

2016/5/13 Fri.

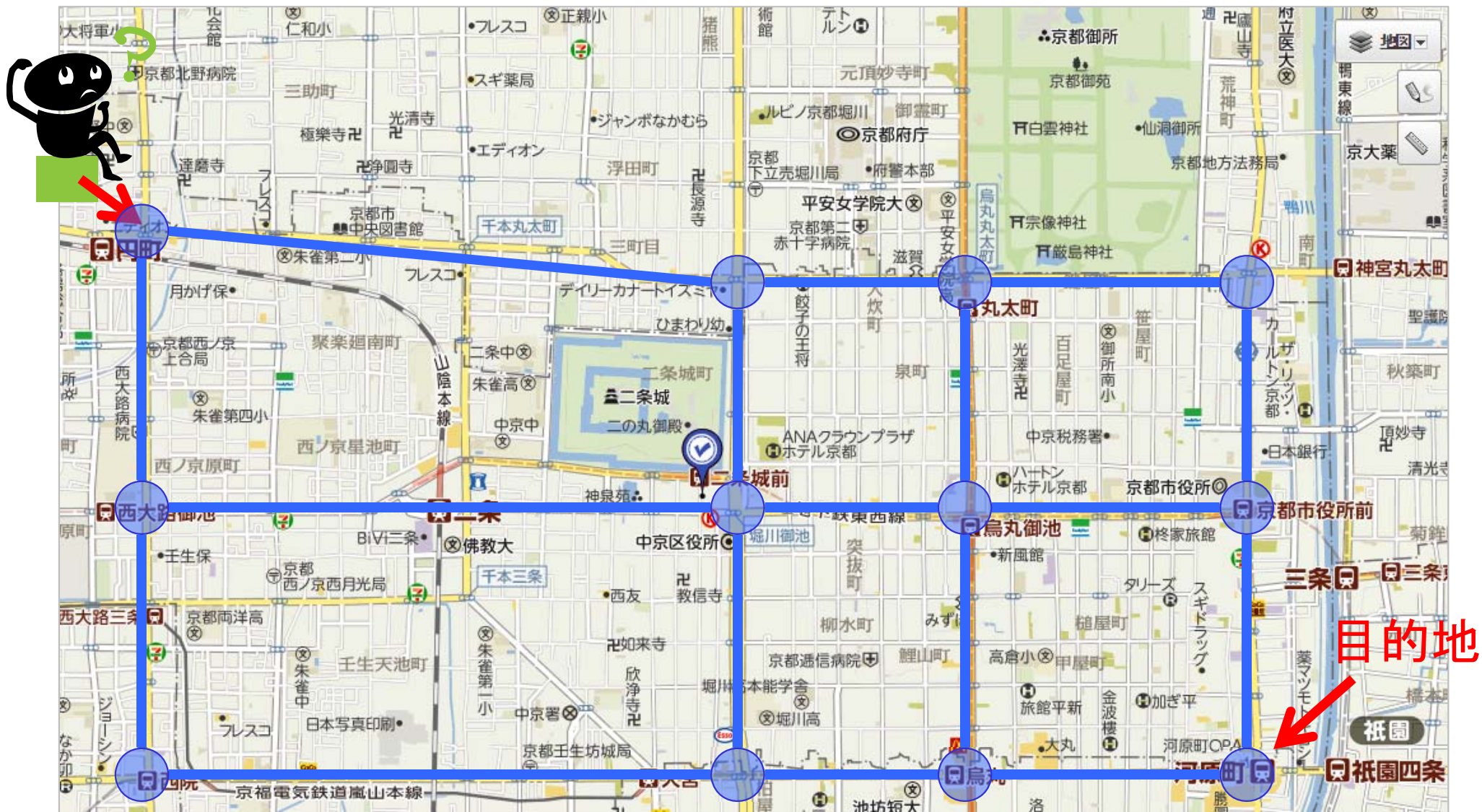
問題解決技法入門

最短経路探索

堀田 敬介

ルート探索

今、円町の交差点にいる 河原町の交差点まで、車で大通りのみを選んで通り、目的地までたどり着きたい どの経路(ルート)を通るのがよいか？

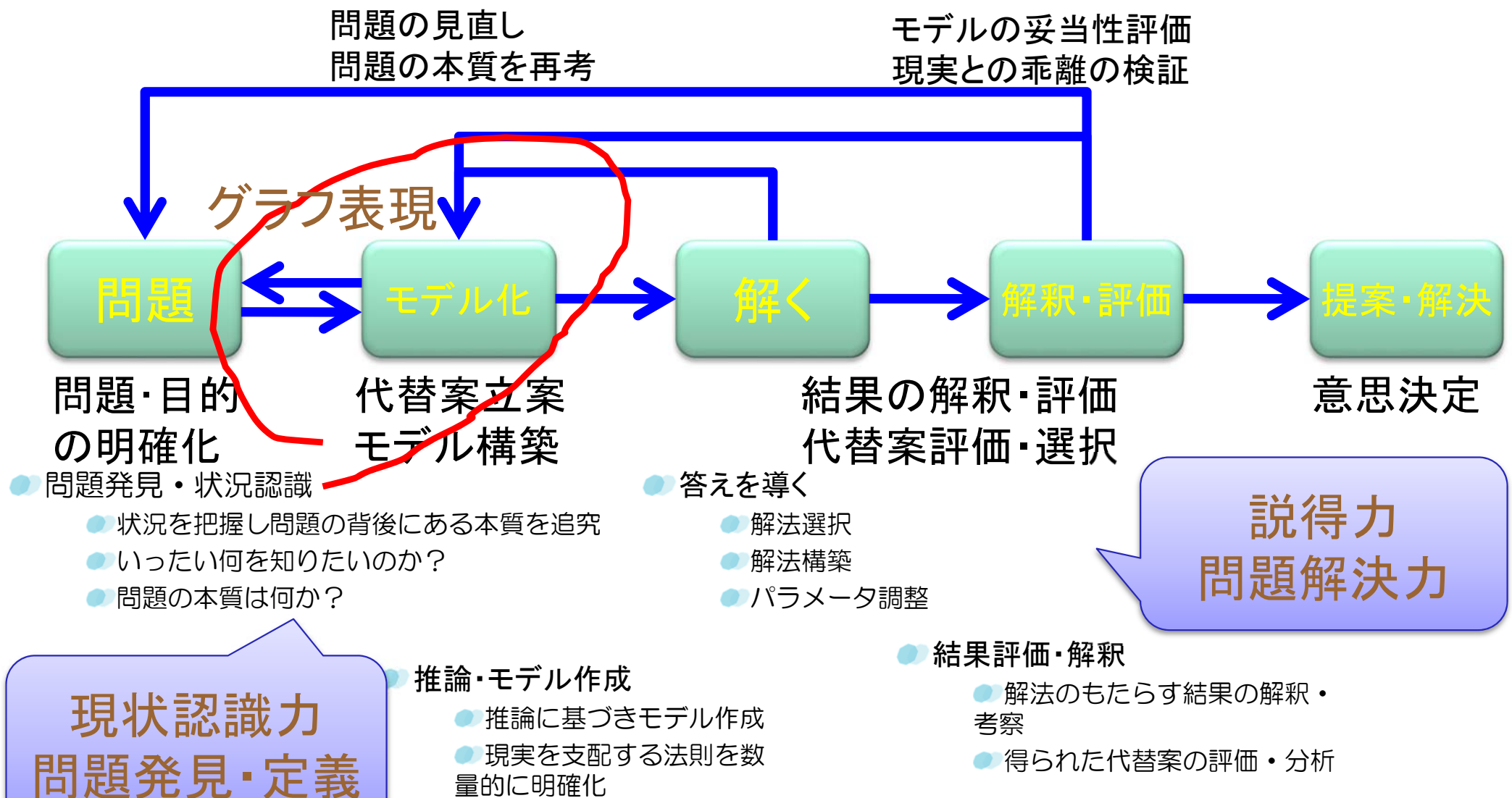


map: Yahoo!Japan地図 京都周辺

意思決定

論理的思考力
データ分析, 統計学
数理的アプローチ

- 「問題の把握」から「意思決定」までの流れ



参考：ナビゲーション・システム

航海, 航海術

- ナビゲーション・システムの2大機能

- 情報表示

- 現在地や渋滞情報, 周辺情報などを地図に重ねて表示

- ルート探索

- 目的地を指定すると現在地からの(最短)経路を表示

ex) カー・ナビゲーション・システム

automotive navigation system

PND・GPS携帯・
スマホなど多様化

どうやってるの？

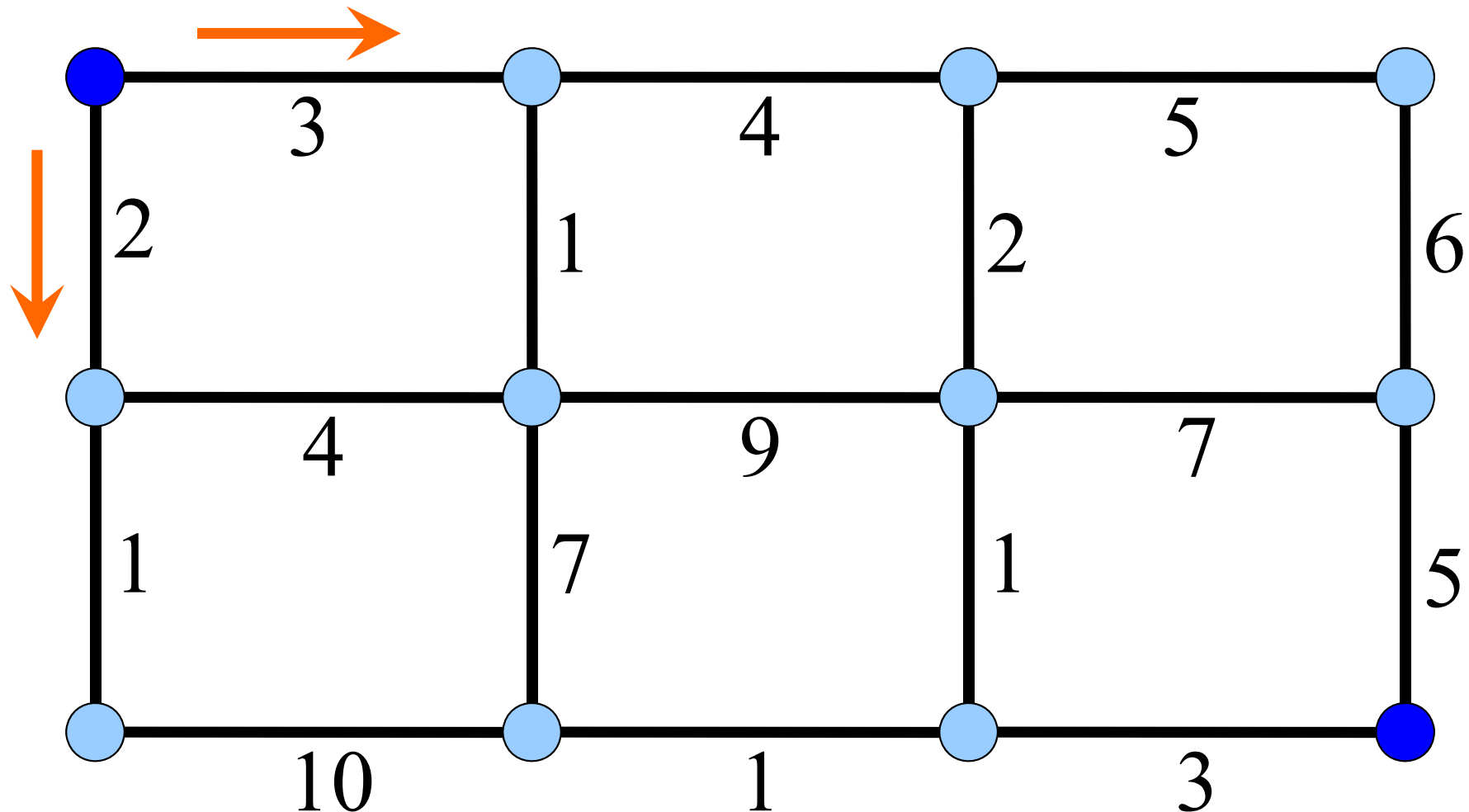


解く: どうやって解くか？

youtube
[erato お姉さん]で検索

全ての経路を調べ、
その中から最も短い経路を選べば良い！
[素朴で素直な方法＝全列挙, しらみつぶし]

何通りあるか
お姉さんに聞いてみよう！

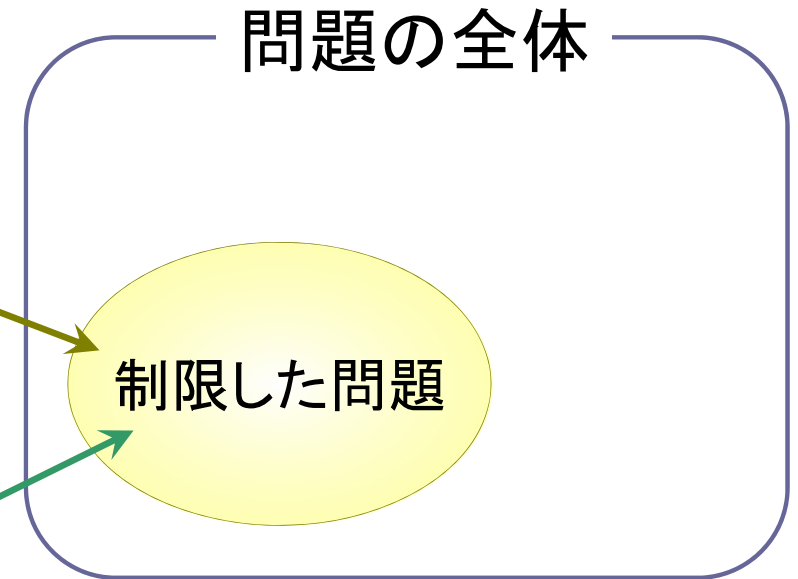


難しいなら易くすればいいのさ！

OR的問題解決のヒント
問題を**簡単**にする！

{ 問題の**一部だけ**を考える
条件を付加して易くする

ここだけで考えて上手いけば、
全体に広げられるかも！



全てのネットワーク上の最短路問題

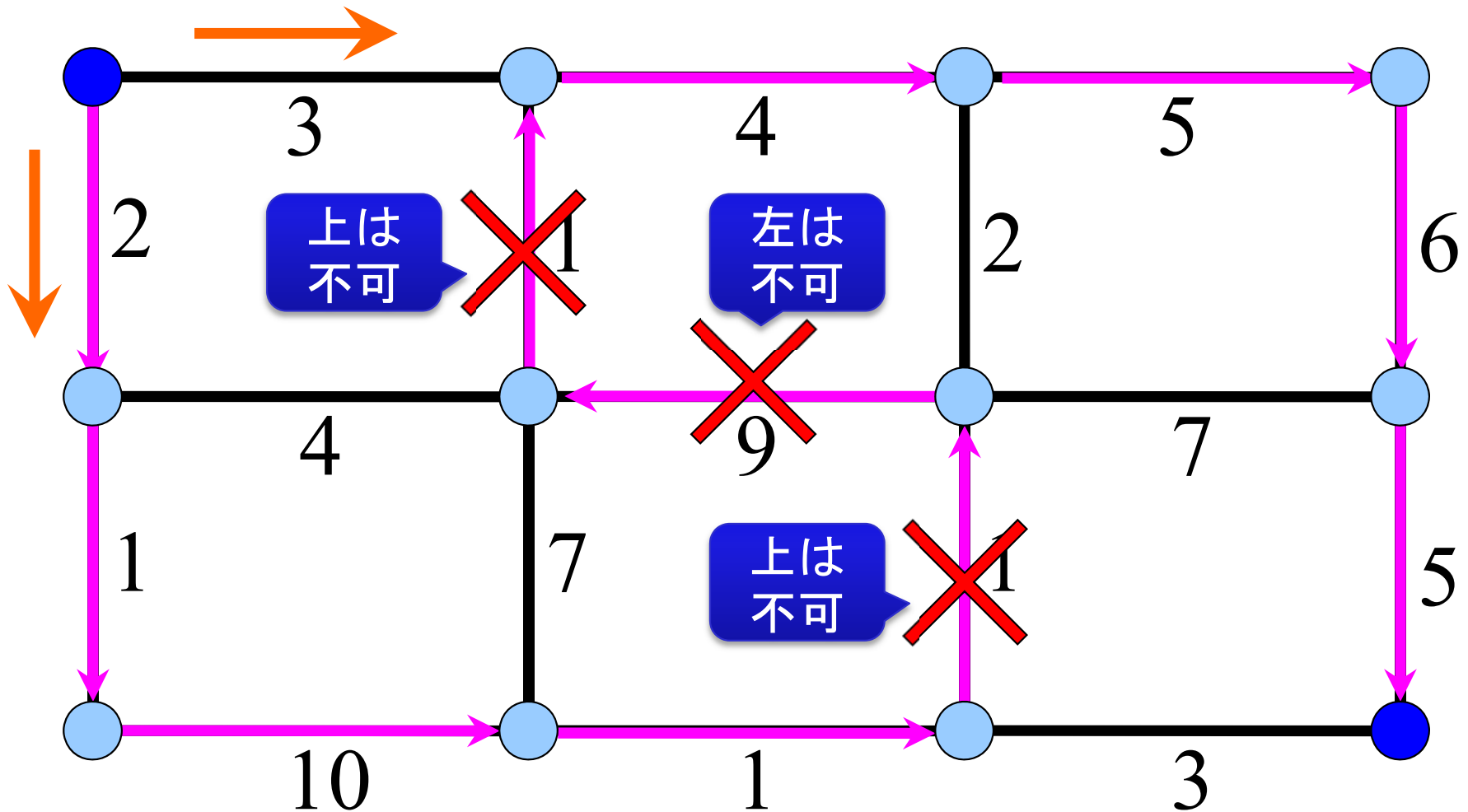
制限した問題

- 格子状のネットワーク
- 出発地：左上点，目的地：右下点
- 移動は**右・下**方向へのみ

難しいなら易しくすればいいのさ！

制限した問題

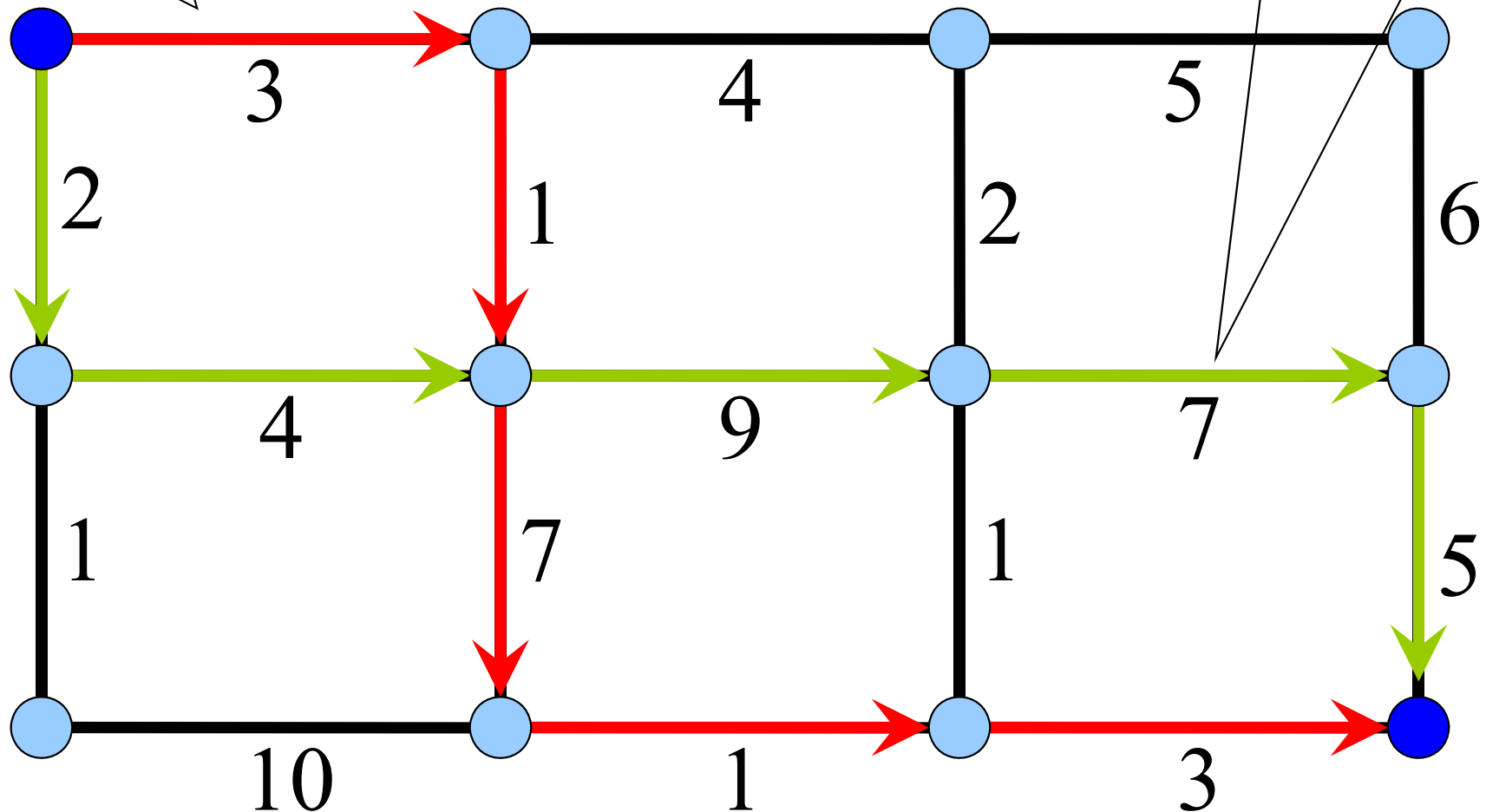
- 格子状のネットワーク
- 出発地: 左上点, 目的地: 右下点
- 移動は **右・下** 方向へのみ



