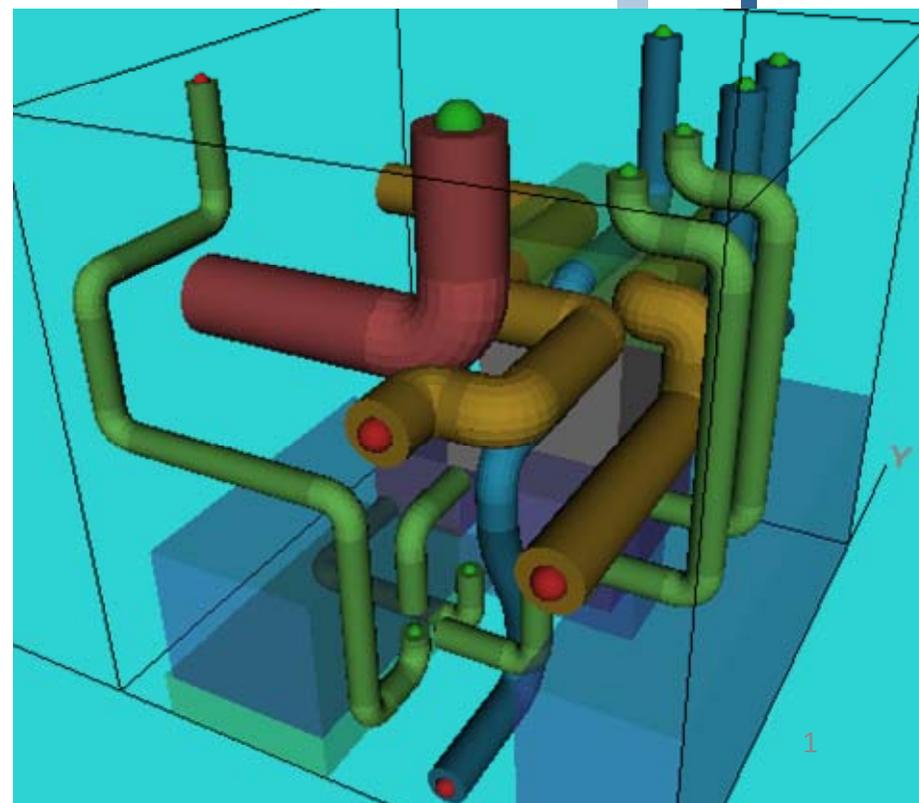




配管経路自動設計に関する研究

九州大学 大学院工学研究院
海洋システム工学部門
准教授 木村 元

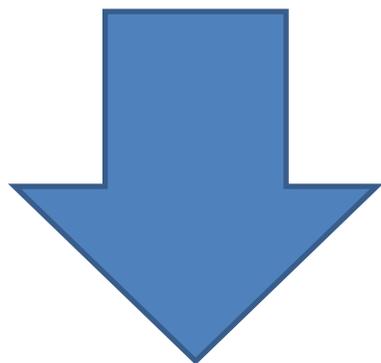
九州大学 大学院工学府
海洋システム工学専攻
博士課程3年 安藤 悠人



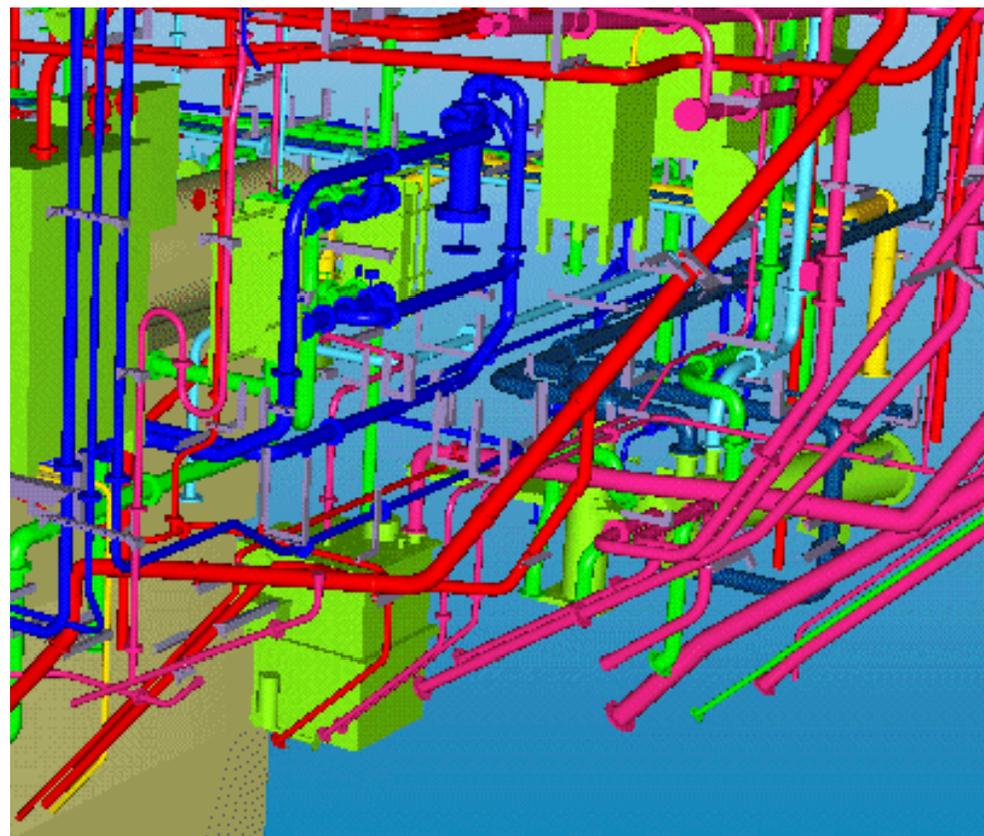
研究目的



- 現状：ベテラン設計者頼み・人海戦術
- 船舶の配管：**狭隘空間**に無理やり詰め込む



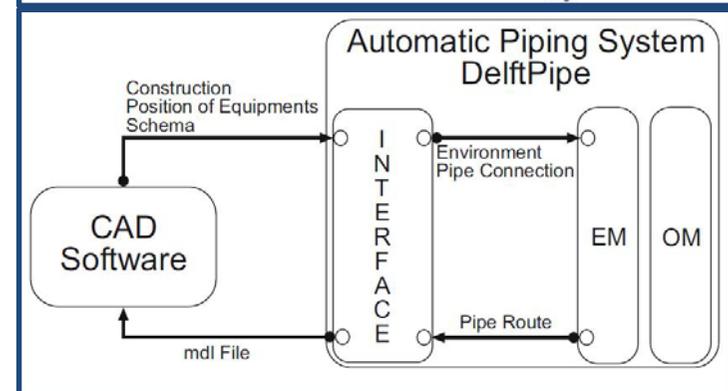
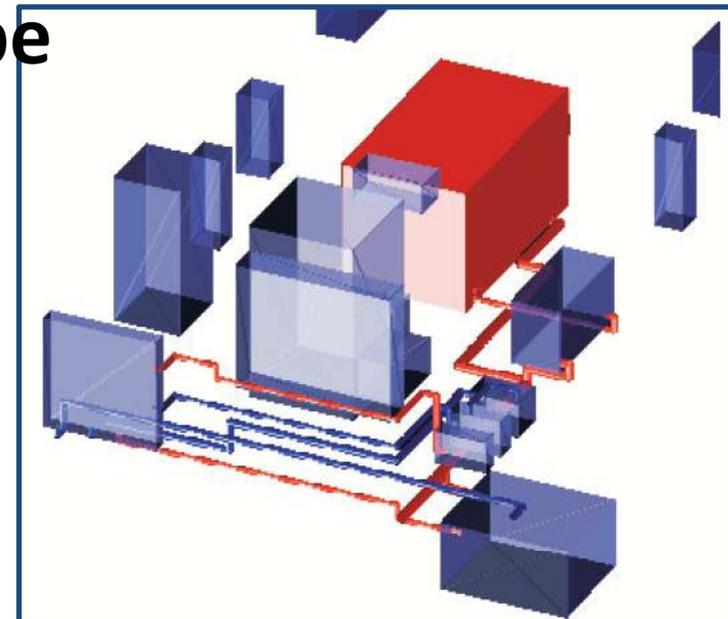
解決策：
自動配管設計
システムの構築





◆ Asmara等の研究: Delft-Pipe

- 配管設計問題をグラフ上の経路探索問題に帰着させた
- ダイクストラ法を適用し、最小コストの経路を探索
- 空間をメッシュ状に分割する際の間隔がパイプの直径以上に制約される



先行研究

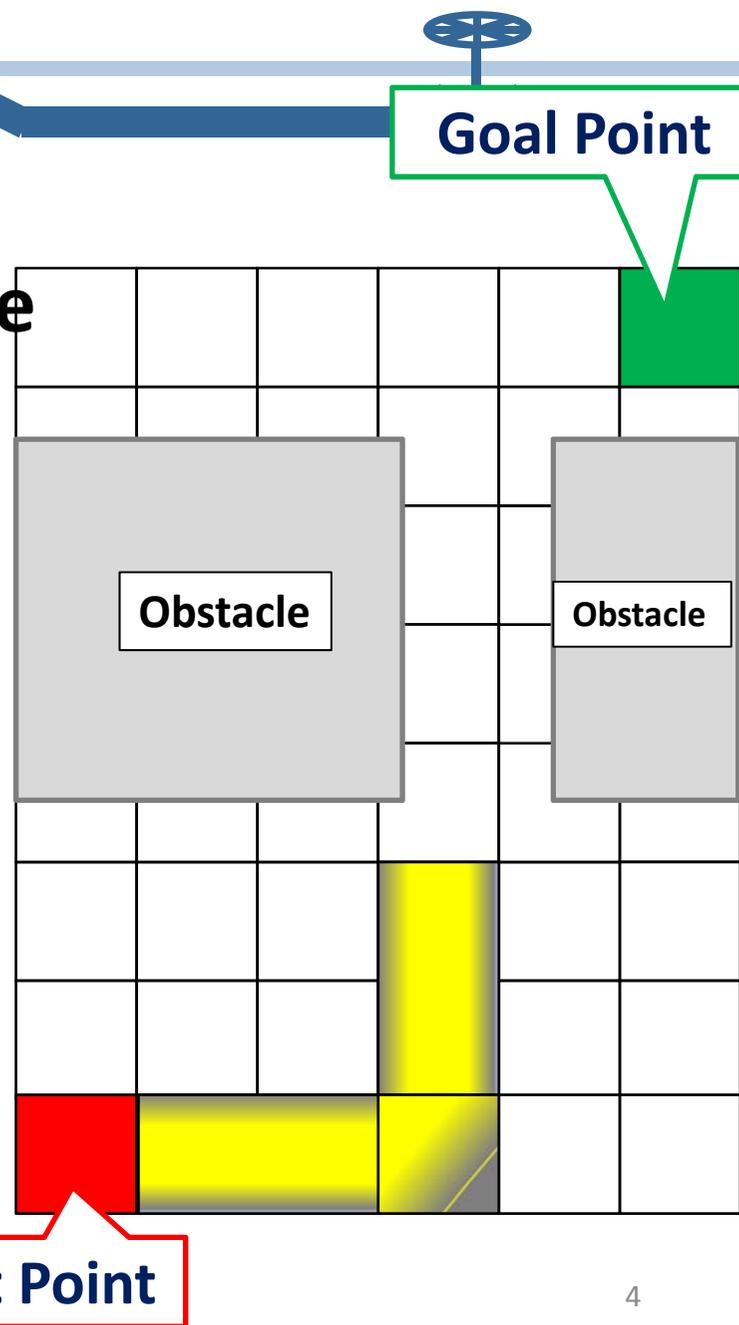
◆ Asmara等の研究: Delft-Pipe

- 配管設計問題をグラフ上の経路探索問題に帰着させた
- ダイクストラ法を適用し、最小コストの経路を探索

• 空間をメッシュ状に分割する際の間隔がパイプの直径以上に制約される

パイプの直径が大きい場合

× 配管設計問題において大きな制約条件



※Paulo等, Ito等



◆ 研究背景・目的

1. 配管1本における経路探索

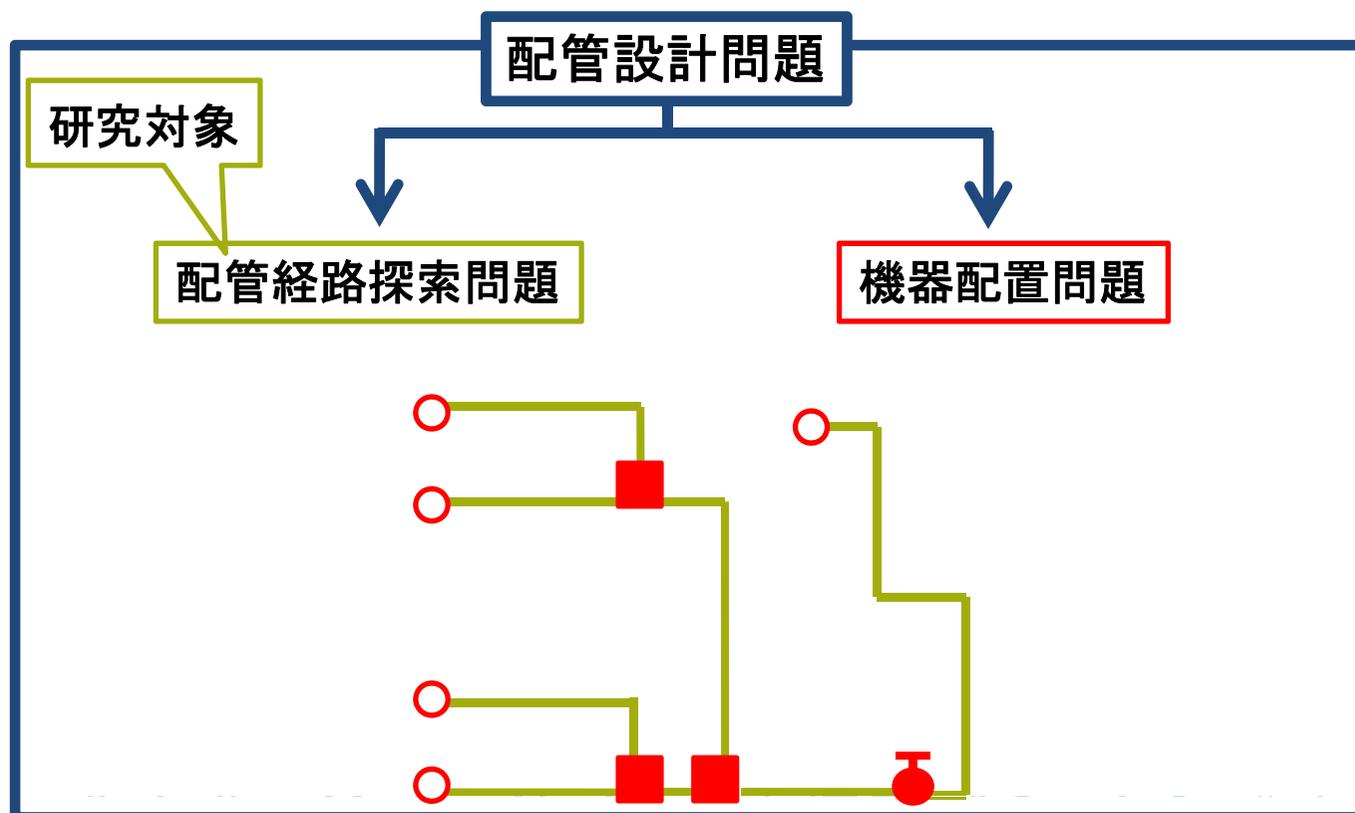
2. 複数配管に

3. シミュレーシ

◆ 結論

- アプローチ
- ダイクストラ法
- 各パイプピース
- パイプラック空間と通路空間
- 鳥居配管
- メッシュ分割

アプローチ



- 対象とするパイプ

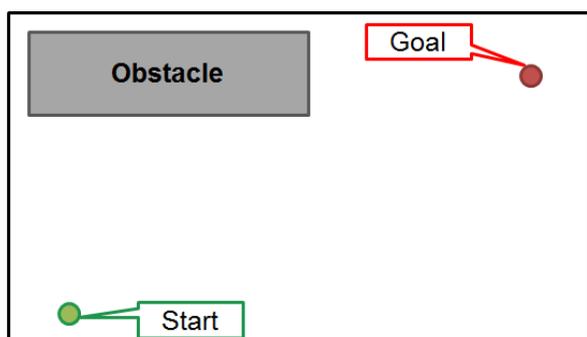
: 分岐を持たず、始点から終点まで直径が変化しないパイプ

アプローチ

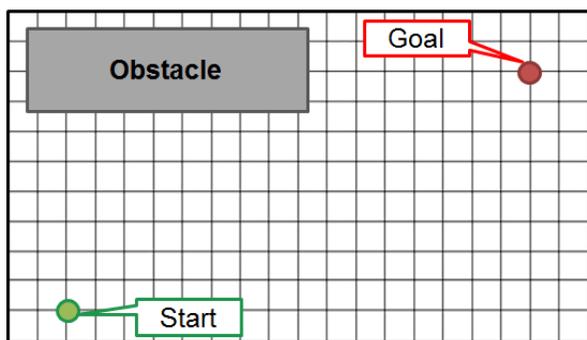


配管経路探索問題 = グラフ上の最短経路探索問題

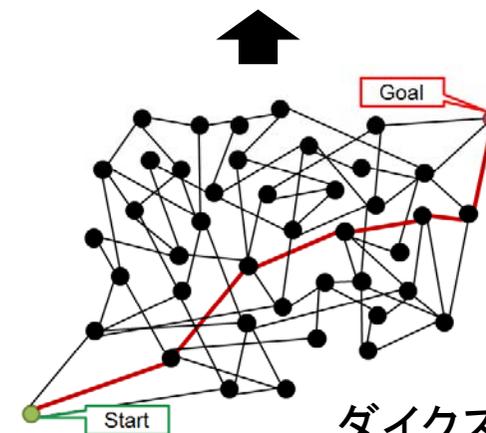
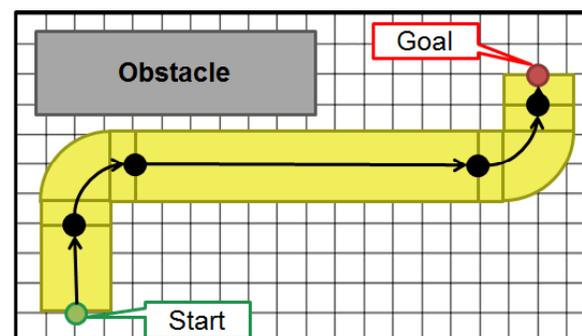
↓
ダイクストラ法



↓ 空間を離散化



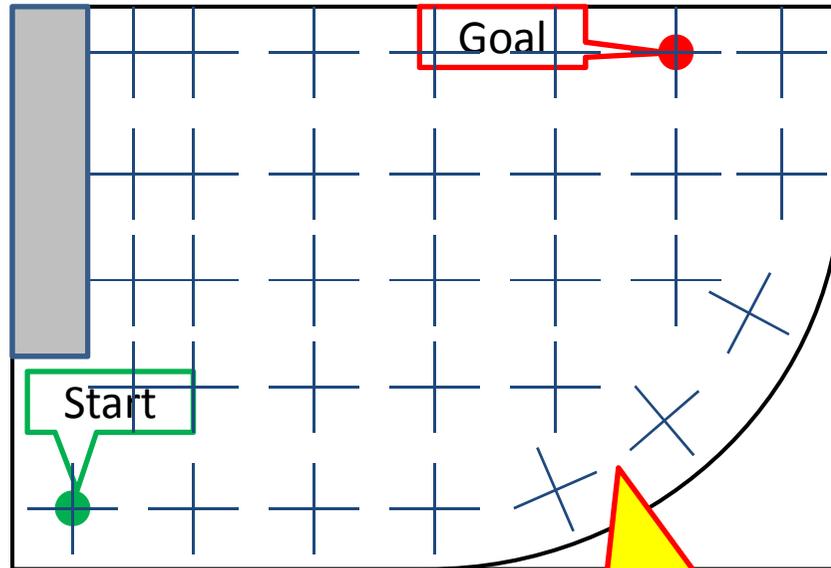
→
グラフ化



ダイクストラ法で
最短経路探索

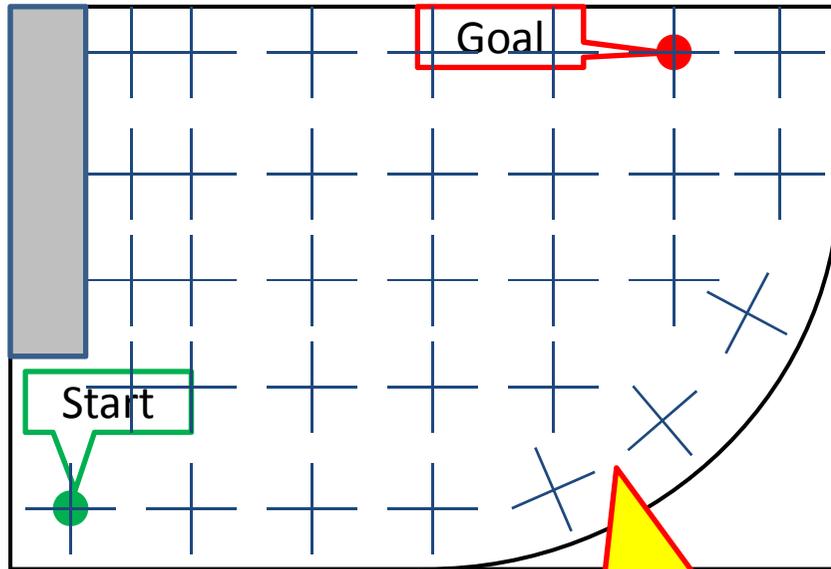
メッシュの分割幅はパイプ径に依存せず

空間の離散化について(曲面を持つ船殻への対応)



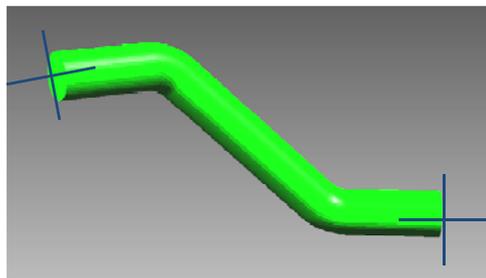
ローカル座標系を持つ基準点を配置

空間の離散化について(曲面を持つ船殻への対応)

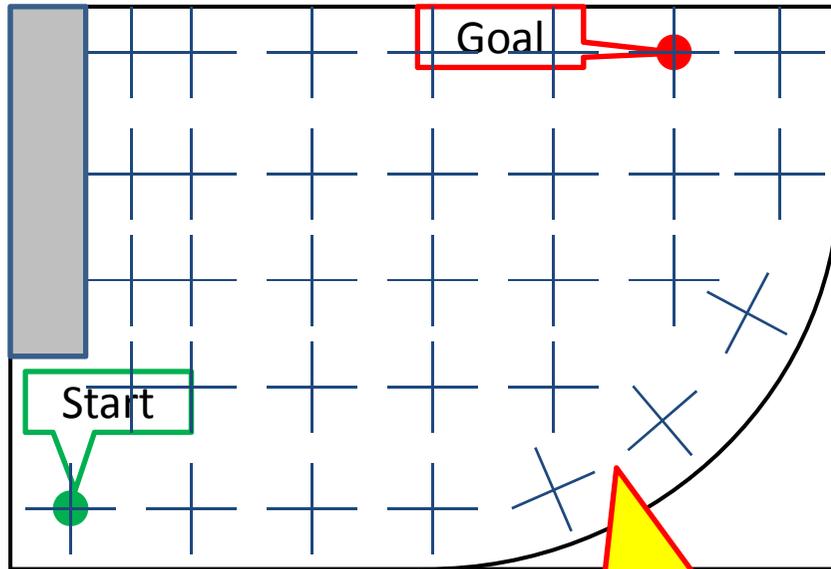


ローカル座標系を持つ**基準点**を配置

隣接する**基準点**同士を各座標軸方向に
ベンド2個以下のパイプで繋がるかどうか判定

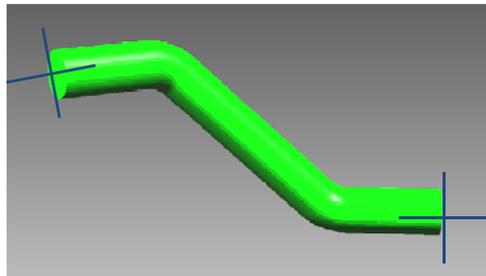


空間の離散化について(曲面を持つ船殻への対応)

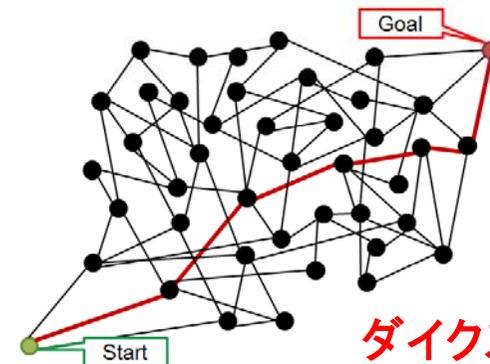


ローカル座標系を持つ基準点を配置

隣接する基準点同士を各座標軸方向に
ベンド2個以下のパイプで繋がるかどうか判定

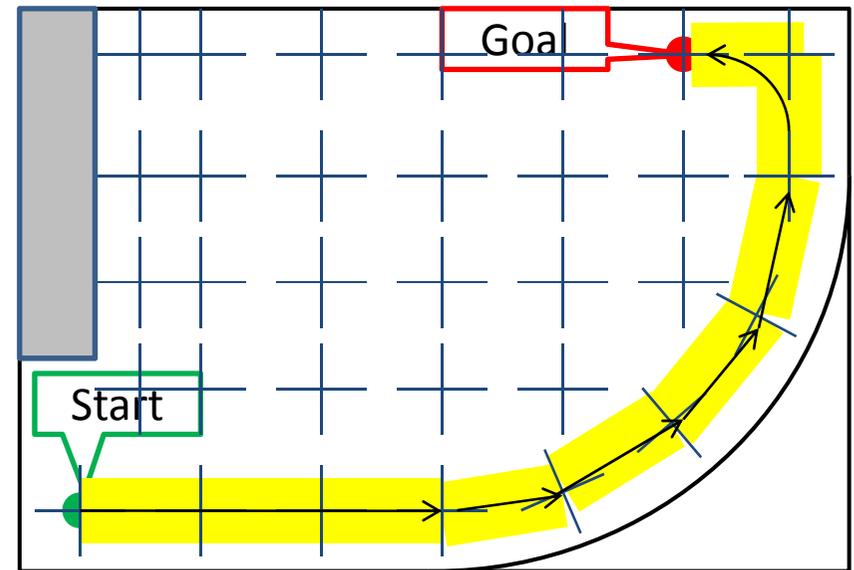
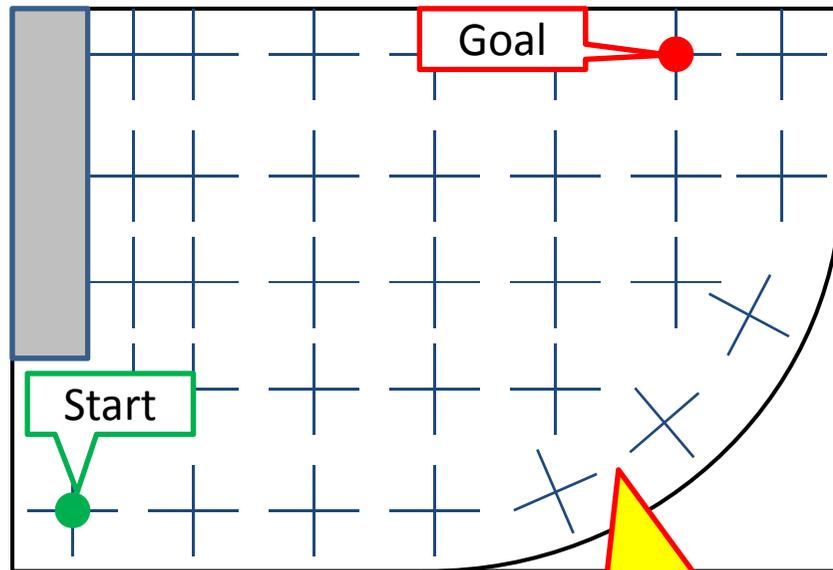


グラフ化



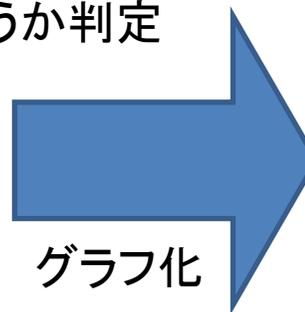
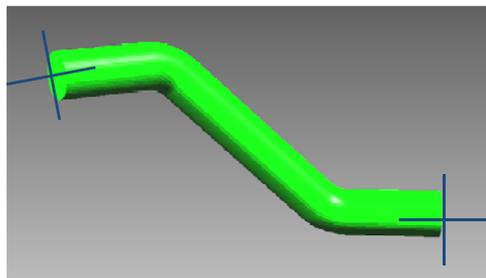
ダイクストラ法で
最短経路探索

空間の離散化について(曲面を持つ船殻への対応)

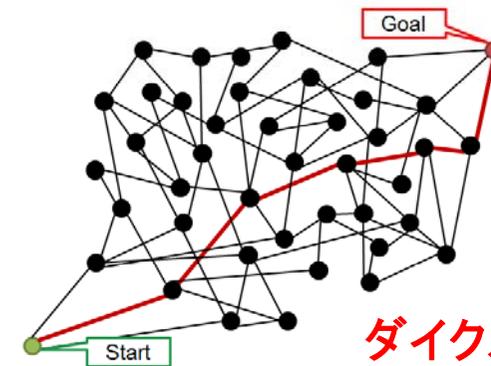


ローカル座標系を持つ基準点を配置

隣接する基準点同士を各座標軸方向に
ベンド2個以下のパイプで繋がるかどうか判定



グラフ化



ダイクストラ法で
最短経路探索

パイプ配置

ダイクストラ法

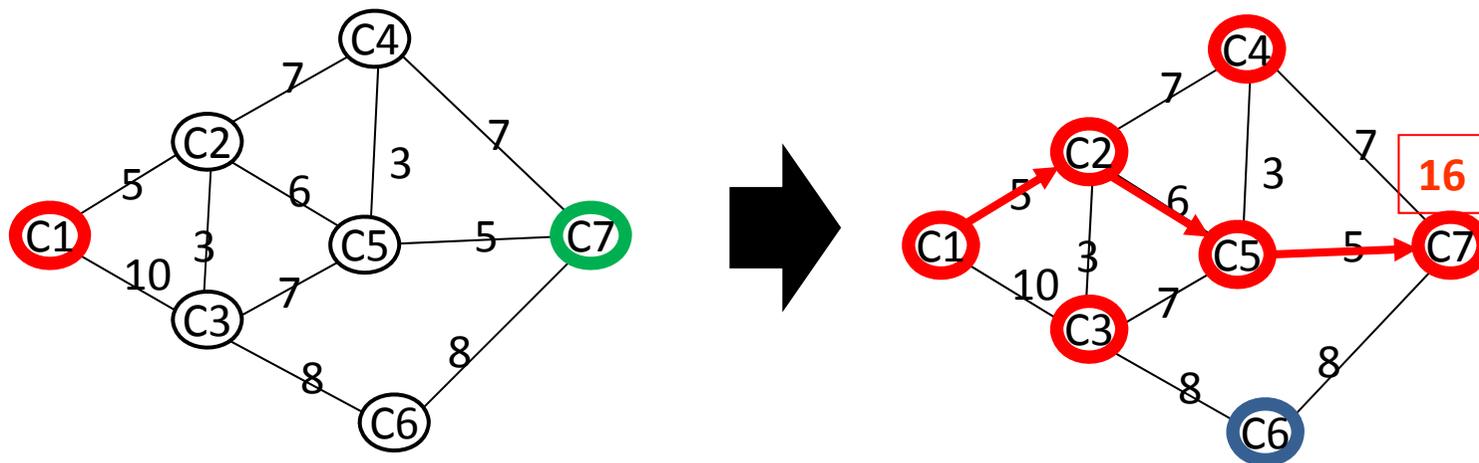


“ダイクストラ法”とは...

