講　座

——データベースの基礎理論（3）——

従属性理論[†]

上林弥彦[††]

1. まえがき

関係データベースの従属性理論は，データベースの設計だけでなく，質問処理，一貫性制約の保持等の分野にも応用できるもので，特にここ数年に大きく進歩した分野でもある．本稿では，重要と思われる課題について最近の動向をまとめている．

1976年までは，従属性としては，関数従属性（FD）しか知られていなかったが，多値従属性（MVD）の導入に伴って，新たに問題が生じ，その解決のため種々の研究が行われた．

1つの問題は，従属性集合から導かれる従属性を求める計算に関するものである．関係 R を $\underline{R}$（関係を構成する属性集合）の部分集合に射影した関係を R' とすると，R' に含まれるMVDを，R の局所MVD（EMVD）と呼ぶ．EMVDでは，上記の導出のための有限の公理系が存在しないことが分かったため，そのような公理系が存在し，かつEMVDや結合従属性（JD，局所的なものも含める）のような重要な従属性を含むような従属性の研究が行われた．その結果として，テンプレート従属性（TD）や局所含意従属性（EID）等という一般的な従属性が定義され，活発な研究が行われている．この方向の研究は，述語論理とも大きな関係があるが，有限の大きさの関係を対象としているという点で，従来の述語論理にない新しい研究も必要となっている．

もう1つの問題は，従属性の持つ意味に関するものである．現実世界のデータの持つ制約が必ずしも従属性で表わせないことから，知られている従属性にさらに意味的制約を加えるという立場と，許される従属性集合に制約を与えるという立場からの研究がある．前者の立場でのFDの部分クラスに，特性，連係，順序従属性といったものがある．ある種のMVD集合は，FDやMVDによる記述では表現できない意味制約を満足することが知られており，このような問題のないMVD集合を求めることも重要である．問題となる場合は，MVDの推移的不整合か，MVDのキー分割不整合が起こっており，このような不整合のないMVD集合を，無矛盾であるという．無矛盾なMVD集合は，1つのJD（詳しくは1つの非巡回JD（AJD））と等価になることが示される．したがって，FD集合と1つのAJDよりなる従属性集合は，重要な制約のクラスであるといえる．このような制約のもとでのデータベースは，局所的な制約保持のみで全体の制約が保持できるため，質問処理も容易となることが知られている．

他の重要な問題として，空値の扱いがある．空値は，空値の許される条件等が従来の従属性では表現できないことや，1つの普遍関係を考えたデータベースでは不可欠である等の理由で重要である．前者の立場からは，空値の存在制約（EC）というものが知られており，後者の立場からは，空値のパターンを対象集合によって規定するという方法が知られている．しかし，ECを一般化した和型存在制約（DEC）は，後者と表現能力がほぼ等しいという結果が示されており，両者をまとめて扱うことが可能である．さらに，質問処理と関係して種々の問題点が知られている．

第2章では，計算可能な従属性集合を求めるという立場からの研究についてまとめ，第3章では，FDやMVDの表わす意味の研究についてまとめる．第4章では，AJDの性質について示し，第5章では主として空値の出現制約についてまとめた．

2. 関数従属性と多値従属性の一般化

2.1 関数従属性の一般化

関数従属性は次のような性質を持っている．

---

† Dependency Theory by Yahiko KAMBAYASHI (Department of Information Science, Kyoto University).

†† 京都大学工学部

（1） 多対1対応の表現.

（2） 1つの関係を，結合操作によって元へもどすことのできるような2つの関係に分解できるための十分条件.

（3） 関係 R の中で，FD: $X \to Y$ が成立していると，X の部分の等しい2つの組は，Y の部分も等しい.

（2）の性質を一般化して得られたものが，多値従属性 MVD，相互従属性 MD，結合従属性 JD であった．すなわち，MVD は1つの関係を結合操作によって元へもどすことのできるような2つの関係に分解できるための必要十分条件であり，MD は3つの関係への分解，JD は n 個 $(n \geq 2)$ の関係への分解のための必要十分条件となっている.

（3）の性質は，関係 $R(X, Y, Z)$ 上で FD: $X \to Y$ が成立する場合，次のように書ける.

組 $(x_1y_1z_1)$ と $(x_1y_2z_2)$ (ここで，たとえば，x_1 は属性集合 X に対応した属性値の並び) があれば，$y_1 = y_2$ である.

これを，次の記法によって表現する.

$$(x_1y_1z_1),\ (x_1y_2z_2) \Rightarrow (y_1 = y_2)$$

右辺は1つの等式のままで，左辺を2個以上にしたものが，**拡張関数従属性**[11] (Extended FD, XFD) である．右辺の等式の数を複数にするかわりに，1つのものを複数個並べて表現できる．XFD は，含意従属性 ID の定義に用いられる.

FD の他の表現法として，**組の存在条件**によるものもある．2つの組 $(x_1y_1z_1)$ と $(x_2y_2z_2)$ とが存在する場合に，組 $(x_3y_3z_3)$ が存在するという条件を，次のように書くものとする.

$$(x_1y_1z_1),\ (x_2y_2z_2) \Rightarrow (x_3y_3z_3)$$

この記法は，MVD 等を表現するのに有用である.

この組の存在条件において，X, Y, Z が互いに素であることが仮定されるのが普通である．しかし，この仮定を除けば，FD を表現できる.

X と Z は互いに素とし，$Z \supseteq Y$，すなわち，$Z = YZ'$ で表わせるものとする．この場合，FD: $X \to Y$ は次のように表現できる.

$$(x_1y_1z_1),\ (x_1y_2z_2) \Rightarrow (x_1y_1z_2)$$

$Z = YZ'$ であるので，$z_1 = y_1z_1'$，$z_2 = y_2z_2'$ となる (Z 内の Y の部分の値は，組の中の Y の部分と同じであるため)．結果の組は，$(x_1y_1y_2z_2')$ となるが，これが1つの組を示すためには Y の部分の値が等しくなくてはならず，したがって，$y_1 = y_2$ が得られる．すなわち，上記の表現で，FD: $X \to Y$ が示せることになる.

この性質は，推移従属性 TrD の定義に用いられる.

2.2 多値従属性の一般化

多値従属性の一般化には，現在次の立場によるものが知られている.

（1） 1つの関係を，結合によって元へ戻るような複数個の関係に分解するような従属性.

（2） MVD を表わす，組の存在条件を一般化して表現できるような従属性.

（1）の立場よりの従属性には，MD や JD のほかに，Delobel によって定義された，**第1階階層分解**[10] (First Order Hierarchical Decomposition, FOHD) の概念がある．これは，関係を次のような n 個の関係に分解するものである.

$$R(X, Y_1, Y_2, \cdots, Y_n) = R[X, Y_1] * R[X, Y_2] * \cdots * R[X, Y_n]$$

Delobel は，Fagin や Zaniolo の MVD の導入よりも以前 (1974 年) に，上記の概念を発表している.

関係 R を，$\underline{R}$ の部分集合 V に射影したときに表われるような MVD を，**局所多値従属性** (Embeded MVD, EMVD) と呼ぶ．すなわち，$R(X, Y, Z, W)$ における EMVD: $X \to\to Y | Z$ ($V = XYZ$ に相当) は，次のように表現できる.

$$R[X, Y, Z] = R[X, Y] * R[X, Z]$$

$W \neq \phi$ のとき，R はこの MVD によって必ずしも分解することはできない．このように，EMVD では，対象となる属性集合を明記する必要があるため，必ず2つの EMVD を対にして表現する.

