

非正規関係集合の構造に対応するネットワーク構造

九州大学工学部 古川哲也 (Tetsuya Furukawa)

九州大学工学部 上林彌彦 (Yahiko Kambayashi)

1. まえがき

非正規関係は、冗長性が少なく、利用者に分かり易いデータベースの利用者インタフェースとして優れている¹⁾²⁾。これまでの非正規関係に関する研究は、データが満たす多値従属性集合などの意味制約と非正規構造との対応を明確にし、与えられた意味制約を満足するデータの非正規構造による表現³⁾⁴⁾、最も冗長性の少ない非正規構造の設計⁵⁾⁶⁾、非正規関係上での演算⁷⁾等に関するものであった。しかし、利用者インタフェースとしての非正規関係を考えると、データベースにおける質問処理の結果を与えられた非正規構造でいかに効率よく出力するかが重要となる。

データベースシステムは、データのモデル化の方法により、関係データベースシステムとネットワークデータベースシステムに大別できる。効率の良さから広く普及しているネットワークデータベースは、そのリンク構造が非正規関係の構造と直接対応しており⁸⁾、利用者ビューを非正規関係とするデータベースの実現に適している。本稿では、ネットワーク構造で表現できる非正規関係集合の構造を明確にし、ネットワークデータベースで出力できる非正規関係について議論する。

2. ネットワーク構造で直接表現される非正規構造

属性集合 X 上の関係 $R(X)$ は、属性値の組の集合である。各属性値が単純値のとき関係 R を正規関係、そうでないとき非正規関係という。関係を非正規化する代表的な操作としてRow-nest操作とGroup-by操作がある。関係 $R(X)$ に属性集合 Y によるRow-nest操作を適用したものは、 $X-Y$ が同じ値になる組集合を Y の値を集合値にして1つの組としたものである。 Y によるGroup-by操作は、 $X-Y$ によるRow-nest操作

として定義される。非正規構造は次のような有向木 $T(V, E)$ で表すことができる。 V は属性集合に対応する節点の集合である。節点 $v_1, v_2 (\in V)$ で $v_1 \neq v_2$ であれば $v_1 \cap v_2 = \phi$ である。節点 v を根とする T の部分木を $T(v)$ 、 $T(v)$ に含まれる属性の集合を $U_{T(v)}$ 、 v から根までの属性の集合を $A(v)$ とする。枝 $\langle v_1, v_2 \rangle$ は、 $U_{T(v_1)}$ 上の部分関係に $U_{T(v_2)}$ での Row-nest 操作を適用したことを表している。図 1 は (a) の正規関係を (b) の非正規構造に従って非正規化した関係 (c) を示している。