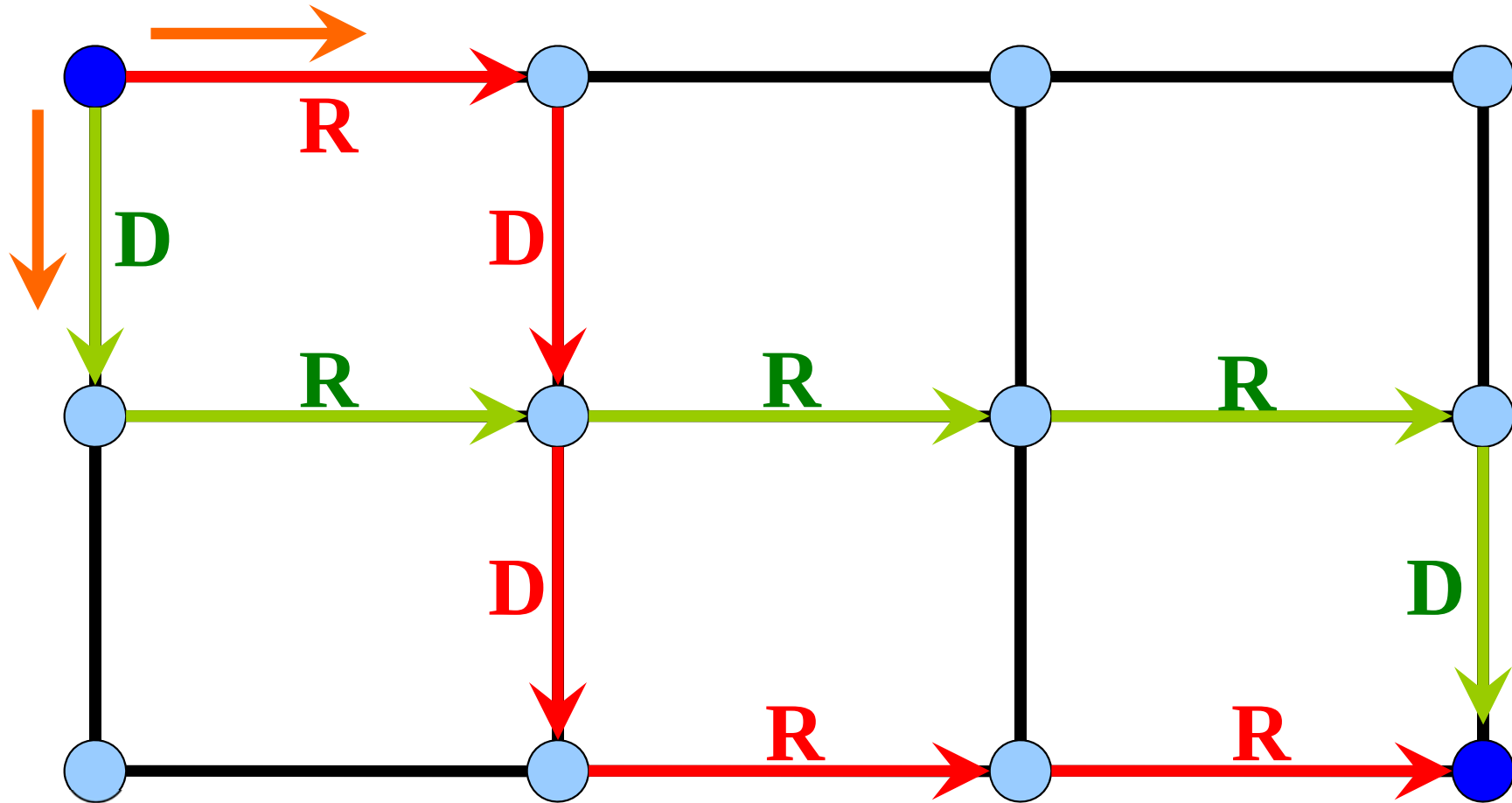
難しいなら易くすればいいのさ！

$$3+1+7+1+3 = \mathbf{15}$$

$$2+4+9+7+5 = \mathbf{27}$$



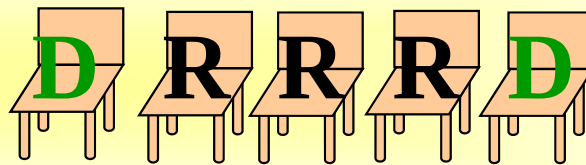
さて、経路は全部で幾つあるのか？



Point: どんな経路も、順番を無視すれば、R=3回、D=2回使う

緑の経路 = DRRRD

赤の経路 = RDDRR



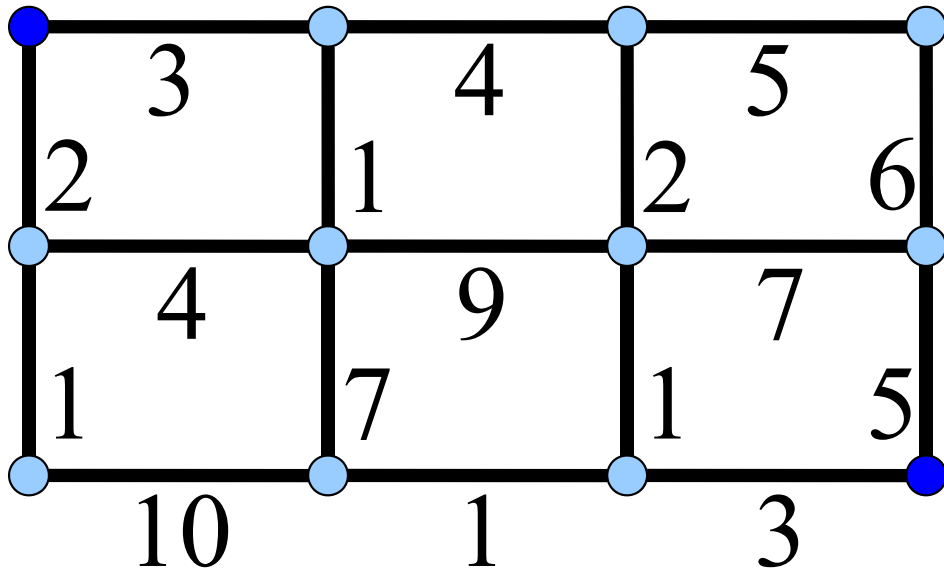
$$= \frac{(R+D)!}{R!D!} \text{通り}$$

i.e., (R+D)の椅子へのDの座らせ方を決めれば良い $\rightarrow {}^{R+D}C_D$

例では ${}_{3+2}C_2 = 10$ 通り

演習：やってみよう！全列挙

- **Q**: スタート(左上)からゴール(右下)へと至る最短経路を求めなさい。そしてそれが最短だと示しなさい



- **A**: 全列挙したよ ①～⑩

の10通り計算し⑧が最短だ！

① **DDRRR**: $2+1+10+1+3=17$

② **DRDRR**: $2+4+7+1+3=17$

③ **DRRDR**: $2+4+9+1+3=19$

④ **DRRRD**: $2+4+9+7+5=27$

⑤ **RDDRR**: $3+1+7+1+3=15$

⑥ **RDRDR**: $3+1+9+1+3=17$

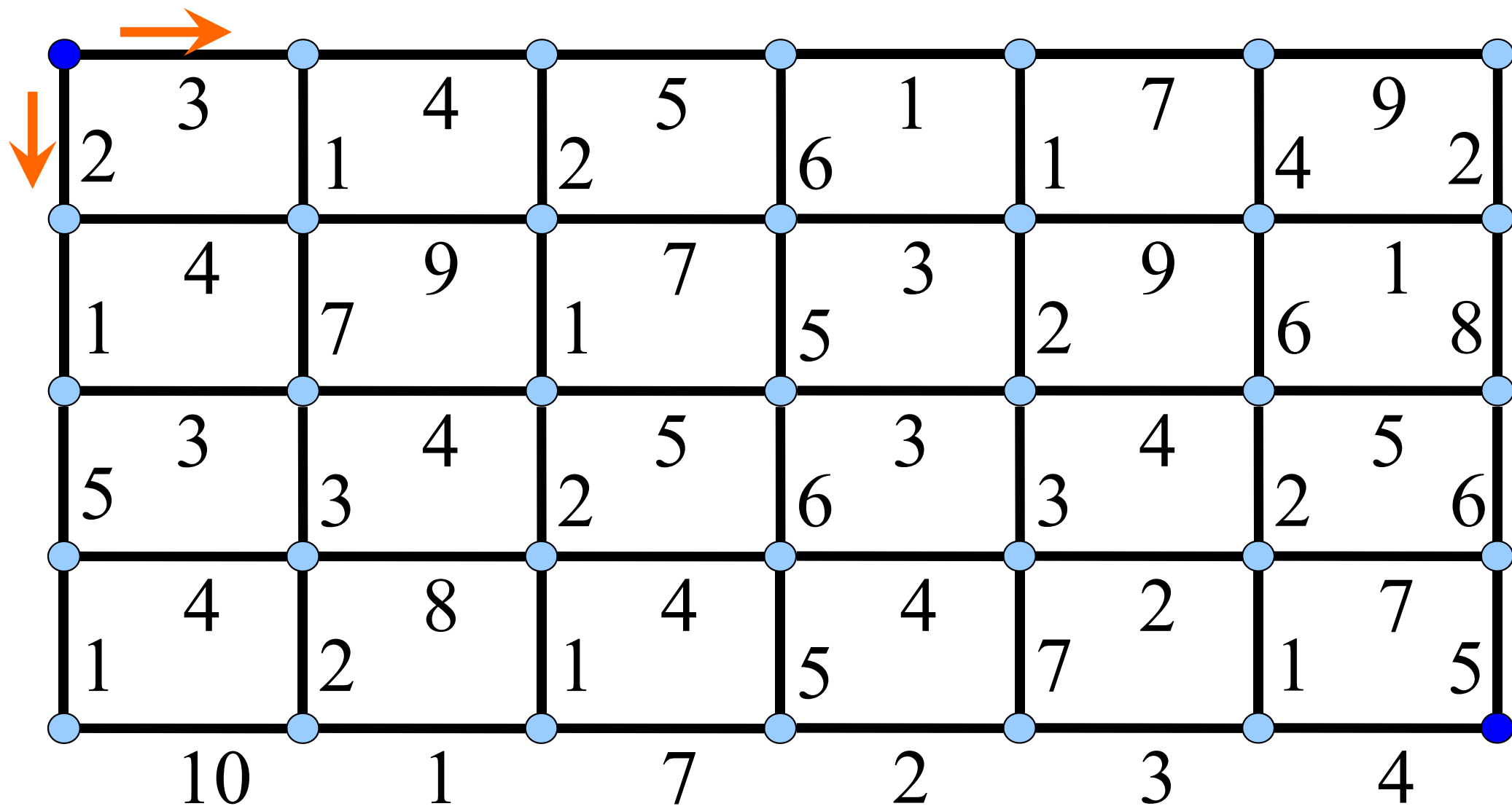
⑦ **RDRRD**: $3+1+9+7+5=25$

⑧ **RRDDR**: $3+4+2+1+3=13$

⑨ **RRDRD**: $3+4+2+7+5=21$

⑩ **RRRRD**: $3+4+5+6+5=23$

経路は全部で幾つ？

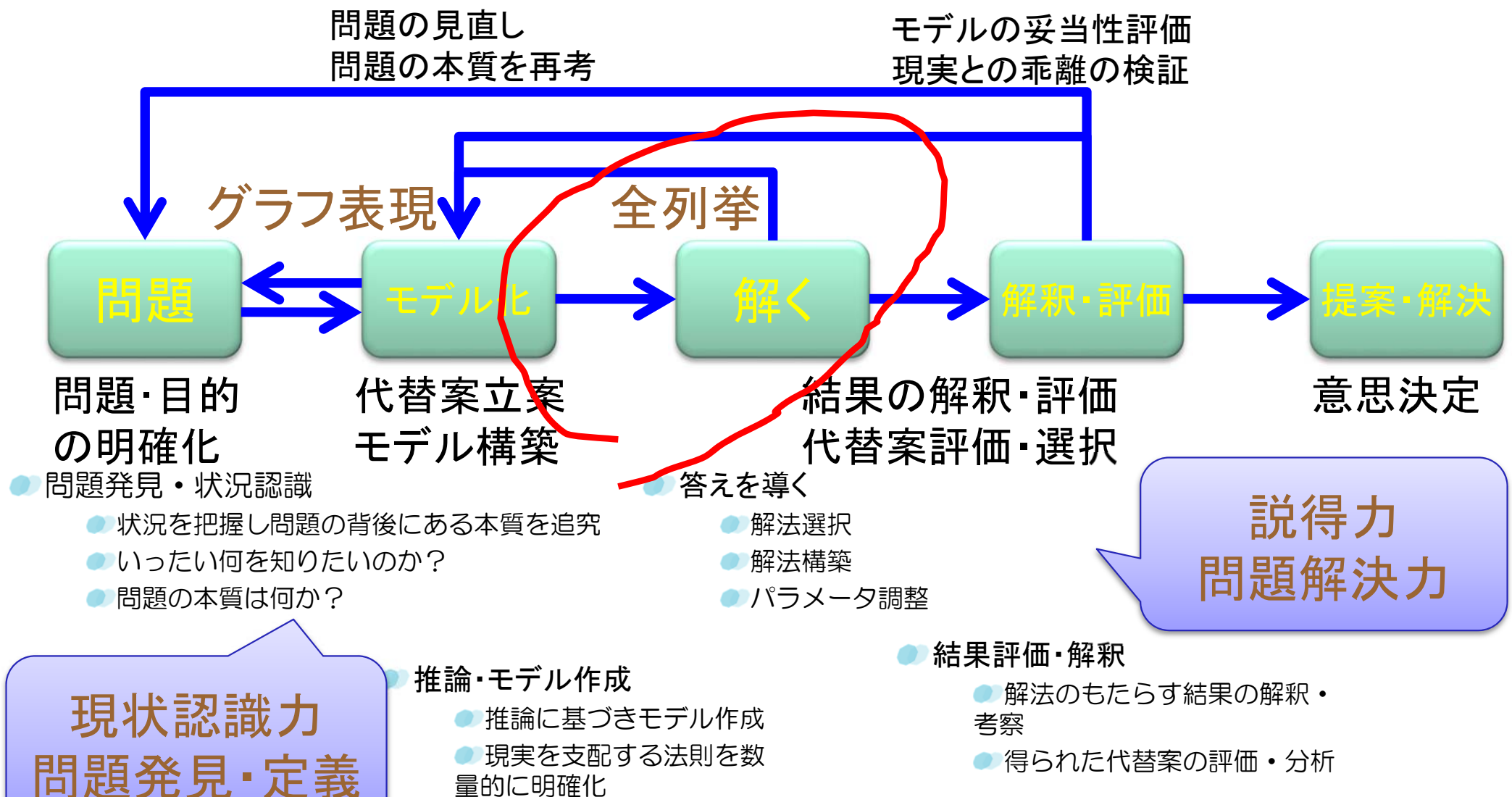


R=6, D=4なので, ${}_{6+4}C_4 = \frac{10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7}{4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1} = 210$ 通り

意思決定

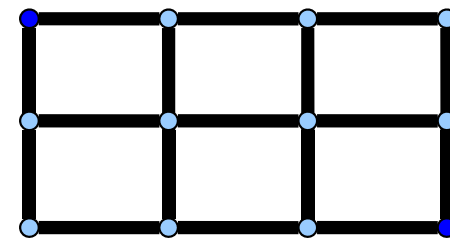
論理的思考力
データ分析, 統計学
数理的アプローチ

- 「問題の把握」から「意思決定」までの流れ



経路は全部で幾つ？【全列举】

R(横)	D(縦)	全経路
3	2	10
6	4	210
10	5	3,003
20	10	30,045,015
50	50	1.0×10^{29}
100	100	9.1×10^{58}
500	500	2.7×10^{299}
1000	1000	#NUM!



【格子道路の街】
cf.京都市,札幌市
R, D幾つぐらい？

経路は全部で幾つ？【全列举】

経路がとてもたくさんあるとは言っても、今のコンピュータは
かなりの速さで計算できるんでしょ？ だから大丈夫だよな！

- 代表的なCPU, Game機, super computer の浮動小数点演算回数
 - Intel Core i7(3.2GHz) : **51.2GFLOPS** ...1秒間に約**512億**回
 - PS3 : **218GFLOPS** ...1秒間に約**2180億**回
 - PS4 : **1.84TFLOPS** ...1秒間に約**1兆8400億**回
 - 京 : **10.51PFLOPS** ...1秒間に約**1京510兆**回

(※2011年6月, 11月 **世界最速** ! by Top500.org)
(※2012年6月=2位, 11月=3位, 2013年6月=4位, 11月=4位)
- ※FLOPS = *F*Lloating-point *O*perations *P*er *S*econd
- [Wikipedia「FLOPS」より]
2013/5/1の情報

1つの経路を見つけ、その総コストを計算するの
に、たどる経路枝数の浮動小数点演算でできると仮定しよう

例えば、R=10, D=5の経路なら、10+5回の演算で計算可と仮定すること

K(キロ) $\simeq \times 10^3$ = 千倍
M(メガ) $\simeq \times 10^6$ = 百万倍
G(ギガ) $\simeq \times 10^9$ = 10億倍
T(テラ) $\simeq \times 10^{12}$ = 1兆倍
P(ペタ) $\simeq \times 10^{15}$ = 千兆倍
E(エクサ) $\simeq \times 10^{18}$ = 百京倍

経路は全部で幾つ？【全列举】

1.84TFLOPS

10.51PFLOPS

R(横) D(縦)	全経路	PS4	京
3 2	10	0.0000000000 秒	0.0000000000 秒
6 4	210	0.0000000001 秒	0.0000000000 秒
10 5	3,003	0.0000000024 秒	0.0000000000 秒
20 10	30,045,015	0.000489864 秒	0.0000000086 秒
25 25	1.3×10^{14}	57 分	0.601382523 秒
30 30	1.2×10^{17}	45 日	11 分
40 40	1.1×10^{23}	148,219 年	26 年
50 50	1.0×10^{29}	1.7×10^{11} 年	30,439,996 年
100 100	9.1×10^{58}	2.3×10^{31} 宙齡	4.0×10^{27} 宙齡
500 500	2.7×10^{299}	3.4×10^{272} 宙齡	5.9×10^{268} 宙齡

圧倒的な計算力をもつコンピュータですら、**全列举(しらみつぶし)**では答えを求めることが出来ない！

1宙齡＝138億年



参考：大きい数を表す接頭辞

- 万(まん) $\times 10^4$
- 億(おく) $\times 10^8$
- 兆(ちょう) $\times 10^{12}$
- 京(けい) $\times 10^{16}$
- 垓(がい) $\times 10^{20}$
- 杼(じょ) $\times 10^{24}$
- 穰(じょう) $\times 10^{28}$
- 溝(こう) $\times 10^{32}$
- 澗(かん) $\times 10^{36}$
- 正(せい) $\times 10^{40}$
- 載(さい) $\times 10^{44}$
- 極(ごく) $\times 10^{48}$
- 恒河沙(ごうがしゃ) $\times 10^{52}$
- 阿僧祇(あそうぎ) $\times 10^{56}$
- 那由他(なゆた) $\times 10^{60}$
- 不可思議(ふかしぎ) $\times 10^{64}$
- 無量大数(むりょうたいすう) $\times 10^{68}$

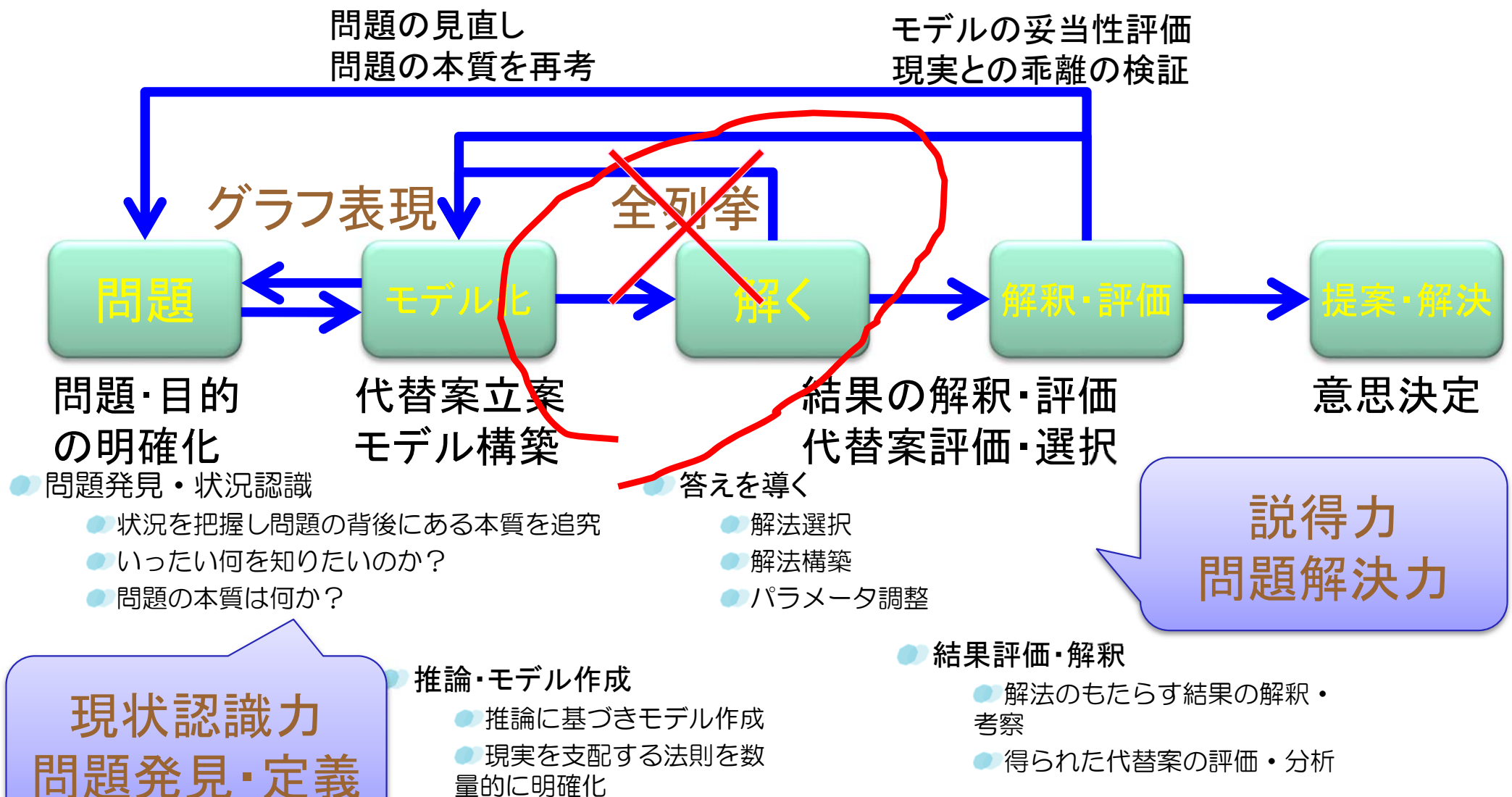
【注】「杼」は正しくは「のぎへん」(らしい)

【注】「無量大数」は「無限大 ∞ 」とは違う

意思決定

論理的思考力
データ分析, 統計学
数理的アプローチ

- 「問題の把握」から「意思決定」までの流れ



ではどうする？

- 素朴で素直な方法〔列挙法〕
 - 全経路をしらみつぶしに調べて、最も短い経路を見つける方法

時間が
掛かり過
ぎる！



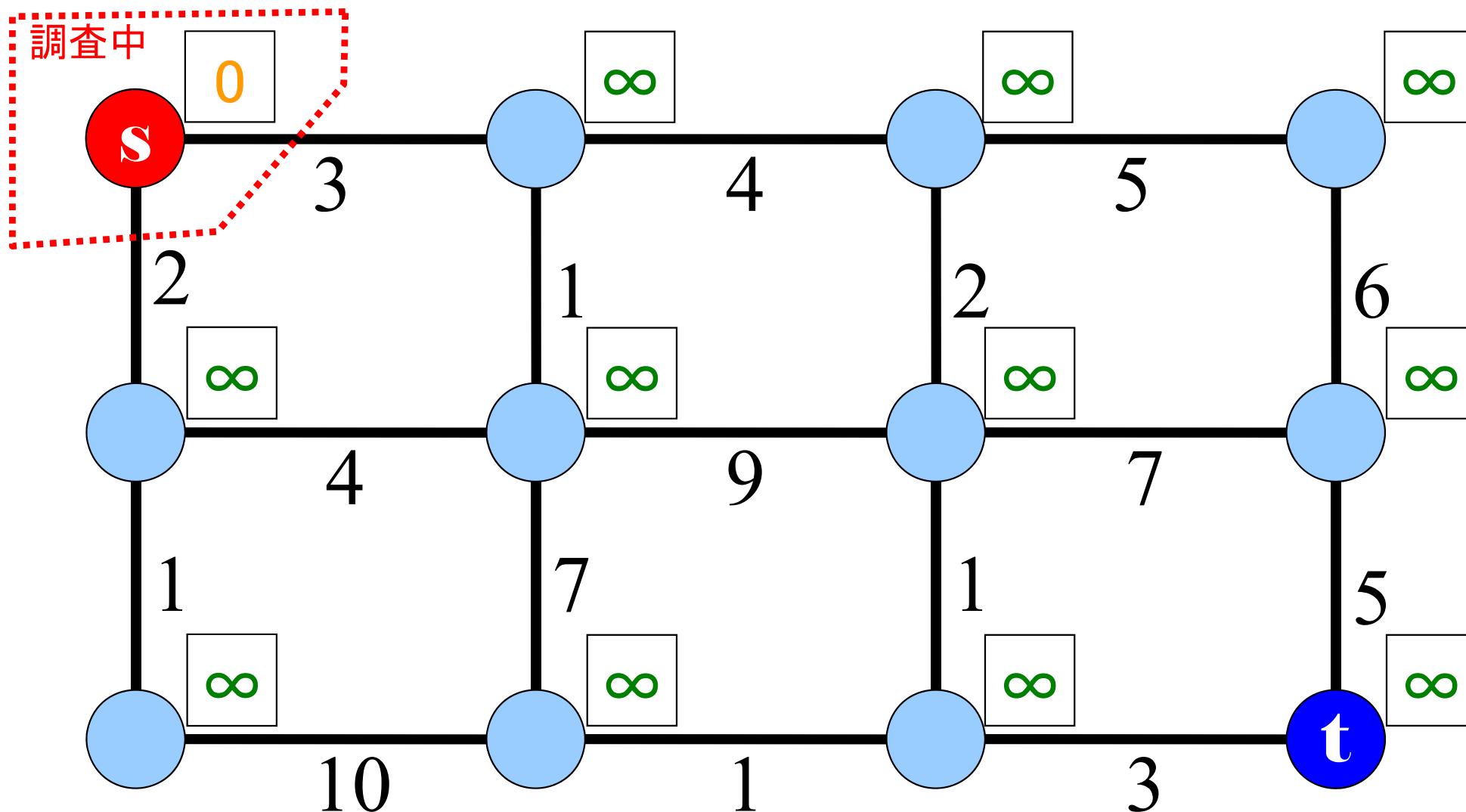
全経路をしらみつぶしに調べずに、
最も短い経路を、現実的時間で
見つける方法があるか？

Dijkstra法
(ダイクストラ法)

人間の創造
的な仕事！

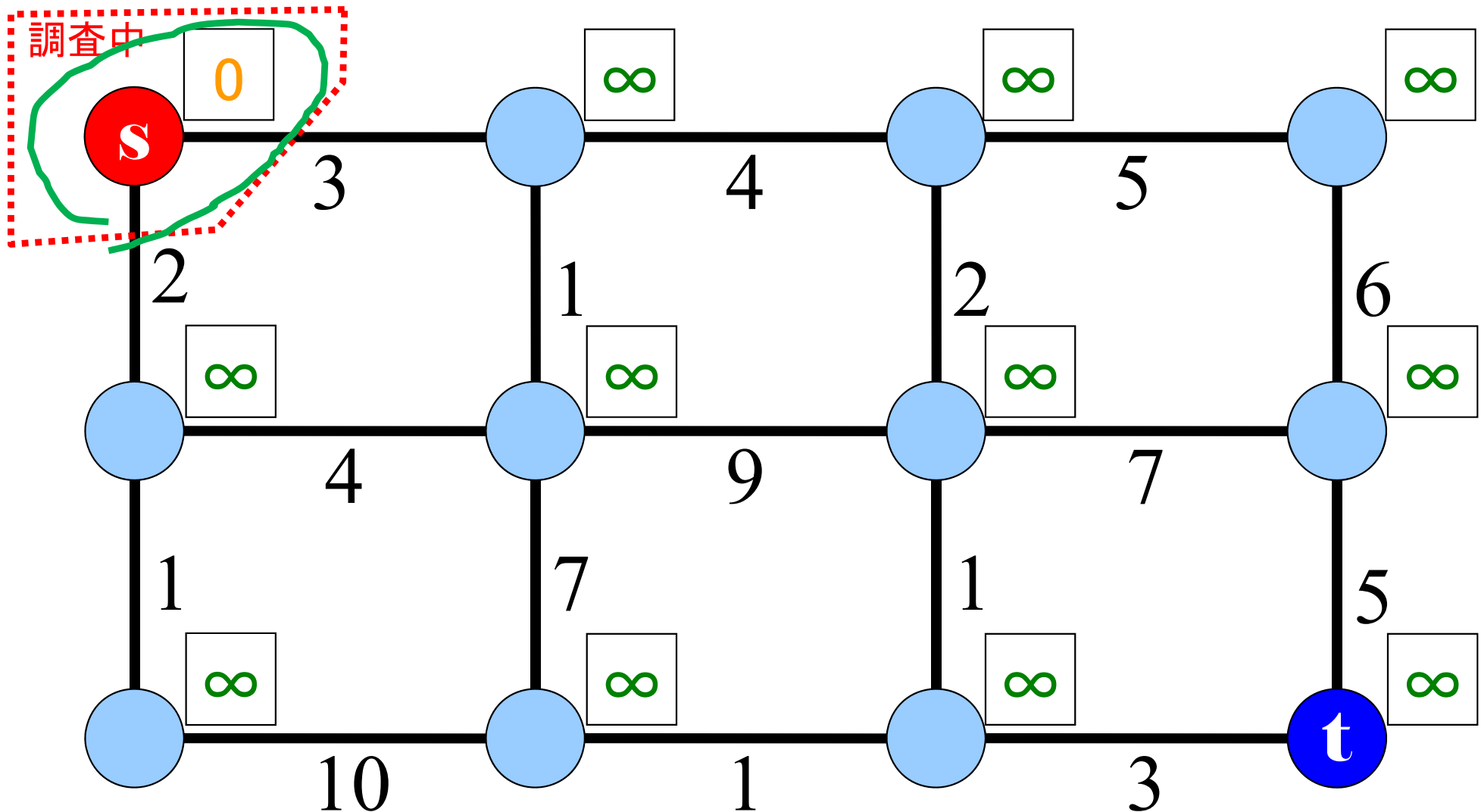
Dijkstra法 (初期設定)

step0: start点のラベルを0にし, その他のラベルを ∞ に設定する
start点 (●s) を 調査中 の点集合とする



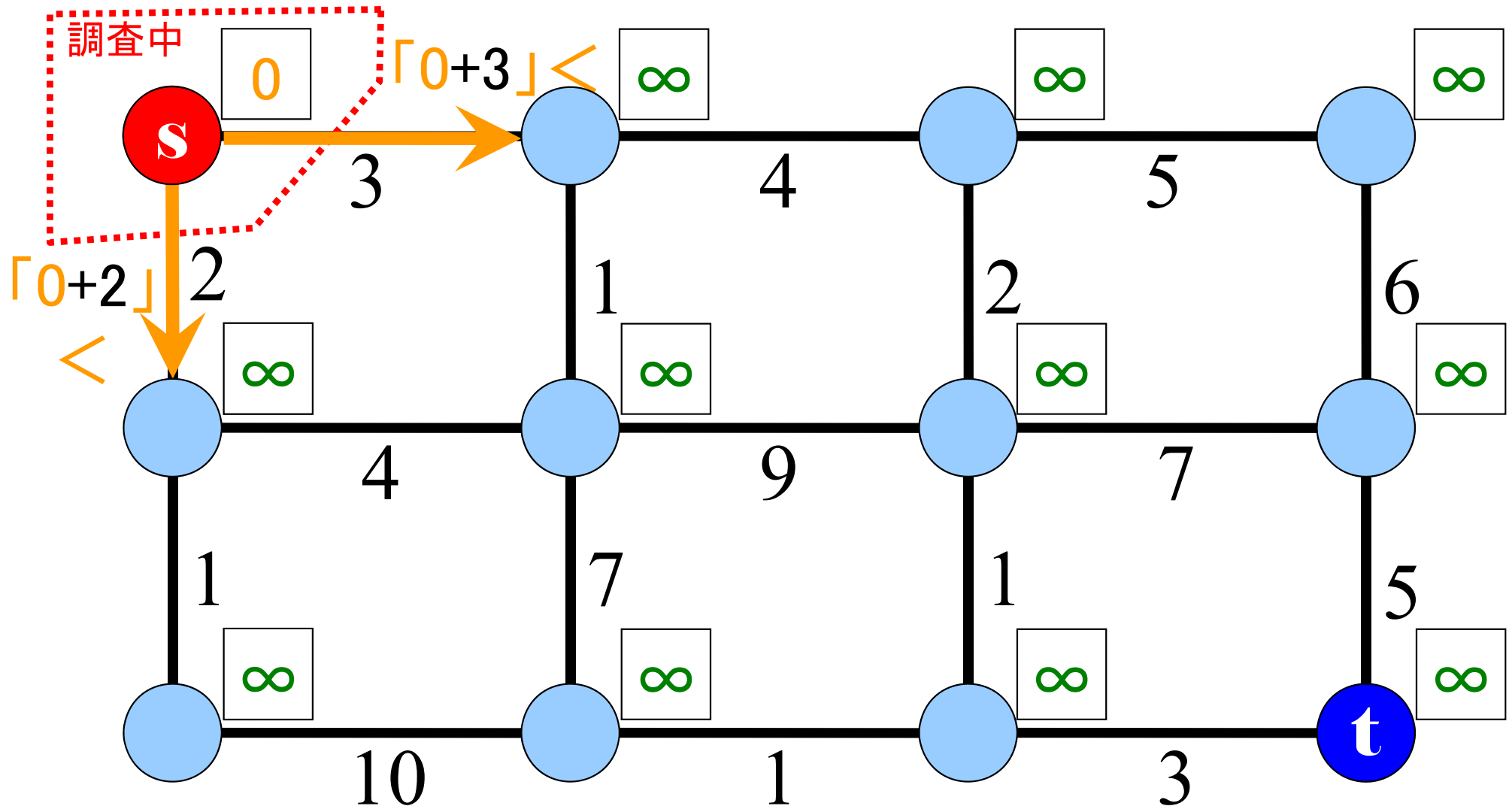
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうちで、ラベル値が最小の点を見つける



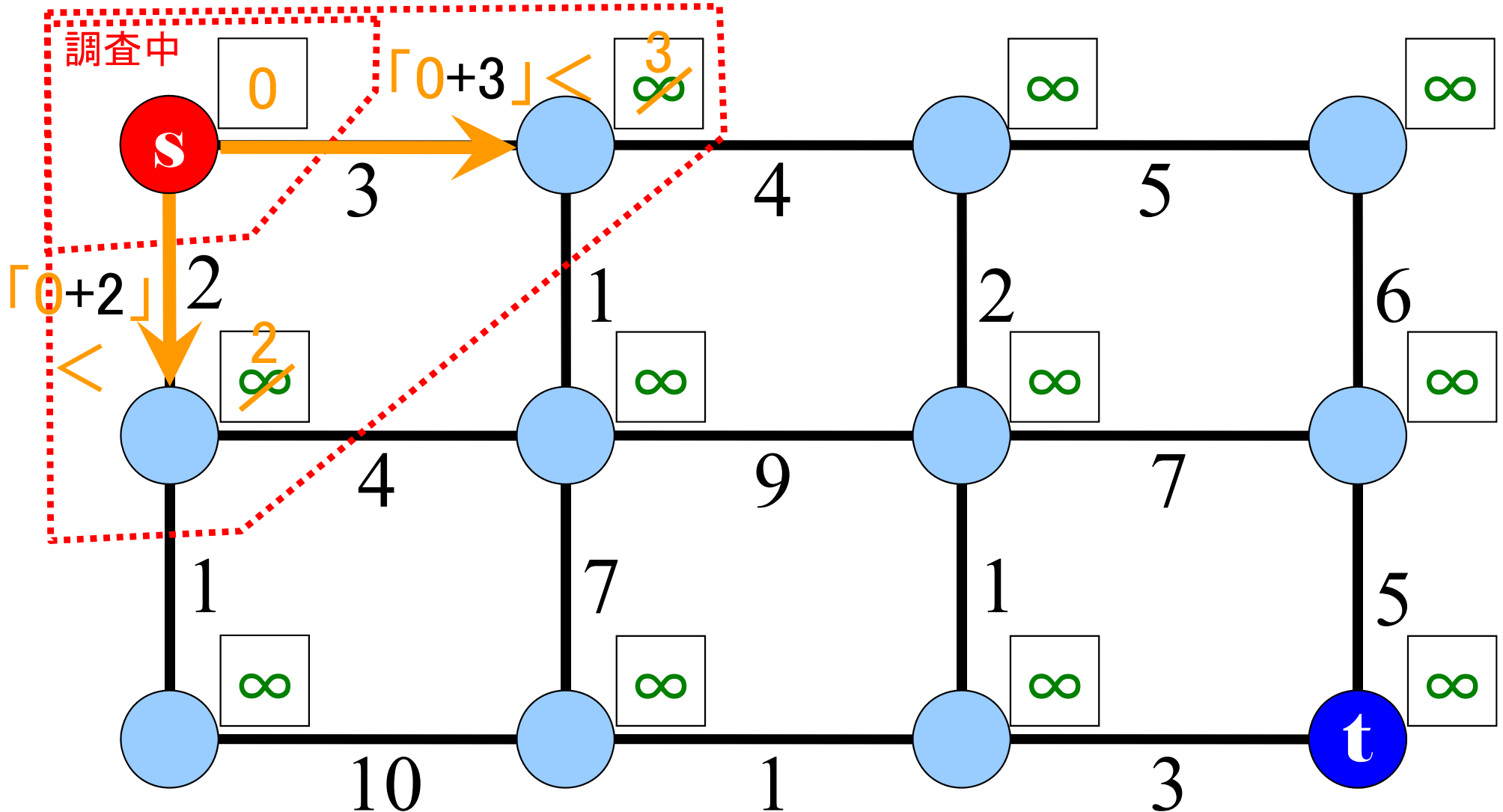
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

