

***** BDD パッケージ (1.86 版) ドキュメント *****

著者: 湊 真一 北海道大学 大学院情報科学研究科

最新更新日: 2021.9.2

このパッケージは BDD の基本操作を行う C 言語の関数ライブラリである。

- ・ 本プログラムは、32 ビットまたは 64 ビットの計算機で動作する。(コンパイル時に、オプション B_64 を指定すると 64 ビットモードとなる)
- ・ 各操作は C 言語の関数呼び出しにより実行される。
関数等の宣言部は、bddc.h にあるので、include すること。
プログラム本体は bddc.c にある。
- ・ 入力変数番号 (VarID) は 1 から始まる unsigned int 型 (bddvar 型) の整数で識別する (0 は定数を表す)。VarID の最大値は bddvarmax で参照される。デフォルトは 65535 (16 ビット)。
- ・ 各 VarID ごとに BDD での上下の順位 (level) の情報を保持している。
Level もまた 1 から始まる bddvar 型の整数で識別する。大きい数値ほど上位の変数を表す (BDD の根に近く、先に展開される)。VarID を何も指定せずに生成した場合は VarID と同じ値の level を持つ。
- ・ 論理演算結果の BDD は、32 ビット (または 64 ビット) の unsigned int (bddp 型) のインデックスで返される。BDD は論理関数に対して一意であり、インデックスの値も BDD に対して一意である。したがって、2 つの論理演算結果が等価であるかどうかは、演算結果のインデックスの値が同じかどうかを比較することで行える。

bddp f, g

.....

if (f == g) 一致

if (f != g) 不一致

ただしインデックスの大小比較 ($f > g$) は意味を持たない。

- ・ BDD のインデックスのビット構造は以下の通りである

ビット幅 32 の場合

ABBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC

ビット幅 64 の場合（下位 40 ビットを使用）

000000000000000000000000ABBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC

A: 節点 ID か定数値かを区別するフラグ。0:節点 ID 1:定数値

B: (A=0 の場合) 節点番号を表す。

(A=1 の場合) BC を合わせて定数値を表す。

通常の論理関数の場合、最下位ビット C 以外は常に 0。

C: 否定枝を表すフラグ。定数値の場合は奇数偶数を表す。

- ・ BDD の節点情報を格納する記憶領域のデータ構造を以下に示す。

ビット幅 32 の場合

Node. f0_32 ABBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC 0 枝の BDD インデックス

Node. f1_32 ABBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC 1 枝の BDD インデックス

Node. nx_32 00BBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBB N: 次の節点番号（記憶管理用）

Node. varrfc RRRRRRRRRRRRRRVVVVVVVVVVVVVV R: 参照カウンタ V: 変数番号

ビット幅 64 の場合

Node. f0_32 BBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC 0 枝の BDD インデックス

Node. f1_32 BBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBC 1 枝の BDD インデックス

Node. nx_32 BBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBBB N: 次の節点番号（記憶管理用）

Node. varrfc RRRRRRRRRRRRRRVVVVVVVVVVVVVV R: 参照カウンタ V: 変数番号

Node. f0_h8 ABBBBBBB 0 枝の BDD インデックス（上位 8 ビット）

Node. f1_h8 ABBBBBBB 1 枝の BDD インデックス（上位 8 ビット）

Node. nx_h8 00BBBBBB N: 次の節点番号（記憶管理用）（上位 8 ビット）

- ・ 本プログラムでは、各 BDD の参照回数を記憶するカウンタ（参照カウンタ）を用いて記憶管理を行っている。BDD をコピーする際には、インデックスを直接代入せず、必ず `bddcopy()` を使用する。また、不要になった変数は、`bddfree()` にて解放することにより、記憶の再利用が行われる。
- ・ 論理演算中に記憶あふれが発生した場合は、その演算を行う前の状態に戻し、`bddnull` を返す。それ以外のエラーが発生した場合は、エラーメッセージを出力した後、異常終了する。なお、関数の引数に