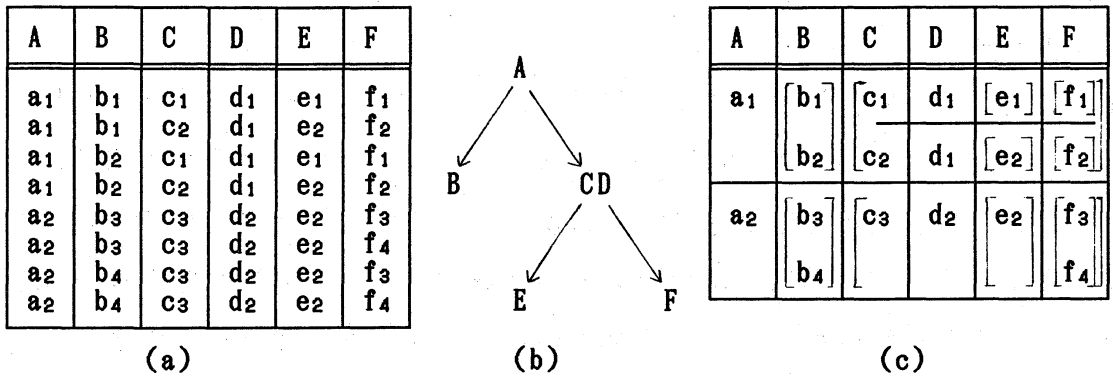


図 1 非正規構造と非正規関係

関係 $R(U)$ で、属性集合 X の値を定めると属性集合 Y の値の集合が $U-X-Y$ の値に独立に定まるとき、 R は多値従属性 $X \twoheadrightarrow Y$ を満足しているという。 $X \twoheadrightarrow Y_1, X \twoheadrightarrow Y_2, \dots, X \twoheadrightarrow Y_n$ のとき $X \twoheadrightarrow Y_1 | Y_2 | \dots | Y_n$ とかく。非正規構造 T では、各節点 v 、 v の子節点 v_1, v_2, \dots, v_n に対し、 $A(v)$ の値を定めると $U_{T(v_1)}$ の値の集合は独立に定まるので、多値従属性 $A(v) \twoheadrightarrow U_{T(v_1)} | U_{T(v_2)} | \dots | U_{T(v_n)}$ を表している。図 1 (b) の非正規構造は $A \twoheadrightarrow B | C | D | E | F, CD \twoheadrightarrow E | F$ を表している。属性集合 X の値を定めると属性集合 Y の値が一意に定まるとき、関数従属性 $X \rightarrow Y$ を満足しているという。非正規構造 T で、節点 v に対し、 $v \rightarrow A(v)$ であれば v の値は重複しない。

ネットワークモデルは、同じ属性からなるレコードの集合であるレコード型と 2 つのレコード型間のレコードの 1 対多の対応を表す親子集合型の集合によって表現される。属性集合 X からなるレコード型 R を $R(X)$ で、親レコード型が R_0 、子レコード型が R_M である親子集合型を $\langle R_0, R_M \rangle$ で表す。この構造はバックマン線図と呼ばれる有向グラフ $B(V, E)$ で表される。ここで、 V は各レコード型に対応する節点集合、 E は親レコード型から子レコード型へ向かう有向枝の集合である。値が定めればレコード型 $R(X)$ のレコードがただ 1 つ定まるような最小の属性集合 K を R のキー

といい、 $K(R)$ で表す。ネットワーク構造では、各レコード型で、キーの値を定めるとレコードが定まり、レコードを定めるとその祖先のレコードが定まるため、関数従属性を表している。また、レコード型を除いたときの連結成分では、レコードの対応は独立なので、多値従属性を表している。図2は、バックマン線図とその実現値の例である。このバックマン線図は、関数従属性集合 $\{B \rightarrow A, C \rightarrow ADE, F \rightarrow ACDE\}$ 、多値従属性集合 $\{A \rightarrow \rightarrow B|CDEF, CD \rightarrow \rightarrow AB|E|F\}$ を表している。

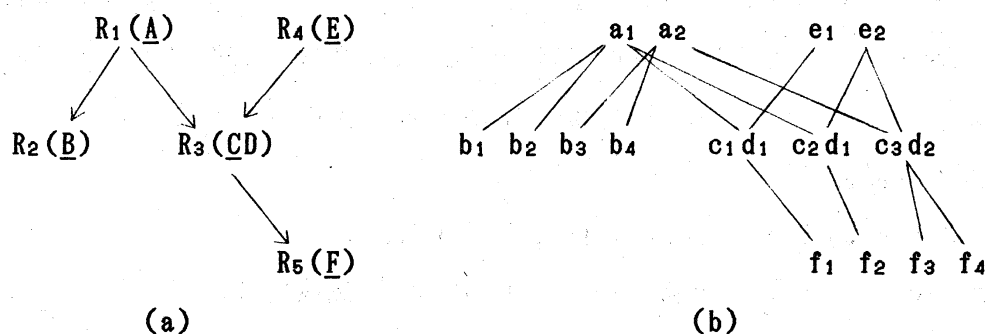


図2 バックマン線図とその実現値

木構造のバックマン線図 B で、根レコード型 R が n 個の子 R_1, R_2, \dots, R_n （木構造での子で親子集合型での子でなくともよい）持っているとする。 R_1 を根とする部分木のレコードの対応は、 R のレコードごとにまとまっており、それらは R の各レコードに対して直積的に対応する。これは、 R によるGroup-by操作、 R_1 を根とする部分木によるRow-nest操作に対応している。図2(a)のバックマン線図で、 R_1 を根とすると、その非正規構造は図1(b)で表され、図2(b)の実現値は図1(c)の非正規関係となる。レコード型 R_2, R_3, R_4, R_5 を根とするとそれぞれ図3(a)~(d)の非正規構造となる。