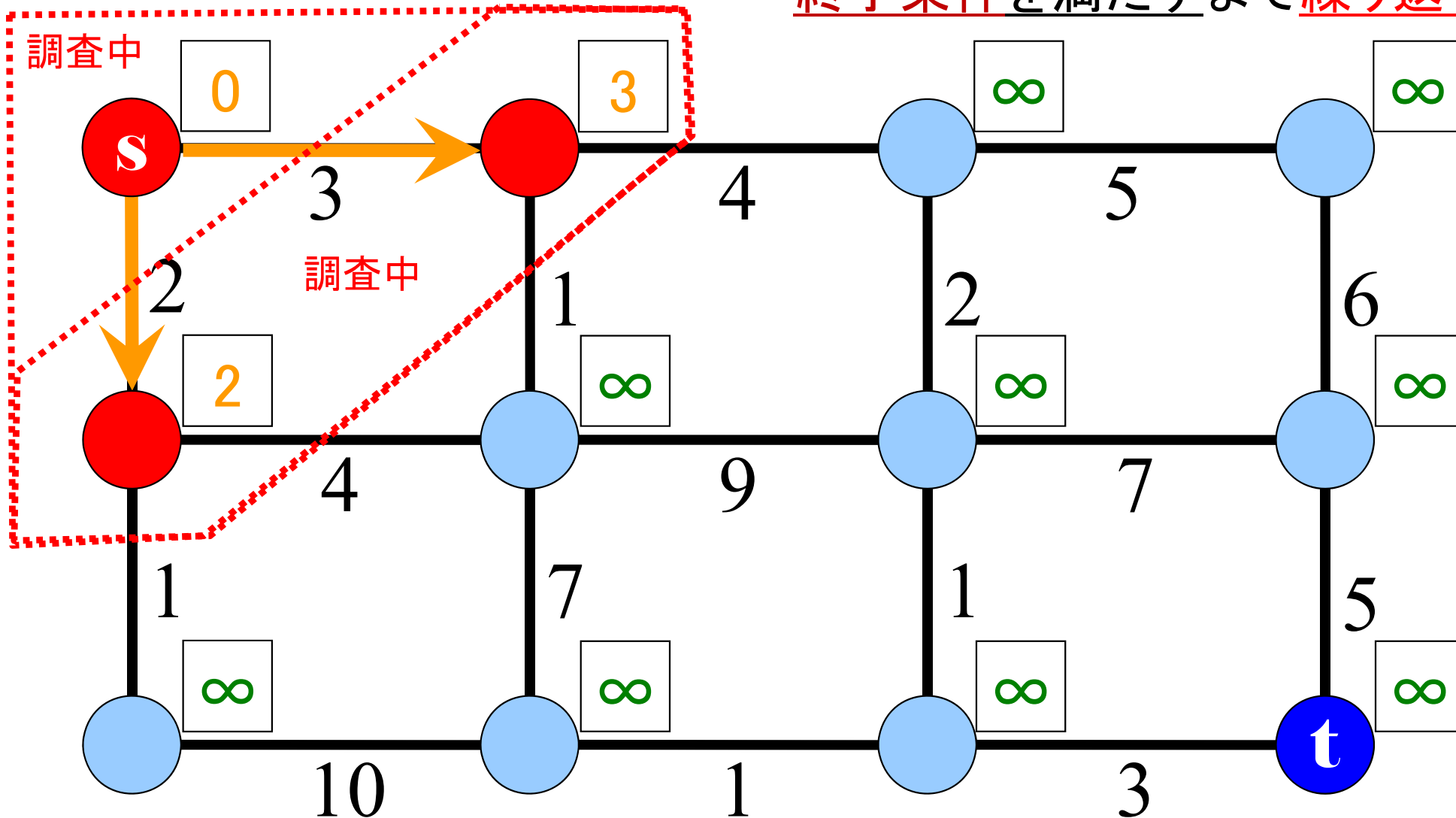
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法

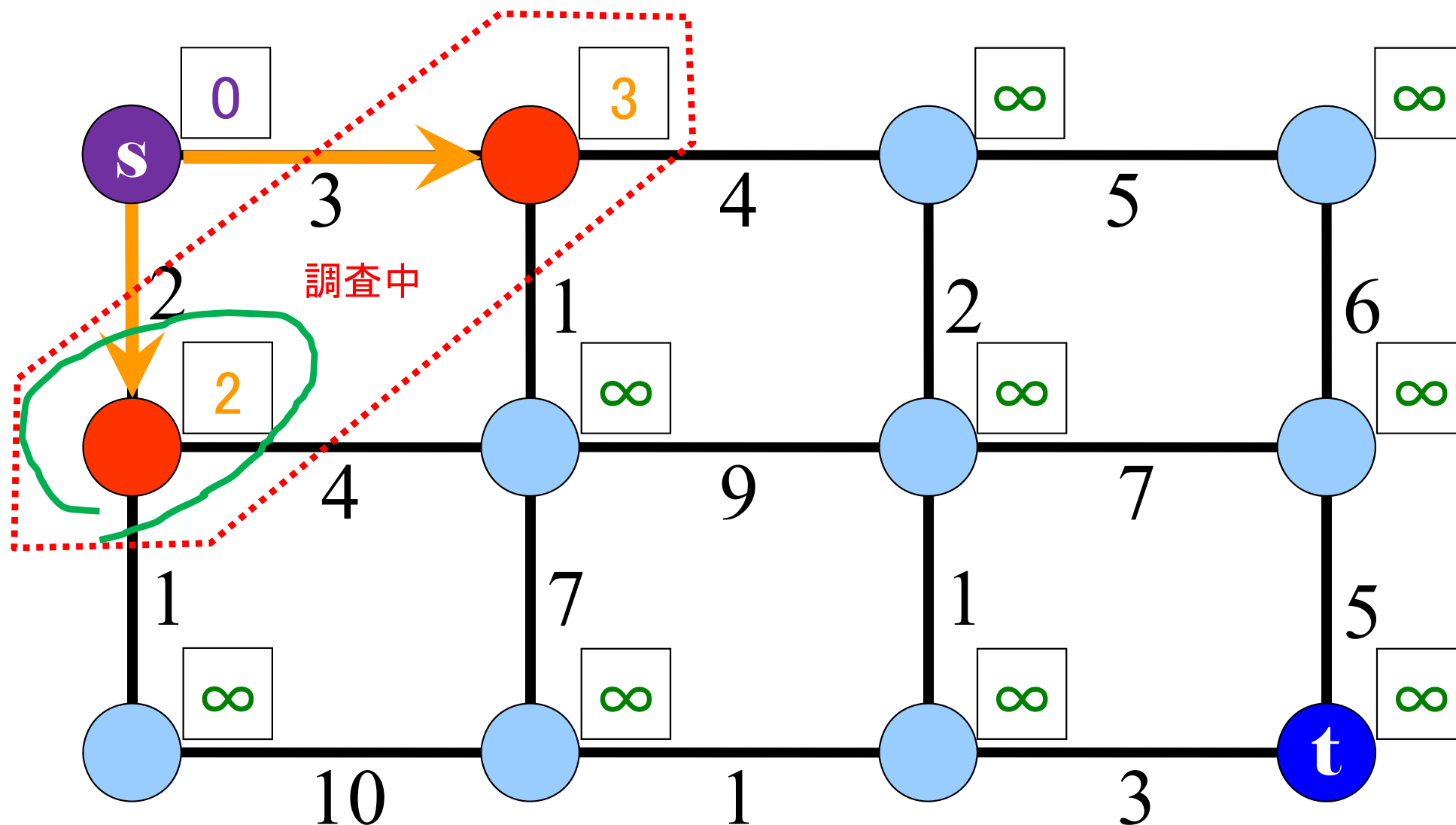
step1-3: 全枝終了したら、調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1～step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



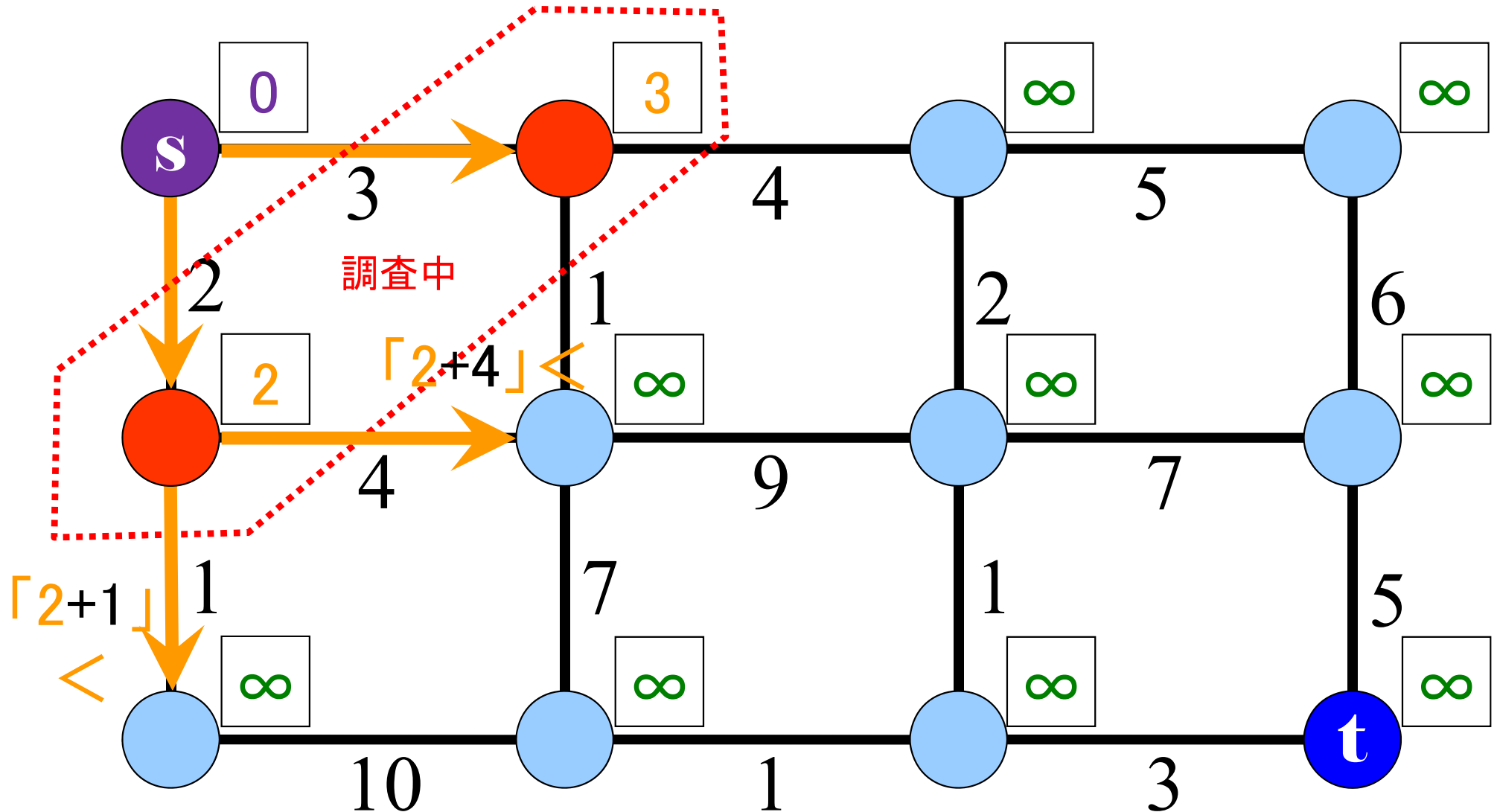
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうちで、ラベル値が最小の点を見つける



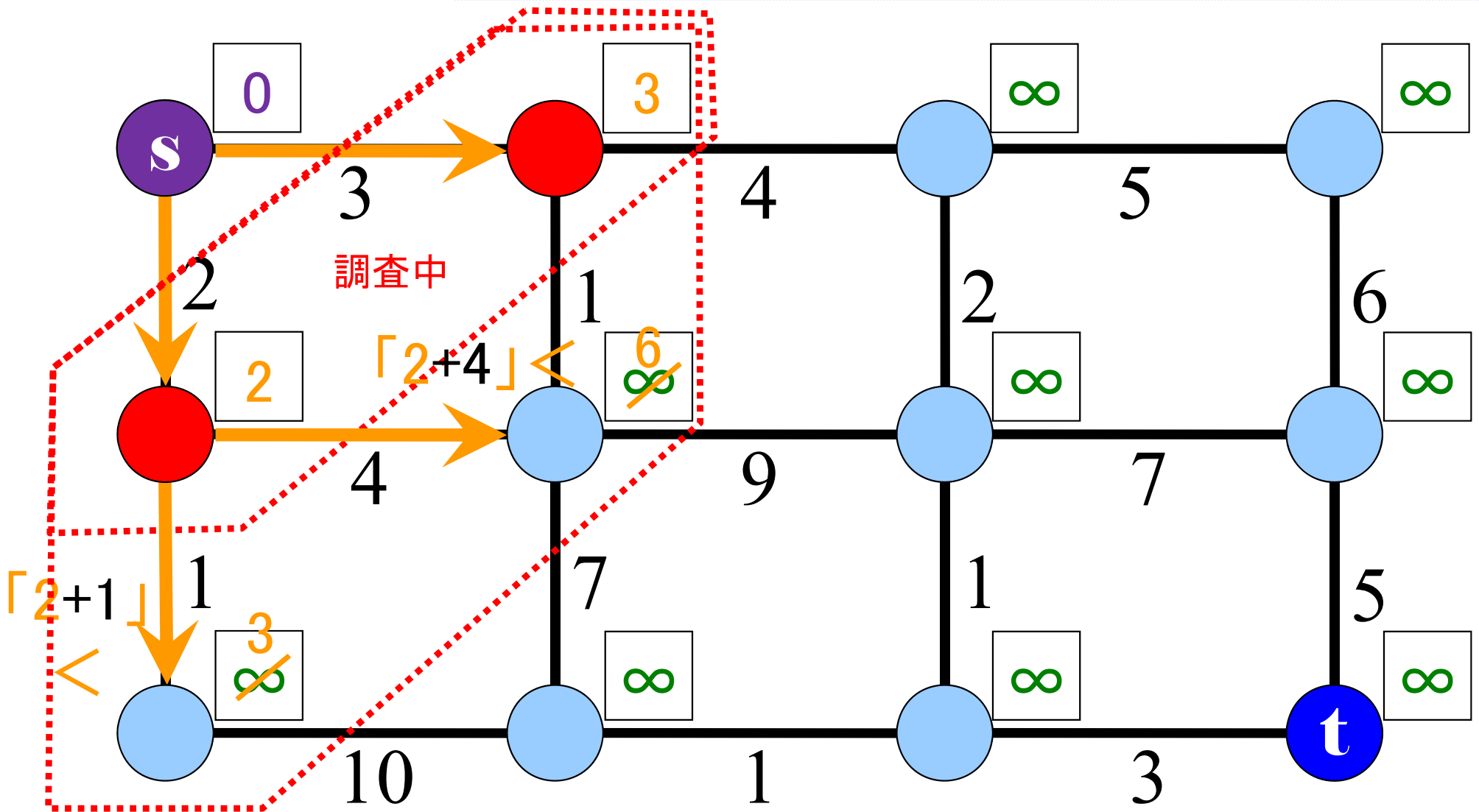
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

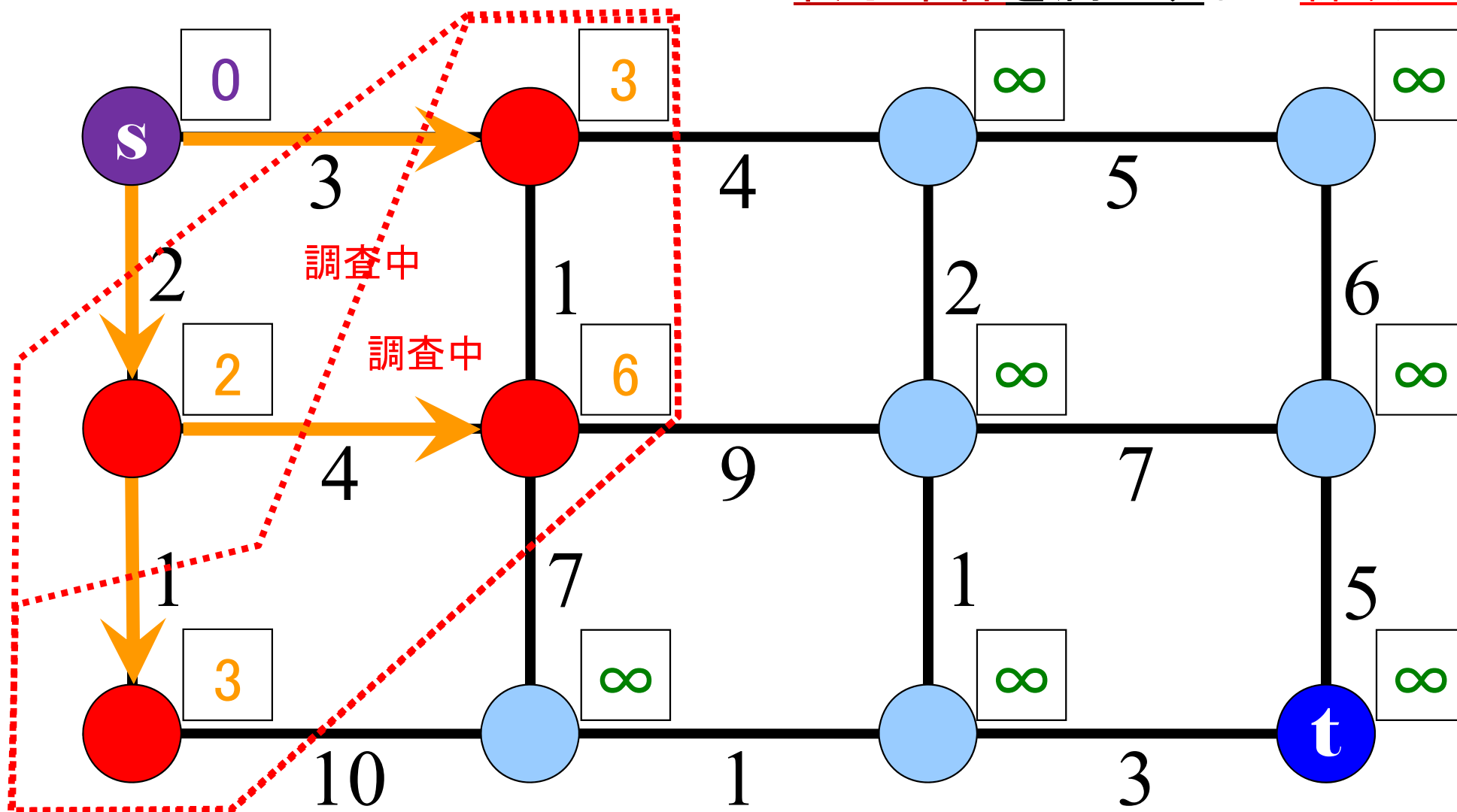
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

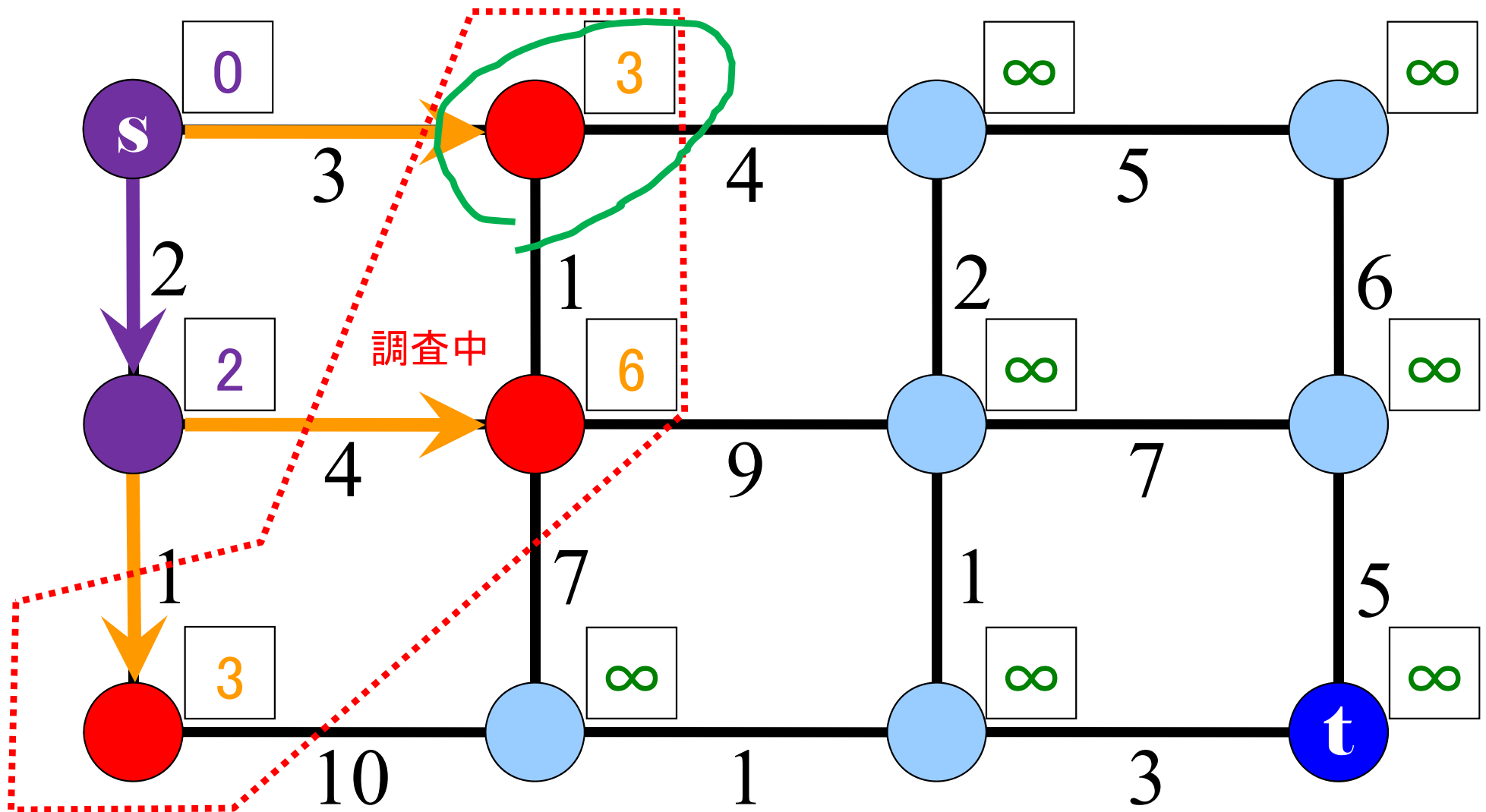
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



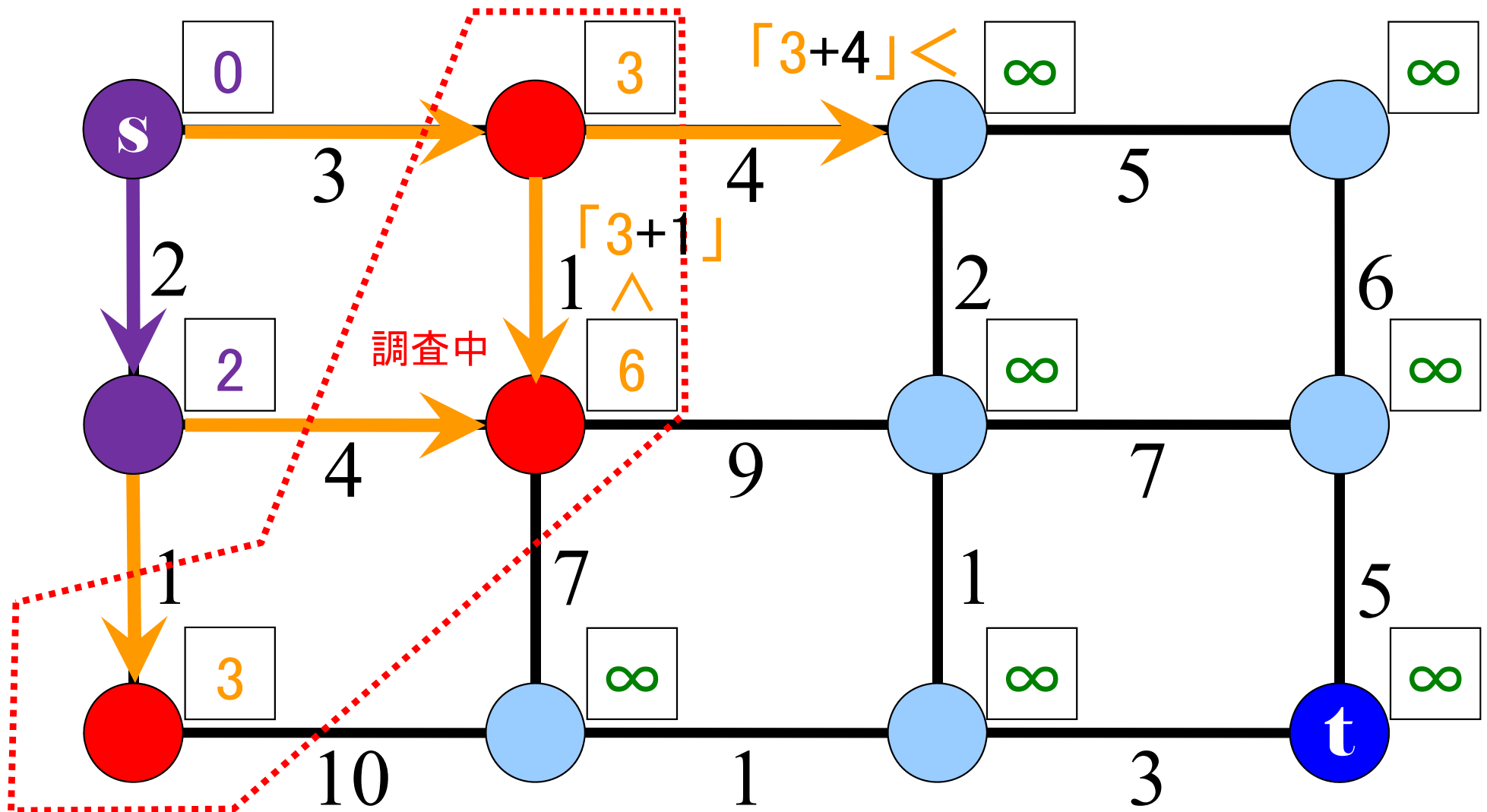
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で、ラベル値が最小の点を見つける



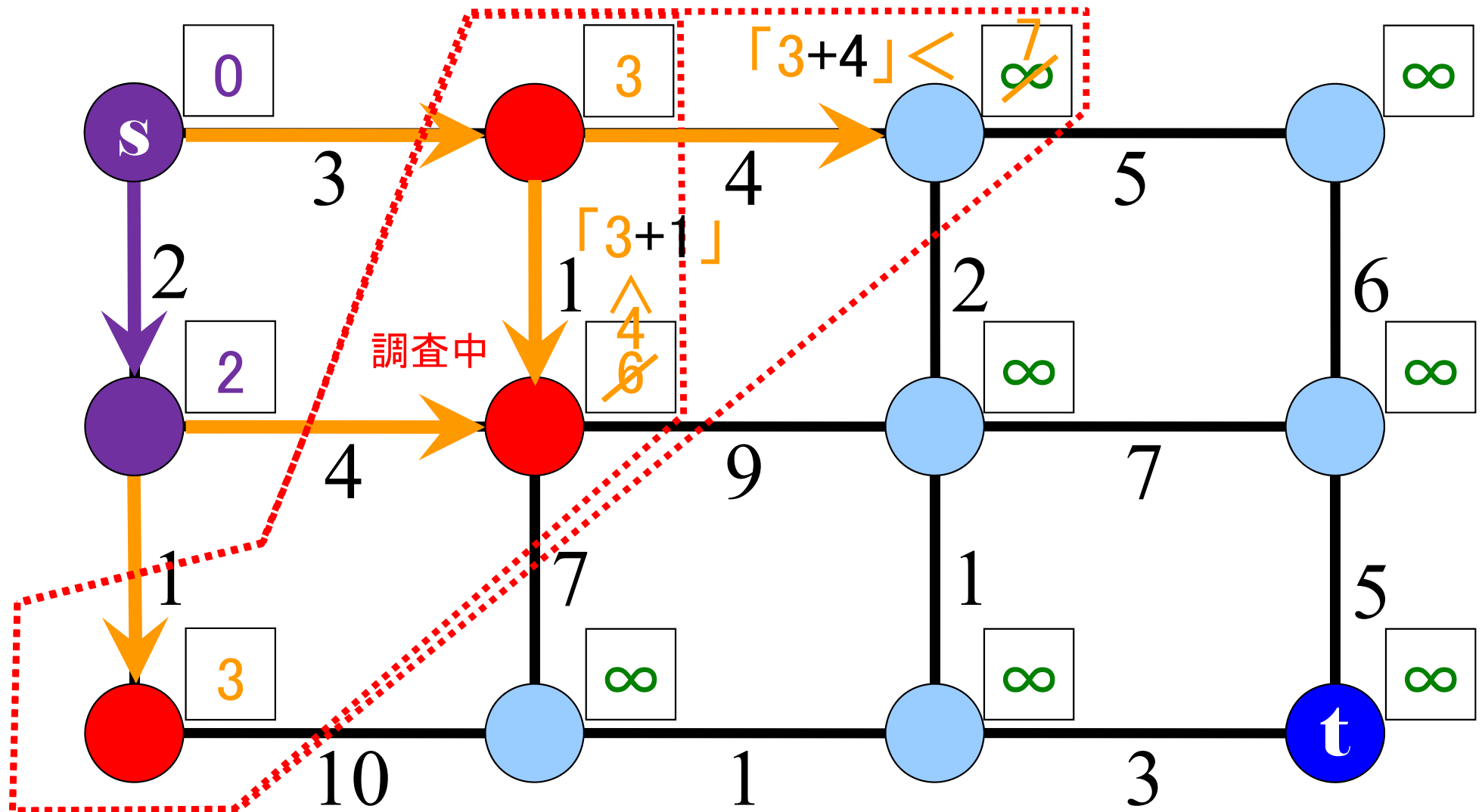
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい($<$)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

