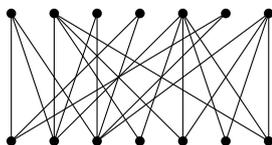


提出締切：2021年6月11日 12:59

授業内問題 8.1 次の図に示す二部グラフは完全マッチングを持たない。なぜ完全マッチングを持たないのか、次に挙げる方法を用いて説明せよ。



1. 頂点被覆を挙げることによって。
2. 結婚条件を満たさない頂点部分集合を挙げることによって。

授業内問題 8.2 1以上の任意の整数 d を考える。二部グラフ $G = (V, E)$ のすべての頂点の次数が d であるとする (つまり、 G は d 正則二部グラフである)。

1. G の2つの部集合を A と B とするとき、 $|A| = |B|$ が成り立つことを証明せよ。
2. G が完全マッチングを持つことを証明せよ。(Hallの結婚定理を用いてもよい。)

復習問題 8.3 König-Egerváry の定理は「任意の二部グラフ $G = (V, E)$ において、 G の最大マッチング M と G の最小頂点被覆 $C \subseteq V$ が $|M| = |C|$ を満たす」ことを主張している。以下の手順にしたがって、König-Egerváry の定理を証明せよ。

- (1) 二部グラフ G の部集合を A, B とする。このとき、 G から次の有向グラフ $G' = (V', A')$ を構成する。すなわち、 $V' = V \cup \{s, t\}$ であり、

$$A' = \{(u, v) \mid \{u, v\} \in E, u \in A, v \in B\} \cup \{(s, u) \mid u \in A\} \cup \{(v, t) \mid v \in B\}$$

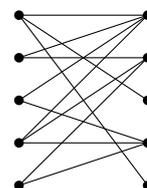
とするのである。また、 G' の各弧 $(x, y) \in A'$ の容量を

$$c((x, y)) = \begin{cases} 1 & (x = s \text{ または } y = t \text{ のとき}), \\ \infty & (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

と定める。(ただし、 ∞ は十分大きな整数を表す記号であるとする。) G' において最大 s, t 流の値が G の最大マッチングの辺数以下であることを証明せよ。(ヒント：整数流定理を用いよ。)

- (2) 問 (1) で構成した有向グラフ G' と弧容量に対して、 G' における最小 s, t カットの容量が G の最小頂点被覆の頂点数以上であることを証明せよ。
- (3) 最大マッチングと最小頂点被覆に対する弱双対性と最大 s, t 流と最小 s, t カットに対する強双対性を用いて、König-Egerváry の定理の証明を完結せよ。

復習問題 8.4 次の図に示す二部グラフは完全マッチングを持たない。なぜ完全マッチングを持たないのか、次に挙げる方法を用いて説明せよ。

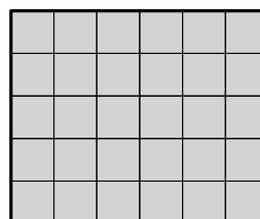


1. 頂点被覆を挙げることによって。
2. 結婚条件を満たさない頂点部分集合を挙げることによって。

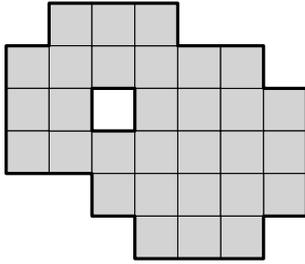
復習問題 8.5 任意の二部グラフ $G = (V, E)$ を考え、その部集合は A, B であるとする。このとき、 G が A の頂点をすべて飽和するマッチングを持つための必要十分条件は、任意の $S \subseteq A$ に対して、 $|S| \leq |N_G(S)|$ が成り立つことである。これを証明せよ。(ヒント：十分性の証明に、König-Egerváry の定理を用いてもよい。)

復習問題 8.6 トランプ・カードの1デッキには、各ランク (A, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, J, Q, K) のカードが4枚ずつ存在する。つまり、カードの総枚数は52である。この52枚のカードを4枚ずつ13個の組へ任意に分けたとき、各組から1枚ずつカードをうまく選ぶと、すべてのランクのカードを取り出せることを証明せよ。

復習問題 8.7 次の灰色の部分で表された盤面に 1×2 の長方形をいくつか重なりあうことなく置くことで、この盤面全体を敷き詰めることができるだろうか？理由も付けて答えよ。



復習問題 8.8 次の灰色の部分で表された盤面に 1×2 の長方形をいくつか重なりあうことなく置くことで、この盤面全体を敷き詰めることができるだろうか？ 理由も付けて答えよ。



復習問題 8.9 4×4 の正方格子状の盤面上で行う次の二人ゲームを考える。先手と後手が交互に 1 マスずつ選択する。既に選択されたマスを選択することはできない。先に、縦の 1 列か横の 1 列に並ぶ 4 マスを選択した人が勝利する。

このゲームにおいて、後手は、自身が負けないようにマスを選択できることを証明せよ。

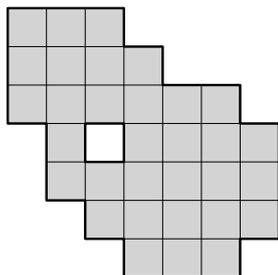
補足問題 8.10 演習問題 8.9 のゲームにおいて、先手は、自身が負けないようにマスを選択できることを証明せよ。

補足問題 8.11 演習問題 8.9 のゲームの変種として、先に、縦の 1 列か横の 1 列か斜めの 1 列に並ぶ 4 マスを選択した人が勝利するゲームを考える。

1. このゲームにおいて、先手は、自身が負けないようにマスを選択できることを証明せよ。
2. このゲームにおいて、後手は、自身が負けないようにマスを選択できることを証明せよ。(ヒント：先手の 1 手目においては、全通りの可能性を考えよ。その後、後手の 1 手目をうまく選択することで、演習問題 8.9 と同様の論法を用いてみよ。)

追加問題 8.12 二部グラフ $G = (V, E)$ の辺数を m とし、最大次数を $\Delta \geq 1$ とする。König-Egerváry の定理を用いて、 G が辺数 m/Δ 以上のマッチングを持つことを証明せよ。

追加問題 8.13 次の灰色の部分で表された盤面に 1×2 の長方形をいくつか重なりあうことなく置くことで、この盤面全体を敷き詰めることができるだろうか？ 理由も付けて答えよ。



追加問題 (発展) 8.14 実正方行列 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ が二重確率行列であるとは、 A の任意の成分が非負であり、 A のどの行の成分和、どの列の成分和も 1 であることである。二重確率行列が置換行列であるとは、その成分がどれも 0 か 1 であることである。

任意の二重確率行列 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ に対して、ある自然数 m と非負実数 c_1, \dots, c_m , 置換行列 P_1, \dots, P_m が存在して、

$$A = c_1 P_1 + \dots + c_m P_m \quad \text{かつ} \quad c_1 + \dots + c_m = 1$$

が成り立つことを証明せよ。例えば、

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/3 & 1/6 \\ 0 & 1/6 & 5/6 \\ 1/2 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

という等式が成立する。(ヒント： A における非零成分の数に関する数学的帰納法を用いてもよい。そのとき、Hall の結婚定理が使えるか考えてみよ。) (補足：これは、バーコフ・フォンノイマンの定理と呼ばれ、最適化理論において重要な役割を果たしている。)