安定性とインクルージョン性を考慮したマッチング手法

秋葉　俊祐[†]　　鈴木　伸崇[††]

† 筑波大学情報学群知識情報・図書館学類　〒 305–8550 茨城県つくば市春日 1-2
†† 筑波大学図書館情報メディア系　〒 305–8550 茨城県つくば市春日 1-2
E-mail: †s1811450@s.tsukuba.ac.jp, ††nsuzuki@slis.tsukuba.ac.jp

あらまし　本研究では，マッチングをワークフローのタスク割り当てに応用することを考える．ここでマッチングとは，参加者の希望を考慮しつつ組み合わせを求める問題であり，代表的な問題として結婚問題や研修医配属問題などがある．マッチングにおいては安定的な解を求めることが望ましく，受け入れ保留アルゴリズムがよく用いられている．一方，本研究の問題においてはインクルージョン性も含めて考慮する必要があり，受け入れ保留アルゴリズムの適用が困難である．そこで本研究では，最適化手法を用いて，安定性とインクルージョン性を考慮した，多対多のマッチング手法を考案する．ワーカには希望のタスク数，タスクには受け入れ可能ワーカ数があり，各ワーカとタスクは選好を持ち，ボランティアベースなど，参画するワーカがあらかじめ把握されている状況を考える．

キーワード　マッチング，クラウドソーシング，タスク割り当て，最適化問題

1　は じ め に

マッチングとは，人やモノに対して，それぞれの需要と供給をできるだけ満たしながらマッチさせることである．代表的なマッチング問題として結婚問題がある．結婚問題は，１対１のマッチング問題である．この問題で与えられるのは集合の組であり，片方を男性の集合，もう一方を女性の集合とする．それぞれの人が異性に対して好みの順を示す希望リスト（選好）をもち，この選好に基づいたマッチングを求めるという問題である．この問題は，受け入れ保留アルゴリズムにより，安定的マッチングが得られることが分かっている [1]．安定的マッチングを求める際には，ブロッキングペアができないように注意しなければならない．ブロッキングペアとは，マッチングにおいて現在ペアを組んでいる相手よりも，組んでいない相手のほうがお互いがより好みである対のことである．また１対多のマッチング問題として，研修医配属問題がある．病院の集合と研修医の集合におけるマッチングであり，結婚問題と同様，受け入れ保留アルゴリズムによって安定的マッチングが得られることが分かっている．受け入れ保留アルゴリズムは，アメリカの研修医配属では以前から使われており [3]，近年日本でも使われている [4]．安定的な結果を生み出す配属システムは，そうでないものと比較して長続きするといわれている [2,3]．

ただし，受け入れ保留アルゴリズムも万能ではない．受け入れ保留アルゴリズムを用いたマッチング問題では，結果が片方の選好によってしまい，双方の選好をバランスよく考慮した結果が必ずしも得られるわけではない．結婚問題において，例えば，男性の選好に沿って女性とマッチしていくとき，男性側の選好は良い順位となるが，女性側の選好は十分満たされているとは言えない結果が得られる．これを男性最適化というが，受け入れ保留アルゴリズムを用いるとしばしばこのような結果となる．

本研究では，マッチングをクラウドソーシングのワーカ割り当てに応用することを考える．ここでは，複数のワーカに対し複数のタスクを割り当てる，多対多のマッチング手法を必要とする．各ワーカとタスクは，それぞれ選好を持っている．またワーカには希望のタスク数，タスクには受け入れ可能ワーカ数がある．想定状況は，ボランティアベースなど，参画するワーカがあらかじめ把握されているとする．このような状況においては，このワーカとタスクに対してマッチングを行うときに，インクルージョン性も考慮することが望ましい．インクルージョン性とは，できるだけ多くのワーカにタスクが割り当てられるようにすることである [5]．インクルージョン性を考慮しない場合，一部の有能なワーカにタスクが集中し，他のワーカにはほとんどタスクが無い状況に陥る可能性がある．しかし，安定的，かつインクルージョン性をできるだけ満たすといった複数の条件を踏まえたマッチングにおいて，受け入れ保留アルゴリズムを応用することは難しい．

以上から，本研究では最適化手法を用いて上記のマッチングを求める．ワーカに対して各ワーカの選好と希望数に沿ったタスクを割り当てる，かつタスク側の選好も十分に満たせる安定的なマッチングの手法の提案を目的とする．本研究では，３段階に分けて最適化手法を用いる．まず，各ワーカの選好と各タスクの選好の和が最小となるような割り当てと，その値を求める．次に，インクルージョン性の指標が最大となるような割り当てと，その値を求める．最後に，安定性を満たすという条件の下で，上記２つの値との乖離が最小となる値を求める．これによりマッチングの組み合わせを得る．