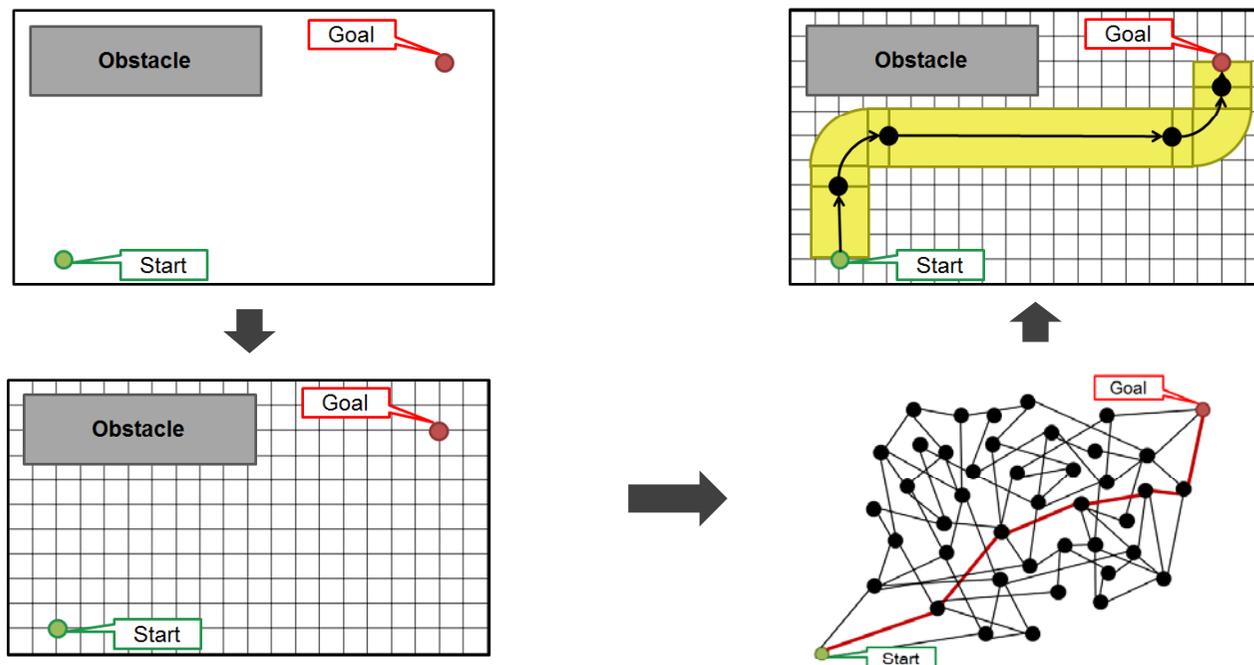
グラフ構造の問題に対して任意の2点間を結ぶ最小コストの経路を求めるアルゴリズム.

エッジに非負の重みが設定されている場合, 最短経路の獲得が保証されている.

C1とC7を結ぶ最小コストの経路は？



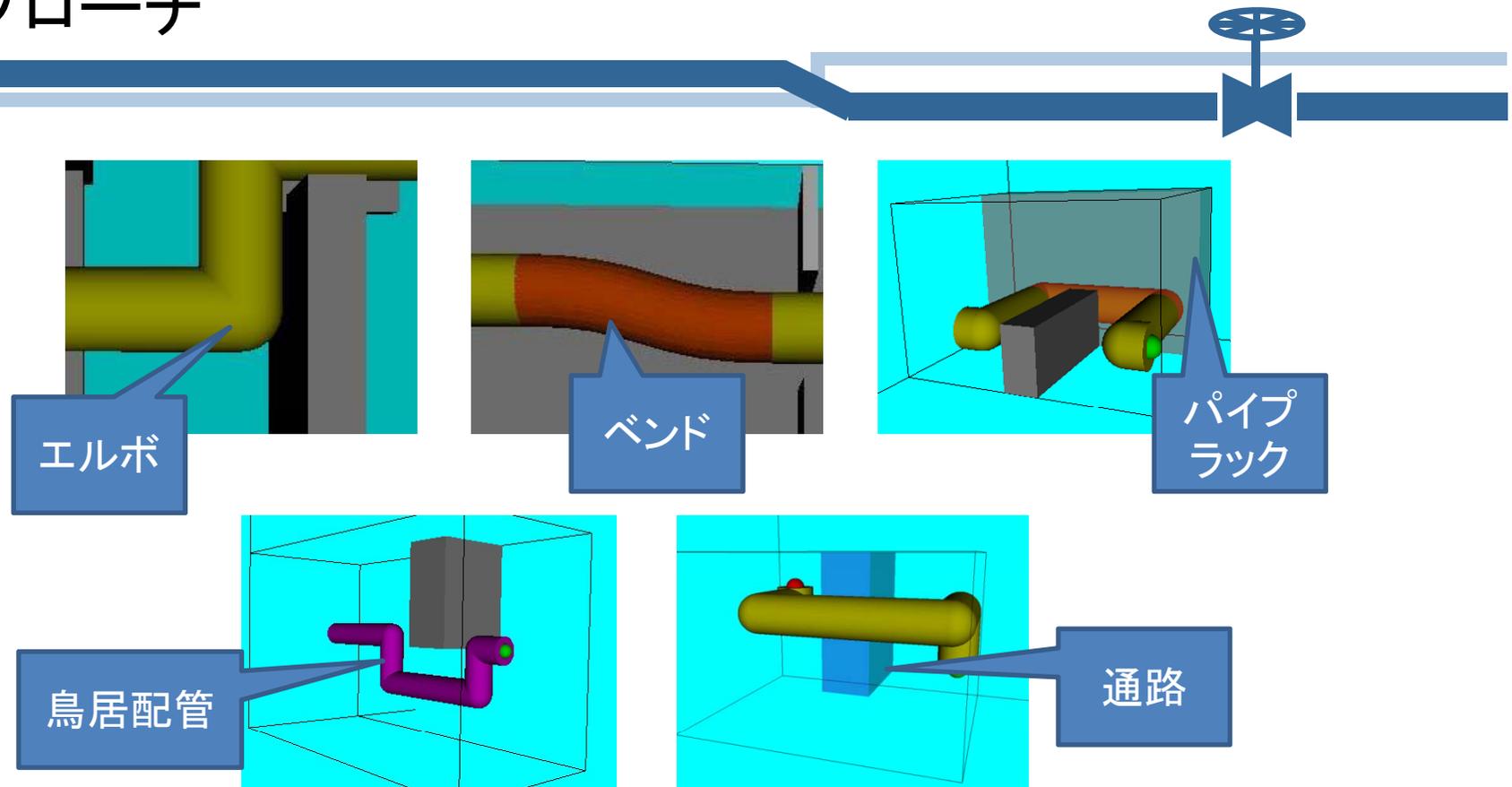
アプローチ



グラフ構造へ置き換える利点

- **ダイクストラ法**などの経路探索の利用 → 確実に**最適解が獲得**される
- エッジの重みとして、設計項目のコストを反映 → 実用的な経路の獲得
(設計項目: 実際の設計者が作業中に考慮している点)

アプローチ



グラフ構造へ置き換える利点

- ダイクストラ法などの経路探索の利用 → 確実に解が獲得される
- エッジの重みとして、設計項目のコストを反映 → 実用的な経路の獲得

(設計項目: 実際の設計者が作業中に考慮している点)

各パイプピース

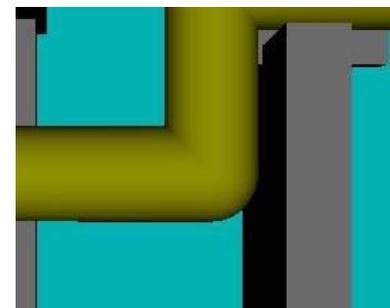


パイプピース: 配管経路を構成するパイプのパーツ

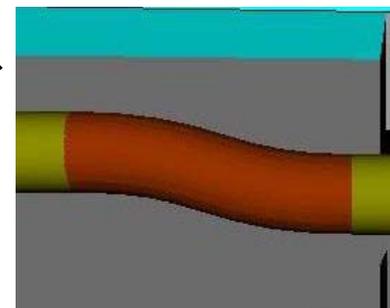
システム内で考慮されているパイプピース

直管: 真直ぐに延びたパイプピース

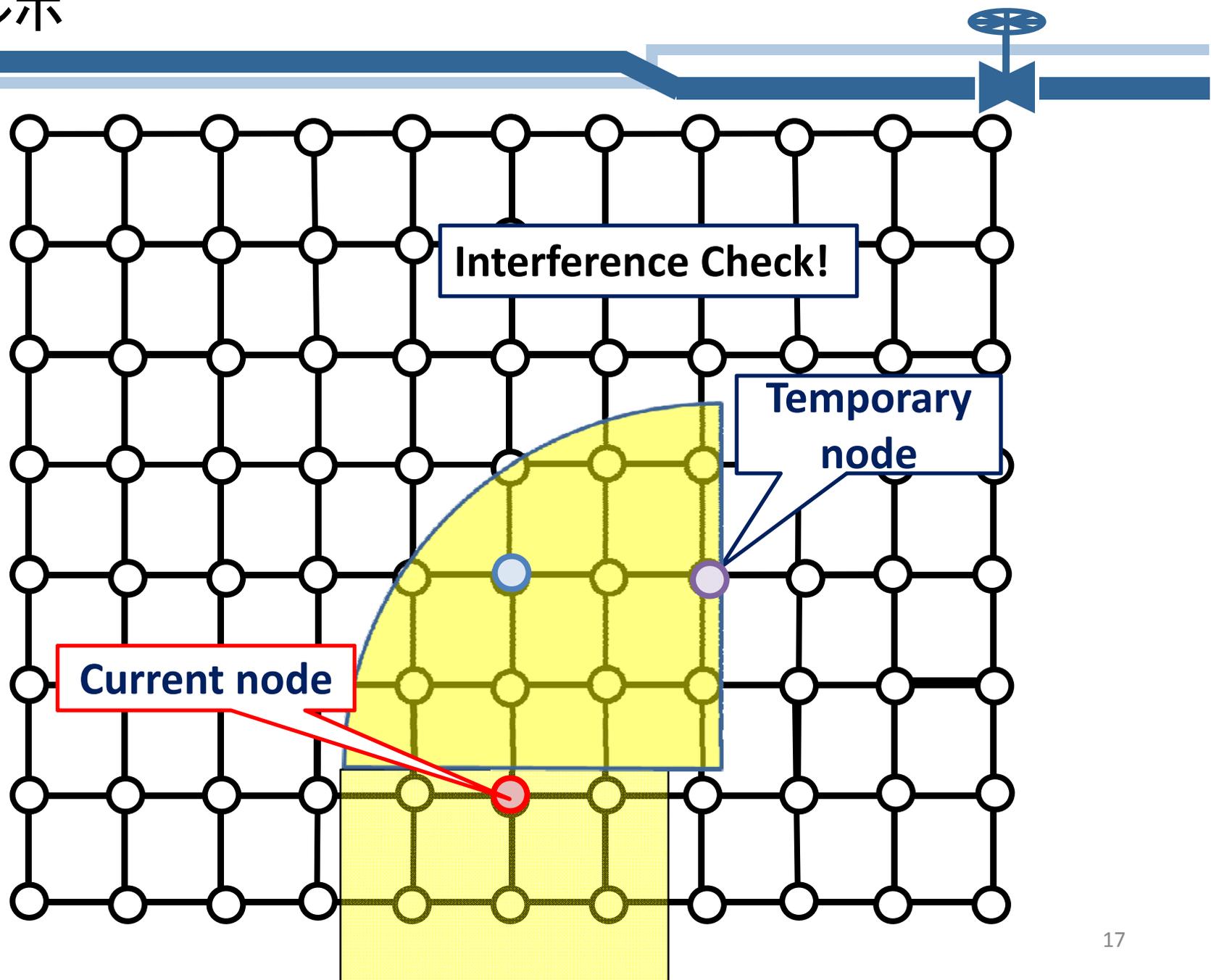
エルボ: 90度に曲がるパイプピース
曲率等のパラメータ有り



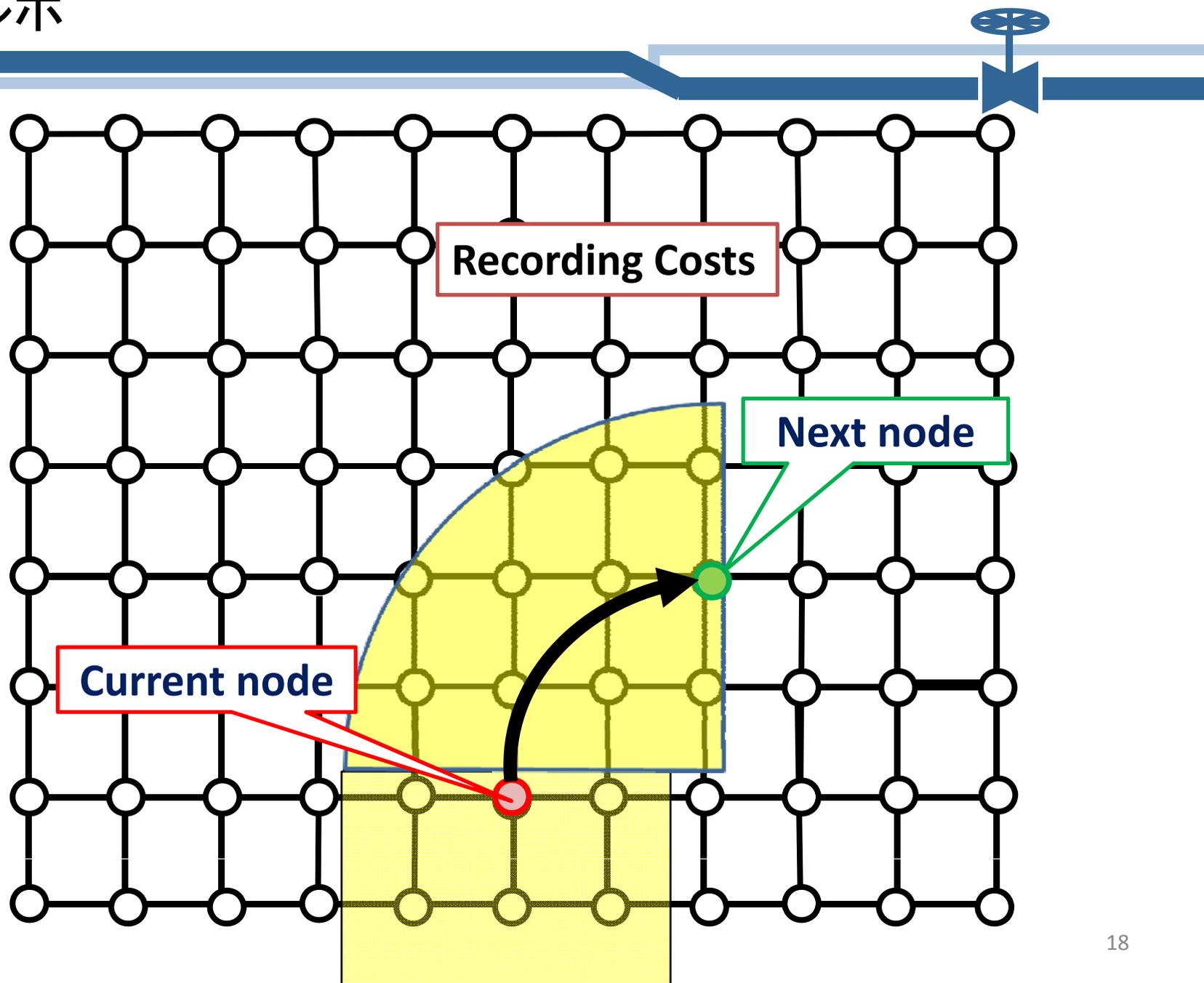
バンド: 局所的に斜めに通過するパイプピース
曲率等のパラメータ有り



エルボ



エルボ

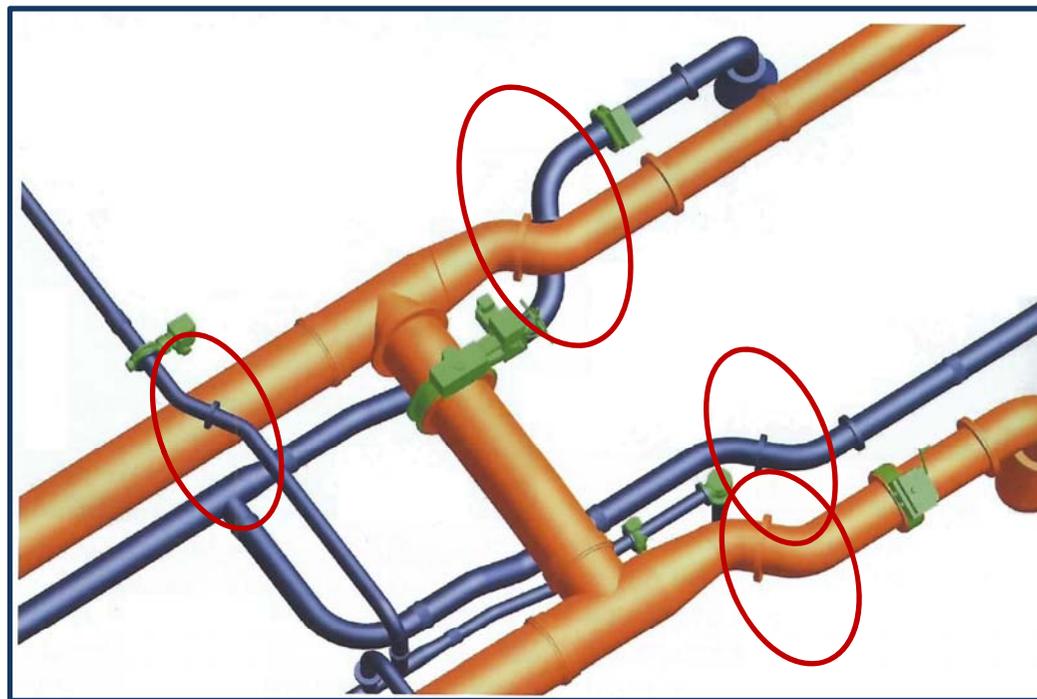


ベンド

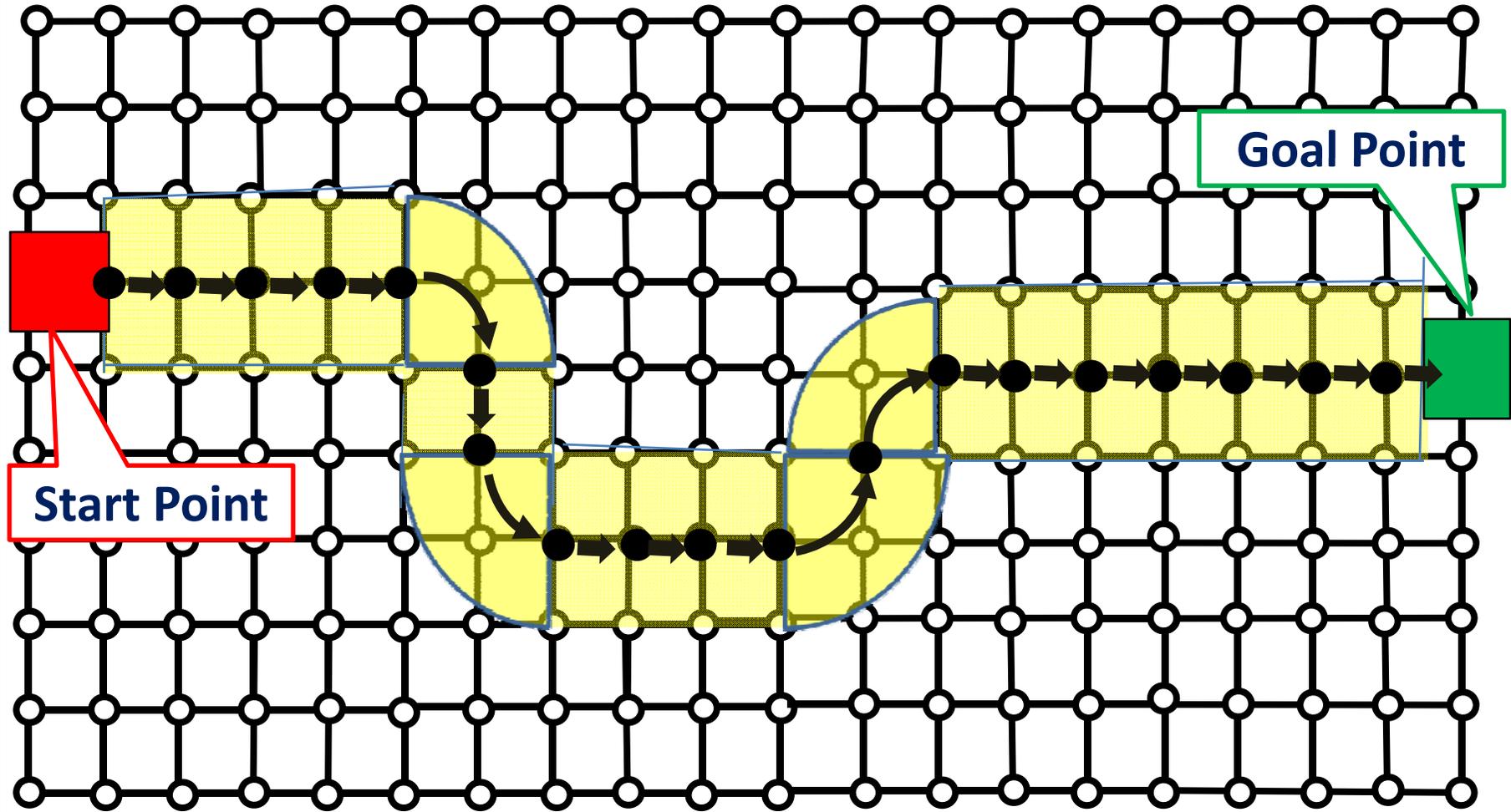


“ベンド”とは...

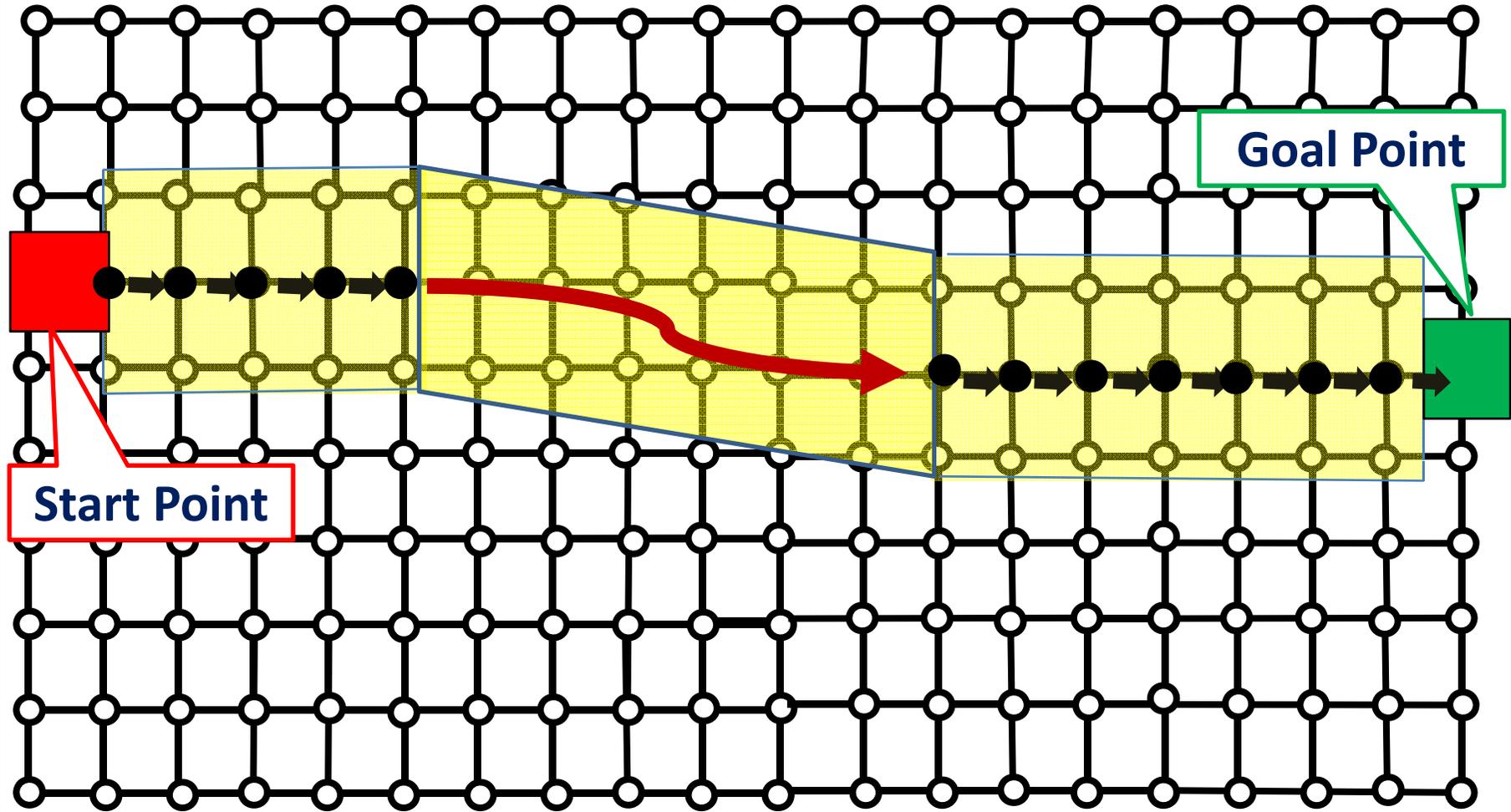
- ベンドとはエルボよりも曲げ半径が大きなパイプピース.
- エルボだけでは対処できない個所に使用される.



