データベース・システム 66－6
（1988. 7. 22）

リレーショナルDBのファジィ問い合わせ言語

高橋祥兼
NTT情報通信処理研究所

人間の思考になじみ易いファジィ命題を用いて表現されたリレーショナルDBへの問い合わせ言語を，リレーショナルドメイン論理言語の拡張により構成した。
L.A.Zadehは，自然言語における表現を4タイプの命題（修飾命題，結合命題，量限定命題，質限定命題）に分類している。本論文で構成するファジィ問い合わせ言語は，L.A.Zadehの各タイプの命題の中でリレーショナルDB検索で必要となる全ての命題を表現可能としており，ほぼ十分な検索能力を備えている。
ファジィ問い合わせ言語の定式化により，これまでに開発された多くのリレーショナルDBへの曖昧検索技術の開発が容易となると共に，リレーショナルDBを用いたファジィ推論等を可能とするエキスパートシステムの開発が促進されることが期待される。

Fuzzy Query Language for Relational Database

Yoshikane Takahashi
NTT Communications and Information Processing Laboratories

1-2356, Take, Yokosuka-Shi, Kanagawa, 238-03 Japan

A fuzzy query language for the relational database is proposed. This language, an enhancement of the relational calculus, has enough capability to represent all four types of fuzzy propositions classified by L.A.Zadeh. The idea is to formulate the truth value criterion which dominates the truth value in [0,1] of a fuzzy proposition for each constituent tuple of a relation.
The fuzzy query language enables us to provide a human-oriented access interface to prevalent relational databases. Furthermore, it is expected that a fuzzy expert system will be developed, which has access to its fact data in a relational database through the use of the fuzzy query language.

1．まえがき

データベース技術は，ユーザからのアクセスインタフェースをより人間の思考に近付けることを1つの目標としてリレーショナルデータベースシステムへと発展してきた。リレーショナルデータベースシステムの今後の発展方向には，データベースに蓄積するデータ内容を人間の思考に近付ける方向と，データベースへの問い合わせ内容を人間の思考に近付ける方向の2つの方向がある。この内，後者は，既に開発された多くのリレーショナルDBをそのまま利用できる点で，早期の開発が期待される。

ファジィ理論は，自然言語に多く含まれる0，1のみでは表現できない言語変数を含む各種命題を定式的に表現する可能性分布の理論を持つ。例えば，"AはBよりも少し年寄りである"や，"Aは非常に知的である"等のような下線部の言語変数を含む命題を可能性分布で表現できる。

リレーショナルDBへのファジィ問い合わせについては，これまで例題を用いた研究や実験システムの構築がボトムアップ的に行われてきているが，ファジィ問い合わせ言語を体系的に研究し，今後のファジィDBシステム構築の基盤理論として確立しているという研究例は未だない(1)(2)(3)。本論文では，今後のファジィDBシステム構築の基盤理論を確立することを目的として，リレーショナルDBへのファジィ問い合わせ言語を定式的に構成する。この定式的なファジィ問い合わせ言語はリレーショナルドメイン論理言語を核として，L.A.Zadehによって分類された自然言語の4タイプのファジィ命題（修飾命題，結合命題，量限定命題，質限定命題）を表現可能とするように構成する。

2．ファジィ問い合わせのタイプ

L.A.Zadehは，自然言語における表現を4つのタイプに分類し，各タイプの言語を自然言語の意味表現言語PRUF(Possibilistic Relational Universal Fuzzy)に変換する規則を定式化した(4)。本論文では，リレーショナルデータベースのファジィ問い合わせとして必要となる各タイプの自然言語表現を包含するようにファジィ問い合わせ言語を構成する。

L.A.Zadehによる一般的な自然言語命題の4タイプへの分類を以下に示す。

(1)タイプI（修飾命題）

次のような修飾子を持つ命題は，タイプIに分類される。（下線部が修飾子を表す。）

(a)Tomは非常に（very）知的である。
(b)BobはAlよりもっと（much）年寄りである。
(c)Tomの体重は重くはない（not）。
(d)きわめて（extremely）暑い。
(e)Tomはかなり（quite）経験がある。
(f)EdはAlよりもはるかに（very much）年寄りであるということはない（not）。