先行研究として，１対１の安定的マッチングを求めるために最適化手法を用いる提案がある [8]．この研究では，集合ｔと集合ｐがあり，各集合の母数は同数である．手法は，各ｔと各ｐの選好の和の最小値，差の最小値を求め，安定性の条件の下でその乖離が最小となる値を求めるという方法である．本研究では，ワーカ集合とタスク集合のそれぞれの母数は，ワーカ数が

タスク数以上であれば成り立ち，安定性のほかに，インクルージョン性も考慮している多対多のマッチングであるという点で，より幅広い状況において対応できる．

評価実験では，複数通りのテストデータを作成し，提案手法を実行し，インクルージョン性の条件の有無による結果の比較，また関連研究 [8] の手法との比較によって評価を行った. 得られた結果では，提案手法が最もインクルージョン性と安定性の双方を反映していた．

本論文の構成は以下の通りである．第２章では，マッチングと最適化手法について述べる．第３章では，提案アルゴリズムについて述べる．第４章では，評価実験について述べる．第５章では，本研究のまとめを述べる．

2 諸 定 義

本章では，マッチング，最適化問題について述べる．

2.1 マッチング

マッチングとは，人やモノに対して，それぞれの需要と供給をできるだけ満たしながらマッチさせることである．代表的なマッチング問題として，結婚問題や研修医配属問題がある．これらは，受け入れ保留アルゴリズムにより，安定的な結果が得られることが分かっている．以降より，上記２つのマッチング問題，受け入れ保留アルゴリズム，安定的，ブロッキングペアについて述べる．

結婚問題は１対１のマッチングの代表的な問題である. 結婚問題について，受け入れ保留アルゴリズムを用いた例を提示し，説明する．男性の集合 M=A,B,C と女性の集合 N=a,b,c が用意され，各々は選好を持っているとする．各男性と女性の選好を以下の表１のようにする．

表 1　各男性と女性の選好（左から好みの順）

男性	選好			女性	選好		
A	a	b	c	a	C	A	B
B	b	c	a	b	A	B	C
C	a	c	b	c	C	B	A

まず男性 A の選好に注目する．男性 A の選好は，a >b >c の順なので，男性 A と女性 a を暫定的にマッチさせる．次に男性 B の選好に注目する．男性 B が最も好むのは女性 b であるため，男性 B と女性 b を暫定的にマッチさせる．次に男性 C に移る．男性 C が最も好むのは女性 a であるが，女性 a は男性 A と暫定的にマッチしている状況である．この場合は，女性 a の選好に注目し，男性 A と男性 C のどちらの方が好みかを考慮する．ここでは，女性 a は男性 A よりも男性 C のほうが好みであるため，男性 C と女性 a をマッチさせる．これにより，男性 A が誰ともマッチされていない状況となるため，男性 A が２番目に好む女性に注目する．それは女性 b であるが，女性 b は男性 B と暫定的にマッチしている．先ほどの男性 C と女性 a の場合と同様に考え，男性 A と女性 b をマッチさせる．最後に男性 B を女性 c とマッチさせ，重複がないため，この時点でマッチしているペアで確定となる．安定的なマッチング結果が得られる結婚問題は，安定結婚問題という．受け入れ保留アルゴリズムによって，確かに安定的な結果になるが，片方の選好に沿ってマッチングを行うため，双方の選好をバランスよく満たしているとは言い難い．上記の例の場合は，男性の選好に沿ってマッチングを行ったため，男性の選好は十分に考慮されているが，女性の選好も同様に考慮したとは必ずしも言えるわけではない．この場合を，男性最適化という．

またブロッキングペアとは，例えば上記の例において男性 A と女性 c が最終的にマッチしているとする．この時，男性 A の選好において，女性 c は最も好まない相手であり，女性 c の選好においても男性 A は最も好まないという状況である．そのため，男性 A と女性 c はそれぞれより好みの相手が存在し，それらの異性と抜け駆けを起こす可能性がある．このような状況は，マッチングを行うにあたって避けることが望ましい．

研修医配属問題は，１対多の代表的な問題であり，安定結婚問題と同様，受け入れ保留アルゴリズムによって安定的なマッチング結果が得られることが分かっている．病院の集合と研修医の集合があり，それぞれに選好がある．また病院には受け入れ可能数がある．１つの病院に対して，複数の研修医が配属される．各病院の選好に沿って，マッチング行っていく．１対１のマッチング異なる点は，選好だけでなく，受け入れ可能数を超えないように注意しなければならない．

2.2 最適化問題

最適化問題とは，与えられた条件（制約）の下で，目的関数を最小化または最大化する変数の値を求める問題である．特に，変数の一部が整数値をとる場合，整数計画問題という．これらは数式によって表現され，制約の式の下で，目的関数の式を最適化し，最適解を求める．制約，目的関数は以下のように記述されることが多い [6].

