土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.67, No.5 (土木計画学研究・論文集第28巻), I_399-I_406, 2011.

高齢者を含む社会的ネットワークにおける情報交換から得られる知識の性質

大窪 和明[1]・奥村 誠[2]

[1]正会員　東北大学助教 東北アジア研究センター（〒 980-8576 仙台市青葉区川内 41）
E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp
[2]正会員　東北大学教授 東北アジア研究センター（〒 980-8576 仙台市青葉区川内 41）
E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

本研究では高齢者を含んだ社会的ネットワークにおける情報交換によって得られる知識の性質を明らかにする．具体的には，高齢者が経験を通じて知識を得る過程をモデル化し，さらに若年者との情報交換後に各エージェントが得られる知識の性質を明らかにする．はじめに，過去の経験から現在の初期信念が形成された場合には，多くの既存研究で用いられている初期信念の平均値が真の状態に等しいという仮定が成立しない場合があることを示す．高齢者と若年者が情報を交換することによって，初期信念の平均値と真の状態との間に生じた差異が調整されることを示す．さらに，調整された知識によって，高齢者と若年者が望ましい意思決定をするための条件を示す．

Key Words : *social network, information exchange, aging society*

1.　はじめに

近年，高齢者の社会的な孤立が問題となる中で，高齢者を含んだ社会的ネットワークに関心が集まり，様々な現状分析がなされている[1),2)]．また高齢者同士の支援や援助といった社会的ネットワークの機能に関する研究も進み[3)]，高齢者の役割に対して期待が高まっている．例えば農林水産省が行った“地域農業・社会における高齢者の役割に関する意向調査”[4)]からは，高齢者の農業の経験から得られる情報に対して多くの農業従事者が期待していることがわかる．農業のように種まきから収穫までの期間が長いものでは，若年者よりも高齢者の方が多くの経験が蓄積されていることが多く，豊かな知識を持っている可能性が高い．しかし，一方では時代による変化とともに，高齢者の持つ知識を活かさないほうが良い場合もある．本研究では，高齢者が過去の経験を基に情報を蓄積し，若年者と社会的ネットワークを通じて情報を交換した結果，得られる知識の性質を明らかにすることを目的とする．

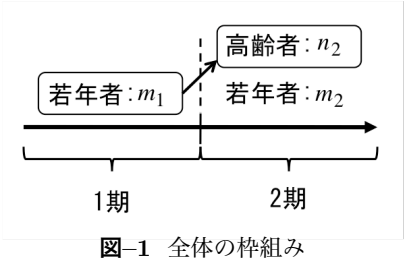
近年の“集団の知恵”への関心の高まり[5)]とともに，社会的ネットワークを通じた情報交換に関する研究が進んでいる[6)]．社会的ネットワークを通じた情報交換を扱った先駆的な研究である DeGroot[7)]のモデルが見直され，様々な研究がなされてきた (Demarzo et al.[8)], Goulb and Jackson[9)], Jadbabie et al.[10)], Acemoglu et al.[11)])．例えば，Goulb and Jackson では，社会的ネットワークを通じて情報交換が行われたときに，人々の信念が真の状態に達する条件を示している．また Acemoglu et al. では，誤った情報が広まる原因として，周りの人の情報に適応しにくいという特徴を持つエージェント (以下，Forceful Agent) の存在を考え，その影響を分析している．これらの研究では，情報交換の前にエージェントが持つ初期信念に関して全てのエージェントで平均したものが真の状態に等しい，という仮定をおいていることがほとんどである．しかし，この仮定が成立する条件については調べられていない．本研究では，エージェントの過去の経験から現在の初期信念が形成された場合にはこの仮定が必ずしも成立せず，平均値誤差が生じることを明らかにする．

また Acemoglu et al. においては Forceful agent という異質なエージェントは常に誤った情報を導くと仮定している．しかし現実には，新しい情報に適応しにくい高齢者の情報が役に立つ場合は多い．本研究では高齢者を含む情報交換構造の理論的な性質を明らかにした上で，若年者と高齢者という 2 種類の異質なエージェントが存在することによって，初期信念の平均値誤差を修正し，各エージェントが望ましい意思決定をするのに十分な知識を得ることができる条件を提示する．

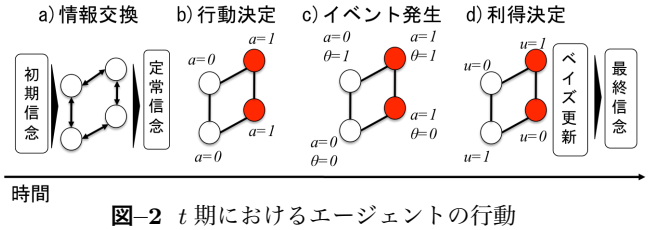
2.　モデルの定式化

(1)　状況設定

本研究では**図–1** に示すような 2 期間モデルを考える．1 期目には m_1 人の若年者のみが存在し，これらの全て



図–1 全体の枠組み



図–2 t 期におけるエージェントの行動

が 2 期目の高齢者になるとする ($m_1 = n_2$)．2 期目のはじめには，1 期目からの高齢者に加えて，新たに m_2 人の若年者が社会的ネットワークに加わるとして，各期のエージェント総数を N_t で表す ($t \in \{1, 2\}$)．

