

ハイパーグラフにおける完全マッチングについて

東大・理 宮本 敬士 (Takashi Miyamoto)

ここでは, (2-) グラフにおけるHallの定理の, ハイパーグラフへのある種の拡張について述べる。これは, R. Aharoni [1] の予想として知られているものである。結果的には, Aharoniの予想は特別な場合にのみ解けたが, 一般の場合にはなお未解決である。

最初に, Hallの定理について簡単に触れておく。グラフ G としては単純二部グラフを考えることにして, G の部集合を V_1 と V_2 で表す。 G のマッチングとは, 互いに頂点を共有しない辺の集合のことをいう。 G のマッチングが, $|V_1|$ 本の辺を含んでいるとき, V_1 からの完全マッチングであるという。さらに, G の頂点集合 ($V(G)$ と表す) の部分集合 S に対して, S の隣接点集合 $\Gamma(S)$ を, $\Gamma(S) := \{y \in V(G) \mid xy \in E(G) \text{ for some } x \in S\}$ と定義する。($E(G)$ は G の辺集合である。)

Hallの定理を以下に示す。

(定理 Hall)

$\forall S \subseteq V_1; r(S) \geq |S| \iff G$ に V_1 からの完全マッチングが存在する。

このようにHallの定理は、二部グラフにおいて、 V_1 からの完全マッチングが存在するための必要十分条件を与えるものである。この定理をハイパーグラフに拡張する場合（ただし後述のように「十分性」の部分のみの拡張であるが）、対象となるハイパーグラフは、二部グラフに相当するような構造を持つものでなければならない。

今後は、 n -partite n -graphと呼ばれる、ハイパーグラフの族のみを考える。ハイパーグラフ H が n -partite n -graph であるとは

$$H := (V(H), E(H))$$

$$V(H) = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_n \text{ (disjoint)}$$

$$E(H) \subseteq V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$$

と表し得る場合をいう。二部グラフの場合と同様に、 H のマッチングとは、互いに頂点を共有しない辺の集合のことである。 H のマッチングのうち、含まれている辺の数が最大なものを、 H の最大マッチングといい、 H の最大マッチングに含まれている辺の数を $\nu(H)$ で表す。また、 H のマッチングが

$|V_1|$ 本の辺を含んでいるとき, V_1 からの完全マッチングであるという。 n -partite n -graphの定義より, H に V_1 からの完全マッチングが存在すれば, それは H の最大マッチングである。従って, H に V_1 からの完全マッチングが存在することと, $\nu(G) = |V_1|$ となることは同値である。以後, 「 V_1 からの完全マッチング」を, 単に完全マッチングと呼ぶことにする。

$S \subseteq V_1$ に対して, $N(S) := \{(v_2, \dots, v_n) \mid (a, v_2 \dots v_n) \in E(H) \text{ for some } a \in S\}$ と定義する。(ただし, $n \geq 2$ とする) すなわち, $N(S)$ とは, S に属する頂点を通る H の辺のそれぞれを, $V_2 \times \dots \times V_n$ に制限したものの集合である。さらに, $\Gamma(S)$ とは, 頂点集合が $V_2 \cup \dots \cup V_n$, 辺集合が $N(S)$ であるようなハイパーグラフであると定義する。 $(n \geq 2)$ 明らかに, $\Gamma(S)$ は $(n-1)$ -partite $(n-1)$ -graphになっている。

そこで, H に完全マッチングが存在するための十分条件を考える。Hallの定理は $n=2$ すなわち 2-partite 2-graphの場合に相当するわけだが, この定理の条件を, 次のように表すことができる。

$$\forall S \subseteq V_1; \nu(\Gamma(S)) \geq |S| \quad \text{--- (*)}$$

($n=2$ だから, $\Gamma(S)$ は 1-partite 1-graphとなる。 $\nu(\Gamma(S))$ は, $\Gamma(S)$ の頂点数(=辺数) に等しい。)

