C++プログラミング II

第 4 回 vector の機能と構造

岡本秀輔

成蹊大学理工学部

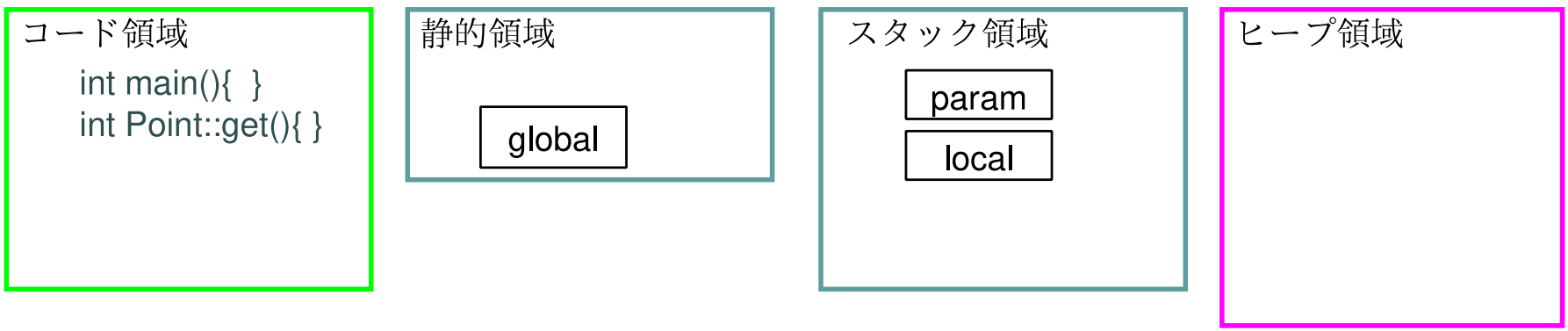
学修に当たって

- 自動車の運転:
  - 自動車の運転の仕方は免許をとる際に習う
  - ガソリン車、電気自動車、ハイブリット車で運転の仕方は同じ
  - 内部の仕組みを知ればそれぞれの特徴を活用できる
- 今日学ぶ内容
  - `std::vector`の様々な機能
  - `vector`類似クラス作成での内部動作の確認
    - `vector`の使い方だけでなく、
      内部の仕組みを知ることで特徴をいかせるようにする
  - 配列を管理するための操作

vectorの機能と構造

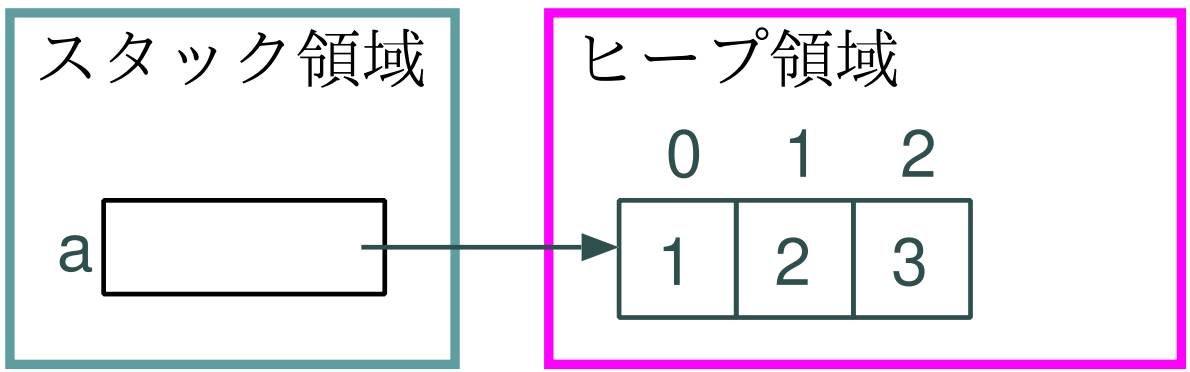
C++で使う四つのメモリ領域

- コード領域：関数やメンバ関数の機械語が置かれる。
- 静的領域：大域変数や文字列用。コンパイル時にメモリサイズが決まり、実行開始時に割り当てられる。
- スタック領域：引数を含む局所変数と関数呼び出しの制御に使う。コンパイル時に関数ごとのメモリサイズが決まり、関数呼び出しごとに割り当て、呼び出しから戻る際に解放がなされる。
- ヒープ領域：プログラムの実行状況に応じて割り当てと解放を行う。vectorの本体はこの領域に関係する。



std::vectorの使うメモリ

- 変数の制御情報部分は静的領域またはスタック領域
- 数が増減する要素の値を保存する本体はヒープ領域
- その本体は固定サイズの配列要素の値が隣り合う形
  - 添字指定でn番目の要素の場所が計算可能
  - 要素の場所 = 先頭の場所 + n*要素のサイズ
- `vector<int> a {1,2,3};`のイメージ:



