

Nilpotent π -subgroups and gluing complexes

山口大学・教育学部 飯寄信保

Nobuo Iiyori

Department of Mathematics, Faculty of Education,
Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8511, Japan

iiyori@yamaguchi-u.ac.jp

千葉大学・教育学部 澤辺正人

Masato Sawabe

Department of Mathematics, Faculty of Education,
Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

sawabe@faculty.chiba-u.jp

この報告は 2017 年 12 月 13 日（水）に京都大学数理解析研究所で行った講演を再現するものである。講演内容はベキ零 π -部分群から定義される部分群複体に関するいくつかの考察である。具体的には以下で述べる命題 2.3, 定理 2.5, 命題 3.1, 及び第 4 節に於ける応用の紹介であり, これらは論文 [3, 5] のごく一部である。本研究の全体については [3, 5] を参照されたい。一方, 一連の研究内容, 及びその動機などについては論文 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] あるいは報告集 [10, 11, 12, 13, 14] をご覧頂きたい。

1 背景

まずは記号の定義などから述べる。 G を有限群とし, $\text{Sgp}(G)$ を G の部分群全体の集合とする。 G の部分群族 $\mathcal{H} \subseteq \text{Sgp}(G)$ に対して $S(\mathcal{H})$ を \mathcal{H} に属する部分群からなる包含列全体の集合とする。言い換えれば, \mathcal{H} を包含関係によって半順序集合 (\mathcal{H}, \subseteq) と見なしたときの全順序部分集合の全体が $S(\mathcal{H})$ である。このとき組 $\Delta(\mathcal{H}) := (\mathcal{H}, S(\mathcal{H}))$ は \mathcal{H} を頂点集合, $S(\mathcal{H})$ を単体の集合とする抽象単体複体を与える。複体 $\Delta(\mathcal{H})$ を G の部分群複体という。以下 $\Delta(\mathcal{H})$ を単に \mathcal{H} で表すことにする。

■ p -部分群複体 $\mathcal{S}_p(G)$ 素数 $p \in \pi(G)$ に対して $\mathcal{S}_p(G)$ を G の非自明な p -部分群全体の集合とする。これは Brown 複体とも呼ばれる。 p -部分群複体 $\mathcal{S}_p(G)$ に関してよく知られている事実を確認しておく。

1. $\mathcal{S}_p(G)$ の部分複体 $\mathcal{B}_p(G) := \{U \in \mathcal{S}_p(G) \mid O_p N_G(U) = U\} \subseteq \mathcal{S}_p(G)$ に対して $\mathcal{S}_p(G)$ は $\mathcal{B}_p(G)$ と互いにホモトピー同値 $\mathcal{S}_p(G) \simeq \mathcal{B}_p(G)$ である。部分群 $U \in \mathcal{B}_p(G)$ は p -radical と呼ばれる。
2. p -radical 部分群にはモデルケースが存在する。標数 p の有限体上で定義された Lie 型の群 L に対して $\mathcal{B}_p(L)$ は L の unipotent radical 全体を与える。言い換えれば, $\mathcal{B}_p(L)$ は L に付随する幾何, ビルディング, を与える。このことから一般に $\mathcal{B}_p(G)$ は幾何的に重要な対象であり, その一環として, 全ての散在型有限単純群に対する p -radical 部分群の分類がきちんと存在しているのである。

2 ベキ零 π -部分群複体 $\mathcal{L}_\pi(G)$ の導入

以上の背景を踏まえて, 我々の一つの方向性としては, このような p -部分群複体 $\mathcal{S}_p(G)$ の自然な意味のある拡張を何か作りたいということである。そこで次のような部分群族 (複体) を新たに導入する。

定義 2.1 (page 732 in [3]) 空でない部分集合 $\pi \subseteq \pi(G)$ に対して $\mathcal{N}_\pi(G)$ を G の非自明なベキ零 π -部分群全体の集合とする. このとき $\mathcal{L}_\pi(G)$ を次のように定める.

$$\mathcal{L}_\pi(G) := \{U \in \mathcal{N}_\pi(G) \mid O_\pi ZN_G(U) \leq U\} \subseteq \mathcal{N}_\pi(G).$$

注意 2.2 p -radical 部分群 $U \in \mathcal{B}_p(G)$ に対してその定義から $O_p N_G(U) = U$ が成り立つ. また一般に $O_p ZN_G(U)$ は $N_G(U)$ の正規 p -部分群であることから $O_p ZN_G(U) \leq O_p N_G(U) = U$ を得る. つまり $U \in \mathcal{L}_{\{p\}}(G)$ となる. 従って $\mathcal{L}_{\{p\}}(G)$ は $\mathcal{B}_p(G)$ を完全に含んでいることになる.