上記の FOHD は，分解された関係がすべて X を含むような，特別な JD を用いていると考えられるが，この JD は下記のように MVD と EMVD の集合によって表現できる.

MVD: $X \to\to Y_1$

EMVD: $X \to\to Y_2 | Y_3 \cdots Y_n$

$X \to\to Y_3 | Y_4 \cdots Y_n$

$\vdots$

$X \to\to Y_{n-1} | Y_n$

この理由から，MVD や EMVD を考える場合，FOHD を直接扱わないのが普通となっている.

EMVD では，有限個の規則よりなる公理系が存在しないことが示されている．このことから，上記（2）の立場による一般化が行われ，部分集合従属性 SD，推移従属性 TrD，テンプレート従属性 TD 等の概念が導入された．TD は，有限個の規則よりなる公理系

を持ち，EMVD 等を部分クラスとして含む，1つの重要な従属性のクラスである．

MVD, JD, TD といった重要な従属性は，FD を特殊な場合として含んではいるが，FD そのものを記述できるわけではないので，FD とこれらの従属性の間の干渉についての研究が必要である．このため，FD も直接記述でき，重要な従属性を部分クラスとして含むような従属性として，含意従属性 ID が定義された．これらの従属性の研究は述語論理の研究と大きな関係がある．

以下では，従属性が関係 R 上の全属性 $\underline{R}$ を対象として定義されている場合と，$\underline{R}$の部分集合($\underline{R}$ も含む)を対象として定義されている場合で区別をする．前者の場合は全域 (Full, F) を従属性名の前に付け，後者の場合は局所 (Embedded, E) を前に付けることとするが，MVD と EMVD, FJD と JD (EJD ともいう), FTD と TD, ID と EID のようにどちらか片方は省略されることが多い（これはそれぞれの従属性に対して習慣上決まっている）．

関係 $R(X, Y, Z)$ 上で，MVD：$X \to\to Y$ が存在すると仮定する．$R[X, Y]$ が組 (x_1y_1), (x_1y_2) を含んでおり，$R[X, Z]$ が組 (x_1z_1), (x_1z_2) を含んでいれば，$R=R[X, Y]*R[X, Z]$(MVD：$X \to\to Y|Z$ に対応）には次の4つの組が含まれる．

$$(x_1y_1z_1),\ (x_1y_1z_2),\ (x_1y_2z_1),\ (x_1y_2z_2)$$

このような直積条件は，次のように示すこともできる

Rが，$(x_1y_1z_1)$ と $(x_1y_2z_2)$ とを含めば，R は $(x_1y_1z_2)$ と $(x_1y_2z_1)$ も含む．

ここで，x, y, z は変数であるため，次のように単純化できる．

R が，$(x_1y_1z_1)$ と $(x_1y_2z_2)$ を含めば，R は $(x_1y_1z_2)$ を含む．

（もう1つの組は y_1 と y_2, z_1 と z_2 を入れ換えたと解釈できる）．一般にこの条件で，$X \to\to Y$ という MVD を示すことができる．

したがって，組の存在条件による記法を用いると，$R(X, Y, Z)$ 上の MVD：$X \to\to Y$ は次のように表現される．

$$(x_1y_1z_1),\ (x_1y_2z_2) \Rightarrow (x_1y_1z_2)$$

$R(X, Y, Z, W)$ を XYZ 上に射影した関係上で成立する EMVD：$X \to\to Y|Z$ は，次のように表現できる．

$$(x_1y_1z_1w_1),\ (x_1y_2z_2w_2) \Rightarrow (x_1y_1z_2w_3).$$

これは，W の値が全く関係しないことを示している．

EMVD は，データベースの分解設計法に不可欠なものである．すなわち，与えられた関係Rをある MVD で分解すると結果の関係はRの射影となっており，ここで成立する MVD（すなわち R の EMVD）がこれらの関係の分解に使えるためである．与えられた MVD と EMVD の集合からどのような MVD や EMVD が導出できるかを調べるには，EMVD を含む推論則を求める必要がある．EMVD の推論則の主なものを次に示す．

［EMVD の推論則］[24]

EMVD 1（射影律）：$X \to\to YZ|W$ なら $X \to\to Y|W$.

EMVD 2（キー変更律）：$X \to\to YZ|W$ なら $XY \to\to Z|W$.

EMVD 3（分解律）：$X \to\to Y|ZW$, $XY \to\to Z|W$ なら $X \to\to Z|W$.

EMVD 4（共通集合）：$X \to\to Y|Z$, $X \to\to V|W$, $Y \cap V \neq \phi$, $Y \cap W \neq \phi$ なら $X \to\to Y \cap V|Y \cap W$.

EMVD 5（擬推移律）：$X \to\to Y|Z \cup V$, $YZ \to\to U|XW$, かつ V と W 以外の組合せがすべて互いに素なら，$XZ \to\to U|YW$.

MVD-EMVD 1（結合可能性）：$XY \to\to Z$, $X \to\to Y|Z$ と $X \to\to Z$ は等価.

MVD-EMVD 2（和集合）：$XY \to\to UV$, $XZ \to\to UW$ $X \to\to Y|Z$, $W \subseteq Y$, $V \subseteq Z$ なら，$X \to\to UVW$.

FD-EMVD 1：$X \to\to Y|Z$, $Y \to Z$ なら $X \to Z$.

FD-EMVD 2：$X \to\to Y|Z$, $XY \to U$ なら $X \to\to YU|Z$.

上記で EMVD は，$X \to\to Y|Z$ という2つの EMVD の組で示されている．EMVD の計算については文献[2),15),33)]を参照のこと．

しかしながら，Parker, Parsaye-Ghomi, Sagiv, Walecka は，EMVD に対しては，有限個の推論則よりなる公理系が存在しないことを示した．

Parker と Parsaye-Ghomi の示した推論則は次のとおりである[24]．

$$\left.\begin{array}{l} X_i \to\to X_{i+1}|X_{i+2} \\ (i=1, \cdots, n-1) \\ X_n \to\to X_{n+1}|X_1 \end{array}\right\} \text{ならば，} X_1 \to\to X_n|X_{n+1}.$$

この推論則は任意のnについて成立する．しかも，あるnに対する推論則は，前提となる EMVD が $n-1$ 個以下であるような推論則の組合せでは表わせないとも示せるため，推論則の数の無限性が示せる．

Sagiv, Walecka の示したものは次のとおりである[28]．

$$\left.\begin{array}{l} X_i \to\to X_{i+1} | Z \\ (i=1, \cdots, n-1) \\ X_n \to\to X_1 | Z \end{array}\right\} \text{ならば，} X_1 \to\to X_n | Z$$

部分集合従属性 (Subset Dependency, SD)[28] や**推移従属性** (Transitive Dependency, TrD)[23] は，EMVD を一般化して，その性質を研究するために導入された概念であるが，やはり有限個の推論則よりなる公理系は存在しない[24].

関係 $R(X, Y, Z, W)$上 の SD や TrD は次のように定義される.

$(x_1y_1z_1w_1)$, $(x_1y_2z_2w_2) \Rightarrow (x_2y_1z_2w_3)$.