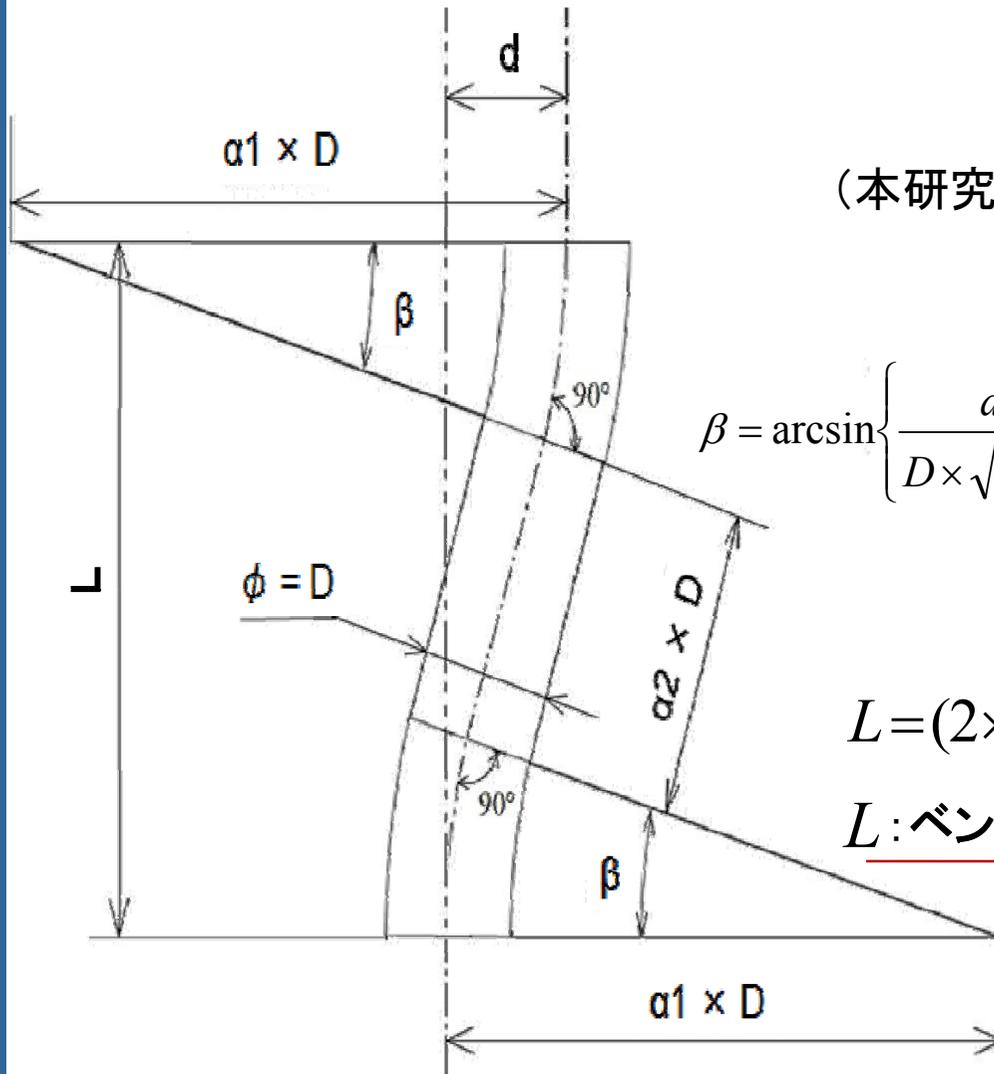
ベンド



ベンド



ベンド



α_1, α_2, d を設定

(本研究では、 $\alpha_1 = 5, \alpha_2 = 0, d < R$ と設定)



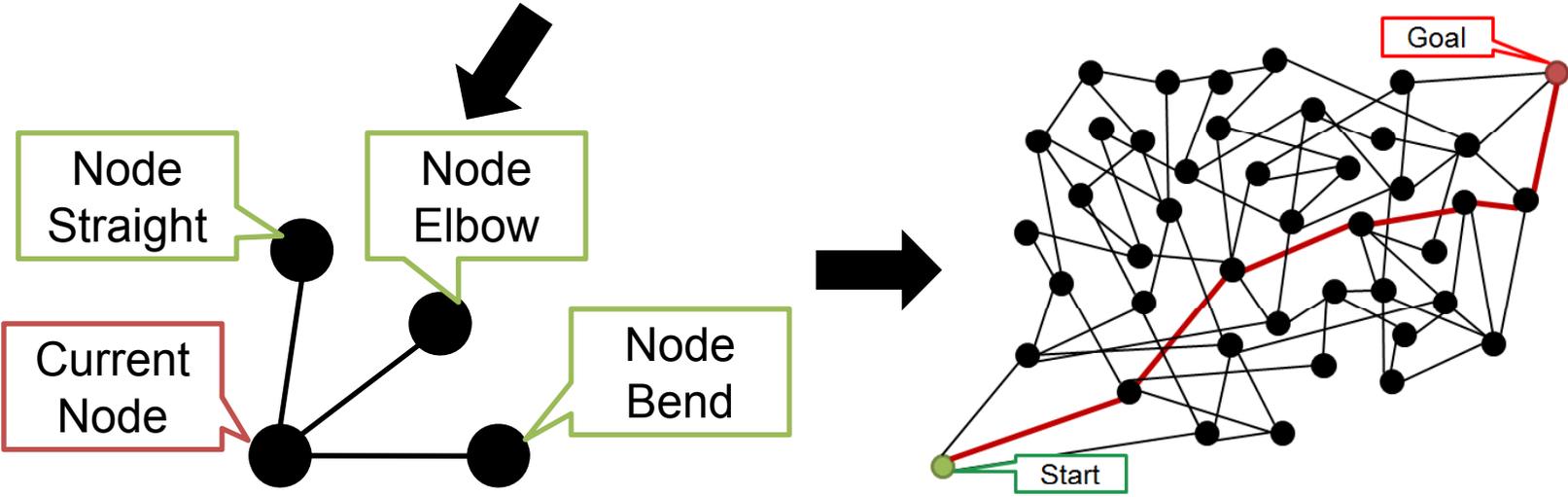
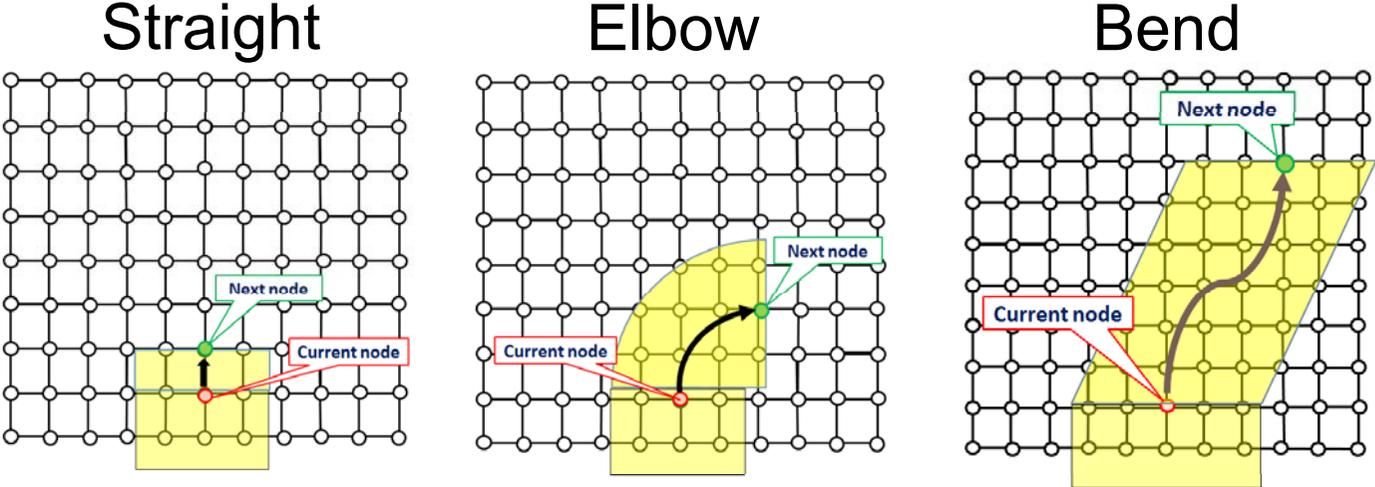
$$\beta = \arcsin \left\{ \frac{d - 2 \times \alpha_1 \times D}{D \times \sqrt{(2 \times \alpha_1)^2 + (\alpha_2)^2}} \right\} + \arcsin \left\{ \frac{2 \times \alpha_1}{\sqrt{(2 \times \alpha_1)^2 + (\alpha_2)^2}} \right\}$$



$$L = (2 \times \alpha_1 \times R \times \sin \beta) + (\alpha_2 \times R \times \cos \beta)$$

L : ベンドを設置するのに必要な最小距離

各パイプピースのコスト



各パイプピースのコスト



直管のコスト(C_S): $d \times D$

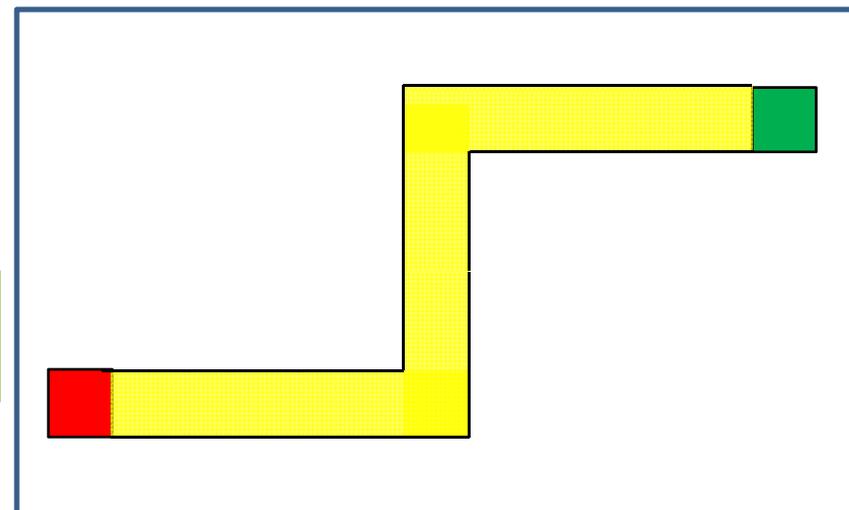
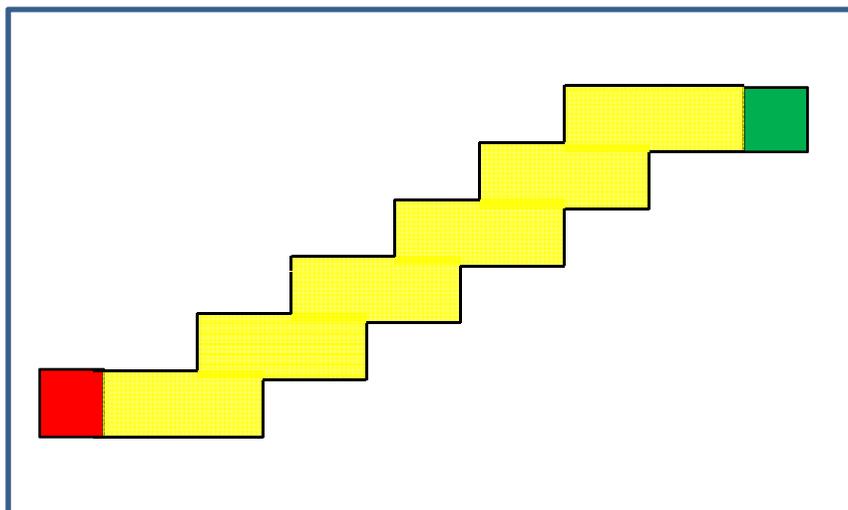
エルボのコスト(C_E): $(d + 0.1) \times D$

ベンドのコスト(C_B): $(d + 0.3) \times D$

ただし,

d : ノード間のマンハッタン距離

D : パイプの直径



各パイプピースのコスト



直管のコスト(C_S): $d \times D$

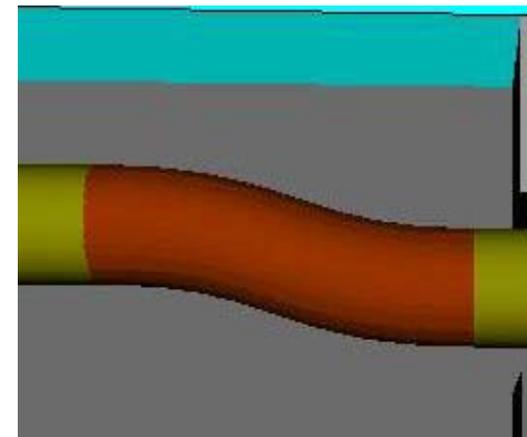
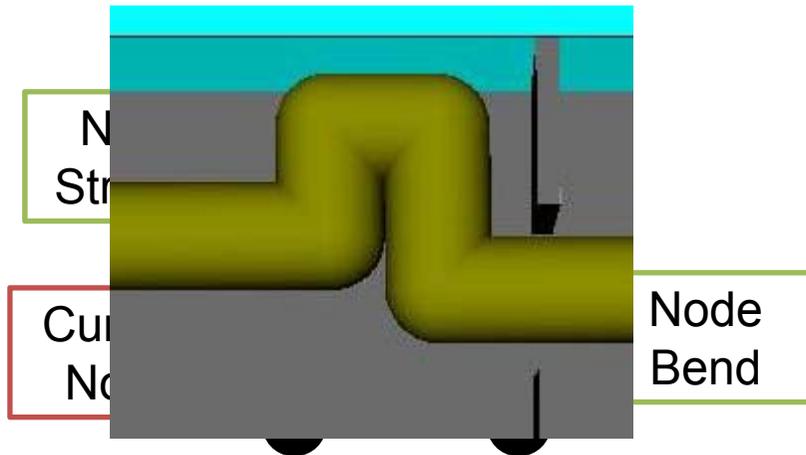
エルボのコスト(C_E): $(d + 0.1) \times D$

ベンドのコスト(C_B): $(d + 0.3) \times D$

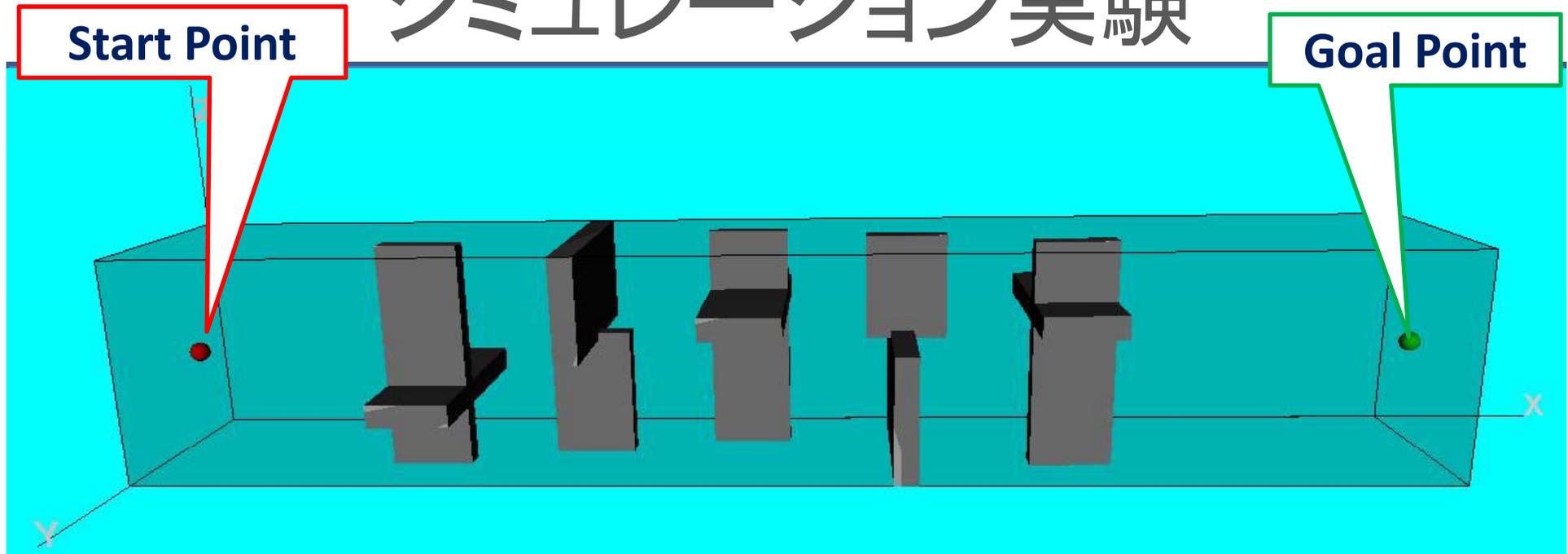
ただし,

d : ノード間のマンハッタン距離

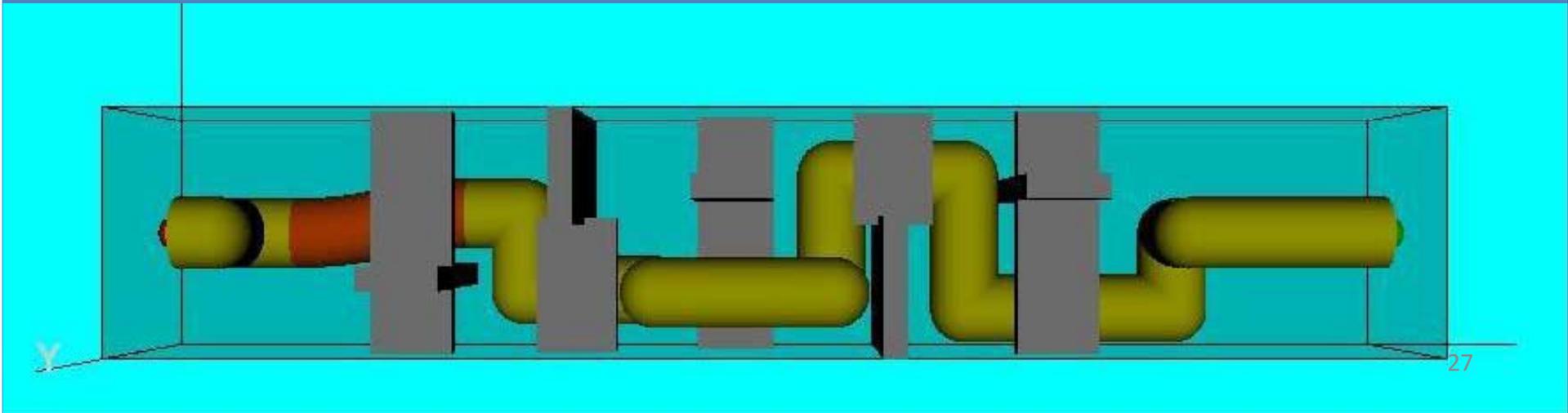
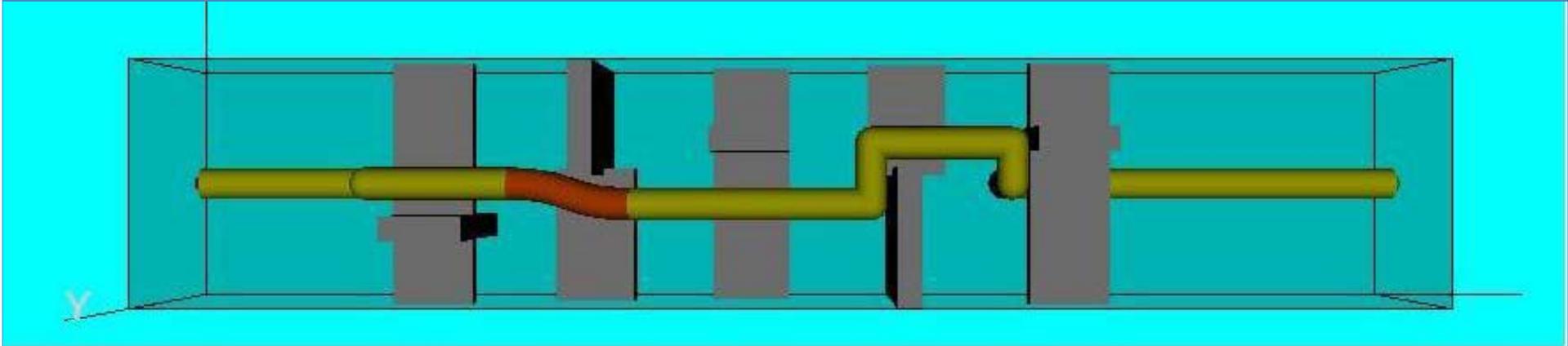
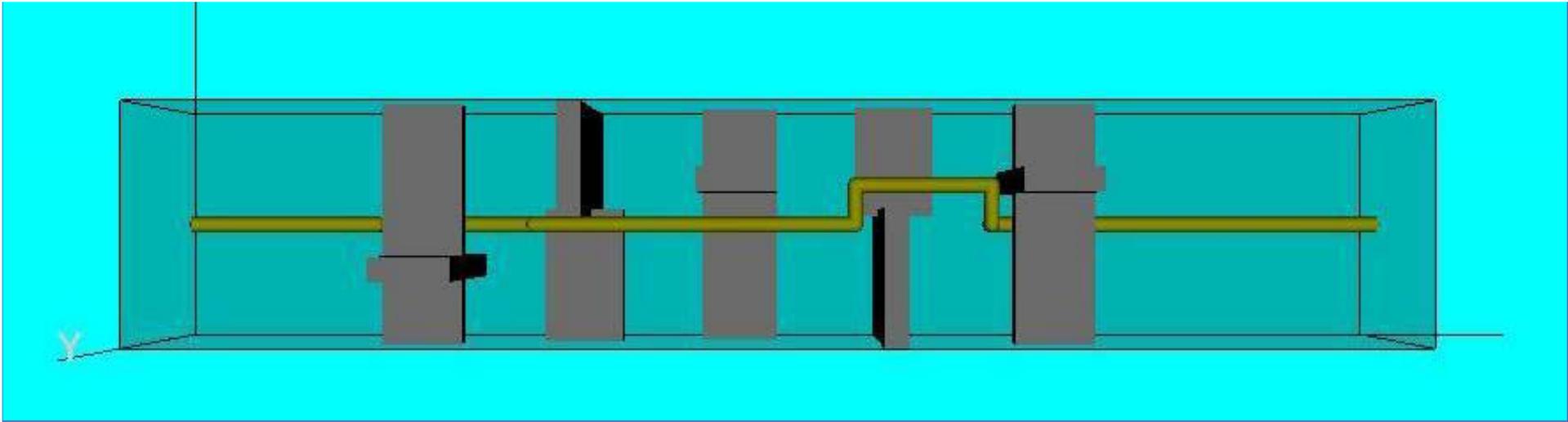
D : パイプの直径



シミュレーション実験



- ・設計対象空間 : Size X 16.75m, Size Y 3m, Size Z 3m
- ・格子分割幅 : Size X 0.25m, Size Y 0.25m, Size Z 0.25m
- ・始点座標および向き: (0.5m, 1.75m, 1.5m), x+
- ・終点座標および向き: (16.5m, 1.5m, 1.5m), x-
- ・障害物として10個の直方体を配置



鳥居配管の回避

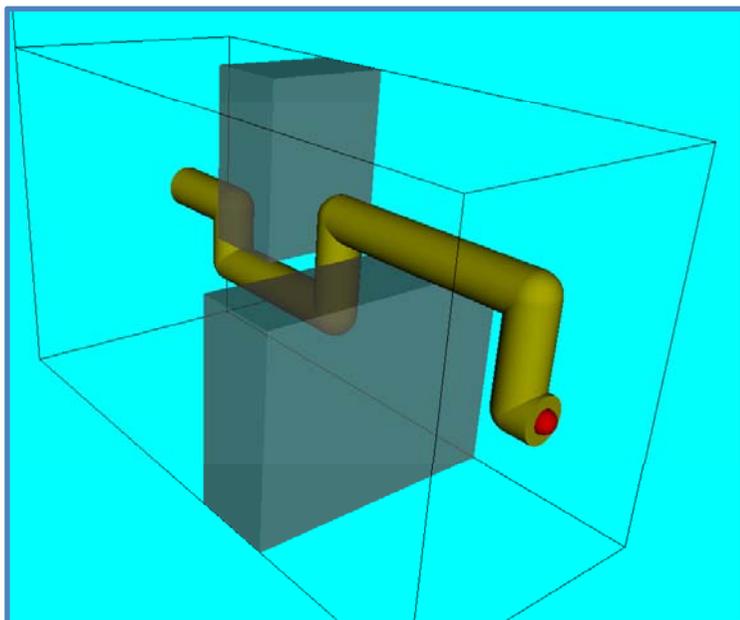


目的

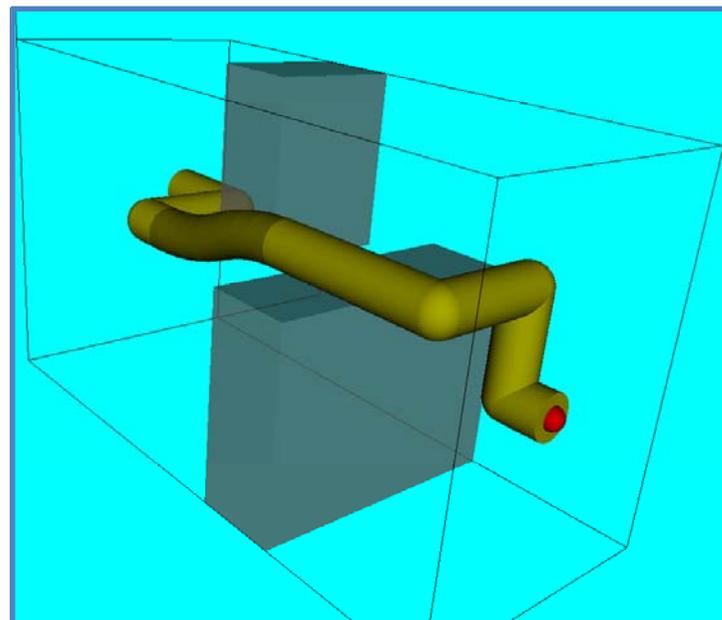
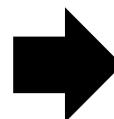
システム内での鳥居配管の取り扱い.

結果

溜りの発生を可能な限り抑えた設計案を獲得.