命題 2.3 (Proposition 4.3 in [3]) $\mathcal{L}_\pi(G)$ と $\mathcal{N}_\pi(G)$ はホモトピー同値 $\mathcal{L}_\pi(G) \simeq \mathcal{N}_\pi(G)$ である.

我々としては, $\mathcal{N}_\pi(G)$ と互いにホモトピー同値となるような“ほぼほぼ極小な”部分複体 $\mathcal{L}_\pi(G) \subseteq \mathcal{N}_\pi(G)$ を捕まえたという感触である.

注意 2.4 1. 命題 2.3 のホモトピー同値性に対して π を素数 p の一点集合とすれば $\mathcal{L}_{\{p\}}(G) \simeq \mathcal{N}_{\{p\}}(G) = \mathcal{S}_p(G) \simeq \mathcal{B}_p(G)$ が導かれる.

2. $\mathcal{S}_p(G)$ の部分集合を $\mathcal{S}_p(G)^> := \{U \in \mathcal{S}_p(G) \mid \mathcal{S}_p(G)_{>U} \text{ は可縮でない}\}$ で定める. 同様に一般の半順序集合 (\mathcal{P}, \leq) に対して $\mathcal{P}^>$ が定義される. このとき $\mathcal{S}_p(G)^> \subseteq \mathcal{B}_p(G)$ がとなることがよく知られている. さらに, いわゆる Quillen 予想を仮定すると等号 $\mathcal{S}_p(G)^> = \mathcal{B}_p(G)$ が成立する. この類似として $\mathcal{N}_\pi(G)^>$ を考察することにより $\mathcal{N}_\pi(G)^> \subseteq \mathcal{L}_\pi(G)$ を示すことが出来る. 実際に, この包含関係から $\mathcal{L}_\pi(G) \simeq \mathcal{N}_\pi(G)$ が導かれている.

以上の注意を振り返ってみると $\mathcal{L}_{\{p\}}(G)$ は $\mathcal{B}_p(G)$ を完全に含んでおり, かつそれらは互いにホモトピー同値であり, かつ組 $(\mathcal{S}_p(G)^>, \mathcal{B}_p(G))$ と組 $(\mathcal{N}_\pi(G)^>, \mathcal{L}_\pi(G))$ の状況も同じであることから, $\mathcal{L}_\pi(G)$ は $\mathcal{B}_p(G)$ の拡張概念として“ π -radical”と呼ばれるべきものになっていると我々は考えている. 即ち, $\mathcal{L}_\pi(G)$ を新しい研究対象に加えて良いであろうということである. その一環として, 対称群 S_n の $\mathcal{L}_\pi(S_n)$ (see [3, Sect. 5]) と一般線形群 $GL(n, q)$ の $\mathcal{L}_\pi(GL(n, q))$ (see [5, Sect. 4]) を決定するアルゴリズムを与えた. 同様に全ての散在型有限単純群 S に対する $\mathcal{L}_\pi(S)$ のリストを作成しておくことも重要であると考えている.

さて, $\mathcal{N}_\pi(G)$ と $\mathcal{L}_\pi(G)$ の基本性質の一つとして次を挙げることが出来る.

定理 2.5 (Theorem 3.4 in [5]) 空でない部分集合 $\pi_1, \pi_2 \subseteq \pi(G)$ に対して $\pi_1 \cap \pi_2 = \emptyset$ と仮定する. このとき次のホモトピー同値が成り立つ.

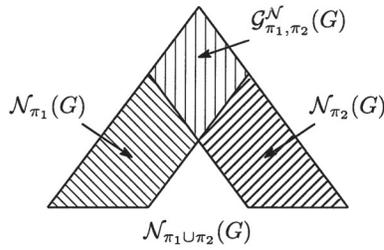
$$\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus \mathcal{N}_{\pi_1}(G) \simeq \mathcal{N}_{\pi_2}(G), \quad \mathcal{L}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus \mathcal{L}_{\pi_1}(G) \simeq \mathcal{L}_{\pi_2}(G).$$

3 Gluing complexes の導入

素数 p の一点集合ではなく, 素数の集合 $\pi \subseteq \pi(G)$ を考えることによって, 例えば p と q の交わりであるとか, 或いは π_1 と π_2 の交わりを考えることが可能になる. そこで改めて, 空でない部分集合 $\pi_1, \pi_2 \subseteq \pi(G)$ に対して $\pi_1 \cap \pi_2 = \emptyset$ と仮定する. 次のような集合を用意する.