MINIMIZE　(目的関数の式)
subject to　(制約の式)

簡単な例で最適化問題の用語を詳しく述べる．最適化問題で，最も基本的な問題に，線形計画問題がある．線形計画問題は，大規模な問題であっても高速に最適解を得る方法が確立されている [6]．以下に線形計画問題の一例を提示する [9].

$$
\begin{array}{llr}
\text{maximize} & 15x_1 + 18x_2 + 30x_3 & (1.1) \\
\text{subject to} & 2x_1 + x_2 + x_3 \leqq 60 & (1.2) \\
 & x_1 + 2x_2 + x_3 \leqq 60 & (1.3) \\
 & x_3 \leqq 30 & (1.4) \\
 & x_1, x_2, x_3 \geqq 0 & (1.5)
\end{array}
$$

式 (1.1) が目的関数であり,「subject to」以降に書かれている，式 (1.2) から (1.5) が制約である．制約を満たしながら，目的関数が最大となるような値を求める．また式 (1.5) は変数の設定であり，x_1, x_2, x_3 は，連続変数である．連続変数とは，

整数だけに限らず，連続する実数の変数のことである．

整数最適化問題における代表的な問題の１つに，多制約 0-1 ナップサック問題がある [9]．これは,「n 個のアイテム，m 本の制約，各々のアイテム $j = 1, 2, \ldots, n$ の価値 $v_i(\geqq 0)$．アイテム j の制約 $i = 1, 2, \ldots, m$ に対する重み $a_{ij}(\geqq 0)$．および制約 i に対する制約の上限値 $b_i(\geqq 0)$ が与えられたとき，選択したアイテムの重みの合計が各制約 i の上限値 b_i を超えないという条件の下で，価値の合計を最大にする.」という問題である．アイテム番号の集合を $I = \{1, 2, \ldots, n\}$，制約の番号の集合を $J = \{1, 2, \ldots, m\}$ と記し，アイテム j をナップサックに詰めるとき 1，それ以外のときは 0 になる 0-1 変数 x_j を使い，整数最適化問題として定式化すると以下のようになる．

$$
\begin{array}{llll}
\text{maximize} & \sum_{j\in J} v_i x_i & & (2.1) \\
\text{subject to} & \sum_{j\in J} a_{ij}x_j \leqq 60 & \forall\, i \in I & (2.2) \\
 & x_j \in \{0, 1\} & \forall\, j \in J & (2.3)
\end{array}
$$

式 (2.1) が目的関数であり，ここではナップサックに詰めたアイテムの価値が最大となるような最適値を求める．式 (2.2) と (2.3) は制約である．式 (2.2) では，ナップサックに詰めたアイテムの重みの合計が，上限値を超えないようにするための制約である．式 (2.3) は，0-1 変数の設定である．最適化問題では，上記のように問題に対して定式化を行い，一般には最適化ソルバーを用いて最適化を行うことが多い．最適化ソルバーとは，最適化問題を解くためのソフトウェアであり，目的関数と条件式を入力すると解を返す.

3 提 案 手 法

本章では，最適化手法を用いた，安定性とインクルージョン性を考慮したマッチング手法アルゴリズムについて述べる．

3.1 本研究で用いる略式記号

本節では，説明の都合上，本研究で用いる略式記号について述べる．以下が略式記号である．

- W：ワーカ集合
- T：タスク集合
- $\mathrm{r}_t(w)$ ： タスク t におけるワーカ w の選好順位
- $\mathrm{r}_w(t)$ ： ワーカ w におけるタスク t の選好順位
- T_w ： ワーカ w の希望タスク数
- W_t ： タスク t が受け入れ可能なワーカ数
- X_{wt} ： ワーカ w がタスク t に割り当てられているかどうかを表す変数

3.2 評価指標について

本研究では，安定性とインクルージョン性の２種類の評価指標を用いる．安定性に関しては関連研究 [8] の手法を参照する．インクルージョン性は「一部の有能なワーカにタスクが集中することを避け，できるだけ多くのワーカにタスクを割り当てる」[5] ことであるため，各ワーカの希望タスク数通りに，各ワーカに対してタスクが割り当てられることが望ましい．以上を踏まえて，本研究では，各ワーカの希望タスク数と各ワーカに対して割り当てられたタスク数が同数であることを目標とし，以下の式でインクルージョン性 (I) を定義する．

$$I = \frac{(\text{各ワーカに割り当てられたタスク数})}{(\text{各ワーカの希望タスク数})}$$

上記の式では，I が 1 に近いほど，各ワーカに対して希望タスク数通りにタスクが割り当てられているため，インクルージョン性が満たされている．次節において，上記の式に加え，最適化手法を用いたアルゴリズムについて，略式記号を用いて述べる．

