

Iwasawa theory for vertex-weighted graphs  
館野莊平氏との共同研究 arXiv:2025.12351

室岡 亮祐

所属：名古屋大学大学院多元数理科学研究科

2026年2月10日



# 目次

荷重なしグラフの岩澤理論（導入）

頂点荷重グラフの定義（準備1）

頂点荷重グラフの行列木定理（結果1）

頂点荷重グラフのガロア被覆（準備2）

$\mathbb{Z}_p$  塔における分解公式（結果2）

岩澤型公式（結果3）

岩澤型公式の略証（時間次第）



# 荷重なしグラフの岩澤理論（導入）

## 定義（基本の概念）

$X$ ：連結有限グラフ     $T : X$  の部分グラフ

1.  $T$  は連結グラフ。

▶  $T$  が  $X$  の全域木  $\iff$  2. ( $T$  の頂点集合) = ( $X$  の頂点集合)。  
3.  $T$  は閉路を持たない。

▶  $\text{ST}_X := \{X \text{ の全域木}\}$ ,  $\kappa(X) := \#\text{ST}_X \rightsquigarrow X$  の複雑度と呼ぶ。

●  $X$  が連結でない  $\implies \kappa(X) = 0$

## 複雑度の例

$X :=$    $\rightsquigarrow \text{ST}_X = \left\{ \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet - \bullet \end{array}, \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet - \bullet \end{array}, \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagup \\ \bullet - \bullet \end{array} \right\}, \kappa(X) = 3$



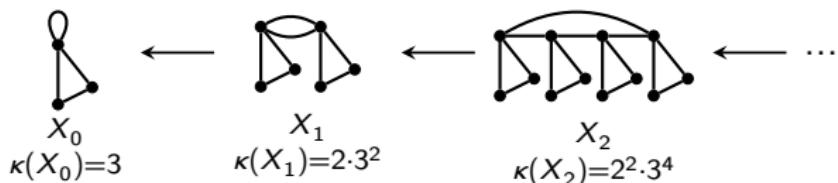
## 定義 (グラフの $\mathbb{Z}_p$ 塔)

$p$  : 素数 グラフのガロア被覆の列

$$X_0 \leftarrow X_1 \leftarrow \cdots \leftarrow X_n \leftarrow \cdots$$

が  $\mathbb{Z}_p$  塔 : $\iff \forall n, \text{Gal}(X_n/X) \cong \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$

例 ( $p=2$  の場合の例)



## 定理 (Gonet'22, McGown-Vallières'24)

$$\exists! \mu, \lambda, \nu \in \mathbb{Z}, \quad \underbrace{\text{ord}_p(\kappa(X_n))}_{\kappa(X_n) \text{ の } p \text{ ベキ部分}} = \mu p^n + \lambda n + \nu \quad \forall n \gg 0$$

上の例  $\text{ord}_2(\kappa(X_n)) = n \rightsquigarrow \mu = 0, \lambda = 1, \nu = 0$

導入終



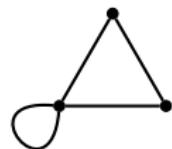
# 頂点荷重グラフの定義（準備1）

定義 (Serreによるグラフの定義)

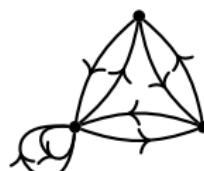
(有限) グラフ：五つ組  $X = (V_X, E_X, o, t, (-)^-)$  のこと

- ▶ 有限集合  $V_X$  ; 頂点 (Vertex) の集合
- ▶ 有限集合  $E_X$  ; 辺 (Edge) の集合
- ▶ 対応  $o: E_X \rightarrow V_X, t: E_X \rightarrow V_X$  ;  
辺の始点 (origin) と終点 (terminus) の指定
- ▶  $\forall e \in E_X, o(\bar{e}) = t(e), t(\bar{e}) = o(e), \bar{\bar{e}} \neq e, \bar{\bar{\bar{e}}} = e$   
となる対応  $(-)^-: E_X \rightarrow E_X$  ; 逆向きの辺の指定