bddnull を与えた場合には、基本的に何もしないで bddnull を返す。

- ・本プログラムでは、組合せ集合を表す Zero-suppressed BDD (ZBDD) の処理も行う。ZBDD と BDD の節点は内部で区別されている。ZBDD 向けの演算の引数に BDD の節点を与えた場合（またはその逆も）エラーを検出し異常終了する。ちなみに内部での区別の仕方であるが、BDD/ZBDD では、0 枝側は否定枝にはならないという性質があるため、基本的に f0_32 の最下位ビットは 0 になっているはずである。そこで、本来 0 であるべき最下位ビットが 1 になっていたら ZBDD 節点であることを示している。

***** 定数マクロ *****

bddvarmax 入力変数番号の最大値（通常 65535）
bddfalse 恒偽関数を指す BDD インデックス値 (0x80000000)
bddtrue 恒真関数を指す BDD インデックス値 (0x80000001)
bddnull エラーを意味する BDD インデックス値（通常 0x7FFFFFFF）
bddempty ZBDD の空集合を表す BDD インデックス値 (= bddfalse)
bddsingle ZBDD の単位元集合を表す BDD インデックス値 (= bddtrue)

***** 関数 *****

----- [1] 初期設定・入力変数番号設定 -----

extern int bddinit(bddp initsize, bddp limitsize)

処理系を初期化し、メモリの確保を行う。プログラムの最初に必ず実行しなければならない。initsize で、最初にメモリを確保する BDD 節点数を指定する。以後、演算中にメモリを使い切った場合は、自動的にメモリの再確保が行われる。再確保毎に節点数は 4 倍に拡大される。拡大の上限は、limitsize によって指定できる。使用節点数が limitsize に達したときは、メモリの再確保はそれ以上行われず、ガベジコレクションが起動され、bddfree() により解放された空き節点が回収される。initsize は、最低 256 より大きく、limitsize を越えてはならない。limitsize は、最低 256 より大きく、上限は計算機の実メモリ量に依存する。(1 節点当たり約 25 バイト必要とする。) bddinit() による初期化が正常に行われた場合には、関数の値として 0 を返し、

メモリ確保に失敗した場合 1 を返す。bddinit() を複数回実行すると、前回の内容がクリアされ、再度初期化される。

```
extern bddvar bddnewvar(void)
```

新しい入力変数を 1 つ生成し、その変数番号 (VarID) を返す。VarID は 1 から始まる整数で、bddnewvar() または bddnewvaroflev() を 1 回実行するごとに 1 ずつ大きな値が返る。生成した変数の BDD 展開順位 (level) は、VarID と同じ値となる。変数の個数が最大値 bddvarmax を超えるとエラーを出力して異常終了する。

```
extern bddvar bddnewvaroflev(bddvar lev)
```

新しい入力変数を 1 つ生成し、その変数番号 (VarID) を返す。VarID は 1 から始まる整数で、bddnewvar() または bddnewvaroflev を 1 回実行するごとに] 1 ずつ大きな値が返る。生成した変数の BDD 展開順位 (level) は、引数 lev で指定した値となる。実行時に順位 lev の変数がすでに存在していた場合は、lev 以上の変数を 1 つずつ上にずらして (level を 1 ずつ増加させ)、空いたところに新しい変数を挿入する。引数 lev は 1 以上かつ「関数実行直前の変数の個数 + 1」以下でなければならない。そうでなければエラーを出力して異常終了する。変数の個数が最大値 bddvarmax を超えるとエラーを出力して異常終了する。

```
extern bddvar bddlevofvar(bddvar v)
```

引数 v で指定した変数番号 (VarID) の BDD 展開順位 (level) を返す。引数 v は 1 以上かつ「現在の変数の個数」以下でなければならない。そうでなければエラーを出力して異常終了する。

```
extern bddvar bddvaroflev(bddvar lev)
```