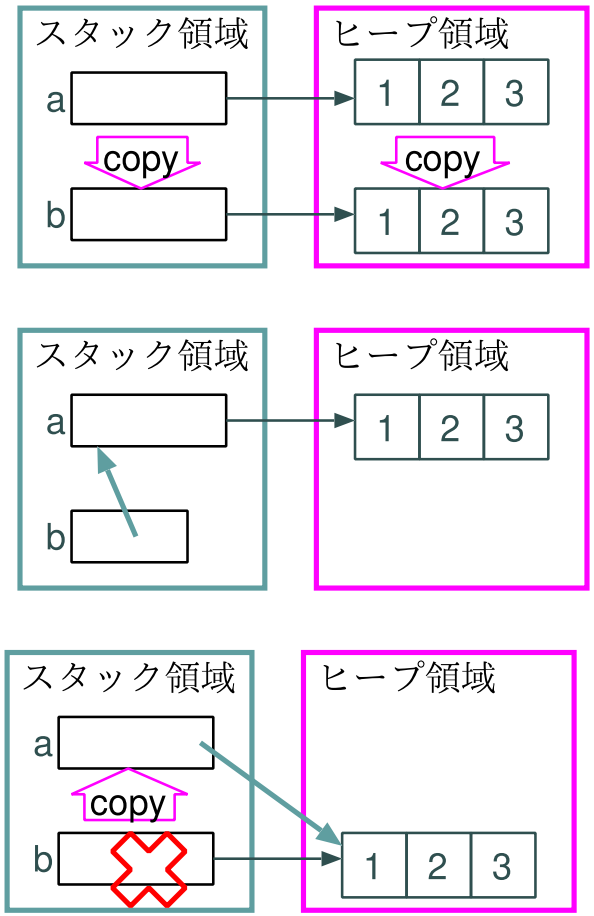
代入と関数呼び出し

- 代入と引数の値渡しでは制御情報と本体の双方がコピーされる
  - `b=a;`
  - `void f(vector<T> b);`
- 参照渡しの引数では場所情報（変数のアドレス）が渡される
  - `void f(vector<T>& b);`
  - `void f(const vector<T>& b);`
- 局所変数を関数から返すと制御情報のみコピー (move) される

```
auto f(){ vector<T> b(3); return b; }

a = f();
```

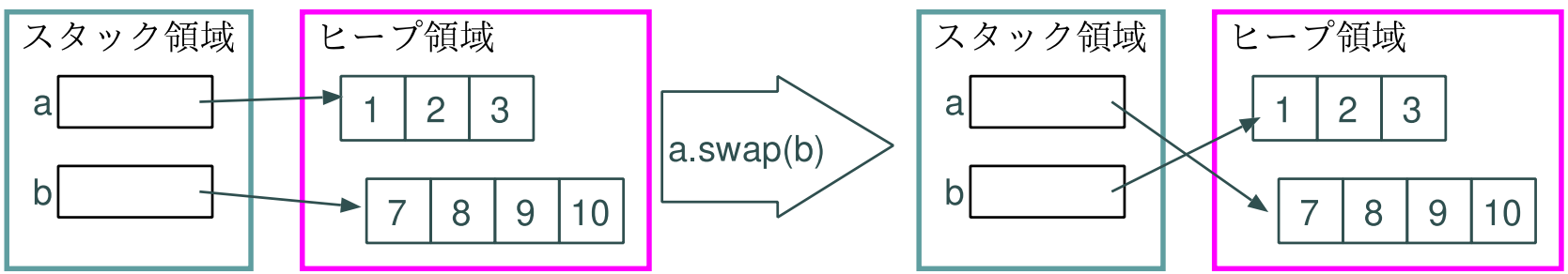
  - さらなる効率化も行われる (RVO)



swap メンバ関数

- `void vector<T>::swap(vector<T>& other);`
- 同型の他の変数と内容（制御情報と本体）を交換する

```
int main() {
    vector<int> a{1,2,3}, b{7,8,9,10};
    print(a); // (1,2,3)
    print(b); // (7,8,9,10)
    a.swap(b);
    print(a); // (7,8,9,10)
    print(b); // (1,2,3)
}
```



