離散数学 第 16 回
補講：グラフ

岡本 吉央
okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2015 年 7 月 31 日

最終更新：2015 年 7 月 31 日　14:43

スケジュール 前半

1. 集合と論理 (1)：命題論理 (4 月 10 日)
2. 集合と論理 (2)：集合と論理の対応 (4 月 17 日)
3. 集合と論理 (3)：述語論理 (4 月 24 日)
4. 証明法 (1)：∃と∀を含む命題の証明 (5 月 1 日)
5. 証明法 (2)：含意を含む命題の証明 (5 月 8 日)
6. 集合と論理 (4)：直積と冪集合 (5 月 15 日)
7. 証明法 (3)：集合に関する証明 (5 月 22 日)
8. 写像 (1)：像と逆像 (5 月 29 日)
9. 写像 (2)：全射と単射 (6 月 5 日)

- 中間試験 (6 月 12 日)

スケジュール 後半

10. 関係 (1)：関係 (6 月 19 日)
11. 関係 (2)：同値関係 (6 月 26 日)
12. 関係 (3)：順序関係 (7 月 3 日)
13. 関係 (4)：関係の閉包 (7 月 10 日)
14. 証明法 (4)：数学的帰納法 (7 月 17 日)
15. 集合と論理 (5)：集合の再帰的定義 (7 月 24 日)

- 補講：グラフ (西 8-131) (7 月 31 日)
- 期末試験 (西 8-131) (8 月 7 日)

今日の概要

この講義の目標

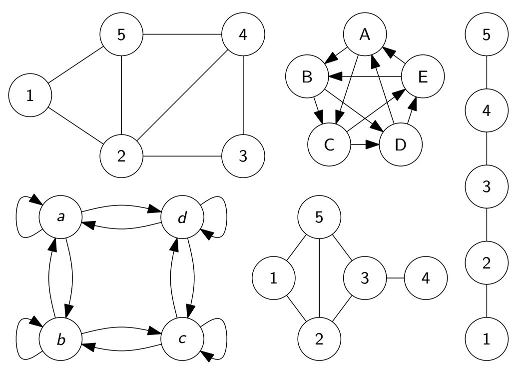
- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- グラフの定義を理解し，グラフに関する用語を正しく用いることができるようになる
- グラフの同型性を理解し，同型であるか判定できるようになる

目次

グラフの例



有向グラフ

有向グラフとは？

有向グラフとは，順序対 (V, A) で，

- V は集合
- $A \subseteq V \times V$ は V の順序対の集合

であるもののこと

例：

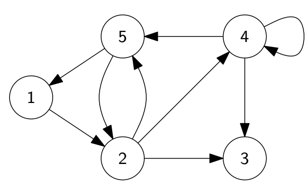
- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $A = \{(1, 2), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (5, 1), (5, 2)\}$

注意

$(1, 2) \neq (2, 1)$

有向グラフの図示

- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $A = \{(1, 2), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (5, 1), (5, 2)\}$



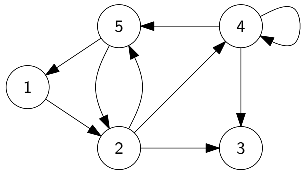
有向グラフの用語

有向グラフ $G = (V, A)$

有向グラフの用語

- V の要素を G の頂点と呼ぶ
- A の要素を G の弧と呼ぶ
- V を G の頂点集合と呼ぶ
- A を G の弧集合と呼ぶ
- 弧 $(u, v) \in A$ に対して，u はその始点であり，v はその終点である

- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $A = \{(1, 2), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (4, 3), (4, 4), (4, 5), (5, 1), (5, 2)\}$
- 頂点 2 は弧 $(2, 3)$ の始点，頂点 3 は弧 $(2, 3)$ の終点



無向グラフ

無向グラフとは？

無向グラフとは，順序対 (V, E) で，
- V は集合
- $E \subseteq 2^V$ は V の要素数 2 の部分集合の集合

であるもののこと

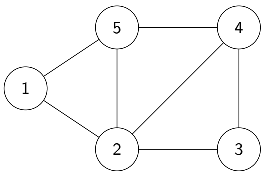
例：
- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $E = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}$

注意

$\{1, 2\} = \{2, 1\}$

無向グラフの図示

- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $E = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}$