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) &:= \{H \in \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \mid \pi(H) \cap \pi_1 \neq \emptyset\} = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus \mathcal{N}_{\pi_2}(G), \\ \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) &:= \{H \in \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \mid \pi(H) \cap \pi_2 \neq \emptyset\} = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus \mathcal{N}_{\pi_1}(G), \\ \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{\mathcal{N}}(G) &:= \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cap \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus (\mathcal{N}_{\pi_1}(G) \uplus \mathcal{N}_{\pi_2}(G)). \end{aligned}$$

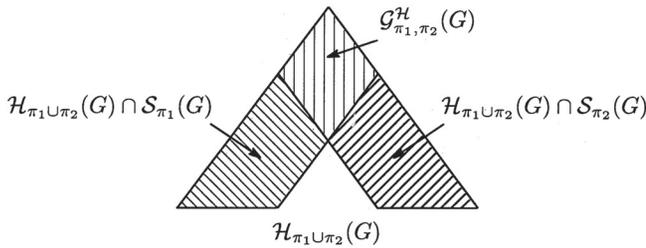
ここで $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cup \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ であることにも注意する. $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ を図で表すと次のようになる.



以上はベキ零という群論的性質を持っている $(\pi_1 \cup \pi_2)$ -部分群に関することであると解釈すれば、これはもっと一般的なセッティングで議論することが出来る。まず、空でない部分集合 $\pi \subseteq \pi(G)$ に対して $\mathcal{S}_\pi(G)$ を非自明な π -部分群全体からなる集合とする。このとき部分族 $\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \subseteq \mathcal{S}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ に対して、次のような集合を用意する。

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) &:= \{H \in \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \mid \pi(H) \cap \pi_1 \neq \emptyset\} = \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus (\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cap \mathcal{S}_{\pi_2}(G)), \\ \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) &:= \{H \in \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \mid \pi(H) \cap \pi_2 \neq \emptyset\} = \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus (\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cap \mathcal{S}_{\pi_1}(G)), \\ \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^H(G) &:= \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cap \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) = \{H \in \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \mid \pi(H) \cap \pi_i \neq \emptyset (i = 1, 2)\}. \end{aligned}$$

ここで $\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) = \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \cup \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ であることにも注意する。 $\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ を図で表すと次のようになる。



$\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^H(G)$ を \mathcal{H} に関する G の (π_1, π_2) -gluing complex と名付けることにする。 $\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ の例としては既に現れている $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ と $\mathcal{L}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ の他に、 $Ab_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ (可換部分群), $\mathcal{A}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ (基本可換部分群の直積部分群) などが想定される。 gluing complex の基本性質として次を挙げる事が出来る。

命題 3.1 (Propositions 3.13 and 3.14 in [5]) 上記の記号の下で次が成り立つ。

1. $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{Ab}(G) \simeq \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^A(G) \simeq \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^N(G)$.
2. $\mathcal{L}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \subseteq \mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \subseteq \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ なる $\mathcal{H}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ に対して $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^H(G) \simeq \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^N(G)$ が成り立つ。特に $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^L(G) \simeq \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^N(G)$ が得られる。

状況に応じて扱いやすい gluing で議論してよいことになる。

4 ホモロジーへの応用

次の事実はよく知られている。

命題 4.1 (Mayer-Vietoris 列; cf. Theorem 25.1 in [9]) X を単体複体とする. A, B を X の部分複体で $X = A \cup B$ なるものとする. このとき次の完全列が得られる.

$$\begin{aligned} \cdots \longrightarrow H_n(A \cap B) &\longrightarrow H_n(A) \oplus H_n(B) \longrightarrow H_n(X) \\ &\longrightarrow H_{n-1}(A \cap B) \longrightarrow \cdots \longrightarrow H_0(X) \longrightarrow \{0\} \end{aligned}$$

一つの応用として $X = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ とする. X の部分複体 A として先程の図の左の山 $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ を取り, 部分複体 B として右の山 $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ を取る. このときの共通部分 $A \cap B$ は $\mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ の gluing $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{\mathcal{N}}(G)$ である. これは様々な \mathcal{H} の gluing $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{\mathcal{H}}(G)$ とホモトピー同値であった. さらに, この $A = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G) \setminus \mathcal{N}_{\pi_2}(G)$ は定理 2.5 より $A \simeq \mathcal{N}_{\pi_1}(G)$ であり, また命題 2.3 より $A \simeq \mathcal{N}_{\pi_1}(G) \simeq \mathcal{L}_{\pi_1}(G)$ である. 全く同様に $B \simeq \mathcal{N}_{\pi_2}(G) \simeq \mathcal{L}_{\pi_2}(G)$ が成り立つ. この状況の下で次のことに着目する.