引数 lev で指定した BDD 展開順位 (level) を持つ変数番号 (VarID) を返す。引数 lev は 1 以上かつ「現在の変数の個数」以下でなければならない。そうでなければエラーを出力して異常終了する。

```
extern bddvar bddvarused(void)
```

現在の入力変数の個数を返す。

----- [2] 基本的な論理演算 -----

```
extern bddp bddprime(bddvar v)
```

変数番号 v の入力変数に関する単項関数を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。すでに同じ BDD が存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。引数 v は 1 以上かつ「現在の変数の個数」以下でなければならない。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。不当な引数を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD ではない通常の BDD を生成する。ZBDD 向け処理には利用できない。

```
extern bddvar bddtop(bddp f)
```

f が指す BDD の最上位の節点の変数番号 (VarID) を返す。返すのは BDD 展開順位の値 (level) ではなくその値を持つ変数の VarID であることに注意。 f の参照カウンタの値は変化しない。 f が定数関数の場合は 0 を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は 0 を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合はエラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp bddcopy(bddp f)
```

f が指す BDD をコピーする。すなわち、参照カウンタの値を 1 増やし、 f そのものを返す。`bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp bddnot(bddp f)
```

f の否定を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。「否定枝」を使用しているため、節点数は増加せず、 f の参照カウンタの値を 1 増やすだけで、定数時間で結果を返す。`bddnull` を与えた場合は `bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを

出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddand(bddp f, bddp g)
```

f と g の論理積を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddor(bddp f, bddp g)
```

f と g の論理和を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddxor(bddp f, bddp g)
```

f と g の排他的論理和を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddnand(bddp f, bddp g)
```

f と g の論理積の否定を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。

計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddnor(bddp f, bddp g)
```

f と g の論理和の否定を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddxnor(bddp f, bddp g)
```

f と g の排他的論理和の否定を表す BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddat0(bddp f, bddvar v)
```

f が指す BDD に対して、変数番号 v の入力変数に 0 を代入したときの BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f が ZBDD を指していた場合はおかしい計算をする可能性がある。

```
extern bddp    bddat1(bddp f, bddvar v)
```

f が指す BDD に対して、変数番号 v の入力変数に 1 を代入したときの BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f が ZBDD を指していた場合はおかしい計算をする可能性がある。

----- [3] 記憶管理・表示 -----

```
extern void    bddfrees(bddp f)
```

f が指す BDD がもはや不要であることを宣言する。すなわち、参照カウンタの値を 1 減らす。定数関数の場合は何もしない。f が指していた BDD は、ガベジコレクションが起動されるまでは、回収されずに残っている。引数に bddnull を与えた場合は、何もしない。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp    bddused(void)
```

現在使用中の総節点数を返す。bddfree() によって解放された節点も、回収されるまでは使用中として数えるため、正確な節点数を知るには、直前に bddgc() を実行（ガベジコレクション起動）する必要がある。

```
extern int     bddgc(void)
```

強制的にガベジコレクション（不要な節点の回収）を行う。bddgc() を陽に起動しなくても、記憶が足りなくなった場合には自動的に起動される。ガベジコレクションで空き節点が回収された場合は 0 を返し、空き節点が 1 個も見つからなかった場合は 1 を返す。

```
extern bddp    bddsize(bddp f)
```


f が指すの BDD の節点数を返す。参照カウンタの値は変化しない。
引数に bddnull を与えた場合は、0 を返す。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。
この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp bddvsize(bddp *p, int lim)
```

bddp 型の配列 p[]（配列長の上限 lim）により与えられた複数の BDD の節点数を返す。
複数の BDD に共通に含まれる節点は重複して数えない。参照カウンタの値は変化しない。
配列の要素として bddnull が出現したら、その直前で配列が終了しているとする。
bddnull が出現しなければ配列長は lim までとする。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。不当な引数を与えた場合はエラーを出力し異常終了する。
この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern void bddexport(FILE *strm, bddp *p, int lim)
```

