

『離散構造』 5 章の例題 (の一部) の解答例

例題 1 (グラフと二項関係)

二項関係は、それを図形で表現することにより、有向グラフと見なせる。すなわち、集合 A 上の二項関係 R があれば、頂点の集合を A とし、辺の集合を R とする有向グラフが考えられる。逆に、有向グラフがあれば、それに対応する二項関係を考えることができる。

例えば、講義資料 35 ページの例 76 の有向グラフは、集合 $\{1, 2, 3, 4\}$ 上の二項関係 R として、以下のように定義できる。

$$R = \{\langle 1, 2 \rangle, \langle 2, 3 \rangle, \langle 3, 1 \rangle, \langle 3, 4 \rangle\}$$

集合 $V = \{x \in \mathcal{N} \mid 0 < x < 10\}$ 上の二項関係として以下のものを考えるとき、それぞれに対応する有向グラフを図示せよ。

$$R_1 = \{\langle x, y \rangle \in V \times V \mid x \leq y\}$$

$$R_2 = \{\langle x, y \rangle \in V \times V \mid (x - 5.5)(y - 5.5) < 0\}$$

$$R_3 = \{\langle x, y \rangle \in V \times V \mid (x - y) \text{ は } 3 \text{ で割り切れる} \}$$

また、それぞれのグラフのサイズ、位数、強連結成分の数を答えよ。ただし、強連結成分というのは、「部分グラフのうち、強連結なもの」であり、「強連結なグラフ」とは、「どの 2 つの頂点 x, y に対しても、 x から y への道も y から x への道もあるグラフ」である。

(答: 図示は省略; 後半のみ)

R_1 に対応するグラフは、 $1 \leq x \leq y \leq 9$ となる x から y への辺がある有向グラフであり、辺の本数は $(1 + 2 + 3 + \cdots + 9) = 45$ 本ある。つまり、サイズは 45 である。位数 (頂点数) は 9 である。このグラフでは、 $x < y$ のとき y から x へ行く道はないので、「強連結な部分グラフ」は、各頂点 1 個だけからなるグラフだけである。つまり、「頂点 1 だけからなるグラフ」、「頂点 2 だけからなるグラフ」、...、「頂点 9 だけからなるグラフ」が、それぞれ強連結成分であり、9 個となる。

R_2 に対応するグラフは、 $1 \leq x \leq 5$ かつ $6 \leq y \leq 9$ となる x から y へ、また、 y から x への辺がある有向グラフである。つまり、辺の本数は $5 * 4 * 2 = 40$ である。位数 (頂点数) は 9 である。このグラフは、完全 2 部グラフであり、頂点 1, 2, 3, 4, 5 と頂点 6, 7, 8, 9 は全てつながっている。したがって、どの頂点から他のどの頂点に行く道もあるので、全体が強連結である。よって、強連結成分は 1 個である。

R_3 に対応するグラフは、1, 4, 7 は全ての頂点間に辺があり、2, 5, 8 も同様、3, 6, 9 も同様である。よって、辺の本数は $3 * 3 * 3 = 27$ である。位数 (頂点数) は 9 である。このグラフの強連結成分は、3 つである。

例題 2 (木)

- 木の頂点の個数を n とすると、辺の本数は何本あるか答えよ。

(答) これは授業で説明したように、木の形状によらず、辺は $n - 1$ 本ある。証明は省略。

- 高さ h の完全 2 分木の頂点の個数は、何個以上何個以下であるか答えよ。ただし、高さ h の完全 2 分木とは、深さ 0 以上 $h - 1$ 以下の全ての頂点が 2 個の子を持つ木である。

(答) 完全 2 分木は、全ての葉の「深さ」(根からの距離) が同じ 2 分木であり、木の高さ (葉の深さの最大値) が h ということは、全ての葉の深さは h である。よって、頂点の個数は、 $1 + 2 + 2^2 + \cdots + 2^h = 2^{h+1} - 1$ である。

- 高さ h の 3 分木 (完全 3 分木とは限らない) の頂点の個数は、何個以上何個以下であるか答えよ。

(答) 3 分木の中で、一番頂点が少ないのは、葉が 1 つだけ (根から葉まで一直線になっている) 木であり、これは実際には「1 分木」と言うべきものだが、一応、3 分木の中にもはいる。この木の頂点の個数は、明らかに $h + 1$ である。

3 分木の中で、一番頂点が多いのは、完全 3 分木であり、これは、前問と同様に考えると、頂点数は、 $1 + 3 + 3^2 + \cdots + 3^h = \frac{3^{h+1} - 1}{2}$ となる。

- 頂点が n 個ある木で、互いに異なるものはいくつあるか？ $n = 3, 4$ に対して答えなさい。

(答) この種の問題は、意外に難しい。ここでは、素朴に $n = 1, 2, 3, 4$ の順番に木を作っていくことにする。
(位数 n の木は、かならず、位数 $n - 1$ の木に頂点と辺を 1 つずつ追加した形をしているので、下から順番に作っていくことができる。)

$n = 1$ のとき: 根だけからなる木になるので、1 個だけである。

$n = 2$ のとき: これも根と葉が 1 個だけからなる木であり、1 個だけである。

$n = 3$ のとき: 根から一直線に葉まで延びていく木のほか、根が 2 つの子を持つケースがあり、2 個ある。

$n = 4$ のとき: $n = 3$ の木に、1 個の頂点と 1 本の辺を追加することを考えると、高さ 3 の木が 1 つ、高さ 2 の木が 3 つ、高さ 1 の木が 1 つでき、合計で 5 個である。

(注: 当初は、 $n = 5$ のケースも書いていたが、かなりごちゃごちゃした議論になり、素朴な方法でひたすら数えあげるのは、この授業の趣旨にあわないので、 $n = 4$ までとする。)