t 期におけるエージェントの行動を**図–2** に示す．t 期において農作物の病気や害虫の発生などのイベントがエージェントごとに確率的に発生するが，各エージェントはイベントの真の発生確率を知らないものとする．各エージェントはイベントがどれくらいの確率で起こるかについての主観的確率 (信念) を持ち，それに従って病気や害虫を予防する薬を事前に準備するなどの行動 $a_{i,t}$ を行う．各エージェントは行動を決定する前に近隣のエージェントと情報交換を行って自らの信念を調整し，信念が変化しなくなる定常信念に到達するまで十分な回数の調整を行うことができる．各エージェントがこの定常信念に基づいて行動を決めた後，各エージェントが観測不可能な真の発生確率に従ってイベントが発生し，利得が決定する．このイベントが発生した状態を $\theta_{i,t} = 1$，発生しなかった状態を $\theta_{i,t} = 0$ と表現する．各エージェントは，得られた利得を基に，自らの定常信念をベイズ更新して今期の最終信念とし，それが次期の初期信念として用いられることになる．以下では**図–2** の流れに従ってモデルの詳細を説明する．

(2) エージェントの行動の定式化

a) 情報交換の定式化

はじめに各エージェントはイベントが起きる確率 $Pr(\theta_{i,t} = 1)$ に関する初期信念を基に情報交換を行う．情報交換は社会的ネットワークでつながった他のエージェントの信念に重みをつけて足し合わせた平均の値に合わせるように自らの信念を調整することで表現する．具体的には，t 期中の k 回目の情報交換による調整後のエージェントの信念を，

$$\mathbf{p}_t(k) = \begin{bmatrix} p_{1,t}(k) & p_{2,t}(k) & \cdots & p_{N_t,t}(k) \end{bmatrix} \tag{1}$$

と定義する．式 (1) の $p_{1,t}(k), p_{2,t}(k), \cdots, p_{n_t,t}(k)$ は高齢者の信念を表し，$p_{n_t+1,t}(k), \cdots, p_{N_t,t}(k)$ は若年者の信念を表す．情報交換により，

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_t(k) &= \mathbf{W}_t \mathbf{p}_t(k-1) \\ &= (\mathbf{W}_t)^k \mathbf{p}_t(0) \end{aligned} \tag{2}$$

が成立する．各期において式 (2) が定常状態に達するまで十分な回数の情報交換が行われて，定常信念に到達した後にエージェントは行動を決定すると仮定する．ここで $\mathbf{W}_t$ は非負の要素を持つ t 期の情報交換行列であり，情報交換によって信念を調整するときに社会的ネットワークで繋がったエージェントに付ける重みとする．$\mathbf{W}_t$ は，

$$\mathbf{W}_t = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{ff,t} & \mathbf{W}_{fr,t} \\ \mathbf{W}_{rf,t} & \mathbf{W}_{rr,t} \end{pmatrix} \tag{3}$$

とする．ただし，添え字の r は若年者を表し，信念の調整において標準的なエージェント (Regular Agent) であるとする．また添え字の f は高齢者を表し，他のエージェントの意見を反映しにくい Forceful Agent とする．$\mathbf{W}_{ff,t}(n_t \times n_t)$ は高齢者から高齢者へ，$\mathbf{W}_{fr,t}(n_t \times m_t)$ は若年者から高齢者へ，$\mathbf{W}_{rf,t}(m_t \times n_t)$ は高齢者から若年者へ，$\mathbf{W}_{rr,t}(m_t \times m_t)$ は若年者から若年者への情報交換を表す行列である．このとき高齢者は若年者よりも新しい情報に適応しにくいことを考え，高齢者が他のエージェントにつける重み $w_{f,t}$ は若年者がつける重み $w_{r,t}$ よりも小さいとし，

$$[\mathbf{W}_{ff,t}]_{i,j} \leq [\mathbf{W}_{rr,t}]_{j,i} \tag{4}$$

とする．ただし $[\mathbf{A}]_{i,j}$ は行列 $\mathbf{A}$ の $\{i, j\}$ 成分を表す．

既存の研究 (DeGroot, Demarzo et al. Goulb and Jackson など) にならい，各エージェントが他のエージェントにつける重みの和を 1 とするため，$\mathbf{W}_t$ の i 行，j 列目の要素 $[\mathbf{W}_t]_{i,j}$ は，

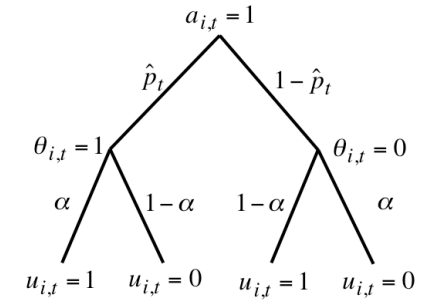
$$\sum_{j=1}^{n_t+m_t} [\mathbf{W}_t]_{i,j} = 1 \tag{5}$$

とする．全てのエージェントが少なくとも 1 人のエージェントと情報交換を行っているとし，$\mathbf{W}_t$ は強連結な情報交換行列を考える．情報交換行列が強連結である場合，Goulb and Jackson によって次の命題が示されている．