bddp 型の配列 p[]（配列長の上限 lim）により与えられた複数の BDD の構造を、
strm で指定するファイルに出力する。配列の要素として bddnull が出現したら、
その直前で配列が終了しているとする。bddnull が出現しなければ配列長は
lim までとする。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。
不当な引数を与えた場合はエラーを出力し異常終了する。
この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern int bddimport(FILE *strm, bddp *p, int lim)
```

strm で指定するファイルから BDD の構造を読み込み、bddp 型の配列 p[]（配列長の上限
lim）に格納する。読み込んだ BDD 配列の要素数の 1 つ先の要素に bddnull を書き込む。
ただし、ファイルに書かれているデータの配列長が lim より大きいときは lim まで
しか読まない。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。
ファイルに文法誤りが合った場合等、異常終了時は 1 を返す。正常時は 0 を返す。
この演算は BDD でのみ正しく動作する。

```
extern int bddimportz(FILE *strm, bddp *p, int lim)
```

strm で指定するファイルから ZBDD の構造を読み込み、bddp 型の配列 p[]（配列長の上限

lim) に格納する。読み込んだ ZBDD 配列の要素数の 1 つ先の要素に bddnull を書き込む。ただし、ファイルに書かれているデータの配列長が lim より大きいときは lim までしか読まない。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。ファイルに文法誤りが合った場合等、異常終了時は 1 を返す。正常時は 0 を返す。この演算は ZBDD でのみ正しく動作する。

```
extern void    bddgraph(bddp f)
```

f が指す BDD のグラフ構造を X-Window に描画する。引数に bddnull を与えた場合は、何も表示しない。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern void    bddgraph0(bddp f)
```

f が指す BDD のグラフ構造を X-Window に描画する。bddgraph() とほとんど同じだが、否定枝を使わない場合のグラフ構造を描画する。引数に bddnull を与えた場合は、何も表示しない。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では正しく表示されない。

```
extern void    bddvgraph(bddp *p, int lim)
```

bddp 型の配列 p[] (配列長 n) により与えられた複数の BDD ののグラフ構造を X-Window に描画する。配列の要素として bddnull が出現したら、その直前で配列が終了しているとする。bddnull が出現しなければ配列長は lim までとする。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern void    bddvgraph0(bddp *p, int n)
```

bddp 型の配列 p[] (配列長 n) により与えられた複数の BDD ののグラフ構造を X-Window に描画する。bddvgraph() とほとんど同じだが、否定枝を使わない場合のグラフ構造を描画する。配列の要素として bddnull が出現したら、その直前で配列が終了しているとする。bddnull が出現しなければ配列長は

lim までとする。配列の記憶領域はあらかじめ確保されているものとする。
不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、
エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では正しく表示されない。

----- [4] その他の論理演算 -----

```
extern bddp  bddlshift(bddp f, bddvar shift)
```

f が指す BDD について、関係する全ての入力変数を、展開順位 (level) が shift ずつ大きい（上位にある）変数の変数番号 (VarID) にそれぞれ書き換えて BDD を複製し、それを指すインデックスを返す。実行結果において未定義の入力変数が必要になるような shift を与えてはならない。必要な入力変数はあらかじめ宣言しておくこと。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。shift に負の値を指定することはできない。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp  bddrshift(bddp f, bddvar shift)
```

f が指す BDD について、関係する全ての入力変数を、展開順位 (level) が shift ずつ大きい（上位にある）変数の変数番号 (VarID) にそれぞれ書き換えて BDD を複製し、それを指すインデックスを返す。実行結果において未定義の入力変数が必要になるような shift を与えてはならない。したがって、f に関係しない入力変数が下位レベルに用意されていなければならない。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。shift に負の値を指定することはできない。不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern bddp  bddsupport(bddp f)
```

f が指す BDD に関係する入力変数（変数の値が 0 か 1 かで f の結果が異なる

ような変数)の集合を取り出す。演算結果は、関係する入力変数の論理和(例: $a + b + d$)を表す BDD を生成し、それを指すインデックスを返す。
(演算結果の BDD の 0 枝を順にたどっていくと、求める変数が得られる)
f が定数の場合は `bddfalse` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等)を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。f が ZBDD の場合は演算結果は ZBDD の集合和の形式となる。

