2021年度「プログラミング言語」配布資料 (12)

五十嵐 淳

2022年10月02日

1　ビジターパターンによる操作とデータの分離 (java/bstVisitor)

Java の 2 分探索木プログラムでは，ある種類のデータに関する処理が全てひとつのクラスにまとまっているために，例えば木のノードの種類を追加したい場合には，既存のプログラムに修正を加えることなく新たなクラスを定義するだけで済む．一方で，操作単位で見てみると，定義が複数のクラスに散らばっているために定義全体を見通すのが難しい．これは，ノードの種類を追加するには既存のデータ構造定義を修正する必要がある一方で，新しい操作を加えるには単に新しい関数定義を追加するだけで済んだ OCaml や C のプログラムとは対照的である．Java で操作が散らばらないようにプログラムを記述するひとつの方法としては，`isLeaf` などのメソッドや `instanceof` 演算子を使ってデータの種類についての場合分けを行って記述することが考えられる．

ここで紹介する，ビジターパターン (visitor pattern)[1]は，動的ディスパッチを活用しながら，データに対する操作をデータ定義から分離してプログラムを構成する方法である．find などの 2 分木に対する操作は，* データが葉か枝かによる場合分け * 葉に対する処理 * 枝に対する処理

から構成されている．講義資料その (2) では，これを，

- 葉に対する処理は葉のクラスに記述
- 枝に対する処理は枝のクラスに記述
- 二種類の処理を同名のメソッドに記述し，データが葉か枝かによる場合分けを動的ディスパッチで行う

ということにしてプログラムを組んでいた．ビジターパターンでは，データ構造に対する操作を表すビジターと呼ばれるオブジェクトを用意し，

- 葉に対する処理はビジターのクラスのメソッドに記述
- 枝に対する処理もビジターのクラスの別のメソッドに記述
- 葉か枝かによる場合分けは依然としてデータ側のメソッドの動的ディスパッチで行い，データ側のメソッドからビジター内の対応する処理を呼ぶ，

という形でプログラムを構成する．

[1]オブジェクト指向言語でのプログラミングイディオムのいくつかはデザインパターン (design pattern) と呼ばれている．デザインパターンには，ここで紹介するビジターパターン以外にも多数あって，講義資料その (2) で導入した，インターフェースとクラスを使ったデータ構造の表現方法もコンポジットパターン (composite pattern)) と呼ばれている．

1.1 find 操作のビジターによる定義

文章で書くだけではわかりにくいので，find 操作の例を見てみよう．まず，インターフェースには，これまでと違い accept というメソッドだけが宣言されている．そして引数は Find 型となっている．これが，これから定義する find 操作を表すビジターのクラス名である．

```
public interface BinarySearchTree {
    boolean accept(Find v);
}
```

次に，Find の定義を見てみよう．

```
public class Find {
    private int n;

    public Find(int n) {
        this.n = n;
    }

    public boolean caseLeaf() {
        return false;
    }

    public boolean caseBranch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right) {
        if (n == v) {
            return true;
        } else if (n < v) {
            return left.accept(this);
        } else /* n > v */ {
            return right.accept(this);
        }
    }
}
```

caseLeaf と caseBranch というメソッドがあって，この中身は葉の場合の処理，枝の場合の処理がほぼそのままコピーされている．また，探索する整数 n は，Find クラスのインスタンス変数として宣言されている．この Find クラスのオブジェクト，例えば new Find(5) は「5 を探索する操作」を表すオブジェクトとして機能する．2 分木に対して探索をしたい場合には，以下のように accept メソッドの引数として Find オブジェクトを渡すことになる．

```
BinarySearchTree t = ...;
boolean b = t.accept(new Find(5));  // Does t store 5?
```