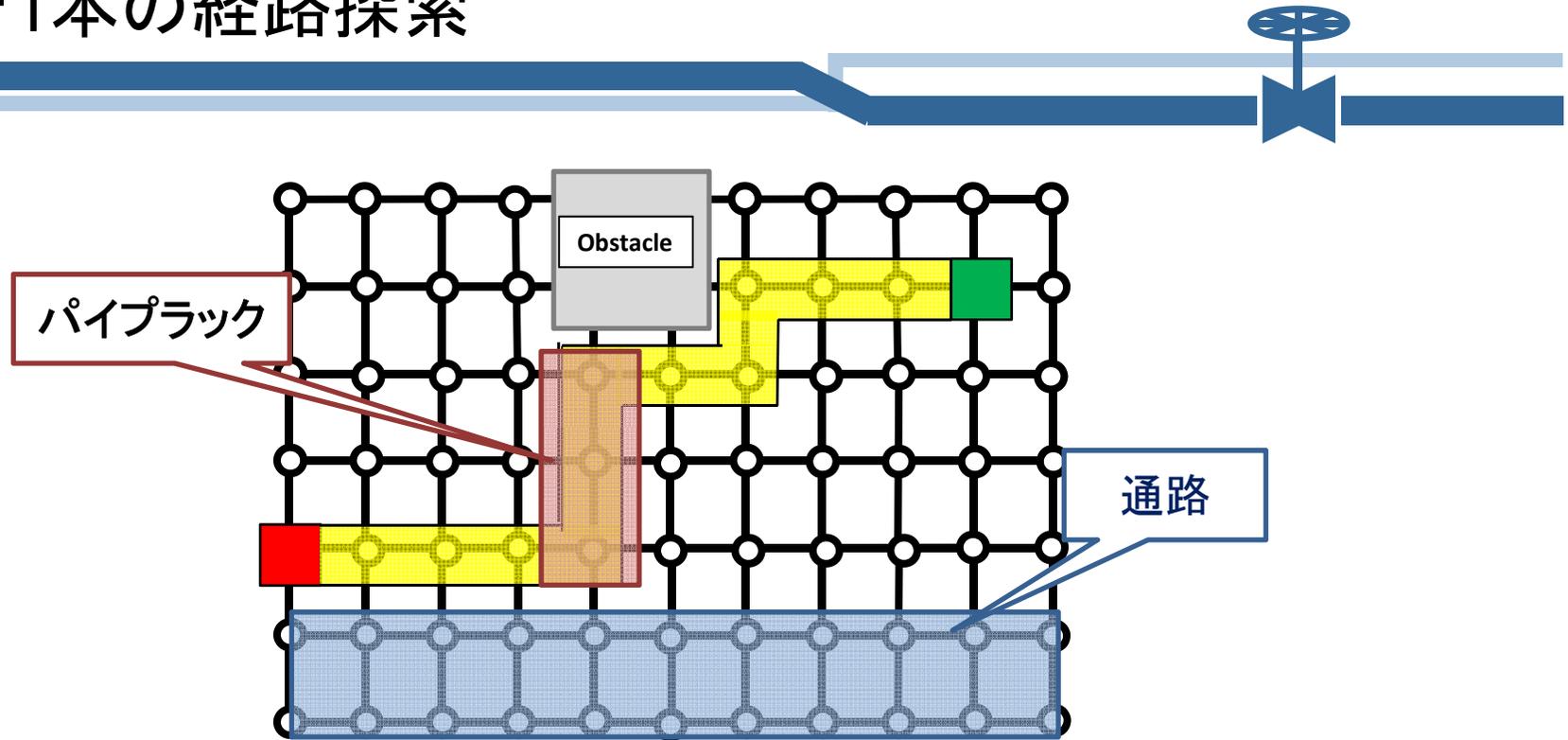


鳥居配管を考慮しない場合



鳥居配管を考慮した場合
(垂直方向にコストを割増)

配管1本の経路探索



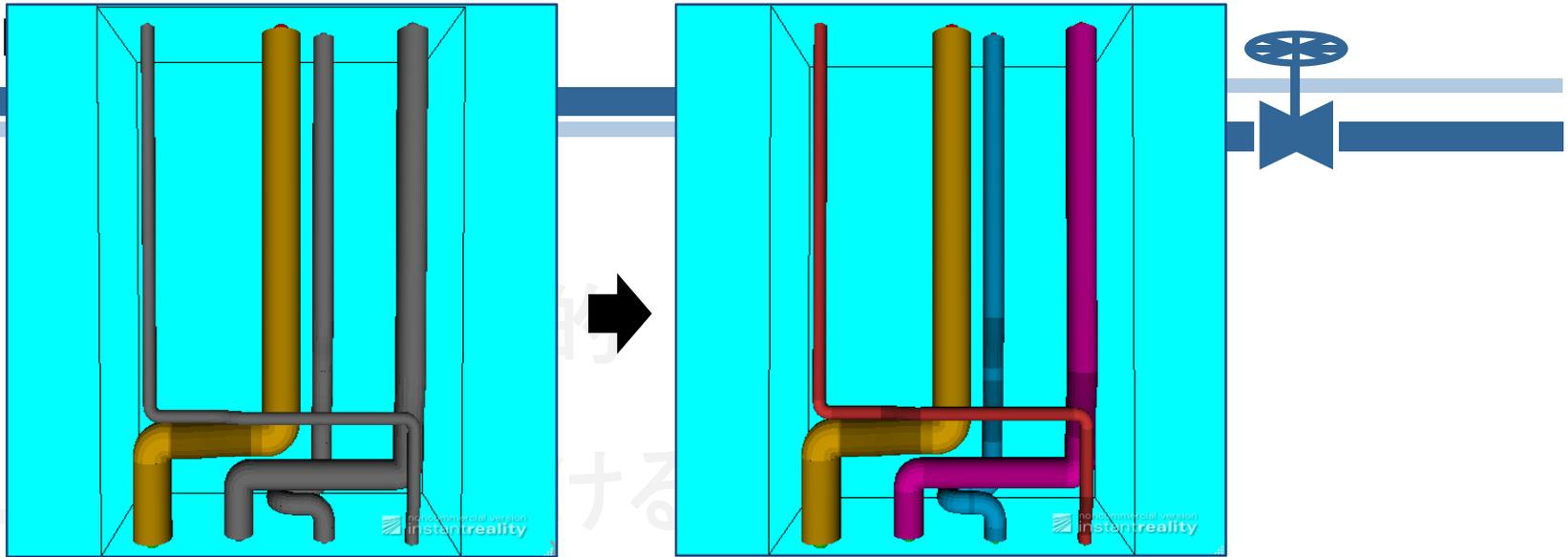
- ・パイプ長
- ・エルボおよびベンドの数
- ・パイプラック空間
- ・通路空間
- ・鳥居配管の発生(垂直方向への移動)

グラフ構造におけるコスト値



ダイクストラ法
(単目的最適化)

Outli



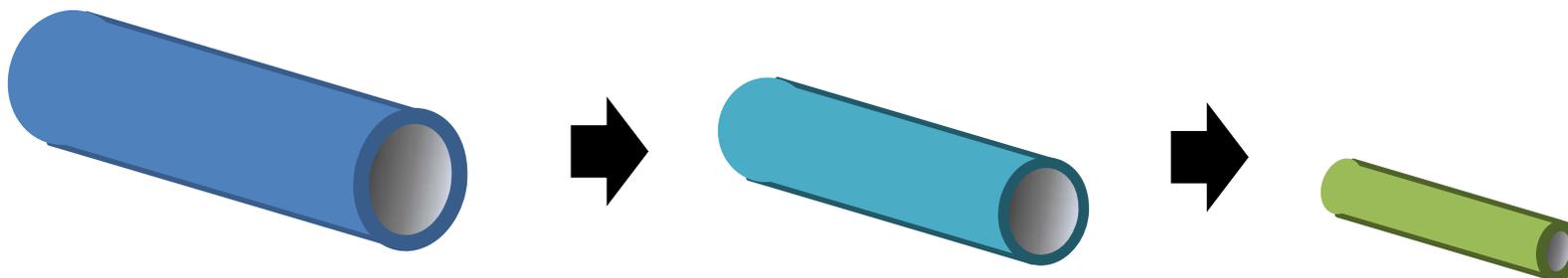
2. 複数配管における経路探索

- 3. シミュレーション
 - ◆ 本研究の成果
- 複数本の探索における問題点
 - タッチアンドクロス法の利用
 - 焼きなまし法の利用

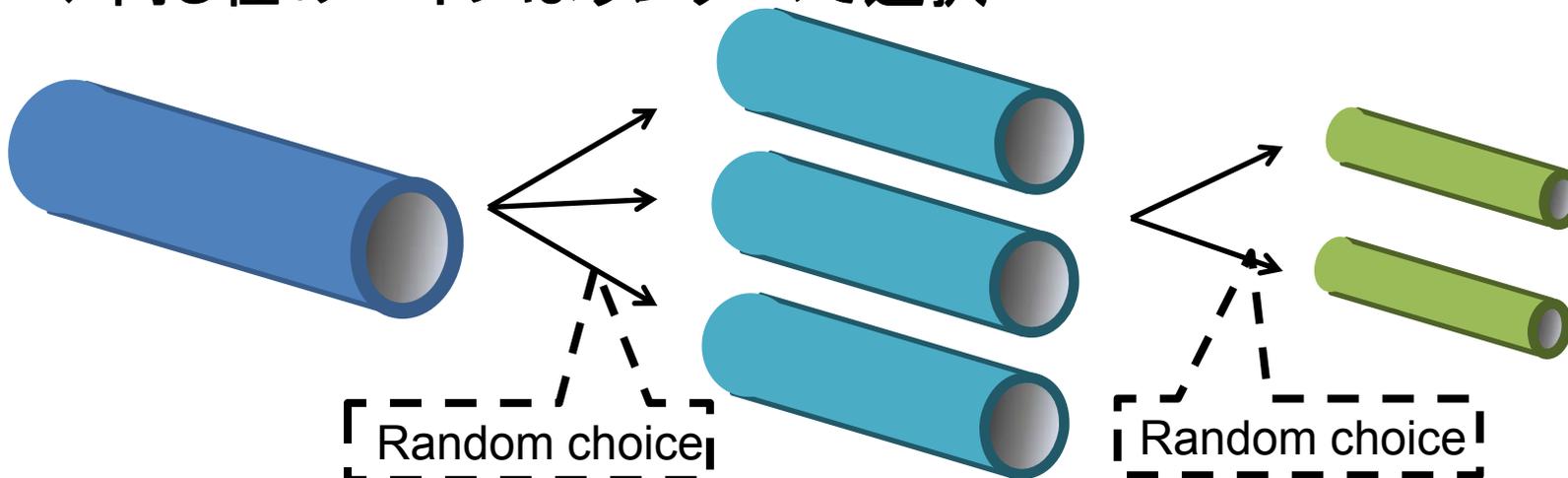
複数本の探索における問題点



◆ 径の大きいパイプからルーティング



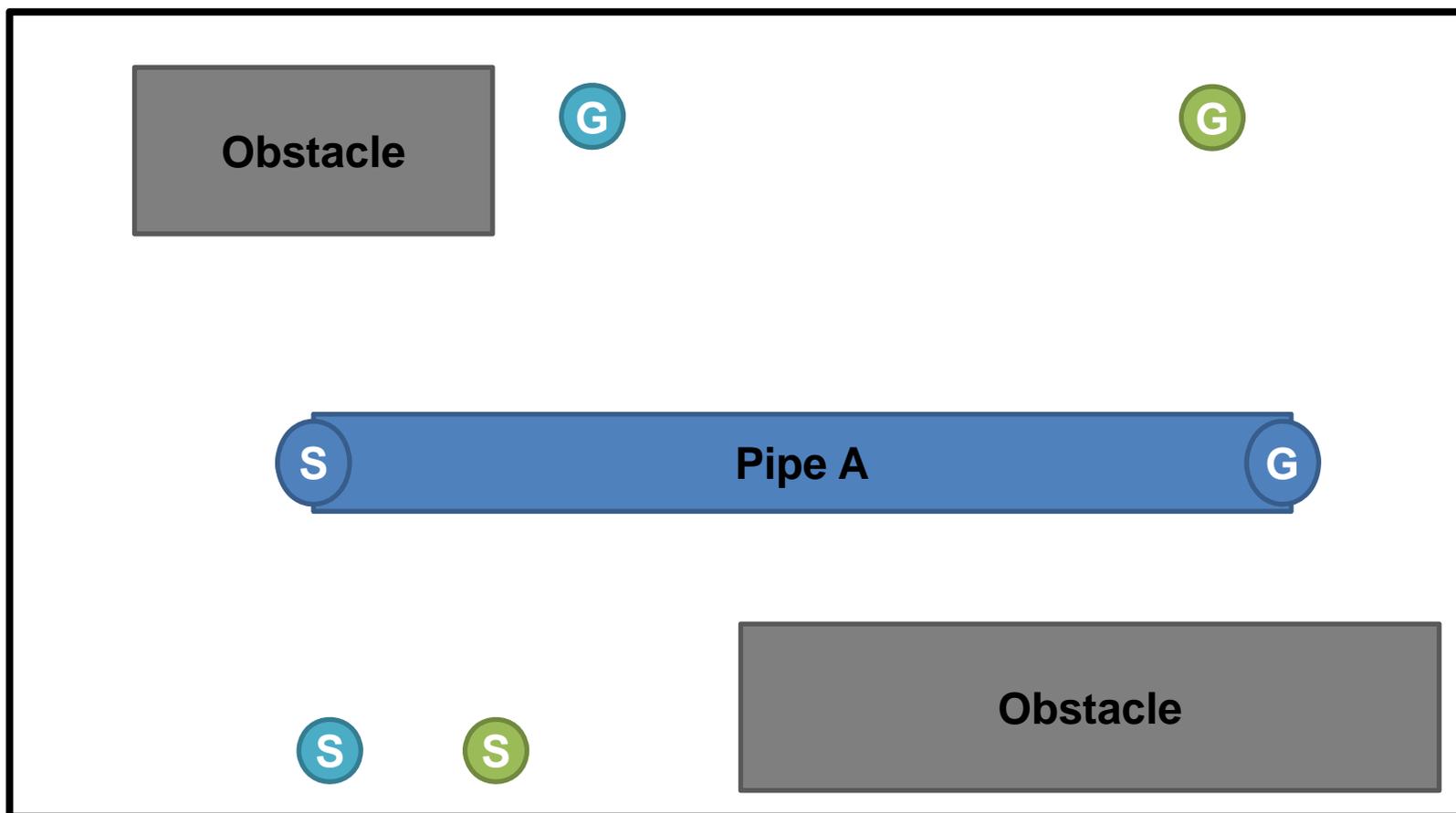
◆ 同じ径のパイプはランダムで選択



複数本の探索における問題点



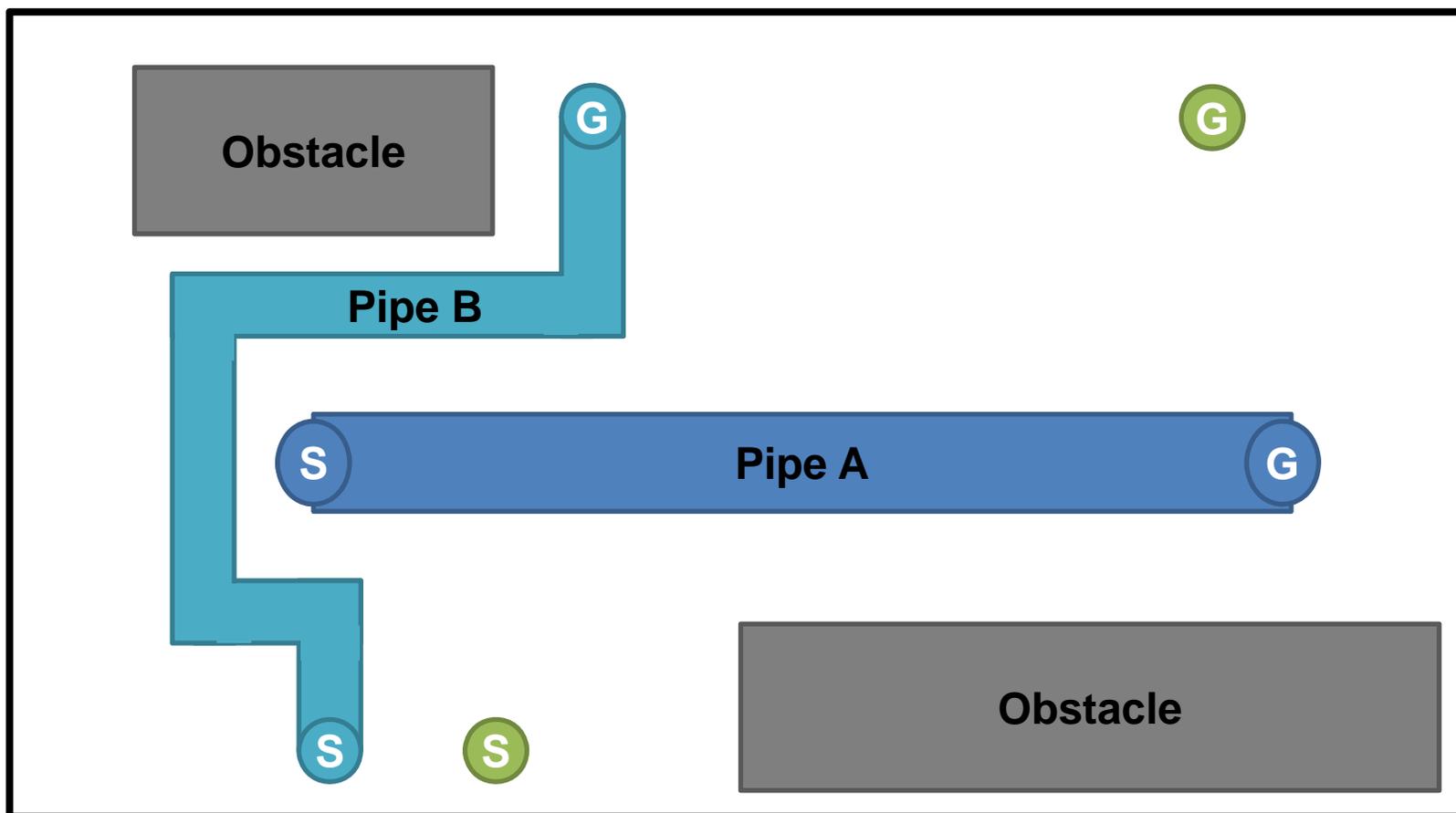
太いパイプから1本ずつルーティング



先行研究での複数本の取り扱い



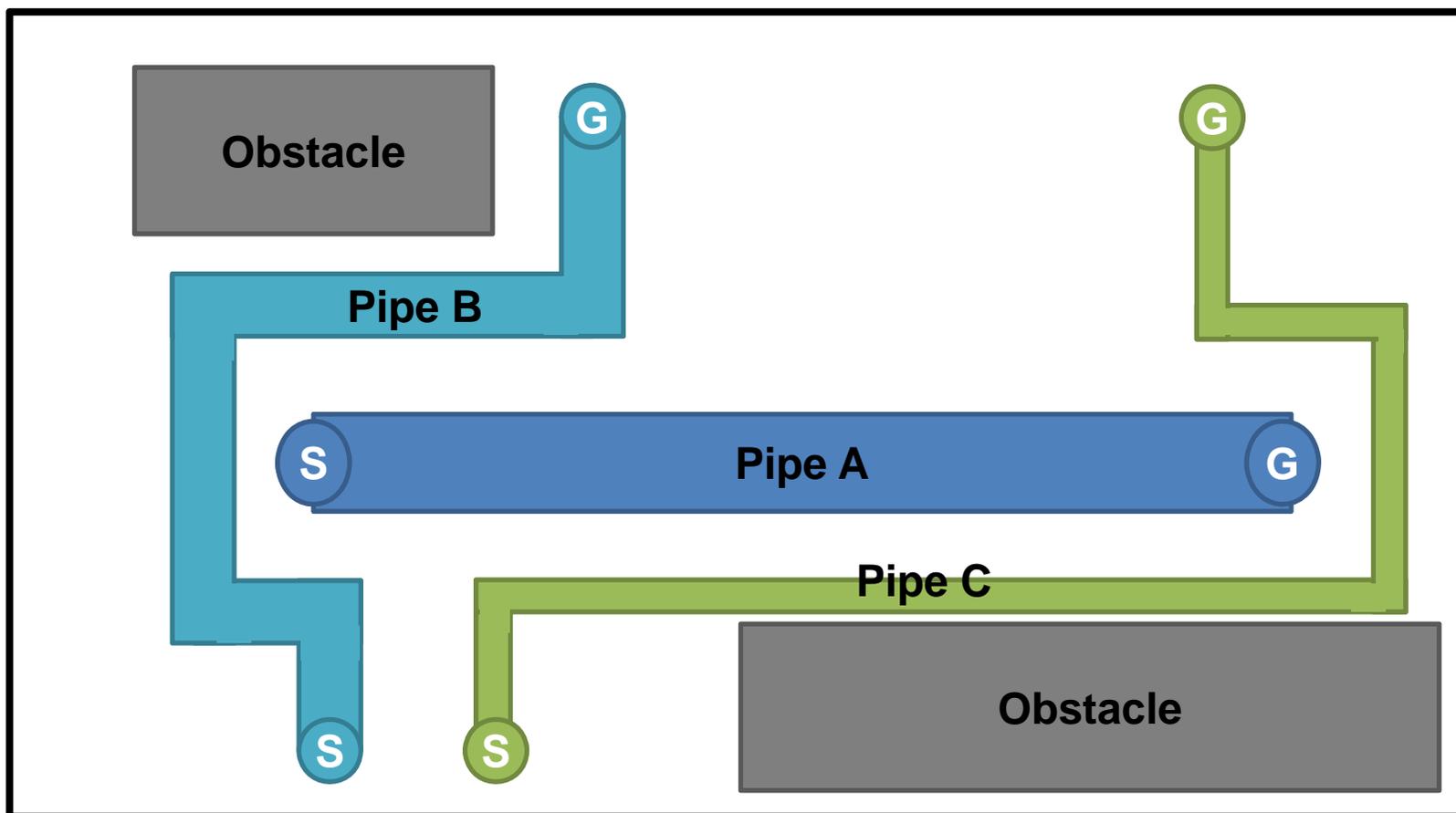
太いパイプから1本ずつルーティング



複数本の探索における問題点



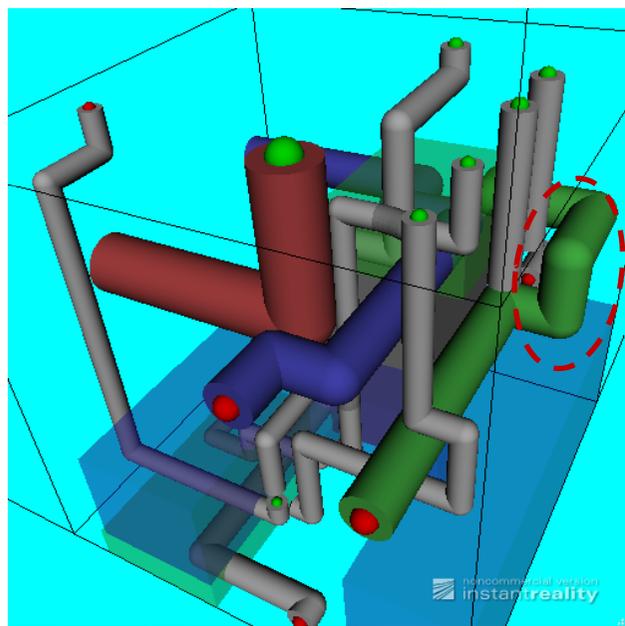
太いパイプから1本ずつルーティング



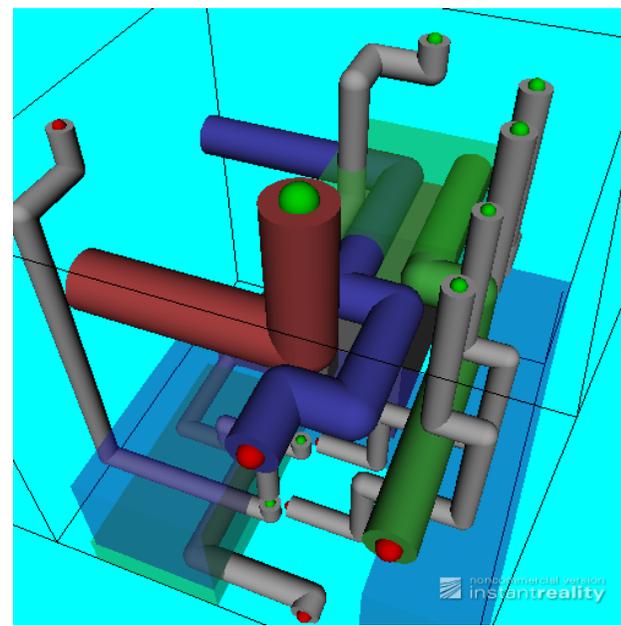
複数本の探索における問題点



経路が複数本ある場合、実用的な解を獲得できる保証がない。



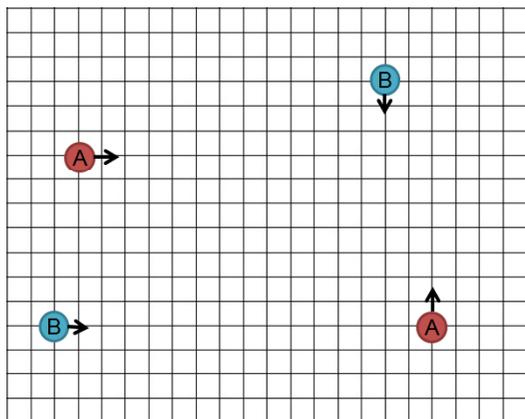
×



○

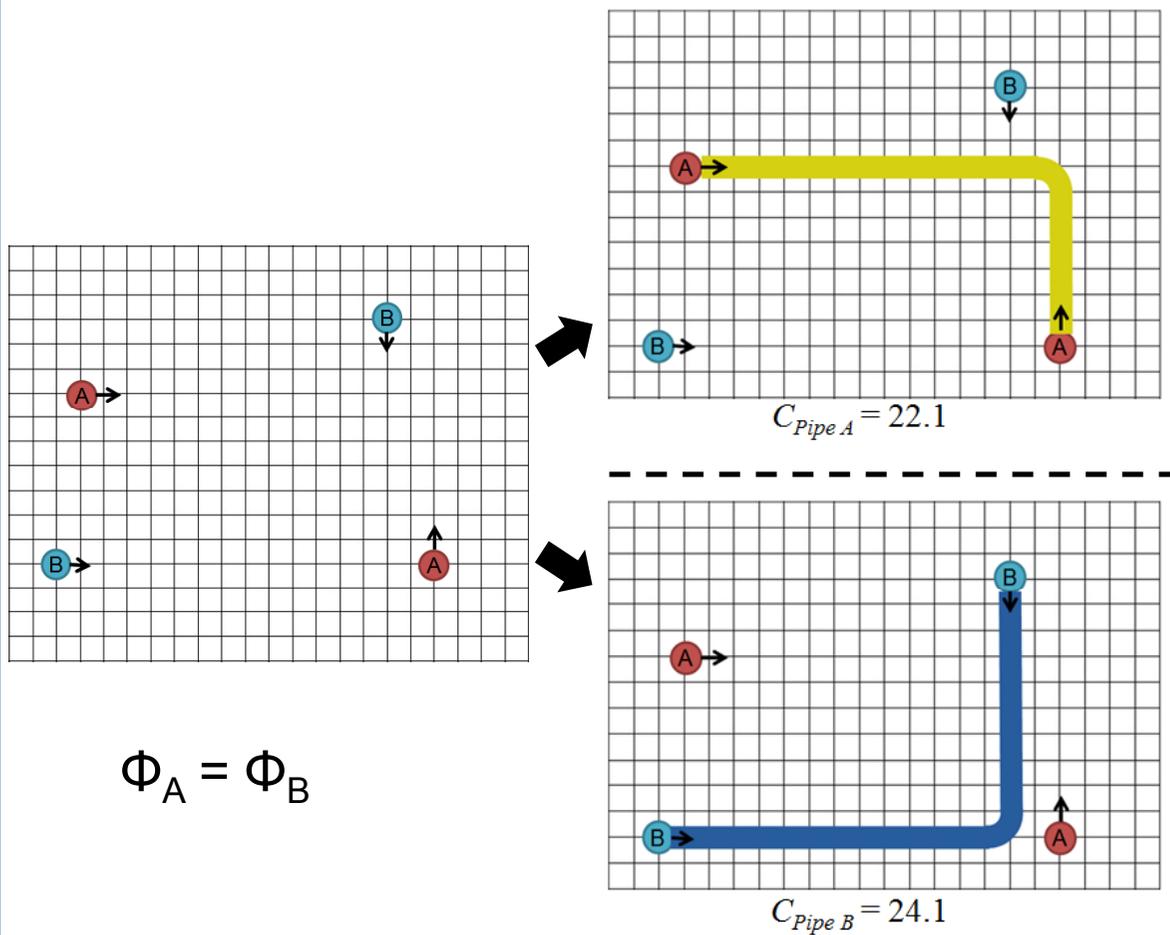
- ・ 経路を探索する順序の影響
- ・ 1本の経路中で最適解が複数個ある場合の、解の選択による影響