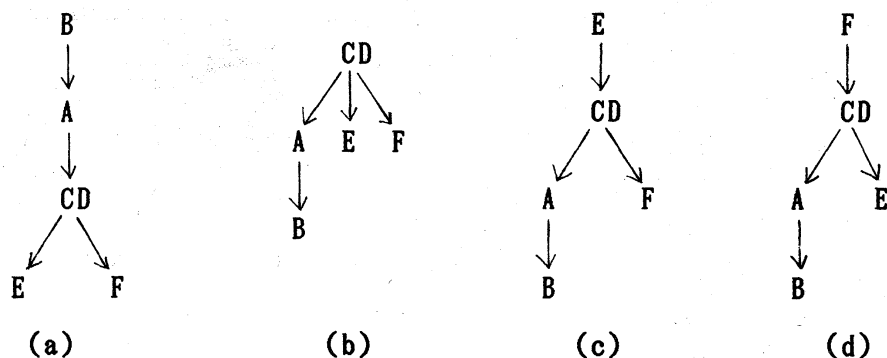


図3 ネットワーク構造が直接表現する非正規構造

〔定義1〕 バックマン線図Bで表されるネットワーク構造で、B中のレコード型を1つ定め、それを根とした有向木となるように各枝の方向を変え、各節点のレコード型R(X)を属性集合Xとした有向木で表される非正規構造を、Bが直接表現する非正規構造といい、そのような非正規構造の集合をUR(B)で表す。□

3. コストのかからない非正規構造の変換

ネットワーク構造は、非正規構造を直接表現していなくても等価的に表現している場合がある。非正規関係を他の構造の非正規関係に変換するとき、特別な操作を必要としない場合で、その様な変換には、次の3つがある。

(1) 入れ子の展開

(1-1) Group-by操作でまとめた値を展開する。

(1-2) Row-nest操作で直積となった値の集合を展開する。

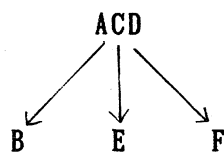
図1(c)の非正規関係の属性AによるCDのGroup-by操作を展開すると、図4(a)となる。その構造は図4(b)で表される。さらにACDによるBのGroup-by操作を展開す

A	C	D	B	E	F
a ₁	c ₁	d ₁	[b ₁ b ₂]	[e ₁]	[f ₁]
a ₁	c ₂	d ₁	[b ₁ b ₂]	[e ₂]	[f ₂]
a ₂	c ₃	d ₂	[b ₃ b ₄]	[e ₂]	[f ₃ f ₄]

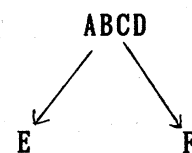
(a)

A	B	C	D	E	F
a ₁	b ₁	c ₁	d ₁	[e ₁]	[f ₁]
a ₁	b ₁	c ₂	d ₁	[e ₂]	[f ₂]
a ₁	b ₂	c ₁	d ₁	[e ₁]	[f ₁]
a ₁	b ₂	c ₂	d ₁	[e ₂]	[f ₂]
a ₂	b ₃	c ₃	d ₂	[e ₂]	[f ₃ f ₄]
a ₂	b ₄	c ₃	d ₂	[e ₂]	[f ₃ f ₄]

(c)



(b)



(d)

図4 入れ子の展開

ると図4(c)となり、その構造は図4(d)である。図4(c)は、図1(c)のAからの枝分かれによるRow-nest操作を展開したものになっている。

(2) Group-by操作の変更

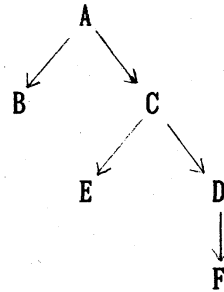
(2-1) Group-by操作の分離

(2-2) Group-by操作の順序の入れ換え

図5(a),(c)は、図1(c)の非正規関係のCDによるGroup-by操作をCおよびDのGroup-by操作に分離したものである。非正規構造はそれぞれ図5(b),(d)となる。図5(a)の非正規構造のDおよびFの順序を入れ換えたものが図5(e)であり、その構造は図5(f)である。