互いに逆向きの関係にある辺を同一視  $\rightsquigarrow$  向き無しのグラフ；



扱いたいグラフ



グラフの実態



$p$  : 素数  $\mathbb{Q}_p$  :  $p$  進数体  $\mathbb{Q}_p \hookrightarrow \bar{\mathbb{Q}}_p$  : 代数閉包への埋込 (固定)

定義

- ▶ **頂点荷重グラフ** : グラフ  $X$  と関数  $w: V_X \rightarrow \bar{\mathbb{Q}}_p$  の対  $(X, w)$  のこと  $\rightsquigarrow$  以下単に **グラフ** と呼ぶ。
- ▶  $X$  の**全域木** :  $V_T = V_X$  かつ閉路を持たない  $X$  の部分グラフ  $T$  のこと  $\text{ST}_X := \{X \text{ の全域木}\}$
- ▶  $v \in V_X, T \in \text{ST}_X, d_T: V_X \times V_X \rightarrow \mathbb{Z}$  :  $T$  における頂点間の距離  
 $X$  の**根付き全域木** : 次で定まる有向部分グラフ  $T_v$  のこと

$$V_{T_v} = V_T, \quad E_{T_v} = \{e \in E_T : d_T(v, o(e)) < d_T(v, t(e))\}$$

$$\triangleright w(T_v) := \prod_{e \in E_{T_v}} w_{t(e)}, \quad \kappa_v(X) := \sum_{T \in \text{ST}_X} w(T_v), \quad \kappa(X) := \sum_{v \in V_X} \kappa_v(X)$$

例  $X = \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \\ | \quad | \\ 1 \quad 2 \end{array}$   $\rightsquigarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{根が } 1 \text{ の} \\ \text{全域木} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \\ | \quad | \\ 1 \quad 2 \end{array}, \quad \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \quad \bullet \\ | \quad | \\ 1 \quad 2 \end{array}, \quad \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \quad \bullet \\ | \quad | \\ 1 \quad 2 \end{array} \end{array} \right\}$

$$\rightsquigarrow \kappa_1(X) = w_1^2 + w_1 w_3 + w_1 w_2$$
$$\cdots \rightsquigarrow \kappa(X) = w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_1 w_2 + w_2 w_3 + w_3 w_1$$



# 頂点荷重グラフの行列木定理（結果 1）

定義 (頂点荷重グラフ  $X$  の情報を持つ行列)

$V_X := \{1, \dots, m\} \quad \forall i \in V_X, \text{ 平方根 } \sqrt{w_i} \in \bar{\mathbb{Q}}_p$  を固定する。

▶ 次数行列 :  $D_X(i, i) = \sum_{e \in E_X : o(e)=i} w_{t(e)}$  で定まる  $m$  次対角行列  $D_X$

▶ 隣接行列 :  $W_X(i, j) = \sum_{e \in E_X : o(e)=i, t(e)=j} \sqrt{w_i} \sqrt{w_j}$  で定まる  $m$  次正方形行列  $W_X$

▶ ラプラス行列 :  $L_X := D_X - W_X$  のこと

定理 (Chung-Langlands '96 ( $\mathbb{R}_{>0}$  荷重), M.-Tateno '26+)

$$\det(L_X[i]) = \kappa_i(X), \quad (\sum_{k \in V_X} w_k) \cdot \text{adj } L_X(i, j) = \sqrt{w_i} \sqrt{w_j} \kappa(X)$$