これは，$x_1=x_2$ のとき EMVD: $X \to\to Y|Z$ となる. SD では，$X \cap Z=\phi$，$Y \cap Z=\phi$ が仮定されており，TrD ではそのような仮定はない. したがって，SD では，$X \cap Y=\phi$ は仮定されておらず，$X \cap Z=\phi$ が仮定されているという点で，Y と Z の間に非対称性がある. TrD ではそのような非対称性がなく，$Y \cap Z=\phi$ も仮定されていないため FD も表現できる.

上記で定義された TrD を，$X(Y, Z)$ と略記することにする. FD, MVD, EMVD は，それぞれ，次のように表わせる.

FD: $X \to Y$	$X(Y, U)$
MVD: $X \to\to Y$	$X(Y, U-Y)$
EMVD: $X \to\to Y \mid Z$	$X(Y, XZ)$

ここで U は全属性集合である. FD の場合の証明は，**2.1** で示したものとほぼ同じである. 他の証明も自明である.

テンプレート従属性 (Template Dependency, TD)[25] は，存在を仮定する組の数を2個以上にしたものである. すなわち，$t_1, \cdots, t_n$ という n 個の組が関係に含まれていれば，t_{n+1} という組も含まれることになるという条件

$t_1, t_2, \cdots, t_n \Rightarrow t_{n+1}$

で示される. 属性集合については SD や TrD の場合のような重複は許されていない.

TD は，あきらかに，EMVD 等を含んでいる. JD を含んでいることは，次の例で示される.

JD: $*[ABC, BCD, AE]$ は次の条件で示される.

$(abcd_1e_1)$, (a_1bcde_2), $(ab_1c_1d_2e) \Rightarrow (abcde)$.

通常，SD, TrD, JD, TD では，局所的 (embedded) なものをEを省いて示す. TD については，次の結果が知られている.

(1) TD に対して，健全で完全な公理系が存在する.

(2) TD は，EMVD, JD 等を含む一般的な従属性であるが，FD をきっちり表わすことはできない. このため，FD と TD の干渉問題も研究されている[26].

JD については，現在のところ FJD に対する健全で完全な公理系の存在が知られている[30].

2.3 含意従属性と代数従属性

含意従属性 (Implicational Dependency, ID) は，次のような形で示せる.

$t_1, t_2, \cdots, t_n \Rightarrow t_{n+1}$ or $x_i=y_j$

すなわち，TD と XFD をまとめたものといえ，FD, MVD, JD 等のおもな従属性をすべて含んでいる.

右辺は，複数個の条件の論理積であっても良いが，全域的な場合は，右辺が1つのものに分解できる. **局所含意従属性** (Embeded ID, EID) の場合はこのような分解はできない.

Yannakakis と Papadimitriou[36] は，次のような**代数従属性** (Algebraic Dependency, AD) を定義した.

$\bar{R}=\{A, B, \cdots, D\}$ とする. $\bar{R}$ は R のコピーを横方向に無限個つないだものである. すなわち，

$\underline{R}=\{A_1, B_1, \cdots, D_1, A_2, B_2, \cdots, D_2, A_3, \cdots\}$

$\bar{R}=\{t\,t\,t \cdots | t \in R\}$

AD は，$\bar{R}$ に対する，射影と結合による式を用いた制約である. ϕ_1 と ϕ_2 を，射影と結合による式として，

$\phi_1(\bar{R}) \subseteq \phi_2(\bar{R})$

という形で表現できる.

FD や EJD は，次に示すように，上式の特別な場合として表現できる.

FD は，コピーの部分を用いて，組の存在条件による表現と同様に次の形で表現できる. FD: $A \to B$ に対し，

$\bar{R}[AB_1] * \bar{R}[AB_2] \subseteq \bar{R}[AB_1B_2]$

EJD: $*[S_1, \cdots, S_n] (S=\cup S_1)$ は次の形で表現できる.

$\bar{R}[S_1] * \bar{R}[S_2] * \cdots * \bar{R}[S_n] \subseteq \bar{R}[S]$

すべての $\bar{R}$ は R で置き換えることができる. また，一般に，左辺⊇右辺が成立するため，上記の条件が成立すれば，左辺=右辺となり，EJD の定義と一致する.

AD は，結合と射影という2つの演算によって定義されており，関係代数による制約表現となっている.

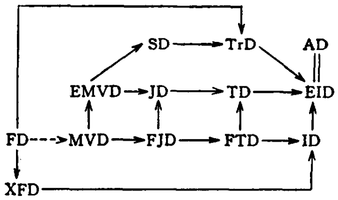

図-1 従属性間の関係

AD に関しては，次の性質が知られている．

（1） 健全で完全な公理系が存在する．

（2） AD と EID は等価である．

AD と EID は，全く異なった動機で定義されたが，その能力が一致することから，一般的な従属性として重要なものと考えられ，最近この性質に関していくつかの報告がある[8]．

図-1 は，これらの従属性の間の関係を示したものである．ここで，$A\rightarrow B$ は，B は A を含みかつ B は A を表現できることを示しており，$A\rightsquigarrow B$ は B は A を含むが A そのものは表現できないことを示している．＝は等価であることを示す．

3. 関数従属性と多値従属性の意味的側面

関数従属性 FD，および多値従属性 MVD は，それぞれ1対1対応，多対1対応，および多対多対応の重要な部分クラスである概念的要素集合従属性 CESD 等に対応しているため，他の従属性に比べて直感的な意味が分かりやすいという点で重要な従属性と考えられる．したがって，FD や MVD の意味についての検討や，その特別なクラスについての研究も盛んで，本章ではそれらの研究について紹介する．

3.1 関数従属性の部分クラス

1975年に，Schmid と Swenson は，FD をさらに意味を考えて類別し，意味によって扱いを変えるべきであると主張した[29]．

1つの類別は，**直接的関係**と**間接的関係**の区別である．たとえば，学生に指導教官が1人ずつ割り当てられているとすると，学生→学生の年齢　という直接的関係を示す FD のほかに，学生→指導教官の年齢　という間接的関係を示す FD も得られる．後者は，学生→指導教官，指導教官→指導教官の年齢　という2つの FD より得られたものであるため間接的であるといえる．

データベースの設計に際しては，できるだけ直接的関係を反映するようにするべきである．しかし，FD の左辺が2個以上の属性からなるものも許すと，直接的関係と間接的関係の区別は容易ではない．次の例は Bernstein の与えたものである[5]．

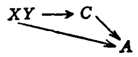

図-2 直接的関係と間接的関係

次の FD 集合を考える．

$XY\rightarrow A$　　$AX\rightarrow B$　　$BY\rightarrow C$　　$C\rightarrow A$

はじめの3個の FD を使うと，次の FD が出てくる．

$XY\rightarrow C$

ここで，XY と C と A の関係を示すと，**図-2** のようになる．$XY\rightarrow A$ は，$XY\rightarrow C$ と $C\rightarrow A$ という2つの FD より導けるものとなっている．したがって，$XY\rightarrow A$ を間接的関係として消去すると，実際には $XY\rightarrow C$ が $XY\rightarrow A$ を使って導かれていたため，$XY\rightarrow C$ も消えてしまうことになる．