(2)タイプII（結合命題）

次のようにAND，OR，またはIF-THEN/ELSEで合成される命題は，タイプIIに分類される。（下線部が結合子を表す。）

(a)Xは大きくそして（and）Yは小さい。（連言結合）
(b)Xは大きいかまたは（or）Yは小さい。（選言結合）
(c)もし（if）Xが大きいならば（th

en）Yは小さい。（条件結合）

(d)もし（if）Xが大きいならば（then）Yは大きく，さもなければ（else）Yは非常に大きい。（条件及び連言結合）

(3)タイプⅢ（量限定命題）

次のような量限定子を持つ命題は，タイプⅢに分類される。（下線部が量限定子を表す。）

(a)ほとんど（most）の日は晴れである。

(b)多く（many）の男性はほとんど（most）の女性よりも背が高い。

(c)幾（some）日かは非常に寒い。

(d)少数（a few）の人々はきわめて金持ちである。

(4)タイプⅣ（質限定命題）

次のような質限定子を持つ命題は，タイプⅣに分類される。（下線部が質限定子を表す。）

(a)”Alは年寄りである”はきわめて真である（quite true）。（真理値限定子）

(b)”Alは年寄りである”は非常に有り得るということはない（not very probable）。（確率限定子）

(c)”Alは年寄りである”はほとんど不可能である（almost impossible）。

3．リレーショナルＤＢ検索言語

リレーショナルＤＢ検索言語には，論理言語（ドメイン論理，タプル論理）と代数言語があり，記述能力は相互に等価である。本論文では，リレーショナルＤＢ検索言語の持つ問い合わせ能力を包含するファジィ問い合わせ言語を構成する。ここでは，第４章で構成するファジィ問い合わせ言語の核言語とするドメイン論理言語（ＤＣＬ；Domain Calculus Language）の定義を以下に示す(6)。

3．1　ドメイン論理言語の論理式

(1)ＤＣＬの論理式の形式

ＤＣＬの論理式は｛x1x2...xn｜φ（x1,x2,...,xn）｝の形式で表現される。ここで，x1x2...xnはタプル変数で，そのドメインＤ（x1x2...xn）は有限で，D1xD2x...xDnである。また，φは素論理式と論理演算子の集まりから構成され，下記(2),(3)で定義される。

(2)ＤＣＬの素論理式

素論理式には次の３つのタイプがある。

(a)R(x1x2...xn)：x1x2...xnがリレーションRのタプル変数であることを示す。

(b)xiθxj：xiとxjが算術比較演算子θ（＞，＜，≧，≦，＝，≠）の関係にあることを示す。

(c)xiθa，aθxi：xiが定数aとθの関係にあることを示す。

(3)ＤＣＬの論理式

(a)全ての素論理式は論理式である。

(b)φ1とφ2が論理式の場合，φ1∧φ2，φ1∨φ2，¬φ1は全て論理式である。

(c)φが論理式なら，(∃x)(φ)，(∀x)(φ)も論理式である。

(d)論理式は必要なときは括弧でくくって良く，実行優先順序は次の通りである。

①算術比較演算子

②限定作用素∃，∀

③¬，∧，∨（この順に優先）

(e)上記(a)-(d)以外は論理式ではな

い。

3．2　ドメイン論理言語の論理式の解釈

DCLの論理式の真偽値を以下の手順で判定する(6)(7)。

(1)論理式ϕに現れる各ドメイン変数xiにドメインDiの要素を対応させる。但し，ここで，x1x2...xnはタプル変数となるように対応させる。

(2)素論理式xiθxjまたはxiθa，aθxiの真偽を判定する。

(3)論理演算子$\wedge$,$\vee$,$\neg$で結合された論理式ϕの真偽を判定する。

(4)$(\forall x)(\phi)$，$(\exists x)(\phi)$に対しては，xにD上の全てのxを割り当てたときに，ϕが全て真であれば$(\forall x)(\phi)$は真であり，少なくとも一つのxを割り当てたときにϕが真であれば$(\exists x)(\phi)$は真である。