しかしながら, (*)は $n \geq 3$ では十分条件にはなり得ない。

例えば,

$$H = (V(H), E(H)), \quad V(H) = V_1 \cup V_2 \cup V_3$$

$$V_1 = \{a_1, a_2\}, \quad V_2 = \{b_1, b_2\}, \quad V_3 = \{c_1, c_2\}$$

$$E(H) = \{(a_1, b_1, c_1), (a_1, b_2, c_2),$$

$$(a_2, b_2, c_1), (a_2, b_1, c_2)\}$$

とすると, H は 3-partite 3-graph であり, 明らかに (*) が満たされているが, H は完全マッチングを持たない。同様な例を $m \geq 4$ で作ることは容易である。

従って, $m \geq 3$ では, 完全マッチングが存在するための ($\nu(\Gamma(S))$ に関する) 十分条件は, $\nu(\Gamma(S)) > |S|$ を満たすものでなければならない。

Aharoni の予想は, 次の通りである。

(予想 R. Aharoni [1])

$$\forall S \subseteq V_i; \nu(\Gamma(S)) \geq (m-1)(|S|-1) + 1 \quad \dots (**)$$

$$(m \geq 2)$$

$$\implies \nu(H) = |V_i|$$

$m=2$ ならば Aharoni の予想する十分条件は (*) に一致している。この予想によると, $\Gamma(S)$ で最低必要とされる最大マッチングの値は, $|S|$ が 1 増加するのに対して, $m-1$ の割合で増加する。これは, (*) での増加の割合に対して, 非常に急激である。しかし, もしこの予想が正しいければ, (**) は sharp な条件であることが, 次の例により示される。

(例) $H = (V(H), E(H))$

$$V(H) = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_m \quad (m \geq 2)$$

$$V_1 = \{a_i^1 \mid 1 \leq i \leq \ell\} \quad (\ell \geq 2)$$

$$V_k = \{a_{ij}^k \mid 1 \leq i \leq \ell-1, 1 \leq j \leq m-1\} \quad (2 \leq k \leq m)$$

$$E(H) = \bigcup_{i=1}^{\ell-1} \{(a_i^1, a_{i,j}^2, \dots, a_{i,j}^m) \mid 1 \leq j \leq m-1\} \\ \cup \{(a_{i+1}^1, a_{i,1}^2, \dots, a_{i,m-1}^m) \mid 1 \leq i \leq \ell-1\}$$

この例では、 H は m -partite m -graph であり、 $S = V_1$ の場合を除いて $(**)$ が満たされている。しかし、 H には完全マッチングが存在しない。

今回は、Aharoni の予想の証明を試みたが、部分的な結果を得るにとどまった。証明の方針として考えられるのは、 $|V|$ に関する帰納法を用いることであるが、後述の、 $|V|$ が小さい場合の証明が示す通り、 $|V|$ が増えるにつれて、議論が急に複雑になるのである。

(定理) $|V_i| \leq 4, \quad m \geq 2,$

$$\forall S \subseteq V_1; \nu(\Gamma(S)) \geq (m-1)(|S|-1) + 1$$

$$\implies \nu(H) = |V_1|$$

(証明)

$|V_1| = 1$ の場合. 自明である。

$|V_1|=2$ の場合。 $V_1=\{a_1, a_2\}$ とする。

定理の仮定により、 $\Gamma(V_1)$ には、 n 本以上の辺からなるマッチングが存在する。このマッチングの中に、 H において、 a_1 を通る辺と a_2 を通る辺がそれぞれ存在するならば、 H には完全マッチングが存在する。従って、これらの辺は、すべて a_1 を通るとしてよい。「 $|V_1|=1$ の場合」に定理は正しいので、 H には a_2 を通る辺が存在するが、この辺は、先に述べたマッチングのすべての辺と交わることができない。(マッチングの中には、この辺と交わらない辺が、少なくとも1本は存在する。)それゆえ、 H には完全マッチングが存在する。

