内部を知って業務に活かす

PostgreSQL研究所

石井 達夫　ISHII Tatsuo
ishii@postgresql.org

第2回 バックエンドの中身を解析（1）
～パース処理とアナライズ処理

北京出張

4月の中旬に中国は北京に出張で出かけてきました．反日デモなどの報道があったので内心びくびくしていたのですが，市内は意外と平穏で，特に身の危険を感じることもありませんでした．

筆者は北京は今回で3回目ですが，訪れるたびにどんどん街並みが近代化していくのには驚かされます（筆者が初めて北京を訪れたときは高速道路すらありませんでした）．このままいけば，遅くとも20年後くらいには経済的に日本を追い抜いているのではないでしょうか．そのくらいのパワーを感じました．

3回目と言えば，今回もまた万里の長城に行ってしまいましたが，同行してくれた地元の人に「中国人でも3回も万里の長城に行く人はいない」と呆れられてしまいました :-)

いよいよPostgreSQLのバックエンドの中身を解析

前回は，PostgreSQLの内部構造を知る上で必要な基礎的事項，すなわち，

- プロセス構造
- ソースツリー
- デバッガを使って実行の流れを追う方法
- tagsの使い方

を説明しました．今回はいよいよPostgreSQLのバックエンドの中身に迫っていきます．

今回からPostgreSQL 8.0.2がターゲット

前回はPostgreSQL 8.0.1を前提にお話ししましたが，今回からは5月にリリースされたPostgreSQL 8.0.2のソースを解析の対象にします（もっとも違いはわずかなので，前回の記事内容を特に8.0.2用に変更する必要はないはずです）．

8.0.2は8.0.1に対するバグ修正という位置づけです．実は，8.0.1から8.0.2になるときに1点だけバグ修正以外の変更が入っています．それは，バッファ管理のアルゴリズムがARC（Adaptive Replacement Cache）から2Qに変更されたことです．

PostgreSQL 8.0がリリースされる直前に，IBMがARCの特許を出願していることが発覚しました．特許出願中ということですから，ARCを使ったからといって今ただちに法律上問題になることはありませんが，将来のリスクを避けるに越したことはない，ということで今回の変更になったわけです．ARCから2Qに変更になったことで気になるのはパフォーマンスですが，開発者によればその差はわずかである，ということでした．なお，次期バージョンの8.1では，さらに改良が加えられたアルゴリズムが採用されることになっています．

問い合わせ処理の流れ

前回はpsqlなどのフロントエンドはまずpostmasterと通信を行い，認証などのセキュリティ関係のチェックを受けたらデータベースエンジンであるpostgresプロセスが起動され，以後フロントエンドはpostmaster

228-235__初 06.2.27 10:37 AM ページ229

ではなくpostgresと直接通信を行うということをお話ししました．

バックエンドの処理

以後の流れをバックエンド（postgres）の立場で非常に大雑把に見ると，以下のようになります（図1）．

●① 問い合わせの受信

フロントエンドから送られてきた問い合わせ（SQL文）を受信します．

●② パース処理

SQL文は単なる文字列なので，そのままではコンピュータ処理には向いていません．そこで内部的に扱いやすい「パースツリー」（parse tree）の形に変換します．この段階では，文字通り問い合わせ文字列から得られる情報のみを使用します．したがって，文法的に間違いのない限り，存在しないテーブルをSELECTしようとしてもエラーにはなりません．こうしたことから，この段階のパースツリーは「ローパースツリー」（raw parse tree）とも呼ばれます．

ここでの処理は「パース処理」と呼ばれ，パース処理を行うモジュールを「パーサ」（parser）と呼びます[注1]．

●③ アナライズ処理

パースツリーを解析し，「クエリツリー」（query tree）に変換します．このとき，データベースをアクセスして指定されたテーブルが実際に存在するかどうかをチェックし，存在すればテーブル名からOIDに変換するなどの処理が行われます．