探索順序による影響

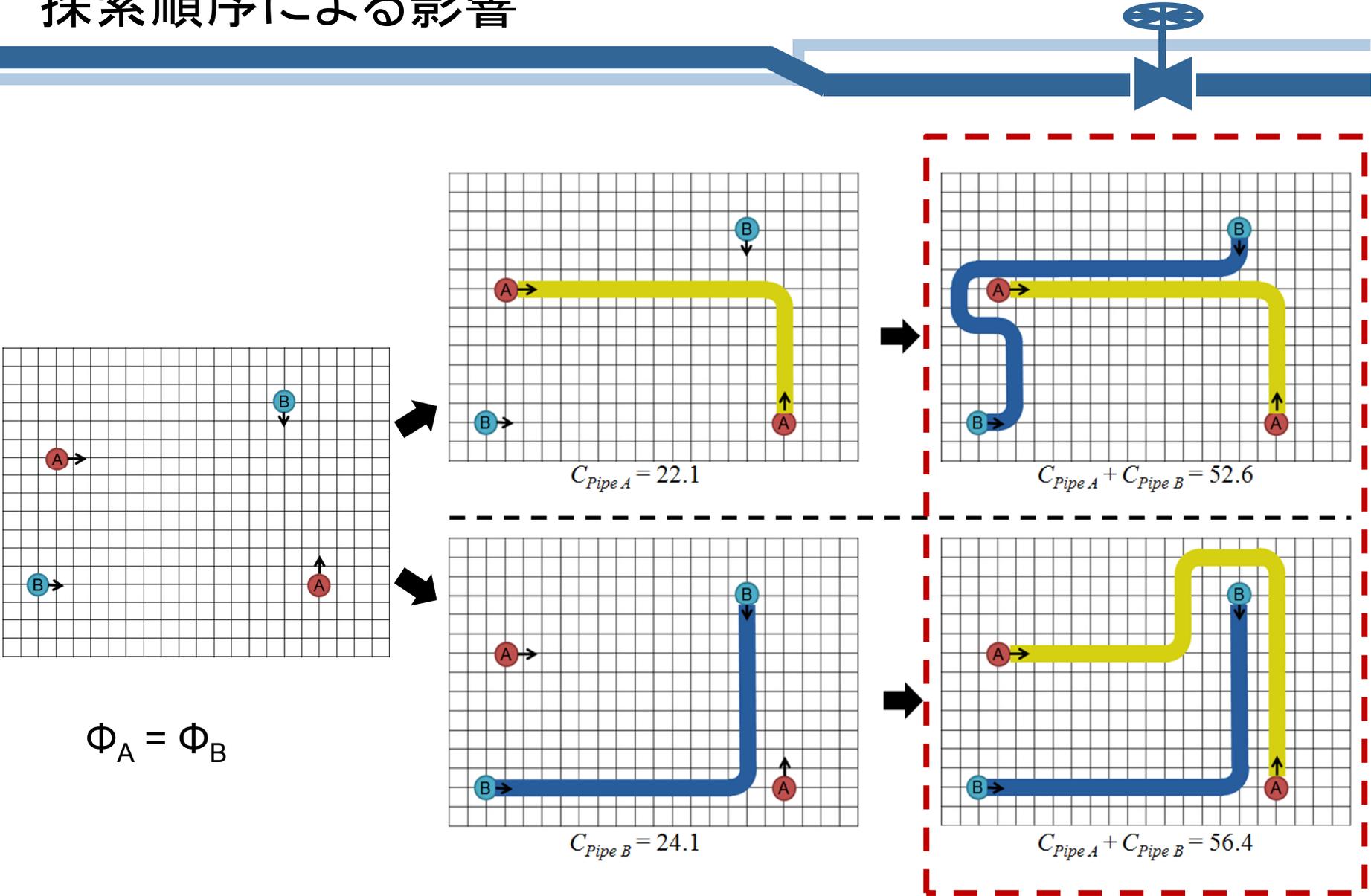


$$\Phi_A = \Phi_B$$

探索順序による影響

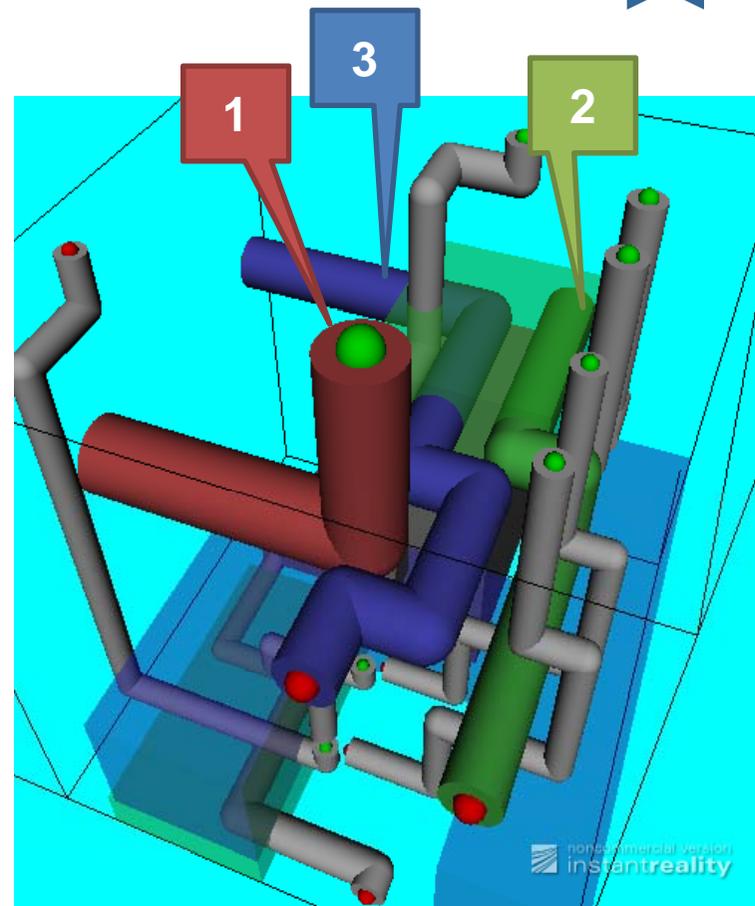
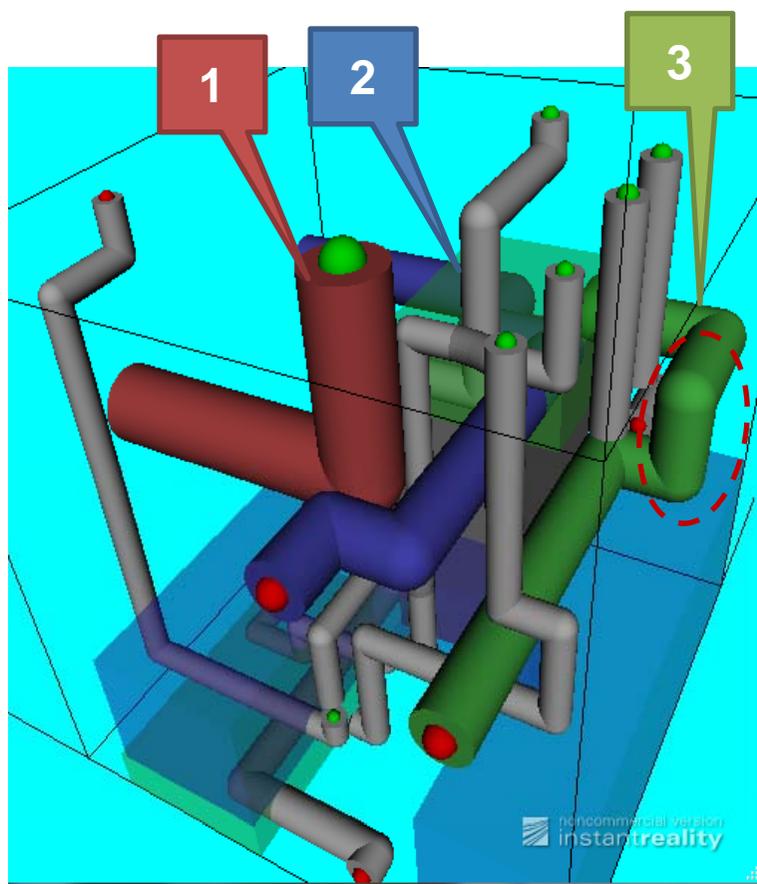


探索順序による影響



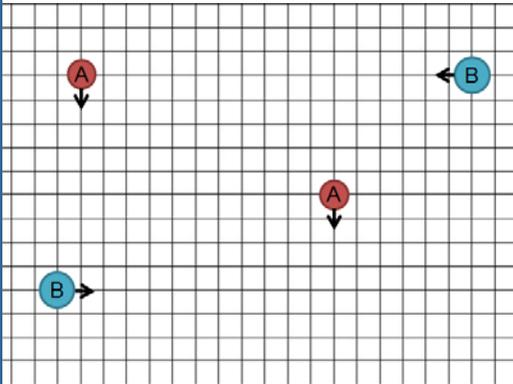
最終的に得られる経路が、探索の順序により異なる。

探索順序による影響



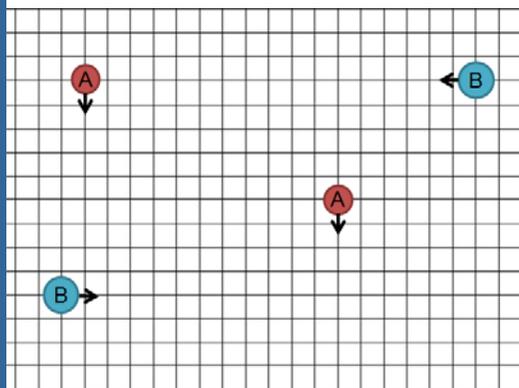
- ・過去のシミュレーションで観察された，経路探索の順序による影響.
- ・青のパイプから探索するか，緑のパイプから探索するかで設計案が異なっている.

解の選択による影響

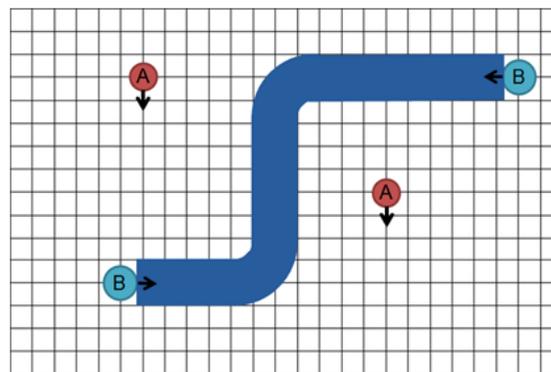


$$\Phi_A < \Phi_B$$

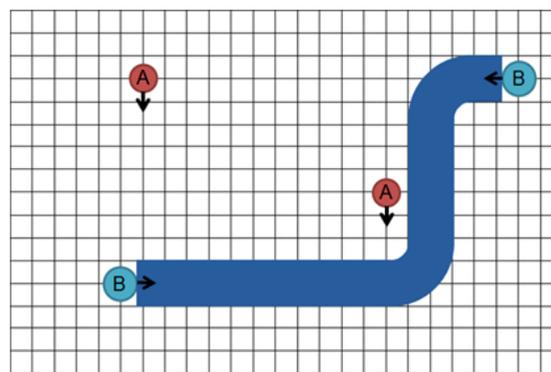
解の選択による影響



$$\Phi_A < \Phi_B$$

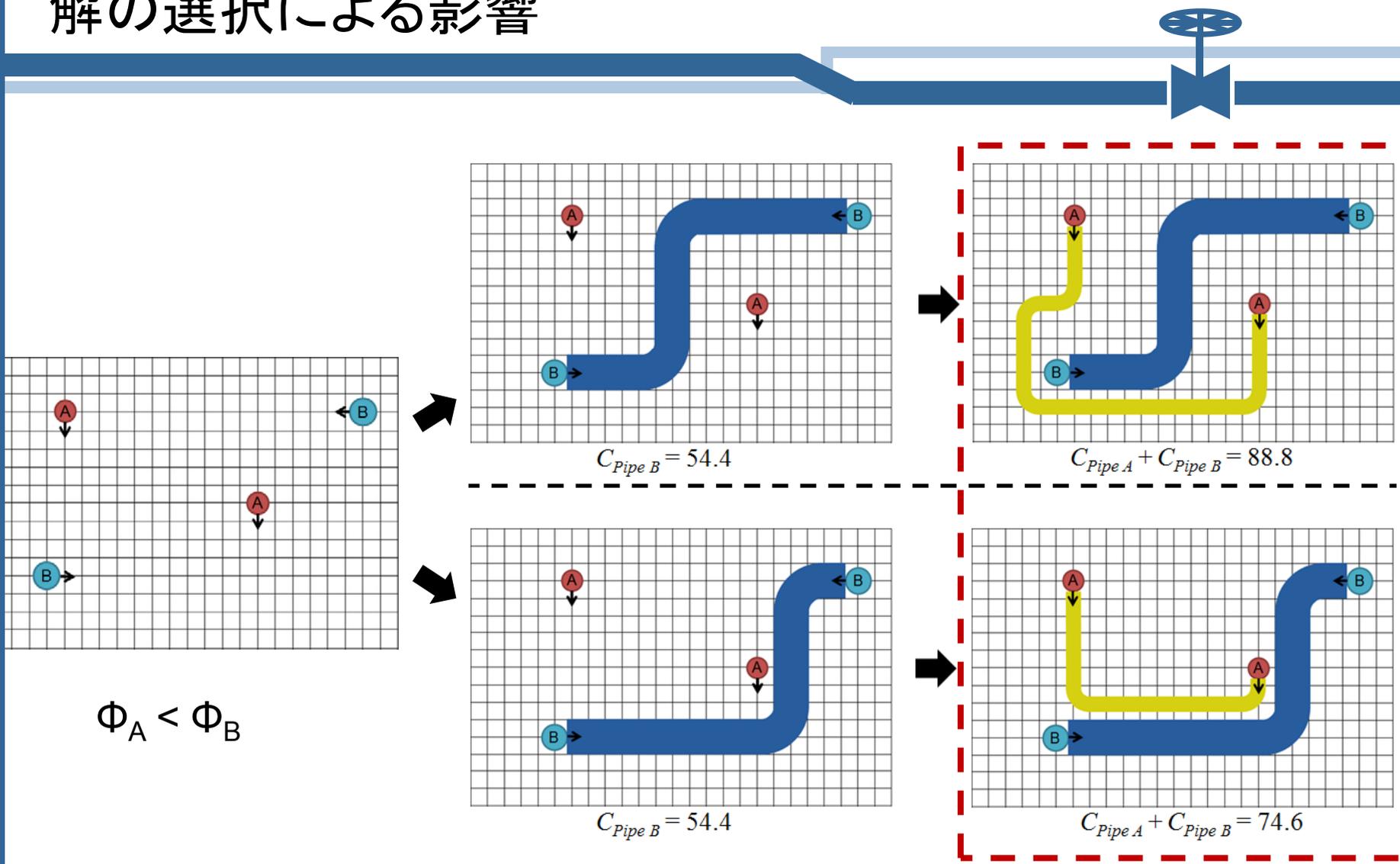


$$C_{Pipe B} = 54.4$$



$$C_{Pipe B} = 54.4$$

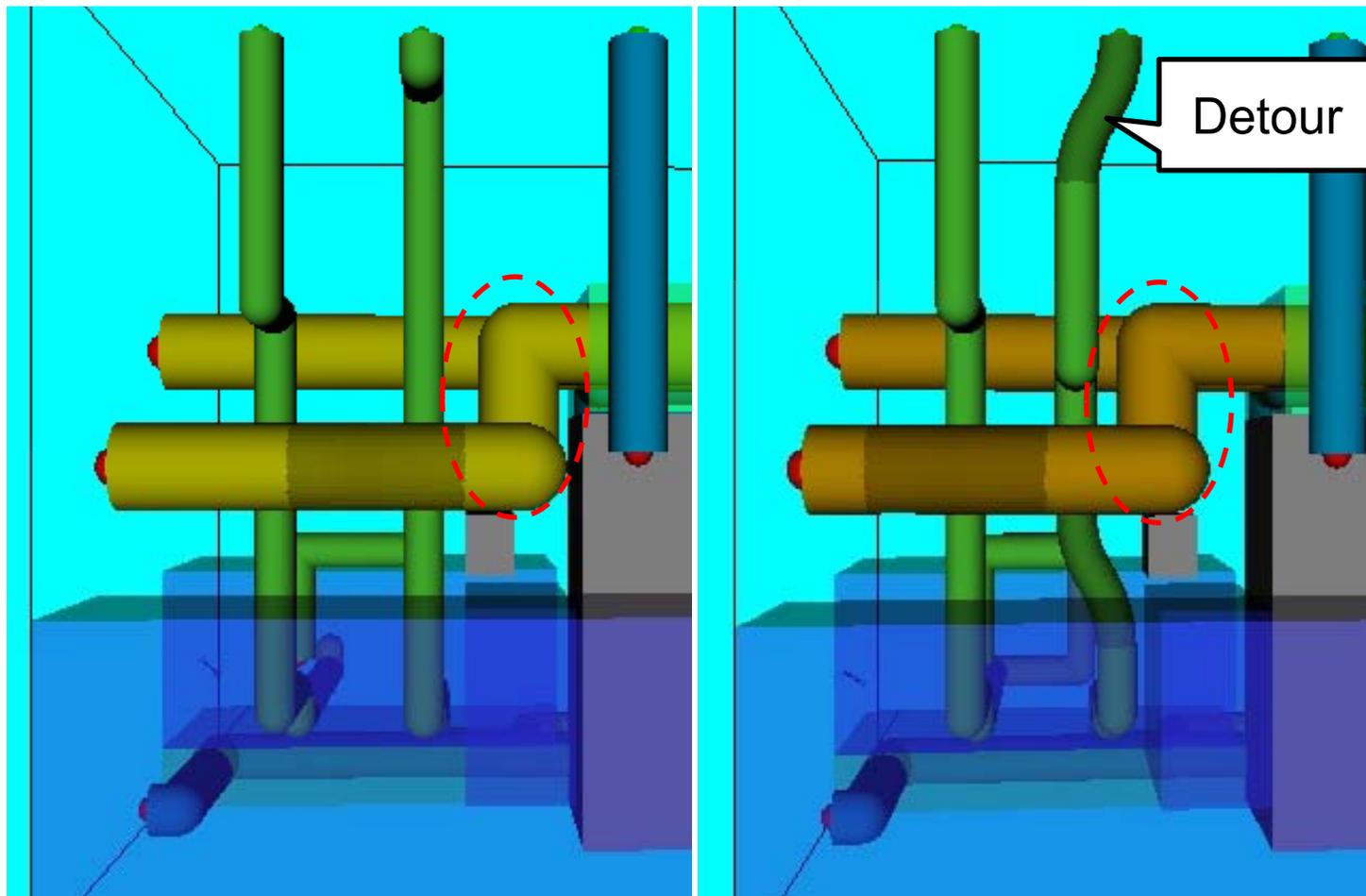
解の選択による影響



解の選択によって、経路が変更されている。

始点・終点距離が短いパイプから探索するべきか？

解の選択による影響



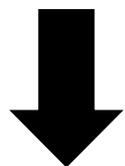
過去のシミュレーションで観察された、最適解の選択による影響。
エルボの位置によって細い経路が迂回している。

複数本の経路探索



経路が複数ある場合の問題点

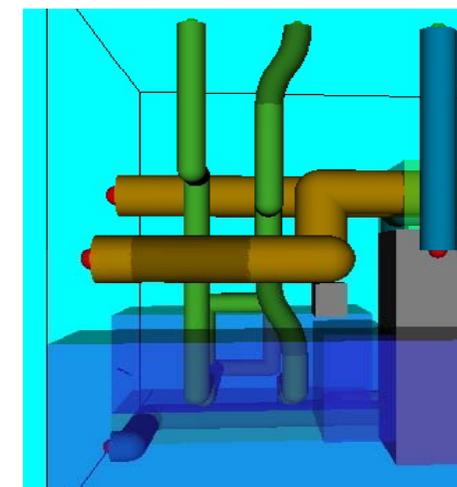
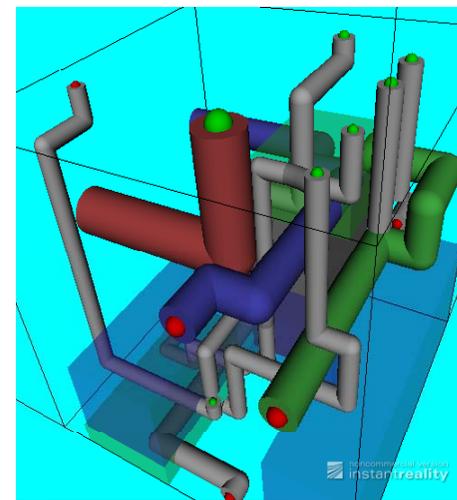
- ・ 経路を探索する順序
- ・ 解の選択



影響を可能な限り取り除きたい

・ タッチアンドクロス法の適用

・ 焼きなまし法の適用

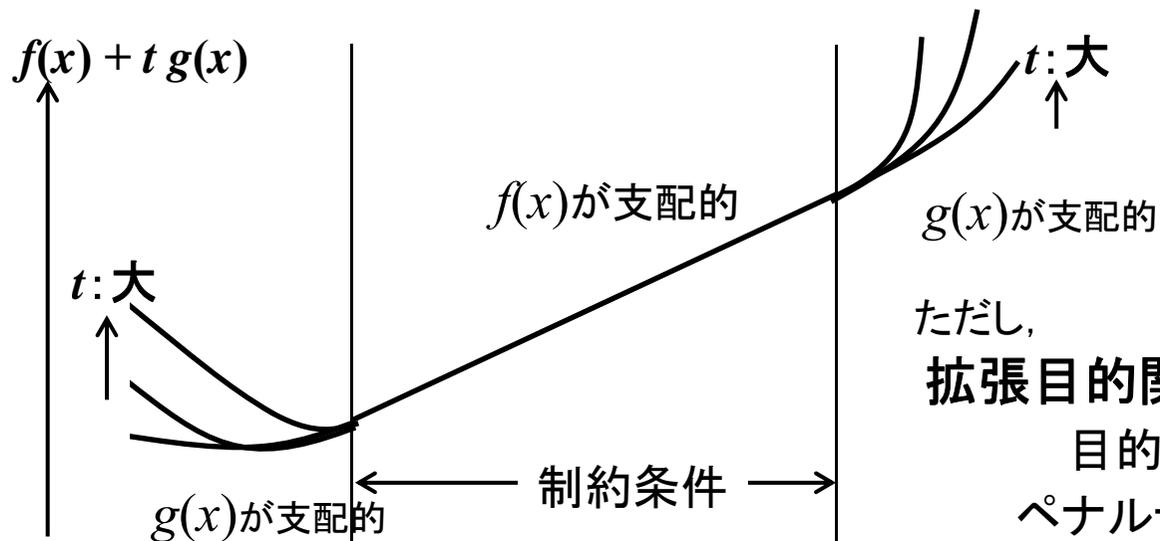


タッチアンドクロス法の適用



“タッチアンドクロス法”とは...

- 集積回路の配線問題を解決するために松岡・新田(1998)によって提案された手法.
- ペナルティ関数法における外点法に分類される.
- 経路同士の干渉に対してペナルティを設定し, 複数回の経路探索を行う中で, 干渉コストを徐々に上昇させる.



ただし,

拡張目的関数: $f(x) + t g(x)$

目的関数: $f(x)$

ペナルティ関数: $g(x)$

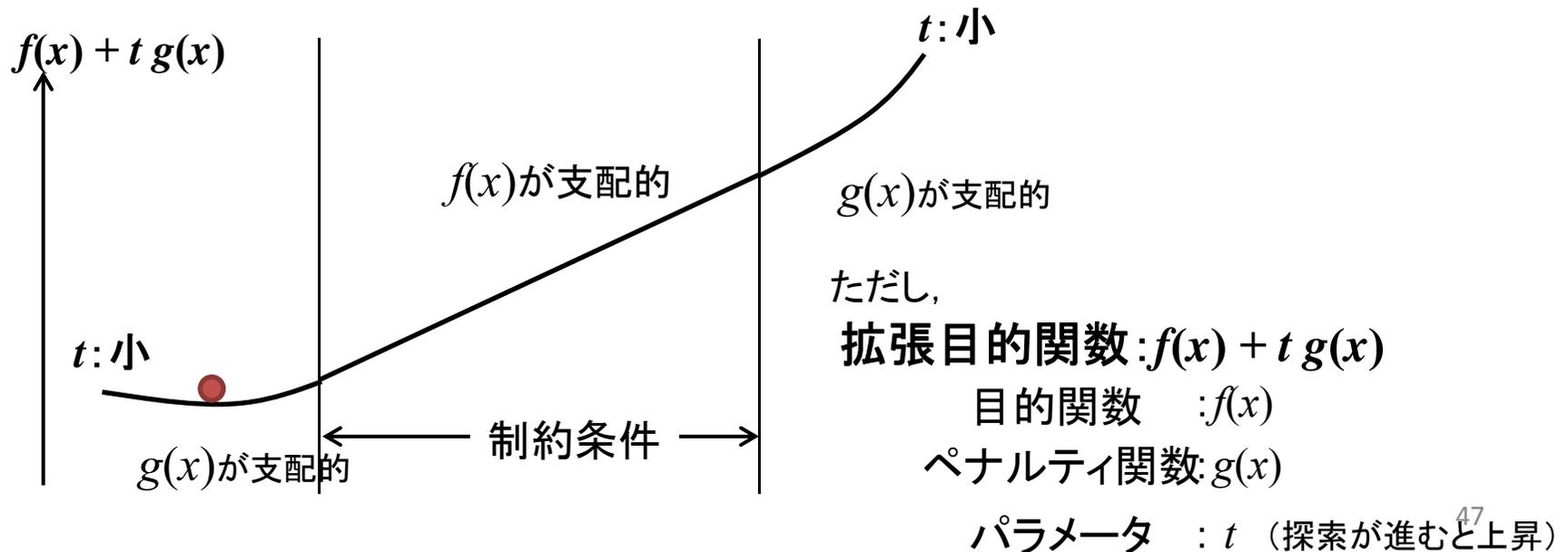
パラメータ: t (探索が進むと上昇)

タッチアンドクロス法の適用



“タッチアンドクロス法”とは...

- 集積回路の配線問題を解決するために松岡・新田(1998)によって提案された手法.
- ペナルティ関数法における外点法に分類される.
- 経路同士の干渉に対してペナルティを設定し, 複数回の経路探索を行う中で, 干渉コストを徐々に上昇させる.

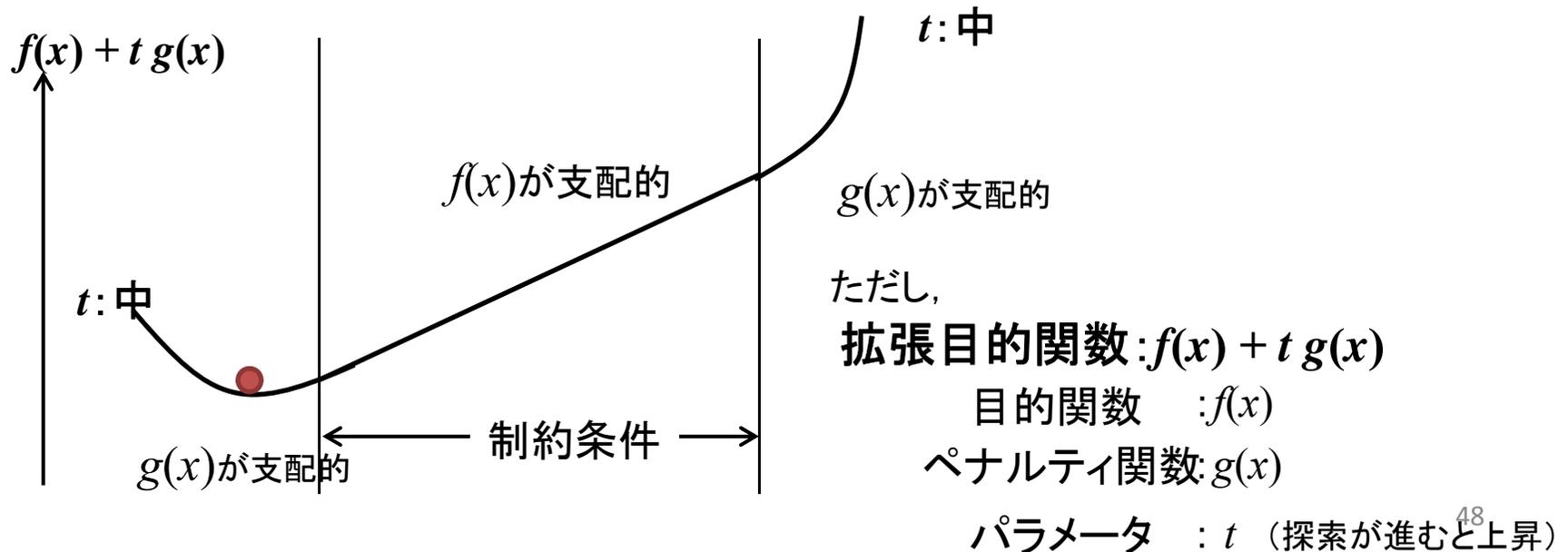


タッチアンドクロス法の適用



“タッチアンドクロス法”とは...

- 集積回路の配線問題を解決するために松岡・新田(1998)によって提案された手法.
- ペナルティ関数法における外点法に分類される.
- 経路同士の干渉に対してペナルティを設定し, 複数回の経路探索を行う中で, 干渉コストを徐々に上昇させる.

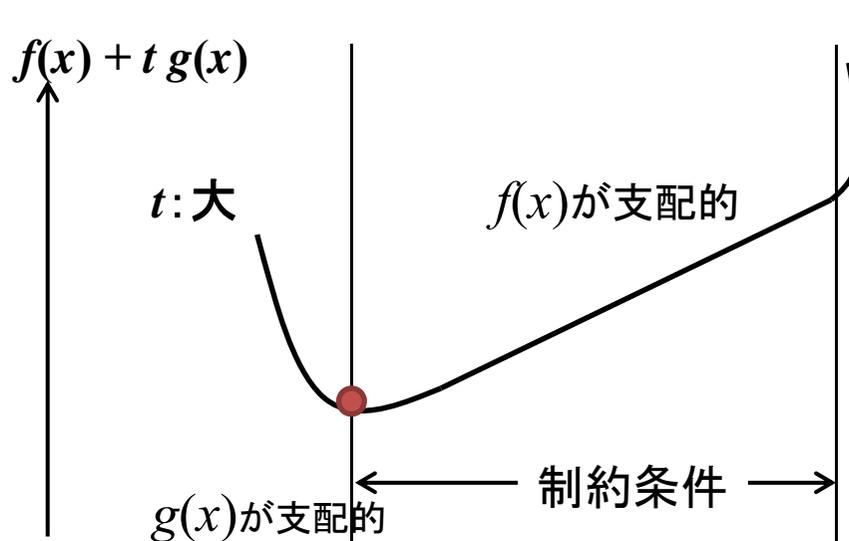


タッチアンドクロス法の適用



“タッチアンドクロス法”とは...

- 集積回路の配線問題を解決するために松岡・新田(1998)によって提案された手法.
- ペナルティ関数法における外点法に分類される.
- 経路同士の干渉に対してペナルティを設定し, 複数回の経路探索を行う中で, 干渉コストを徐々に上昇させる.



t : 大

$g(x)$ が支配的

ただし,

拡張目的関数: $f(x) + t g(x)$

目的関数 : $f(x)$

ペナルティ関数: $g(x)$

パラメータ : t (探索が進むと上昇)

タッチアンドクロス法の適用



“タッチアンドクロス法”とは...