1. $H_n(A) \cong H_n(\mathcal{L}_{\pi_1}(G)) \cong H_n(\mathcal{N}_{\pi_1}(G))$ や $H_n(B) \cong H_n(\mathcal{L}_{\pi_2}(G)) \cong H_n(\mathcal{N}_{\pi_2}(G))$ は $X = \mathcal{N}_{\pi_1 \cup \pi_2}(G)$ より次元の下がったベキ零複体のホモロジーになっている. 従って, これらは帰納的に既に知られているとしてよい.
2. A, B のホモロジーは既に分かっているとしてよいことを踏まえると, Mayer-Vietoris 列が示唆していることは, 共通部分 $A \cap B$, 即ち gluing $\mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{\mathcal{N}}(G)$ のホモロジーが分かれば全体 X のホモロジーが大体分かるはずということである.
3. そこで極端な状況を考え, $\mathcal{G} := \mathcal{G}_{\pi_1, \pi_2}^{\mathcal{N}}(G)$ が可縮であると仮定すると $H_n(\mathcal{G}) = \{0\}$ ($n \geq 1$) となる. このとき Mayer-Vietoris 列から群同型 $H_n(X) \cong H_n(A) \oplus H_n(B)$ ($n \geq 2$) が得られる. $H_1(X)$ と $H_0(X)$ については [5, pages 205, 206] を参照されたい. つまり X のホモロジーが確かに分かるのである.

以上, 全体を振り返ってみると, p -部分群複体 $\mathcal{S}_p(G)$ の一般化として $\mathcal{N}_\pi(G)$ に着目する. この $\mathcal{N}_\pi(G)$ とホモトピー同値となるようなほぼほぼ極小な部分複体 $\mathcal{L}_\pi(G) \subseteq \mathcal{N}_\pi(G)$ を捕まえる. 部分群 $U \in \mathcal{L}_\pi(G)$ は “ π -radical” であるべし. その $\mathcal{L}_\pi(G)$ に関するホモトピー同値性の基本性質を洗い出し, さらに gluing complex を新たに導入して, その性質や振る舞いを考察したという話の大雑把な紹介であった. 詳細については二本の論文 [3, 5] を参照されたい.

参考文献

- [1] N. Iiyori and M. Sawabe, Representations of path algebras with applications to subgroup lattices and group characters, *Tokyo J. Math.* **37** (2014), 37–59.
- [2] N. Iiyori and M. Sawabe, Simplicial complexes associated to quivers arising from finite groups, *Osaka J. Math.* **52** (2015), 161–204.
- [3] N. Iiyori and M. Sawabe, Partially ordered sets of non-trivial nilpotent π -subgroups, *Osaka J. Math.* **53** (2016), 731–750.
- [4] N. Iiyori and M. Sawabe, Homology of a certain associative algebra, *Hokkaido Math. J.* **46** (2017), 227–256.
- [5] N. Iiyori and M. Sawabe, Partially ordered sets of non-trivial nilpotent π -subgroups II, *Topology Appl.* **231** (2017), 197–218.
- [6] N. Iiyori and M. Sawabe, Homology of the complex of all non-trivial nilpotent subgroups of a finite non-solvable group, to appear in *Tokyo J. Math.*

- [7] N. Iiyori and M. Sawabe, Representations of quivers with applications to finite groups, preprint.
- [8] N. Iiyori and M. Sawabe, Class functions related to Brauer characters and quiver representations, preprint.
- [9] J.R. Munkres, “Elements of algebraic topology”, Addison-Wesley Publishing Company, Menlo Park, CA, 1984.
- [10] 飯寄信保, 澤辺正人, Prime graphs and subgroup lattices of finite groups, 有限群とその表現, 頂点作用素代数, 代数的組合せ論の研究, 数理解析研究所講究録 **1872**, 2014.
- [11] 澤辺正人, 有限群の部分群族とパス代数の表現, 第 29 回代数的組合せ論シンポジウム (弘前大学) 2012, 報告集.
- [12] 澤辺正人, 有限群の Up-Down パスから得られる単体複体について, 第 30 回代数的組合せ論シンポジウム (静岡大学) 2013, 報告集.
- [13] 澤辺正人, 複素既約指標の生成定数は 1 である, 第 31 回代数的組合せ論シンポジウム (東北大学) 2014, 報告集.
- [14] 澤辺正人, Subgroup complexes of nilpotent subgroups, 有限群のコホモロジー論とその周辺, 数理解析研究所講究録 **1967**, 2015.