ここでの処理は「アナライズ処理」と呼ばれ，アナライズ処理を行うモジュールを「アナライザ」（analyzer）と呼びます[注2]．

●④ リライト処理

PostgreSQLでは，クエリを書き換えることによってVIEWやRULEを実装しています．もし必要ならばこの段階でクエリを書き換えます．

ここでの処理は「リライト処理」と呼ばれ，リライト処理を行うモジュールを「リライタ」（rewriter）と呼びます[注3]．

●⑤ プラン処理

クエリツリーを解析し，実際に問い合わせを実行するための「プランツリー」（plan tree）を作成します．

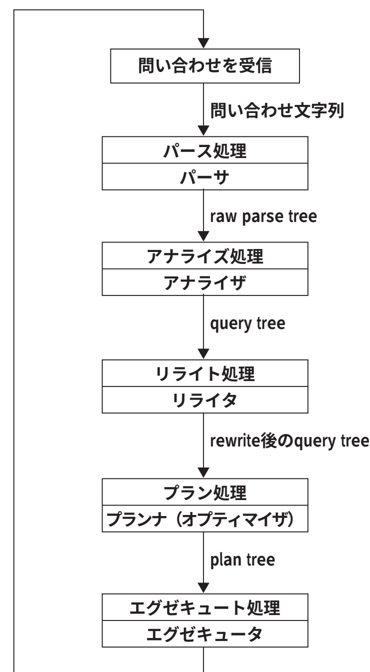
ここでの処理は「プラン処理」と呼ばれますが，実行時間がもっとも短くて済みそうなプランツリーを作成することが非常に大切です．そのため，この処理は「クエリオプティマイズ」（query optimize：最適化）ないし単に「オプティマイズ」と呼ばれることもあり，こうした処理を行うモジュールを「クエリオプティマイザ」（query optimizer）ないし，単に「オプティマイザ」と呼びます（あるいは「プランナ」と呼ぶこともあります）[注4]．

●⑥ エグゼキュート処理

プランツリーに従い，問い合わせを実行します．

ここでの処理は「エグゼキュート処理」と呼ばれ，

▼図1　問い合わせ処理の流れ



注1）関連ソースはsrc/backend/parserにあります．
注2）関連ソースはsrc/backend/parserにあります．
注3）関連ソースはsrc/ backend/rewriteにあります．
注4）関連ソースはsrc/backend/planにあります．

エグゼキュート処理を行うモジュールを「エグゼキュータ」(executor) と呼びます注5.

●⑦ 実行結果の送信

実行結果をフロントエンドに送信します.

その後は，再び①に戻ります.

◇ ◇ ◇

それでは早速，パース処理から順に処理内容を詳しく見ていきましょう.

パース処理

パース処理のソースコード

パース処理のソースコードはsrc/backend/parserにありますが，このディレクトリにはアナライズ処理のソースも含まれています．パース処理に関わるソースファイルは以下です.

- gram.c ：構文解析処理
- keywords.c ：予約語表
- parser.c ：パース処理メイン
- scan.c ：字句解析処理
- scansup.c ：字句解析処理の補助関数

パース処理のメイン関数はpg_parse_queryで，parser.cで定義されていますが，パース処理のキモは実はgram.cとscan.cです.

パース処理では，文字列としてのSQLを解析する必要があります．もちろん一から文字列処理プログラムを書いていくこともできますが，SQL文法ほどの複雑さのレベルになるとそれはかなり困難なので，専用のツールでSQL文法を表現し，パースするプログラムを自動生成する方法をPostgreSQLでは採用しています.

字句解析処理

字句解析処理とは，文字列から「単語」を切り出す処理のことを指します．たとえば，

```
SELECT * FROM accounts WHERE aid = 100;
```

なら，「 」(空白)「SELECT」「*」「FROM」などがすべて単語ということになります．この際に，さらに単語をある程度分類しておきます．たとえば，0～9の数字を組み合わせたものなら整数であるというような感じです.

字句解析処理のソースファイルscan.cは，flexというツール用に書かれたscan.lから自動生成されたものです．scan.lには，flexの文法にしたがって字句解析のルールを書きます．たとえば，先ほどの整数であれば，以下のような記述になります.