ヒープ領域の割り当て

- 概要
  - `vector`の本体部分のサイズは増減する
  - 必要に応じて適当なサイズを確保する
  - 少し多めに確保して割り当て回数を減らす
  - 確保する量に決まりはない（実装の仕方に依存）
- 確保したメモリサイズの確認
  - `capacity`メンバ関数 (capacity: 容量)
  - `size`は挿入された要素の数
- 確保するタイミング
  - コンストラクタ, `push_back`, `insert`など
- 解放するタイミング
  - 変数の使用が終了した時点（デストラクタ）など
  - `pop_back`, `erase`, `clear`, `resize`では解放しない実装が許される

push_back と capacity

- 容量が変化した時点でそのサイズを出力してみる

```
const size_t N {200};
std::vector<int> v;
size_t cap { v.capacity() };

cout << cap <<"\n";
for (size_t i=0; i<N; i++){
   v.push_back(i);
   if (cap != v.capacity()){ // 容量変化!
      cap = v.capacity();
      cout << cap <<"\n";
   }
}
cout <<"size     = "<< v.size() <<"\n"
     <<"capacity = "<< v.capacity() <<"\n";
```

出力結果：

```
0
1
2
4
8
16
32
64
128
256
size     = 200
capacity = 256
```

末尾削除／全削除

- 要素削除では容量は変化しない（実装の仕方に依存）

```
void print(const std::vector<int>& a) {
    cout << a.size() <<", "<< a.capacity() <<": ";
    for (auto e : a) cout << e <<" ";
    cout <<"\n";
}
int main() {
    std::vector<int> a {1,2,3};
    print(a);    // 3, 3: 1 2 3
    a.pop_back();
    print(a);    // 2, 3: 1 2
    a.pop_back();
    print(a);    // 1, 3: 1
    a.clear();
    print(a);    // 0, 3:
}
```

先頭と末尾

- front()：先頭要素へのアクセス
- back()　：末尾要素へのアクセス
- どちらも左辺値として使える
  - 要素のリファレンスを返す

```
using std::cout;
std::vector a {3,2,3,4,8};
a.front() = 1;
a.back() = 5;
cout << a.front() <<" "<< a.back() <<"\n"; // 1 5
for (auto e : a)
    cout << e <<" ";
cout <<"\n"; // 1 2 3 4 5
```

vectorのイテレータ

- イテレータ（反復子）とは
  - 要素の場所情報を保持し、ループで使うためのクラス
  - 他のコンテナ（複数データを管理するクラス）と操作を揃えるためのもの
  - ポインタに類似の * や -> 演算子を使用する
  - vector用のイテレータは加算減算や比較が可能
- イテレータの例
  - begin()：要素の先頭を表すイテレータを返す
  - end()：末尾要素の次を表すイテレータを返す

```
std::vector a {1,2,3,4};
auto it { a.begin() };   // イテレータ
cout << *it <<" "<< *(it + 1)<<"\n"; // 1 2
++it;
cout << *it <<"\n";                  // 2
cout << a.end() - a.begin() <<"\n";  // 4
```

末尾以外の挿入削除

- 末尾以外の挿入削除の指定にはイテレータを使用する。
  添字を使った挿入削除はできない。
- push_front(), pop_front は提供されない。
  理由は操作時間が要素数に比例するため。

```
void print(const std::vector<int>& a) {
    for (auto e : a) cout << e <<" ";
    cout <<"\n";
}
int main() {
    std::vector a {8,6,5,3,2,1};
    a.insert( a.begin(), 9 );    // push_front() に相当
    print(a); // 9 8 6 5 3 2 1
    a.insert( a.begin()+2, 7 ); // a[2] に 7 を挿入
    print(a); // 9 8 7 6 5 3 2 1
    a.erase( a.begin()+3 );      // a[3] を削除
    print(a); // 9 8 7 5 3 2 1
}
```

範囲 for 文

- 範囲 for文はイテレータのループを簡潔に書くために C++11から導入された
- begin()と end()を備えることが条件

```
std::vector a {1,2,3,4,5};
for (auto e : a)
    std::cout << e <<"\n";
```

- begin()と end()を使ったほぼ同じ処理内容の for文

```
std::vector a {1,2,3,4,5};
for (auto it=a.begin(); it!=a.end(); ++it) {
    auto e { *it };
    std::cout << e <<"\n";
}
```

MyVec(vector類似クラス）の実装

MyVecの概要

- vectorの最小限の機能で、その他の機能を実装する
- 作ってみることでvectorのメンバ関数の動きを学ぶ
  - ただし要素は基本データ型のみのサポートとする
  - クラスオブジェクトを要素にした場合には制限がある
- 使用するvectorの機能（後の授業で置き換える）:
  - ヒープ領域に連続領域を割り当ててアクセスする機能
  - サイズ指定コンストラクタ `vector<int> a(5);`
  - []演算子による要素へのアクセス `a[0]`
  - swap()メンバ関数 `a.swap(b);`
- 実装する機能（vectorと同じ名前のメンバ関数）
  - empty, size, capacity, swap
  - push_back, pop_back, operator[], clear
  - begin, end, insert, erase