- 経路同士の干渉に対してコストを設定し、複数回の経路探索を行う中で、干渉コストを徐々に上昇させる。

$$C_{Total} = \sum C_{Pipe}$$

$$C_{Pipe} = \underbrace{C_{Parts}} \times \underbrace{R_{Space}} + \underbrace{C_{Interference}}$$

パイプピースの
使用コスト

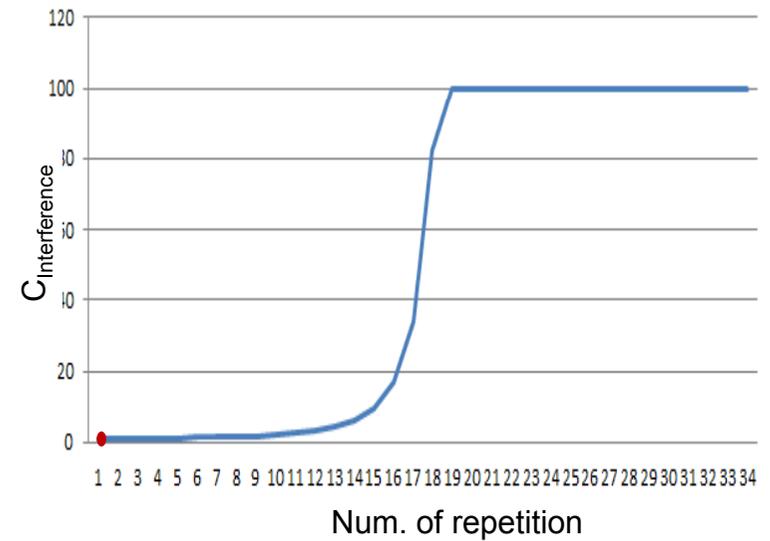
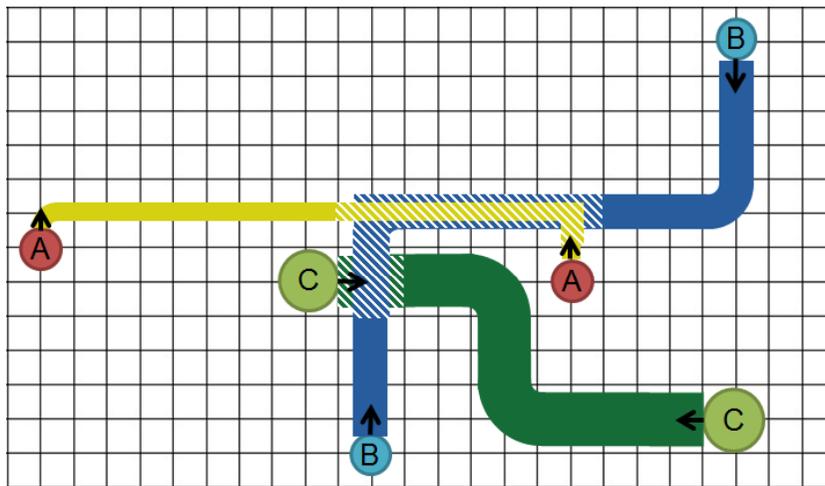
通路・パイプラック
空間による割引率

経路同士の干渉コスト
(探索が進むにつれて値が増加)

タッチアンドクロス法の適用



2次元平面図での探索イメージ



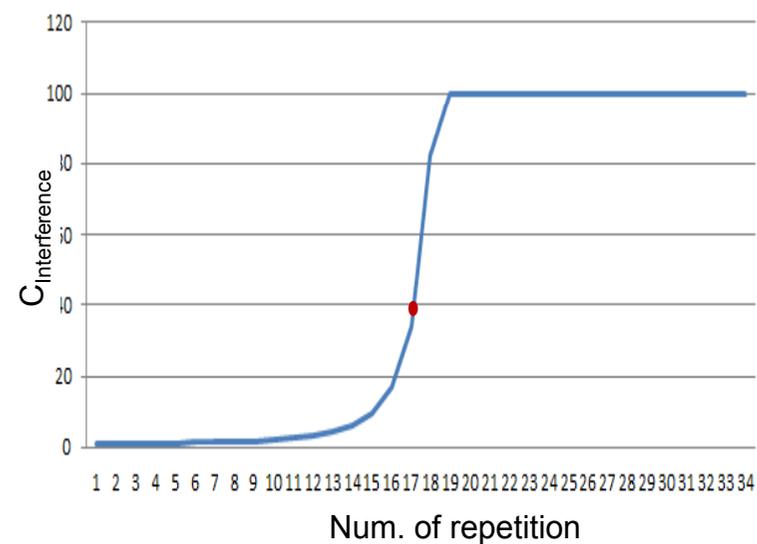
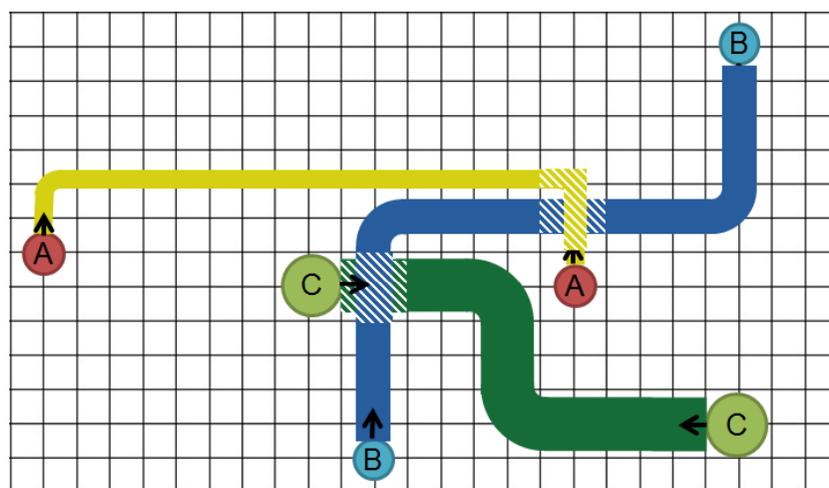
探索序盤

- ・ 干渉コスト: 小さい
- ・ 各経路は最短経路で結ばれている.

タッチアンドクロス法の適用



2次元平面図での探索イメージ



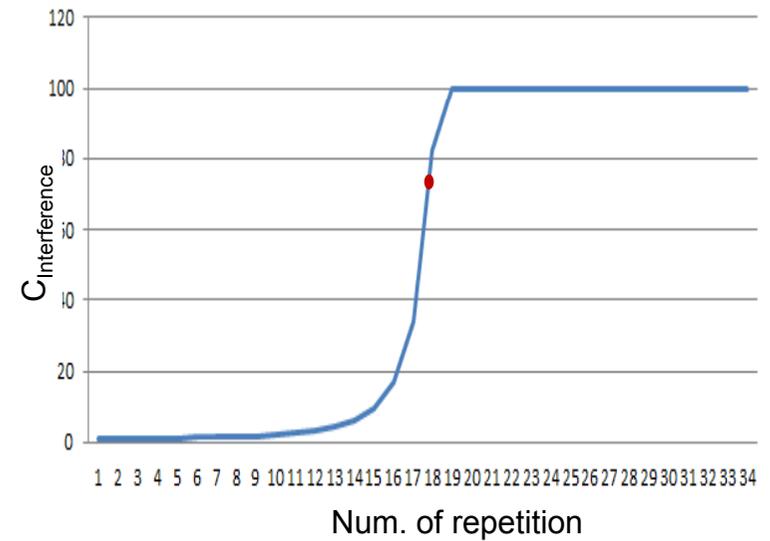
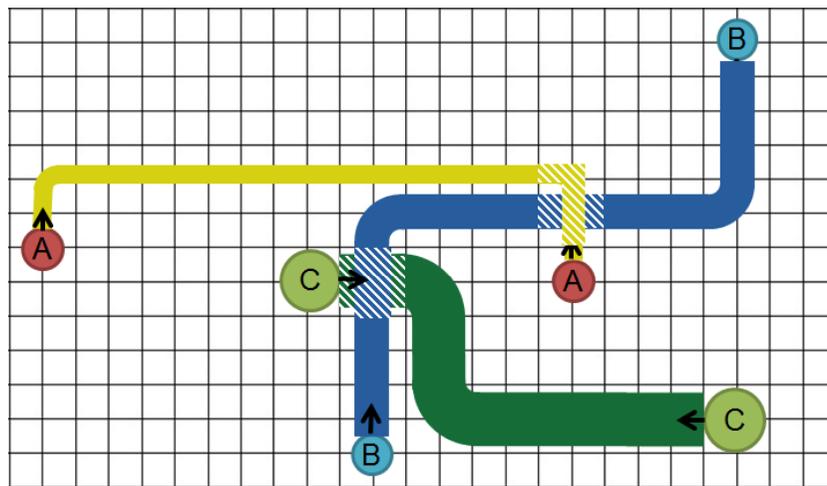
探索中盤～終盤

- ・ 干渉コスト: 大きい
- ・ 干渉状態を避けている.

タッチアンドクロス法の適用



2次元平面図での探索イメージ



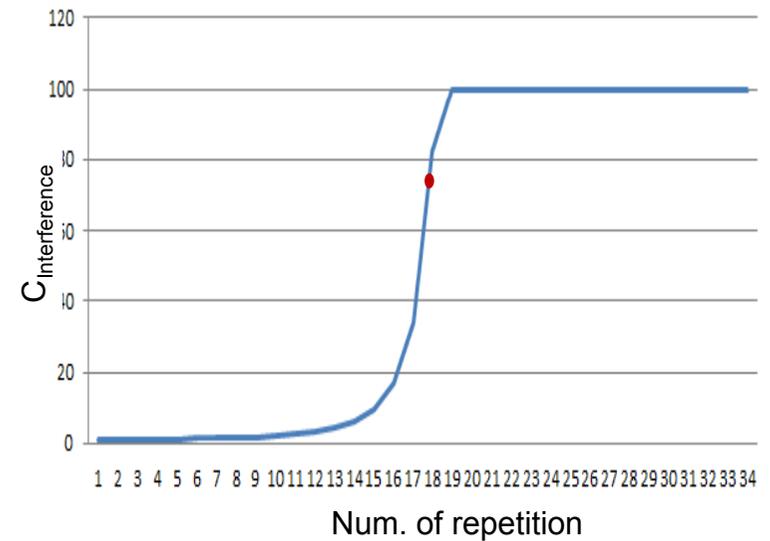
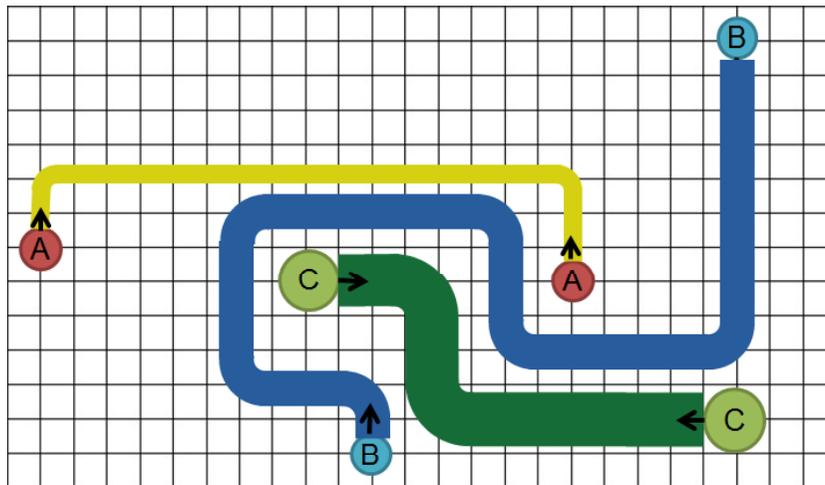
探索終盤

- ・ 干渉コスト: 大きい
- ・ 干渉状態を避けている.

タッチアンドクロス法の適用



2次元平面図での探索イメージ



探索終盤

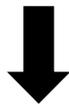
- ・ 干渉コスト: 大きい
- ・ 干渉状態を避けている.

タッチアンドクロス法の適用



T.C.法(タッチアンドクロス法)の課題

- ◆ 回路設計のための手法なため、経路がすべて結ばれたらその時点で探索を終了してしまう。
- ◆ 山登り法が基本であるため、**探索が行き詰る**。



複数配管経路の最適な最終設計案を獲得するためには不十分。



探索の後戻りを許し、**探索の行き詰り**を避ける。

焼きなまし法の導入

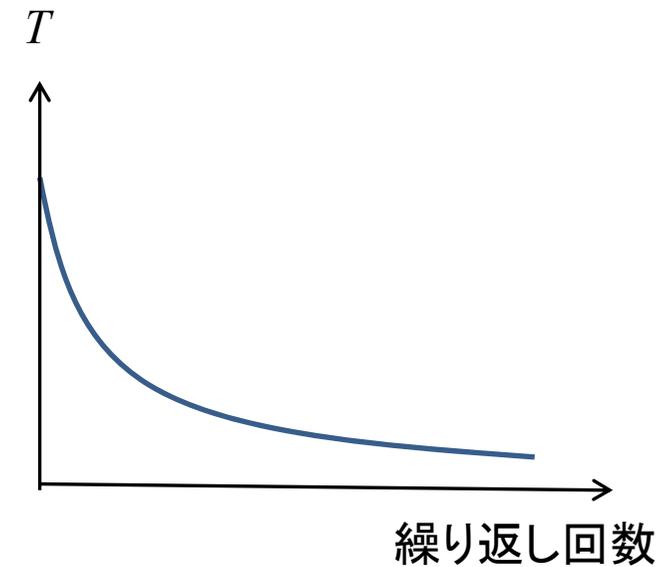
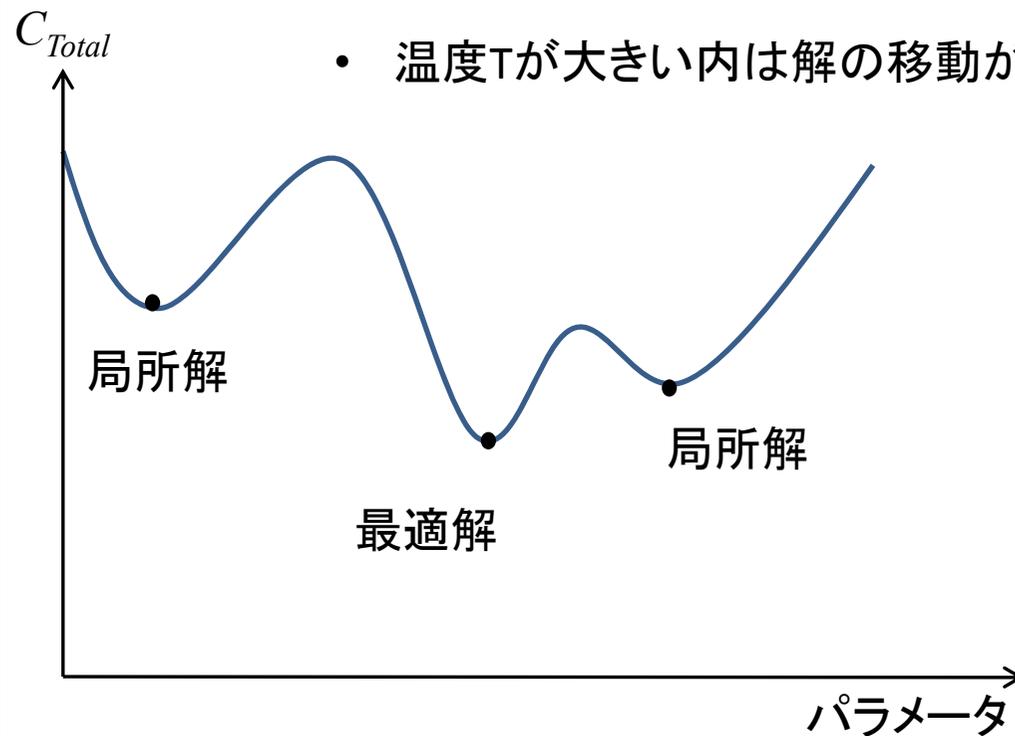


焼きなまし法の適用



焼きなまし法とは...

- 局所解にとらわれず、大域的な解候補を探索するための手法.
- 温度 T を徐々に小さくしていく中で、現在の解のランダムな近傍の解をもとめる.
- 温度 T が大きい内は解の移動が大きく、 T が小さくなると収束する.

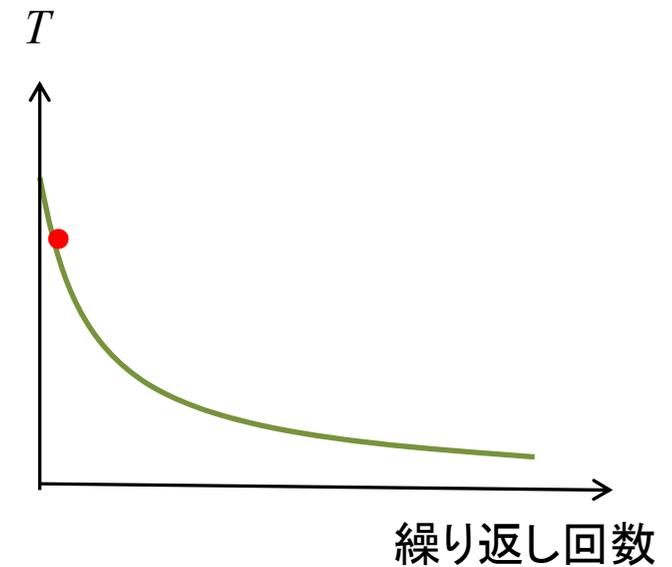
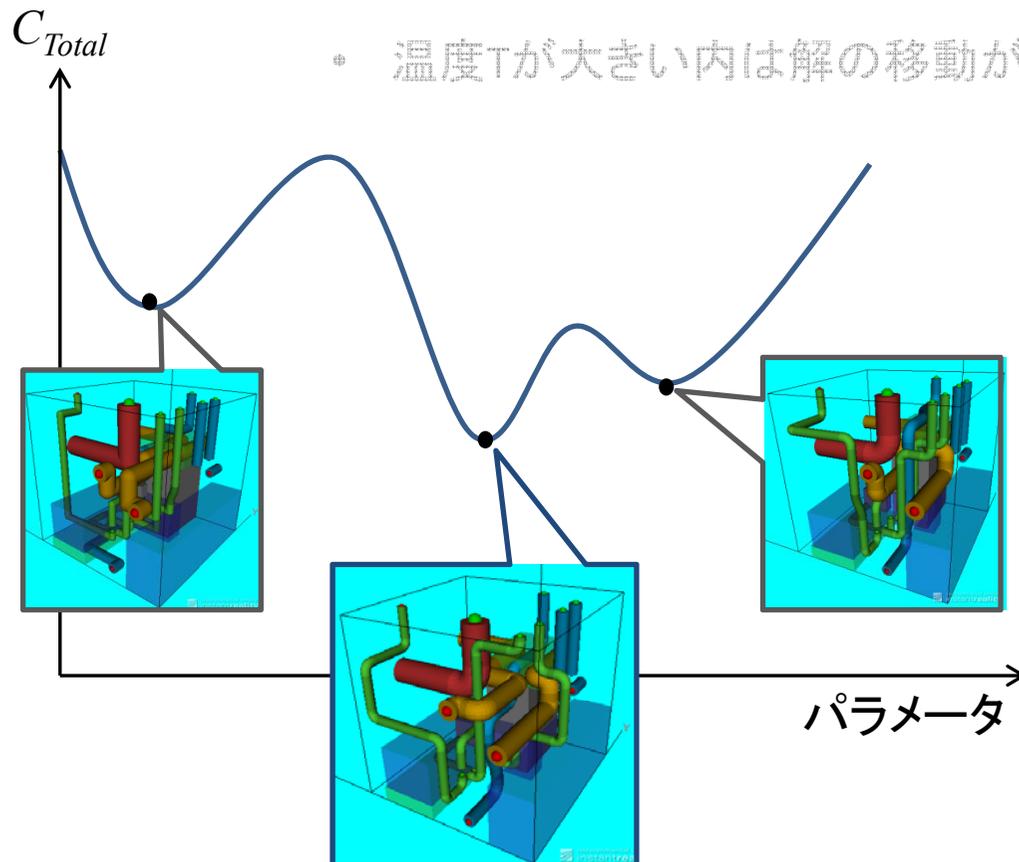


焼きなまし法の適用



焼きなまし法とは...

- 局所解にとらわれず、大域的な解候補を探索するための手法.
- 温度 T を徐々に小さくしていく中で、現在の解のランダムな近傍の解をもとめる.
- 温度 T が大きい内は解の移動が大きく、 T が小さくなると収束する.

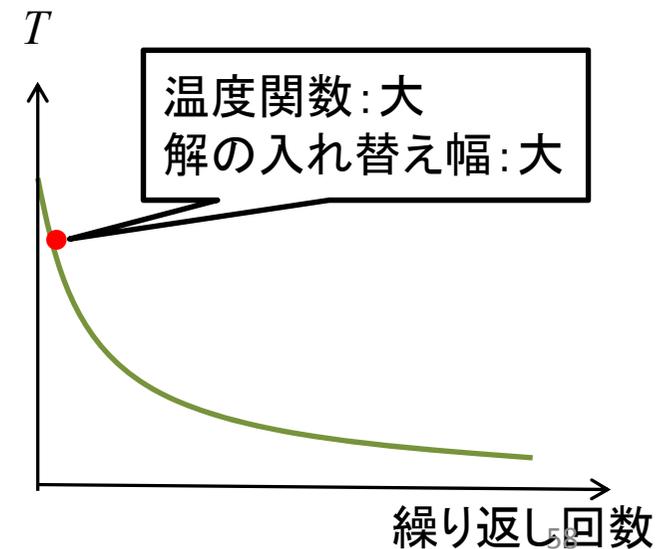
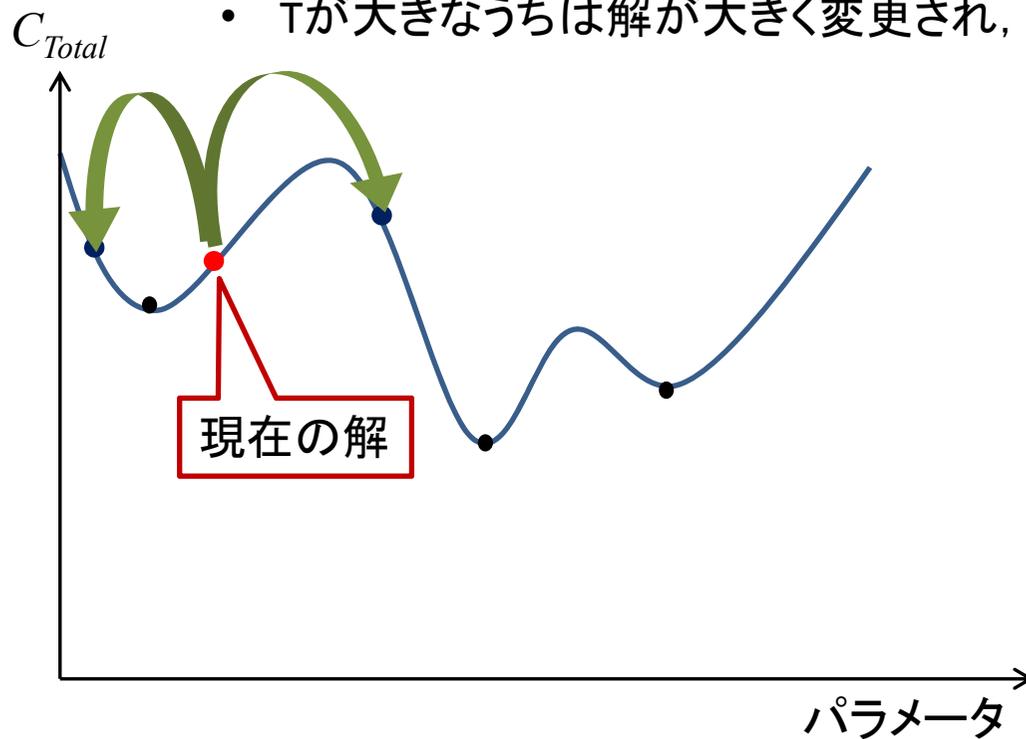


焼きなまし法の適用



$$\begin{cases} \Delta C = C_{n+1} - C_n \\ P = \exp(-\Delta C/T) \end{cases}$$

- $C_{n+1} > C_n$ の場合は遷移確立 P に従って, 解候補を取得.
- 取得後は, 温度関数 T を減少させる.
- T が大きいうちは解が大きく変更され, 小さくなるにつれて収束する.

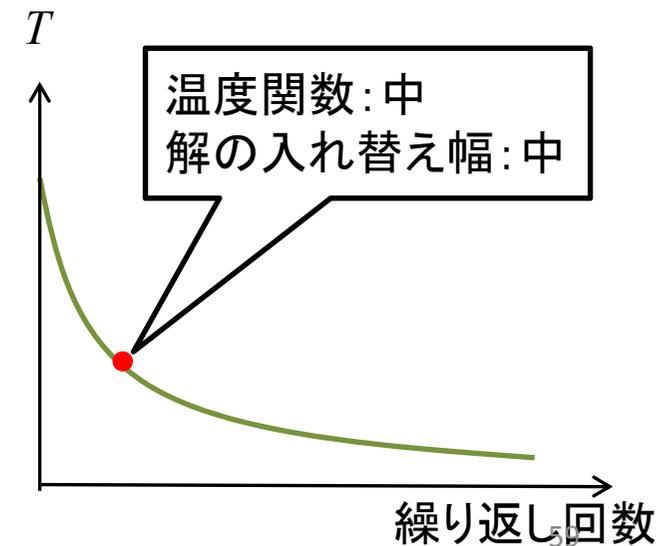
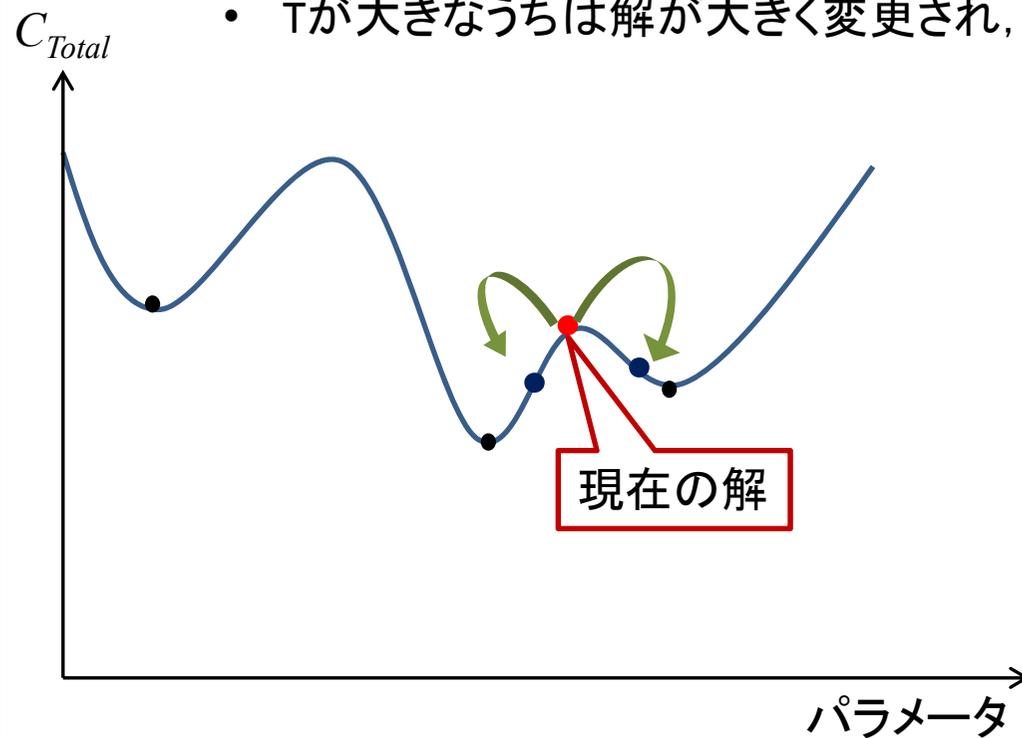


焼きなまし法の適用



$$\begin{cases} \Delta C = C_{n+1} - C_n \\ P = \exp(-\Delta C/T) \end{cases}$$

- $C_{n+1} > C_n$ の場合は遷移確立 P に従って、解候補を取得.
- 取得後は、温度関数 T を減少させる.
- T が大きいうちは解が大きく変更され、小さくなるにつれて収束する.