- digit : [0-9]
- integer : {digit}+

ご覧のように，基本的にある単語を識別するためのルールを正規表現で書くのがflexの文法である，ということになります.

構文解析処理

字句解析処理によって単語の切り出しができたら，構文解析処理を行います．bisonというツール用に書かれたgram.yから自動生成されたものが構文解析処理のソースファイルgram.cになります．gram.yは構文解析処理の中心になるもので，8000行以上の大きさがあるかなり複雑なものです．すべてを解説するのは誌面の関係でできませんが，ここでは感じだけでも掴んでいただきましょう.

構文解析処理は，基本的にはパターンマッチング処理です．たとえば先ほどのSELECT文は，**リスト1**の

▼リスト1 パターンの例

```
simple_select:
            SELECT opt_distinct target_list
            into_clause from_clause where_clause
            group_clause having_clause
                {
                    SelectStmt *n = makeNode(SelectStmt);
                    n->distinctClause = $2;
                    n->targetList = $3;
                    n->into = $4;
                    n->intoColNames = NIL;
                    n->intoHasOids = DEFAULT_OIDS;
                    n->fromClause = $5;
                    n->whereClause = $6;
                    n->groupClause = $7;
                    n->havingClause = $8;
                    $$ = (Node *)n;
                }
```

注5) 関連ソースはsrc/backend/executorにあります.

パターンにマッチするはずです．

ここで，「simple_select」はパターンの名前です．右側にはパターンを書きます．このパターンは，

「SELECT」ではじまり，オプションでDISTINCT句（opt_distinct），ターゲットリスト（target_list），INTO句（into_clause），FROM句（from_clause），WHERE句（where_clause），GROUP BY句（group_clause），HAVING句（having_clause）と続く

と定義されています注6．

{}の中は，パターンマッチが起きたときに実行される「アクション」です．アクションにはC言語の他，bison特有の予約記号を書くことができます．

PostgreSQLのパーサの目的は，パースツリーを作ることです．そこで，まず，

```
SelectStmt *n = makeNode(SelectStmt);
```

によって，SELECT文に対応する構造体SelectStmtを持つノードをmakeNodeという関数で作っています（パースツリーの構造については，後で詳しく述べます）．

以下，構造体のメンバに値をセットしています．たとえば，

```
n->targetList = $3;
```

の$3は，

```
SELECT opt_distinct target_list
into_clause from_clause where_clause
group_clause having_clause
```

の3番目の部分（target_list）をtargetListにセットしているわけです．

target_listは別の場所で解析

しかし，このままでは元のSQL文との対応はよくわかりません．というのは，target_listもまたパターンであり，別のところで定義されているからです．その部分はリスト2のようになります．target_listの本体はtarget_elであり，そのときにlist_make1が呼び出されるというアクションが起こることがわかりました．

では，target_elの定義はどうなっているのでしょう？（リスト3）いくつかのパターンが「|」で列挙されており，これはどれかのパターンにマッチすればよいことを意味します．

先頭の「a_expr AS ColLabel」は，「i AS this_month」のように，列の別名が付いているパターンです．a_exprやColLabelはさらに別のところで定義されています．

前述のSELECT文のターゲットリストは，「'*'」のパターンにマッチします．このときのアクションとしては，ColumnRefという構造体がパースツリーのノードとして作られます．ColumnRefはリスト4（次ページ）のように定義されます．NodeTagはノードの識別値でenumであり，この場合はT_ColumnRefという値になります注7．

リスト3の「fields」には，列名をリストにしたもの

▼リスト2 target_listの定義

```
target_list:
          target_el  { $$ = list_make1($1); }
```

▼リスト3 target_elの定義

```
target_el:    a_expr AS ColLabel
                {
                    $$ = makeNode(ResTarget);
                    $$->name = $3;
                    $$->indirection = NIL;
                    $$->val = (Node *)$1;
                }
              | a_expr
                {
                    $$ = makeNode(ResTarget);
                    $$->name = NULL;
                    $$->indirection = NIL;
                    $$->val = (Node *)$1;
                }
              | '*'
                {
                    ColumnRef *n = makeNode(ColumnRef);
                    n->fields = list_make1(makeString("*"));

                    $$ = makeNode(ResTarget);
                    $$->name = NULL;
                    $$->indirection = NIL;
                    $$->val = (Node *)n;
                }
        ;
```