3.3 アルゴリズム

本節では，安定性とインクルージョン性を考慮したマッチング手法アルゴリズムに関して述べる．

提案アルゴリズムでは，最適化手法を 3 段階に分けて用いる．まずステップ 1a として，各ワーカと各タスクの選好の和が最小となる値を求める．次にステップ 1b として，インクルージョン性の指標が最大となる値を求める．最後にステップ 2 として，安定性の条件の下で，上記２つの値との乖離が最小となる値を求める．以下に式を提示し，詳しく述べる．

3.3.1 ステップ 1a：選好順位の和の下限 S を求める

$$
\begin{array}{lll}
\text{minimize} & S = \sum_{w\in W} \sum_{t\in T}\ \{r_t(w) + r_w(t)\} \cdot X_{wt} & (3.1) \\
\text{subject to} & & \\
1 \leqq \sum_{t\in T}\ X_{wt} \leqq T_w & \forall\, w \in W & (3.2) \\
\sum_{w\in W}\ X_{wt} \leqq W_t & \forall\, t \in T & (3.3) \\
X_{wt} \geqq 0 & & (3.4)
\end{array}
$$

式 (3.1) は目的関数であり，各ワーカと各タスクの選好の和が最小となるような割り当てと，その値 S を最適化により求める．式 (3.2) から (3.4) は制約である．式 (3.2) は，各ワーカに対して割り当てられるタスク数が，1 以上希望タスク数以下である条件である．(3.3) は，各タスクに対して受け入れるワーカ数が，受け入れ可能数以下である．上記の最適化問題は，マッチしたワーカとタスクの双方の選好順位がより良いものにするための問題設定となっている．

3.3.2 ステップ 1b：インクルージョン性の指標の上限 I を求める

$$
\begin{array}{lll}
\text{maximize} & I = \sum_{w\in W}\ \{A_w/T_w\} & (3.5) \\
\text{subject to} & & \\
A_w = \sum_{t\in T}\ X_{wt} & \forall\, w \in W & (3.6) \\
1 \leqq \sum_{t\in T}\ X_{wt} \leqq T_w & \forall\, w \in W & (3.7) \\
\sum_{w\in W}\ X_{wt} \leqq W_t & \forall\, t \in T & (3.8) \\
X_{wt} \geqq 0 & & (3.9)
\end{array}
$$

式 (3.5) は目的関数であり，前節のインクルージョン性を示す指標として述べたものを，記号によって式で表したものである．これが最大 (1) となるような割り当てと，その値 I を最適化により求める．式 (3.6) は，制約であり，各ワーカに割り当

てられたタスク数として変数 A_w を設定している．その他の制約の式 (3.7) から (3.9) は，ステップ 1a の制約と同様の条件となっている．

3.3.3 ステップ 2：S と I との乖離が最も小さい安定的マッチングを求める

$$\text{minimize} \qquad D_1 + D_2 \tag{3.10}$$

subject to

$$\textstyle\sum_{t \in T} \; X_{wt} \leqq T_w \qquad \forall\, w \in W \tag{3.11}$$

$$\textstyle\sum_{w \in W} \; X_{wt} \leqq W_t \qquad \forall\, t \in T \tag{3.12}$$

$$X_{wt} \in \{0, 1\} \qquad \forall\, w \in W, t \in T \tag{3.13}$$

$$\sum_{t' \in T \; s.t. \; r_w(t') < r_w(t)} X_{wt'} + \sum_{w' \in W \; s.t. \; r_t(w') < r_t(w)} X_{w't} + X_{wt} \leqq 1 \qquad \forall\, w \in W, t \in T \tag{3.14}$$

$$\textstyle\sum_{w \in W} \sum_{t \in T} \; \{r_t(w) + r_w(t)\} \cdot X_{wt} - D_1 = S \tag{3.15}$$

$$\textstyle\sum_{w \in W} \; \{A_w / T_w\} - D_2 = I \tag{3.16}$$

制約の式 (3.11) から (3.13) は，ステップ 1a の制約と同様の条件である．式 (3.14) は，安定性の条件を示す制約の式 [8] である．この式の最初の項では，ワーカ w とタスク t に対して，各ワーカ W からみて各タスク t よりも選好の低い各タスク t' に対して和をとるので，ワーカ w がタスク t よりも選好の低いタスク t' とマッチしていたら 1 となり，そうでなければ 0 となる．このとき，マッチングが安定的であるためには，タスク t はワーカ w よりも選好の高い好みのワーカとマッチする必要があるので，この制約の式における第 2 項は 0 にならなければならない．また，ワーカ w はタスク t ともマッチしないので，第 3 項も 0 にならなければならい．以上が成立すると「安定的」の条件を満たすことになる．式 (3.15) と (3.16) では，それぞれステップ 1a とステップ 1b での最適解との乖離を表す変数 D_1 と D_2 を設定している．目的関数の式 (3.10) では，D_1 と D_2 の和の最小値を求める．