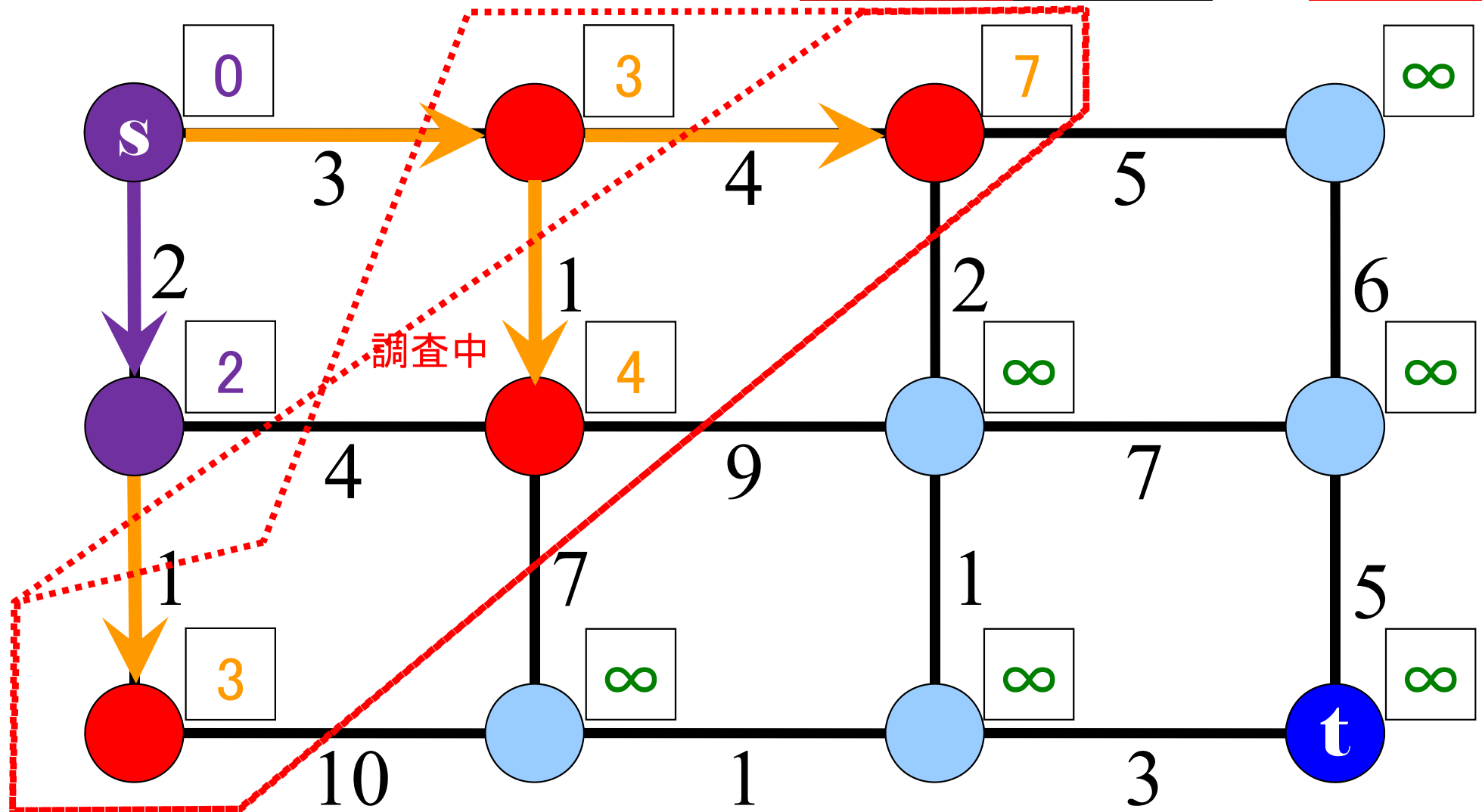
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい($<$)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

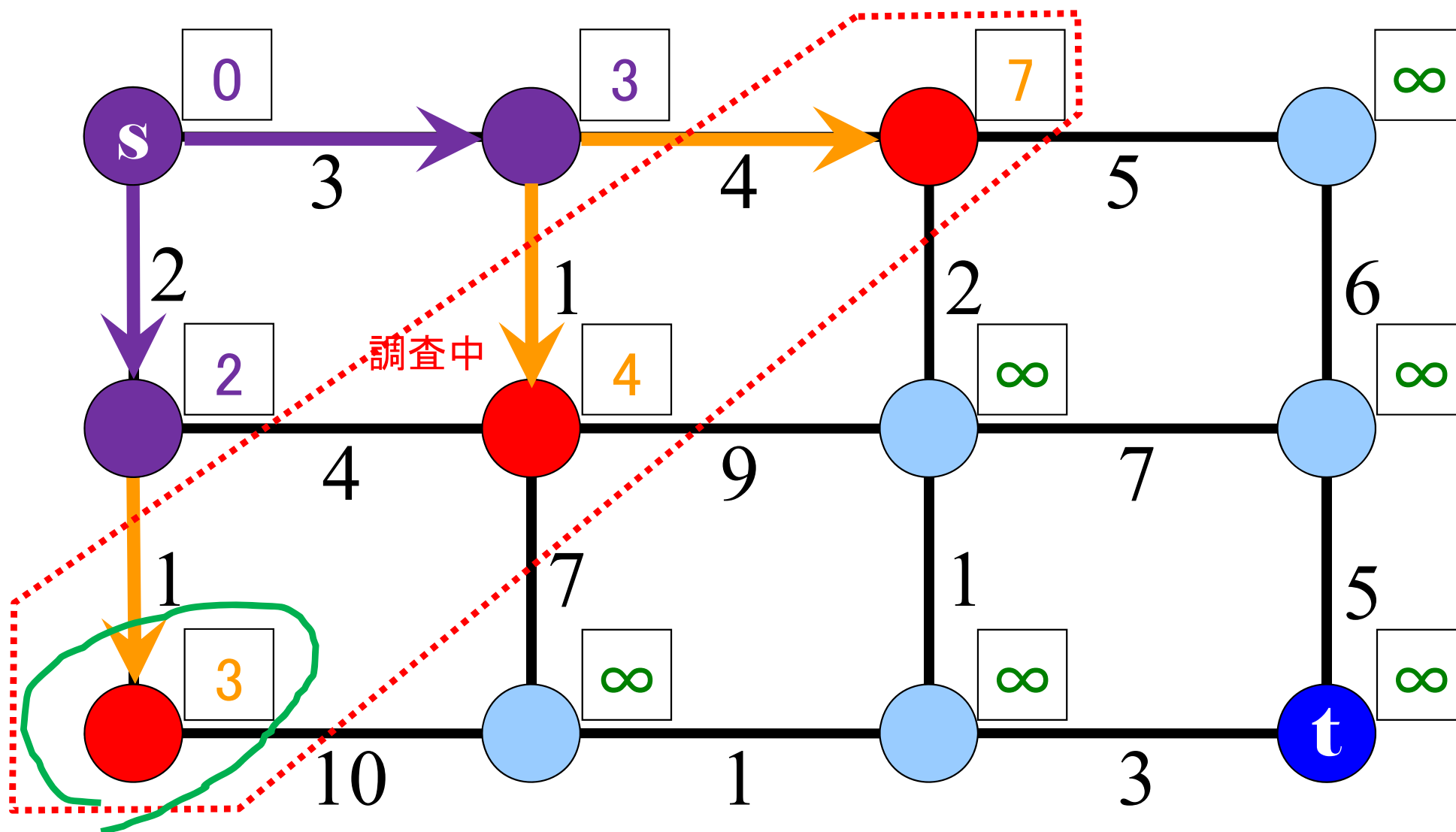
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



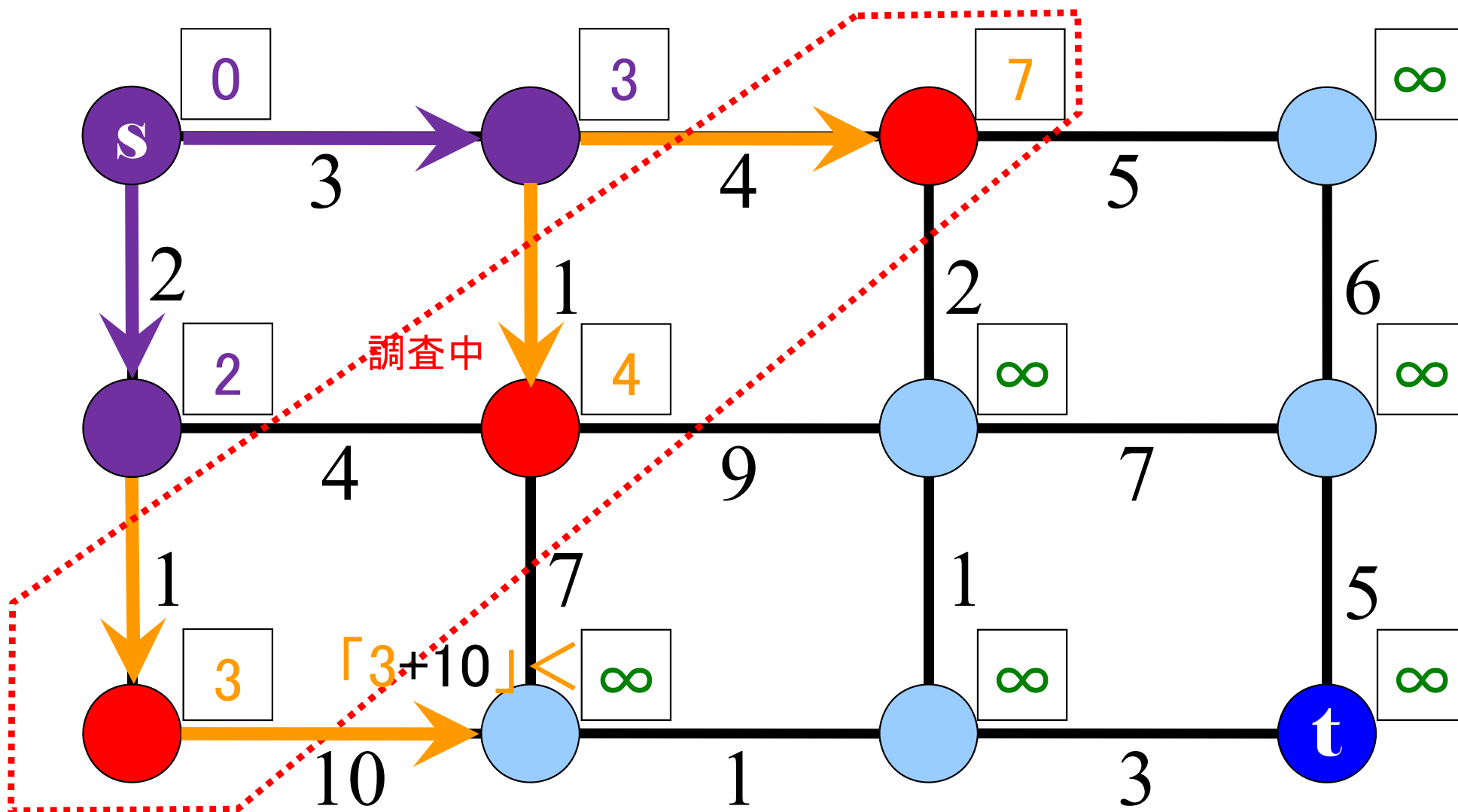
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうちで、ラベル値が最小の点を見つける



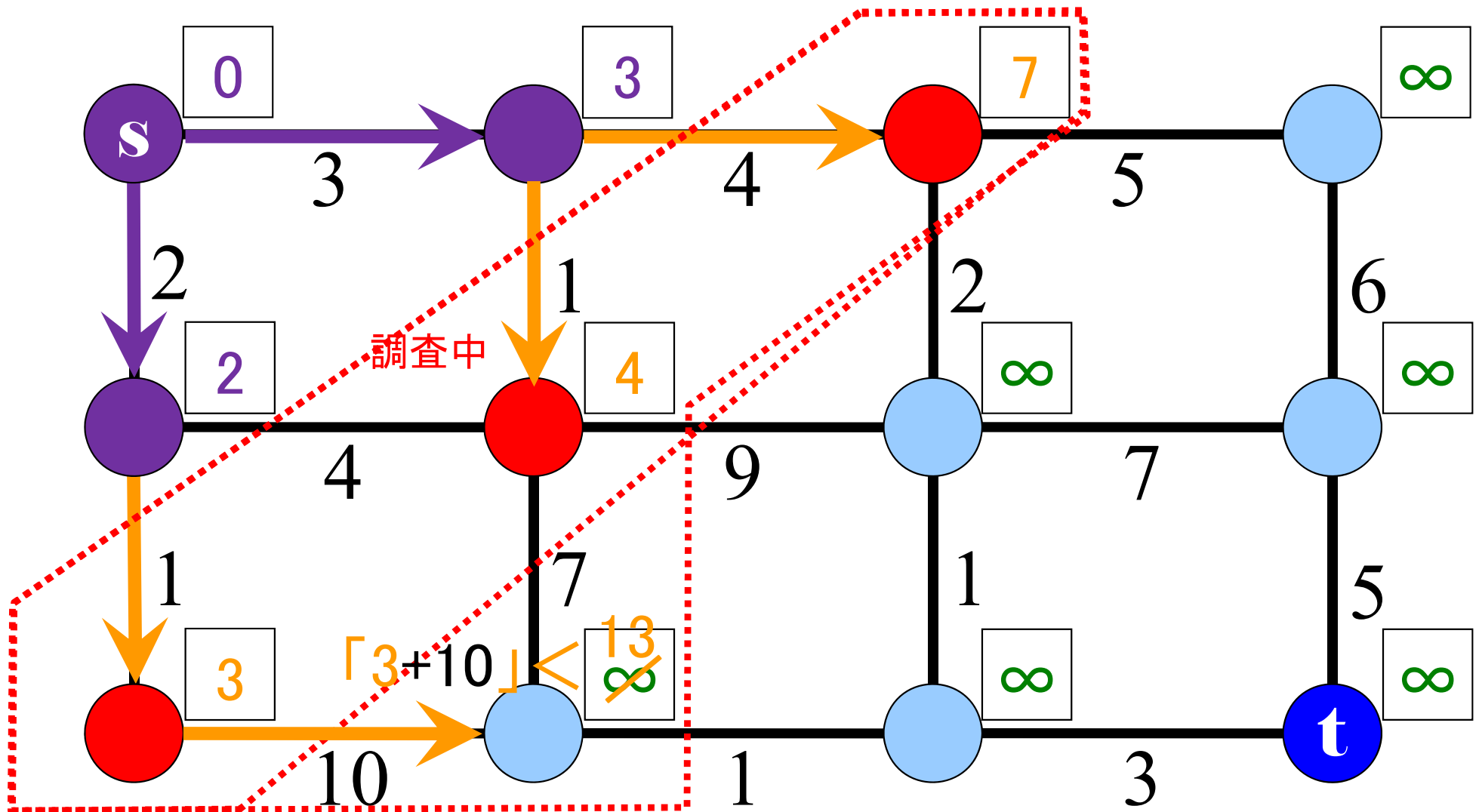
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

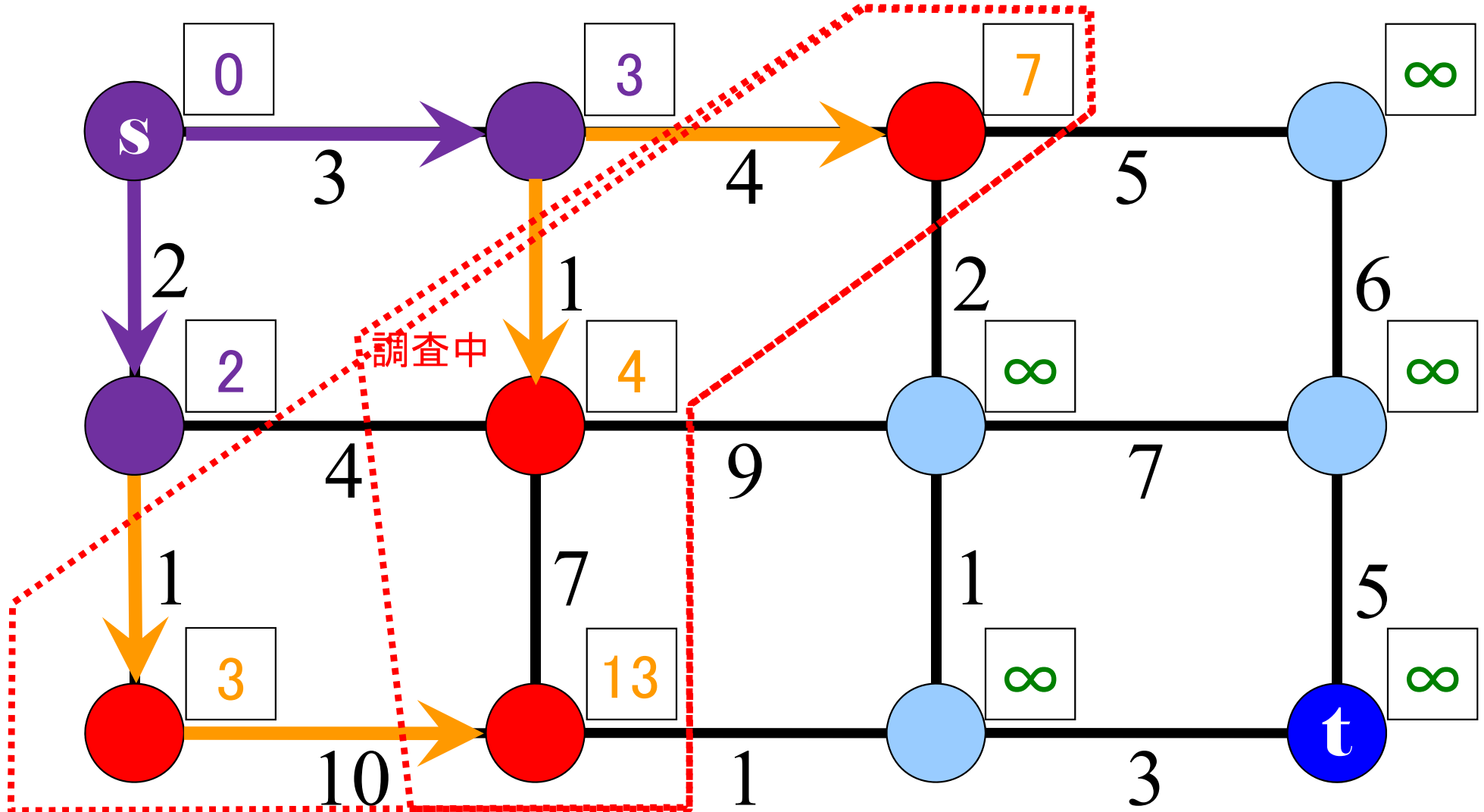
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

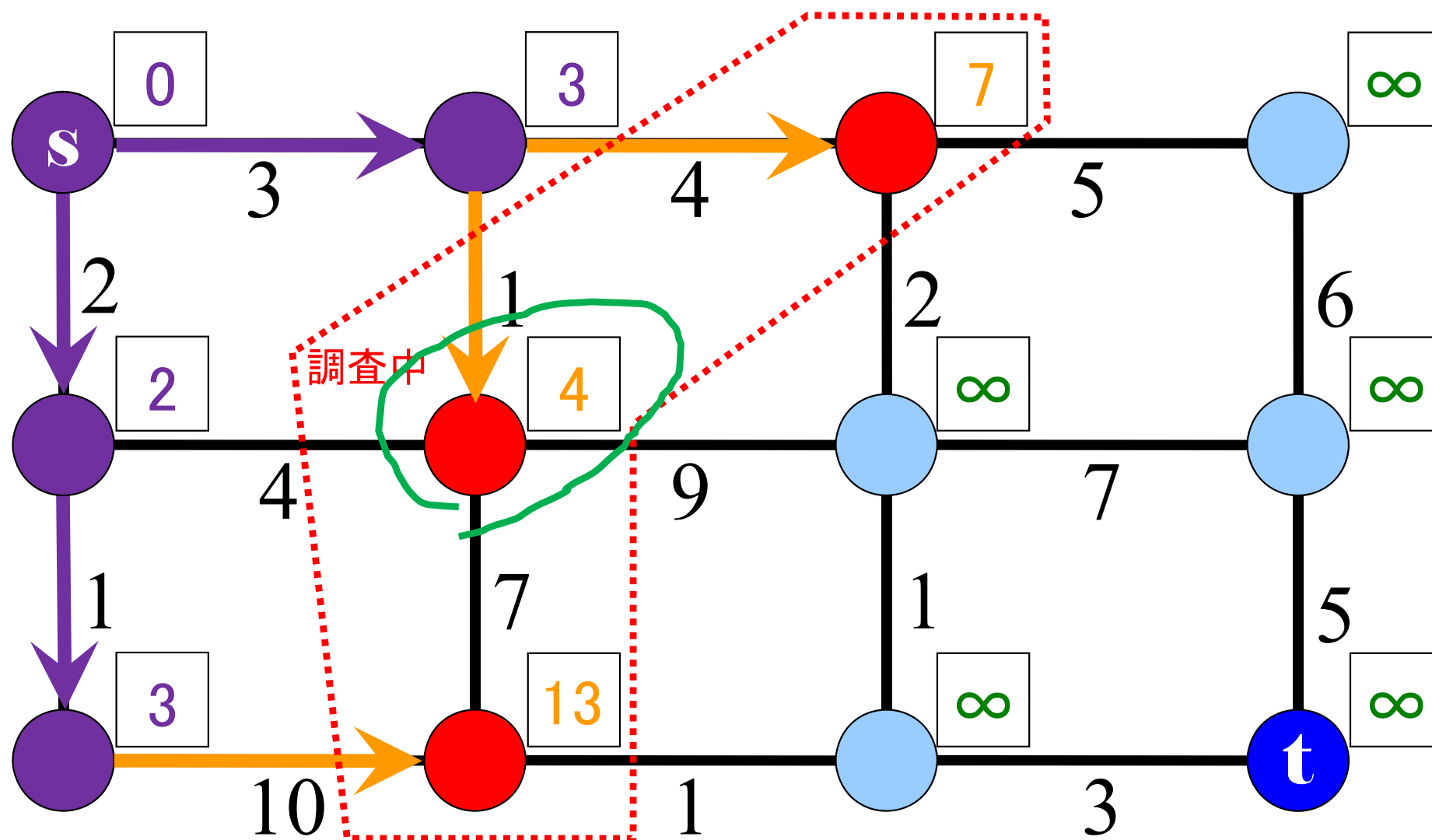
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



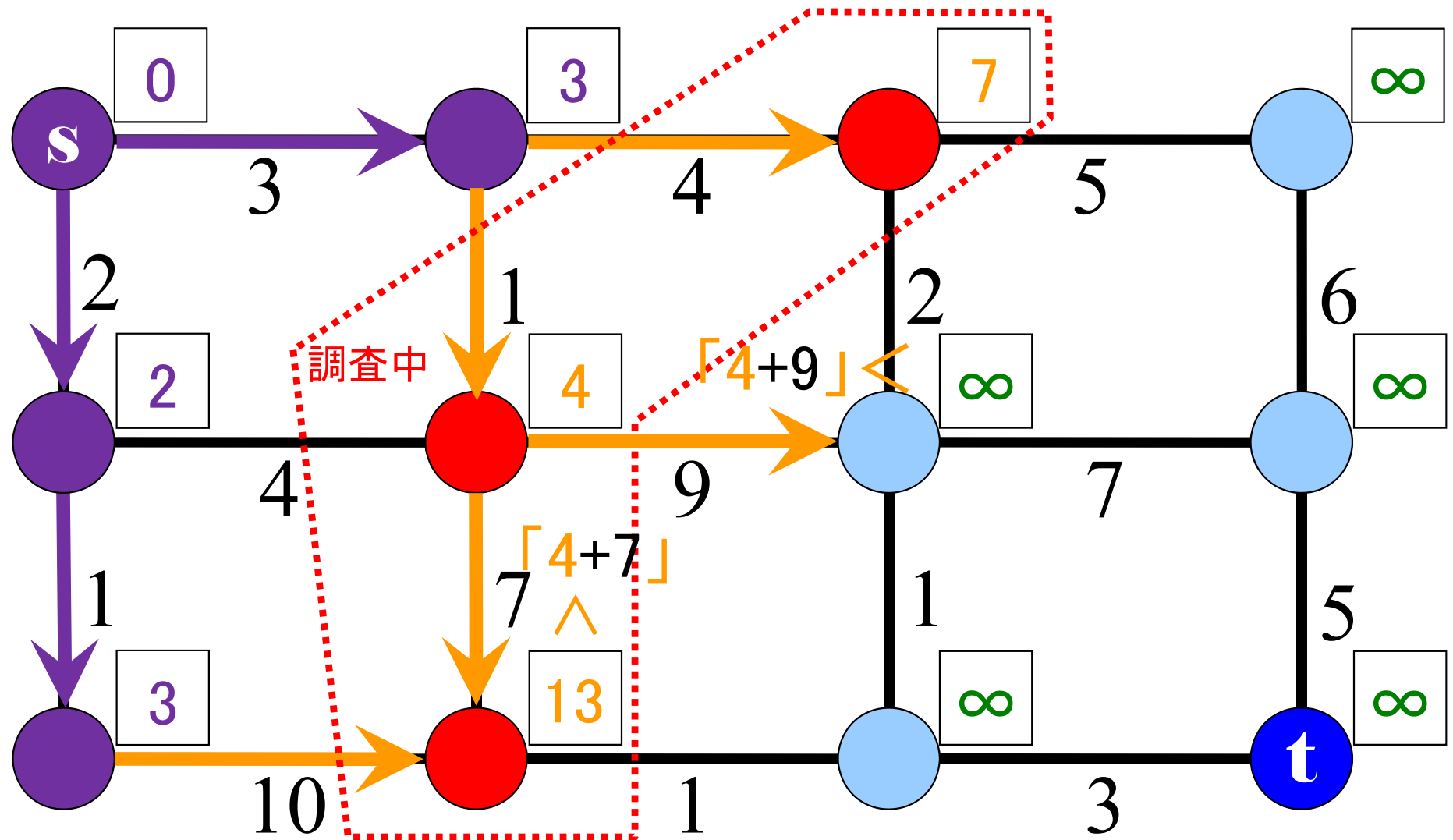
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうち、ラベル値が最小の点を見つける



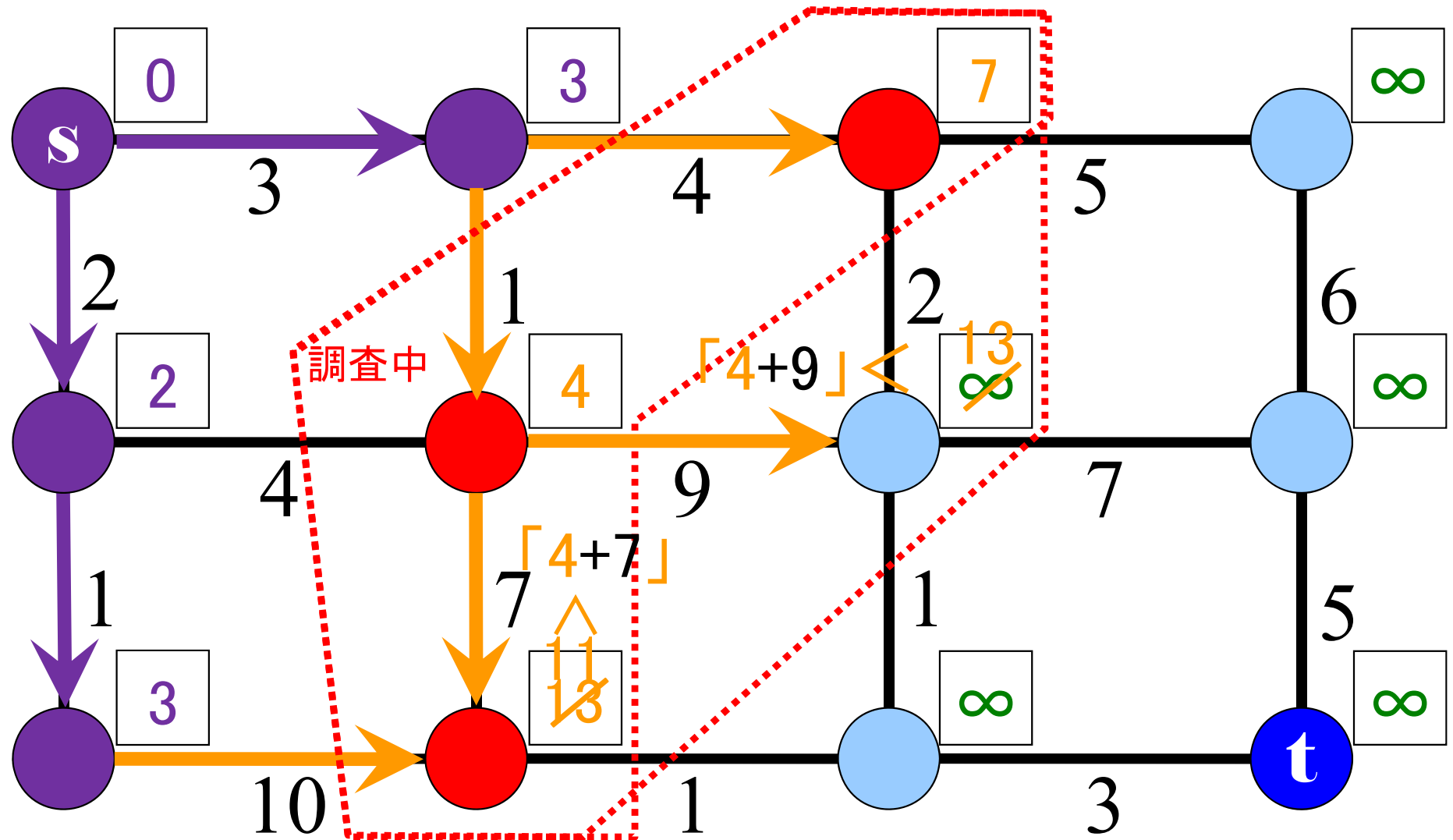
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい($<$)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

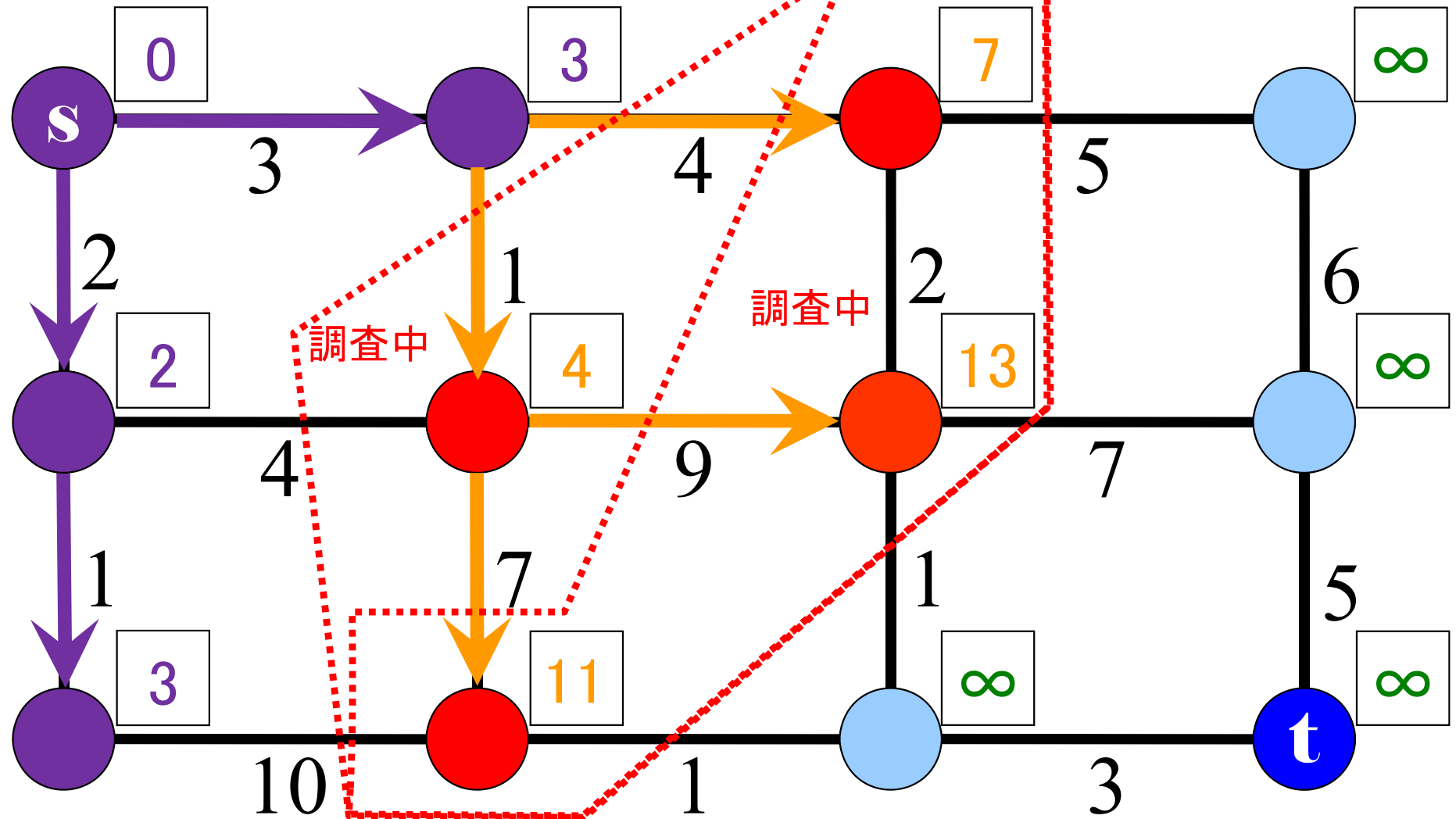
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい($<$)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