$|V_1|=3$ の場合。 $V_1=\{a_1, a_2, a_3\}$ とする。

$\Gamma(V_1)$ には、 $(2n-1)$ 本以上の辺からなるマッチングが存在する。これらの辺は、 H では a_1 または a_2 を通るとしてよい。このマッチングの中で、 H において a_1 を通る辺全体の集合を F_1 、 a_2 を通る辺全体の集合を F_2 で表す。(F_1, F_2 は、 H の辺の集合として考えている。) $|F_1|+|F_2| \geq 2n-1$ なので、一般性を失わず、 $|F_1| \geq n$ としてよい。「 $|V_1|=2$ の場合」に定理は正しいので、 H には、 a_2 を通る辺と a_3 を通る辺で、互いに頂点を共有しないものがある。前者を f_2 、後者を f_3 とする。 f_3 と交わらない辺が F_2 に存在すれば、 $|F_1| \geq n$ なので、 F_1 に属する辺で f_3 と交わらないものがあるゆえ、 H に完全マッチングが存在す

る。従って、 f_3 は F_2 に属する辺すべてと交わっている（このことを、「 f_3 が F_2 をcoverする」と言う。正確には、ある辺集合 $\{g_1, \dots, g_m\}$ が別の辺集合 $\{h_1, \dots, h_m\}$ をcoverするとは、「任意の $h_i \in \{h_1, \dots, h_m\}$ に対して、ある $g_j \in \{g_1, \dots, g_m\}$ が存在し、 h_i と g_j が $V_2 \cup \dots \cup V_m$ に属する頂点で交わる」ということである。）としてよい。さて、 $F_1 \cup F_2$ の辺の中で、別の一辺からcoverされるのは、高々 $n-1$ 本であることに注意しよう。ゆえに、 $\{f_2, f_3\}$ によってcoverされる $F_1 \cup F_2$ の辺は、高々 $2n-2$ 本である。一方、 $|F_1 \cup F_2| \geq 2n-1$ であり、 f_3 は F_2 をcoverしているので、 F_1 には $\{f_2, f_3\}$ によってcoverできない辺がある。ゆえに、 H には完全マッチングが存在する。

$|V_1|=4$ の場合。 $V_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ とする。

$E_i := \{e \mid e \in E(H), e \text{ は } a_i \text{ を通る}\}$ ($i=1 \dots 4$) とする。 $\Gamma(V_1)$ には、 $3n-2$ 本以上の辺からなるマッチングがある。これらの辺は、 H では、 a_1, a_2, a_3 のいずれかを通るとしてよい。先と同様に F_1, F_2, F_3 を定める。（ $|F_1| \geq n$ としてよい。）「 $|V_1|=3$ の場合」に定理は正しいので、 H には、 a_2 を通る辺（ f_2 とおく）、 a_3 を通る辺（ f_3 ）、 a_4 を通る辺（ f_4 ）で、互いに交わらないものがある。 f_4 は、一般性を失わず、 F_3 をcoverしているとしてよい。

$\{f_3, f_4\}$ で F_1 も F_2 もcoverしなければ、明らかに H には完

全マッチングが存在する。 $\{f_3, f_4\}$ が F_2 を cover していれば、 $\{f_2, f_3, f_4\}$ によって cover される $F_1 \cup F_2 \cup F_3$ の辺は、高々 $3n-3$ 本であり、一方、 $|F_1 \cup F_2 \cup F_3| \geq 3n-2$ 、かつ、 $\{f_3, f_4\}$ が $F_2 \cup F_3$ を cover しているので、 $\{f_2, f_3, f_4\}$ は F_1 を cover しない。従って、 H には完全マッチングが存在する。以上のことから、 $\{f_3, f_4\}$ が F_1 を cover しているとしてよい。この結果、次のことがわかる。

- ① $|F_2| \geq n$ ($\{f_3, f_4\}$ が $F_1 \cup F_3$ を cover している)
- ② E_4 に属する任意の辺は、 F_3 を cover するとしてよい。
- ③ E_1 に属する任意の辺は、 f_3 または f_4 と交わるとしてよい。

定理の仮定により、 $\Gamma(\{a_1, a_3, a_4\})$ には $2n-1$ 本からなるマッチングが存在する。このマッチングを L とし、 $L_i := L \cap E_i$ と定める。