A	B	C	E	D	F
a ₁	b ₁	c ₁	e ₁	d ₁	f ₁
	b ₂	c ₂	e ₂	d ₁	f ₂
a ₂	b ₃	c ₃	e ₂	d ₂	f ₃
	b ₄				f ₄

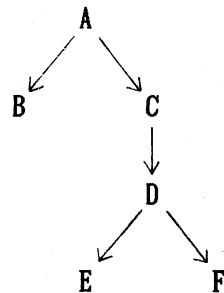
(a)



(b)

A	B	C	D	E	F
a ₁	b ₁	c ₁	d ₁	e ₁	f ₁
	b ₂	c ₂	d ₁	e ₂	f ₂
a ₂	b ₃	c ₃	d ₂	e ₂	f ₃
	b ₄				f ₄

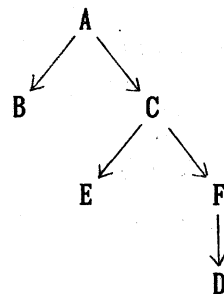
(c)



(d)

A	B	C	E	F	D
a ₁	b ₁	c ₁	e ₁	f ₁	d ₁
	b ₂	c ₂	e ₂	f ₂	d ₁
a ₂	b ₃	c ₃	e ₂	f ₃	d ₂
	b ₄			f ₄	d ₂

(e)



(f)

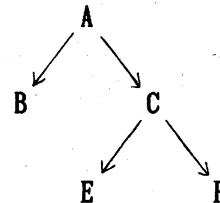
図5 Group-by操作の変更

(3) 属性の削除

図 1 (c) の非正規関係から属性集合 CD を除くと、図 6 (a) の非正規関係が得られる。この構造は図 6 (b) である。

A	B	C	E	F
a ₁	b ₁	c ₁	e ₁	f ₁
	b ₂	c ₂	e ₂	f ₂
a ₂	b ₃	c ₃	e ₂	f ₃
	b ₄			f ₄

(a)



(b)

図 6 属性の削除

4. ネットワーク構造で表現できる非正規構造

3 節での非正規関係の変換に対応する非正規構造の変換は次のものである。

[変換 1] 非正規構造 $T(V, E)$ を節点 $v_1, v_2 \in V$, 枝 $(v_1, v_2) \in E$ について、次のような非正規構造 $T'(V', E')$ にする。

$$V' = V - \{v_1, v_2\} \cup \{v (=v_1 v_2)\},$$

$$E' = E - \{(v_1, v_2)\} - \{(v_0, v_1)\} - \{U_1(v_1, v_{11})\} - \{U_1(v_2, v_{21})\}$$

$$\cup \{(v_0, v)\} \cup \{U_1(v, v_{11})\} \cup \{U_1(v, v_{21})\}$$

ここで、 v_{ki} は v_k の子節点、 v_0 は v_1 の親節点である。□

[変換 2] 非正規構造 $T(V, E)$ を節点 $v, v_1 \in V$, 枝 $\{(v, v_1)\} \subseteq E$ について、次の (1) または (2) の非正規構造 $T'(V', E')$ にする。

(1) $V' = \{v \text{ を } v' (v' \subset v) \text{ で置き換え, } v'' (=v-v') \text{ を加える}\}$

$$E' = E - \{(v, v_1)\} \cup \{(v', v'')\} \cup \{(v'', v_1) \mid (v_1 \text{ は } v \text{ の子節点})\}$$

(2) $v (=v'')$ と $v' (\in \{v_1 \mid v \text{ の子節点}\})$ を入れ換える。□

[変換 3] 非正規構造 $T(V, E)$, 属性 A について、A を含む節点 v を $v' (=v-A)$ で置き換える。 $v' = \phi$ となるときは v を除き、 v の親 v_0 と子 $v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{nn}$ に対し、枝

$(v_0, v_{n_i}) (1 \leq i \leq n)$ を加える。□

以下、非正規関係の変換を構造の変換で議論する。

【定義2】 非正規構造 T が非正規構造 T' に対する変換 1 ~ 3 の適用により得られるとき、 $T < T'$ 、特に、変換 i のみで得られるとき、 $T <_i T'$ で表す。□