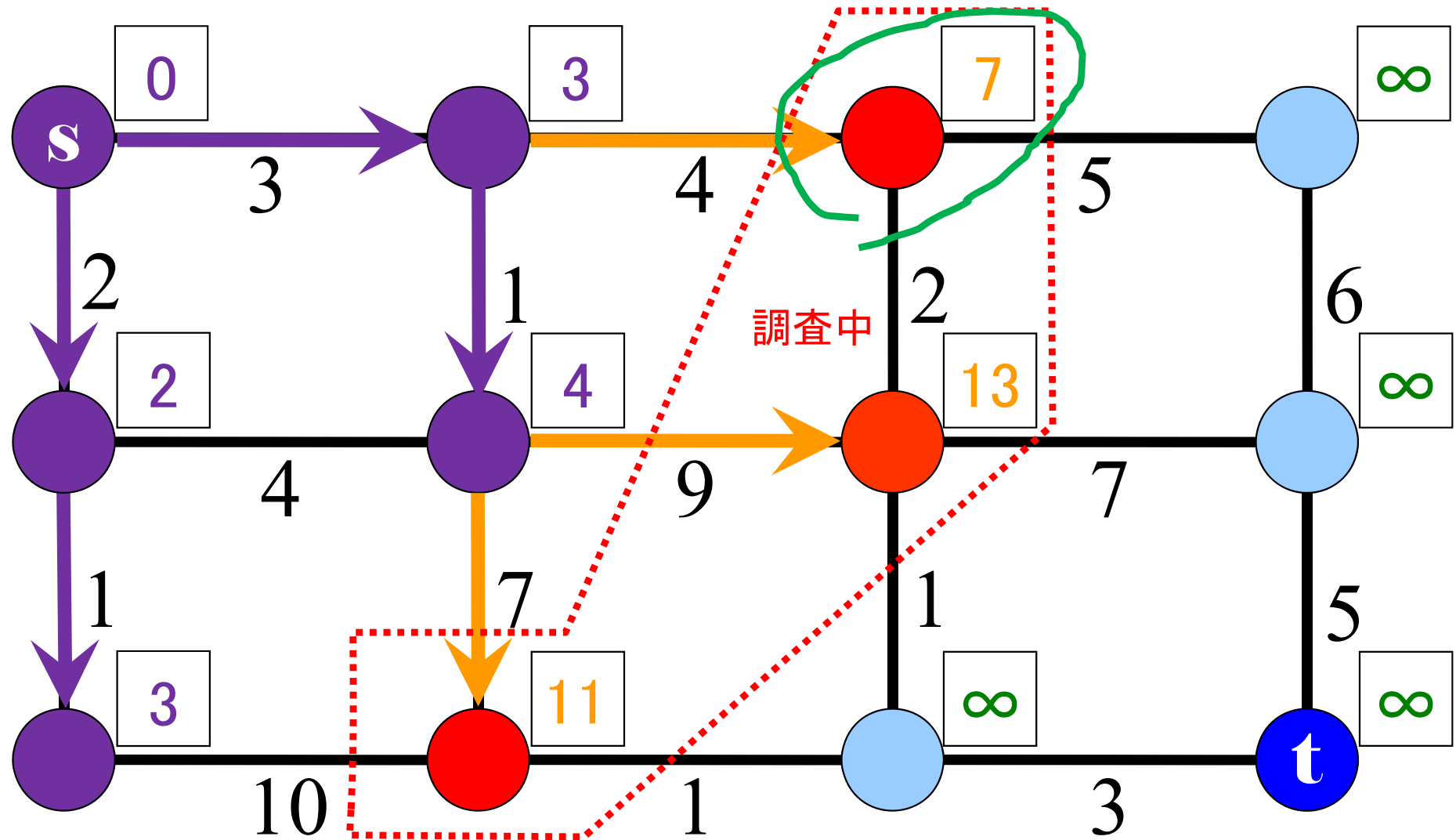
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



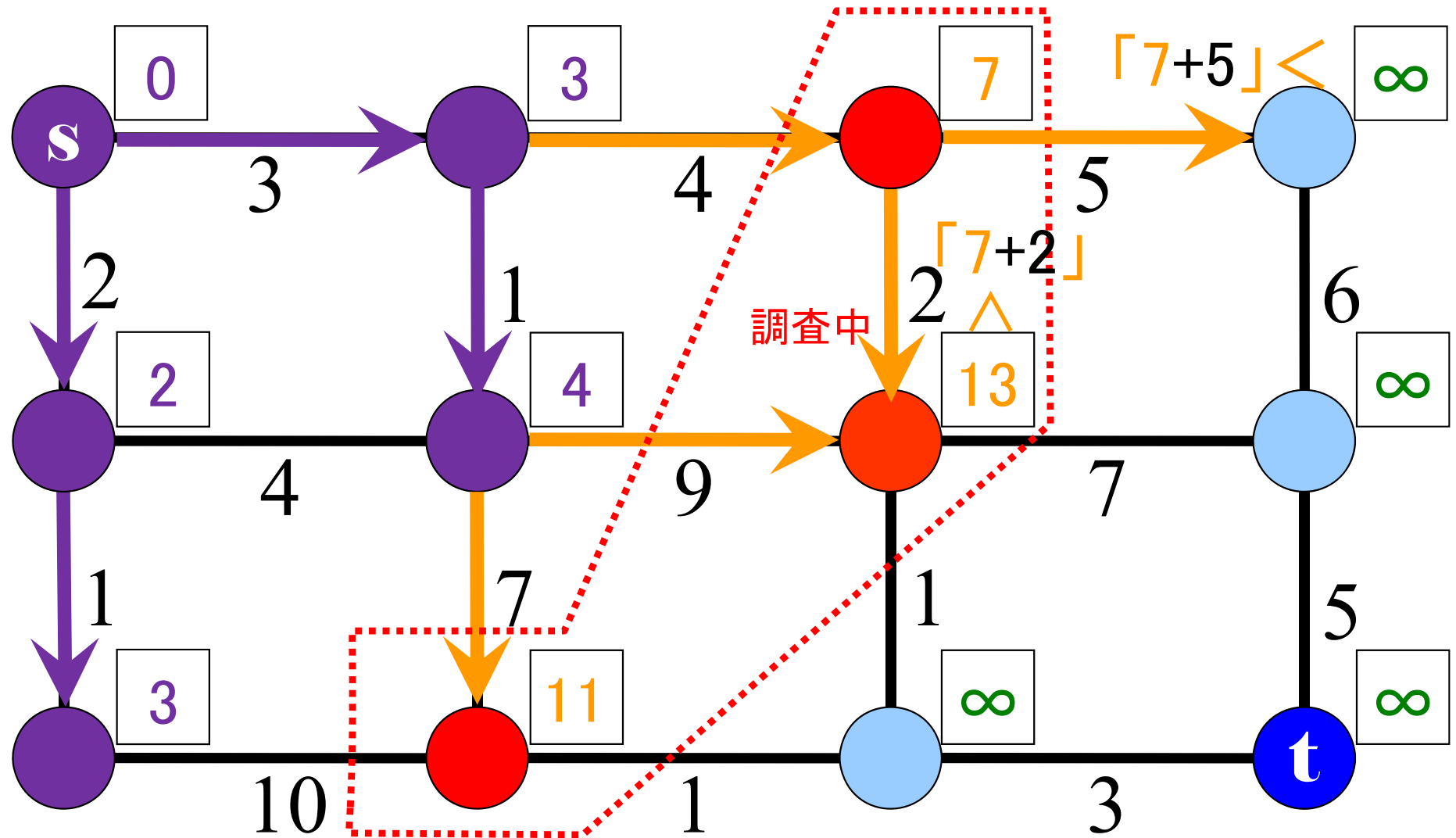
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうち、ラベル値が最小の点を見つける



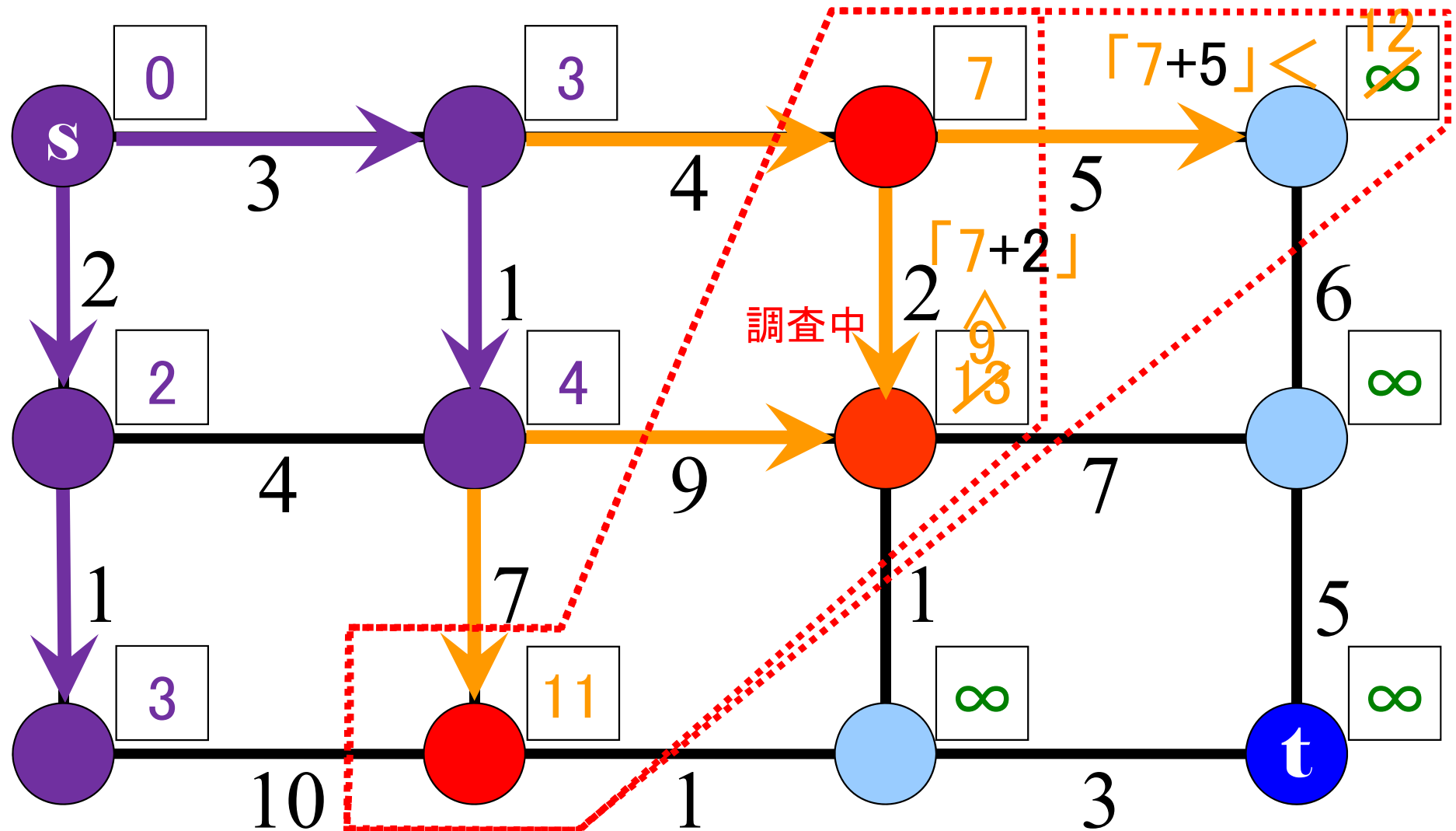
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

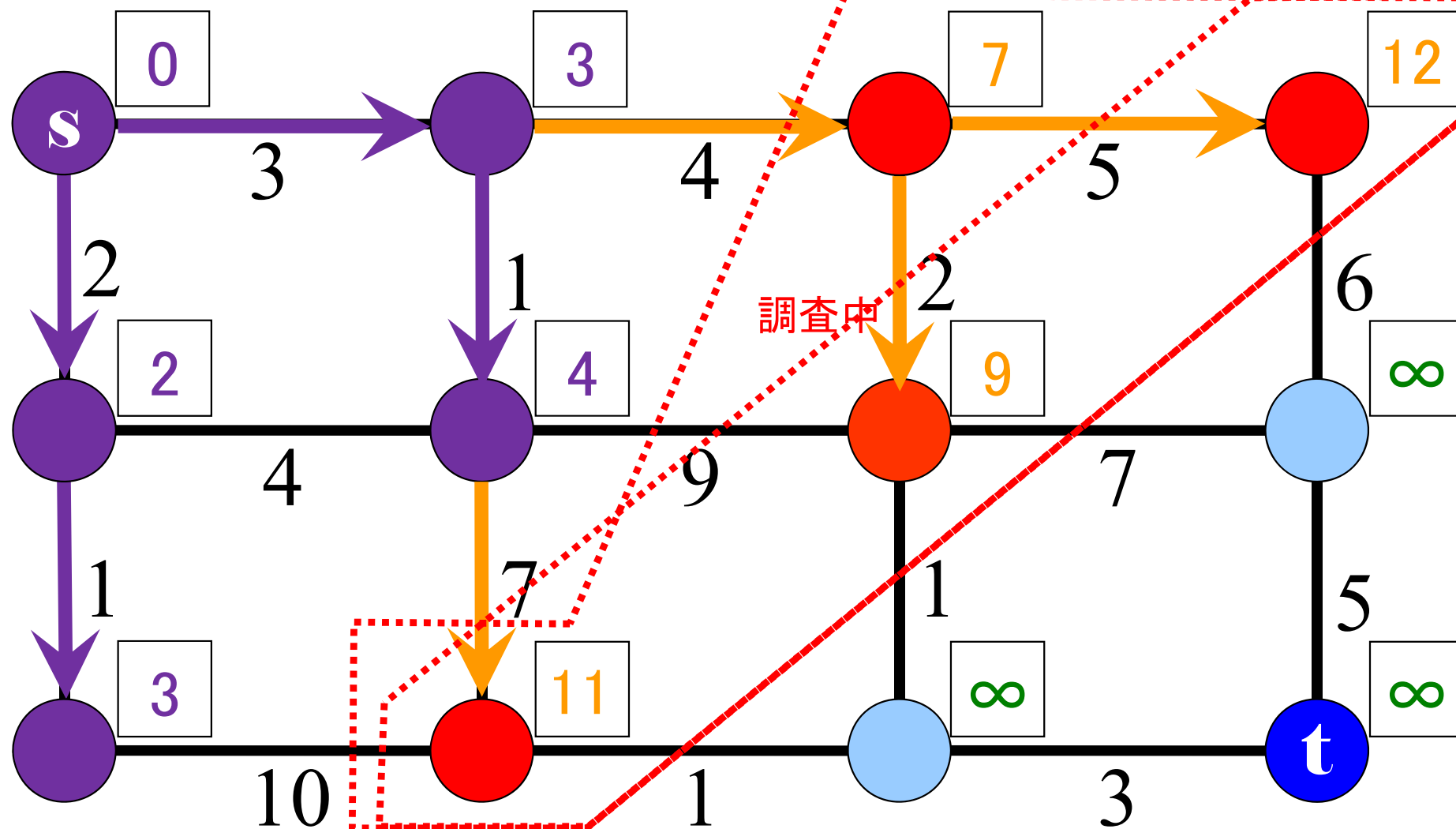
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

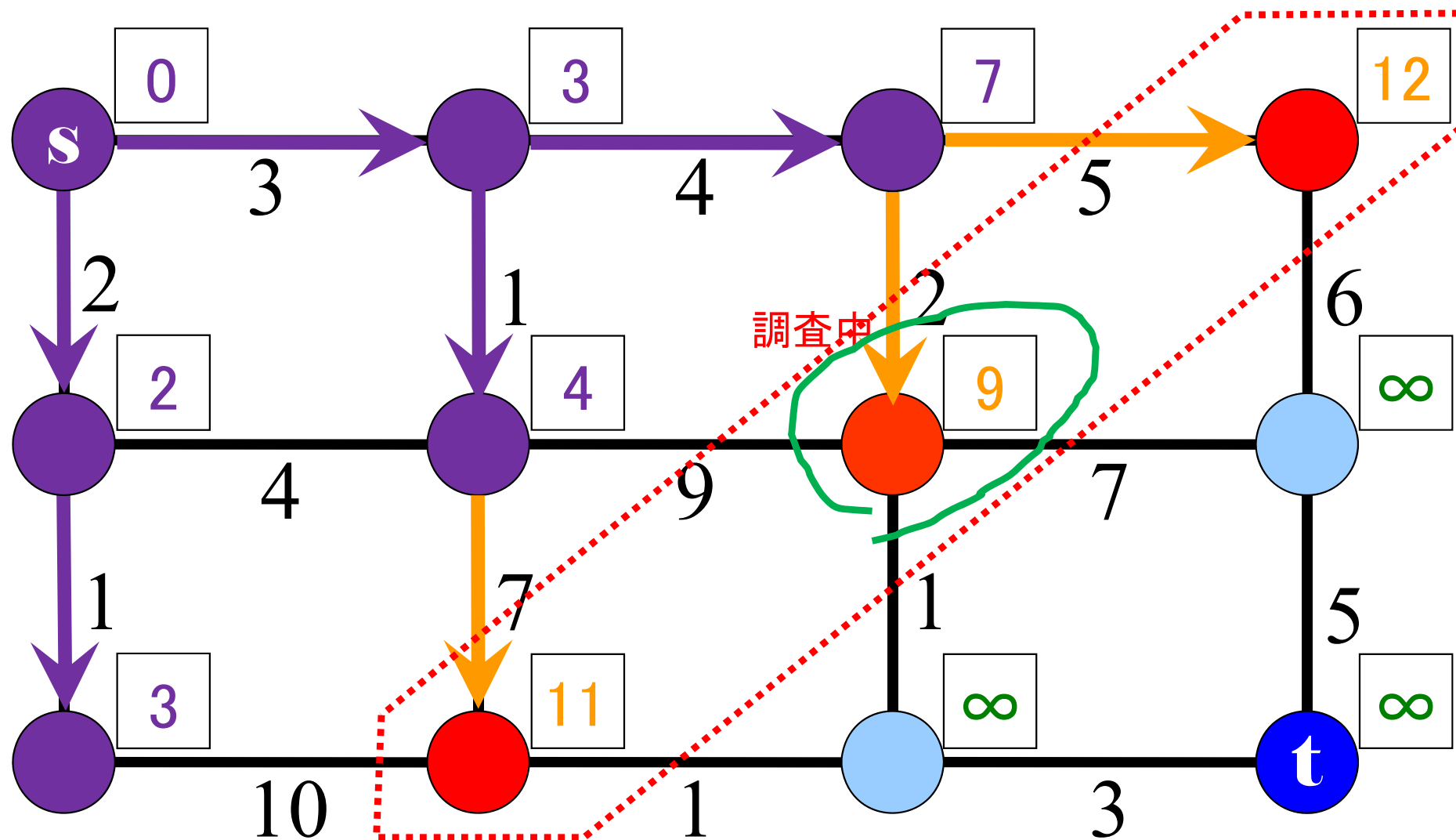
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



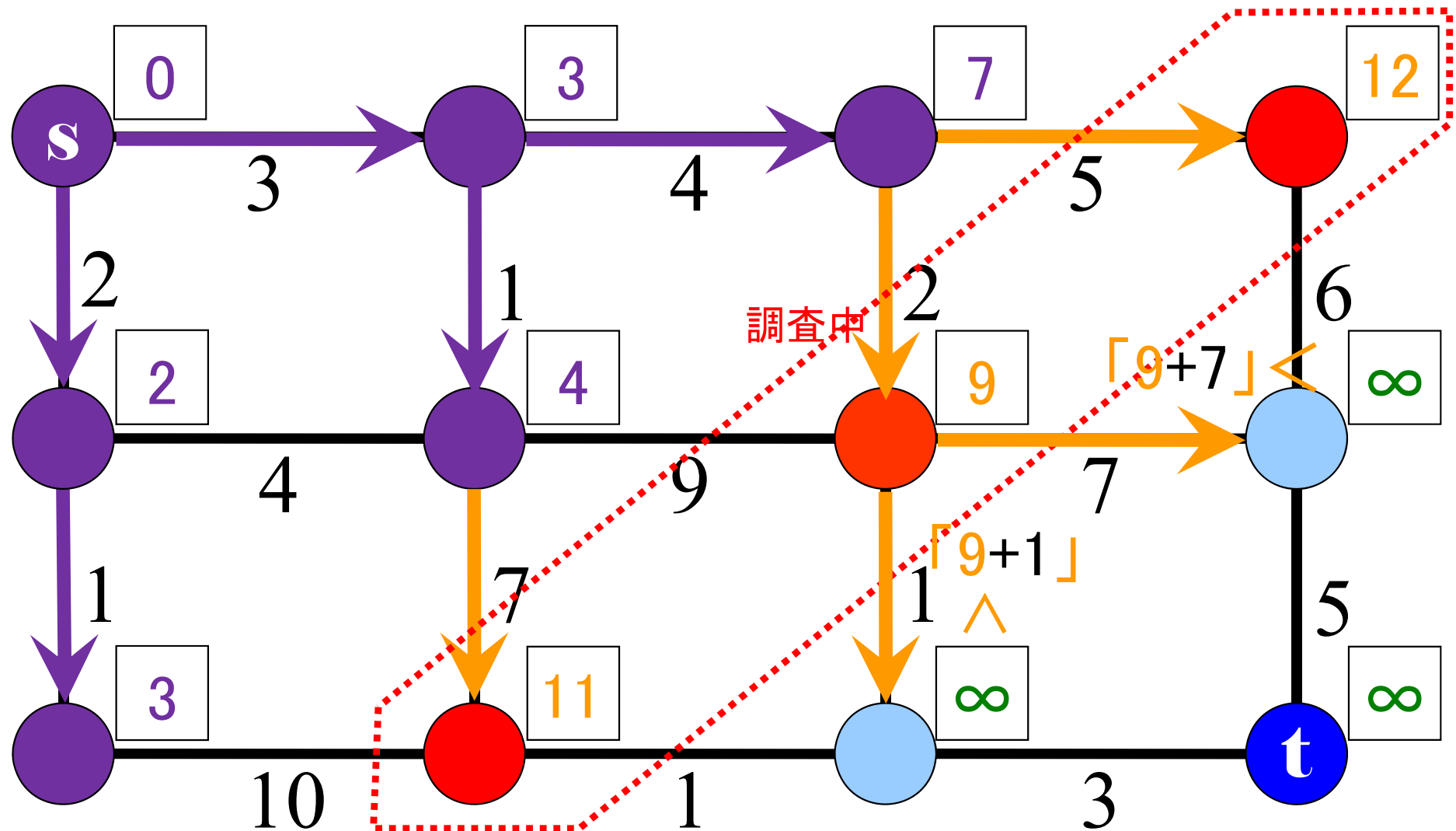
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で, ラベル値が最小の点を見つける



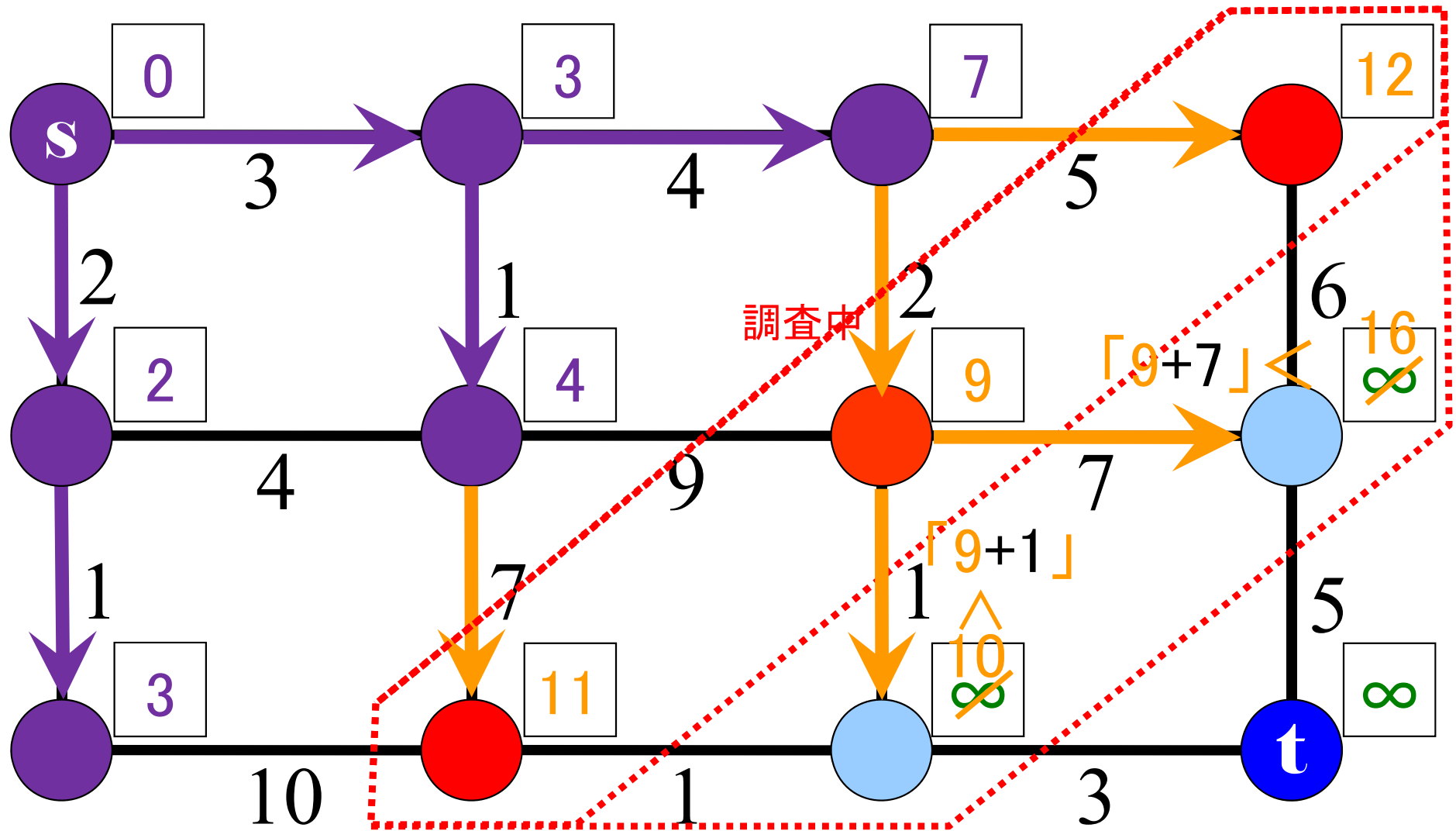
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

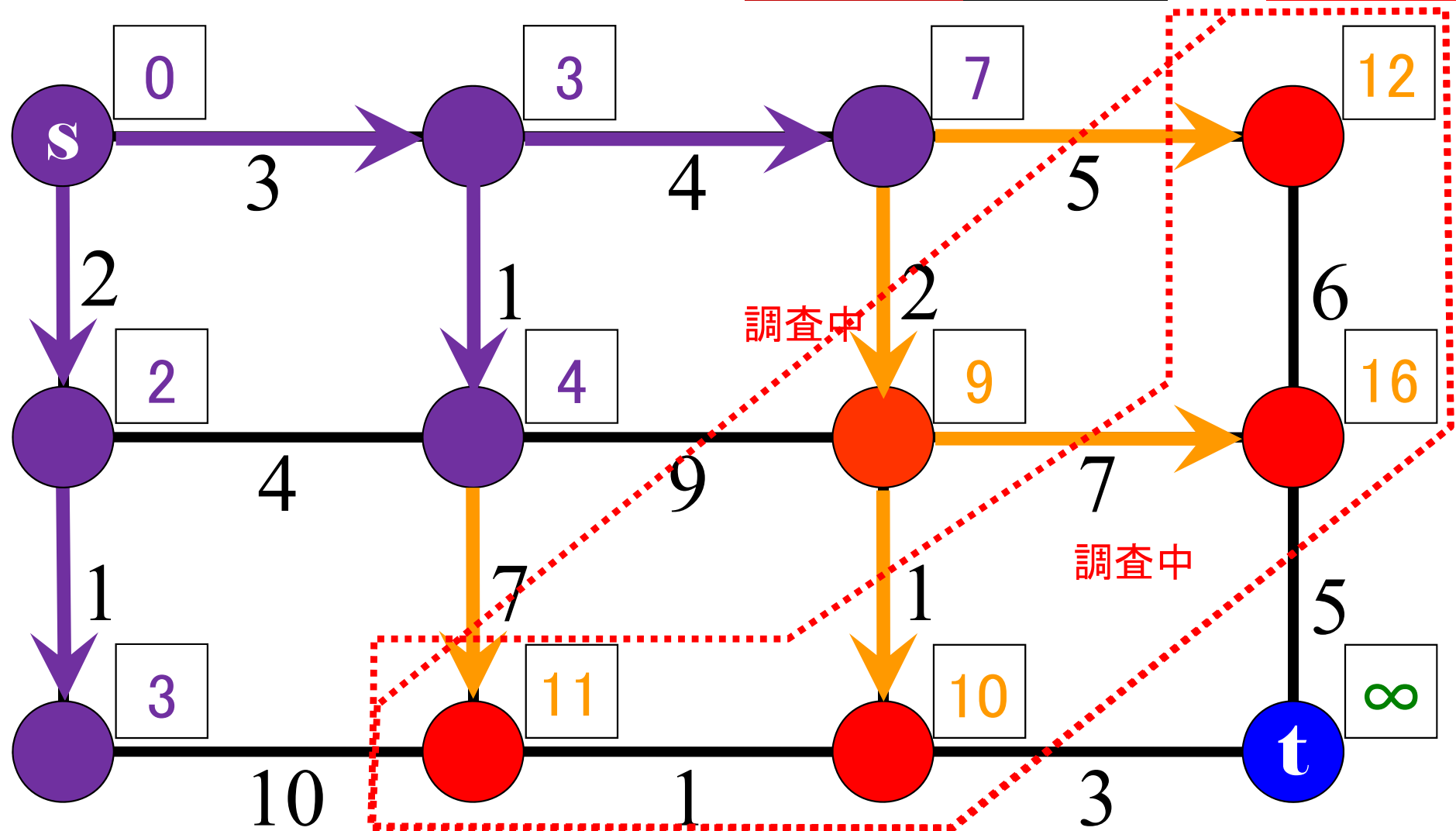
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