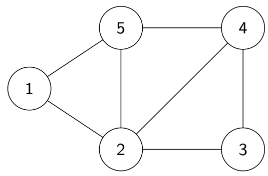
無向グラフの用語

無向グラフ $G = (V, E)$

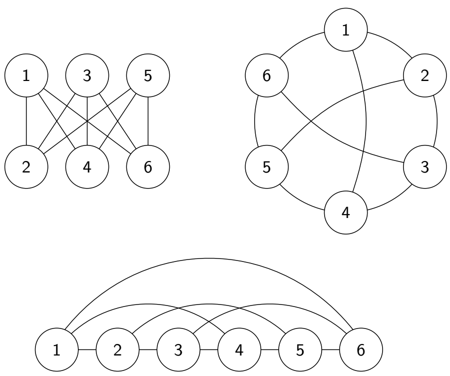
無向グラフの用語

- V の要素を G の頂点と呼ぶ
- E の要素を G の辺と呼ぶ
- V を G の頂点集合と呼ぶ
- E を G の辺集合と呼ぶ
- 辺 $\{u, v\} \in E$ に対して，u, v をその端点と呼ぶ

- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $E = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}$
- 頂点 $2, 3$ は辺 $\{2, 3\}$ の端点



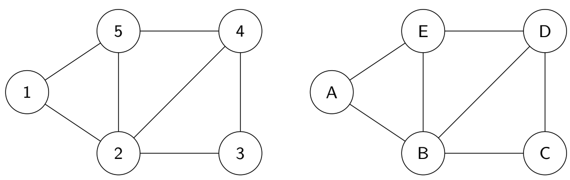
1 つのグラフに対するいろいろな図示



目次

「同じ」グラフとは？ (1)

次の 2 つのグラフを見てみる



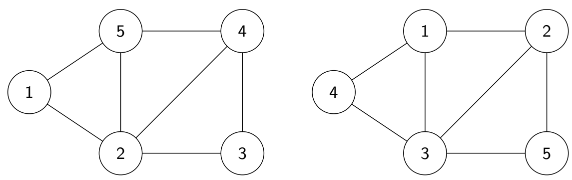
- 頂点同士の「つながり方」は同じである
- しかし，頂点集合，辺集合は異なる
- したがって，この 2 つは「同じグラフではない」

でも「同じであると見なしたい」

そうなるような同値関係を与えてみる

「同じ」グラフとは？ (2)

次の 2 つのグラフを見てみる



- 頂点同士の「つながり方」は同じである
- しかし，辺集合は異なる
- したがって，この 2 つは「同じグラフではない」

でも「同じであると見なしたい」

そうなるような同値関係を与えてみる

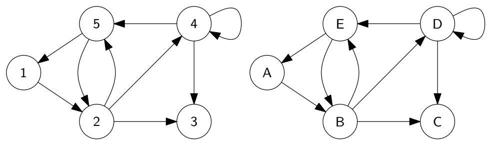
同型写像 (有向グラフの場合)

2 つの有向グラフ $G_1 = (V_1, A_1)$, $G_2 = (V_2, A_2)$

同型写像とは？

G_1 から G_2 への**同型写像**とは，全単射 $\varphi\colon V_1 \to V_2$ で次を満たすもの

- 任意の頂点 $u, v \in V_1$ に対して，
$$(u, v) \in A_1 \quad \Leftrightarrow \quad (\varphi(u), \varphi(v)) \in A_2$$



$\varphi(1) = \mathrm{A}, \varphi(2) = \mathrm{B}, \varphi(3) = \mathrm{C}, \varphi(4) = \mathrm{D}, \varphi(5) = \mathrm{E}$

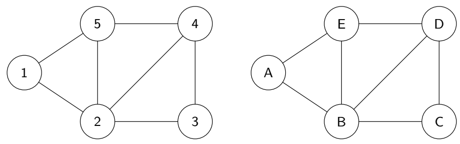
同型写像 (無向グラフの場合)

2 つの無向グラフ $G_1 = (V_1, E_1)$, $G_2 = (V_2, E_2)$

同型写像とは？

G_1 から G_2 への**同型写像**とは，全単射 $\varphi\colon V_1 \to V_2$ で次を満たすもの

- 任意の頂点 $u, v \in V_1$ に対して，
$$\{u, v\} \in E_1 \quad \Leftrightarrow \quad \{\varphi(u), \varphi(v)\} \in E_2$$