変換 1 はいかなる非正規構造に対しても適用できるが、変換 2, 3 は常に適用できるわけではない。

【性質1】 変換 2 は、 $A(v) - v'' \rightarrow v''$ のときのみ適用可能である。このとき、変換後の根から v' までの経路の値の組に対し、 v'' の値は一意なので何の操作も必要としない。この関数従属性が成り立たないとき、 v'' の値は複数存在し得るので、 $v'v''$ の部分関係で v' による Group-by 操作が必要となる。□

【性質2】 変換 3 は、 $A \neq v$ のとき $A(v) - A \rightarrow A$ 、 $A = v$ のとき $A(v_i) - A \rightarrow A(v_i$ は v の子節点) のときのみ適用可能である。これらの条件を満たさないとき、 $A \neq v$ のときは $A(v) - A$ の値の組に、 $A = v$ のときは $A(v_i) - A$ の値の組に重複が存在し得るので、Group-by 操作が必要となる。□

【定義3】 非正規構造 T に対し、 $T' < T$ となる非正規構造を T で表現できる構造といい、そのような構造の集合を $\text{Rep}(T)$ で表す。非正規構造の集合 T に対しては、 $\text{Rep}(T) = \{T' \mid T' \in \text{Rep}(T), T \in T\}$ とする。□

定義3より、与えられた非正規構造の集合 T を表現するネットワーク構造を議論する場合、 $T \in \text{Rep}(T')$ となる非正規構造の集合 T' を考えればよい。従って、非正規構造の集合を表現するネットワーク構造の設計では、次の点に注意すればよい。

(1) なるべく非正規化されたもの、即ち非正規構造 T に対し、 $T <_1 T'$ となる非正規構造 T' を用いる (変換 1)。

- (2) Group-by操作については、非正規化されていなくてもよい場合がある（変換2, 性質1）。
- (3) 属性を多く用いる（変換3）。

(2)は次の既約化された非正規構造で代表した方がよいことを意味する。

【定義4】 有向木 $T(V, E)$ で表される非正規構造は、根 v_0 以外の節点 v で、根から v までの経路 v_0, v_1, \dots, v_n, v で $U v_i \rightarrow A (A \in v)$ となるものが存在しないとき既約であるという。既約でないとき、 v を $v' = v - A$ とし、 $U_{j=0, k} v_j \rightarrow A$ となる最小の k の v_k に A を加え既約にする操作を既約化という。□

既約化した非正規関係が表現可能であれば、各組の v_k の A の値を $T(v')$ の集合値の A の値とすることにより元の非正規関係が得られる。これは、 $U v_i \rightarrow A$ より $U v_i$ が定まれば A が定まるので、 $T(v)$ で Row-nest 操作を行うと $T(v)$ の値の集合の A の値が一致するためである。

【定理1】 非正規構造 T 、および T を既約化した非正規構造 T' は、 $T <_2 T'$ であり、 $T'' \neq T'$ 、 $T <_2 T''$ 、 $T' <_2 T''$ となる非正規構造 T'' は存在しない。□

(証明) 既約化を行う操作の逆の操作は変換2で実現でき、関数従属性が成り立つので性質1より適用可能で、 $T <_2 T'$ となる。 $T' <_2 T''$ となる T'' が存在すれば、 T' は既約でなく、既約化により T'' とすることができる。(証明終り)

5. オブジェクトによる非正規構造の表現可能性

意味的にまとまりのある属性集合をオブジェクトという。本節では、ネットワーク構造のオブジェクトと非正規構造のオブジェクトを比較することにより非正規関係を表現可能であるかどうかを判定する。

【定義5】 バックマン線図 B で表現されるオブジェクト Z は、属性集合 Z を含む B の部分ネットワーク構造 B' で、すべてのレコードの組の Z の値の組に重複がな

いような B' が存在する属性集合 Z である。□

B の連結な部分グラフ B' で表されるネットワーク構造 (B の部分ネットワーク構造) に含まれる属性集合 $U_{B'}$ も表現可能なオブジェクトであるが、データの対応を求める際にレコード型でキー以外の属性は無視することもできる。