4．ファジィ問い合わせ言語の構成

ファジィ問い合わせ言語（FQL；Fuzzy Query Language）は，DCLを拡張することにより構成する。

4．1　FQLの論理式の形式

FQLの論理式ϕ（x1,x2,...,xn）は，リレーショナルドメイン論理式を拡張して次のように定義する。

即ち，FQLの論理式は｛x1x2...xn｜ϕ（x1,x2,...,xn）｝の形式で表現する。ここで，x1x2...xnはタプル変数で，そのドメインD（x1x2...xn）は有限で，D1xD2x...xDnである。また，ϕは論理式と論理演算子の集まりから構成し，下記第4．2節－4．7節で定義する。

4．2　素論理式

素論理式には次の2つのタイプがある。

(1)R(x1x2...xn)：x1x2...xnがリレーションRのタプル変数であることを示す。

(2)θ（x1,x2,...,xn)：「ドメイン変数x1,x2,...,xnは素ファジィ述語θの関係にある」というファジィ命題を示す。ここで，素ファジィ述語θは以下で定義し，その中には特殊な述語として，確定した意味を持つ算術比較演算子（＞，＜，≧，≦，＝，≠）を含む。

素ファジィ述語θは，次の5つ組(N,{θ},U,G,M(θ))で与えられる素ファジィ述語変数の1つの構成要素である。

(a)N：ファジィ述語変数の名前
(b)θ：Nのファジィ述語（値）。言語的に意味を持つ最小のファジィ述語を素ファジィ述語と呼ぶ。
(c)U：ファジィ集合を考える全体空間
(d)G：θのシンタクス規則（言語表現のための文法）
(e)M(θ)：M(θ)はθの意味表現であり，Uのファジィ集合として表現する。

素ファジィ述語の例を以下に示す。
(a)N：AGE
(b)θ：old, young, middle-aged
なお，次のようなファジィ述語を複合ファジィ述語と呼ぶ。例えば，very old, not old, approximately old, not very young, more or less young, not quite

old and not very young 等である。

(c)U: [0, 100]

(d)G: 英語の文法

(e)M(θ):

$$\mu\, young(s)=\begin{cases}1 & \text{for } s<25\\ (1+((s-25)/5)2)-1 & \text{for } s\geqq 25\end{cases}$$

$$\mu\, old(s)=\begin{cases}0 & \text{for } s<50\\ (1+((s-50)/5)-2)-1 & \text{for } s\geqq 50\end{cases}$$

素ファジィ述語θを，その意味を表現するファジィ集合M(θ)と同一視すれば，素ファジィ論理式θ(x1,x2,...,xn)は，「ドメイン変数x1,x2,...,xnの間に成立する関係は，ファジィ集合M(θ)で表現される」というファジィ命題を意味する。以下では，このファジィ命題を簡略に「ドメイン変数xはファジィ集合M(θ)である」と記述する。また，可能性分布Πxを用いて，素論理式θ(x)を「θ(x)≡Πx=M(θ)」と定式表現する。

4．3　修飾タイプ論理式

修飾タイプ論理式は，PRUFのタイプI命題の問い合わせ言語を表現するものである。

素論理式θ(x)をΠx=M(θ)と表現する。修飾タイプの論理式ξ(x,m)は「ドメイン変数xは，修飾子mで修飾されたファジィ集合M(θ,m)である」ことを意味し，「ξ(x,m)≡Πx=M(θ,m)」と定式表現される。ここで，M(θ,m)はM(θ)をmで修飾したファジィ集合であり，例えば以下のように表現される。

(1)m=notの場合，M(θ,m)=「M(θ)の補集合」

(2)m=veryの場合，M(θ,m)=M(θ)2

(3)m=more or lessの場合，M(θ,m)=M(θ)(1/2)