3.4 最適化問題を用いたアルゴリズムの説明

アルゴリズムの入力は，ワーカ集合 W，タスク集合 T，各ワーカ w と各タスク t の選好 $r_t(w)$ および $r_w(t)$，各ワーカ w の希望タスク数 T_w，各タスク t の受け入れ可能ワーカ数 W_t である．提案アルゴリズムを実施して，各ワーカ w に対するタスク t の割り当て X_{wt} を返す．

• ステップ 1a では，各ワーカ w と各タスク t の選好の和が最小になるような最適化問題を解き，その解を S とする．その際，以下の制約を満たし，最後に割り当て X_{wt} を返す．

∘ 各ワーカ w に対して割り当てられるタスク数が，1 以上希望タスク数 T_w 以下になる．

∘ 各タスク t に対して割り当てられるワーカ数が，受け入れ可能ワーカ数 W_t 以下になる．

∘ X_{wt} が 0 以上である．

• ステップ 1b では，インクルージョン性の指標が最大となるような最適化問題を解き，その解を I とする．その際，以下の制約を満たす．

∘ 各ワーカ w に対して割り当てられたタスク数を A_w とする．

∘ 各ワーカ w に対して割り当てられるタスク数が，1 以上希望タスク数 T_w 以下になる．

∘ 各タスク t に対して割り当てられるワーカ数が，受け入れ可能ワーカ数 W_t 以下になる．

∘ X_{wt} が 0 以上である．

• ステップ 2 では，安定性とインクルージョン性を考慮したマッチングの最適化問題である．ステップ 1a とステップ 2b のそれぞれで求められた最適解との乖離が最小となるような最適化問題を解く．その際，以下の制約を満たす．

∘ 各ワーカ w に対して割り当てられるタスク数が，希望タスク数 T_w 以下になる．

∘ 各タスク t に対して割り当てられるワーカ数が，受け入れ可能ワーカ数 W_t 以下になる．

∘ 安定性の示す条件．

∘ D_1 は，各ワーカと各タスクの選好の和とステップ 1a の最適解との乖離を表す．

∘ D_2 は，インクルージョン性を示す指標とステップ 1b の最適解との乖離を表す．

ワーカ数 6，タスク数 6 で表 2 のようにそれぞれ選好と希望タスク数，受け入れ可能ワーカ数がある例を用いて，アルゴリズムの動作例を示す．まず，ステップ 1a において，これらの選好の和が最小となるような最適化問題を解き，S に保存する．次にステップ 1b において，インクルージョン性の指標が最大となる最適化問題を解く．ここでは最適解は約 4.67 となり，これを I に保存する．最後にステップ 2 の安定性の条件の下で，ステップ 1a と 1b の最適解 S，I との乖離 (D_1，D_2) の和が最小となる最適化問題を解き，最適解とマッチングの結果を得る．以上により，表 3 のようにマッチングの結果を得る．

表 2　ワーカ数 6，タスク数 6 (左から好みの順) () 内は希望数

ワーカ w	選好	ワーカ w	選好
w_1 (3)	t_2，t_1，t_6，t_5，t_3，t_4	t_1 (1)	w_6，w_5，w_2，w_3，w_4，w_1
w_2 (3)	t_4，t_6，t_2，t_3，t_1，t_5	t_2 (2)	w_1，w_6，w_3，w_2，w_4，w_5
w_3 (1)	t_1，t_4，t_5，t_6，t_2，t_3	t_3 (2)	w_6，w_4，w_2，w_3，w_5，w_1
w_4 (2)	t_6，t_2，t_3，t_5，t_4，t_1	t_4 (1)	w_6，w_2，w_1，w_3，w_4，w_5
w_5 (3)	t_6，t_4，t_2，t_3，t_1，t_5	t_5 (1)	w_4，w_5，w_3，w_2，w_1，w_6
w_6 (1)	t_6，t_1，t_3，t_4，t_2，t_5	t_6 (2)	w_3，w_4，w_6，w_1，w_5，w_2

表 3　マッチング結果

ワーカ w	タスク t
w_1	t_2
w_2	t_3，t_4
w_3	t_1
w_4	t_3，t_6
w_5	t_5，t_6
w_6	t_2

4 評価実験

本章では, 前章での提案アルゴリズムに関する評価実験について述べる.