ファイル構成

- MyVecクラス定義はmyvec.hppファイルに保存
- 使用するプログラムは#include "myvec.hpp"を書く

```
template<typename T>
class MyVec { ...  };
```

```
#include <iostream>
#include "myvec.hpp"
int main() { MyVec<int> x; ...  }
```

```
$ g++ -std=c++17 test.cpp
$ ./a.out
```

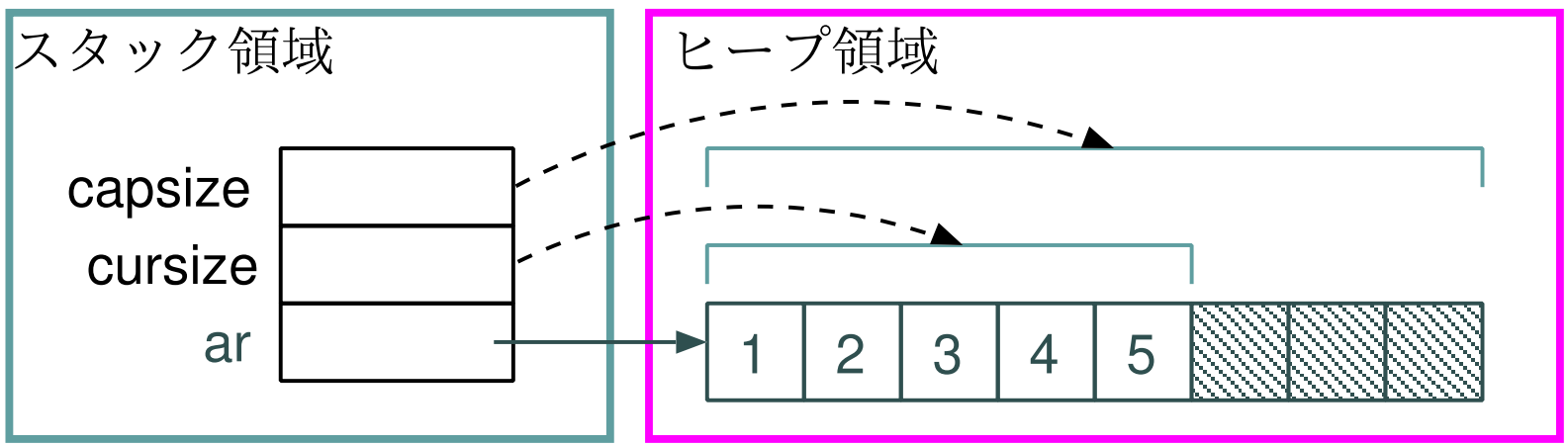
クラス定義

- データメンバとメンバ関数の宣言

```
#include <vector>
template<typename T>
class MyVec {
    size_t capsize{}; // 割り当てサイズ
    size_t cursize{}; // 現在の使用サイズ
    std::vector<T> ar;
public:
    bool   empty()    const{ return cursize == 0; }
    size_t size()     const{ return cursize; }
    void   clear()          { cursize = 0; }
    size_t capacity() const{ return capsize; }
    T  operator[](size_t i) const{ return ar[i]; }
    T& operator[](size_t i)      { return ar[i]; }
    // この後に作るメンバ関数が続く
};
```

データメンバの役割

- `capsize`：未使用を含めて割り当てたサイズ
- `cursize`：挿入済みの現在の (current) 要素数
- `ar`：`vector`を要素保持の目的だけに使用
  - 割り当てサイズを `ar`に任せない
  - `ar.capacity()==capasize` にする
  - `cursize=0;`で `MyVec::size()==0`



MyVecの[]演算子

添字を使った要素へのアクセス

- `T  operator[](size_t i) const;`
  - `y = myvec[x];`の形式で使用する (右辺値)
- `T& operator[](size_t i);`
  - `myvec[x] = y;`の形式で使用する (左辺値)
  - `T&`を返すことで要素を変更できる

```
MyVec<int> x;
// 後で作成する要素を挿入するコード
...
// 要素へのアクセス
x[0] = 1; // 左辺値
x[1] = 5;
x[2] = 3;
for (size_t i = 0; i < x.size(); i++)
    std::cout << x[i] <<" "; // 右辺値
std::cout <<"\n";  // 1 5 3
```