4．4　量限定タイプ論理式

量限定タイプ論理式は，PRUFのタイプIII命題の問い合わせ言語を表現するものである。

素論理式θ(x)をΠx=M(θ)と表現する。量限定タイプの論理式ξ(x,r)は「qxはファジィ集合M(θ)である」ことを意味し，「ξ(x,r)≡Π count(M(θ))=Q」と定式表現される。ここで，qは量限定子であり，Qはqを表現するファジィ集合である。また，count(M(θ))=Σ μM(θ)(ui)であり，その和はui＞0なるi(=M(θ)のサポート)に関してとる。

量限定子qとそのファジィ集合Qの例を以下に示す。

(1) q=SEVERALのときQ=0.2/3+0.6/4+1/5+1/6+0.6/7+0.2/8である。

(2) q=MOSTのときQ=∫[0,1]S(u; 0.5, 0.7, 0.9)/uである。ここで，S関数S(u;α,β,γ)は以下で定義される。

$$S(u;\alpha,\beta,\gamma)=\begin{cases}0 & \text{for } u\leqq\alpha\\ 2((u-\alpha)/(\gamma-\alpha))2 & \text{for } \alpha\leqq u\leqq\beta\\ 1-2((u-\gamma)/(\gamma-\alpha))2 & \text{for } \beta\leqq u\leqq\gamma\\ 1 & \text{for } \gamma\leqq u\end{cases}$$

(3) q=LARGE NUMBERのときQ=∫[0,∞](1+(u/100)-2)-1)/uである。

4．5　質限定タイプ論理式

質限定タイプ論理式は，PRUFのタイ

プⅣ命題のうちDB問い合わせとして必要な真理値限定命題に関する問い合わせ言語を表現する。

素論理式θ(x)をΠx=M(θ)と表現する。真理値限定命題ξ(x,s)は「"xはファジィ集合M(θ)である"は真理値τをもつ」ことを意味し，「ξ(x,s)≡Πx=M(θ,s),μM(θ,s)(u)=μτ(μM(θ)(u))」と定式表現される。ここで，真理値τは素ファジィ述語で表現され，その意味M(τ)はメンバシップ関数μτ(u)で表現されるファジィ集合である。

真理値限定命題ξ(x,s)の例を以下に示す。

ξ(x,s)≡「"x is small" is very true」で，μSMALL=1-S(u; 5,10,15), u∈[0, ∞),かつμTRUE=S(u; 0.6,0.8,1.0)とするとき，ξ(x,s)≡「πx(u)=S2(1-S(u; 5,10,15); 0.6,0.8,1.0)である。

4．6 結合タイプ論理式

結合タイプ論理式は，PRUFのタイプⅡ命題のうちリレーショナルリレーショナルDB問い合わせとして必要な連言結合(AND)と選言結合(OR)に関する問い合わせ言語を表現する。

素論理式θ1(x)をΠx=M(θ1)と表現し，素論理式θ2(y)をΠy=M(θ2)と表現する。但し，M(θ1)は集合Uのファジィ集合であり，M(θ2)は集合Vのファジィ集合である。

このとき，連言結合論理式ξ(x,y,and)は，「xはファジィ集合M(θ1)であり，かつyはファジィ集合M(θ2)である」ことを意味し，「ξ(x,y,and)≡Π(x,y)=(M(θ1)xV)∩(UxM(θ2))」と定式表現される。

また，選言結合論理式ξ(x,y,or)は，「xはファジィ集合M(θ1)であるか，またはyはファジィ集合M(θ2)である」ことを意味し，「ξ(x,y,or)≡Π(x,y)=(M(θ1)xV)∪(UxM(θ2))」と定式表現される。