このように，自明でない場合があるのは注意すべきであろう．

もう1つの類別は，**特性**と**連係**の区別である．さきの例で，学生→学生の年齢　と　学生→指導教官　という2つの FD がこれらに対応している．

学生の年齢は学生の特性として示されているもので，学生が卒業していなくなれば同時に消される性質のものである（同じ年齢の学生がいなければ，その年齢値そのものがデータベースより消える）．しかし，学生と指導教官との関係はもうすこし対等で，学生か指導教官のいずれかがいなくなっても，対応する指導教官が学生のデータを消すという要請はない．前者のように，学生に対する，住所，年齢，身長，体重といったものを特性と呼び，後者の連係と区別することができる．Wiederhold[35] の本では，この区別を対応する属性に適用して，前者を**値属性**，後者を**参照属性**と呼んでいる．5章で述べる**存在制約**も前者と関係したものである．

$A\rightarrow B$ という FD は，A と B が数値をとると仮定すると $B=f(A)$ という関数（一般に部分的にしか定義されていない）とみることができる．これに，単調非減少関数や単調非増大関数という類別を行うというのが，Ginsburg と Hull の**順序従属性** (Order Dependency, OD) である[14]．

たとえば，小切手番号 CHECK# と小切手の日付 CHDATE は，CHECK# が増加して CHDATE が減少するということはないため，単調非減少関数の関

係にあるといえる．このことを次の記号で示す．

$\overline{\mathrm{CHECK\#}} \rightarrow \overline{\mathrm{CHDATE}}$

家の価格 PRICE が，広さ FLOORAREA が大きいほど高く，市の中心よりの距離 DISTANCE が大きいほど安いとすると，次のように示される．

$\overline{\mathrm{FLOORAREA}}\ \ \underline{\mathrm{DISTANCE}} \rightarrow \overline{\mathrm{PRICE}}$

すなわち，各属性 A に対し，非減少順を示す $\bar{A}$ と非増大順を示す $\underline{A}$ を用意して，順序従属性を表現する．このどちらでもないものに対しては，$\bar{A}$ と $\underline{A}$ を並べることにする．このようにすれば，順序従属性は一般の FD を表現できる（FD：$X\rightarrow Y$ は，$\bar{X}\underline{X}\rightarrow\bar{Y}\underline{Y}$ で示される）．

このような順序従属性は，次のような用途に用いられる．

（1）　データ伝送量の削減：チェック番号 #100 が5月1日で，#200 が5月5日であるとすると，その間の番号に対しては1日から5日までの間であると分かり，そのような情報のみでできる処理に使える．

（2）　インデックスの圧縮：3月1日に #1 より #5 までのチェックを発行し，2日に #6 より #12 まで発行した等の事実は，各日に発行した最初の番号（日の飛ぶときは最後の番号も必要）を記憶するだけでよい．

（3）　あいまいな質問の効率の良い処理：10万ドルで買える家にはどのようなものがあるか等といった質問の処理．

3.2　縮退した多値従属性

縮退した MVD (DMVD) は，2つの FD によって表わされるもので，FD の持つ扱いやすい性質を保存した特別なクラスの MVD といえる．このクラスの MVD は，著者の知る限りでは，田中，チュン，上林，矢島 (1978)[32]，Armstrong, Delobel (1980)[2]，Sagiv, Fagin (1979)[27] らにみられる．

$R(X, Y, Z)$ が FD の存在により $R[X, Y]$ と $R[X, Z]$ に分解できる場合，次のいずれかの FD が用いられる．

$X\rightarrow Y \qquad X\rightarrow Z$

したがって，次の条件を満足する R は，$R[X, Y]$ と $R[X, Z]$ に分解できる（図-3）．

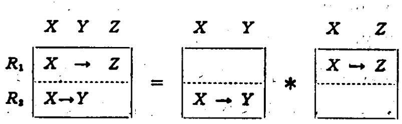

図-3　縮退した多値従属性

（1）　R は R_1 と R_2 の和で示される．

（2）　$R_1[X]$ と $R_2[X]$ は共通要素を含まない．

（3）　R_1 では，$X\rightarrow Y$ が成立する．

（4）　R_2 では，$X\rightarrow Z$ が成立する．

R_1 も R_2 も，(3)と(4)の条件により分解でき，(2)の条件により $R=R_1\cup R_2$ も同様の分解ができることになる．すなわち，R では，MVD：$X\rightarrow\rightarrow Y|Z$ が成立する．この MVD は，$X\rightarrow Y$ の部分と $X\rightarrow Z$ の部分に分けることができるために，特に縮退した MVD と呼ばれる（(3)と(4)の両方の条件の成立する $X\rightarrow YZ$ の部分は(2)の条件により R_1 か R_2 のどちらかに含める）．

田中，チュン，上林，矢島[32]は，2つの関係を結合して構成してできたビューの更新の行える条件として，このような DMVD を定義した．すなわち，システムが $R[X, Y]$ と $R[X, Z]$ を記憶していて，ビュー R をこの2つの結合で作った場合，一般には R 上の1つの組の追加や削除の操作は一意的にシステムの記憶している関係の操作に翻訳できないが，R が DMVD の条件を満足していれば，一意的な翻訳が可能となる．Delobel, Armstrong の動機も同様である[2]．

Sagiv と Fagin は，DMVD を**多ブール従属**と呼んでおり，MVD と全く同じ公理系が使えることを示した[27]．Σ を FD と MVD よりなる集合とし，σ を1つの FD か MVD とする．Σ' と σ' は，それぞれ，Σ と σ の中の MVD を対応する DMVD に置き換えたものとする．このとき，σ が Σ より導かれることと σ' が Σ' より導かれることとは等価であることが示されている．

勝野は，次章で述べる MVD の推移律によって生じる意味の問題は，DMVD に限れば生じないことを示している[18]．

3.3　多値従属性の持つ意味

あるクラスの従属性集合が任意に与えられた場合，その集合より導かれるすべての従属性をちょうど満足するような関係が常に存在する場合，そのクラスの従属性集合は**アームストロング関係**を持つという．FD 集合，MVD 集合，FD と MVD のまざった集合，JD 集合などはアームストロング関係を持つ例である．たとえば，任意の MVD 集合が与えられた場合，それより推論則で導かれるすべての MVD をちょうど満足し，その他の MVD を満足しないような関係を必ず作ることができる．しかし，その関係が“自然”なものかどうかは別の問題である．MVD の集合があ

る場合には“不自然”な関係を定義することが，上林，田中，矢島[16]によって指摘され，Lien や Sciore によってより一般的な概念である無矛盾な MVD 集合という概念が導入された[31]．MVD は JD の特殊な場合であるため，当然 JD 集合の場合にも不自然な場合がありうるが，無矛盾な MVD 集合は 1 つの JD に対応するということも示されているため，このような拡張は不要であろう．まず，MVD と CESD との対応上の問題をまとめてみる．

MVD の導入以来，問題とされてきた性質に MVD 0 がある．これは次のようなものであった．

MVD 0 : $U=XYZ$, $Y\cap Z\subseteq X$, $X\to\to Y$ なら $X\to\to Z$.