注6）ここで「SELECT」は予約語であり，keywords.cに定義されています．

注7）makeNodeはマクロであり，引数に「T_」を付けたものをNodeTagにセットするとともに，引数の名前で構造体のメモリを割り当てます．したがって，構造体の名前にT_を付けたものがノード識別値のenumの値になるという「隠れた規則」があるわけですね．こうした内部的な規則はどこにもドキュメント化されていないので，コードを実際に触りながら推測しなければならないのがちょっとつらいところです．

228-235__初 06.2.27 10:37 AM ページ232

をセットします．list_make1は，要素が1個しかないリストを作るマクロです（コラム参照）．また，

```
$$ = makeNode(ResTarget);
```

は，result target（SELECT文などで検索する列名など）を表現するノードを作り，「上位」のパターンに返却しています．ここで上位のパターンとは，先ほど出てきたsimple_selectを指します．そのアクションの中に，

```
n->targetList = $3;
```

というのがありましたが，$$でここの部分がアクセスされます．結果として，

```
n->targetList = makeNode(ResTarget);
```

が実行されることになります．

ResTargetはリスト5のような構造体です．ここでは列名は単に「*」なので，nameには値なしを表すNULL，indirectionは未使用なのでNIL，valには先ほど作ったColumnRef構造体へのポインタをセットしています．

パターンとアクションの組み合わせでパースツリーを構築

あちこちに話が飛んでしまったのでちょっとわかりにくかったかもしれませんが，bisonによる構文解析では，いきなり詳細な解析を行うのではなく，徐々に詳細な解析を行う「トップダウン」方式な記述が可能です．また，文法の記述もパターンとアクションの組み合わせなので，手続き的にプログラムを書くよりもはるかに見通しがよいことをおわかりいただけたと思います．

こうした構文解析の結果，メモリ上にパースツリーが作成されます．

```
SELECT * FROM accounts WHERE aid = 100;
```

のパースツリーを図2に示します[注8]．メインになるのはSelectStmtという構造体です．その他の情報はこの構造体にぶら下がる形になっています．

アナライズ処理

生成される情報

アナライズ処理では，実際にシステムカタログなどを検索しながら必要な情報を補ってクエリツリーを作成します．この段階で生成される情報としては，以下のようなものがあります．

●① テーブルOID

文字列で指定されたテーブルを，システムカタログの「pg_class」を検索することによって確定し，OID（オブジェクトID）を求めます．

スキーマ名で明示的に修飾されたテーブルは対応するテーブルの実体が確定するので，容易にOIDが求められます．スキーマ名で修飾されていない場合は，スキーマサーチパスを検索してスキーマを確定し，OIDを求めます．