メンバ関数の作成

以下の操作を加えていく

- `push_back`
- `pop_back`
- `swap`
- `begin()`,`end()`
- `erase`
- `insert`

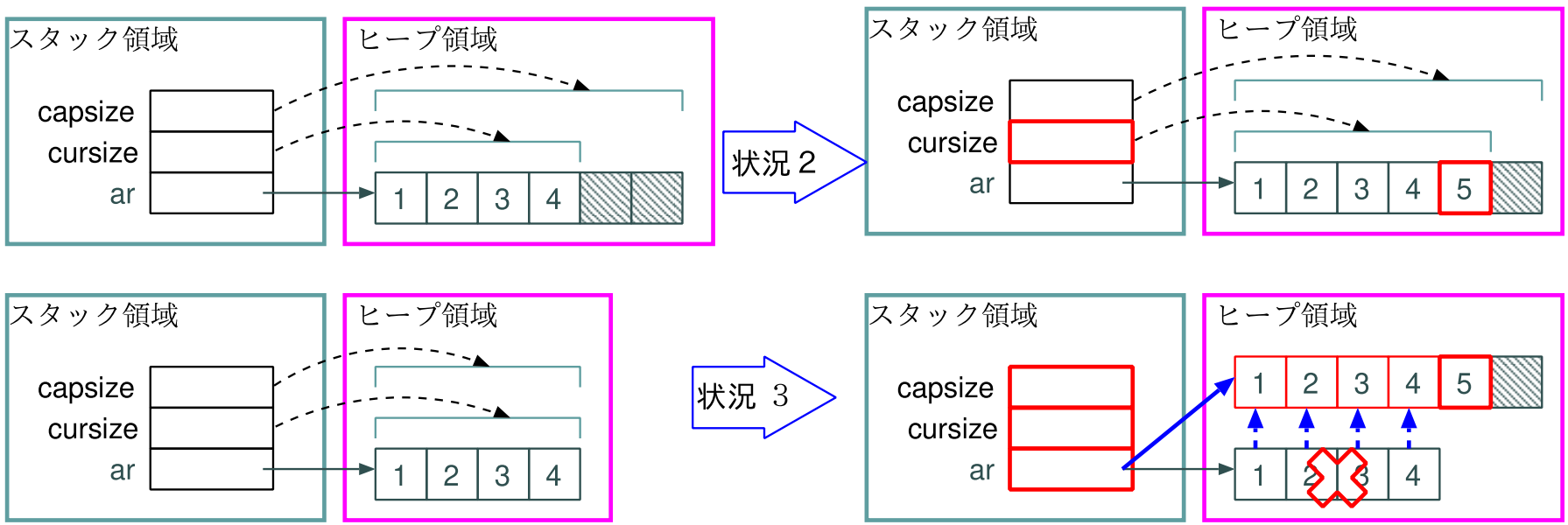
push_backと割り当て数の関係

- 2^n の要素を持てるように割り当て数を増やしていく
- capsizeと cursizeを変更していく。
- capsizeの変更に応じて arも変更する

```
MyVec<int> myvec; // 割り当て数と要素数ともに0
myvec.push_back(1); // 割り当て数1 要素数1
myvec.push_back(2); // 割り当て数2 要素数2
myvec.push_back(3); // 割り当て数4 要素数3
myvec.push_back(4); // 割り当て数4 要素数4
myvec.push_back(5); // 割り当て数8 要素数5
myvec.push_back(6); // 割り当て数8 要素数6
myvec.push_back(7); // 割り当て数8 要素数7
myvec.push_back(8); // 割り当て数8 要素数8
myvec.push_back(9); // 割り当て数16 要素数9
```

MyVec::push_back 操作の概要

- 末尾に要素を挿入する
- 状況により三種類の対応が必要
  - 状況 1: 未だ割り当てがない
    - 割り当て数の決定, 割り当て, 代入
  - 状況 2: 割り当て数に余裕がある
    - 代入
  - 状況 3: 割り当て数に余裕がない
    - 割り当て数の決定, 割り当て, 現在要素のコピー, 代入



MyVec::push_back の実装

- 新しいサイズは空なら 1 それ以外は容量 2 倍
- 要素の代入と cursizeの増加は共通

```
class MyVec {
  ...
    void push_back(const T& x) {
      if (cursize == capsize) { // 空 or 満杯
         capsize = (capsize==0) ? 1 : 2*capsize;
         std::vector<T> n(capsize); // 新しい割り当て
         for (size_t i=0; i<cursize; i++) // コピー
            n[i] = ar[i];
         ar.swap(n);                      // 入れ替え
      }
      ar[cursize] = x;                    // 代入
      ++cursize;
    }
};
```