4.1 概要

本節では，評価実験の内容について説明する．評価実験では，提案手法が安定性とインクルージョン性を満たすマッチングとなっているかどうかを評価する．比較対象は，本研究の手法からインクルージョン性を除いた場合と，本研究と同様に，最適化問題を用いて安定的マッチングを行った手法 [8] を多対多のマッチングに適応させたものの 2 つ場合と比較する．

評価実験では，ワーカ集合とタスク集合用意する．各ワーカは選好と希望タスク数を持ち，各タスクは選好と受け入れ可能ワーカ数を持つ．これらは任意のワーカ数とタスク数を入力すると自動生成され，入力し，3 種類の手法を用いることで評価実験を行った．本研究では，最適化ソルバーとして，整数計画に対応し，Python で記述できる Gurobi を使用する．また，ワーカ数が 20 人以下の場合は，希望タスク数が 3 以下であり，20 人以上の場合は，希望タスク数が 5 以下であるとする．タスクに対しても同様のとした．実験に用いたデータは，(ワーカ数，タスク数) = (20，15)，(30，25)，(40，30) である．どの入力データの場合においても，ブロッキングペアは見られなかった．

4.2 比較する手法

本節では，評価実験に用いた，比較する手法について述べる．

4.2.1 インクルージョン性の指標を除いた場合

この手法は，提案アルゴリズムにおいて，ステップ 1b のインクルージョン性の指標についての最適化問題は考慮せずにステップ 2 の最適化問題を解く．よって提案手法と異なる部分のみ記述すると，ステップ 2 の最適化問題が以下のようになる．

minimize $\quad D_1+D_2$

subject to

$\sum_{t\in T} \; X_{wt} \leqq T_w \qquad \forall\, w \in W$

$\sum_{w\in W} \; X_{wt} \leqq W_t \qquad \forall\, t \in T$

$X_{wt} \in \{0,1\} \qquad \forall\, w \in W, t \in T$

$\sum_{t'\in T \; s.t. \; r_w(t')<r_w(t)} X_{wt'} + \sum_{w'\in W \; s.t. \; r_t(w')<r_t(w)} X_{w't} + X_{wt} \leqq 1 \quad \forall\, w \in W, t \in t$

$\sum_{w\in W}\sum_{t\in T} \; \{r_t(w) + r_w(t)\} \cdot X_{wt} - D_1 = S$

最適解 I を用いて，インクルージョン性の指標のとの乖離を表す部分が除かれている．これによりインクルージョン性を考慮しない場合の最適解を求められ，インクルージョン性を考慮した場合とのマッチング結果の比較を行えるようにした．

4.2.2 関連研究 [8] の手法

安定的マッチングを求めるために最適化手法を用いた関連研究 [8] の手法について述べる．この手法では，集合 t と集合 p が用意され，以下の最適化問題を解くことによって，安定的マッチングを得る．各 t と各 p のそれぞれの選好の和が最小となる最適化問題，各 t と各 p のそれぞれの差の絶対値が最小となる最適化問題，安定性の条件の下で上記 2 つの最適解との乖離の和が最小となる最適化問題の 3 つの段階での最適化問題を解く．提案手法との違いは，各 t と各 p の選好の差の絶対値が最小となる最適化問題である．この最適化問題の目的関数は，以下のように定式化される．

minimize $\quad W_{opt} = \sum_{w\in W}\sum_{t\in T} \; |r_t(w) - r_w(t)| \cdot X_{wt}$

しかし，この手法は 1 対 1 のマッチングに対応したものとなっているため，評価実験で用いるためには多対多のマッチングに対応させなくてはならない．そのため，この手法の制約式の一部を変更したものを評価実験に用いた．

4.3 評価実験の結果

以下に評価実験の結果を示す．表 4 から表 6 は各ワーカ w と各タスク t に対して，提案手法，インクルージョン性の指標を除いたもの，関連研究 [8] の手法を多対多のマッチングに対応させたものの 3 種類の手法を用いた場合のマッチングの結果を示したものである．本評価実験において，インクルージョン性の指標を除いた場合では，ワーカとタスクの組が 10 組以下となった．また，関連研究 [8] の手法ではワーカとタスクの組は，どのワーカ数とタスク数を入力した場合においてもいくつかの組ができたが，提案手法のようにすべてのワーカに対してタスクが割り当てられることはなかった．

表 4 は，ワーか数 20，タスク数 15 のマッチング結果であり，括弧内の数字は希望タスク数 T_w を示している．以降の表においても，括弧内には希望タスク数 T_w を示している．また,「-」はどのタスクも割り当てられなかったことを表している．インクルージョン性の指標を除いた場合の結果は 6 組であり，関連研究 [8] の手法での組はの 6 組である．このワーカ数とタスク数においては，各ワーカの希望タスク数 T_w どおりにタスクが割り当てられた．表 5 は，ワーカ数 30，タスク数 25 の結果である．インクルージョン性の指標を除いた場合の結果は 10 組でり，関連研究 [8] の手法では 6 組である．表 6 は，ワーカ数 40，タスク数 30 の結果である．インクルージョン性の指標を除いた場合の結果は 10 組であり，関連研究 [8] の手法では 11 組である．