テーブルを継承しているテーブルがある場合は，それらのテーブルのOIDリストも作られます．

●② 列名リスト

SELECT * FROM …のように列名が省略されている場合は，①でテーブルOIDを求めた後，システムカタログを検索す

▼リスト4　ColumnRefの定義

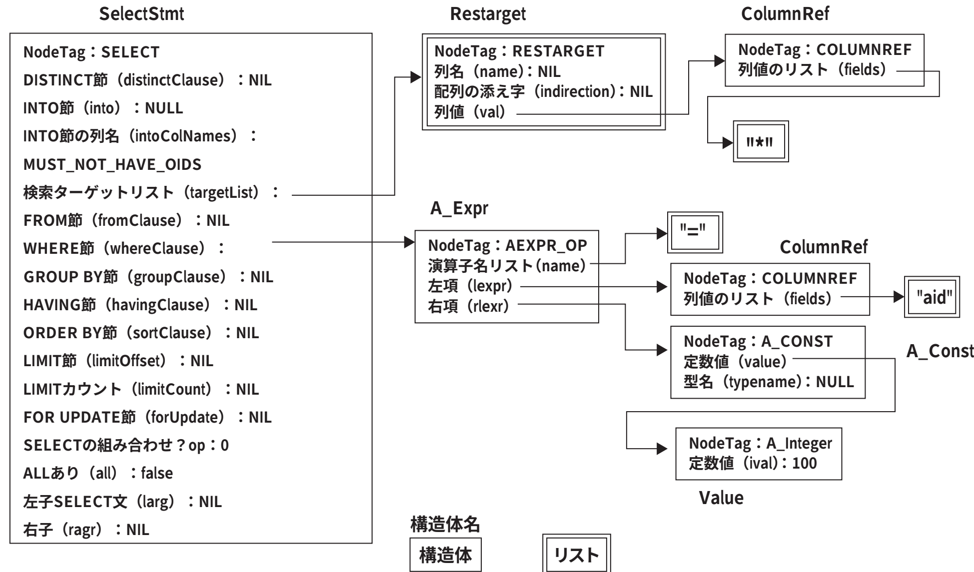
```
typedef struct ColumnRef
{
    NodeTag        type;
    List          *fields;     /* field names (list of Value strings) */
} ColumnRef;
```

▼リスト5　ResTargetの定義

```
typedef struct ResTarget
{
    NodeTag        type;
    char       *name;           /* column name or NULL */
    List       *indirection;    /* subscripts and field names, or NIL */
    Node       *val;            /* the value expression to compute or
                                 * assign */
} ResTarget;
```

注8）postgresql.confのdebug_print_parseをtrueにすることにより，パースツリーを出力することができることになっていますが，実際に出力されるのはパースツリーではなく，本稿で言うところのクエリツリーです．本稿を執筆するにあたり，若干ソースコードに手を加えてアナライズ前のパースツリーを表示させて検証を行いました．

▼図2　SELECT * FROM accounts WHERE aid = 100のパースツリー



PostgreSQLのリストパッケージ

コラム

パースツリーなどの複雑なリスト要素を作成するために，PostgreSQLではリストを扱う機能が充実しています．ソースコードはsrc/ backend/nodes/list.cにあり，そのためのインタフェースはsrc/include/nodes/pg_list.hに定義されています．

PostgreSQLのリストは一方向の単純なリンク付きリストで，3つのタイプがあります．

- T_List　　：ポインタのリスト
- T_IntList　：整数のリスト
- T_OidList　：OIDのリスト

パースツリーなどで使われるのは主にT_Listです．PostgreSQLでは，リストで連結されたデータを「セル」（cell）と呼びます．

リストを管理する構造体は以下のようになっており，リストの長さ，最初のセルへのポインタ，最後のセルへのポインタが管理されています．

```
typedef struct List
{
    /* T_List, T_IntList, or T_OidList */
    NodeTag     type;
    int         length;
    ListCell    *head;
    ListCell    *tail;
} List;
```

各セルの構造は以下のようになっています．

```
struct ListCell
{
    union
    {
        void    *ptr_value;
        int     int_value;
        Oid     oid_value;
    }           data;
    ListCell    *next;
};
```

基本的にはデータと次のセルへのポインタが管理されています．なお，空のリストは，List構造体へのポインタが「NIL」（実際には0）であることで表現されます．したがって，List構造体が存在するということは，少なくともlengthが1以上であるということになります．

整数値1，2，3の3つのセルを持つリストの例を図Aに示します．図Aは，整数1，2，3をリストにして

次ページに続く ➡

228-235__初 06.2.27 10:37 AM ページ234

ることによって明示的な列名のリストに変換します．

●③ 型OID

WHERE句などで指定されている列や定数の型名を確定し，型OIDを求めます．型が明示的に指定されていないものに関しては，型の推測が行われます．

●④ オペレータOID

オペレータ（演算子）はPostgreSQLでは関数呼び出しとして実装されています．同じ「=」といったオペレータでも，その両側に来るデータ型によって，内部的に呼び出される関数が異なってきます．そこでアナライザはそれらの型情報を使ってシステムカタログ「pg_operator」を検索し，オペレータのOIDを確定して適切な関数を呼び出すことができるようにします．