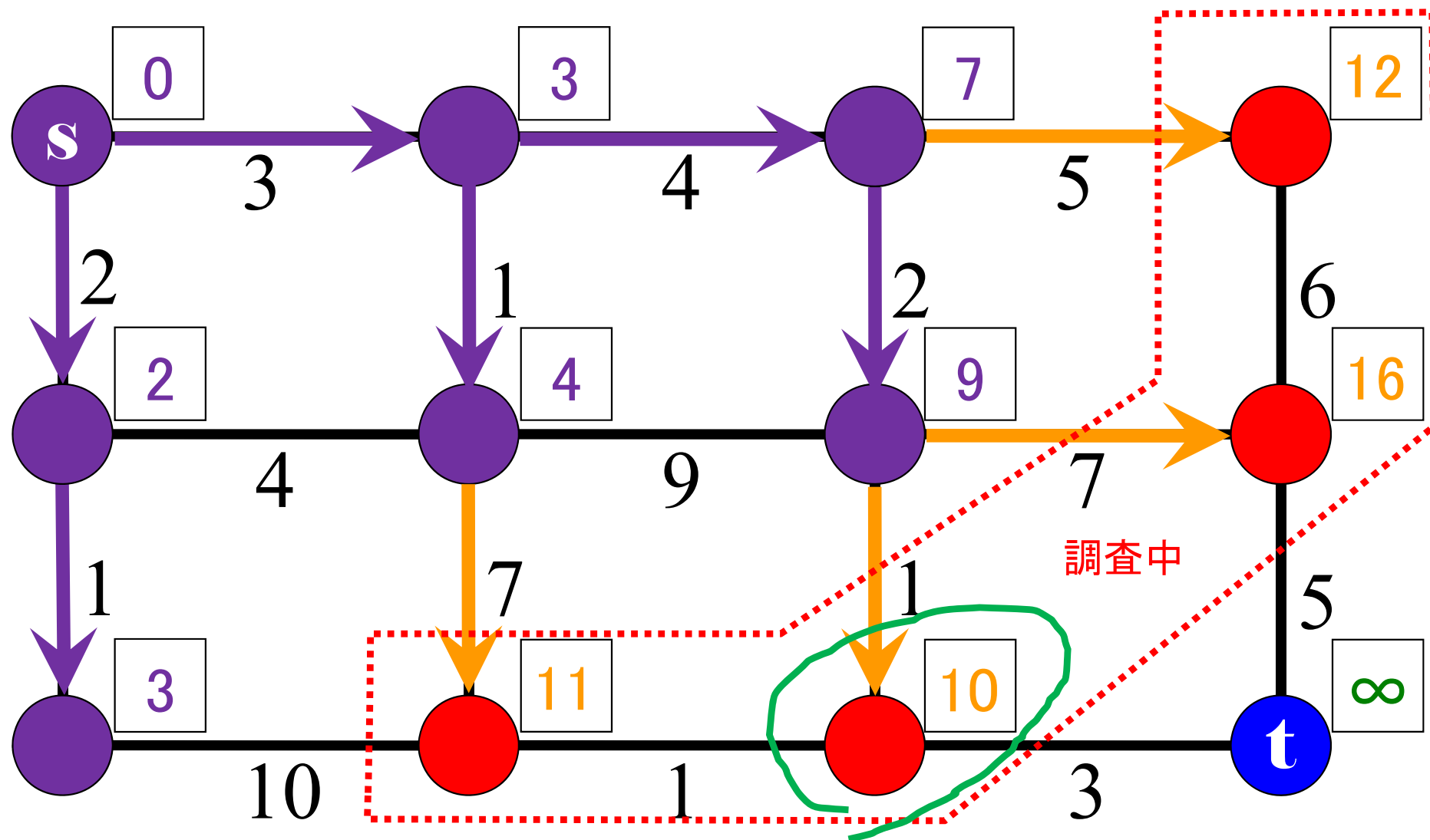
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



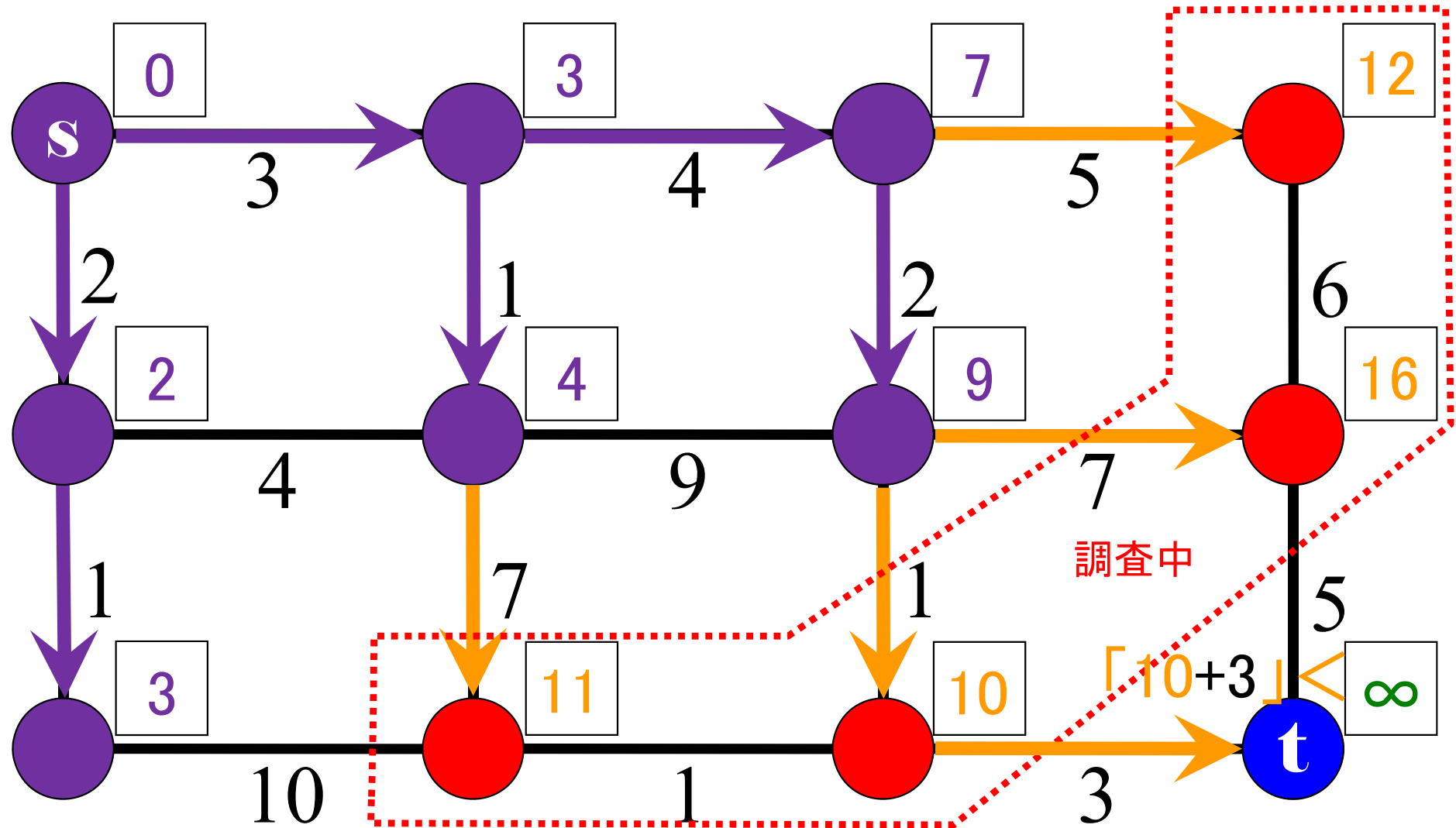
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点のうちで、ラベル値が最小の点を見つける



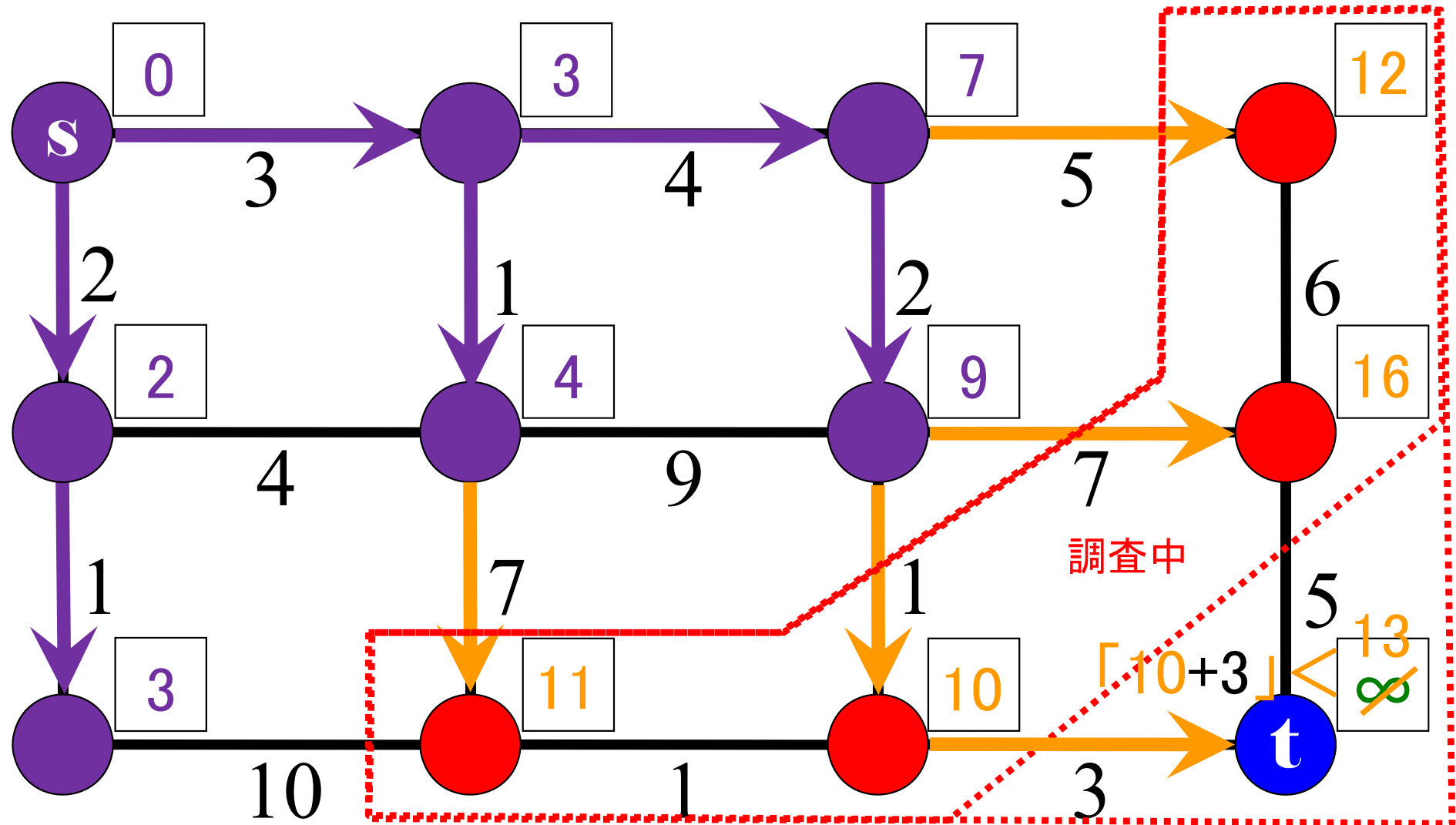
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

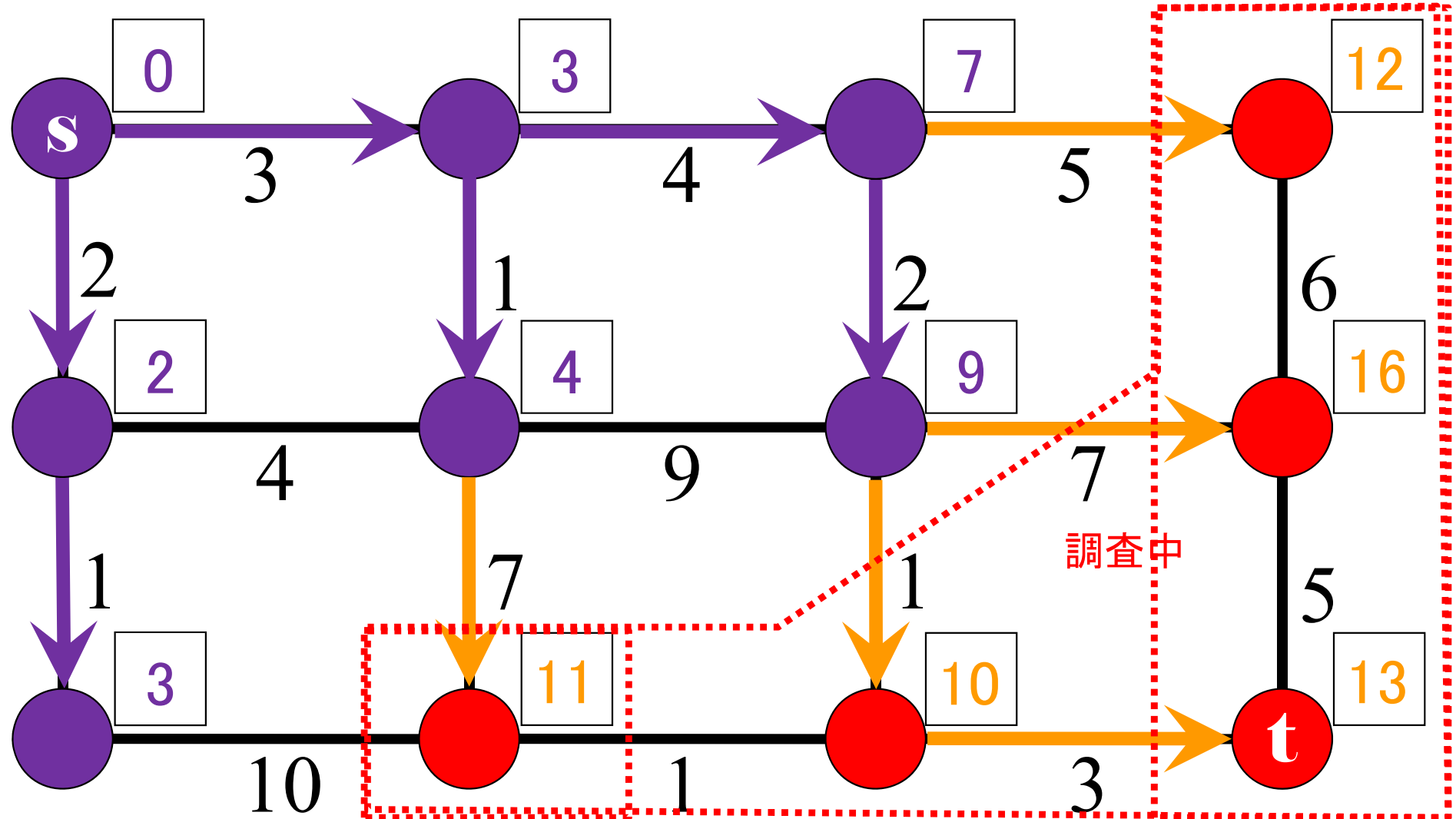
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

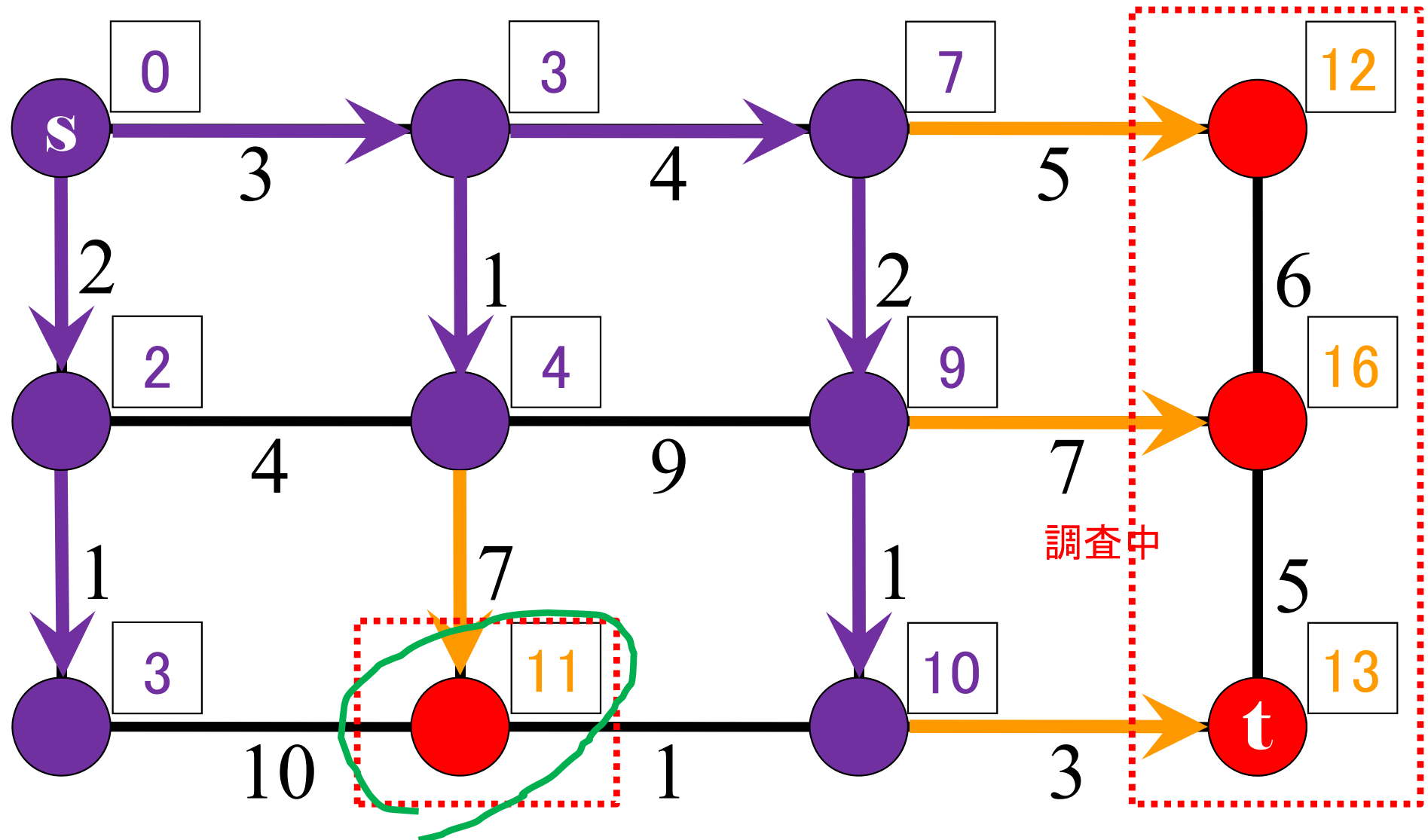
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

以降step1-1~step1-3を
終了条件を満たすまで繰り返す



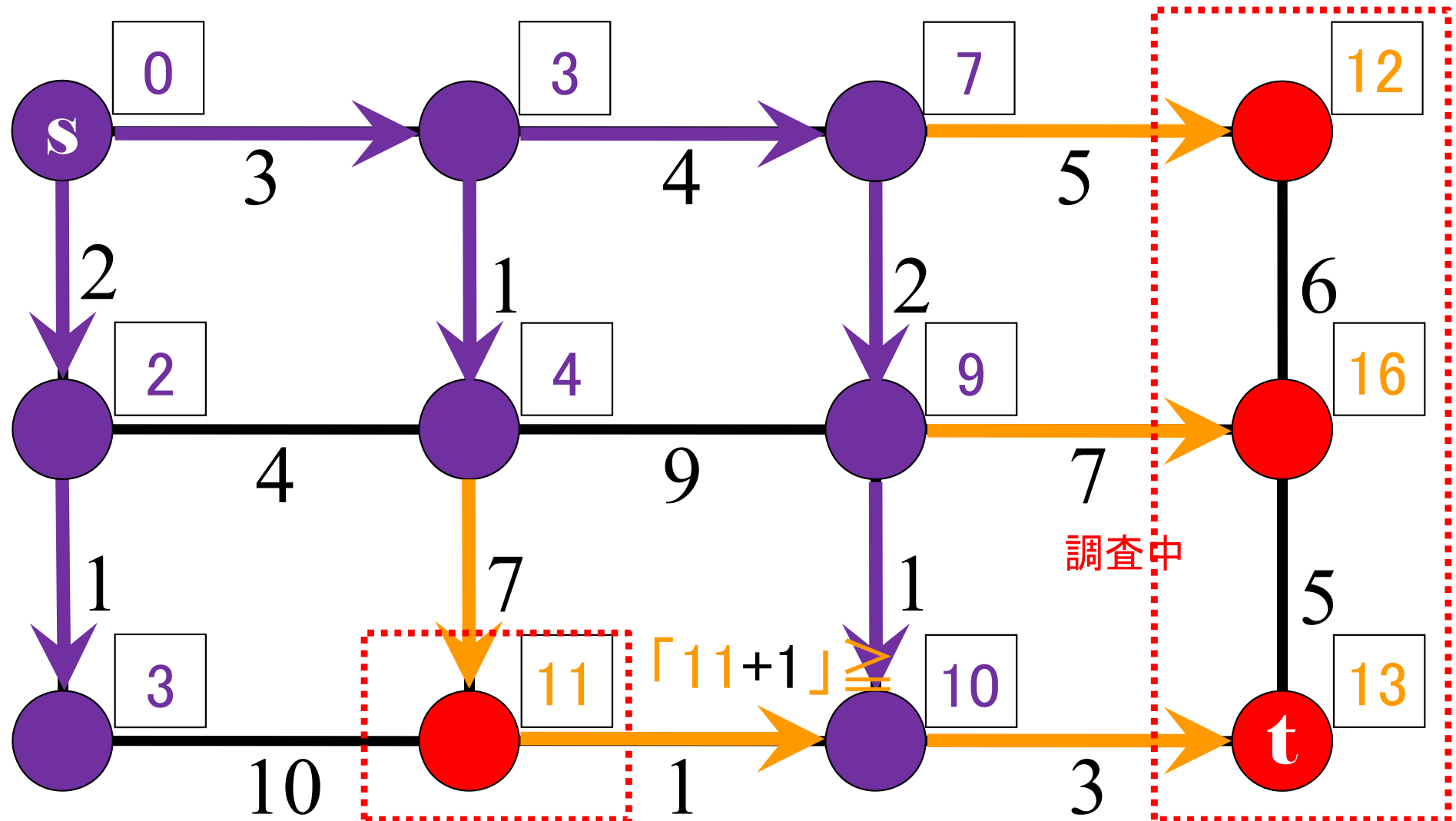
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で、ラベル値が最小の点を見つける



Dijkstra法 (更新法)

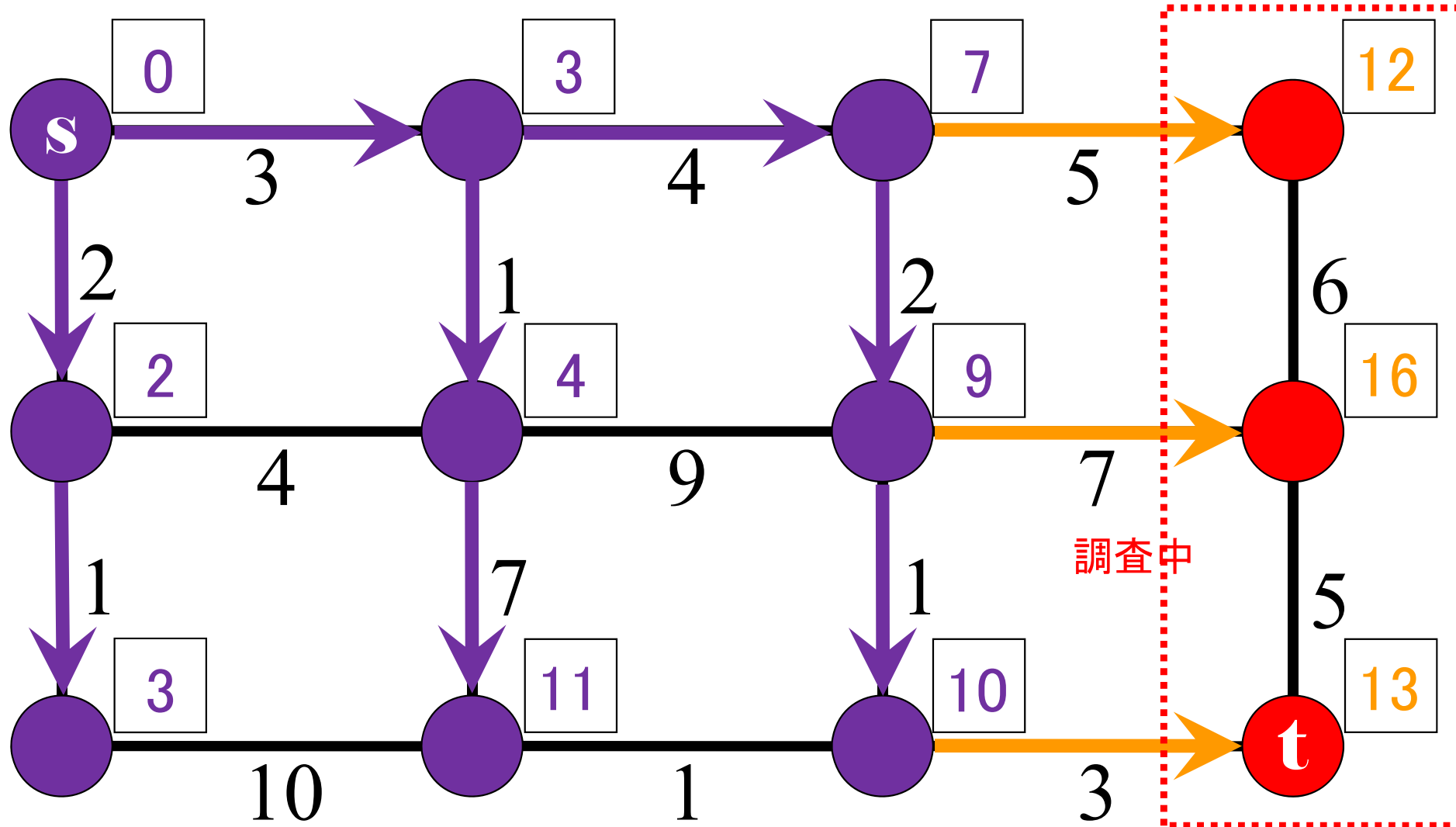
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

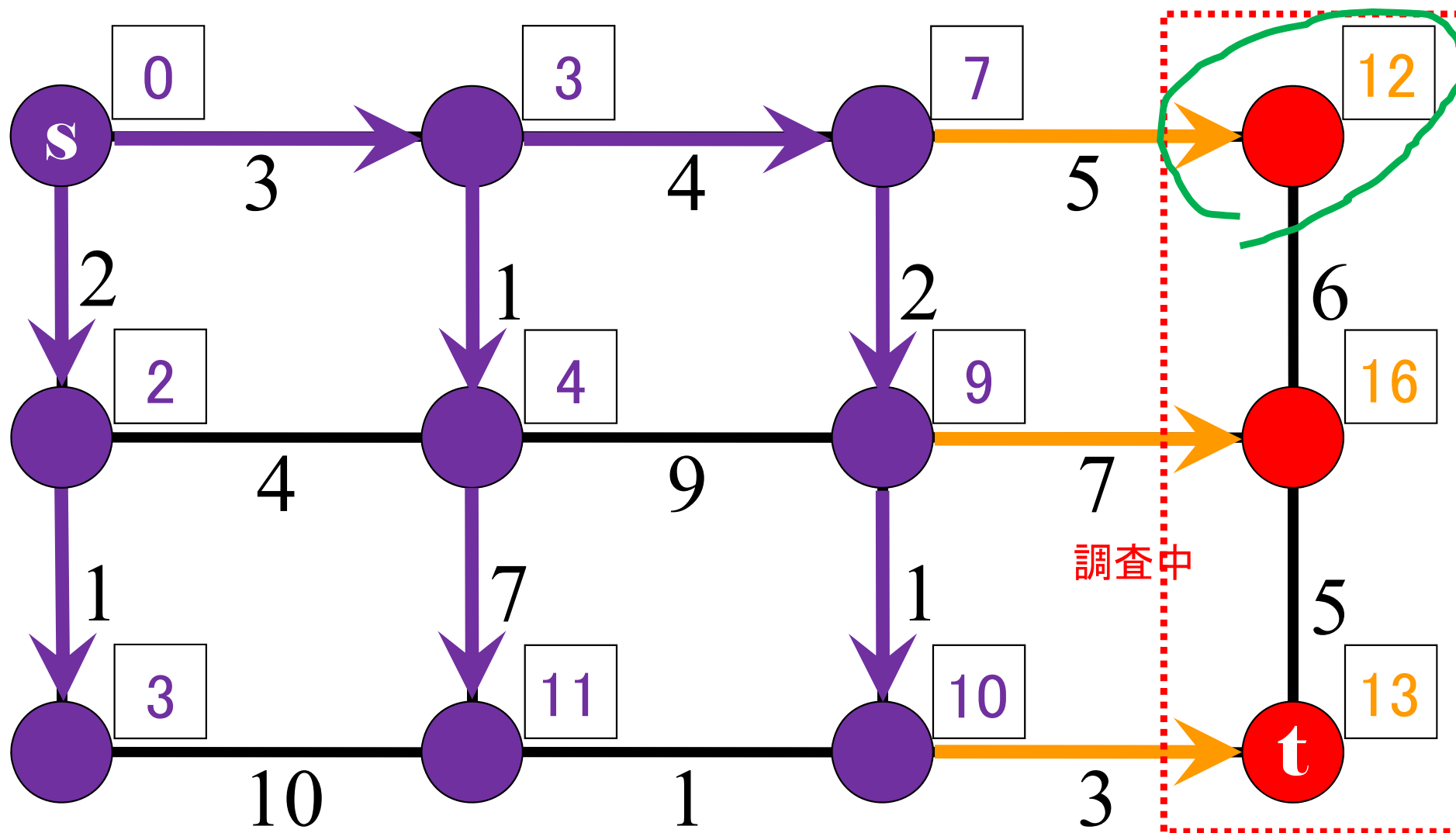
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの**暫定最短路**が**最短路**として確定)