4.4 考察

前節で示した結果を見ると，提案アルゴリズムによってマッチングを行ったものが最も安定性とインクルージョン性を満たしていた．インクルージョン性の指標を除いた場合と関連研究 [8] の手法を多対多のマッチングに対応させたものでは，少数のワーカにのみタスクが割り当てられたことから，インクルージョン性の指標が多対多のマッチングに大きな影響を与えていると考えられる．

表 4　ワーカ数 20，タスク数 15 の結果 () 内は希望タスク数

ワーカw	タスクt		
	提案手法	インクルージョン性の指標を除いたもの	[8]の手法
w1 (1)	t5	-	-
w2 (3)	t2,t3,t10	t5,t13	-
w3 (1)	t7	-	-
w4 (3)	t1,t8,t12	-	-
w5 (1)	t3	-	-
w6 (2)	t3,t5	t4	t4
w7 (1)	t11	-	-
w8 (2)	t1,t13	-	-
w9 (1)	t8	-	-
w10 (1)	t4	-	-
w11 (2)	t6,t15	-	-
w12 (1)	t9	-	-
w13 (1)	t13	t1	t1
w14 (2)	t6,t11	-	-
w15 (2)	t1,t6	-	-
w16 (3)	t14	-	t12
w17 (3)	t7,t13,t14	-	-
w18 (1)	t11	t14	t3
w19 (1)	t12	-	t13
w20 (1)	t9	t15	t1

表 5　ワーカ数 30，タスク数 25 の結果 () 内は希望タスク数

ワーカw	タスクt		
	提案手法	インクルージョン性の指標を除いたもの	[8]の手法
w1 (4)	t1,t6,t7	-	-
w2 (4)	t2,t5,t10,t20	t5,t13	-
w3 (5)	-	-	-
w4 (4)	t8,t13,t22	-	-
w5 (4)	t2,t15,t22	-	t1
w6 (2)	t2,t12	t4	-
w7 (1)	t12	-	-
w8 (1)	t7	-	-
w9 (1)	t7	-	-
w10 (1)	t6	-	-
w11 (1)	t8	-	-
w12 (2)	t1,t5	-	-
w13 (4)	t12,t19,t22	t1	t24
w14 (4)	t8,t12,t14,t23	-	-
w15 (4)	t4,t11,t15,t23	-	-
w16 (4)	t2,t8,t16	-	t12
w17 (4)	t9,t17	-	-
w18 (2)	t14,t15	t14	-
w19 (2)	t2,t9	-	-
w20 (5)	t5	t15	-
w21 (5)	t18	t16	-
w22 (5)	-	t17	-
w23 (3)	t8,t15,t23	t18	-
w24 (2)	t23,t24	t19	-
w25 (5)	t7	t20	t4
w26 (2)	t21,t22	t21	t19
w27 (5)	t18,t22	t22	-
w28 (5)	t15,t18,t25	t23	-
w29 (3)	t7,t17	t24	t15
w30 (5)	-	t25	t18

表 6　ワーカ数 40，タスク数 30 の結果 () 内は希望タスク数

ワーカw	タスクt		
	提案手法	インクルージョン性の指標を除いたもの	[8]の手法
w1 (3)	t4,t17,t26	-	t1
w2 (2)	t3,t9	t1	t2
w3 (5)	-	t25	-
w4 (4)	t2,t6,t11	-	-
w5 (3)	t3,t9,t26	t20	-
w6 (3)	t5,t19,t26	-	-
w7 (1)	t5	t26	t9
w8 (5)	-	t28	-
w9 (4)	t4,t23	t27	-
w10 (5)	t4	-	t10
w11 (1)	t6	-	-
w12 (4)	t6	-	-
w13 (3)	t6,t7,t22	-	-
w14 (1)	t7	t23	-
w15 (4)	t7,t15,t25	-	-
w16 (2)	t15,t16	-	-
w17 (1)	t4	-	t3
w18 (4)	t10	-	t15
w19 (4)	t5,t12	-	-
w20 (5)	t8	-	-
w21 (5)	t14,t27	-	-
w22 (5)	t15	-	-
w23 (1)	t20	-	t12
w24 (3)	t13,t24,t28	-	-
w25 (3)	t1,t14,t23	t6	-
w26 (4)	t15	-	-
w27 (4)	t8,t16,t29	-	t22
w28 (2)	t16,t25	-	-
w29 (3)	t5,t26,t28	-	-
w30 (2)	t7,t29	t4	-
w31 (1)	t28	-	-
w32 (1)	t29	-	-
w33 (3)	t1,t20,t29	-	t25
w34 (5)	t28	-	-
w35 (5)	t6,t26	-	-
w36 (3)	t15,t28,t30	-	-
w37 (2)	t16,t22	-	-
w38 (4)	t18,t21,t27	-	-
w39 (4)	t25,t30	t24	t16
w40 (5)	t23	-	t6