さて，上のように accept を呼ぶと，t が Leaf か Branch いずれかの accept メソッドを呼ぶことになる．仕上げは，それぞれの accept メソッドから，引数として渡された Find オブジェクトに対し caseLeaf または caseBranch を呼ぶように Leaf と Branch を定義することにある．

```
public class Leaf implements BinarySearchTree {
    public Leaf() {
    }

    public boolean accept(Find visitor) {
        return visitor.caseLeaf();
    }
}

public class Branch implements BinarySearchTree {
    private BinarySearchTree left;
    private int v;
    private BinarySearchTree right;

    public Branch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right) {
        this.left = left;
        this.v = v;
        this.right = right;
    }

    public boolean accept(Find visitor) {
        return visitor.caseBranch(left, v, right);
    }
}
```

6 行目と 22 行目が肝である．受け取った `visitor` に対し，`Leaf` クラスでは `caseLeaf` を，`Branch` クラスでは `caseBranch` を呼ぶことで，葉・枝それぞれに対する処理をするわけである．この際，インスタンス変数もビジターに渡してあげるのも大事な点である[2]．

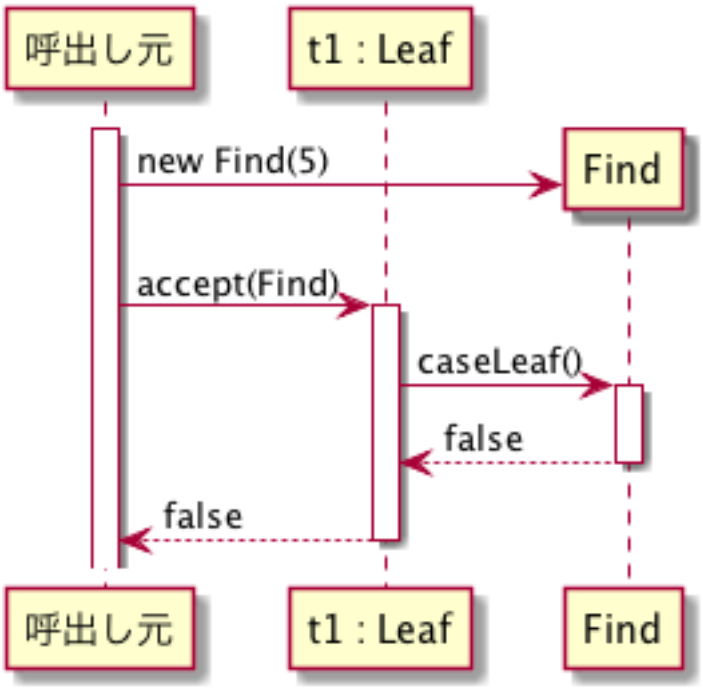
1.2 find 操作の動作

さて，このように定義されたプログラムの動作を (8) 再帰と繰返しでも使った UML のシーケンス図を使って説明しよう．例えば，

```
// 呼出し元
BinarySearchTree t1 = new Leaf();
System.out.println(t1.accept(new Find(5))); // should display false
```

には，`t1` (が指す) オブジェクトと `Find` オブジェクトが登場するが，`t1.accept(new Find(5))` の動作を記述したシーケンス図は下のようになる．

[2]オブジェクトを丸ごとビジターに渡すことも多い (正式なビジターパターンの定義ではそうなっている) が，ここでは他の実装方式との比較をやりやすくするためにインスタンス変数を渡すようにプログラムを書いている．特に，短命のデータ構造など，オブジェクトの状態の変更が必要な場合はオブジェクトを丸ごと渡す必要がある．