まず、③より、 $|L_1| \leq 2n-2$... ④ である。

次に、 $|L_1 \cup L_3| \geq 2n-1$ と仮定する。④より、 L_3 は空ではない。 f_4 が L_3 を cover したとすると、③より、 $\{f_3, f_4\}$ が $L_1 \cup L_3$ を cover することになって、仮定に反する。従って、 L_3 の元 l_3 で、 f_4 に交わらないものがある。このようなすべての元 l_3 について、 $\{l_3, f_4\}$ は F_1 を cover するとしてよい。

(F_2 を cover したとすると、 $\{l_3, f_3, f_4\}$ が $F_1 \cup F_2 \cup F_3$ を

coverすることになり、矛盾である。) しかしながら、 $|F_1| \geq n$ なので、 F_1 には、 f_4 で cover できない辺 d_0 がある。ゆえに、 $\{f_4, d_0\}$ が L_3 を cover する。

さて、 L_1 の元 l_i で、 f_4 と交わらないものがあるとする。 $\{l_i, l_3, f_4\}$ は、互いに交わらない辺の集合で、 $F_1 \cup F_3$ を cover する。従って、 F_2 は cover できないゆえ、 H に完全マッチングが存在する。だから、 L_1 の元は f_4 と交わるとしてよい。

結局、 $\{f_4, d_0\}$ が $L_1 \cup L_3$ を cover することになり、仮定 $|L_1 \cup L_3| \geq 2n-1$ に反する。それゆえ、 $|L_1 \cup L_3| \geq 2n-1$ ならば H は完全マッチングを持つ。

この結果、 $|L_1 \cup L_3| \leq 2n-2$ としてよい。同様な議論で、 $|L_1 \cup L_4| \leq 2n-2$ としてよいことが言える。一方、 $|L_1 \cup L_3 \cup L_4| = |L| \geq 2n-1$ なので、 L_3, L_4 は空ではない。

③より、 L_1 に属する任意の辺は、 f_3 または f_4 と交わる。従って、「 f_4 に交わらない L_3 の元 l_3 が存在する。」「 f_3 に交わらない L_4 の元 l_4 が存在する」のうち、少なくとも一方が成立する。どちらが成立したとしても、同様な議論が可能なので、ここでは前者の場合のみを示す。

まず、 $\{l_3, f_4\}$ は F_1 を cover するとしてよい。 $(|L_1 \cup L_3| \geq 2n-1$ の場合と同じ議論が使える) また、②より、 L_4 に属

する任意の辺 l_4 は, F_3 を cover する。従って, $\{l_3, l_4\}$ は F_1 を cover するとしてよい。(F_2 を cover したとすると, $\{l_3, l_4, f_4\}$ で $F_1 \cup F_2 \cup F_3$ を cover することになって矛盾である) さらに, L_3 に属する任意の辺 l_3 について, $\{l_3, l_4\}$ は F_1 を cover するとしてよい。(F_2 を cover するならば, $\{l_3, l_3', l_4\}$ を考えれば矛盾)

ここで, $L_1 = \emptyset$ と仮定する。適当に L_3 と L_4 の元を一つずつ取ってくると, この二本で $F_1 \cup F_3$ を cover しているので, L_1 の元は F_2 を cover することはなく, H に完全マッチングが存在する。ゆえに, $L_1 = \emptyset$ としてよい。

L_3 の任意の辺を l_3 , L_4 の任意の辺を l_4 とする。すでに示したように, $\{l_3, l_4\}$ は F_1 を cover するが, $|F_1| \geq n$ なので, F_1 には, l_3 と交わらない辺 d_1 , l_4 と交わらない辺 d_1' が存在する。 d_1 は L_4 を cover し, d_1' は L_3 を cover する。また, $L_1 = \emptyset$ である。以上のことにより, $\{d_1, d_1'\}$ は L を cover し, $|L| \leq 2n-2$ となって, 矛盾である。

この結果, $|V|=4$ の場合も, 定理が正しいことが示された。

(証明終)

[参考文献]

- [1] R. Aharoni, Matchings in n -Partite n -Graphs, Graphs and Combinatorics, 1(1985), 303-304.