例  $X = \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \circ \end{array} \rightsquigarrow D_X = \begin{pmatrix} 2w_1+w_2+w_3 & & \\ & w_1+w_3 & \\ & & w_1+w_2 \end{pmatrix},$   
 $W_X = \begin{pmatrix} 2w_1 & \sqrt{w_1}\sqrt{w_2} & \sqrt{w_1}\sqrt{w_3} \\ \sqrt{w_1}\sqrt{w_2} & 0 & \sqrt{w_2}\sqrt{w_3} \\ \sqrt{w_1}\sqrt{w_3} & \sqrt{w_2}\sqrt{w_3} & 0 \end{pmatrix}, \quad L_X = \begin{pmatrix} w_2+w_3 & -\sqrt{w_1}\sqrt{w_2} & -\sqrt{w_1}\sqrt{w_3} \\ -\sqrt{w_1}\sqrt{w_2} & w_1+w_3 & -\sqrt{w_2}\sqrt{w_3} \\ -\sqrt{w_1}\sqrt{w_3} & -\sqrt{w_2}\sqrt{w_3} & w_1+w_2 \end{pmatrix}$

$$\rightsquigarrow \det(L_X[1]) = (w_1 + w_3)(w_1 + w_2) = w_1^2 + w_1 w_2 + w_1 w_3 = \kappa_1(X)$$



# 頂点荷重グラフのガロア被覆（準備2）

$Y, X$ : 頂点荷重グラフ       $E_{Y,v} := \{e \in E_Y : o(e) = v\}$

► グラフの射  $f: Y \rightarrow X$ : 3条件を満足する写像の組

$f = (V_Y \xrightarrow{f_V} V_X, E_Y \xrightarrow{f_E} E_X)$  のこと;

1.  $\forall e \in E_Y, o(f_E(e)) = f_V(o(e)), t(f_E(e)) = f_V(t(e))$
2.  $\forall e \in E_Y, f_E(\bar{e}) = (f_E(e))^+$
3.  $\forall v \in V_Y, w_Y(v) = w_X(f_V(v))$

► グラフの被覆  $Y/X$ :  $\pi_V$  と  $\pi_E$  が全射, かつ  $E_{Y,v} \xrightarrow{\text{bij}} E_{X,\pi(v)}$  を満足する射  $\pi: Y \rightarrow X$  のこと;  $Y/X := \pi$

►  $\pi$  上の自己同型:  $\sigma_V$  と  $\sigma_E$  が全単射, かつ  $\pi \circ \sigma = \pi$

$\left[ \begin{array}{ccc} Y & \xrightarrow{\sigma} & Y \\ \pi \searrow & & \swarrow \pi \\ & X & \end{array} \right]$  を満足する射  $\sigma: Y \rightarrow Y$  のこと  
 $\text{Aut}(Y/X) := \{\pi \text{ 上の自己同型}\}$

► ガロア被覆:  $\forall v \in V_X, \text{Aut}(Y/X) \cong \pi^{-1}(\{v\})$  が推移的な被覆  $\pi: Y \rightarrow X$  のこと  $\text{Gal}(Y/X) := \text{Aut}(Y/X)$

例



# $\mathbb{Z}_p$ 塔における分解公式 (結果 2)

$X$  : 頂点荷重グラフ     $K := \mathbb{Q}_p(w(V_X))$      $\mathcal{O}$  :  $K$  の付値環

$\Lambda := \mathcal{O}[[T]]$  (岩澤代数)     $W(n) := \{\zeta \in \overline{\mathbb{Q}}_p : \zeta^{p^n} = 1\}$

定義 ( $\mathbb{Z}_p$  塔)

ガロア被覆の列  $X = X_0 \leftarrow X_1 \leftarrow \cdots \leftarrow X_n \leftarrow \cdots$

が  $\mathbb{Z}_p$  塔 : $\iff \forall n, \text{Gal}(X_n/X) \cong \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$

定理 (Wu-Feng-Sato '11 (根無しの場合の原型),

M.-Tateno '26+)

$\mathbb{Z}_p$  塔  $X \xleftarrow[\pi_n]{} \cdots \xleftarrow[\pi_n]{} X_n \leftarrow \cdots \cdots$  に対して, 以下を満足する元