MyVec::pop_back 操作

- 操作
  - 末尾要素を削除する（使えなくする）
  - 割り当て数を変更する必要はない
  - cursizeを調整する
  - size()と empty()の結果に影響する
- vectorとの違い
  - 削除要素のデストラクタが実行されない。
    ややこしいので考えないことにする。

```
class MyVec {
  ...
   void pop_back()         { -- cursize; }

};
```

MyVec::swap 操作

- 制御に使う変数の内容を入れ替える
- クラスのデータメンバをすべて入れ替える

```
class MyVec {
  ...
   void swap(MyVec<T>& x) {
      ar.swap(x);
      std::swap(capsize, x.capsize);
      std::swap(cursize, x.cursize);
   }
};
```

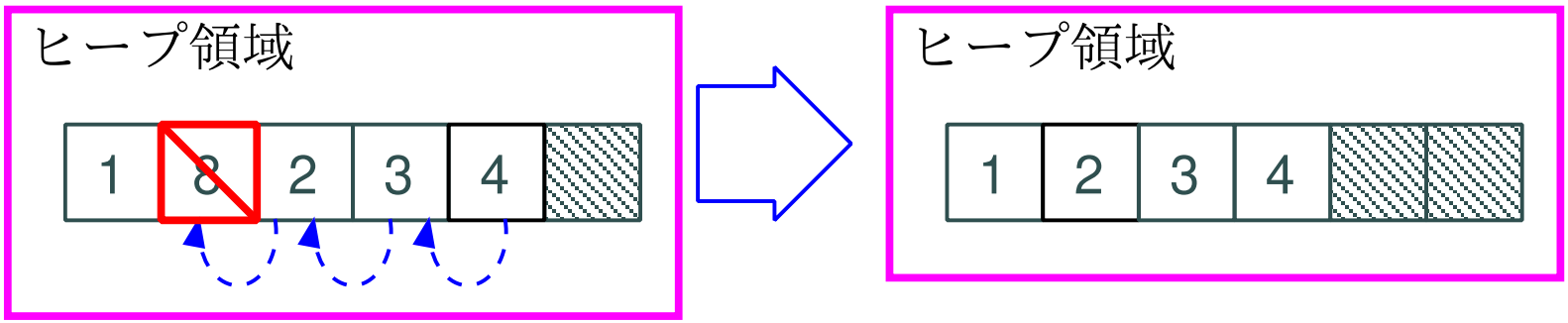
末尾以外の挿入削除

- insert, eraseにはイテレータが必要
- イテレータはやや複雑なクラスなので単純化する
  - 添字を指定した挿入と削除だけできるようにする
  - iteratorクラスを作らずにsize_tを使う
- begin, endを作りvectorと使い方を似せる
  - `size_t begin() { return 0; }`
  - `size_t end()  { return cursize; }`

```
// 想定する使い方（これならばvectorでも同じ）
for (int i=0; i<5; i++) {
    x.insert(x.begin(), i); // 先頭に挿入
    print(x);
}
x.insert(x.begin()+3, 10); // x[3]に挿入
print(x);
x.erase(x.begin()+2);  // x[2]を削除
print(x);
```