```
extern bddp    bdduniv(bddp f, bddp g)
```

全称作用演算(universal quantification)。g で指定した入力変数の部分集合に 0,1 の定数を代入したときに、どのような 0,1 の組合せを代入しても常に $f=1$ となる場合には 1 を返し、それ以外は 0 を返すような論理関数の BDD を作り、それを指すインデックスを返す。入力変数の部分集合の与え方は、`bddsupport()` の場合と同様で、変数の論理和の形式とする。(g が指す BDD の 0 枝を順にたどっていくと、求める変数が得られる。) 計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等)を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp    bddexist(bddp f, bddp g)
```

存在作用演算(existential quantification)。g で指定した入力変数の部分集合に 0,1 の定数を代入したときに、どのような 0,1 の組合せを代入しても常に $f=0$ となる場合には 0 を返し、それ以外は 1 を返すような論理関数の BDD を作り、それを指すインデックスを返す。入力変数の部分集合の与え方は、`bddsupport()` の場合と同様で、変数の論理和の形式とする。(g が指す BDD の 0 枝を順にたどっていくと、求める変数が得られる。) 計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、`bddnull` を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、`bddnull` を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等)を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp    bddcofactor(bddp f, bddp g)
```

$g = 0$ のときを don't care として f を単純化した BDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ BDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern int     bddimply(bddp f, bddp g)
```

$f \rightarrow g$ (f が真ならば g は真) が恒に成り立つかを調べ、恒に成り立つなら 1 を返し、1 つでも反例があれば 0 を返す。実行中に節点数は増加しないので効率が良い。引数に bddnull を与えた場合は、0 を返す。

不当な引数 (BDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD では定義されていないため、 f, g が ZBDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern void    bddwcache(unsigned char op, bddp f, bddp g, bddp h)
```

演算結果キャッシュへの登録を行う。op は演算の種類を表す。 $(f \text{ op } g) = h$ という演算結果を登録する。 f, g, h は、bddp 型のデータを与える。引数エラーチェックは行っていないので注意。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能である。なお、1.00 版では、 $\text{op} = 0 \sim 9$ は、BDD 処理系内部の演算用に、 $\text{op} = 10 \sim 19$ は、ZBDD 関係の演算用に使用されており、20 以上の番号が未使用である。複数のアプリケーションで番号が衝突しないように注意が必要。

```
extern bddp    bddrcache(unsigned char op, bddp f, bddp g)
```

演算結果キャッシュを参照する。過去に同じ演算が登録されていれば、演算結果の BDD へのインデックスを返し、見つからなければ bddnull を返す。ただし、値を返すだけで、参照カウンタの処理は行わないため、呼び出し側で bddcopy() を実行する必要がある。引数エラーのチェックは行っていないので注意。

----- [5] ZBDD 用の組合せ集合演算 -----

```
extern bddp  bddoffset(bddp f, bddvar v)
```

f が指す ZBDD において、入力変数番号 v のアイテムを含まない組合せ要素を集めた部分集合を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用であるため、f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddonset(bddp f, bddvar v)
```

f が指す ZBDD において、入力変数番号 v のアイテムを含む組合せ要素を集めた部分集合を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用であるため、f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp  bddonset0(bddp f, bddvar v)
```

bddonset() とほぼ同じであるが、抽出した部分集合の各要素から入力変数番号 v のアイテムが取り除かれている。

bddchange(bddonset(f, rank), rank) と等価である。

v が f の最上位の変数番号であれば、1-枝の指す BDD をそのまま返す。

計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。

引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。

この演算は ZBDD 専用であるため、f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddchange(bddp f, bddvar v)
```