連言結合と選言結合の例を以下に示す。

(1)素論理式の例

U=V={1,2,3,4}とし，

M(θ1)≡SMALL≡1.0/1+0.7/2+0.2/3

M(θ2)≡LARGE≡0.2/2+0.7/3+1.0/4

とする。また，

θ(x)≡xはSMALLである

θ(y)≡yはLARGEである

とする。

(2)連言結合の例

ξ(x,y,and)

≡「xはSMALLであり，かつyはLARGEである」

≡Π(x,y)=0.2/(1,2)+0.7/(1,3)+1.0/(1,4)+0.2/(2,2)+0.7/(2,3)+0.7/(2,4)+0.2/(3,2)+0.2/(3,3)+0.2/(3,4)

(3)選言結合の例

ξ(x,y,or)

≡「xはSMALLであるか，またはyはLARGEである」

≡Π(x,y)=1.0/(1,2)+1.0/(1,3)+1.0/(1,4)+0.7/(2,2)+0.7/(2,3)+1.0/(2,4)+0.2/(3,2)+0.7/(3,3)+1.0/(3,4)

4．7 FQLの論理式

素論理式，修飾タイプ論理式，量限定タイプ論理式，質限定タイプ論理式，及び結合タイプ論理式を基本論理式と総称する。

FQLの論理式を以下の条件を満た

すように定める。

(1)全ての基本論理式は論理式である。

(2) $\phi 1$と$\phi 2$が論理式の場合，$\phi 1 \wedge \phi 2, \phi 1 \vee \phi 2, \neg \phi 1$は全て論理式である。$\wedge$(AND)，$\vee$(OR)の定義は，素論理式$\theta(x)$に対して結合タイプ論理式を定義した場合と同様である。また，$\neg$(NOT)の定義は，素論理式$\theta(x)$に対して修飾タイプ論理式の修飾子のNOTを定義した場合と同様である。

(3) ϕが論理式なら，$(\exists x)(\phi)$，$(\forall x)(\phi)$も論理式である。

(4)論理式は必要なときは括弧でくくって良く，実行優先順序は次の通りである。

① 素ファジィ述語θ
② 限定作用素$\exists$，$\forall$
③ $\neg$，$\wedge$，$\vee$（この順に優先）

(5)上記(1)-(4)以外は論理式ではない。

5．ファジィ問い合わせ言語の解釈と問い合わせ結果

5．1 ファジィ問い合わせ言語の解釈

ＦＱＬの論理式$\phi(x)$のタプルxに対する真理値を，真理値空間[0,1]の一つの値として与える。即ち，ＦＱＬの論理式$\phi(x)$の各タプルxに対する真理値$T(\phi(x))$を以下のように決定する。

(1)素論理式「$\theta(x) \equiv \Pi x = M(\theta)$」に現れる各ドメイン変数$x_i$にドメイン$D_i$の要素を対応させる。但し，ここで，$x_1 x_2 ... x_n$はタプル変数となるように対応させる。

(2)素論理式「$\theta(x) \equiv \Pi x = M(\theta)$」のタプルxに対する真理値$T(\theta(x))$を$\mu M(\theta)(u)$で定める。ここで，ファジィ集合の変数uは可能性分布の変数xに対応する値である。

(3)修飾タイプ論理式「$\xi(x,m) \equiv \Pi x = M(\theta,m)$」のタプルxに対する真理値$T(\xi(x,m))$を$\mu M(\theta,m)(u)$で定める。

(4)量限定タイプ論理式「$\xi(x,r) \equiv \Pi\, count(M(\theta)) = Q$」のタプルxに対する真理値$T(\xi(x,r))$を$\mu Q(count(M(\theta);u))$で定める。

(5)質限定タイプ（真理値限定）論理式「$\xi(x,s) \equiv \Pi x = M(\theta,s), \mu M(\theta,s)(u) = \mu\tau(\mu M(\theta)(u))$」のタプルxに対する真理値$T(\xi(x,s))$を$\mu M(\theta,s)(u) = \mu\tau(\mu M(\theta)(u))$で定める。