命題 1(Goulb and Jackson(2009)) $\mathbf{W}_t$ が強連結な行列であるとき，次の 3 つの性質は等価である．

(a) $\mathbf{W}_t$ は収束する．

(b) $\mathbf{W}_t$ は非周期的である．



図–3 行動と利得の関係 ($a_{i,t}=1$)

(c) $\mathbf{W}_t$ の固有値 1 に対応した唯一の左固有ベクトル $\mathbf{s}_t$ が存在し， 次の性質を満たす

$$\lim_{k\to\infty}(\mathbf{W}_t)^k\mathbf{p}_t(0)=\mathbf{s}_t\mathbf{p}_t(0)$$

b) 利得と行動の定式化

エージェント i は収束後の信念 $[\mathbf{p}_t(\infty)]_i$ を基にして t 期の利得 $u_{i,t}$ の期待値が最も大きくなるように行動 $a_{i,t}$ を決める．行動 $a_{i,t}$ は $\{0,1\}$ で表され，例えば行動 $a_{i,t}=1$ を選択した条件下で，イベントが発生する ($\theta_{i,t}=1$) と正の利得が発生しやすく，イベントが発生しなければ ($\theta_{i,t}=0$) 正の利得が発生しにくいと仮定する．これは農作物の害虫の予防のための薬の影響が強く，害虫が発生しなかった場合に農作物を痛めてしまうような場合を考えている．また農作物の害虫の予防に薬を使用した条件下で，害虫が発生したにも関わらず薬が効かない場合があることを考慮し，イベントの状態とエージェントの行動が一致したとき ($\theta_{i,t}=a_{i,t}$)，確率 α で利得が得られるとし，エージェント i の利得 $u_{i,t}(\theta_{i,t},a_{i,t})$ は，

$$u_{i,t}(\theta_{i,t},a_{i,t})=\begin{cases}1 & \text{with Prob. } \alpha\\ 0 & \text{with Prob. } 1-\alpha\end{cases} \tag{6}$$

とする．ここで確率 α はイベントの状態とエージェントの行動が一致したときの利得の発生しやすさを表し，$\alpha>1/2$ とする．式 (6) は行動と現在の状態が一致したとき ($\theta_{i,t}=a_{1,i}$)，確率 α で利得が 1 となることを意味している．逆に，農作物の予防に薬を使用していないときに，害虫が発生しても農作物が助かるという可能性を考えるため，イベントの状態と行動が一致していないとき ($\theta_{i,t}\neq a_{i,t}$) の利得を，

$$u_{i,t}(\theta_{i,t},a_{i,t})=\begin{cases}1 & \text{with Prob. } 1-\alpha\\ 0 & \text{with Prob. } \alpha\end{cases} \tag{7}$$

とする．式 (7) は行動と現在の状態が一致しないとき ($\theta_{i,t}\neq a_{1,i}$)，確率 $1-\alpha$ で利得は 1 となり， それ以外の確率 α のとき ($\theta_{i,1}\neq a_{i,1}$) に利得が 0 となることを示す．以上の行動，イベントの状態と利得の関係を図示すると，**図–3** のようになる．

t 期において高齢者 i が期待利得を最大化する行動は次の補題のようになる．

補題 1 t 期においてエージェント i の定常信念が $[\mathbf{p}_t(\infty)]_i$ であるとき，期待利得を最大化する最適な行動 $a^*_{i,t}$ は次のようになる．

$$a^*_{i,t}=\begin{cases}1 & \text{if } [\mathbf{p}_t(\infty)]_i>\dfrac{1}{2}\\ 0 & \text{if } [\mathbf{p}_t(\infty)]_i\leq\dfrac{1}{2}\end{cases} \tag{8}$$

式 (8) は状態 0 よりも状態 1 が起きやすいと考えている場合に行動 1 を選択し，逆に状態 0 が起きにくいと考えている場合には行動 0 を選択することを示す．

c) イベントの発生確率

各期におけるイベントはエージェントごとに独立に発生するとして，真の発生確率 $Pr(\theta_{i,t}=1)$ を，

$$Pr(\theta_{i,t}=1)=\hat{p}_t \tag{9}$$

とし，エージェントにとっては観測不可能な値とする．t 期にイベントが発生した ($\theta_{i,t}=1$) エージェントの数を l_t とおくと，大数の法則により，

$$\lim_{N_t\to\infty}\frac{l_t}{N_t}=\hat{p}_t \tag{10}$$

が成り立つ．

d) 利得の決定と定常信念のベイズ更新

式 (9) の真の発生確率に基づいてイベントが発生し，式 (6)，(7) に従って各エージェントの利得が決定した後，各エージェントは定常信念をベイズ更新して t 期の最終信念とする．具体的には．

$$[\mathbf{p}_{t+1}(0)]_i=\frac{h(u_{i,t}|\theta_{i,t}=1,a_{i,t})g(\theta_{i,t}=1)}{\sum_{j\in\{0,1\}}h(u_{i,t}|\theta_{i,t}=j,a_{i,t})g(\theta_{i,t}=j)} \tag{11}$$