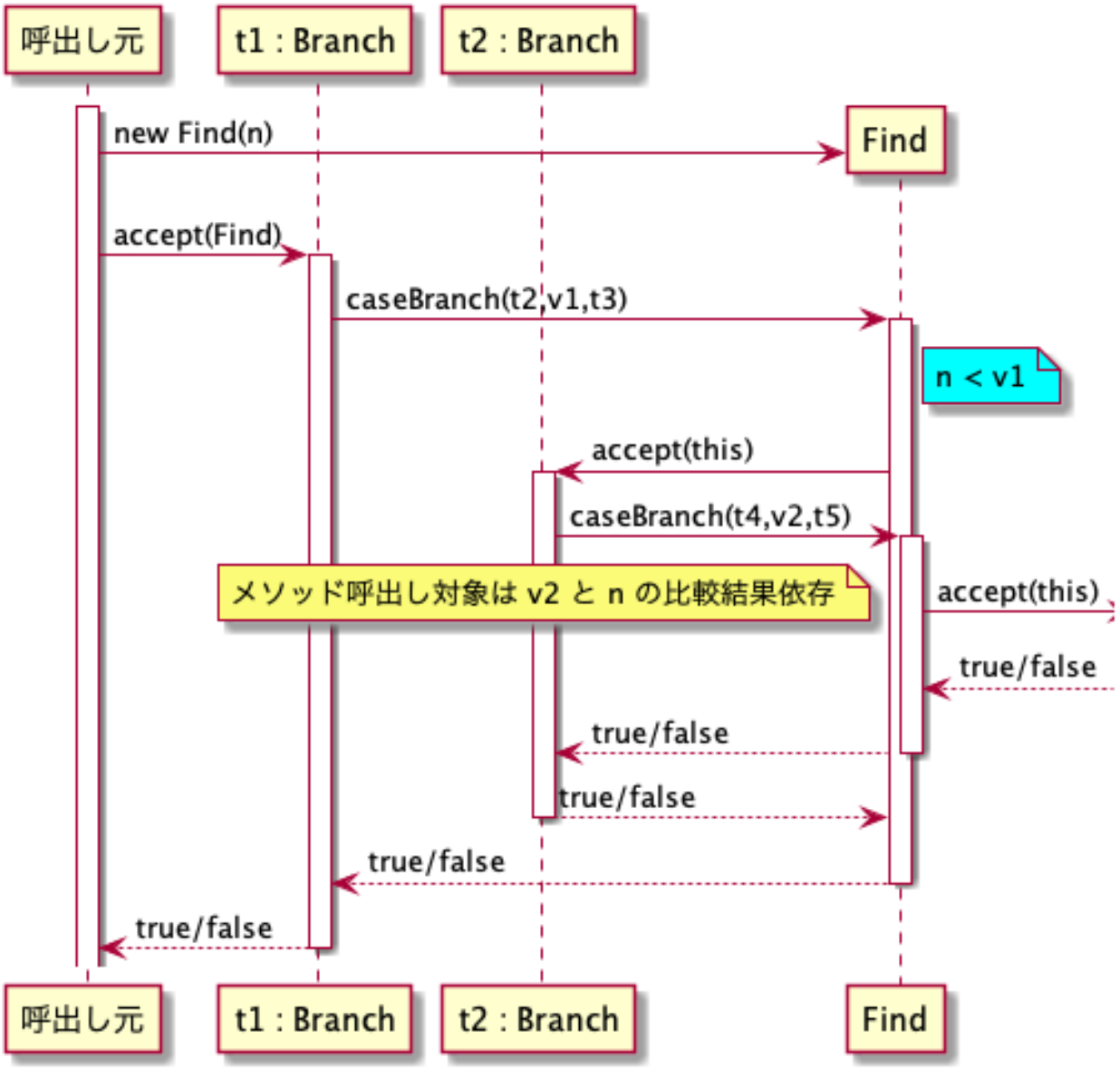
図だけ見れば，なんとなく何を意味しているか想像できるかもしれないが，* 縦軸が時間の経過を示しており，発生する出来事が上から順に書かれる．(たまに太くなる) 縦線はライフラインと呼ばれ，上下の長方形には登場するオブジェクトの情報が書かれる．* 左右のライフライン間を走る矢印はメソッド呼出し (メッセージとも呼ばれる) とメソッドからの復帰 (return) を示している．復帰は応答メッセージとも呼ばれる．矢印の上には引数などの情報を書く* ライフラインが太くなっている部分は，そのオブジェクトのいずれかのメソッドが実行中であることを示している．

このシーケンス図の場合，1. 呼出し元が，`Find` クラスのオブジェクトを生成し，1. `t1` の `accept` メソッドを呼出し，1. `accept` メソッドが，`caseLeaf` を呼出し，1. `caseLeaf` が `false` を返し，1. `accept` メソッドが，(`caseLeaf` から返ってきた)`false` を最初の呼出し元に返したという時系列を表している．ポイントは，`t1` が `Leaf` オブジェクトであるために `caseLeaf` が呼ばれた，というところである．

