックリスト一覧

No.	from	to	No.	from	to
1	Education	Start_Living	24	Friends	Working
2	Working	Start_Living	25	Neighborhood	Working
3	Income	Start_Living	26	Invited	Working
4	Go_Out	Start_Living	27	Join	Working
5	Partner	Start_Living	28	Go_Out	Income
6	Children	Start_Living	29	Partner	Income
7	Friends	Start_Living	30	Children	Income
8	Neighborhood	Start_Living	31	Friends	Income
9	Invited	Start_Living	32	Neighborhood	Income
10	Join	Start_Living	33	Invited	Income
11	Working	Education	34	Join	Income
12	Income	Education	35	Invited	Go_Out
13	Go_Out	Education	36	Join	Go_Out
14	Partner	Education	37	Invited	Partner
15	Children	Education	38	Join	Partner
16	Friends	Education	39	Invited	Children
17	Neighborhood	Education	40	Join	Children
18	Invited	Education	41	Invited	Friends
19	Join	Education	42	Join	Friends
20	Income	Working	43	Invited	Neighborhood
21	Go_Out	Working	44	Join	Neighborhood
22	Partner	Working	45	Join	Invited
23	Children	Working			

Fig. 4 を見ると、社会参加のメインパスとしては、配偶者の有無→子供の有無→誘われる→社会参加という流れになっている。また、友人の有無は社会参加と近所に友人が住んでいるかに影響を与える。Fig. 4 では arc strength の閾値を 0.525 より大きいものとして設定している。

Table 10 女性のためのアーク間の関係

from	to	strength	direction
Invited	Join	0.995	1
Start_Living	Education	0.535	1
Education	Income	0.55	1
Working	Income	0.98	1
Go_Out	Friends	0.525	0.6666667
Partner	Children	0.91	0.7335165
Children	Invited	0.955	1
Children	Partner	0.91	0.2664835
Friends	Join	0.585	1
Friends	Go_Out	0.525	0.3333333
Friends	Neighborhood	0.985	0.6142132
Neighborhood	Friends	0.985	0.3857868

Table 10 は arc strength が 0.4 以上のものをまとめたものである。友人→近所に友人が住んでいるかの arc direction を見ると近所に友人が住んでいるか→友人の有無に約0.4の重みを見つけることができる。つまり、近所に友人が住んでいるかどうかは社会参加に間接的に影響を与えていることになる。子供の有無→友人の有無へも arc strength が 0.47 と比較的大きい。女性の友人関係は子供が幼少期の頃に知り合った、いわゆるママ友の影響が大きいのではないか。

Table 11 にパラメータをまとめておく。

Table 11 女性のみのパラメーター一覧

目的変数/説明変数	SEX	Invited	Join	Start_Living	Education	Income	Working	Go_Out	Partner	Children	Friends	Neighborhood	(Intercept)	残差標準偏差
Invited										0.26550079			0.05882353	0.4119151
Join		0.0454619									0.1853164		0.2357147	0.4459706
Start_Living													0.345679	0.4770638
Education				0.1846361									0.3867925	0.4927968
Income					0.1428387		-0.2517342						0.2622687	0.3585647
Working													0.5864198	0.4940021
Go_Out													0.9259259	0.2627035
Partner													0.654321	0.4770638
Children									0.2830189				0.5	0.4472795
Friends													0.4691358	0.5005939
Neighborhood											0.3454712		0.3255814	0.4720966

## 5. おわりに

社会参加を活性化させることによって社会保障関係費の削減を目標に、社会参加の発生機序をベイジアンネットワークを用いることにより明らかにした。特に配偶者や近所に友人・知人が住んでいるかなどが重要な要素であった。特に女性の場合はこの傾向が顕著であり、男性の地域コミュニティへの参加が障害となっていることが明らかだ。また、若年層や青年層では影響を与えていると考えられる収入や労働は高齢者になると無関係であり、定年退職をすることによって社会的地位が同等になると考えられる。

労働世代の頃の友人付き合いとは形が変わり、近隣とのネットワークが重要となる結果を得ることができた。主なターゲットとしては、独り身の男性と近所付き合いが希薄な女性へのアプローチが最優先だと考えられる。

具体的な施策としては、現在よりもより小地区単位での地域コミュニティの構築を進めるべきである。特に徒歩圏内の交友関係の活性化によって、社会参加の発生を見込める。また、子供を介した社会参加を見受けることができた。地域に直接的に参加させることよりも、子育てを通して地域に愛着を持たせることによって、社会参加を促すことができると考える。現在、男性の育児参加を奨励する動きが見られている。長期的な観点では、こういった施策の活性化により数十年後の社会参加状況は改善されるのではないか。

本稿では、ベイジアンネットワークを構築する際のサンプル数が337と非常に少なく、発展的なベイジアンネットワークの構築が難しかった。より多くのサンプル数を用意することによって、連続変数を取り入れることや、より複雑なモデルを構築することが期待される。

しかしながら、社会参加へのメカニズムはベイジアンネットワークに表現されており、このテーマにおいての可能性を示したものであると感じる。この研究を基により大規模な調査を行った場合でも、結果を期待できるので、本稿が次のステップへの踏み台となることを期待する。

## 参考文献

- 1) <https://www.mhlw.go.jp/wp/yosan/yosan/20syokanyosan/index.html>
- 2) <https://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180409004/201804090.html>
- 3) 佐々木, 岡田: ベイジアンネットワークへの役割期待, オペレーションリサーチ学会誌, 3/7 (2020)
- 4) 地方独立行政法人 東京都健康長寿医療センター: 介護予防につながる社会参加活動等の事例の分析と一般介護予防事業へつなげるための実践的手法に関する調査研究事業, 1/224 (2019)
- 5) Mechakra-tahiri SD, Zunzunegui MV, preville M, Dube M: Gender, social relationships and depressive disorders in adults aged 65 and over in Quebec, (2010)