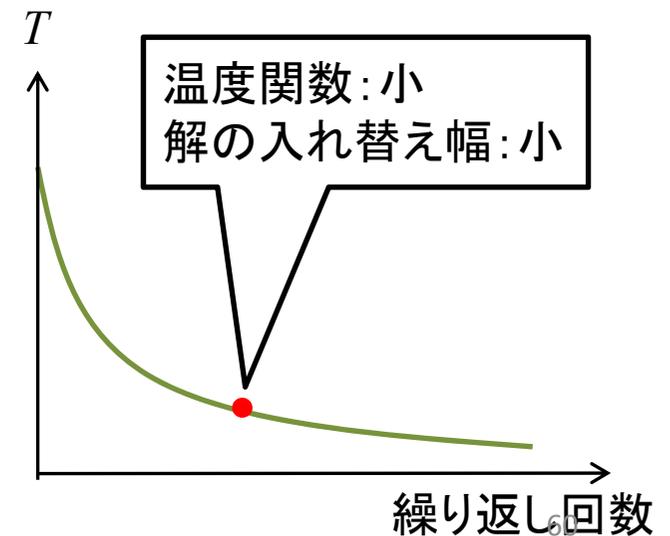
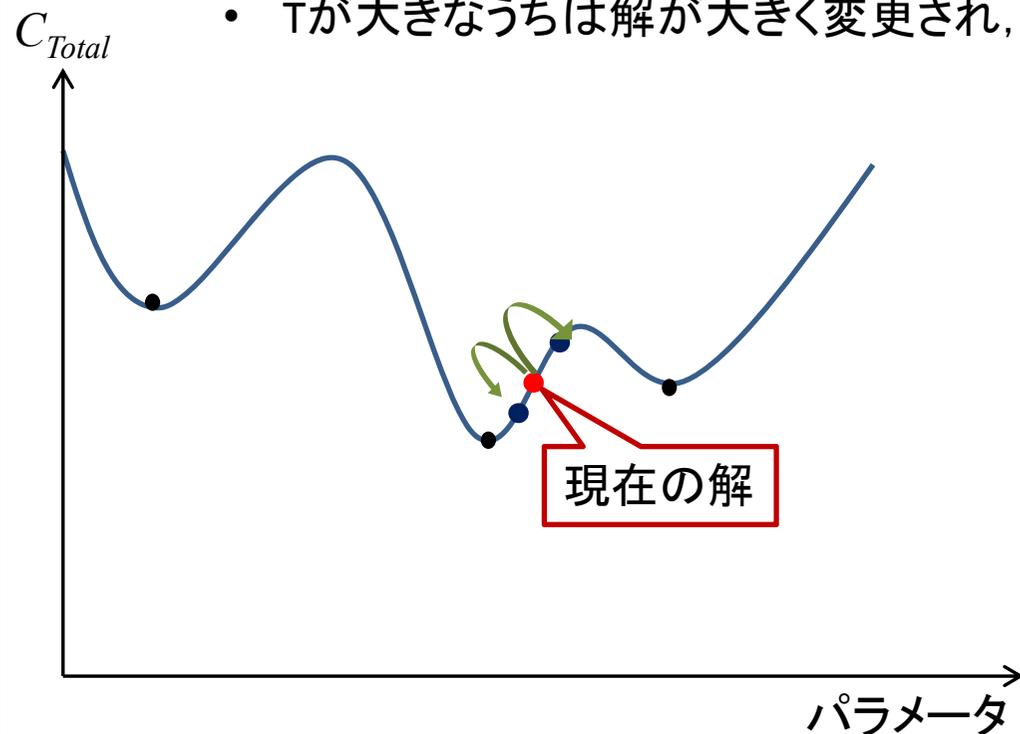


焼きなまし法の適用



$$\begin{cases} \Delta C = C_{n+1} - C_n \\ P = \exp(-\Delta C/T) \end{cases}$$

- $C_{n+1} > C_n$ の場合は遷移確立 P に従って, 解候補を取得.
- 取得後は, 温度関数 T を減少させる.
- T が大きいうちは解が大きく変更され, 小さくなるにつれて収束する.

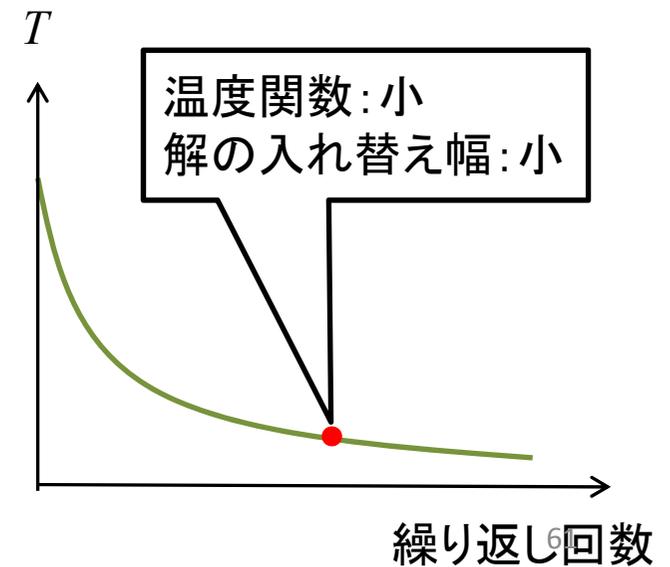
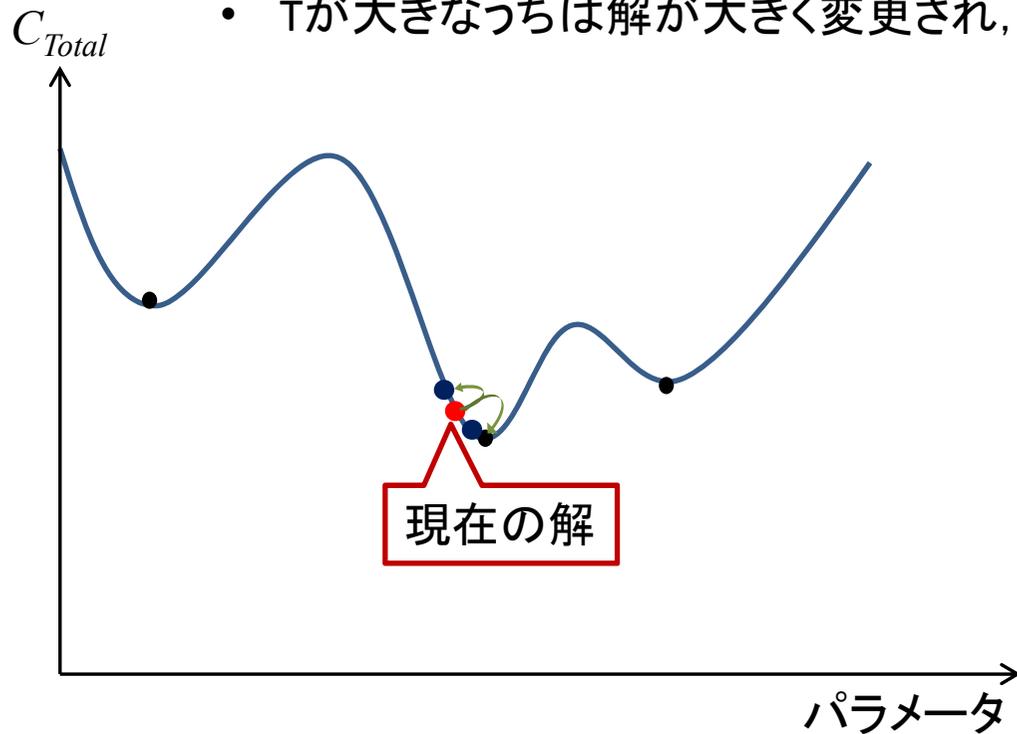


焼きなまし法の適用

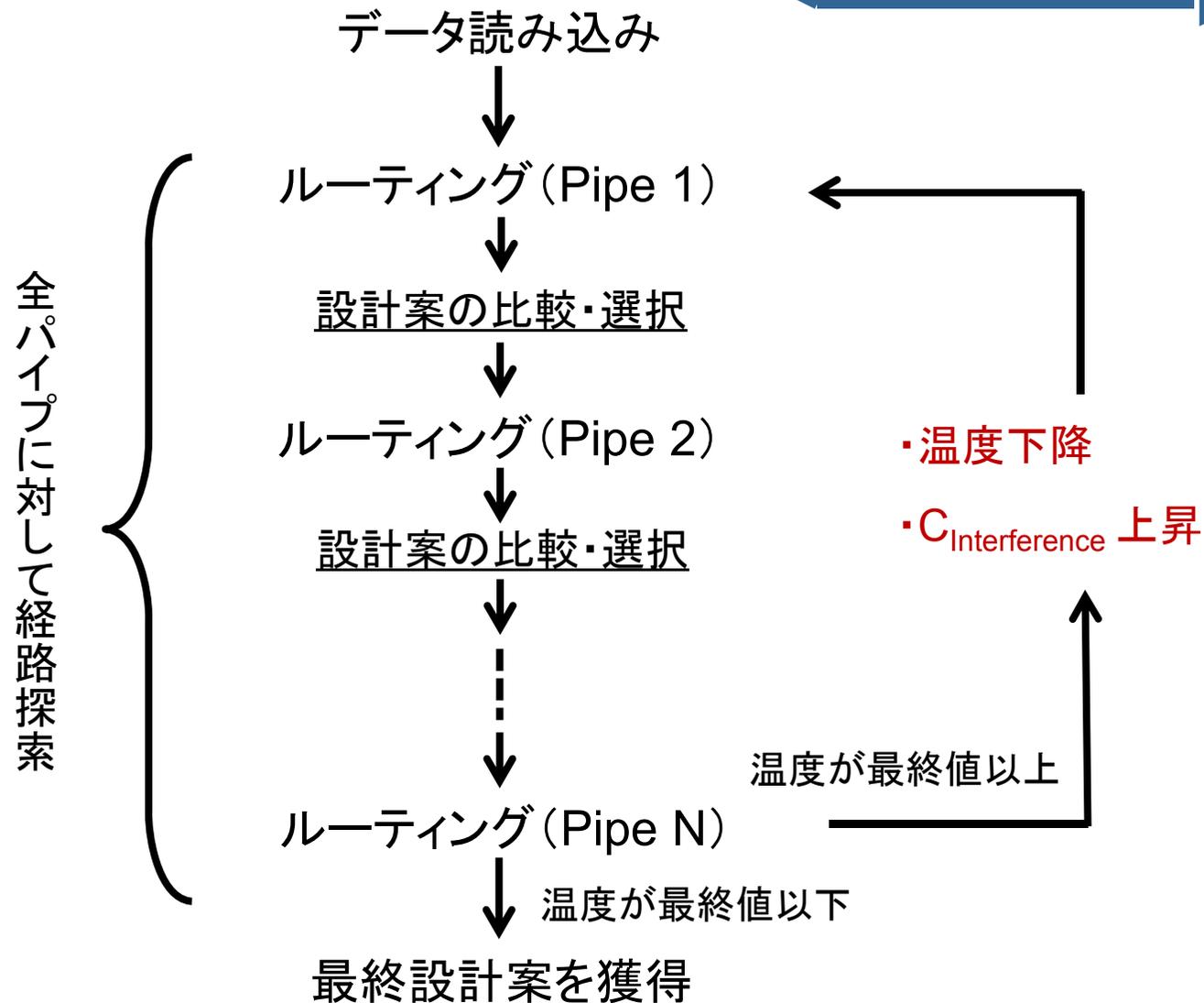


$$\begin{cases} \Delta C = C_{n+1} - C_n \\ P = \exp(-\Delta C/T) \end{cases}$$

- $C_{n+1} > C_n$ の場合は遷移確立Pに従って, 解候補を取得.
- 取得後は, 温度関数Tを減少させる.
- Tが大きくなうちは解が大きく変更され, 小さくなるにつれて収束する.



T.C.法・焼きなまし法を組み合わせた探索手法

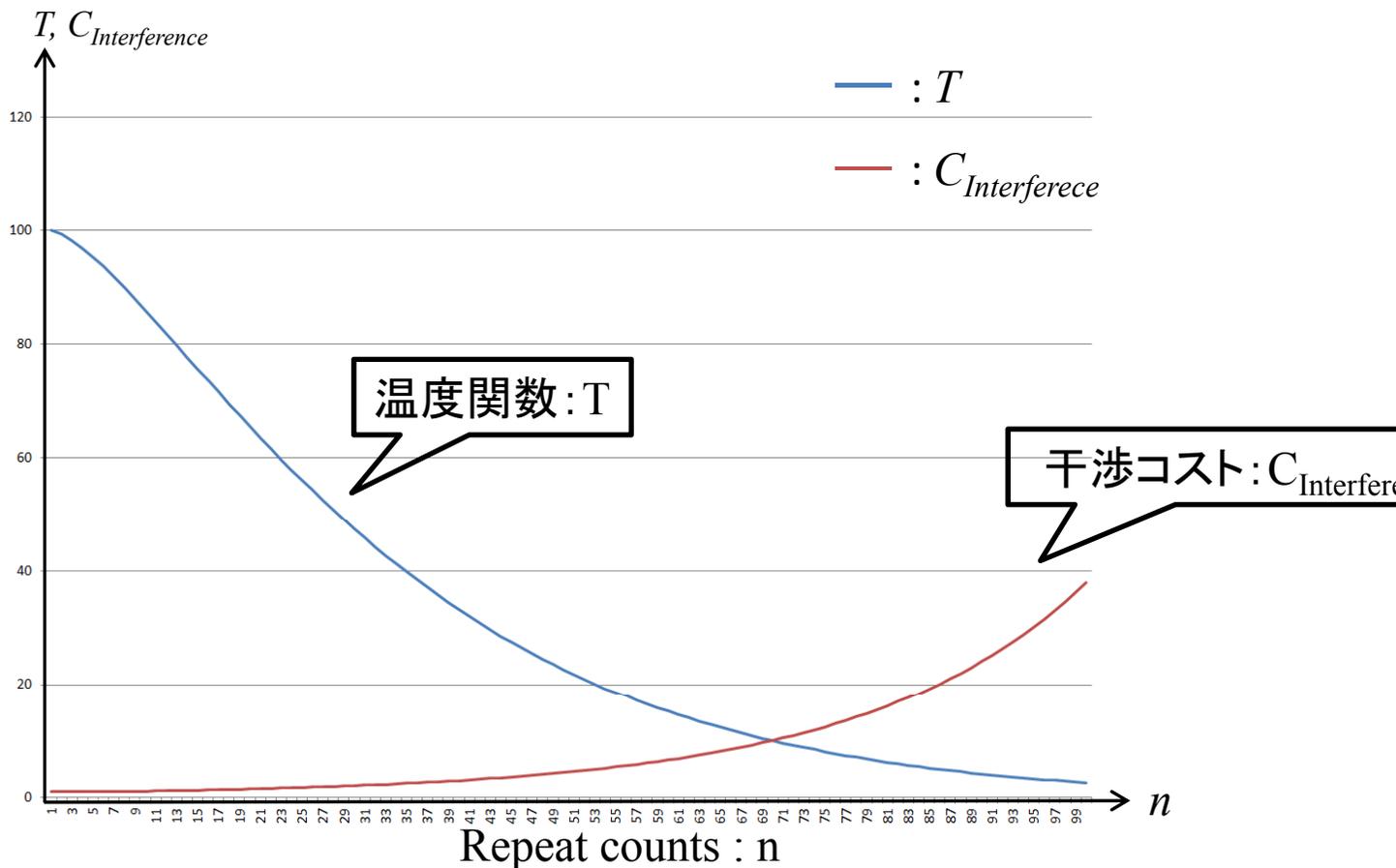


様々な設計案を比較し, 妥当な最終解を獲得可能

各パイプピース



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{温度関数: } T_{k+1} = T_k \times \alpha / (n^\beta) \quad (\alpha = 1, \beta = 0.01) \\ \text{干渉コスト: } C_{\text{Interference}} = T_0 / T \times V_{\text{Pipe}} \\ \quad (T_0: T \text{の初期値, } V_{\text{Pipe}}: \text{干渉しているパイプピースに外接する立方体の体積}) \end{array} \right.$$





◆ 研究背景・目的

1. 配管1本における経路探索
2. 複数配管における経路探索
- 3. シミュレーション実験と考察**

◆ 本研究の成果

シミュレーション実験

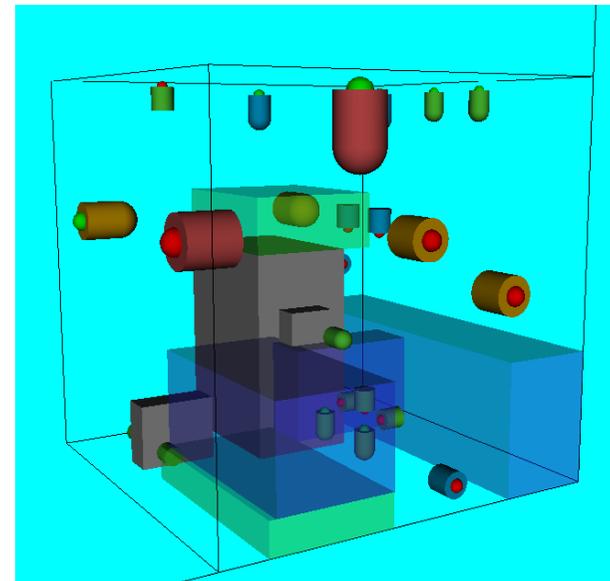


実験1

設計対象空間: 6 x 6 x 6 [m]

直径 x 本数: 0.8[m] x 1, 0.6[m] x 2, 0.4[m] x 4,
0.3[m] x 5

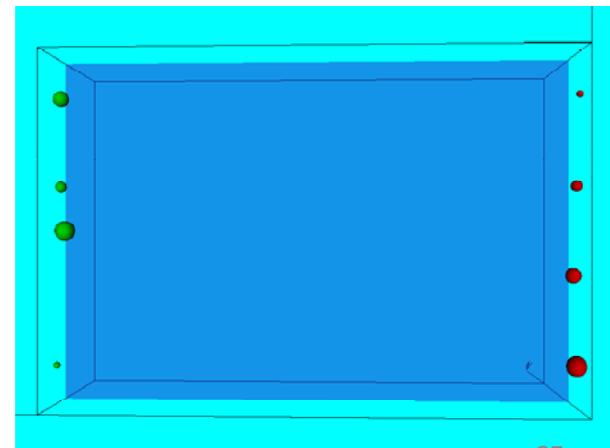
通路空間3個, パイプラック2個, 障害物3個



実験2

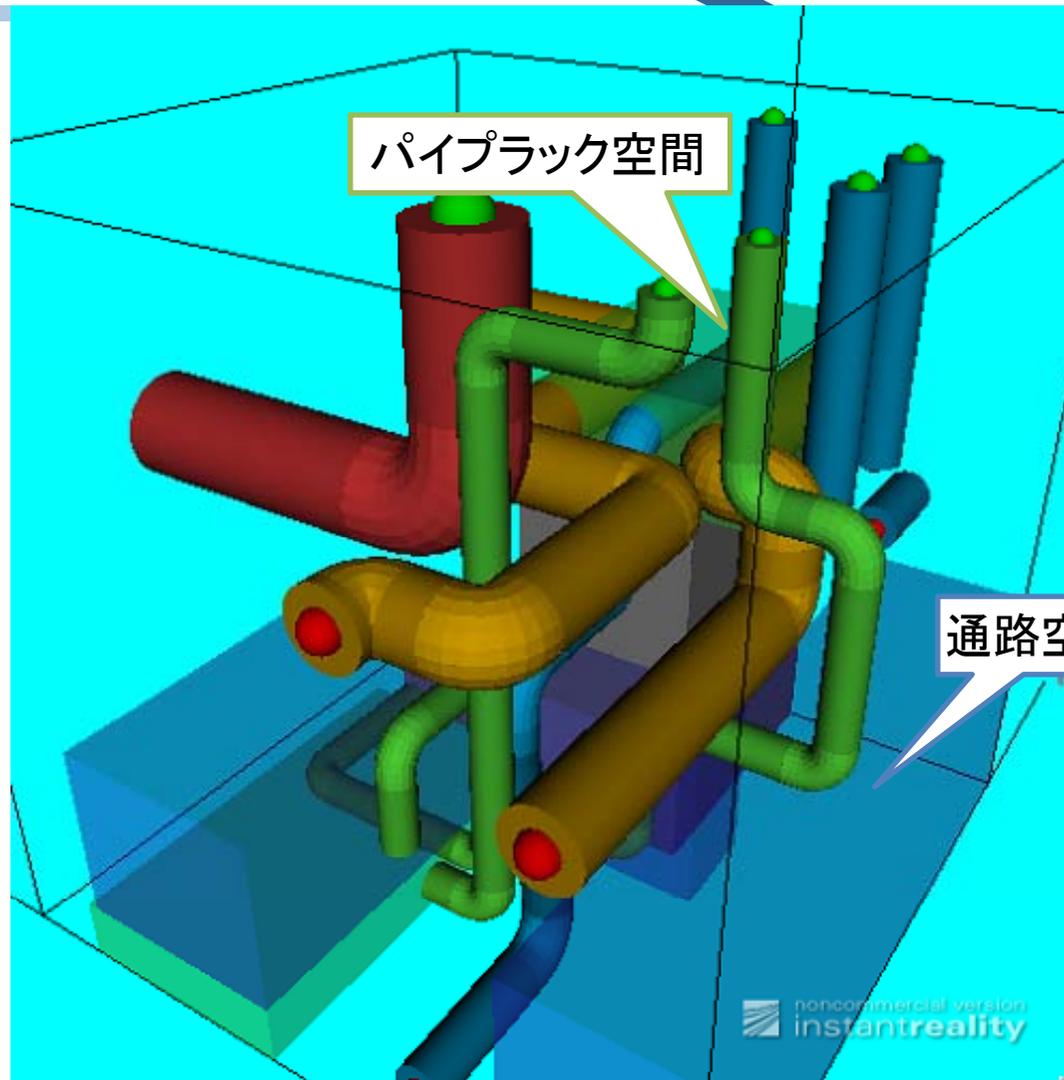
設計対象空間: 8 x 12 x 4 [m]

直径 x 本数: 0.9[m] x 1, 0.7[m] x 1, 0.5[m] x 1,
0.3[m] x 1



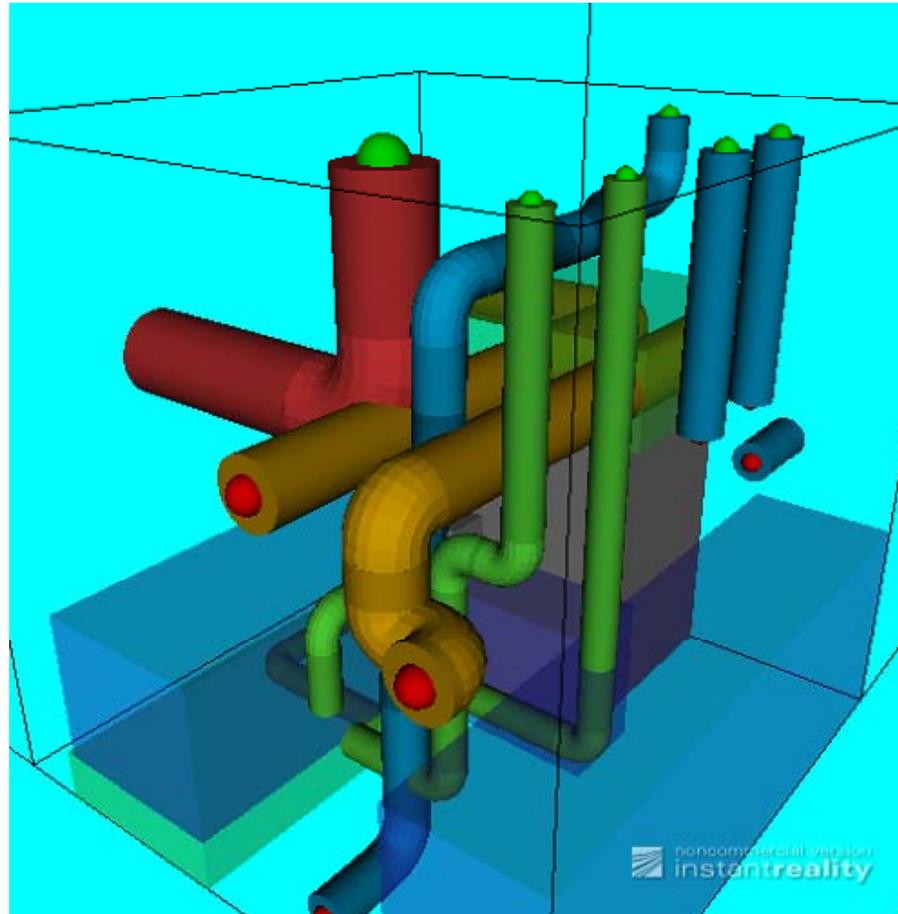
シミュレーション実験1

最終設計案



- ◆ 同じ条件で実験を5回行い, 5回とも探索結果の中では最良な解が獲得された
- ◆ 探索時間: およそ9時間 (Windows7, Intel Core i7 3.4Ghz, 8.00GB)

シミュレーション実験1



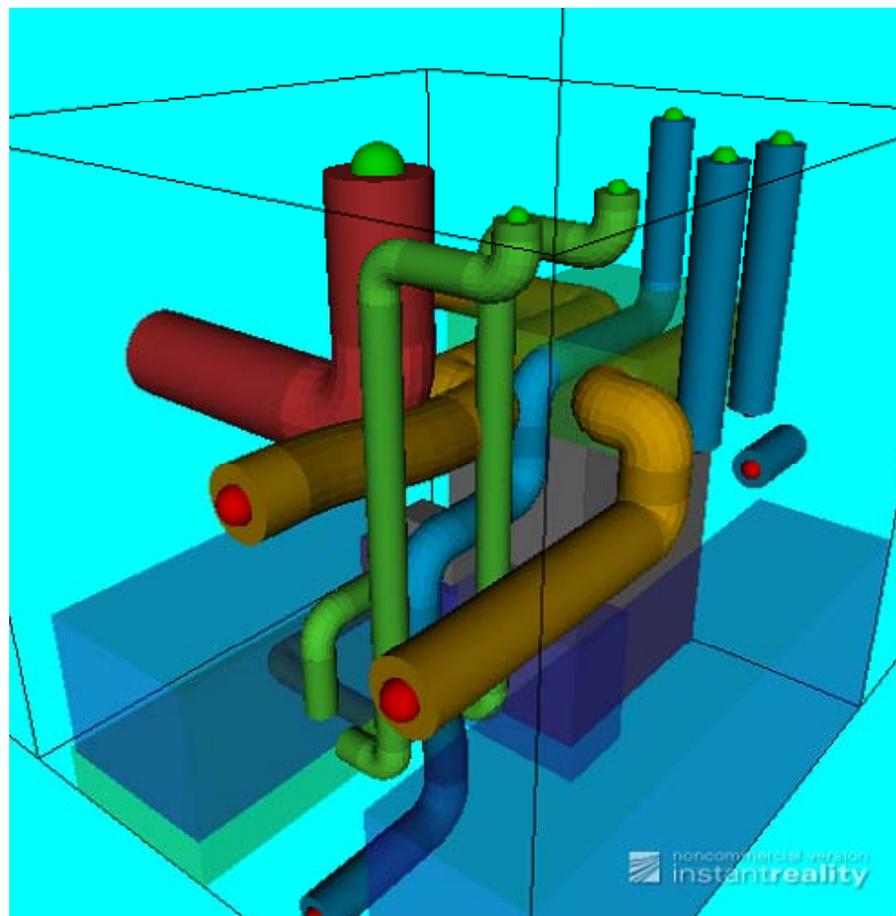
探索ステップ

$k=1, T=100$

温度

◆ 探索序盤のため、最短経路で結ばれている。

シミュレーション実験1



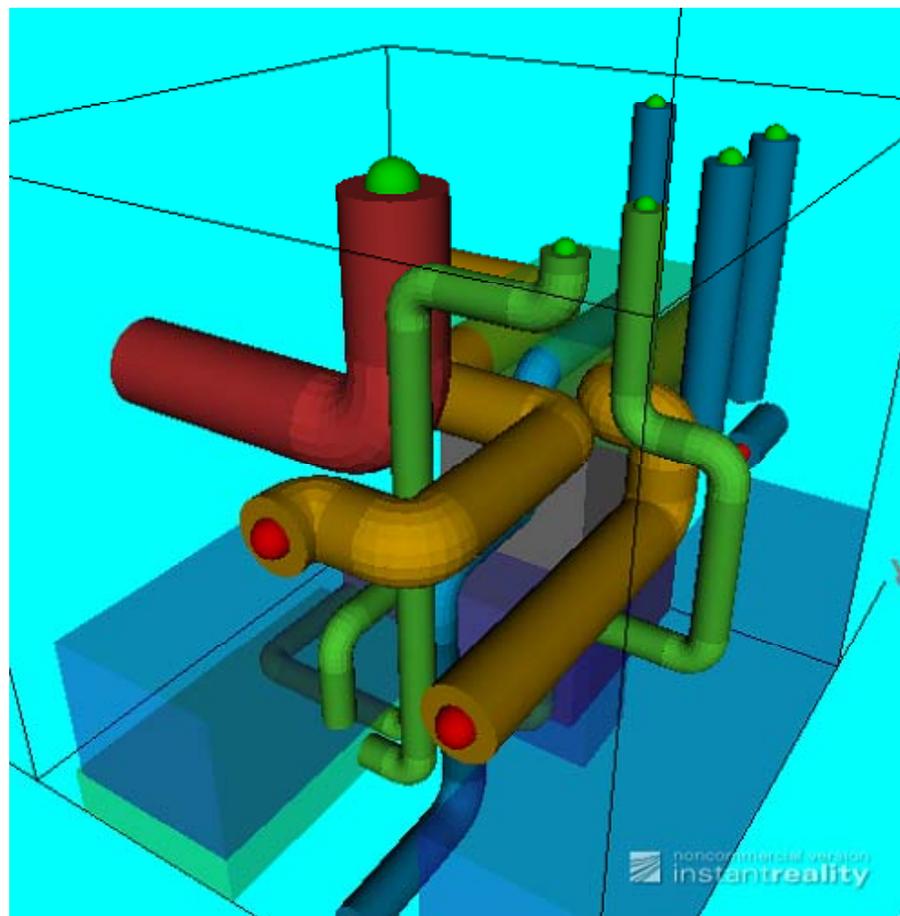
探索ステップ

k=18, T=70

温度

◆ 探索中盤, 経路同士が互いに避け始めている.