$F \in (\Lambda \otimes_{\mathcal{O}} K) \setminus \{0\}$  を構成できる。

$\forall n \in \mathbb{Z}_{>0}, \forall v \in V_X, \forall w \in \pi_n^{-1}(\{v\}),$

$$\kappa_w(X_n) = \frac{\kappa_v(X)}{p_n^n} \prod_{\zeta \in W(n) \setminus \{1\}} F(\zeta - 1), \quad \left( \rightsquigarrow \kappa(X_n) = \kappa(X) \prod_{\zeta \in W(n) \setminus \{1\}} F(\zeta - 1) \right)$$

が成立する。

系 (被覆の根付き複雑度)



$\kappa_w(X_n)$  は  $\pi_n^{-1}(\{v\})$  上で一定である。 $\rightsquigarrow$  これを  $\kappa_v(X_n)$  と置く。

# 岩澤型公式（結果3）

定理（根付き岩澤型公式, M.-Tateno '26+）

頂点  $v \in V_X$  を一つ固定し,  $\forall n, \kappa_v(X_n) \neq 0$  と仮定する。このとき

$$\exists! \mu_v, \lambda_v, \nu_v \in \mathbb{Q}, \forall n \gg 0, \text{ord}_p(\kappa_v(X_n)) = \mu_v p^n + \lambda_v n + \nu_v$$

が成立する。

仮定について

一般の分解公式  $\rightsquigarrow [m \leq n \Rightarrow \kappa_v(X_m) \text{ は } \kappa_v(X_n) \text{ の倍数である}]$

$\rightsquigarrow [\kappa_v(X_n) = 0 \Rightarrow \kappa_v(X_m) = 0 \ \forall m \geq n]$

• 連結でないグラフが塔にある  $\Rightarrow \kappa_v(X_n) = 0 \ \forall n \gg 0$

根なし複雑度についても同様の公式を得られる。

定理（根なし岩澤型公式, M.-Tateno '26+）

$\forall n, \kappa(X_n) \neq 0$  と仮定する。このとき

$$\exists! \mu, \lambda, \nu \in \mathbb{Q}, \forall n \gg 0, \text{ord}_p(\kappa(X_n)) = \mu p^n + \lambda n + \nu$$

が成立する。



# 岩澤型公式の略証

## 根付き公式の略証

① 「 $\forall n \in \mathbb{Z}_{>0}, \kappa_v(X_n) \neq 0$ 」と分解公式

$$\rightsquigarrow \forall \zeta \in \bigcup_{n \in \mathbb{Z}_{>0}} W(n), F(\zeta - 1) \neq 0 \cdots (\heartsuit)$$

② 岩澤理論の一般論と ( $\heartsuit$ )  $\rightsquigarrow \exists! \mu, \lambda, \nu \in \mathbb{Q}$  s.t.

$$\forall n \gg 0, \text{ord}_p \left( \sum_{\zeta \in W(n)} F(\zeta - 1) \right) = \mu p^n + \lambda n + \nu \cdots (\clubsuit)$$

③ 分解公式と ( $\clubsuit$ )  $\rightsquigarrow \forall n \gg 0,$

$$\begin{aligned} \text{ord}_p(\kappa_v(X_n)) &= \text{ord}_p(\kappa_v(X)) - \textcolor{red}{n} + \sum_{\zeta \in W(n)} \text{ord}_p(F(\zeta - 1)) \\ &\stackrel{(\clubsuit)}{=} \mu p^n + (\lambda - 1)n + (\nu + \text{ord}_p(\kappa_v(X))) \end{aligned}$$

## 根なしの場合について

略証終

三段階目の計算における  $-\textcolor{red}{n}$  が無くなる

$\rightsquigarrow \lambda$  不变量のズレ  $-1$  が解消される。