これは，MVD : $X\to\to Y$ が単独では存在せず，必ず $X\to\to Z$ を伴うということで，X と Y が対応関係を持てば，それらと関係のない Z について，X と Z とが対応関係を持つという性質である．これは，CESD にはないものであり，他の MVD 則と異なり関係代数演算に対応してないという点でも問題と考えられていた．このため，Biskup や Beeri らは MVD 0 の影響をいかに除くかという研究を行ってきた．

（1） Biskup は MVD 0 の代りに MVD 7 を導入し，MVD 7，MVD 2，MVD 3 が健全で完全な公理系となることを示した[6]（本講座（1）参照）．

（2） Beeri は，はじめに MVD 0 を 1 回使うだけで，あとは MVD 0 を使わないで，与えられた集合を左辺とする MVD の従属基がすべて求まることを示した[3]．

（3） Biskup は，全属性集合 U を固定しないような MVD について考察した[7]．

著者らは，MVD と CESD とを比較して，次のような問題のあることを指摘した[33]．

（1） MVD の左辺の属性集合は，実体と 1 対 1 対応が要求され，FD におけるキーと同様の性質が満足されなければならない（MVD のキー）．

（2） MVD の推移律は，意味的に不自然な制約となる．

（3） CESD では，1 つの要素と空集合の対応ができるが，MVD ではそのような対応は表現できない．

（1）の問題の例として，関係 R（科目，先生，学生）を考える．各科目には，担当する先生の集合，履修する学生の集合が対応しており，MVD : 科目→→先生|学生 が成立する．このMVDは，先生や学生の中に同姓同名の人がいてもなんら影響されない．しかし，実際には異なる科目が同じ科目名になったとたんに，MVD は満足されなくなることがある．このことは，FD の左辺と同様に，MVD の左辺となっている属性の値を変更するときには，他の属性値の変更よりもっと注意を要することを示している．

A	B
a_1	b_1
a_1	b_2
a_2	b_2
a_2	b_3

（a）

B	C
b_1	c_1
b_2	c_2
b_3	c_3

（b）

A	B	C
a_1	b_1	c_1
a_1	b_2	c_2
a_2	b_2	c_2
a_2	b_3	c_3

（c）

A	C
a_1	c_1
a_1	c_2
a_2	c_2
a_2	c_3

（d）

A	B	C
a_1	b_1	c_1
a_1	b_1	c_2
a_1	b_2	c_1
a_1	b_2	c_2
a_2	b_2	c_2
a_2	b_2	c_3
a_2	b_3	c_2
a_2	b_3	c_3

（e）

図-4 MVD の推移的不整合

（2）の問題の例として，**図-4** を考える．ここで，2 つの MVD : $A\to\to B$ と $B\to\to C$ が成立しているとする．A と B の対応は**図-4**（a）に示すようになっており，BとCの対応は**図-4**（b）に示すようになっているとする．$B\to\to C$ より MVD 0 により $B\to\to A$ が得られるので，この 2 つの関係は結合でき，**図-4**（c）に示す，A, B, C の間の関係が得られる．この関係の A と C に対する射影をとれば，A と C の間の関係（**図-4**（d））が得られる．$A\to\to B$ と MVD 0 により $A\to\to C$ が成立するため，図-4（a）と（d）を結合しても，A, B, Cの間の関係が得られることになる．結果として，**図-4**（e）に示す関係が得られる．（c）と（e）の関係は同じものでないといけない．たとえば，$c_1=c_2=c_3$ であれば同じ関係となる．

このように，1つの関係内で推移的なMVDが成立するためには，データ上に新たな制約が加わることになる．

定理[33]：X, Y, Z を互いに素な属性集合として，関係 $R(X, Y, Z)$ 内で，$X\to\to Y$ と $Y\to\to Z$ が成立しているとする．X の値 x と x' とが条件

$$(R[X=x])[Y]\cap(R[X=x'])[Y]\neq\phi$$

を満足していると

$$(R[X=x])[Z]=(R[X=x'])[Z]$$

となる．これを，**MVD の推移的不整合**と呼ぶ．

MVD 0 によって，$X\to\to Y\to\to Z$ も成立するため，上

記の性質は X と Y を入れ換えても成立する. 図-4 の例で, $B \to\to A \to\to C$ が成立しているので, $X=B$, $Y=A$, $Z=C$ と置くと次のようになる.

$(R[B=b_1])[A]=\{a_1\}$

$(R[B=b_2])[A]=\{a_1, a_2\}$

$(R[B=b_3])[A]=\{a_2\}$

上の2式より, b_1 と b_2 を定理の x と x' とみなせるので

$(R[B=b_1])[C]=(R[B=b_2])[C]$

すなわち, $c_1=c_2$ となる. 同様に2番目と3番目の式より $c_2=c_3$ が得られ, 上記の条件となる.

上記の定理の場合に, $X \to Y$ か $Y \to X$ が成立していれば, このような問題は生じない.

この MVD の推移律問題については, さらに, 勝野[18], 中村, Chen[20] が検討している.

(3)の問題は, 空値の扱いに関するものである. Codd はキーに含まれる属性に空値が存在することを許していない. この条件のもとでは, FD がなく MVD のみしかない関係では, すべての属性がキーに含まれることになるので, 空値を許すことができない. このため, 空集合との対応を表現することができない.

推移律問題を含むより一般的な MVD の問題について, 最近 Lien と Sciore が新しい結果を発表している.

上記の定理で, X と Y とが互いに素という条件をなくすと, MVD の推移的不整合の生じる条件は次のようになる.

条件: $(X \cup Y) \cap Z=\phi$ で, MVD: $X \to\to Y$ と $Y \to\to Z$ が存在し, $X \cap Y \to\to Z$ が存在しない[31].

推移的不整合を従属性で表現するために, Sciore は, X, Y, Z に含まれない次の条件を満足する新しい属性 A を導入する方法を示した.

$X \to A$, $Y \to A$, $A \to\to Z$.

この $A \to\to Z$ を利用して関係を XYA 上の関係と AZ 上の関係に分解できる. 前者では $X \to A$ により $X \to\to Y$ が成立している (MVD 0 による).

もう1つの MVD 集合の問題は, **MVD のキー分割不整合**である. これは, $AB \to\to C|D$ と $CD \to\to A|B$ という2つの MVD が存在する場合で, 片方の MVD が他方の MVD のキー部を2つに分けることになる. まず, 必要な定義をまとめる (MVD 0 による).

DEP (X): X の従属基の要素よりなる集合

必然的従属: $X \to\to Y$ が X を左辺とする MVD を用いないと導くことができないとき, Y は X に必然的従属であるという. このような Y の存在するような X を, 必然的従属の MVD キーと呼ぶ. このようなキーの中で, $Y \subsetneq X$ であるような必然的従属の MVD キーを持たないものを, MVD の最小キーと呼ぶ.

MVD 集合に MVD のキー分割不整合が存在するといわれるのは次の条件が成立した場合である.

ZX, ZY: 必然的従属の MVD キー

DEP $(ZX)=\{V_1Y_1, \cdots, V_nY_n, P_1, \cdots, P_h\}$

DEP $(ZY)=\{W_1X_1, \cdots, W_mX_m, Q_1, \cdots, Q_k\}$

ここで, $X \cap Y=\phi$, $\bigcup_{i=1}^{n} Y_i=Y$, $\bigcup_{i=1}^{m} X_i=X$.

すべての i について, $Z \to\to Q_i$ が成立しない場合は $Q_i \subseteq \bigcup_{j=1}^{n} V_j$, $Z \to\to P_i$ が成立しない場合は $P_i \subseteq \bigcup_{i=1}^{m} W_j$ となる. また, m か n のうち少なくとも1つは1より大きい.

関係の一意的な分解を考えるため, MVD 集合の無矛盾性の概念が Lien によって導入された. MVD 集合が**無矛盾**であるといわれるのは, 任意の2つの必然的従属の MVD キー X と Y に対して, 次の条件が成立する場合である.