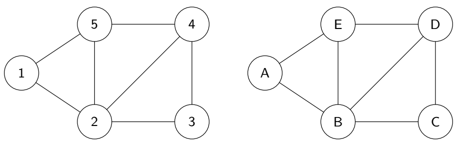
$\varphi(1) = \mathrm{A}, \varphi(2) = \mathrm{B}, \varphi(3) = \mathrm{C}, \varphi(4) = \mathrm{D}, \varphi(5) = \mathrm{E}$

同型なグラフ

同型なグラフとは？

G_1 から G_2 への同型写像が存在するとき，
G_1 と G_2 は**同型**であるといい，
$$G_1 \simeq G_2$$
と書き表す

次の 2 つのグラフは同型



同型である，という関係は同値関係

Γ を「すべての無向グラフを要素として持つ集合」とする

- 「$\simeq$」は Γ 上の関係

$\simeq$ の重要な性質

$\simeq$ は Γ 上の同値関係

つまり，$\simeq$ は次の 3 つの性質を満たす

- 任意の $G \in \Gamma$ に対して，$G \simeq G$ (反射性)
- 任意の $G_1, G_2 \in \Gamma$ に対して，$G_1 \simeq G_2$ ならば $G_2 \simeq G_1$ (対称性)
- 任意の $G_1, G_2, G_3 \in \Gamma$ に対して，$G_1 \simeq G_2$ かつ $G_2 \simeq G_3$ ならば $G_1 \simeq G_3$ (推移性)

$\simeq$ の反射性：証明 (1)

証明すべきこと

任意の無向グラフ G に対して，$G \simeq G$

定義に基づいて書き直したもの

任意の無向グラフ $G = (V, E)$ に対して，同型写像 $\varphi\colon V \to V$ が存在する

さらに，定義に基づいて書き直したもの

任意の無向グラフ $G = (V, E)$ に対して，
全単射 $\varphi\colon V \to V$ で次を満たすものが存在する

- 任意の頂点 $u, v \in V$ に対して，
$$\{u, v\} \in E \quad \Leftrightarrow \quad \{\varphi(u), \varphi(v)\} \in E$$

証明の方針：そのような全単射 φ を実際に構成する

$\simeq$ の反射性：証明 (2)

- 任意の無向グラフ G に対して，G から G への同型写像が存在することを証明すればよい．
- すなわち，任意の無向グラフ $G = (V, E)$ に対して，全単射 $\varphi\colon V \to V$ で次を満たすものが存在することを証明すればよい．
  - 任意の頂点 $u, v \in V$ に対して，
$$\{u, v\} \in E \quad \Leftrightarrow \quad \{\varphi(u), \varphi(v)\} \in E.$$
- そのような全単射として，恒等写像 $\mathrm{id}_V\colon V \to V$ を考える．
- このとき，任意の頂点 $u, v \in V$ に対して
$$\{u, v\} \in E \quad \Leftrightarrow \quad \{\mathrm{id}_V(u), \mathrm{id}_V(v)\} \in E$$
である．
- したがって，id_V は G から G への同型写像である． □

$\simeq$ の対称性と推移性の証明は演習問題

対称性に関するヒント

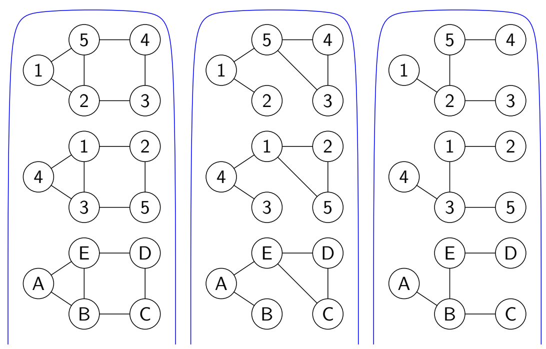
- 無向グラフ G_1, G_2 に対して，G_1 から G_2 への同型写像 φ が存在すると仮定する
- φ は全単射なので，逆写像 φ^{-1} が存在し，それも全単射 (補足問題 9.5，9.7 参照)
- φ^{-1} が G_2 から G_1 への同型写像になることを証明すればよい