一方，`t1` が `Branch` である時を考えてみよう．呼出し元のプログラムは以下のようなものを考える．

```
// Definitions of t3, t4, t5, v1, v2, n, ...
BinarySearchTree t2 = new Branch(t4,v2,t5);
BinarySearchTree t1 = new Branch(t2,v1,t3);
System.out.println(t1.accept(new Find(n)));
```

ここで，`n < v1` が成り立っているとする．すなわち，`n` の探索は `t1` から `t2` に続いていく．このプログラムに対するシーケンス図は以下のようになる．



今度は，t1 が Branch なので，accept に続いて Find オブジェクトの caseBranch メソッドが呼出されているのがポイントである．その際，t1 のインスタンス変数がごっそりビジターに渡されて，その中で n と v1 の比較が行われる．次は，左の部分木 t2 に対する (再帰に相当する) 呼出しだが，これはビジター内の処理を呼出し元として，再び accept メソッドを呼ぶことで行われる．その結果，t2 に対する accept の呼出しは，再び caseBranch の呼出しとなって戻ってくる．一回目の caseBranch の処理が途中のまま，再び caseBranch が呼出されていることを示すため，ライフラインが二重に太くなっている．この先の処理は n と v2 の大小に依存するが，そこは書いていない．(n と v2 が等しい場合にはすぐに true を返すので，必ずしも accept 呼出しが発生するわけではない．) その後，true か false が決定されたら，それがたらい回しに元来た経路を辿って，呼出し元まで伝播していく．

かなりややこしい経過を辿るが (特に Find のメソッド呼出しの途中で，また Find のメソッドが呼ばれる，というのがわかりにくいような気がする)，このようにして find 操作が実現でき，かつ，find 操作の本質的な部

分を一箇所 (すなわち Find クラス) に集めることができた．

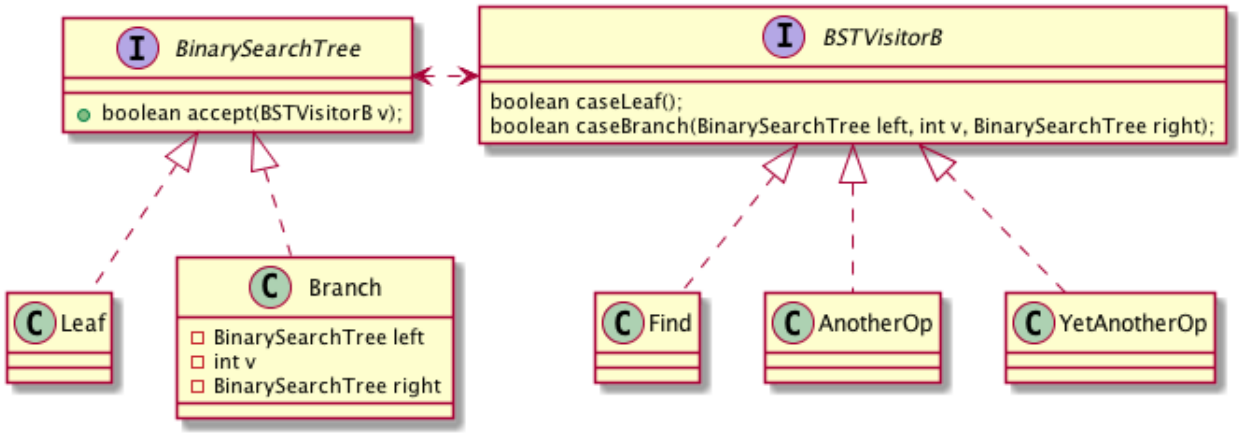
もう一度繰返すと，ビジターの原理は，* ビジターにデータの種類の場合分けに応じたメソッドを定義する．メソッドはデータが保持するインスタンス変数を全てもらうようにする．* データ側には，ビジターを引数とした accept メソッドを置き，データの種類によって，ビジターの対応するメソッドを呼ぶようにする．という点である．