クエリツリー

アナライズ処理で作成されるメインの構造体はQueryです．パース処理では，文の種類（SELECT，INSERT，UPDATE，……など）の違いによって作成される構造体も分かれていましたが，アナライズ処理の結果は単一のQuery構造体です．

アナライズ処理の結果生成されたクエリツリーを図3に示します．

■ PostgreSQLのリストパッケージ（続き）

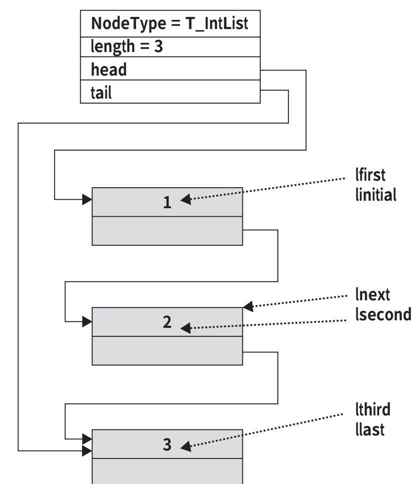
コラム

アクセスインタフェースも示したものです．現在のセルが「1」のセルを指しているものとします．

すべてのインタフェースを解説するのは誌面の関係で無理なので，代表的なものを挙げておきます（表A）．これらを知っているだけでもソースを読むのが楽になると思います．

- lnext　：次のセルへのポインタ
- lfirst　：現在のセルのデータ（data）
- lsecond　：次のセルのデータ
- lthird　：その次のデータ
- linitial　：リスト中の最初のセルのデータ
- llast　：リスト中の最後のセルのデータ

▼図A　リストの例



表A ◎アクセスインタフェース

●関数	●機能
list_make1(x1)	x1をセルに持つリストを作る
list_make2(x1,x2)	x1，x2をセルに持つリストを作る
list_make3(x1,x2,x3)	x1，x2，x3をセルに持つリストを作る
foreach(cell, l)	リストlのすべてのセルを順にアクセスする．cellは現在のcellへのポインタ
lappend(List *list, void *datum)	リストlistにデータdatumを持つセルを追加する
list_concat(List *list1, List *list2)	リストlist1の末尾にリストlist2を追加する
list_copy(List *list)	リストlistをコピーする
list_free(List *list)	リストlistのメモリをlist自身も含めて解放する．ただし，セルの指すポインタの先のメモリは解放しない
list_free_deep(List *list)	リストlistのメモリをlist自身も含めて解放する．セルの指すポインタの先のメモリも解放する

228-235__初 06.2.27 10:37 AM ページ235

次回は？

今回はパース処理とアナライズ処理について解説しました．次回はリライト処理から解説を進めていきます．そのほか，PostgreSQLの内部を理解する上で欠かすことのできないメモリ管理サブシステム，システムカタログキャッシュのようなサブシステムについても触れていきたいと思います．

▼図3　クエリツリー

Query
NodeTag：QUERY
SQLの種類（commandType）：SELECT
問い合わせの出所（querySource）：0（オリジナル）
コマンドタグ設定可能？（cansetTag）：true
ユーティリティコマンド（utilityStmt）：NULL
rtableへのインデックス（resultRelation）：0
SELECT INTOのターゲット（into）：NULL
集約あり？（hasAggs）：false
副問い合わせあり？（hasSubLinks）：false
レンジテーブルリスト（rtable）：
FROM句とWHERE句（jointree）：
FOR UPDATE対象のテーブルへのインデックス(rowMarks):NIL
ターゲットリスト（tagetList）：
GROUP BY句リスト（groupClause):NIL
HAVING句（havingQual）：
DISTINCT句リスト：NIL
ORDER BY句リスト：NIL
LIMIT句：NULL
オフセット数：NULL
UNION/INTERSECT/EXCEPTツリー(setOperations):NIL