ただし，

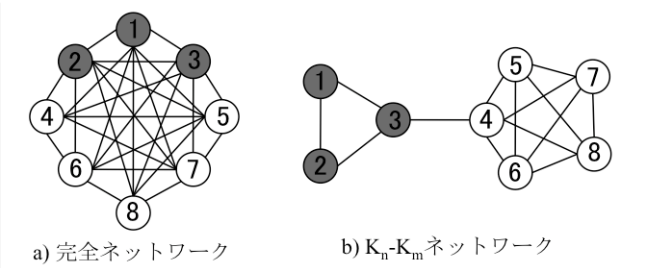
$$g(\theta_{i,t}=1)=[\mathbf{p}_t(\infty)]_i \tag{12}$$

$$g(\theta_{i,t}=0)=1-[\mathbf{p}_t(\infty)]_i \tag{13}$$

に従って信念を更新する．ただし，$h(u_{i,t}|\theta_{i,t}=1,a_{i,t})$ は状態 1，行動 $a_{i,t}$ のもとで $u_{i,t}$ をとる確率を表す関数である．$g(\theta_{i,t}=j)$ はエージェント i の定常信念によって表される状態 j の発生確率であり，エージェント i の行動と関係無く $\theta_{1,i}=1$ が決定するとすれば，式 (12),(13) のようになる．

t 期において式 (11) によってベイズ更新された最終信念は，$t+1$ 期の高齢者の初期信念として用いられる．具体的には，$t+1$ 期の全エージェントの初期信念

$$\mathbf{p}_{t+1}(0)=\begin{bmatrix}p_{1,t+1}(0) & \cdots & p_{n_f+1,t+1}(0) & \cdots & p_{N_{t+1},t+1}(0)\end{bmatrix}$$



図–4 社会的ネットワークの仮定

のうち，高齢者の $p_{1,t+1}(k), p_{2,t+1}(k), \cdots, p_{n_t,t+1}(k)$ は，式 (11) で表される t 期の経験に基づく最終信念を用いる．

3. 高齢者と若年者の情報交換から得られる知識の性質

上述したモデルの 1 期目は若年者のみが完全ネットワークの中で情報交換を行うが，2 期目においては若年者と高齢者の 2 種類のエージェントが含まれる社会的ネットワークにおいて情報交換構造が行われる．ここでは**図–4** (**a**) に示すような全ての高齢者と若年者が情報交換を行う完全ネットワークと，高齢者と若年者がそれぞれがコミュニティを構成し 1 人の高齢者と若年者が情報交換を行う $K_n - K_m$ ネットワークの 2 種類を考え，その違いによる 2 期目の定常信念の違いを明らかにする．

(1) 完全ネットワークにおけるエージェントの行動

a) 情報交換行列の設定

全ての若年者，高齢者が相互に情報交換を行っている場合を考える．このときの情報交換構造は，若年者，高齢者が残りのそれぞれのエージェントと一つのリンクで繋がっている**図–4** (**a**) のような完全ネットワークに相当する．若年者の他のエージェントへの重みを $w_{r,t}$，高齢者の他のエージェントへの重みを $w_{f,t}$ とおく．ただし，$w_{f,t} < w_{r,t}$ とし，信念調整において，高齢者は周りの意見を反映しにくいとする．式 (3) で表される情報交換行列の各ブロック成分は，次のようになる．

$$\mathbf{W}_{ff,t} = \begin{pmatrix} w'_{f,t} & w_{f,t} & \cdots & w_{f,t} \\ w_{f,t} & w'_{f,t} & \cdots & w_{f,t} \\ & \cdots\cdots\cdots & & \\ w_{f,t} & w_{f,t} & \cdots & w'_{f,t} \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\mathbf{W}_{fr,t} = w_{f,t} \times \mathbf{1}_{(n_t \times m_t)} \tag{15}$$

$$\mathbf{W}_{rf,t} = w_{f,t} \times \mathbf{1}_{(m_t \times n_t)} \tag{16}$$

$$\mathbf{W}_{rr,t} = \begin{pmatrix} w'_{r,t} & w_{r,t} & \cdots & w_{r,t} \\ w_{r,t} & w'_{r,t} & \cdots & w_{r,t} \\ & \cdots\cdots\cdots & & \\ w_{r,t} & w_{r,t} & \cdots & w_{r,t} \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$w'_{f,t} = 1 - (N_t - 1)w_{f,t} \tag{18}$$

$$w'_{r,t} = 1 - (N_t - 1)w_{r,t} \tag{19}$$

ここで $\mathbf{1}_{(n_t \times m_t)}$ は全ての要素が 1 の $(n_t \times m_t)$ 行列を表す．式 (14)-(18) は，例えば，各若年者は，$(m_t - 1)$ 人の若年者，n_t 人の高齢者のそれぞれから意見を聞き，自らの信念を調整するような状況を表す．この社会的ネットワークを通じて行われる意見交換においては，式 (14)-(18) で表される情報交換行列は次のような定常状態に収束する．

$$\lim_{k\to\infty} (\mathbf{W}_t)^k = \frac{1}{n_t w_{r,t} + m_t w_{f,t}} \begin{bmatrix} w_{r,t} \times \mathbf{1}_{(N_t \times n_t)} & w_{f,t} \times \mathbf{1}_{(N_t \times m_t)} \end{bmatrix} \tag{20}$$