ここまでは find 操作に特化したプログラムを書いたが，以下では，このパターンを色々な操作を同時に使えるように一般化していく．

1.3 パターンへの一般化

上にあげたプログラムでは accept メソッドの引数が，特定のクラスである Find に固定されてしまっていたため，探索操作しかできない．一般には色々な操作をビジターとして定義したいわけだが，操作毎に (別の名前の) accept を定義するのでは使い勝手が悪い．そこで，最初の一般化として，**boolean を返す操作一般**をうまく扱えるようにする．そのために，ビジターのためのインターフェースを定義し，Find (や，その他 boolean を返すビジターのクラス) はそのインターフェースを implements して定義するようにする．

まず，クラス図を示そう．

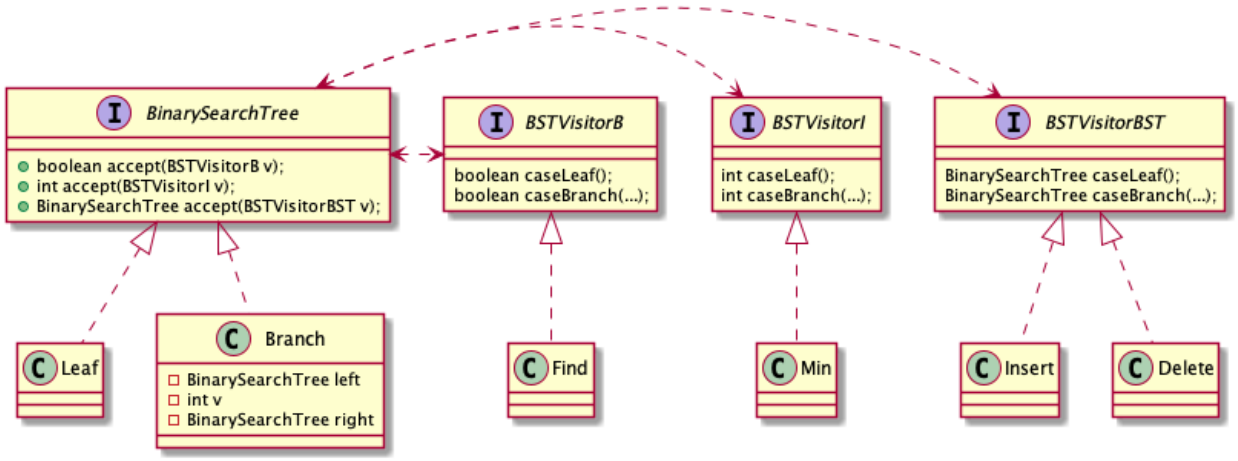


インターフェース間の矢印は相互に依存関係があることを示している (「矢じり」が，implements を表すものと違うことに注意)．BSTVisitorB が「boolean を返す 2 分木に対する操作一般」を表すためのインターフェースであり，accept メソッドも Find 決めうちではなく，BSTVisitorB を引数としている．Find は BSTVisitorB を implements する形で定義するため，accept に渡すことができる．他にも BSTVisitorB を implements したクラスを追加する (caseLeaf と caseBranch の具体的な定義を与える) ことで，2 分木に対する操作を，**既存のクラスの変更をすることなく** 追加することができる．

ここまで一般化すると「パターン」と呼ぶにふさわしくなってくる．

1.4 返り値の違うビジターの扱い

上の方法で，boolean を返す操作については一般的に扱うことができるが，他の型 (例えば挿入・削除のように 2 分木や min のように int) を返す操作を追加する場合は，別のインターフェースを用意する．この場合，accept メソッドもオーバーロードを使って複数バージョン用意する．



配布しているソースコードは，この方針で定義されている．クラス・インターフェースの数はかなり増えてしまうが，例えば Insert クラスに書かれていることは，本質的に OCaml プログラムの insert 関数と同じことであることがわかるのではないだろうか．