MyVec::erase 操作

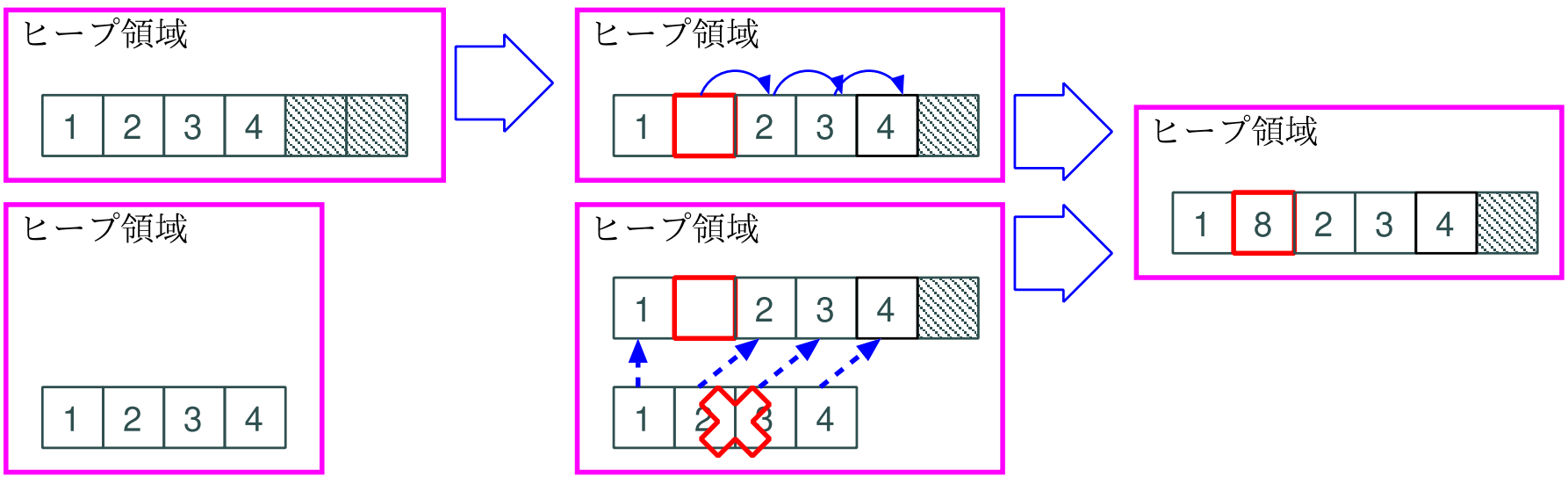
- 添字で指定して要素を削除する
- 削除要素より後ろの要素を前にシフト (容量変更なし)




```
size_t erase(size_t pos) { // メンバ関数
  if (pos >= cursize) return cursize;
  for (size_t i=pos; i<cursize-1; i++) // 前シフト
     ar[i] = ar[i+1];
  -- cursize;
  return pos;
}
```

MyVec::insert 操作の概要

- 指定方法と動作
  - `size_t insert(size_t i, const T& v);`
  - 添字 `i`の要素の前に値 `v`を挿入し、その `i`を返す
  - `MyVec`が空ならば `push_back`と同じ動作
  - `i>=cursize`の時も `push_back`と同じ動作
- 容量が足りる　場合：場所を空けて代入
- 容量が足りない場合：新たに割り当てて、コピーと代入



MyVec::insert の実装

```
size_t insert(size_t pos, const T& v) { // メンバ関数
    if (pos > cursize) pos = cursize;
    if (cursize == capsize) { // 空 or 満杯の場合は
        capsize = (capsize==0) ? 1 : 2*capsize;
        std::vector<T> n(capsize);
        for (size_t i=0; i<pos; i++)          // 前半
            n[i] = ar[i];
        for (size_t i=pos; i<cursize; i++) // 後半
            n[i+1] = ar[i];
        ar.swap(n);                           // 入れ替え
    } else {
        for (size_t i=cursize; i>pos; i--) // 後シフト
            ar[i] = ar[i-1];
    }
    ar[pos] = v;
    ++cursize;
    return pos;
}
```

MyVec::insert の動作確認

```
#include <iostream>
#include "myvec.hpp"
void print(const MyVec<int>& a) {
    std::cout <<a.capacity()<<" [";
    for (size_t i=0; i<a.size(); i++)
        std::cout <<(i==0?"":" ")<< a[i];
    std::cout <<"]\n";
}
int main() {
    MyVec<int> x;
    x.insert(x.begin(), 1);  // 先頭に 1 を挿入
    print(x); // 1 [1]
    x.insert(x.begin()+1, 3);// x[1] に 3 を挿入
    print(x); // 2 [1 3]
    x.insert(x.begin()+1, 2);// x[1] に 2 を挿入
    print(x); // 4 [1 2 3]
    x.erase(x.begin()+1);    // x[1] を削除
    print(x); // 4 [1 3]
}
```

push_backとの違い

- push_backはinsertで実装してもほぼ同じ

```
void push_back(const T& x) { insert(cursize, x); }
```

- 性能
  - insertは挿入位置より後方のシフトが性能を悪くする
  - push_backは割り当てをうまくすれば最後の代入のみ
- 結論
  - insertを多用する使い方は性能悪化に注意