【定理 2】 ネットワーク構造 B で表現可能なオブジェクトは、 B の部分ネットワーク構造 B' で、 $UK(R_i) \subseteq Z \subseteq U_{B'}$ (R_i は B' に含まれ、 B' 中に子レコード型を持たないレコード型) となる B' が存在する属性集合 Z である。そのような属性集合 Z の集合を $OBJ(B)$ で表す。□

(証明) オブジェクトの定義より、 $Z \subseteq U_{B'}$ である。 $UK(R_i) \subseteq Z$ であれば、子レコードが定まれば親レコードが定まるので、 $UK(R_i) \rightarrow U_{B'}$ が成り立つことから、 $UK(R_i)$ の値に重複はない、即ち Z の値の組に重複はない。 $UK(R_i) \subseteq Z$ であれば Z の値の組に重複が存在し得る。(証明終り)

非正規構造のオブジェクトを定義し、ネットワークデータベースでの非正規関係の表現可能性を示す。

【定義 6】 非正規関係の構造を表す有向木 $T(V, E)$ のオブジェクト集合を、 $OBJ(T) = \{Z \mid T \text{ の根から節点 } v(v \in V) \text{ までの経路の属性集合}\}$ とする。□

【定理 3】 構造が有向木 $T(V, E)$ で表される非正規関係が、バックマン線図 B で表されるネットワークデータベースで表現可能であるための必要十分条件は、 T を既約化した構造 T' が $OBJ(T') \subseteq OBJ(B)$ かつ T' の表す多値従属性集合が B の表す多値従属性集合に矛盾しないことである。□

(証明) T' が B で表現可能であれば、 $T < T'$ より T も表現可能である。このとき、根から各節点 v までの属性集合からなる部分関係には組の重複がないので、 $OBJ(T') \subseteq OBJ(B)$ であり、 B は T' の表す多値従属性集合 M に矛盾しない。 B が

Mを満足しなければ、そのようなデータはT'で表現できない。また、OBJ(B)に含まれないT'のオブジェクトが存在すれば、Bのそのオブジェクトの属性集合からなる部分に値の組の重複が存在し、T'の構造で表現できない。(証明終り)

6. むすび

ネットワーク構造で表現できる非正規構造の集合について議論した。非正規関係の集合を効率よく実現するときは、ネットワークモデルを用いる方がよい。そのためには、非正規構造の集合が与えられたときのそれらを表現するネットワーク構造の設計法を確立しなければならない。5節で示したオブジェクトはそのための道具として用いることができる⁹⁾。

参考文献

- 1) Makinouchi, A., "A Consideration on Normalized Form of Not-Necessarily-Normalized Relation in the Relational Data Model," Proc. Int. Conf. on Very Large Data Bases, pp.447-453, 1977.
- 2) Sholl, M.H. and Scheck, H.-J. (ed.), Theory and Applications of Nested Relations and Complex Objects, Workshop Material, INRIA, April 1987.
- 3) 上林, 田中, 武田, 矢島, "関係データベースにおける意味制約を反映した非正規関係の設計問題", 情報処理学会論文誌, 第24巻, 第6号, pp.877-885, 1983年.
- 4) Fisher, P.C., Saxton, L.V., Thomas, S.J., and Van Gucht, D., "Interactions between Dependencies and Nested Relational Structures," J. Comp. and Syst. Sci., Vol.31, No.3, pp.343-354, Dec. 1985.
- 5) Ozsoyoglu, Z.M. and Yuan, L.-Y., "A New Normal Form for Nested Relations," ACM Trans. Database Syst., Vol.12, No.1, pp.111-136, March 1987.
- 6) Takeda, K., "On the Uniqueness of Non-First-Normal-Form Relations," Theory and Applications of Nested Relations and Complex Objects, April 1987.
- 7) Jaeschke, G. and Scheck, H.-J., "Remarks on the Algebra of Non First Normal Form Relations," Proc. ACM Symp. on Principles of Database Syst., pp.124-138, March 1982.
- 8) Kambayashi, Y. and Furukawa, T., "Unnormalized Relations for Network Database Output," Theory and Applications of Nested Relations and Complex Objects, April 1987.
- 9) 古川, 上林, "オブジェクト集合を用いたネットワークデータベースの設計", 情報処理学会データベースシステム研究会, 昭和53年7月.