OCaml による insert(再掲):

```
let rec insert(t, n) =
  match t with
    Lf -> Br {left=Lf; value=n; right=Lf}
  | Br {left=l; value=v; right=r} ->
     if n = v then t
     else if n < v then
       let new_left = insert(l, n) in
       Br {left=new_left; value=v; right=r}
     else (* n > v *)
       let new_right = insert(r, n) in
       Br {left=l;        value=v; right=new_right}
```

ビジターによる insert:

```
public class Insert implements BSTVisitorBST {
    private int n;

    // constructor is omitted

    public BinarySearchTree caseLeaf() {
        return new Branch(new Leaf(), n, new Leaf());
    }

    public BinarySearchTree caseBranch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right) {
        if (n == v) {
            return new Branch(left, v, right);
```

```
        } else if (n < v) {
            BinarySearchTree newLeft = left.accept(this);
            return new Branch(newLeft, v, right);
        } else /* n > v */ {
            BinarySearchTree newRight = right.accept(this);
            return new Branch(left, v, newRight);
        }
    }
}
```

1.4.1 考察

木のノードの種類を増やしたい場合には，ビジターのインターフェースからビジタークラスまで全てにわたって，caseXXX メソッドを増やす必要があり，結局，OCaml のような関数を使った方法と同様に既存コードを修正しないといけない不便さがある．ノードの種類と操作の種類の両方の拡張性を持つように (静的型付言語で) プログラミングできるかという問題は“Expression problem”という名前がつけられ 2000 年代のプログラミング言語研究のホットトピックであった．Java だけでもジェネリクスを駆使すればできることが Torgersen の研究によって知られているが，Scala などの Java よりさらに先進的な機構を持つ言語ではわりと簡潔に記述できる．

1.5 多相性の導入

1.5.1 ビジターの返り値型多相 (java/bstPolyVisitor/)

BSTVisitorXXX のようなインターフェースを増やさずに様々な返り値型のビジターを扱うためにはジェネリクスを使うとよい．以下のインターフェース BSTVisitor<Result> は，BSTVisitorI と BSTVisitorB と BSTVisitorBST をまとめたものと考えられる．

```
public interface BSTVisitor<Result> {
    Result caseLeaf();
    Result caseBranch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right);
}
```

Result をビジターに応じた返り値型で具体化することが想定されている．各ビジタークラスは BSTVisitor<Integer> などを implement して定義することを想定している．例えば，Find クラスは以下のように定義される．

```
public class Find implements BSTVisitor<Boolean> {
    // instance variable and constructor omitted

    public Boolean caseLeaf() {
        return false;
    }

    public Boolean caseBranch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right) {
        if (n == v) {
```

```
            return true;
        } else if (n < v) {
            return left.accept(this);
        } else /* n > v */ {
            return right.accept(this);
        }
    }
}
```

型パラメータはプリミティブ型で具体化できないため boolean の代わりに Boolean を使っているが，それ以外の変更は implements 節だけである．

次に 2 分探索木側の変更を見てみよう．まず，BinarySearchTree の元の定義は

```
public interface BinarySearchTree {
    boolean accept(BSTVisitorB v);
    BinarySearchTree accept(BSTVisitorBST v);
    int accept(BSTVisitorI v);
}
```

であるが，引数の型をジェネリクスを使った形で書き直し，それに応じて返値型をプリミティブ型を使わないようにすると，以下のようになる．

```
public interface BinarySearchTree {
    Boolean accept(BSTVisitor<Boolean> v);
    Integer accept(BSTVisitor<Integer> v);
    BinarySearchTree accept(BSTVisitor<BinarySearchTree> v);
}
```

こうすると，共通するパターンが見えてくるだろう．つまり，accept の返値型と，引数 v の型の型引数が共通して変化するだけなので，ここを型パラメータにして，以下のような定義に辿りつく．

```
public interface BinarySearchTree {
    <Result> Result accept(BSTVisitor<Result> v);
}
```

accept が Result を型パラメータとする多相メソッドとして宣言されており，引数の型が BSTVisitor<Result> となっている．Result がクラスではなく，メソッドの型パラメータになっている理由は，ひとつの木に対し，返値型が異なるビジターが渡される可能性があるためである．もし，Result をクラスの型パラメータとして

```
public interface BinarySearchTree<Result> {
    Result accept(BSTVisitor<Result> v);
}
```