以降**step1-1**~**step1-3**を
終了条件を満たすまで**繰り返す**



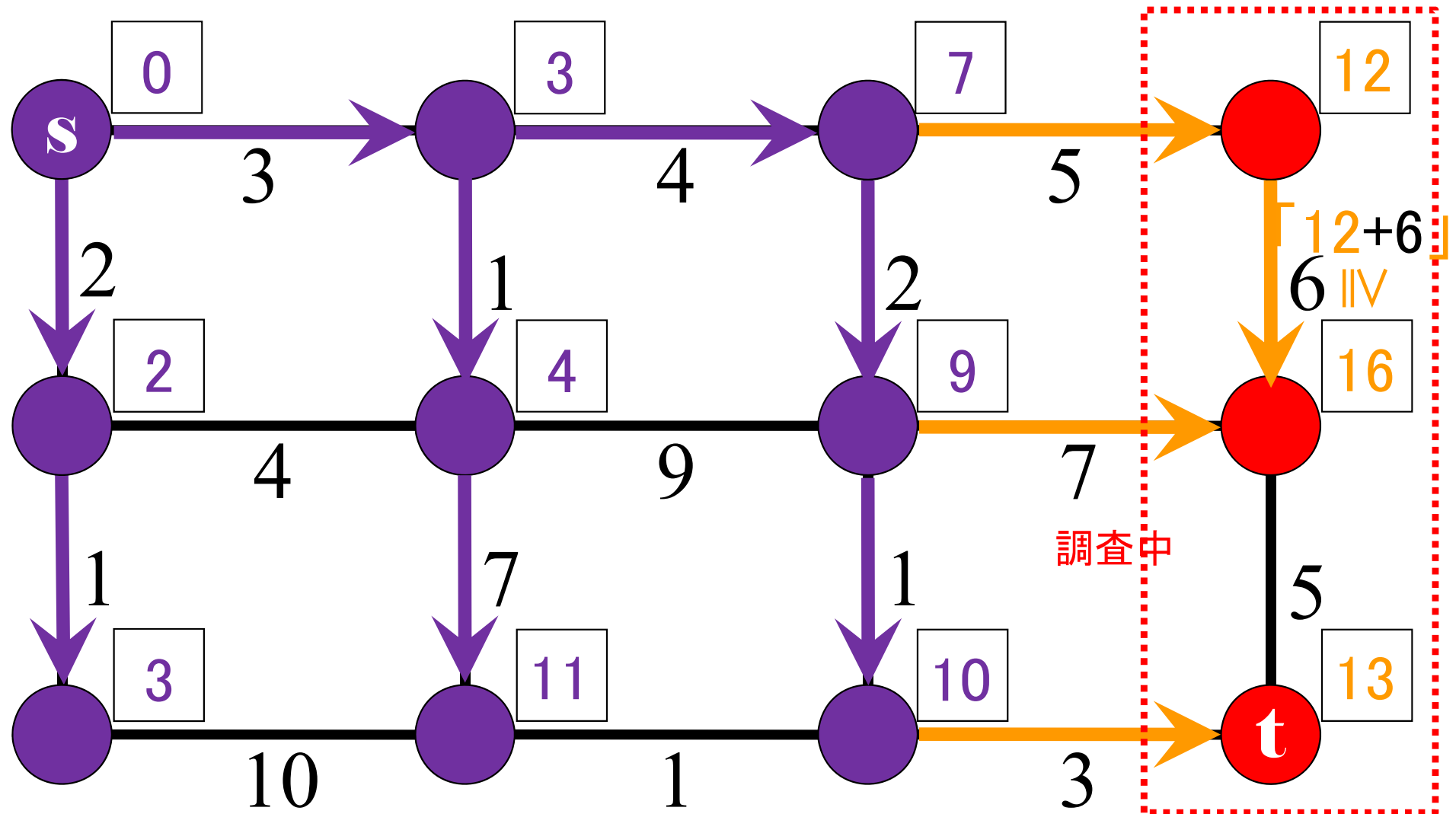
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で、ラベル値が最小の点を見つける



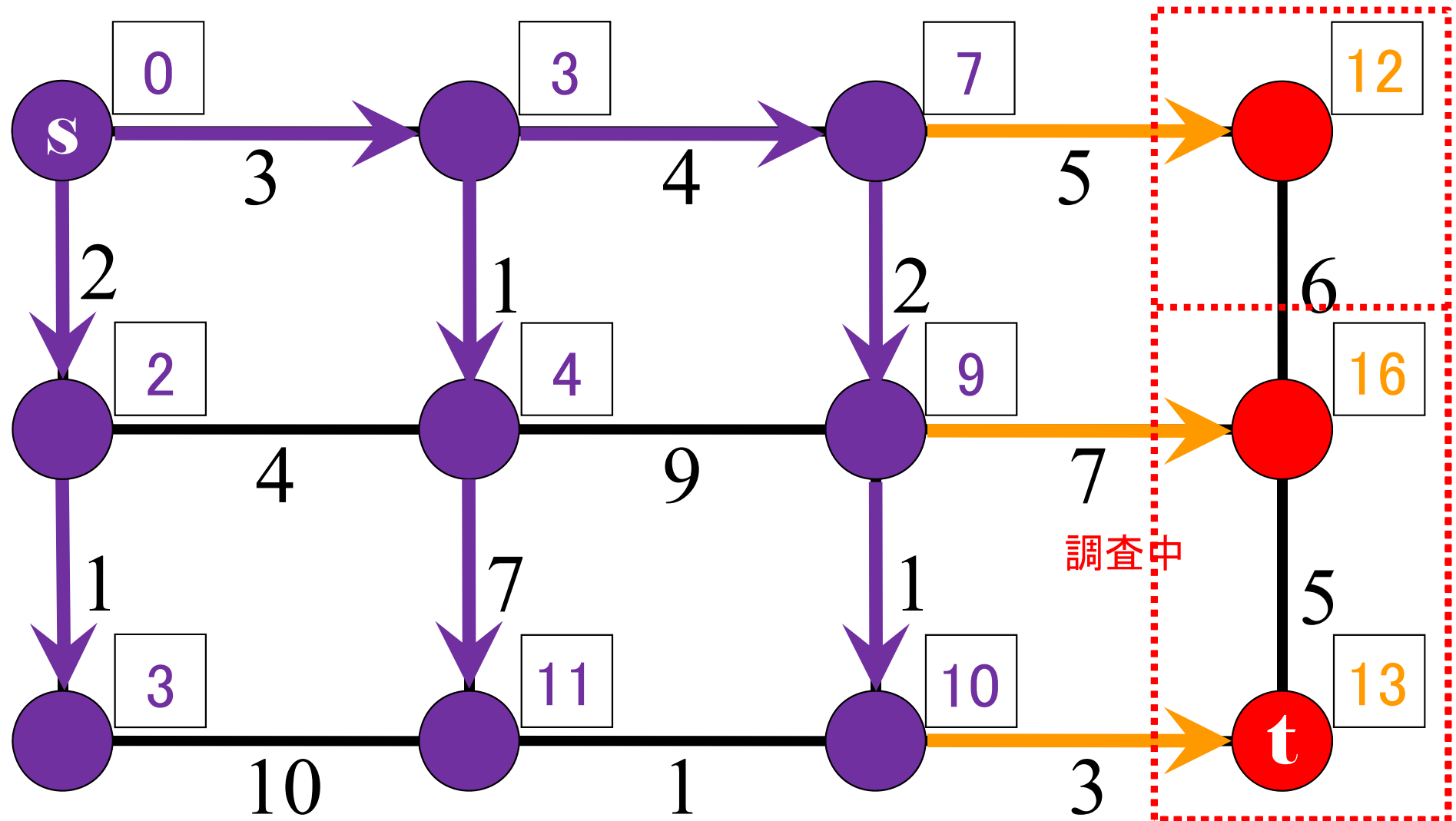
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

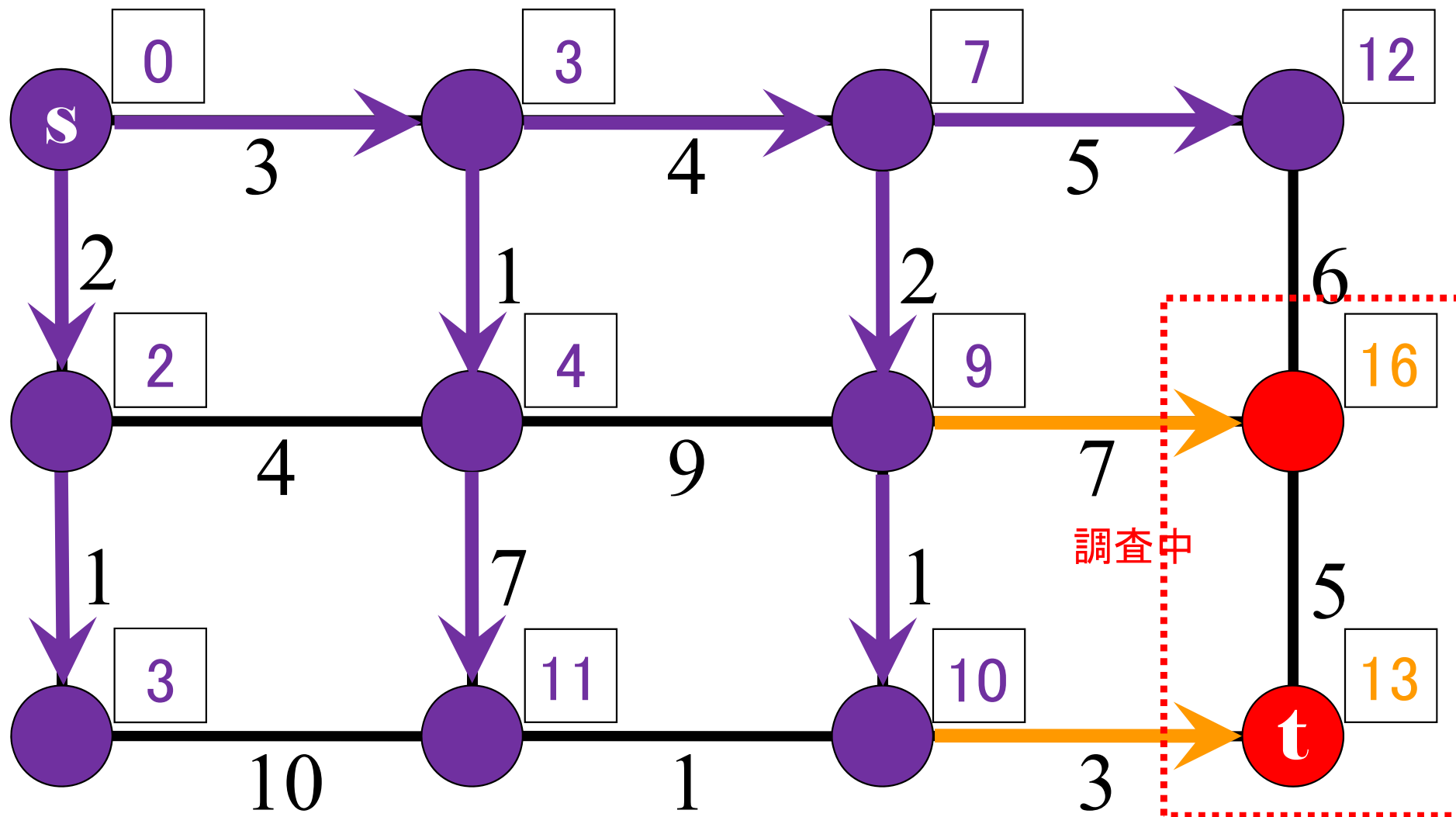
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

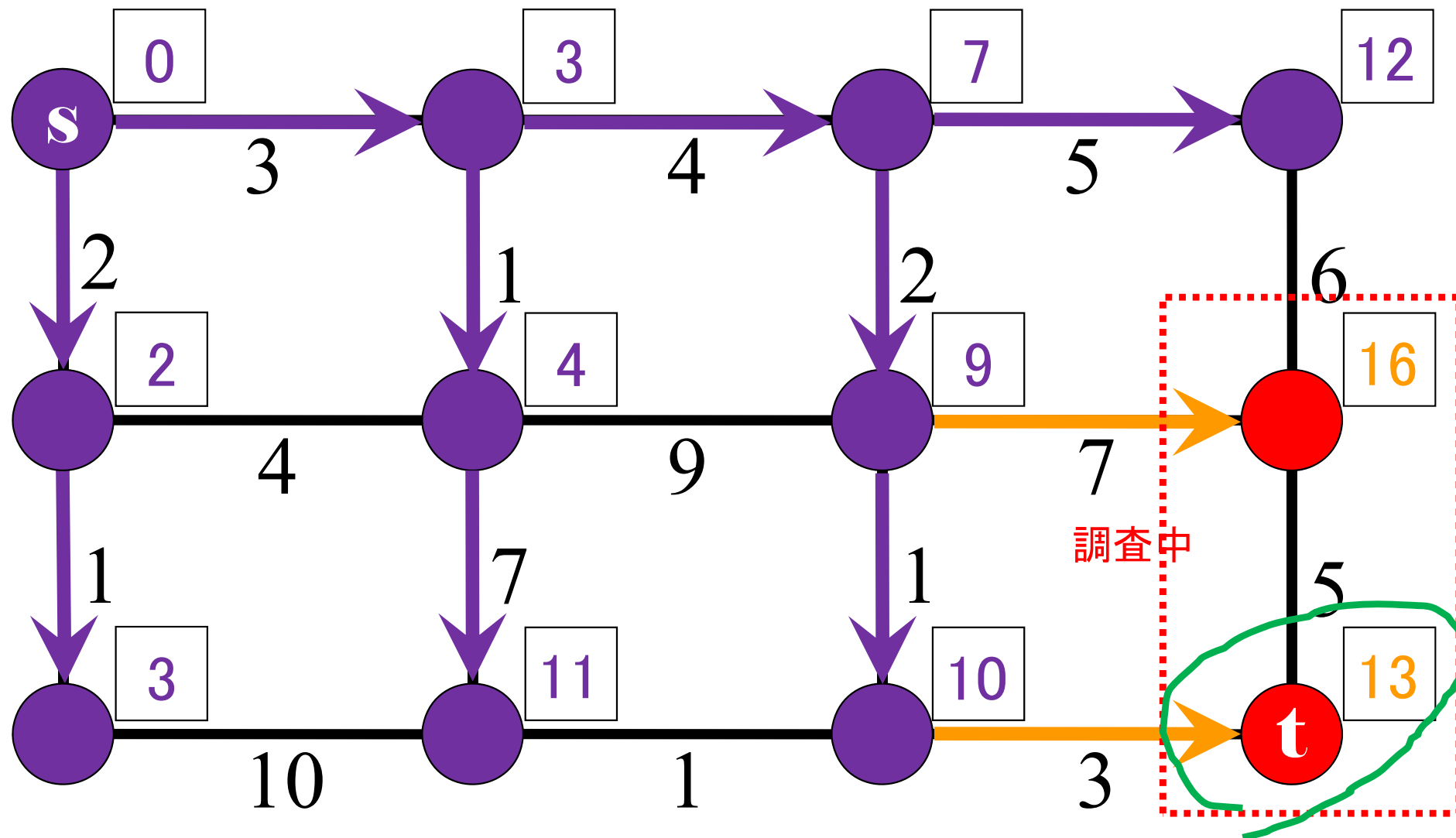
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの**暫定最短路**が**最短路**として確定)

以降**step1-1**~**step1-3**を
終了条件を満たすまで繰り返す



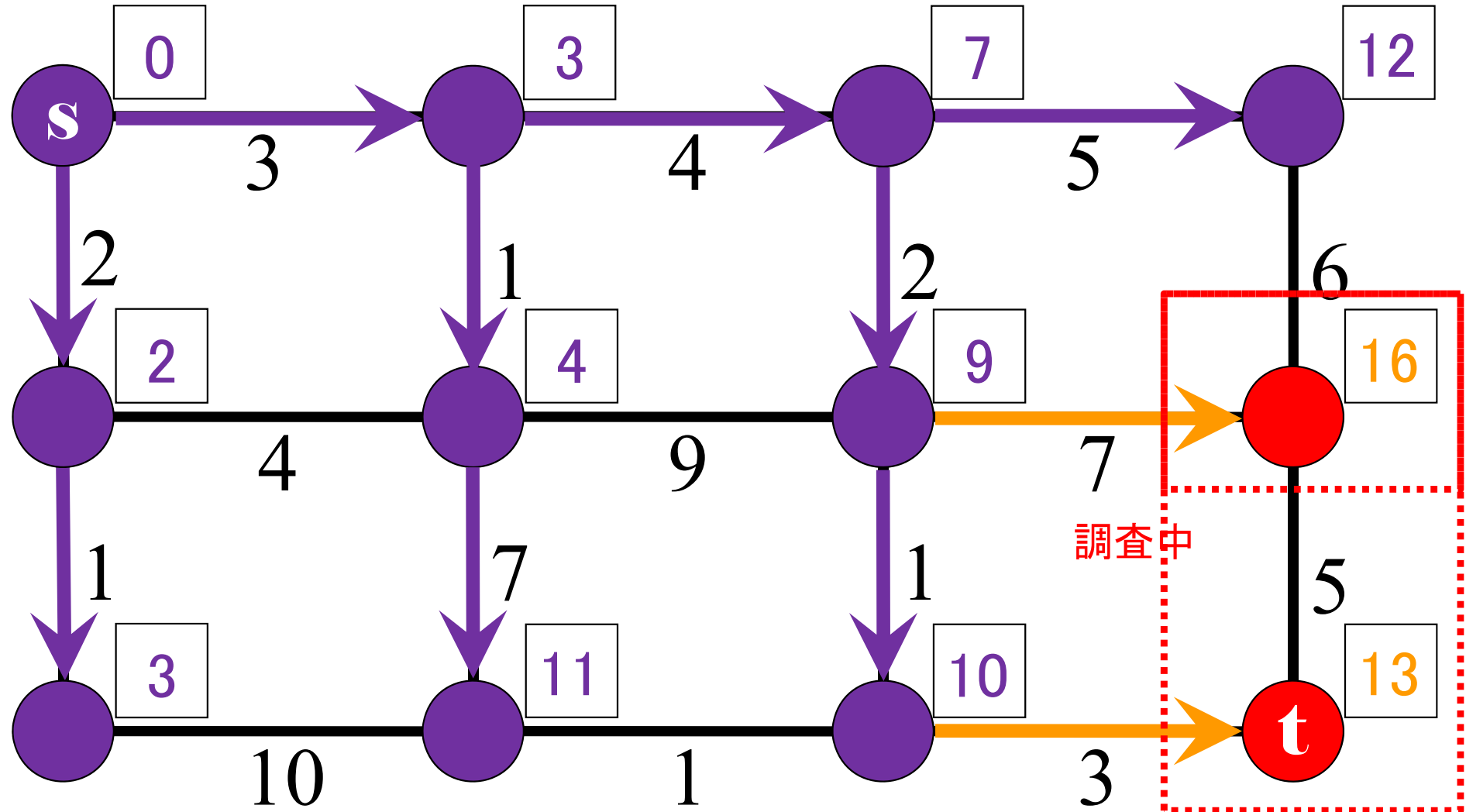
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で、ラベル値が最小の点を見つける



Dijkstra法 (更新法)

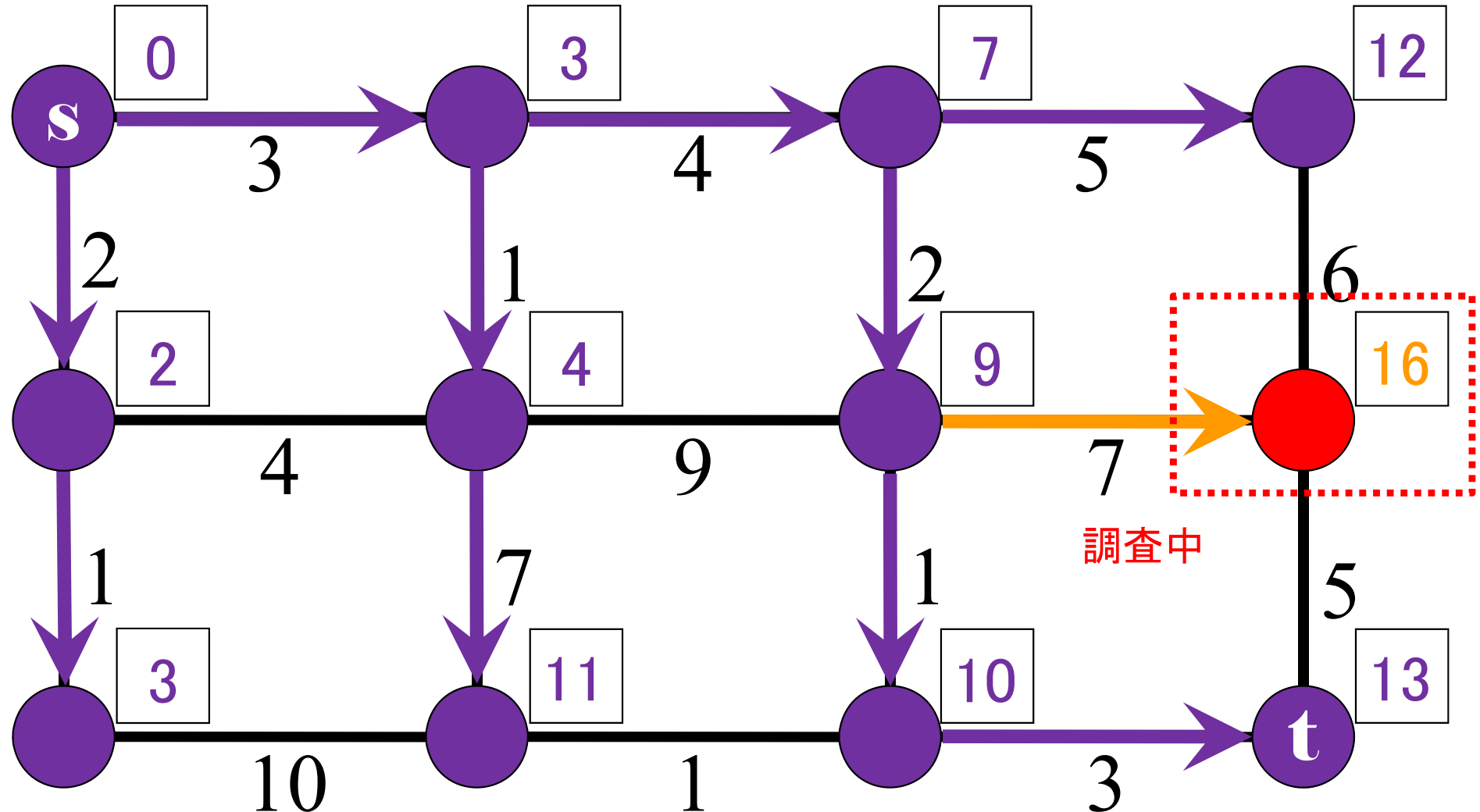
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

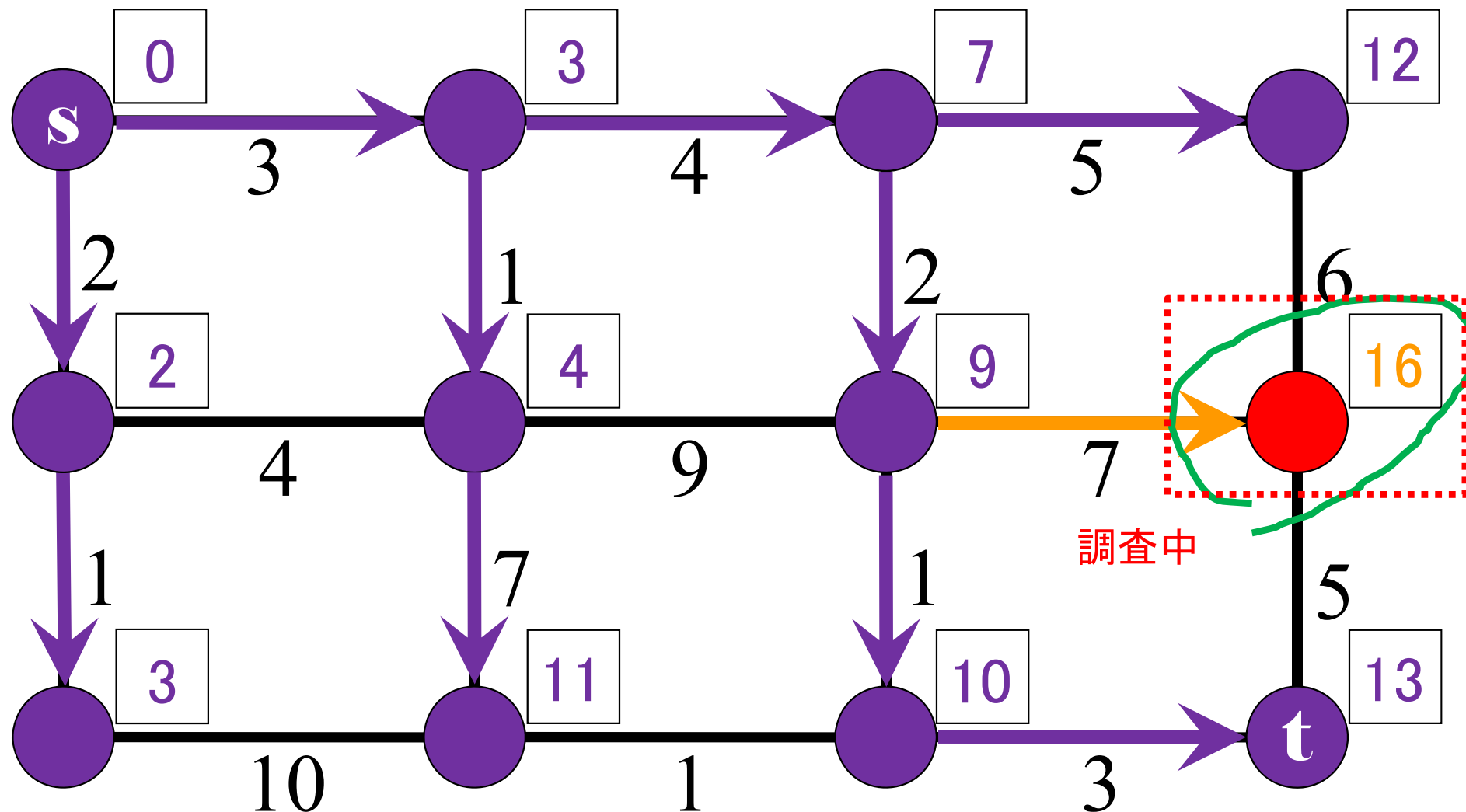
step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの**暫定最短路**が**最短路**として確定)