推移性に関するヒント

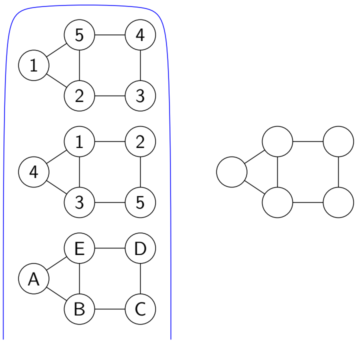
- 無向グラフ G_1, G_2, G_3 に対して，G_1 から G_2 への同型写像 φ_1 と G_2 から G_3 への同型写像 φ_2 が存在すると仮定する
- 合成関数 $\varphi_2 \circ \varphi_1$ を考えると，φ_1, φ_2 が全単射なので，これも全単射 (演習問題参照)
- $\varphi_2 \circ \varphi_1$ が G_1 から G_3 への同型写像になることを証明すればよい

グラフの同型類

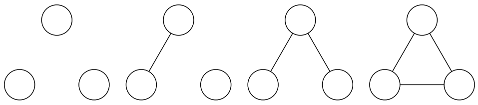
商集合 $\Gamma /\!\simeq$ の要素をグラフの**同型類**と呼ぶ



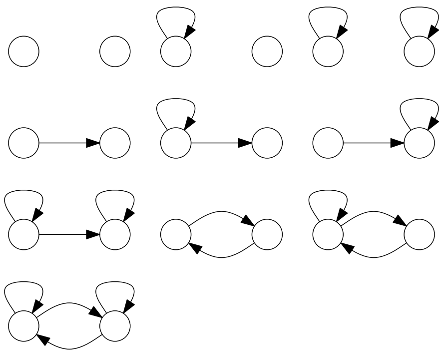
グラフの同型類の図示



頂点数 3 の無向グラフの同型類すべて

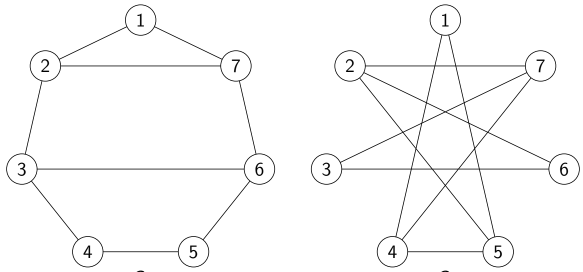


頂点数 2 の有向グラフの同型類すべて



例題：グラフの同型性 (1)

次の 2 つの無向グラフ G_1, G_2 に対して，
G_1 から G_2 への同型写像を 1 つ見つけよ



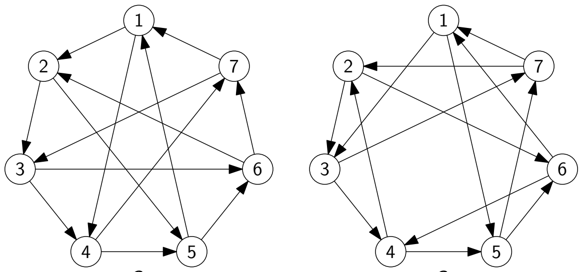
G_1 G_2

次で定められる φ は同型写像である

$$\varphi(1) = 1, \varphi(2) = 4, \varphi(3) = 7, \varphi(4) = 3, \varphi(5) = 6, \varphi(6) = 2, \varphi(7) = 5$$

例題：グラフの同型性 (2)

次の 2 つの有向グラフ G_1, G_2 に対して，
G_1 から G_2 への同型写像を 1 つ見つけよ



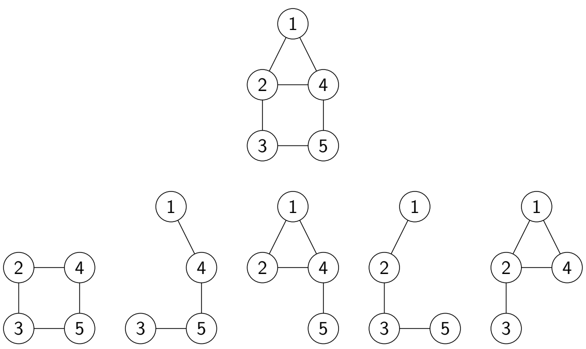
G_1 G_2

次で定められる φ は同型写像である

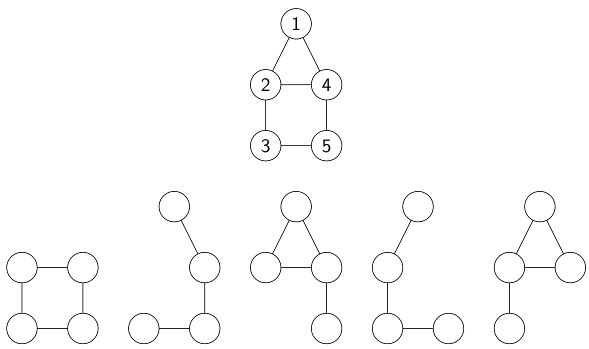
$$\varphi(1) = 1, \varphi(2) = 3, \varphi(3) = 4, \varphi(4) = 5, \varphi(5) = 7, \varphi(6) = 2, \varphi(7) = 6$$