5　む　す　び

本論文では，安定性とインクルージョン性を考慮したマッチング手法として，各ワーカの選好と希望タスク数，各タスクの選好と受け入れ可能ワーカ数を踏まえたワーカ群とタスク群に対して，多対多のマッチングを得るアルゴリズムを提案した．最適化手法を，選好の和の最小値を求める最適化問題，インクルージョン性の指標の最大値を求める最適化問題，それらとの乖離の最小値を求める最適化問題の 3 段階に分けて使用することで上記の目的を満たすことを目指し，また片方の選好にマッチングが偏ることも避けるようにした．評価実験では，提案手法からインクルージョン性の指標を除いた場合，関連研究 [8] の手法を多対多のマッチングに対応させたものと比較して，提案手法が最も安定性とインクルージョン性の双方を満たすことが分かった．

今後の課題は，評価実験の際に明確になった，希望タスク数

5 のワーカに対してタスクの割り当てが十分でないということである．これは，原因は明らかではないが，希望タスク数を 6 以上にしても同様の傾向がみられた．また希望タスク数の最低値を大きくしていくと，マッチングの組がなかなか得られないということが起きた．ワーカ数とタスク数が増えるに応じて，希望タスク数と受け入れ可能ワーカ数を大きくしても安定性とインクルージョン性を満たす組が得られることが理想的であり，改良する必要がある．加えて，提案アルゴリズムでは,「ワーカ数がタスク数以上である」という条件の下でしか機能しなかった．これはタスク数がワーカ数以上であると，一部の制約において，アルゴリズムが機能しないためである．しかし，ワーカ数とタスク数のどちらの方が多い場合でも，マッチングの結果を得られるようにすることが望ましい．よって以上の状況においても対応できるように，アルゴリズムを見直す必要がある．

また，本研究では，ワーカとタスクのそれぞれが選好を持っているという前提でしか考察されていない．しかし，クラウドソーシングにおいては，タスクが必ず選好をもつという前提は必ずしも成り立たないと考えられる．さらに，個々のタスクを独立したものとして考えているが，実際のタスクには互いに依存関係があり，それらを考慮することでより効率よくタスクを処理可能な割り当てが得られると考えられる．具体的には，例えば,「日本語の音声を英語の文章に変換する」というワークフローがあり，日本語と英語の両方を理解できるという人がいる場合,「日本語の音声を日本語の文章にする」というタスクと「日本語の文章を英語に変換する」というタスクの 2 つのタスクを続けてこなしてもらう方が効率が良くなる．今後は，以上の課題解決を行ったアルゴリズムを考案予定である．

6 参考文献

文 献

[1] D. Gale, L. S. Shapley. College admissions and the stability of marriage. The American Mathematical Monthly, 1962, Vol. 69, No. 1, p. 9-15.

[2] A. E. Roth. A natural experiment in the organization of entry-level labor markets: regional markets for new physicians and surgeons in the United Kingdom. The American Economic Review, 1991, Vol. 81, No. 3, p. 415-440.

[3] 宮崎修一. “第 1 章　安定マッチングとは”. 安定マッチングの数理とアルゴリズム　トラブルのない配属を求めて. 現代数学社, 2018, p. 8.

[4] “組合せ決定のアルゴリズム図解”. 医師臨床研修マッチング協議会. https://jrmp2.s3-ap-northeast-1.amazonaws.com/distribution/matching.html, (2021-01-08).

[5] H. Hashimoto, M. Matsubara, Y. Shiraishi, D. Wakatsuki, J. Zhang, A. Morishima. “A Task Assignment Method Considering Inclusiveness and Activity Degree”. Seattle, WA, USA, 2018-10-10/13, IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2018, p. 3498-3503.

[6] 寒野善博. 最適化手法入門. 講談社, 2019, p. 1-7, 11-17, 177-189, 209-213.

[7] 山口大河, 鈴木伸崇. “ マイクロタスク型クラウドソーシングにおけるワーカの希望タスク数を考慮したタスク割当て手法 ”. DEIM Forum, 2021-01-24, 2021.

[8] M. Gharote, N. Phuke, R. Patil, S. Lodha. Multi-objective stable matching and distributional constraints. Soft Computing. 2019, No. 23, p. 2995-3011.

[9] 久保幹雄，ペドロソ ジョア・ペドロ，村松 正和，レイス アブドル．“第 1 章　数理最適化入門”．あたらしい数理最適化 Python 言語と Gurobi で解く．近代科学社，2002，p. 3，29.