DEP $(X)=\{V_1, \cdots, V_k, X_1, \cdots, X_i, Z_XY_1 \cdots Y_j\}$

DEP $(Y)=\{V_1, \cdots, V_k, Y_1, \cdots, Y_j, Z_YX_1 \cdots X_i\}$

DEP $(X \cap Y) \supseteq \{V_1, \cdots, V_k\}$,

$Z_X \cup X=Z_Y \cup Y$.

これらの定義のもとで, Sciore の示した主な結果は次のとおりである[31].

(1) 無矛盾でない MVD 集合においては, MVD の推移的不整合か, MVD のキー分割不整合のいずれかが成立する.

(2) 無矛盾である MVD 集合からは, 第四正規形の関係集合が一意に定まる.

(3) 無矛盾である MVD 集合は, 1つの JD で表現できる. ある1つの JD より導かれる MVD 全体の集合は無矛盾となる (この集合は必ずしも JD と等価とは限らない).

最近, 勝野は拡張した無矛盾性について検討している.

4. 非巡回結合従属性

実際的なデータベース設計に関する仮定として, 1つの**非巡回結合従属性** (acyclic join dependency, AJD) と FD の集合のみを従属性制約とした立場よりの研究が盛んになっている. これは, 次のような理由による.

（1） 本講座の第2回 (Vol. 23, No. 7) の **4.4** 節で示したように，各関係がFDしか表現していないような関係の集合で表現できる制約集合は，1つのJDとFD集合である．

（2） 無矛盾なMVD集合は1つのJDで表現できるが，さらに強い結果として，無矛盾なMVD集合と1つのAJDの等価性がいえる．

本章では，AJDの基本的な性質を要約する[4]．

ハイパーグラフは，(N, E) で示される．ここで N は節点集合で E は枝集合である．枝は，一般のグラフの場合と異なり節点集合の部分集合で示される．ハイパーグラフの枝の中で，他の枝に含まれるようなものを除く操作を簡単化という．他の枝に含まれるような枝のないハイパーグラフを**既約**であるという．**図-5**(a)は既約なハイパーグラフを示しており，(b)は既約でないハイパーグラフを示している．ここで枝は対応する節点(A, B, C, D, E で示される）を囲む形で示されている．

ハイパーグラフの**連結性**は一般のグラフと同様に定義される．

節点集合 M に対して，M によって生成された部分枝集合とは，$\{e \cap M \mid e \in E\}$ をいう．このような M が存在する部分枝集合を，**節点生成型部分枝集合**という．部分枝の連結集合に含まれる2つの枝 e と f が，$Q=e \cap f$ の節点を除くとこの連結集合を非連結にする性質を持つとき，e と f は関節対と呼ばれ，Q は

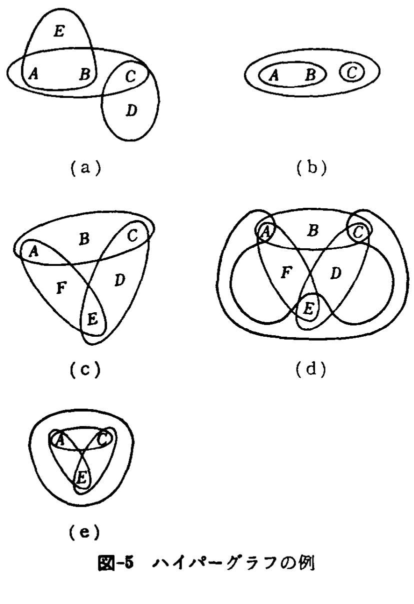

図-5 ハイパーグラフの例

関節集合と呼ばれる．**ブロック**は，既約なハイパーグラフに対して定義され，関節集合を持たないような連結した節点生成型部分枝集合である．1つの枝よりなるブロックを自明であるという．

ハイパーグラフは，既約にした後，すべてのブロックが自明となると**非巡回**であるといわれる．非巡回でないハイパーグラフは**巡回**である．

図-5(a)は，非巡回ハイパーグラフの例である．節点集合を変化させた場合に，非連結となるか，連結で関節集合を持つか，自明なブロックになるかのいずれかしかないので非巡回であることが分かる．

図-5(c)は巡回ハイパーグラフである．これは，このグラフ自体が関節集合を持たないためである．この2つの場合は，巡回か非巡回であるかは，一般のグラフが閉路を含むかどうかと対応しており自明であった．しかし，一般のグラフでは，閉路を含むグラフに枝を加えても閉路を含むが，ハイパーグラフでは，巡回グラフに枝を加えると非巡回となることがある．**図-5**(d)はこのような例で，部分グラフとして(c)の巡回グラフを含んでいるが，このグラフ自体は非巡回である．すなわち，このグラフは，$Q=ABC \cap ACE = AC$ という関節集合を持っている．また，(c)のグラフは(d)の節点生成型部分枝集合ではない．その他の部分集合も調べることにより(d)が非巡回であることが分かる．

ハイパーグラフの非巡回性の判定は，次の方法が簡単である．

［ハイパーグラフの非巡回性の判定］[37]

（1） 1つの枝にしか含まれない節点はすべて除く．

（2） 他の枝に含まれる枝は除く．

（3） 上記(1)と(2)を繰り返して，すべての節点がなくなれば，与えられたグラフは非巡回であり，そうでなければ巡回である．

この方法は，分散データベースの質問処理に関係したものとして，Yu と Ozsoyoglu[37] によって最初に発見されたが，Graham の方法と呼ばれることも多い．

図-5(a)のグラフでは(1)の適用により(b)のグラフとなる．(2)を適用すると，ABC という1つの枝しか残らないので，再び(1)を適用するとすべての節点がなくなり非巡回であるといえる．(c)のグラフでは，(1)で B, D, F が消えるが，それ以後の簡単化はできず，巡回であると分かる．(d)のグラフでは(1)を適用すると(e)のグラフとなり，3つの枝は枝

ACE に含まれてしまうので(2)の操作によって消されてしまう．残りは1つの枝 ACE のみなので再び(1)を適用するとすべての節点がなくなる．

JD：$*[S_1, S_2, \cdots, S_m]$ に対応するハイパーグラフは，$\cup S_i$ に含まれる各属性に対応して1つずつの節点を持ち，枝は $S_1, S_2, \cdots, S_m$ であるようなものである．たとえば，JD：$*[ABE, ABC, CD]$ に対応するハイパーグラフは，図-5(a)に示すものとなる．

JD は，対応するハイパーグラフが非巡回のとき，**非巡回 JD** (AJD) と呼ばれる．

次の性質が知られている．

定理[4)]：$J=*(S_1, \cdots, S_m)$ を1つの JD とし，X と Y を互いに素な属性集合とする．J より MVD：$X \to\to Y$ が論理的に導かれるための必要十分条件は，J に対応するハイパーグラフよりXに対応する節点を除いた場合に，Yが1つまたはそれ以上の連結成分の和になることである．

さらに次の結果が知られている．

定理[4)]：MVD の集合が無矛盾であることの必要十分条件は，それらが1つの AJD に等価であることである．

Beeri らは，1つの AJD と等価な性質をさらにいくつか示している[4)]．

このような1つの AJD よりなるデータベースは，普遍関係を利用者のビューとした，関係名を考えなくて良いような利用者インタフェースを作るにも有用であることが知られている[12)]．