のように定義してしまうと，オブジェクト毎に Result が固定されてしまい，その固定した Result を返すビジターしか受け取れなくなってしまう．(木の map 操作を思い出そう．)accept は多相メソッドなので，accept の呼び出しには (暗黙的に) 型引数を指定することになる．例えば，Find 中の

```
return left.accept(this);
```

という呼び出しは，型引数を明示的に書くなら

```
return left.<Boolean>accept(this);
```

と書かれるものである．これは実引数の this が Boolean を返すようなビジターであることを示している．(より細かくいうと，<Boolean> と指定することで，accept の引数の型は BSTVisitor<Result> の Result を実際に指定された Boolean で具体化した BSTVisitor<Boolean> になる．this の型は Find であるが，Find クラスの implements 節に書いたようにこれは BSTVisitor<Boolean> としても使えるので，この呼び出しは適切である．また，accept の返値型は，定義に書いてある Result を具体化した Boolean であると理解できる．)

この BinarySearchTree に対応した Leaf と Branch クラスは素直に定義できる．以下に Branch のみ示す．

```
public class Branch implements BinarySearchTree {
    private BinarySearchTree left;
    private int v;
    private BinarySearchTree right;

    public Branch(BinarySearchTree left, int v, BinarySearchTree right) {
        this.left = left;
        this.v = v;
        this.right = right;
    }

    public <Result> Result accept(BSTVisitor<Result> visitor) {
        return visitor.caseBranch(left, v, right);
    }
}
```

2 分探索木を作って，メソッド呼び出しを行う Main クラスのコードも変更の必要はない．

1.5.2 要素型の多相性 (java/polyBSTPolyVisitor/)

2 分探索木が格納する要素の型を int に固定せず，ジェネリクスを使って多相的にする場合，BinarySearchTree などに要素の型を表す型引数を追加するのはもちろん，ビジターにも要素型を表す型引数を追加することになる．

```
public interface BinarySearchTree<Elm extends Comparable<Elm>> {
    <R> R accept(BSTVisitor<Elm,R> v);
}

public interface BSTVisitor<Elm extends Comparable<Elm>, R> {
    R caseLeaf();
    R caseBranch(BinarySearchTree<Elm> left, Elm v, BinarySearchTree<Elm> right);
}
```

型変数の Elm にその上限 Comparable<Elm> が指定されているのは以前と同じ理由である．

1.6 その他

短命な 2 分探索木をビジターパターンで実装することもできる (java/bstVisitorMutable 参照)．しかし，ビジターパターンは動的ディスパッチに依存しているので，葉を null ポインタで表現する方法と組み合わせることはできない．

短命な 2 分探索木の場合の accept メソッドは，ビジターに状態変更をしてもらうことになる．そのため，データ構造側にインスタンス変数を変更するためのメソッドを設け，accept メソッドは インスタンス変数の値ではなく，this で 2 分木オブジェクトそのものを渡すことになる．

```
// Branch クラス
    public BinarySearchTree getLeft() {
        return left;
    }

    public void setLeft(BinarySearchTree newLeft) {
        left = newLeft;
    }
    // 同様の getV, setV, getRight, setRight メソッドも定義する

    public BinarySearchTree accept(BSTVisitorBST visitor) {
        // インスタンス変数ではなく `this` を使って 2分木オブジェクトそのものを渡す
        return visitor.caseBranch(this);
    }
```

ビジター側では，代入文の代わりに setXXX メソッドを使ってオブジェクトの状態変更を行う．以下は枝に対する insert 操作を表すメソッド定義である．

```
    public BinarySearchTree caseBranch(Branch that) {
        if (n == that.getV()) {
            return that;
        } else if (n < that.getV()) {
            BinarySearchTree newLeft = that.getLeft().accept(this);
            that.setLeft(newLeft);
            return that;
        } else /* n > that.v */ {
            BinarySearchTree newRight = that.getRight().accept(this);
            that.setRight(newRight);
            return that;
        }
    }
```