式 (20) は情報交換行列は全てのエージェントが，同じ重みになることを意味している．

b) 1 期目の定常信念と最終信念

1 期目においては若年者のみが m_1 人存在し，同じ重みを持った若年者の間で完全ネットワークに従って定常信念に到達するまで情報交換が行われるとする．1 期目における若年者 i の初期信念は，イベントの真の発生確率 $\hat{p}_1$ とノイズ $\epsilon_{1,i}$ との和から成るとし，

$$[\mathbf{p}_1(0)]_i = \hat{p}_1 + \epsilon_{1,i} \tag{21}$$

とおく．ただし $\epsilon_{1,i}$ は平均がゼロのノイズを表し，エージェントの初期信念はイベントの真の発生確率を中心にバラついているとする．初期信念の平均値は，

$$\frac{1}{m_1}\sum_{i=1}^{m_1}[\mathbf{p}_1(0)]_i = \hat{p}_1 \tag{22}$$

となる．このときの情報交換後の定常信念は，式 (20) を用いて，

$$[\mathbf{p}_1(\infty)]_i = \hat{p}_1 \tag{23}$$

となり，1 期目の定常信念はイベントの真の発生確率と等しくなることがわかる．

次に式 (23) の定常信念の下での 1 期目の行動の決定を考える．ここでは $\hat{p}_1 > 1/2$ のみを考える．利得関数は行動とイベントの発生有無に対して対称であるため $\hat{p}_1 \leq 1/2$ についても同様の議論が成り立つため，$\hat{p}_1 > \frac{1}{2}$ のみを考えれば十分である．このとき，式 (23) と [補題 1] より，1 期における全ての若年者の行動は $a_{i,t} = 1$ となる．

次に確率的なイベント発生後に生じる結果を考える．若年者の数が十分に多ければ1期目に大数の法則により，利得 $u_{i,1}=1$ となったエージェントの人数 $l(u_{i,1}=1)$ と利得 $u_{i,t}=0$ となったエージェントの人数 $l(u_{i,t}=0)$ は，それぞれ，

$$l(u_{i,1}=1)=\{\alpha\hat{p}_1+(1-\alpha)(1-\hat{p}_1)\}m_1 \tag{24}$$

$$l(u_{i,1}=0)=\{(1-\alpha)\hat{p}_1+\alpha(1-\hat{p}_1)\}m_1 \tag{25}$$

となる．

次にベイズ更新による最終信念を考える．$u_{i,t}=1$ を経験した若年者の最終信念は，式 (11) から，

$$[\mathbf{p}_2(0)]_i = \frac{\alpha[\mathbf{p}_1(\infty)]_i}{\alpha[\mathbf{p}_1(\infty)]_i+(1-\alpha)(1-[\mathbf{p}_1(\infty)]_i)} \tag{26}$$

となり，$u_{i,t}=0$ を経験した若年者の最終信念も同様に，

$$[\mathbf{p}_2(0)]_i = \frac{(1-\alpha)(1-[\mathbf{p}_1(\infty)]_i)}{\alpha[\mathbf{p}_1(\infty)]_i+(1-\alpha)(1-[\mathbf{p}_1(\infty)]_i)} \tag{27}$$

となる．これらの最終信念が 2 期目における高齢者の初期信念として用いられる．

式 (24),(25),(26),(27) から，2 期目の高齢者 (1 期目の若年者) の初期信念の平均値は，

$$\frac{1}{n_2}\sum_{i=1}^{n_2}[\mathbf{p}_2(0)]_i=\hat{p}_1+\Delta f_1 \tag{28}$$

$$\Delta f_1=\frac{\alpha(1-\alpha)}{\alpha[\mathbf{p}_1(\infty)]_i+(1-\alpha)(1-[\mathbf{p}_1(\infty)]_i)} \tag{29}$$

となる．上式の Δf_1 は利得の発生しやすさを示す確率 α の影響を受けることを表している．イベントの状態と行動とが一致したときに必ず利得が得られる ($\alpha=1$) のときには $\Delta f_1=0$ となり，2 期目における高齢者の初期信念の平均値はイベントの真の発生確率に一致する．しかし，イベントの状態と行動とが一致したときに必ずしも利得が得られない場合 ($\alpha\neq 1$) は，高齢者の 2 期目の初期信念の平均値がイベントの真の発生確率 $\hat{p}_1$ からずれることを表している．

c) 2 期目の情報交換による定常信念

2 期目になり n_2 人の高齢者が式 (28) で表される初期信念を持った状態で，m_2 人の若年者を含む社会的ネットワークにおいて情報交換したときの定常信念を明らかにする．2 期目の若年者 i の初期信念を，真の確率 $\hat{p}_2$ とノイズ $\epsilon_{2,i}$ との和から成るとし，

$$[\mathbf{p}_2(0)]_i=\hat{p}_2+\epsilon_{2,i} \tag{30}$$

とおく．ここでは $\epsilon_{2,i}$ は平均が Δr_2 のノイズを表す ($\Delta r_2\neq 0$)．2 期目の初期信念に生じたノイズ $\epsilon_{2,i}$ の平均値が正の場合（$\Delta r_2>0$）には，イベントが真の確率より起きやすいと考えている若年者が多いことを意味している．逆に $\epsilon_{2,i}$ の平均値が負の場合（$\Delta r_2<0$）には，イベントが真の確率より起きにくいと考えている若年者が多いことを意味している．2 期目においてはイベントの発生確率に対して若年者の偏見が形成されており，各エージェントの利得を低くする原因となっている場合を考える．