f が指す ZBDD に含まれる全ての組合せ要素について、入力変数番号 v のアイテムの有無を反転させた組合せ集合を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用であるため、f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddintersec(bddp f, bddp g)
```

f と g の積集合を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、f, g が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddunion(bddp f, bddp g)
```

f と g の和集合を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、f, g が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp bddsubtract(bddp f, bddp g)
```

f と g の差集合 (f に含まれ g に含まれていない要素) を表す ZBDD を作り、それを指すインデックスを返す。計算結果と同じ ZBDD がすでに存在していれば共有し、参照カウンタの値を 1 増やす。実行中に記憶あふれを起こした場合は、bddnull を返す。引数に bddnull を与えた場合は、bddnull を返す。不当な引数 (ZBDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、f, g が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern bddp    bddcard(bddp f)
```

f が指す ZBDD に含まれる要素数を返す。引数に bddnull を与えた場合は、0 を返す。参照カウンタの値は変化しない。不当な引数 (ZBDD を正しく指していない等) を与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。要素数が扱える数の最大値 (bddnull) を超える場合は、その最大値 (bddnull) を出力する。

```
extern char    *bddcardmp16(bddp f, char *s)
```

f が指す ZBDD に含まれる要素数を最大 16 ワード長までの多倍長整数でカウントする。結果は 16 進数文字列として s から始まる記憶領域に格納する。s に 0 (NULL) を与えて実行した場合は、必要なサイズの文字列領域を確保 (malloc) してから結果を格納し、その開始アドレスを関数値として返す。文字列領域確保に失敗した場合は 0 (NULL) を返し終了する。0 以外の s を与えた場合は、s をそのまま関数値として返す。0 以外の s を与える場合には、あらかじめ十分な記憶領域 (64 ビット PC の場合、最大 129 文字) を確保しておくこと。そうでない場合の動作は保証されない。結果の格納場所が確保されていても計算途中にメモリが不足し計算結果が不明となる場合は、空文字列を格納して終了する。メモリは足りているが計算結果が表現可能な最大値を超える場合は、表現可能な最大値をカウント結果として格納して終了する。引数 f に bddnull を与えた場合は 0 をカウント結果とする。不当な引数 (ZBDD を正しく指していない等) を与えた場合は異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、f が通常の BDD を指していた場合は異常終了する。

```
extern bddp    bddl1it(bddp f)
```


f が指す ZBDD に含まれる組合せに出現するアイテム数の総和を返す。
引数に `bddnull` を与えた場合は、0 を返す。参照カウンタの値は
変化しない。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を与えた
場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、
f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。
要素数が扱える数の最大値 (`bddnull`) を超える場合は、その最大値
(`bddnull`) を出力する。

```
extern bddp bddlen(bddp f)
```

f が指す ZBDD に含まれる組合せのうち、最もアイテム数を多く含む組合せを
探し出して、そのアイテム数を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は、0 を返す。
参照カウンタの値は変化しない。不当な引数（ZBDD を正しく指していない等）を
与えた場合は、エラーを出力し異常終了する。この演算は ZBDD 専用のため、
f が通常の BDD を指していた場合はエラーを出力し異常終了する。

```
extern int bddisbdd(bddp f)
```

f が指すノードが BDD であるかを判定する。BDD なら 1 を、ZBDD なら 0 を返す。
f が定数関数の場合は 1 を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は 0 を返す。
不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合はエラーを
出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。

```
extern int bddiszbdd(bddp f)
```

f が指すノードが ZBDD であるかを判定する。ZBDD なら 1 を、BDD なら 0 を返す。
f が定数関数の場合は 1 を返す。引数に `bddnull` を与えた場合は 0 を返す。
不当な引数（BDD を正しく指していない等）を与えた場合はエラーを
出力し異常終了する。この演算は BDD, ZBDD 共に利用可能。