また，処理の容易な質問は，AJD と似た性質（木質問と呼ばれる）を持っていることも知られている．

5. データベースにおける空値と従属性

データベースにおいては，種々の理由でデータの値が入らない部分がある．このようなものを総称して**空値**と呼ぶ．空値の問題としては，次のようなものが知られている．

(1) 空値の分類およびそれらに対応した質問処理．

(2) 空値を許した場合の従属性理論．

(3) 属性の中には空値を持ってもよいものとそうでないものとがある．どのような属性が空値を持てるかという制約条件の記述とその計算．

空値には種々の意味のあることが知られている．1975年の ANSI/X 3/SPARC のレポートでは14種の空値が示されている[1)]．以下にすこしまとめて示す．

非存在：その値は存在し得ないことを示す．乗物を示す関係内で，車に対しては翼の長さという値は存在し得ない．

存在し得るが値がない：空室となったアパートの室の居住者名．

存在するが不明である：存在することは分かっているがデータが得られない（海王星の温度）．まだデータが得られていない（新入社員の高校での成績）．データはすでにシステムに入っているがまだ使えるようにはなっていない．データの更新中で使えない．

存在するが使うことが禁止されている：個人の思想・宗教のデータは法的に禁止されることになる．保安上の理由で使えない．これには一時的なものもある．

信頼性が低いので使えない．

上記の空値より論理的に導出できる空値．

これらのうちで，とくに，非存在の空値と不明の空値の扱いが重要である．他の空値の扱いもこの2つの空値の扱いに準じて扱うことができる．この2つの扱いの違いは，次の質問の処理に表われる．

{Aの値が集合Sに属している組}$\cup${Aの値が集合$D(A)-S$に属している組}（$D(A)$ は A の定義域）．

A が年齢の場合，$A \geqq 40$ を満足する組と，$A<40$ を満足する組のそれぞれを求める場合には，年齢が不明の人はどちらの答にも含まれない．しかし，和集合をとると，年齢が不明な人もどちらかの集合には属しているため解に含まれることになる．

しかし，Aが翼の長さの場合，翼のないもの（非存在の空値）は解に入ることはない．

(2)の空値を許した場合の従属性理論についても，いくつかの成果が知られている．

関係 $R(A, B, C)$ に，$B \to C$ という FD があり，2つの組 (a_1, λ, c_1), (a_2, λ, c_2) があったとすると，次のことがいえる．

λ は，不明の空値であり，非存在ではない．

$c_1 \neq c_2$ であるとすると，2つの組における λ は異なっていなければならない．

Rを FD：$B \to C$ によって，$R[A, B]$ と $R[B, C]$ に分解する場合には，この2つのλをλ_1とλ_2としておかないと，結合によって元の関係に戻すことができない．この事実は，田中譲による指摘が最初と思われる．

FD や MVD のキー部分以外に空値を許したものとして，**空値付 FD** (FD with Nulls, NFD) や**空値付 MVD** (MVD with Nulls, NMVD) の研究もあ

る[19]．NFD や NMVD では，キー以外の属性に空値をとることを許しており，このためこの部分が他の従属性のキーになれないことがあるという制約が生じる．すなわち，従属性の推移律が成立しなくなるところに大きな問題がある．

NFD：$X \to Y$ は，x_1 が空値を含まないものとして，

$$(x_1, y_1, z_1),\ (x_1, y_2, z_2) \Rightarrow y_1 = y_2$$

で示される．ここで，$y_1 = y_2$ はともに空値でない部分での一致を示す．

NMVD：$X \to\to Y$ の定義は，x_1 が空値を含まないという制約のもとで，通常の MVD と同じになる．

$$(x_1, y_1, z_1),\ (x_1, y_2, z_2) \Rightarrow (x_1, y_1, z_2)$$

NFD や NMVD の公理系について，次のことが知られている．

NFD の健全で完全な公理系は，{FD 1, FD 2, FD 5, FD 6} である．

NMVD の健全で完全な公理系は {MVD 0, MVD 1, MVD 2, MVD 5, MVD 6} である．

NFD-NMVD の健全で完全な公理系は，上記の 2 つの公理系と FD-MVD 1 を合わせたものである．

上記(3)の立場で，どのような属性が空値を持てるかということを表現する 1 つの方法に**存在制約** (Existence Constraint, EC) がある．EC は，$X \vdash Y$ と表現され，X の値が空でないときは Y の値が空でないことを示す制約である[9]．

さきに示した学生と学生の年齢との間に，学生の年齢の値のある場合には必ず学生名があるという制約があるとすると，学生の年齢⊢学生という EC が存在する．

Maier は，この概念を一般化して，**和型存在制約** (Disjunctive Existance Constraint, DEC) を定義した．これは，次の形で表わされる．

$$X \vdash \{Y_1, Y_2, \cdots, Y_n\}$$

X が空値でない場合には，$Y_1, \cdots, Y_n$ のうちの少なくとも 1 つが空値でないという制約を示している．

Goldstein は，次の公理系を示した[13]．

[DEC の公理系]

DEC 1(反 射 律)：$X \vdash X$

DEC 2(右増加律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ なら，$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n, Z\}$．

DEC 3(直 積 律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ かつ $X \vdash \{Z_1, \cdots, Z_m\}$ なら，$X \vdash \{Y_i Z_j \mid i=1, \cdots, n,\ j=1, \cdots, m\}$．

DEC 4(左増加律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ ならば $XZ \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$．

DEC 5(推 移 律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ かつ $Y_i \vdash \{Z_{i1}, \cdots, Z_{ik_i}\}\ (i=1, \cdots, n)$ なら，$X \vdash \{Z_{ij} \mid i=1, \cdots, n.\ j=1, \cdots, k_i\}$．

DEC 6(射 影 律)：$X \vdash \{Y_i Z_i \mid i=1, \cdots, n\}$ なら，$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$．

DEC 7(擬推移律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ かつ，$Y_i Z \vdash \{W_{ij} \mid j=1, \cdots, k_i\}$ $(i=1, \cdots, n)$ なら，$XZ \vdash \{W_{ij} \mid i=1, \cdots, n.\ j=1, \cdots, i_k\}$．

DEC 8(圧 縮 律)：$X \vdash \{Y_1, \cdots, Y_n\}$ である i について $Y_i \vdash \{Z_1, \cdots, Z_k\}$ ただし $\{Z_1, \cdots, Z_k\} \subseteq \{Y_j \mid j=1, \cdots, n\} - \{Y_i\}$ なら，$X \vdash \{Y_j \mid j=1, \cdots, n\} - \{Y_i\}$．

DEC 9(抽 出 律)：$X \vdash \{Y_i Z \mid i=1, \cdots, n\}$ なら，$X \vdash \{Y_i \mid i=1, \cdots, n\}$．

上記のうち，DEC 1, DEC 2, DEC 3, DEC 5 が，健全で完全な公理系をなすことが知られている．

データベース内の関係を情報を失なわない形で 1 つにまとめると空値を使う必要が生じる．**図-6** にその例を示す．この関係は，学生に対する（名前，学校）と，社会人に対する（名前，職業）を合わせたもので，C のように大学生でありながら仕事を持っている場合も許している．この関係では，1 つの組の中で空値をとらない属性の組合せは，次の 3 種と考えられる．

{名前, 学校}, {名前, 職業}, {名前, 学校, 職業}

このような属性の組合せを**対象** (object) という．

関係 R が対象集合 $\{Y_1, \cdots, Y_n\}$ を満足するとは，R のすべての組について，空値でない属性のみを集めた集合が Y_i のうちのいずれかと一致するときにいう (Sciore)．