2 期目における高齢者の初期信念が式 (28) で表され，若年者の初期信念が (30) で表されるとすると，高齢者と若年者の 2 期目の初期信念の平均値は，

$$\frac{1}{n_2}\sum_{i=1}^{n_2}[\mathbf{p}_2(0)]_i=\hat{p}_2+\Delta f_2 \tag{31}$$

$$\frac{1}{m_2}\sum_{i=1}^{m_2}[\mathbf{p}_2(0)]_i=\hat{p}_2+\Delta r_2 \tag{32}$$

$$\Delta f_2=\Delta f_1-(\hat{p}_2-\hat{p}_1) \tag{33}$$

となる．ただし，$\hat{p}_2$, Δf_2, Δr_2 は 2 期目のイベントの真の発生確率，高齢者の初期信念の平均値誤差，若年者の初期信念の平均値誤差である．式 (31), (32) から，完全ネットワークにおける情報交換によって十分に調整された後のエージェント i の定常信念は，

$$[\mathbf{p}_2(\infty)]_i=\hat{p}_2+\frac{\Delta f_2+\delta_2\Delta r_2}{1+\delta_2}+\frac{(\Delta r_2-\Delta f_2)(w_{r,2}-w_{f,2})}{(1+\delta_2)(w_{f,2}+w_{r,2}\delta_2^{-1})} \tag{34}$$

となる．ただし δ_2 は 2 期の若年者と高齢者の人数の比率であり，

$$\delta_2=\frac{m_2}{n_2} \tag{35}$$

である．式 (34) はエージェントの定常信念が，初期信念の誤差によって生じる影響 (第 2 項)，高齢者と若年者の情報交換の差異の影響 (第 3 項) によって，イベントの真の発生確率 $\hat{p}_2$ からずれることを表す．

次に式 (34) で表される定常信念に基づく行動の結果，2 期目にもたらされる利得を考える．2 期目においてもイベントの真の発生確率が $\hat{p}_2>1/2$ の場合を考える．このとき，全てのエージェントが行動 $a_{i,2}=1$ を選択すれば利得 $u_{i,2}=1$ を得られるエージェントの数が最も多くなるが，その条件は定常信念の値が 1/2 よりも大きくなることである．しかし初期信念の平均値誤差が負であれば，定常信念が 1/2 よりも小さくなってしまう可能性がある．

以下では，真の発生確率が 1/2 より大きいにも関わらず，各エージェントの初期信念が 1/2 より小さく，イベントが起きにくいと考えられている場合（$\Delta f_2<0$, $\Delta r_2<0$）において，高齢者と若年者が情報交換するこ

とによって定常信念が 1/2 より大きな値になり，そのイベントが起こりやすいと考えてもらうために高齢者と若年者の人口比率をどのように設定すべきかについて考える．

式 (34) から，2 期目における各エージェントの定常信念が 1/2 よりも大きくなるための条件は，

$$\frac{-\Delta f_2}{1+\delta_2\dfrac{w_{f,2}}{w_{r,2}}}+\frac{-\Delta r_2}{1+\delta_2^{-1}\dfrac{w_{r,2}}{w_{f,2}}}<\hat{p}_2-\frac{1}{2} \tag{36}$$

となる．式 (36) の $(-\Delta f_2)$, $(-\Delta r_2)$ は高齢者と若年者の初期信念に生じた誤差の大きさを表す．この値が小さいほど，初期信念に生じた誤差は小さく，式 (36) を満たす可能性が高くなる．

利得の発生しやすさ α が高い場合や，1 期目と 2 期目でイベントの真の発生確率が大きく変化した場合には，高齢者の誤差が若年者の誤差よりも大きくなるため $(-\Delta f_2 > -\Delta r_2)$，若年者の人数を相対的に多くする ($\delta_2$ を大きくする) か，高齢者が他のエージェントの信念を自らの信念に反映しやすくする ($w_{f,2}$ を大きくする) ことによって，定常信念が 1/2 以上になる可能性を高めることができる．逆に高齢者の誤差が若年者の誤差よりも小さい場合 $(-\Delta f_2 < -\Delta r_2)$，高齢者の人数を相対的に多くするか，若年者が他のエージェントの信念を自らの信念に反映しやすくすることによって，定常信念が 1/2 以上になり，多くのエージェントが利得を得られようになる．

若年者と高齢者の誤差の調整方法として，例えば，アンケート調査によって各エージェントが持つ主観的確率（初期信念）を表明してもらい，その平均値をイベントの観測データに照らし合わすなどして，主観的確率と観測データの確率との差を把握し，人数調整を行う方法が考えられる．ただし，状態と行動が一致したとき必ず利得が発生し（$\alpha=1$），イベントが起きる真の確率が 1 期目と 2 期目で同じであることがわかっている場合には $(-\Delta f_2)=0$ となるため，情報交換に参加する高齢者の数を増やすことによって，利得を得ることができる若年者が多くなるような定常信念に導くことができると考えられる．