(6)連言結合論理式「$\xi(x,y,and) \equiv \Pi(x,y) = (M(\theta 1) x V) \cap (U x M(\theta 2))$」のタプルxに対する真理値$T(\xi(x,y,and))$を$\mu(M(\theta 1) x V) \cap (U x M(\theta 2))(u)$で定める。

また，選言結合論理式「$\xi(x,y,or) \equiv \Pi(x,y) = (M(\theta 1) x V) \cup (U x M(\theta 2))$」のタプルxに対する真理値$T(\xi(x,y,or))$を$\mu(M(\theta 1) x V) \cup (U x M(\theta 2))(u)$で定める。

(7)論理演算子$\wedge, \vee, \neg$で結合された論理式$\phi 1 \wedge \phi 2, \phi 1 \vee \phi 2, \neg \phi 1$のタプルxに対する真理値を以下で定義する。

(a)$T(\phi 1 \wedge \phi 2) = \min\{T(\phi 1), T(\phi 2)\}$
(b)$T(\phi 1 \vee \phi 2) = \max\{T(\phi 1), T(\phi 2)\}$
(c)$T(\neg \phi 1) = 1 - T(\phi 1)$

(8)$(\exists t)(\phi)$，$(\forall t)(\phi)$のタプルxに対する真理値を以下で定義する。

(a)$T((\exists x)(\phi)) = \max T(\phi)$
(b)$T((\forall x)(\phi)) = \min T(\phi)$

5．2　ファジィ問い合わせ言語の問い合わせ結果

ファジィ問い合わせ論理式φ(x)によるリレーションR(x)に対する問い合わせ結果は，以下のいずれかの方法で与える。

(1) R(x)の各タプルxのうち，真理値T(φ(x))が最大となるタプルxを問い合わせ結果とする。

(2)予め定めた真理値T0に対して，T(φ(x))≧T0を満たす真理値T(φ(x))もつタプルxを問い合わせ結果とする。

6．むすび

リレーショナルＤＢの曖昧検索への需要は高く，ファジィ問い合わせ言語は人間の思考になじみ易い一つの適切な曖昧検索手段を与える。本言語の定式化により，これまでに開発された多くのリレーショナルＤＢへの曖昧検索技術の開発が容易となると共に，リレーショナルＤＢを用いたファジィ推論等を可能とするエキスパートシステムの開発が容易となる。

本論文では，リレーショナルドメイン論理言語を拡張してファジィ問い合わせ言語を定式化したが，リレーショナル代数言語を拡張したファジィ問い合わせ言語の定式化も興味ある今後の課題である。また，本論文では，ＤＢとしてリレーショナルＤＢを対象としたが，リレーショナルＤＢの属性値やタプル真理値にファジィ表現（可能性分布）を許容するファジィＤＢに対して，ファジィ問い合わせ言語を拡張することも，今後の重要な課題である。

文　　献

(1)Tahani,V.:"A conceputual framework for fuzzy query processing -- a step toward very intelligent database system", Information Processing & Management, Vol.13, PP.289-303, 1977

(2)Zemankova,M. and Kandel,A.（向殿訳）："ファジィ・リレーショナル・データベースエキスパート・システムへの鍵",啓学出版(1987)

(3)Kacprzyk,J and Ziolkowski,A.:"Database queries with fuzzy linguistic quantifiers", IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-16, No.3, May/June 1986

(4)Zadeh,L.A.: "PRUF -- a meaningful representation language for natural languages", Int. Journal of Man - Machine Studies, Vol.10, PP.395-460, 1978

(5)Ullman,J.D.（国井，大保訳）："データベース・システムの原理"，日本コンピュータ協会，1985

(6)長尾，淵：「論理と意味」，岩波講座，情報科学7，岩波書店，1982

(7)野口，滝沢：「知識工学基礎論」，オーム社(1986)

(8)寺野，浅居，菅野："ファジィシステム入門"，オーム社，昭62.10

(9)浅居，田中，奥田，C.V.Negoita, D.A.Ralescu:"ファジィシステム理論入門"，オーム社，昭62.11