RangeTableEntry
RTE種類（rtekind）：RTE_RELATION
ユーザ指定別名（alias）：NULL
別名リスト
継承?（inh）：false
INあり？（inFromCL）：false
アクセス権（requiredPerms）：ACL_SELECT
アクセス権チェックユーザ（checkAsUser）：0

filler
abalance

NodeTag：ALIAS
別名(aliasname)："accounts"
列名リスト(colnames)：

aid
bid

FromExpr
NodeTag：FROMEXPR
FROMリスト(fromlist)：
検索条件（quals）

RangeTableRef
NodeTag：RANGETABLEREF
RTEインデックスrtindex）：1

OpExpr
NodeTag：OPEXR
オペレータOID（opno）：96
関数OID（opfuncid）：0
関数結果型OID(opresultttype)：16
関数の結果はセット？(oprretset)：false
引数リスト（args）：

Var
NodeTag：VAR
RTEインデックス(varno)：1
列番号（varattno）：1
列データ型（vartype）：23
型修飾子（vartypmod）：-1
相関副問い合わせ
参照レベル(varlevelsup)：0
元のvarno(varnoold)：1
元のvarattno(varoattno)：1

Var
NodeTag：VAR
RTEインデックス（varno）：1
列番号（varattno）：1
列データ型（vartype）：23
型修飾子（vartypmod）：-1
相関副問い合わせ
参照レベル（varlevelsup）：0
元のvarno（varnoold）：1
元のvarattno（varoattno）：1

Const
NodeTag：CONST
データ型(consttype)：23
データ長(constlen)：4
値渡し？(constbyval)：true
NULL?(constisnull)：false
値(constvalue)：

データ長：4
データ：100

TargetEntry
NodeTag：TARGETENTRY
リザルトドメイン(resdom)：
変数情報（expr）：

Resdom
NodeTag：RESDOM
列番号（resno)：1
列型（resno)：23
型修飾子（restypmod)：-1
列名（resname)："aid"
ORDER BY/GROUP BYで
参照インデックス(ressortgroupref)：0
テーブルOID(resorigtbl)：1833543
列番号（resoorigcol）：1
結果に現れない列か？(resjunk)：
false

NodeTag：TARGETENTRY
リザルトドメイン(resdom)：
変数情報(expr)：

NodeTag：RESDOM
列番号（resno）：2
列型（resno）：23
型修飾子（restypmod）：-1
列名（resname）："bid"
（ressortgroupref）：0
テーブルOID(resorigtbl)：1833543
列番号（resoorigcol）：2
（resjunk）:false

NodeTag：VAR
RTEインデックス(varno)：1
列番号（varattno)：2
列データ型（vartype)：23
型修飾子（vartypmod)：-1
相関副問い合わせ
参照レベル(varlevelsup)：0
元のvarno(varnoold)：1
元のvarattno(varoattno)：2

NodeTag：TARGETENTRY
リザルトドメイン(resdom)：
変数情報(expr)：

NodeTag：RESDOM
列番号（resno）：3
列型（resno）：23
型修飾子（restypmod）：-1
列名（resname）："abalance"
（ressortgroupref）：0
テーブルOID(resorigtbl)：833543
列番号（resoorigcol）：3
（resjunk）:false

NodeTag：VAR
RTEインデックス(varno)：1
列番号（varattno)：3
列データ型（vartype)：23
型修飾子（vartypmod)：-1
相関副問い合わせ
参照レベル(varlevelsup)：0
元のvarno(varnoold)：1
元のvarattno(varoattno)：3

NodeTag：TARGETENTRY
リザルトドメイン(resdom)：
変数情報(expr)：

NodeTag：RESDOM
列番号（resno）：4
列型（resno）：21042
型修飾子（restypmod）：88
列名（resname）："filler"
（ressortgroupref）：0
テーブルOID(resorigtbl)：1833543
列番号（resoorigcol）：4
（resjunk）:false

NodeTag：VAR
RTEインデックス(varno)：1
列番号（varattno)：4
列データ型（vartype)：1042
型修飾子（vartypmod)：88
相関副問い合わせ
参照レベル(varlevelsup)：0
元のvarno(varnoold)：1
元のvarattno(varoattno)：4