(2) K_n-K_m ネットワークにおけるエージェントの行動

a) 情報交換行列の設定

若年者，高齢者それぞれの社会的ネットワークが形成され，一人の若年者と高齢者を通じて 2 つのネットワークが繋がり，情報交換がなされている場合を考える (**図–4 (b)**)．具体的には，n_t 人の高齢者で完全ネットワークが形成され， n_t 番目の高齢者が 1 人の若年者と 1 リンクでつながっているとする．この若年者は，m_t 人から成る完全ネットワークに含まれるものとする．このときの情報交換構造は，次のように表すことができる．

$$\mathbf{W}_{ff,t}=\begin{pmatrix} w'_{f,t} & w_{f,t} & \cdots & w_{f,t} \\ w_{f,t} & w'_{f,t} & \cdots & w_{f,t} \\ \cdots\cdots\cdots & & & \\ w_{f,t} & w_{f,t} & \cdots & w'_{f,t}-w_{fr,t} \end{pmatrix} \tag{37}$$

$$\mathbf{W}_{fr,t}=\begin{pmatrix} \mathbf{0}_{(n_t-1)\times 1} & \mathbf{0}_{(n_t-1)\times(m_t-1)} \\ w_{fr,t} & \mathbf{0}_{1\times(m_t-1)} \end{pmatrix} \tag{38}$$

$$\mathbf{W}_{rf,t}=\begin{pmatrix} \mathbf{0}_{(n_t-1)\times 1} & w_{rf,t} \\ \mathbf{0}_{(m_t-1)\times(n_t-1)} & \mathbf{0}_{(m_t-1)\times 1} \end{pmatrix} \tag{39}$$

$$\mathbf{W}_{rr,t}=\begin{pmatrix} w'_{r,t}-w_{rf,t} & w_{r,t} & \cdots & w_{r,t} \\ w_{r,t} & w'_{r,t} & \cdots & w_{r,t} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & & & \\ w_{r,t} & w_{r,t} & \cdots & w'_{r,t} \end{pmatrix} \tag{40}$$

$$w'_{f,t}=1-(n_t-1)w_{f,t} \tag{41}$$

$$w'_{r,t}=1-(m_t-1)w_{r,t} \tag{42}$$

この社会的ネットワークにおける定常信念の重み行列は，

$$\lim_{k\to\infty}(\mathbf{W}_t)^k=\frac{1}{n_t w_{rf,t}+m_t w_{fr,t}} \times\left[w_{rf,t}\times\mathbf{1}_{(N_t\times n_t)} \quad w_{fr,t}\times\mathbf{1}_{(N_t\times m_t)}\right] \tag{43}$$

となる．式 (43) は，完全ネットワークのときと同様に，全てのエージェントが同じ重みになることを意味している．

b) 1 期目の定常信念と最終信念

1 期目において若年者のみが m_1 人存在して，完全ネットワークの下で情報交換が行われるため，**(1)** の完全ネットワークのケースと全く同様である．

c) 2 期目の情報交換による定常信念

2 期目となり n_2 人の高齢者が式 (28) で表される初期信念を持った状態で，m_2 人の若年者を含む社会的ネットワークにおいて情報交換したときの定常信念を明らかにする．ここでは簡略化のため，完全ネットワークのときと同様に，高齢者，若年者の初期信念の平均値を，式 (31),(32) で定義すると，K_n-K_m ネットワークにおけるエージェント i の定常信念は，

$$[\mathbf{p}_2^{\infty}]_i=\hat{p}_2+\frac{w_{rf,2}\Delta f_2+\delta_2 w_{fr,2}\Delta r_2}{w_{rf,2}+\delta_2 w_{fr,2}} \tag{44}$$

となる．式 (44) からエージェント i の定常信念は高齢者，若年者内での情報交換がどのように行われるかによらず，高齢者と若年者をつなぐ 2 人のエージェント間の重みのみに影響されることがわかる．

次に式 (44) で表される定常信念に基く行動の結果，2 期目にもたらされる利得を考える．ここでもイベント

の真の発生確率が $\hat{p}_2 > 1/2$ の場合を考え，全てのエージェントが行動 $a_{i,2} = 1$ を選択してより多くのエージェントが利得を得られるための条件として，定常信念の値が 1/2 よりも大きくなるような高齢者と若年者の人口比率の設定を明らかにする．

式 (44) から，2 期目における各エージェントの定常信念が 1/2 よりも大きくなるための条件は，

$$\frac{-\Delta f_2}{1+\delta_2 \dfrac{w_{fr,2}}{w_{rf,2}}} + \frac{-\Delta r_2}{1+\delta_2^{-1} \dfrac{w_{rf,2}}{w_{fr,2}}} < \hat{p}_2 - \frac{1}{2} \tag{45}$$