目次

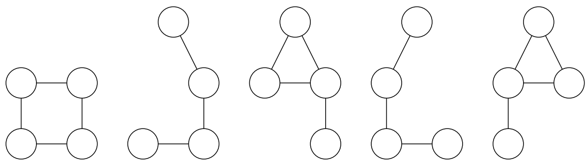
1 つの頂点を取り除いたグラフを作成…



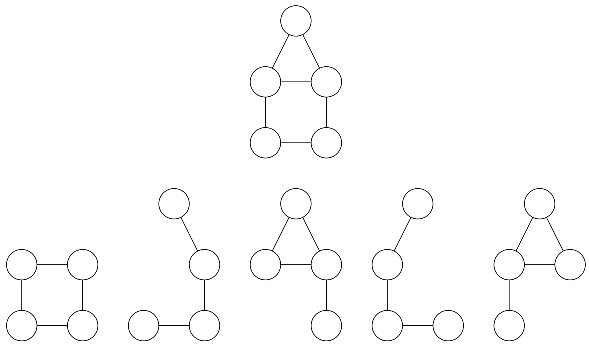
ラベルを忘れる



元のグラフを忘れる

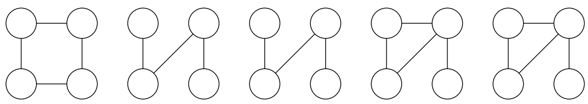


再構成問題：元のグラフ (の同型類) を復元すること



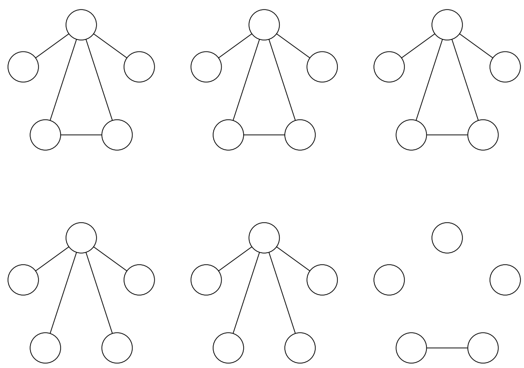
再構成問題：例 0

元のグラフは何でしょう？



再構成問題：例 1

元のグラフは何でしょう？



再構成予想

再構成予想 (ケリーとウラム '42)

頂点数が 3 以上の無向グラフは一意に再構成可能である

つまり，

> G と H が頂点数 3 以上の 非同型 な無向グラフであるとき，
> G から 1 頂点を取り除いてできたグラフの同型類のリストと
> H から 1 頂点を取り除いてできたグラフの同型類のリストは
> 異なる

という予想

用語：デッキ

G から 1 頂点を取り除いてできたグラフの同型類のリストを
G のデッキと呼ぶ

再構成問題は，デッキから G (の同型類) を復元する問題

目次

今日のまとめ

この講義の目標

- 語学としての数学，コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- グラフの定義を理解し，グラフに関する用語を正しく用いることができるようになる
- グラフの同型性を理解し，同型であるか判定できるようになる

期末試験

- 日時：8 月 7 日 (金) 第 3 時限
- 教室：西 8 号館 131 教室 (いつもの場所)
- 出題範囲
  - 第 8 回講義の最初から第 15 回講義の最後まで
- 出題形式
  - 演習問題と同じ形式の問題を 6 題出題する
  - その中の 3 題は講義の演習問題として提示されたものと同一
    - ただし，発展問題は出題しない
  - 全問に解答する
- 配点：1 題 10 点満点，計 60 点満点
- 時間：90 分
- 持ち込み：A4 用紙 1 枚分 (裏表自筆書き込み) のみ可

成績

- $\min\{100, \text{中間試験の素点} + \text{期末試験の素点}\}$

残った時間の使い方

- 演習問題をやる
  - 相談推奨 (ひとりでやらない)
- 質問をする
  - 教員とティーチング・アシスタントは巡回
- 退室時，小さな紙に感想など書いて提出する ←重要
  - 内容は何でも OK
  - 匿名で OK