シミュレーション実験1



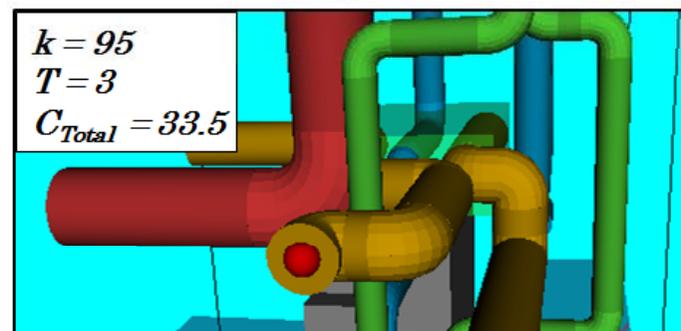
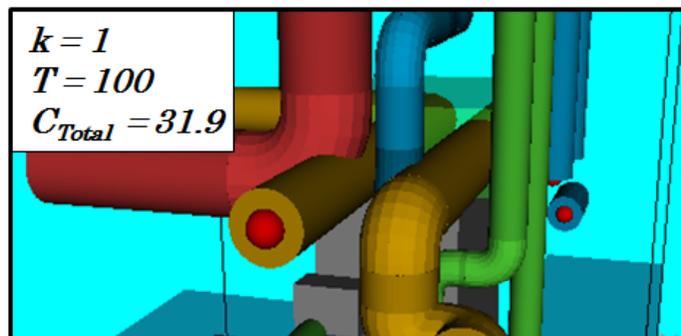
探索ステップ

k=95, T=3

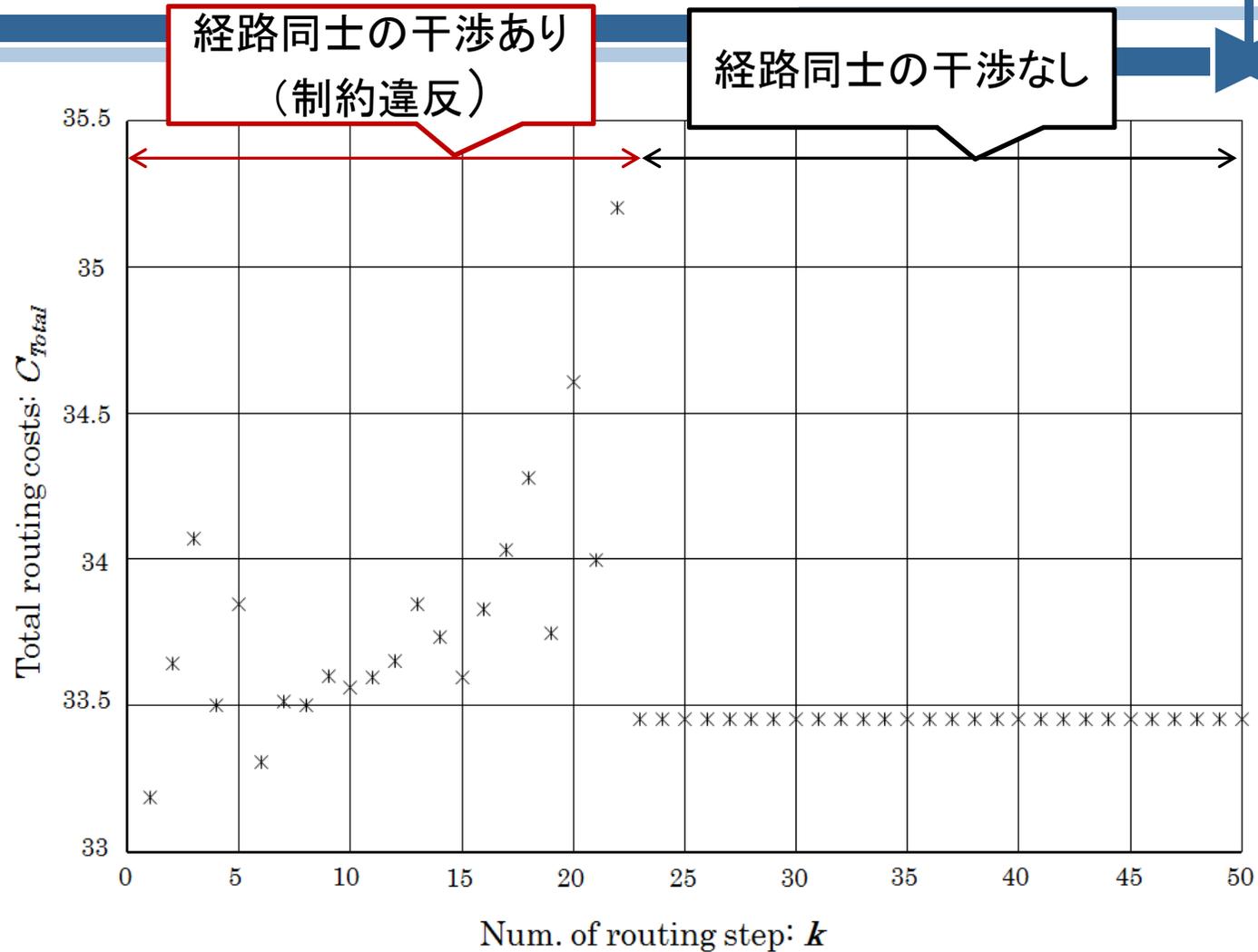
温度

◆ 探索終盤, 経路同士が互いに避けている.

シミュレーション実験1



シミュレーション実験1

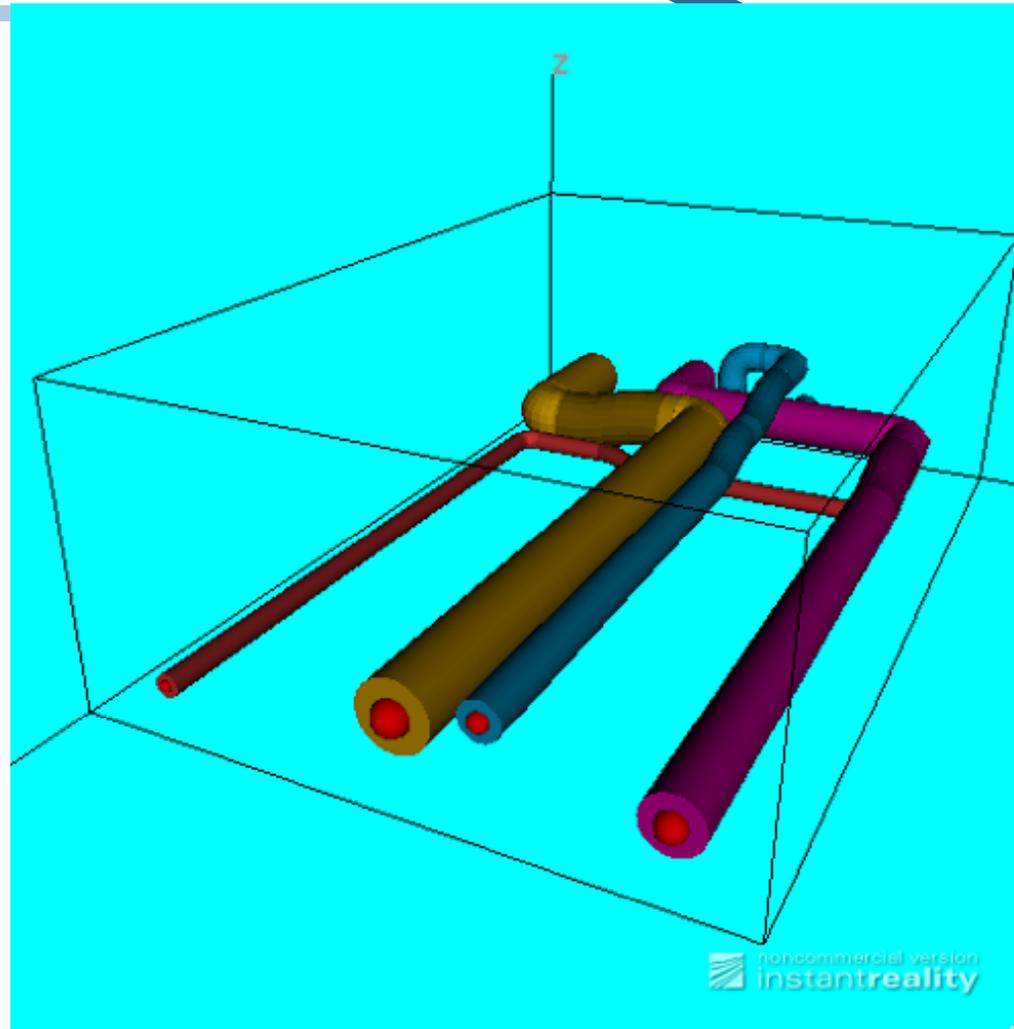


- ◆ 探索ステップが23付近で収束.
- ◆ C_{Total} は拡張目的関数のため, 探索ステップと共に増加

シミュレーション実験2

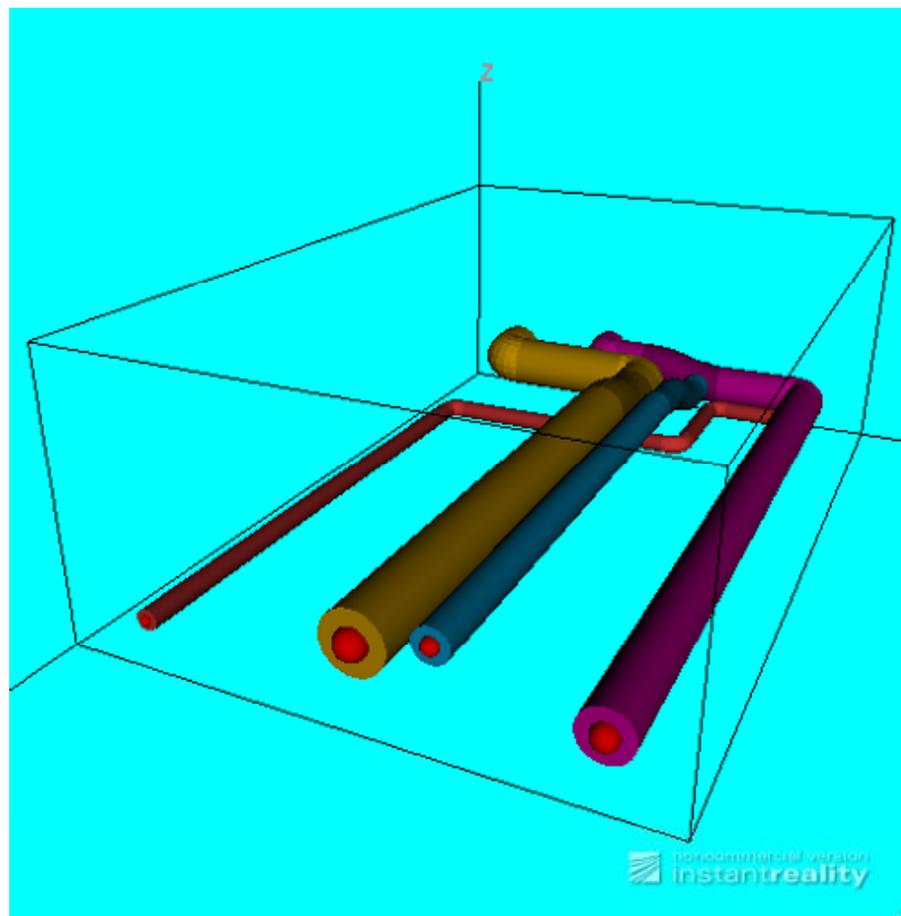


最終設計案



- ◆ 干渉の無い最終設計案が確認された.
- ◆ 探索時間: およそ18時間 (Windows7, Intel Core i7 3.4Ghz, 8.00GB) ⁷²

シミュレーション実験2



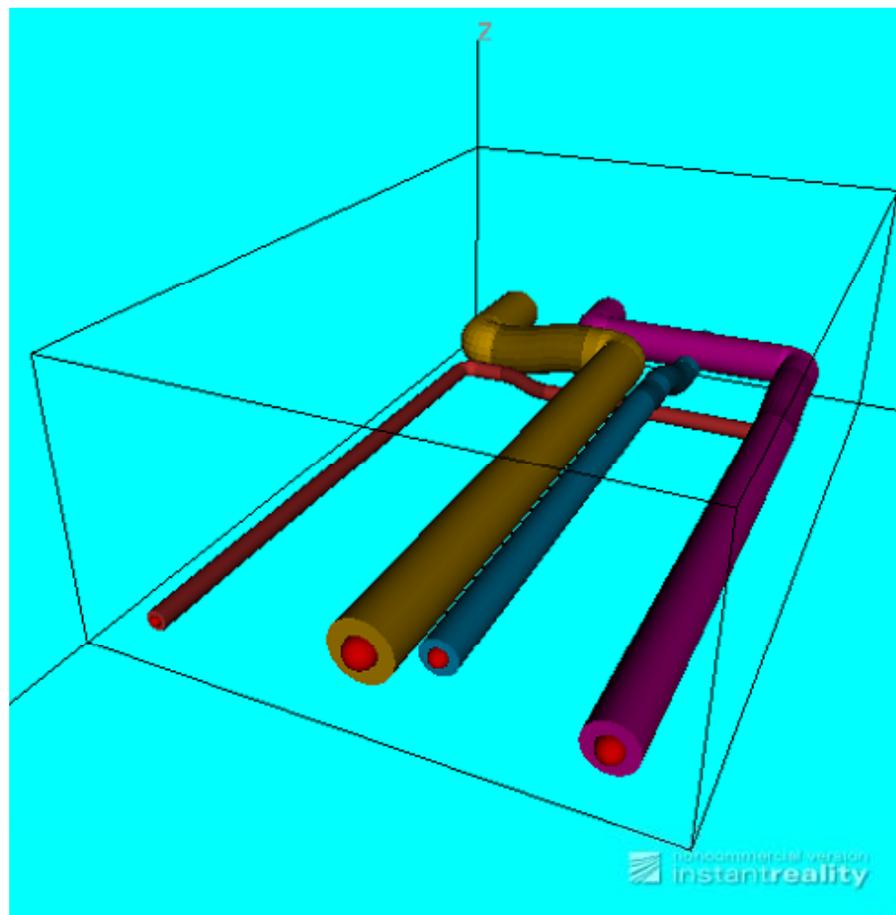
探索ステップ

$k=1, T=100$

温度

◆ 探索序盤のため、最短経路で結ばれている。

シミュレーション実験2



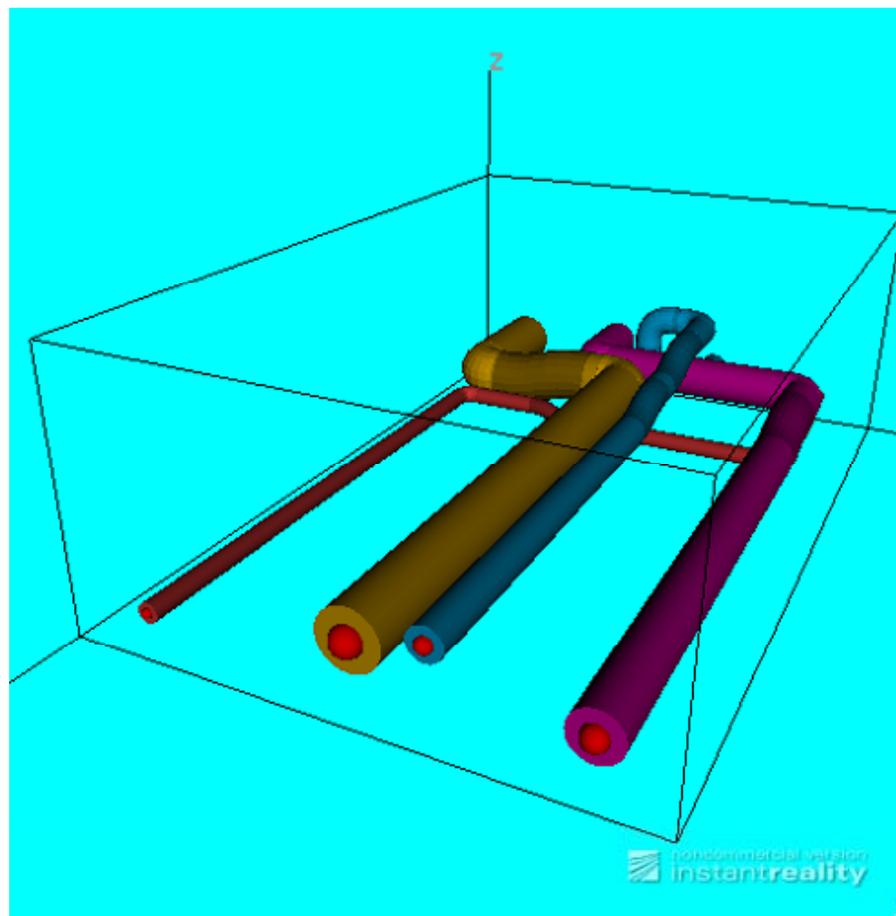
探索ステップ

$k=50, T=29$

温度

◆ 探索中盤, 経路の干渉が減少している.

シミュレーション実験2



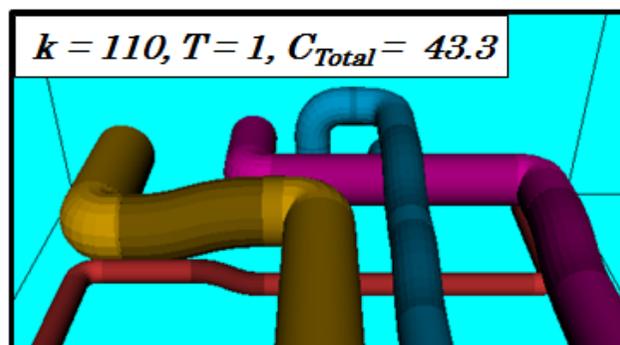
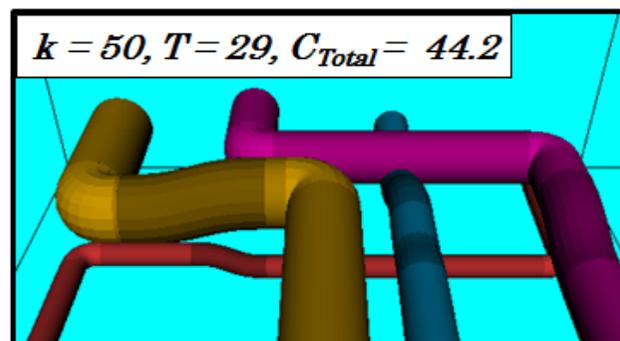
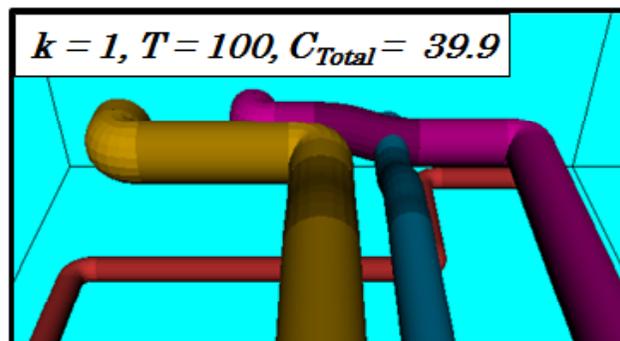
探索ステップ

$k=110, T=1$

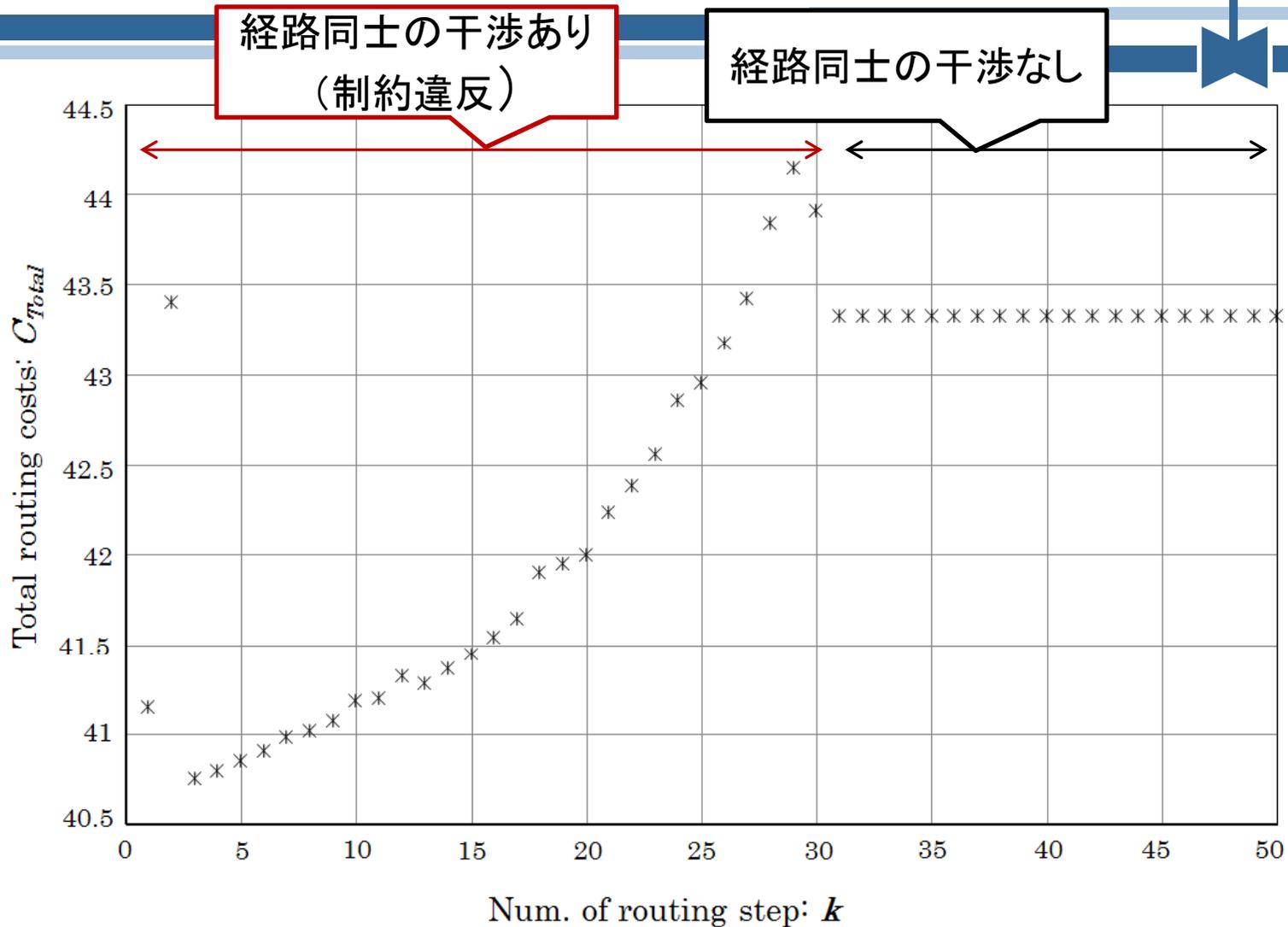
温度

◆ 探索終盤, 経路同士の干渉はなくなっている.

シミュレーション実験2



シミュレーション実験2



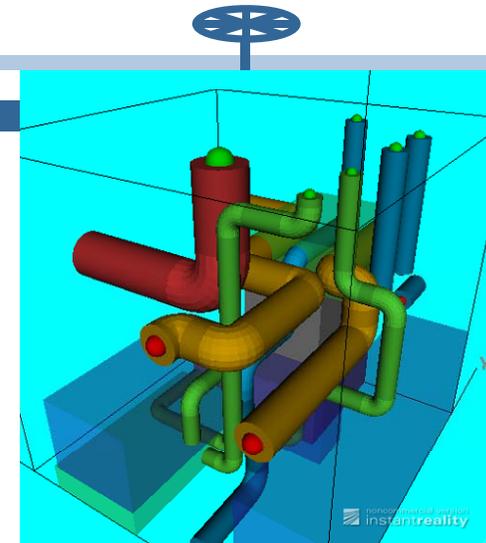
◆ 探索ステップが31付近で収束.

◆ C_{Total} は拡張目的関数のため, 探索ステップと共に増加

考察

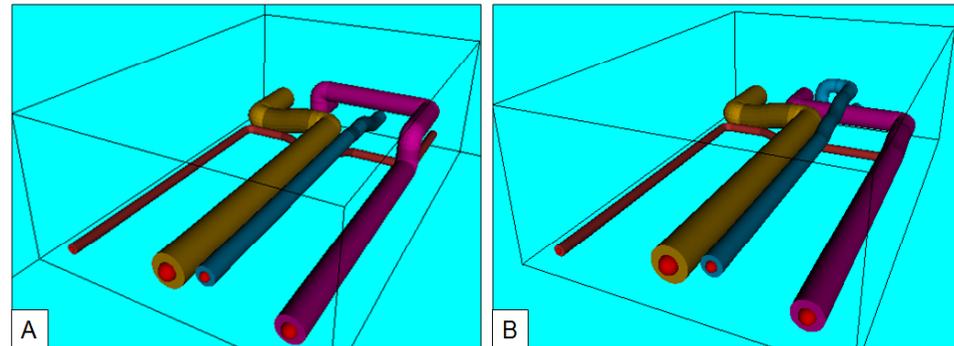
◆探索結果の妥当性

- 実験1では最良解の獲得が可能.
- 実験2ではばらつきあり. (ただし, 実用的な範囲)



◆探索時間

- 実験1,2でそれぞれ9時間, 18時間.
- 機器配置システムとの連動を考えると, 短縮の必要あり.
- 経路探索アルゴリズムの変更(A*サーチ, 複数の計算機の同時使用等)



考察

配管設計支援システム実用化へ向けた課題

◆ 経路探索

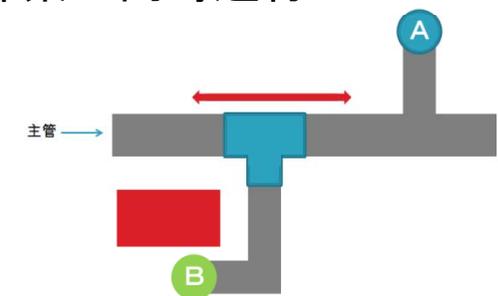
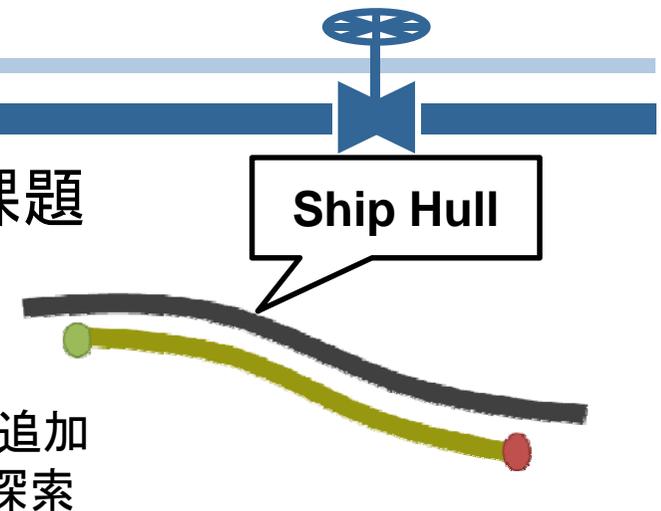
- 船殻に沿った斜めの配管 → 斜めメッシュの追加
幾何学的経路探索
- コストの妥当性(各条件下でのコストの割増, 割引)

◆ 機器配置

- タッチアンドクロス法との併用 → 機器配置と経路探索の同時進行

◆ その他

- 施工性の評価 → フランジ割り問題の定式化
- 設計修正システム → 設計者が作成した設計案を自動修正する機能.
- **設計意図やルールの指示方法** → ソースコードに触れずに簡単指示





◆ 研究背景・目的

1. 配管1本における経路探索
2. 複数配管における経路探索
3. シミュレーション実験と考察

◆ 本研究の成果

本研究の成果



- ◆ **パイプ1本の経路探索**問題において、メッシュの細かさがパイプの直径に依存せず、実用的な項目(各パイプピース, 各空間, 鳥居配管)を考慮して最適経路を得るアルゴリズムを提案したこと.
- ◆ **配管経路が複数ある場合**を想定し、経路探索の順序と解の選択による影響を抑えるため、タッチアンドクロス法と焼きなまし法を組み合わせた経路探索アルゴリズムを提案したこと.
- ◆ バラストポンプルーム, デッキ裏スペースを想定した設計対象に対して、シミュレーション実験を行い、提案手法の有用性を確認.