となる．完全ネットワークのときと同様に，式 (45) の $(-\Delta f_2)$, $(-\Delta r_2)$ が小さいほど，高齢者と若年者の初期信念に生じた誤差は小さく，式 (45) を満す可能性が高くなる．式 (45) から，$K_n - K_m$ ネットワークでは高齢者と若年者をつなぐ 2 人のエージェントの重みのみが影響していることがわかる．例えば，利得の発生しやすさ α が高く，1 期目と 2 期目でイベントの真の発生確率が大きく変化したことによって，高齢者の誤差が若年者の誤差よりも大きい場合 $(-\Delta f_2 > -\Delta r_2)$，若年者の人数を相対的に多くするか，若年者から意見を聞く高齢者の若年者への重み $(w_{fr,2})$ を大きくすることによって，定常信念が 1/2 よりも大きくなる可能性を高めることができる．逆に高齢者の誤差が若年者の誤差よりも小さい場合 $(-\Delta f_2 < -\Delta r_2)$，高齢者の人数を相対的に多くするか，若年者が他のエージェントの信念を自らの信念に反映しやすくすることによって，定常信念が 1/2 以上になり，多くのエージェントが利得を得られようになる．

高齢者と若年者が分離された $K_n - K_m$ ネットワークでは，高齢者と若年者をつなぐノードペアがどの程度お互いの話を聞くかに依存して定常信念が決まる．そのため，世帯間におけるコミュニケーション能力があるエージェントを若年者と高齢者のノードペアとして選び，高齢者または若年者の平均値誤差に応じてお互いの情報を柔軟に取り入れるようにすれば，より良い行動ができるような知識が情報交換によって得られる．

4. まとめ

本研究では高齢者を含んだ社会的ネットワークにおける情報交換によって得られる知識の性質を明らかにした．はじめに，高齢者が経験を通じて知識を得る過程をモデル化し，さらに若年者情報交換後に各エージェントが得られる知識を解析的に導出した．

本研究から，過去の経験の原因を正確に判別できなければ $(1/2 < \alpha < 1)$，その経験を基に更新された現在の初期信念の平均値は真の状態に等しくない．さらに，この初期信念の平均値と真の状態との差異が，高齢者と若年者という異質なエージェントの人数やそれぞれの情報交換における他エージェントへの重みを調整することによって，修正され，各エージェントが望ましい意思決定をするのに十分な知識を得ることができる条件を提示した．

本論文では全てのエージェントの信念が変化しなくなる定常信念に到達するまで情報交換が行われていると仮定して分析を行っている．これは長い時間をかけて情報交換が行われ，全てのエージェントが同じ信念を持つような現象に対しては妥当な仮定といえる．しかし，実際の情報交換においては全てのエージェントの信念が変化しない定常信念に達するまでに情報交換を終えてしまう場合も考えられ，情報交換による信念の収束の過程や速度に関する分析は今後の課題とする．

謝辞： 本研究は平成 22 年度東北大学研究所連携プロジェクトの成果の一部である．記して感謝の念を表します．

参考文献

1) 宍戸邦章：都市郊外における高齢者の社会的ネットワーク-ネットワーク構造と生活機能外部化の関連について-, 同志社社会学研究, No.9, pp.41-56, 2005.
2) 前田信彦：アクティブ・エイジングの社会学 -高齢者・仕事・ネットワーク-, ミネルヴァ書房, 2006.
3) 富樫ひとみ：高齢者の社会関係に関する文献的考察．社会関係の構造的特質の検討-, 立命館産業社会論集, Vol.42, pp.165-181, 2007.
4) 農林水産省：高齢者関係データ集, 2009.
5) Surowiecki, J.: *The Wisdom of Crowds: Why the many are smarter than the few and how collectitive wisdom shapes business, economies, societies and nations*, Anchor books, 2004.
6) Jackson, M.: *Social and Economic Networks*, Princeton University Press, 2008.
7) DeGroot, M. H.: Reaching a Consensus, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.69, pp.118-121, 1974.
8) Demarzo, P., Vayanos, D., and Zwiebel, J.: Persuation Bias, Social Influence, and Undimensional Opinions, *Quarterly Journal of Economics*, Vol.118, pp.909-968, 2003.
9) Golub, B. and Jackon, M.: Naive Learning and Influence in Social Networks and the Wisdom of Crowds, *American Economic Journal: Micro-economics*, Vol. 2, pp.112-149, 2010.
10) Jadbabie, A., Sandroni, A., and Tahbaz-Salehi, A.: Non-Bayesian Social Learning, *PIER Working Paper*, 2010.
11) Acemoglu, D., Ozdaglar, A., and ParandehGhebi, A.: Spread of (mis)information in social network, *Games and Economic Behavior*, Vol.70, pp.194-227, 2010.

(2011. 2. 25 受付)

EXPLORING KNOWLEDGE ACQUIRED BY INFORMATION EXCHANGE THROUGH SOCIAL NETWORK IN AGING SOCIETY

Kazuaki OKUBO and Makoto OKUMURA

This paper explores property of knowledge of elderly and young people acquired by information exchange through social network in aging society. This study proposes a model of elderly people who acquire knowledge from their experience and exchanging information with young people. It was found that assumption, which is used in many studies, is not valid in this case and average value of initial beliefs is different from true state. The difference between the average value of initial beliefs and the true state can be adjusted by the information exchange among the number of elderly and young people. This paper assessed the conditions for agents to enable to select the desirable action based on the adjusted beliefs.