DEC によって定義される空値に対する制約と，対象集合によって定義される空値に対する制約はかなり異なっているように見える．しかしながら，この 2 つはほとんど一致することが Goldstein によって示され

名前	学校	職業
A	京大	—
B	—	技術者
C	立命大	事務

図-6 空値を含む関係

た．彼女の得た主要結果は次の通りである[13]．

（1） 任意の DEC 集合に対し，同じ制約を表現する対象集合がある．

（2） 対象として $\underline{R}$ を含む任意の対象集合に対し，同じ制約を表現する DEC 集合がある．

（3） 任意の EC 集合に対し，同じ制約を表現する，共通集合演算で閉じた対象集合がある．逆に $\underline{R}$ を含み共通集合演算で閉じているような任意の対象集合に対し，同じ制約を実現する EC 集合がある．

これらのことから，空値に対する制約としては，DEC 集合か対象集合を用いると良いことが分かる．対象集合が $\underline{R}$ を含んでいないものは DEC 集合で表わせないので，対象集合による記述の方が少し能力が高い．従来知られていた EC 集合は，制限のある対象集合しか表現できないことも分かる．

最近，田中譲は，EC と FD や MVD を組合せた従属性について研究している．

謝辞 共同研究者であり，ご指導，ご助言いただく，京都大学工学部矢島脩三教授，神戸大学教養部田中克己助手（現南カリフォルニア大）に深謝する．原稿についてご意見をいただいた矢島研究室の諸氏に感謝する．

参考文献

1) ANSI/X 3/SPARC: Study Group on DBMSs Interim Report, SIGMOD FDT 7 (1975).
2) Armstrong, W. W. and Delobel, C.: Decompositions and Functional Dependencies in Relations, ACM TODS 5, pp. 404-430 (1980).
3) Beeri, C.: On the Membership Problem for Functional and Multivalued Dependencies in Relational Databases, ACM TODS 5, pp. 241-259 (1980).
4) Beeri, C., Fagin, R., Maier, D., Mendelzon, A., Ullman, J. and Yannakakis, M.: Properties of Acyclic Database Schemes, ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing, pp. 355-362 (1981).
5) Bernstein, P. A.: Comment on "Segment Synthesis in Logical Data Base Design", IBM Journal of Res. and Develop. 20, p. 290 (1976).
6) Biskup, J.: On the Complementation Rule for Multivalued Dependencies in Database Relations. Acta Informatica 10, pp. 297-305 (1978).
7) Biskup, J.: Inferences of Multivalued Dependencies in Fixed and Undetermined Universes. Theoretical Computer Science 10, pp. 93-105 (1980).
8) Chandra, A. K., Lewis, H. R. and Makowski, J. A.: Embedded Implicational Dependencies and Their Inference Problem, ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing, pp. 242-254 (1981).
9) Chen, P. P. S.: The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data, ACM TODS 1, pp. 9-36 (1976).
10) Delobel, C.: Normalization and Hierarchical Dependencies in the Relational Data Model. ACM TODS 3, pp. 201-222 (1978).
11) Fagin, R.: Horn Clauses and Database Dependencies, ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing, pp. 123-134 (1980).
12) Fagin, R., Mendelzon, A. O. and Ullman, J. D.: A Simplified Universal Relation Assumption and Its Properties, IBM Report RJ 2900 (1980).
13) Goldstein, B. S.: Constraints on Null Values in Relational Databases, VLDB, pp. 101-110 (1981).
14) Ginsburg, S. and Hull, R.: Ordered Attribute Domains in the Relational Model, Report of the University of Southern California (1981).
15) 伊藤 実，谷口健一，嵩 忠雄：関係データベースにおける潜在多値従属の導出，電子通信学会論文誌．J 63-D, pp. 683-690 (1980).
16) Kambayashi, Y., Tanaka, K. and Yajima, S.: Semantic Aspects of Data Dependencies and Their Application to Relational Database Design. IEEE COMPSAC, pp. 398-403 (1979).
17) Kambayashi, Y.: Database-A Bibliography, Vol. I, Computer Science Press (1981) and Springer-Verlag (1982).
18) Katsuno, H.: On Two Different Meanings of Multivalued Dependencies in a Conceptual Schema, IECEJ E 64, pp. 383-389 (1981).
19) Lien, Y. E.: On the Equivalence of Data Models. JACM 29, pp. 333-362 (1982).
20) Nakamura, S. and Chen, P. P.: Semantic Consideration on Multivalued Dependencies in Relational Databases, JIP 4, pp. 134-141 (1981).
21) Nicolas, J. M.: Mutual Dependencies and Some Results on Undecomposable Relations. Proc. 4th International Conference on VLDB, pp. 360-367 (1979).
22) Nicolas, J. M.: First Order Logic formalization for Functional, Multivalued and Mutual Dependencies. ACM SIGMOD, pp. 40-46 (1979).
23) Paredaens, J.: Transitive Dependencies in a Database Scheme. MBLE Res. Lab., Res. Rep., R 387 (1979).
24) Parker, D. S., Jr. and Parsaye-Ghomi, K.:

Inferences Involving Embedded Multivalued Dependencies and Transitive Dependencies. ACM SIGMOID, pp. 52-57 (1980).
25) Sadri, F. and Ullman, J. D.: Template Dependencies: A Large Class of Dependencies in Relational Databases and Its Complete Axiomatization, JACM 29, pp. 363-373 (1982).
26) Sadri, F. and Ullman, J. D.: The Interaction between Functional Dependencies and Template Dependencies. ACM SIGMOD, pp. 45-51 (1980).
27) Sagiv. Y. and Fagin, R.: An Equivalence between Database Dependencies and a Subclass of Propositional Logic. IBM Res. Rep., RJ 2500 (1979).
28) Sagiv, Y. and Walecka, S. f.: Subset Dependencies and a Completeness Result for a Subclass of Embedded Multivalued Dependencies, JACM 29, pp. 103-117 (1982).
29) Schmid, H. A. and Swenson, J. R.: On the Semantics of the Relational Data Model, ACM SIGMOD, pp. 211-223 (1975).
30) Sciore, E.: A Complete Axiomatization of Full Join Dependencies, JACM 29, pp. 373-393 (1982).
31) Sciore, E.: Real World MVD's, ACM SIGMOD, pp. 121-132 (1981).
32) Tanaka, K., Le Viet, C., Kambayashi, Y. and Yajima, S.: A File Organization Suitable for Relational Database Operations, Lecture Notes in Computer Science 75, pp. 193-227 (1978).
33) Tanaka, K., Kambayashi, Y. and Yajima, S.: Properties of Embedded Multivalued Dependencies in Relational Databases, Trans. IECEJ E62, pp. 536-543 (1979).
34) Vassiliou, Y.: Functional Dependencies and Incomplete Information, VLDB, pp. 260-269 (1980).
35) Wiederhold, G.: Database Design, McGraw-Hill (1977).
36) Yannakakis, M. and Papadimitriou, C. H.: Algebraic Dependencies, IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, pp. 328-332 (1980).
37) Yu, C. T. and Ozsoyoglu, M. Z.: An Algorithm for Tree-Query Membership of a Distributed Query, IEEE COMPSAC, pp. 306-312 (1979).

(昭和57年7月1日受付)