まとめ

まとめ

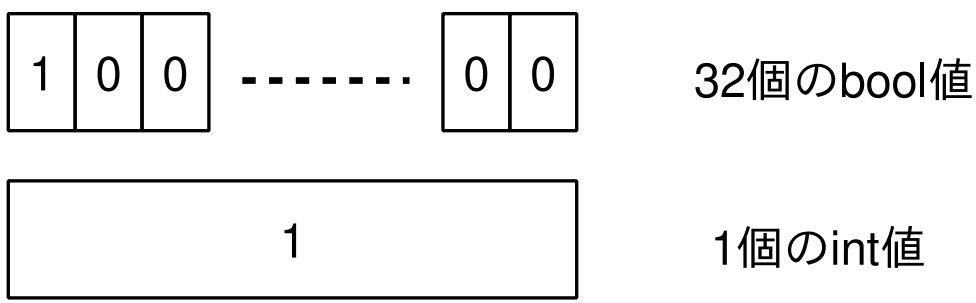
- `vector`とメモリ
  - 要素本体はヒープ領域に割り当てられる
  - 要素数の変化に対応する
  - すべては連続領域に割り当てられる
- MyVec 類似クラスの実装
  - 連続領域の割り当て数を管理する
  - `push_back`は 2^n の要素を持つようにした
  - 要素の増加では割り当て直しと要素のコピーが必要
  - `pop_back`は見た目のサイズの調整のみ
  - `swap`は制御情報の入れ替えのみ
  - `erase`では要素を前側へのシフトが必要
  - `insert`は割り当て直しまたは後ろ側へのシフトが必要
- `erase` と `insert` の処理は配列管理操作の基本

参考

std::vector<bool >

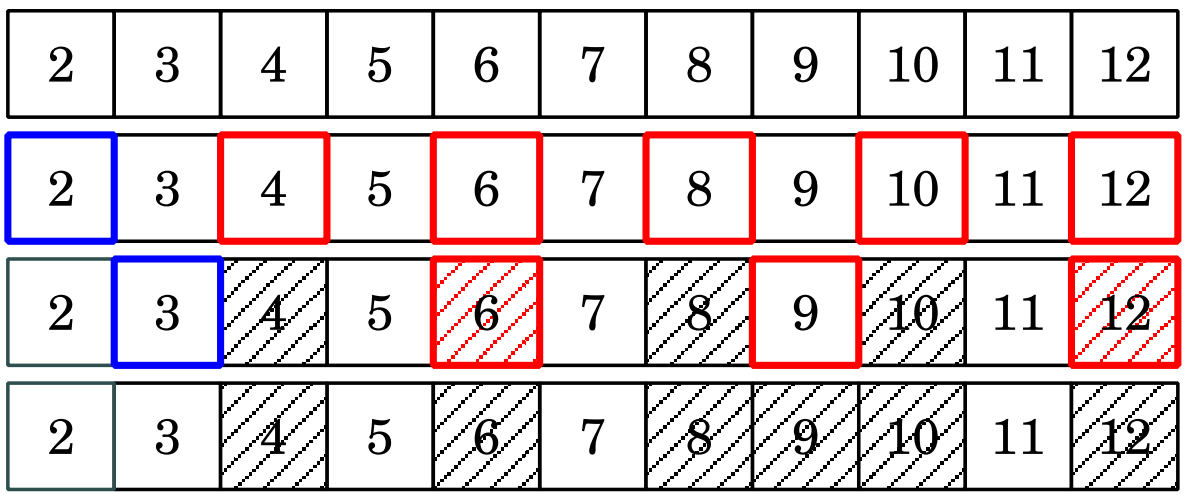
std::vector<bool >とは

- `bool`型の特殊性
  - `bool`は`true`/`false`の 2 値なので 1 ビットで表現可能
  - 現代のコンピュータは以下が苦手
    - 1 ビット単位のメモリ割り当て
    - 1 ビット単位の代入
- ビットアレイ（ビットベクター）とは
  - 32 ビットの整数を使えば 32 個の`bool`値が表現可能
  - 省メモリ化とアクセス高速化の実装技術
- `bool`のみクラステンプレートの特殊化で実装される
  - イテレータは使用可
  - 要素へのポインタ/リファレンスは使用不可



エラトステネスのふるい法

- 最大 n までの素数を探すアルゴリズム
- 素数とは：2 以上で 1 とそれ自身のみが約数となる整数
- アルゴリズムのステップ
  1. 2から nまでの数列を作る。
  2. pを 2として、それを最小の素数とする。
  3. p以外の pの倍数 (2×p, 3×p···) を数列から削除する。
  4. pの次に大きな数を新たな pとする。無ければ 6 に進む。
  5. 3 に戻る。($p > \sqrt{n}$ ならば 6 に進んでもよい)
  6. 残った数列を n以下の素数として終了する。



ふるい法のプログラム

- 配列の添字を調べる数に対応させる
- 要素の値が true の添字を素数にする

```
std::vector<bool> p(n+1, true); // n+1 個すべてが true
// 配列 p は添字が 0 から n まで有効

// p[0] = p[1] = false;
for (int i = 2; i*i <= n; i++) {
    if (!p[i]) continue;
    for (int j = 2*i; j <= n; j+=i){
        p[j] = false;
    }
}

for (int i = 2; i <= n; i++)
    if (p[i]) cout << i <<" ";
cout <<"\n";
```