以降**step1-1**~**step1-3**を
終了条件を満たすまで繰り返す



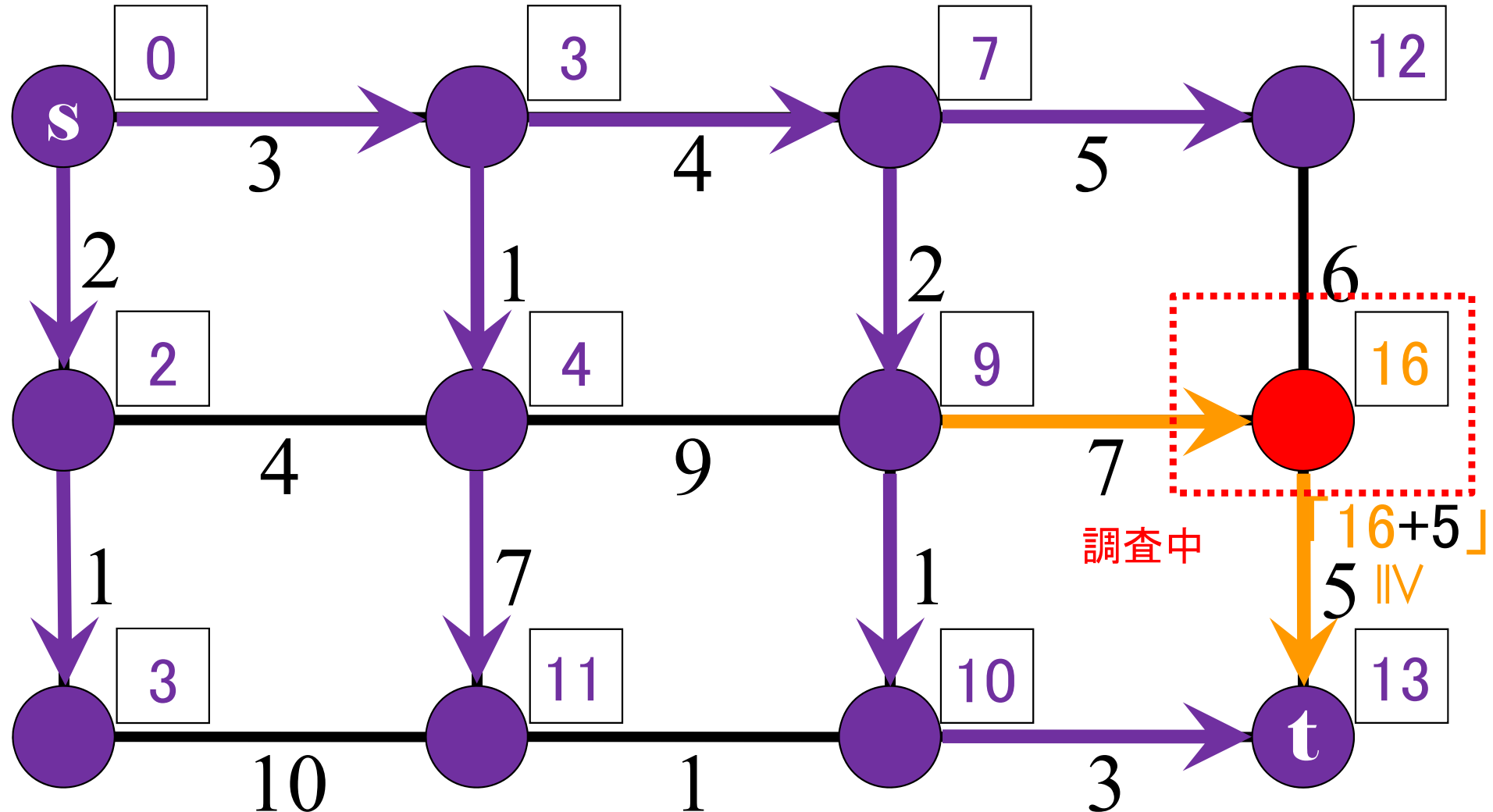
Dijkstra法 (更新法)

step1-1: 調査中点の中で、ラベル値が最小の点を見つける



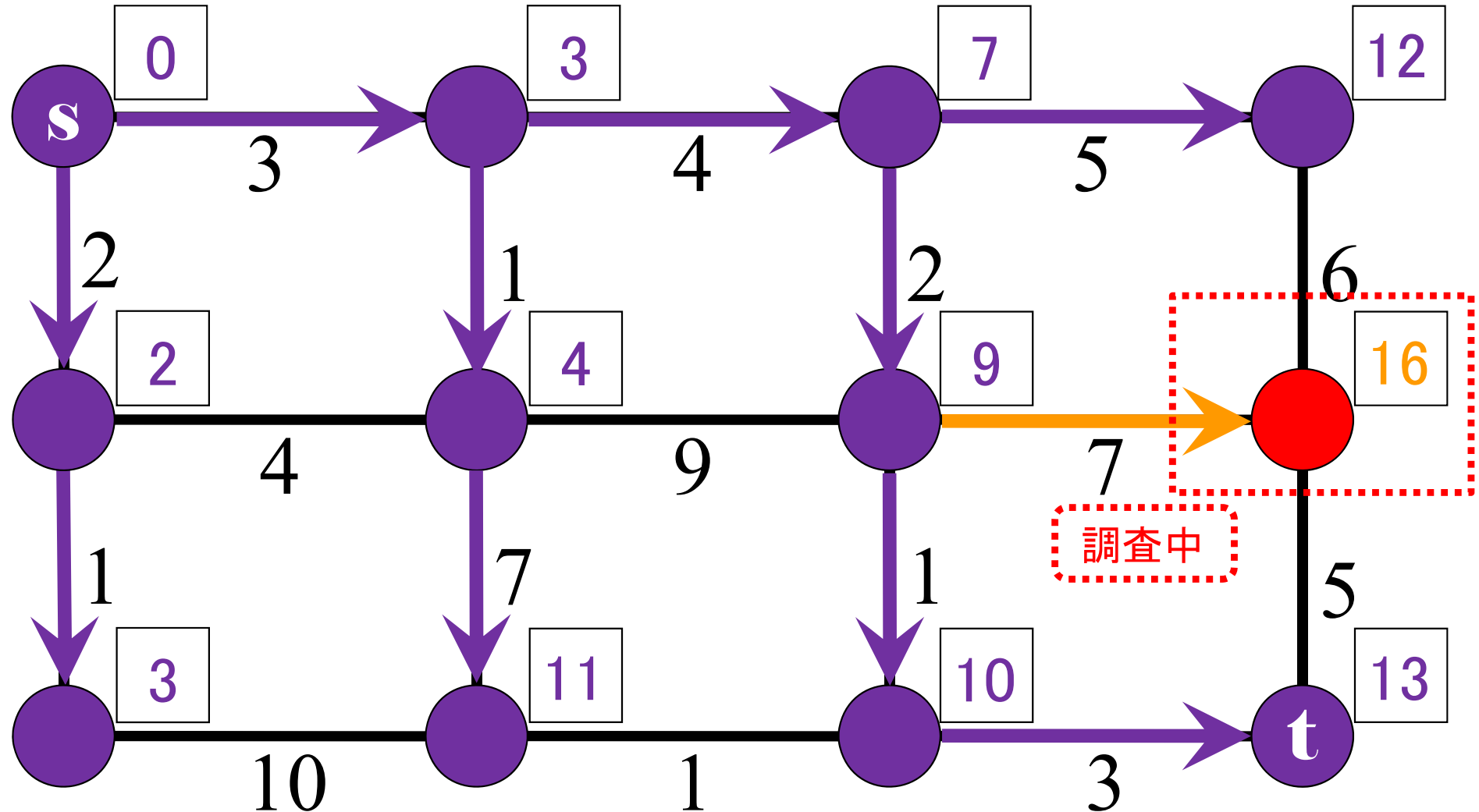
Dijkstra法 (更新法)

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

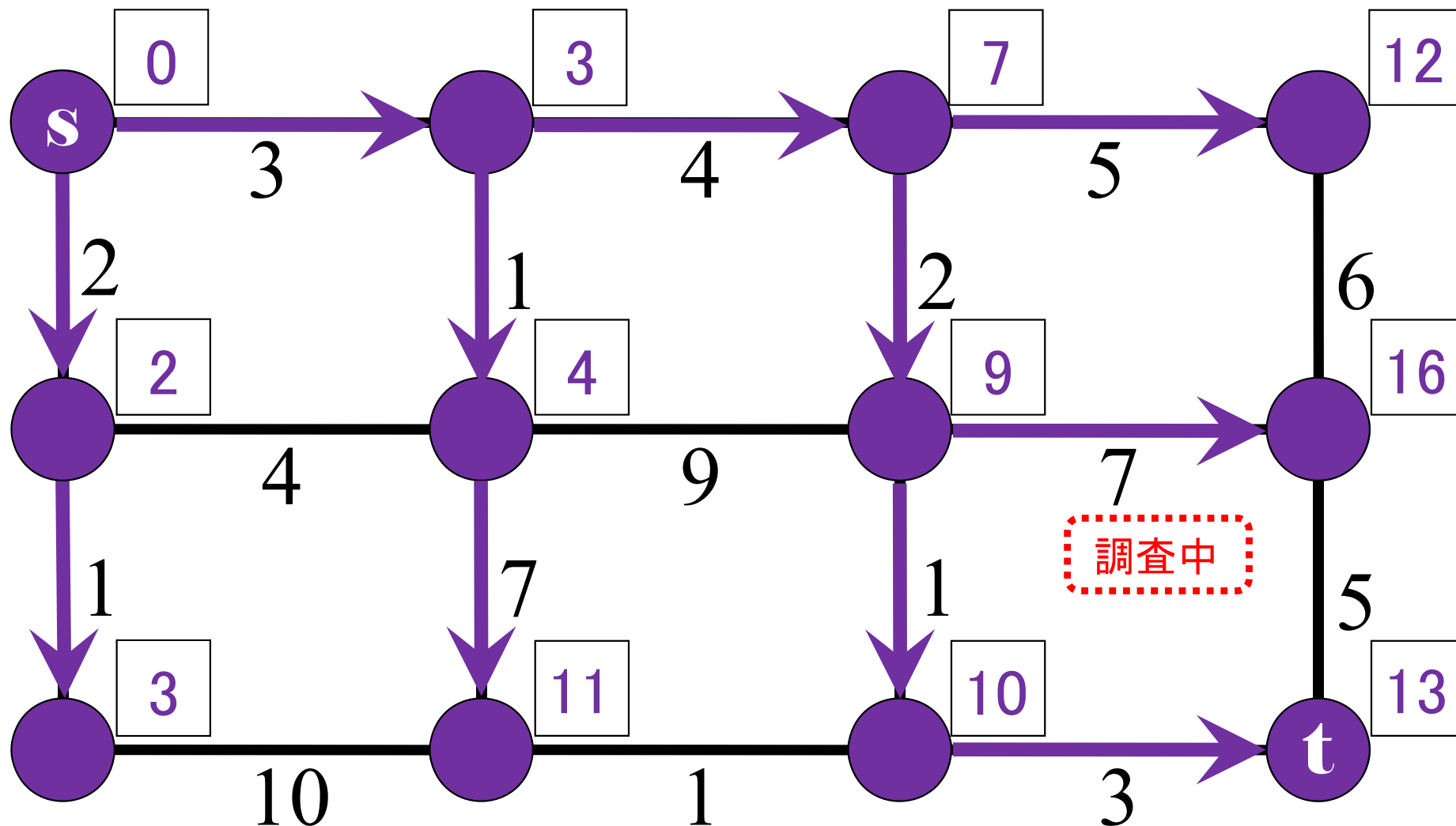
step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、
もし、小さい(<)→枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、
枝先点を調査中に追加, そうでないなら何もしない



Dijkstra法 (更新法)

step1-3: 全枝終了したら, 調査中から外しラベル値確定
(その点までの**暫定最短路**が**最短路**として確定)

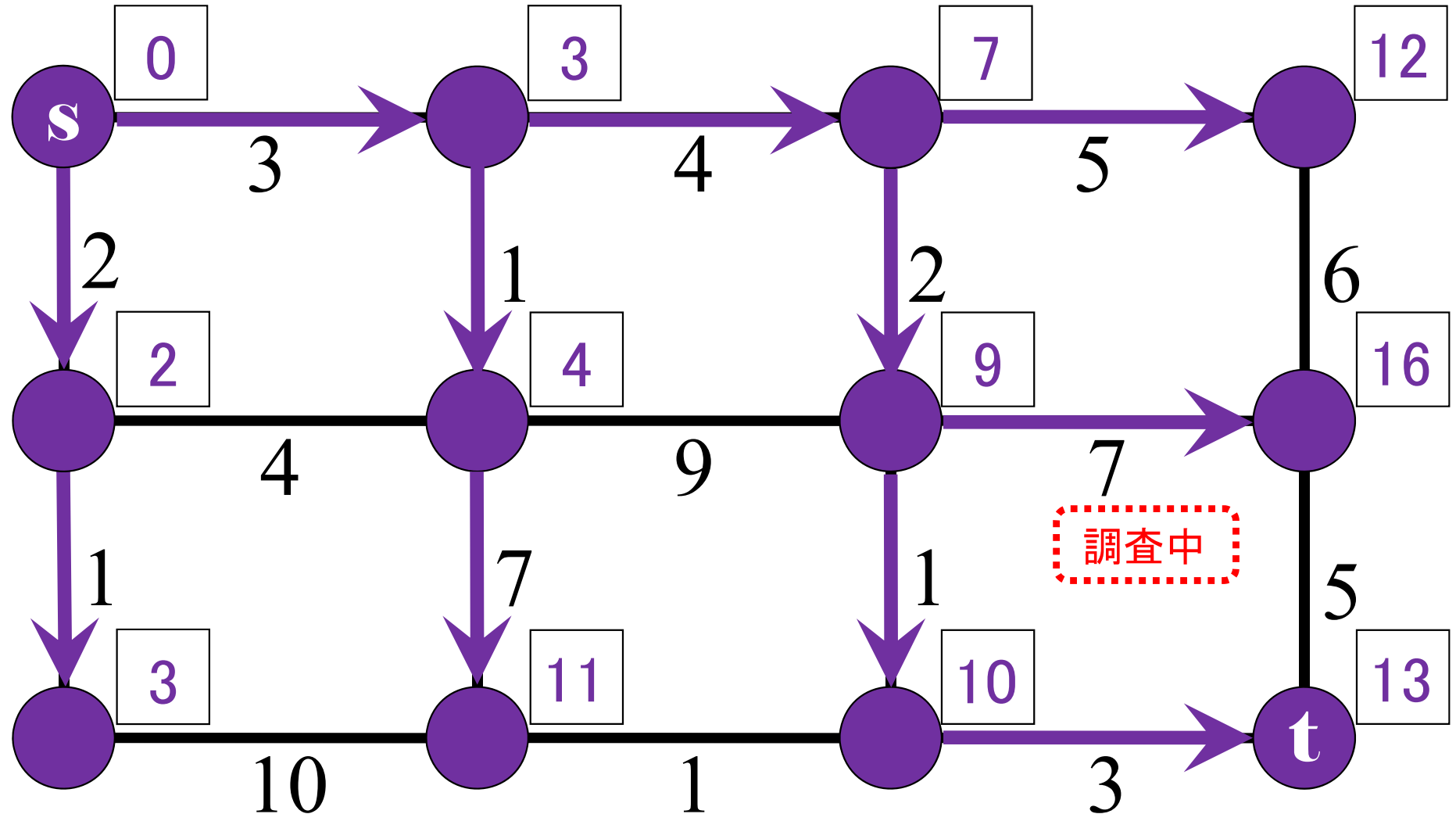
以降**step1-1**~**step1-3**を
終了条件を満たすまで繰り返す



Dijkstra法

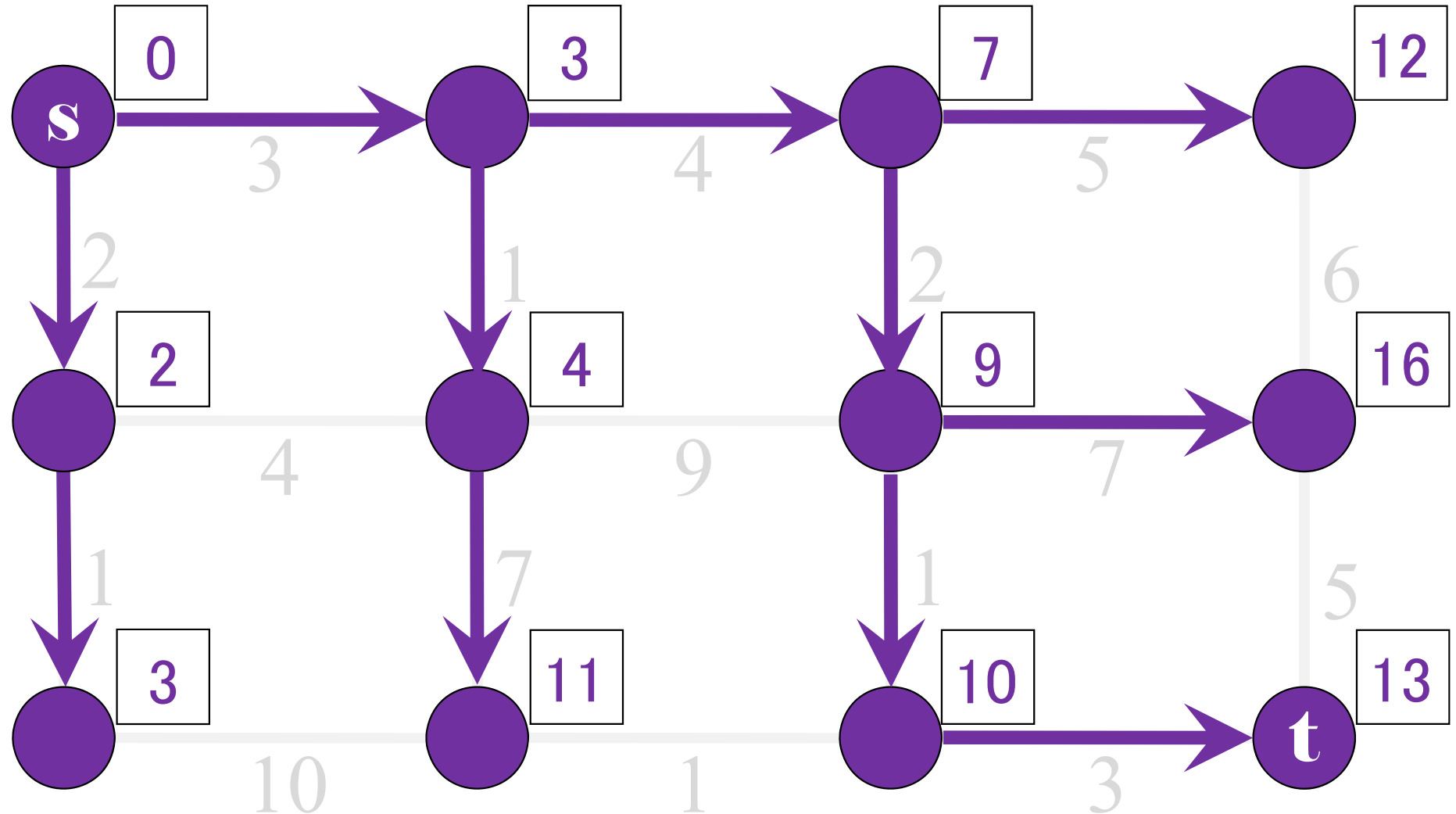
(終了判定)

step2: 調査中の点集合が空なら終了



Dijkstra法終了後

【注】「スタートから全頂点への最短路が求まっている」ことに注意



Dijkstra法

(初期設定)

step0: start点のラベルを0にし、その他のラベルを ∞ に設定する

start点 **S** を調査中の点集合 $\{s\}$ とする

(更新法)

step1-1: 調査中点のうちで、ラベル値が最小の点を見つける

step1-2: その点から出る全枝について「ラベル+枝コスト」を計算し、枝先点のラベル値と比較し、もし、小さい($<$) → 枝先点のラベル更新(暫定最短路)し、枝先点を調査中に追加、そうでないなら何もしない

step1-3: 全枝終了したら、調査中から外しラベル値確定(その点までの暫定最短路が最短路として確定)

step1-1 ~ **step1-3** を終了条件を満たすまで繰り返す

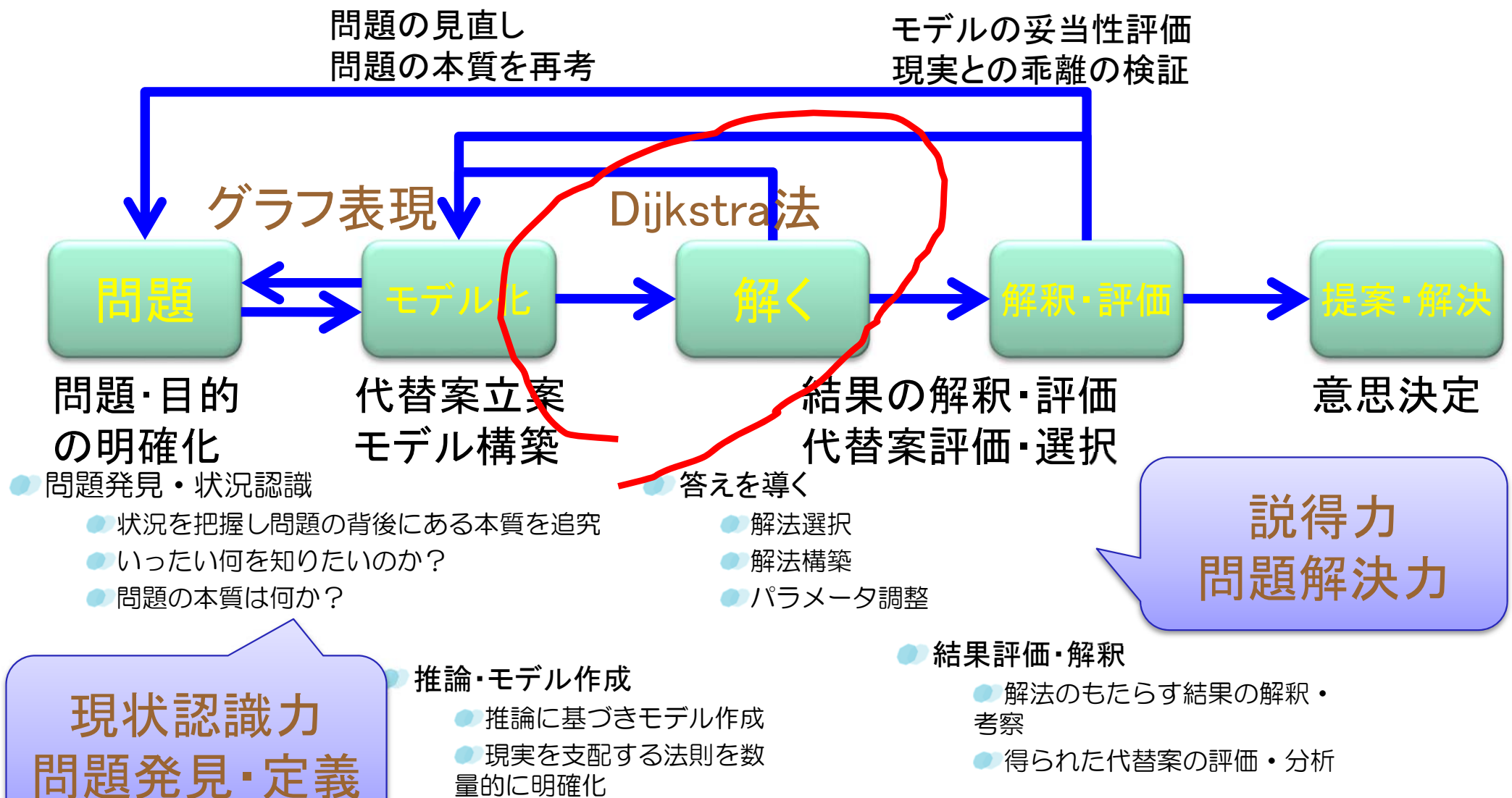
(終了判定)

step2: 調査中の点集合 $\{ \quad \}$ が空なら終了

意思決定

論理的思考力
データ分析, 統計学
数理的アプローチ

- 「問題の把握」から「意思決定」までの流れ



評価: Dijkstra法って速いのか？



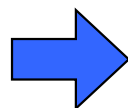
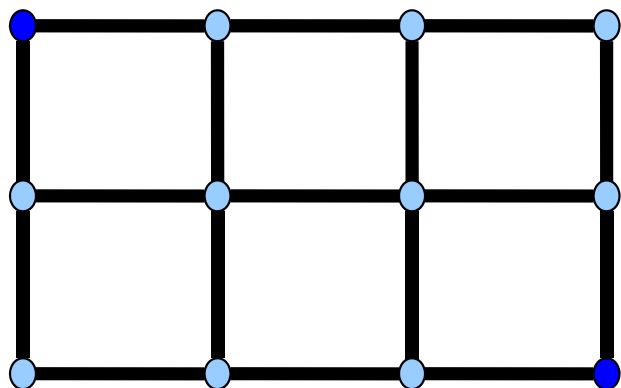
- 点の数を n とすると, 大雑把な見積もりで,

$$O(n^2) \quad \text{多項式オーダー}$$

$$O(m + n \log n)$$

- 点の数 n を右向枝数 R , 下向枝数 D で表すと

$$n = (R + 1) \times (D + 1)$$



$$n = (3 + 1) \times (2 + 1) = 12$$

$$n^2 = 12^2 = 144$$

コンピュータに計算させてみよう！

簡単のため n^2 の5倍の浮動小数点演算回数で計算できると仮定.

評価: Dijkstra法って速いのか？

10.51PFLOPS

51.2GFLOPS

R(横) D(縦)	全経路	京 & しらみつぶし	Core i7 & Dijkstra
3 2	10	0.0000000000 秒	0.0000000001 秒
6 4	210	0.0000000000 秒	0.0000000003 秒
10 5	3,003	0.0000000000 秒	0.0000000006 秒
20 10	30,045,015	0.0000000086 秒	0.0000000023 秒
25 25	1.3×10^{14}	0.601382523 秒	0.0000000066 秒
30 30	1.2×10^{17}	11 分	0.0000000094 秒
40 40	1.1×10^{23}	26 年	0.0000000164 秒
50 50	1.0×10^{29}	30,439,996 年	0.0000000254 秒
100 100	9.1×10^{58}	4.0×10^{27} 宙齡	0.0000000996 秒
500 500	2.7×10^{299}	5.9×10^{268} 宙齡	0.000024512 秒

世界最速SuperComp
+ 力技 (しょぼい方法)

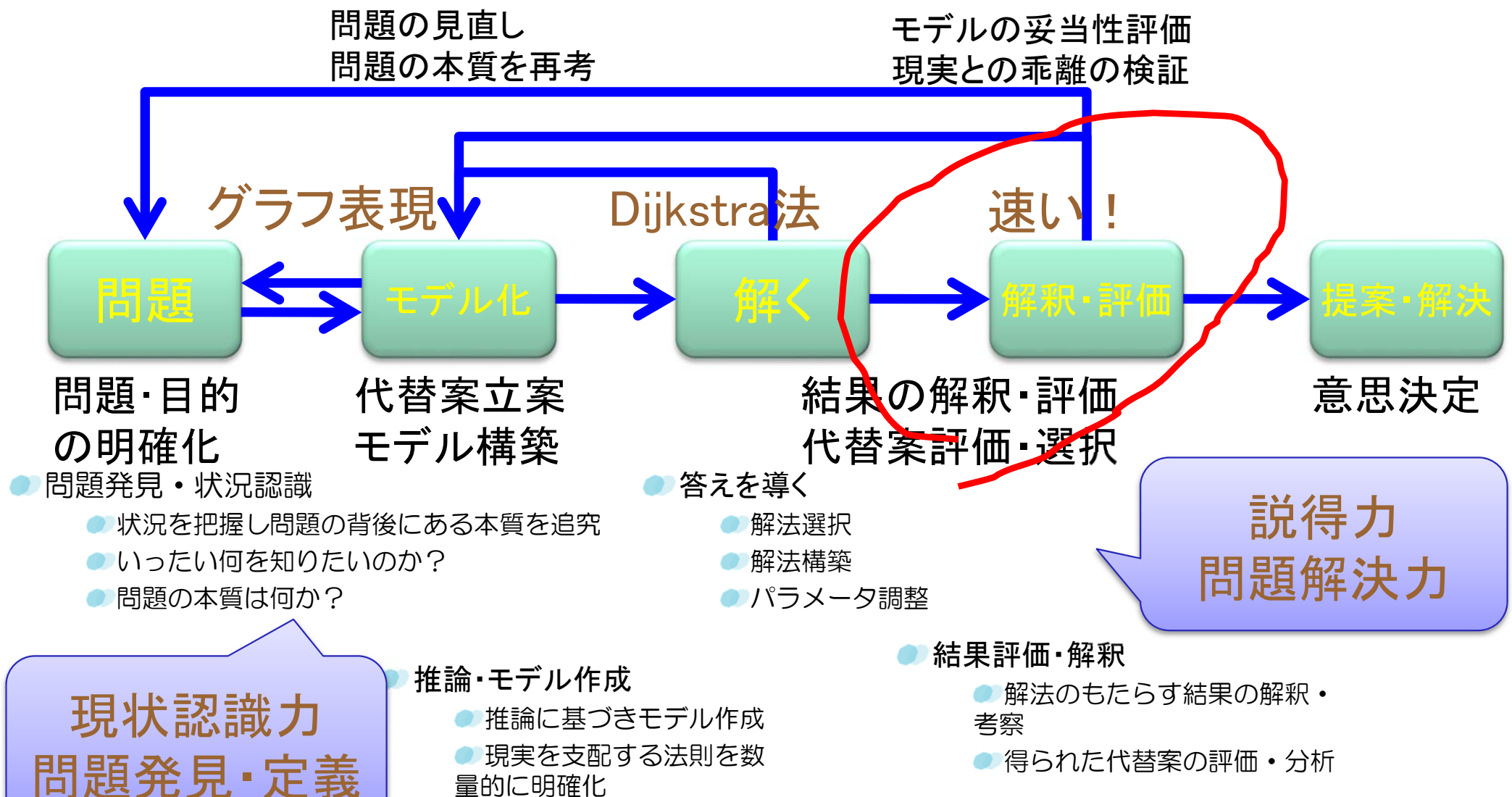


そこらのPC
+ 人間の知恵

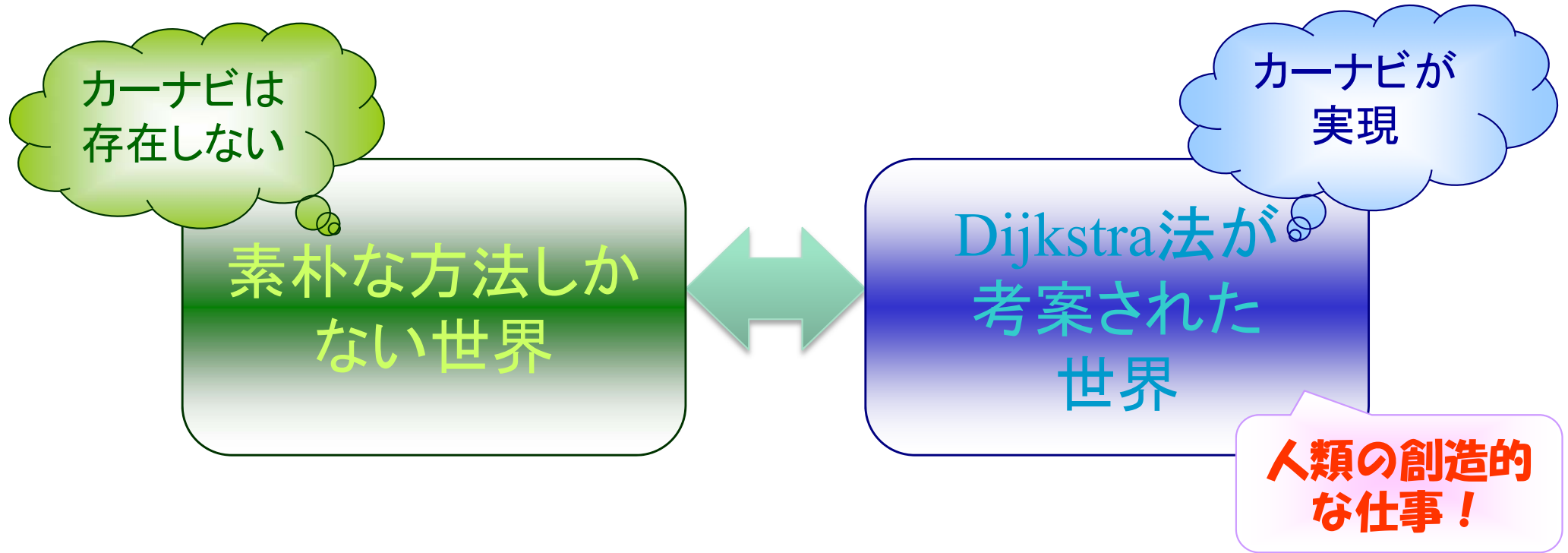
意思決定

論理的思考力
データ分析, 統計学
数理的アプローチ

- 「問題の把握」から「意思決定」までの流れ



意思決定支援・ビジネスサポート



参考文献

コンピュータに仕事を奪われつつある人類...

- [1] 新井紀子
「コンピュータが仕事を奪う」日経新聞社(2010)
- [2] E. Brynjolfsson, A. McAfee, 村井章子訳
「機械との競争」日経BP社(2013)



もっと知りたい人へ

- 参考文献

- グリッツマン, ブランデンベルク「**最短経路の本**」 シュプリンガー(2008)
- W.J.クック「**驚きの数学 巡回セールスマン問題**」 青土社(2013)
- 山本, 久保「**巡回セールスマン問題への招待**」 朝倉書店(1997)
- 久保, 松井「**組合せ最適化『短編集』**」 朝倉書店(1999)
- 松井, 根本, 宇野「**入門オペレーションズ・リサーチ**」 東海大出版(2008)

- 関連する授業

- 「**ネットワークモデル分析**」(4セメ)
- 「**最適化モデル分析**」(5セメ) etc...