

# ディープラーニングを活用した 山岳トンネルの岩盤評価



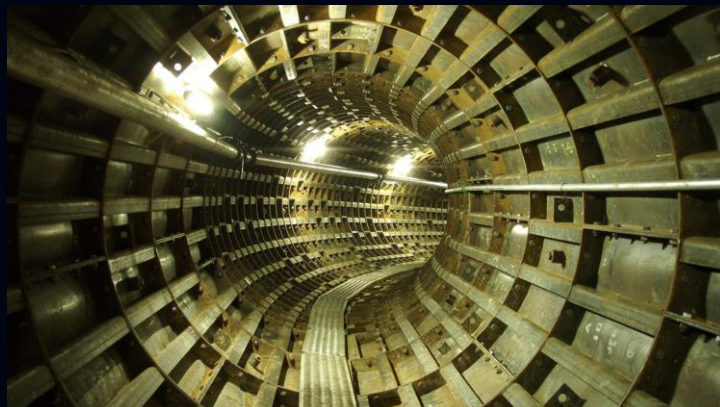
(株) 大林組 技術研究所

畑 浩二

# トンネル、地下空洞

工法分類: 山岳トンネル  
シールドトンネル  
開削トンネル

使用目的: 鉄道、道路  
水路 他



# 山岳トンネルについて

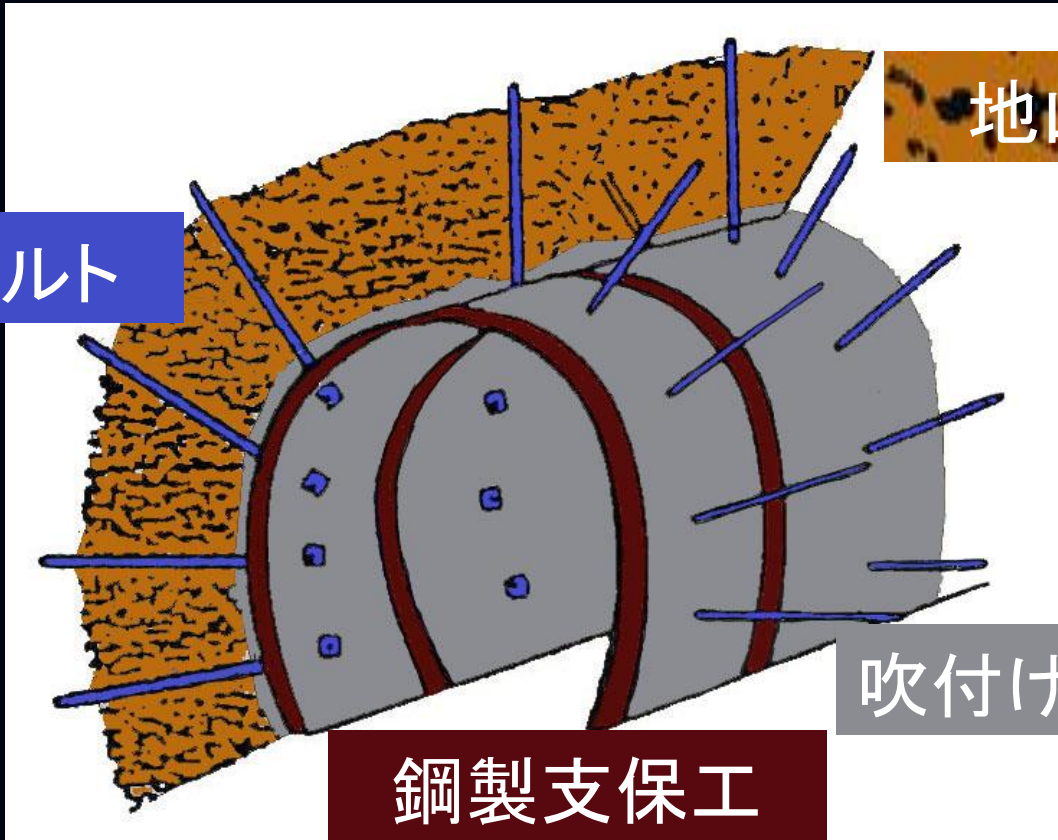
我国における標準工法：NATM

ロックボルト

地山・岩盤

吹付けコンクリート

鋼製支保工





# 発破掘削の標準的な施工サイクル

切羽

1. 削孔／装薬



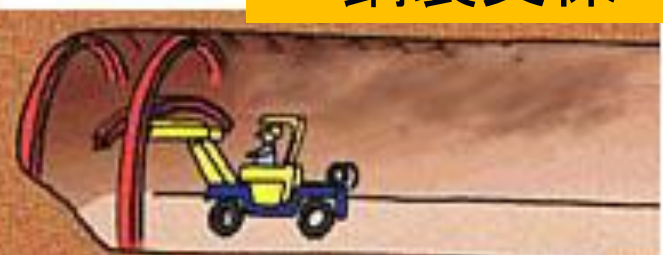
2. 発破



3. ズリ処理



4. 鋼製支保工建込



5. コンクリート吹付け



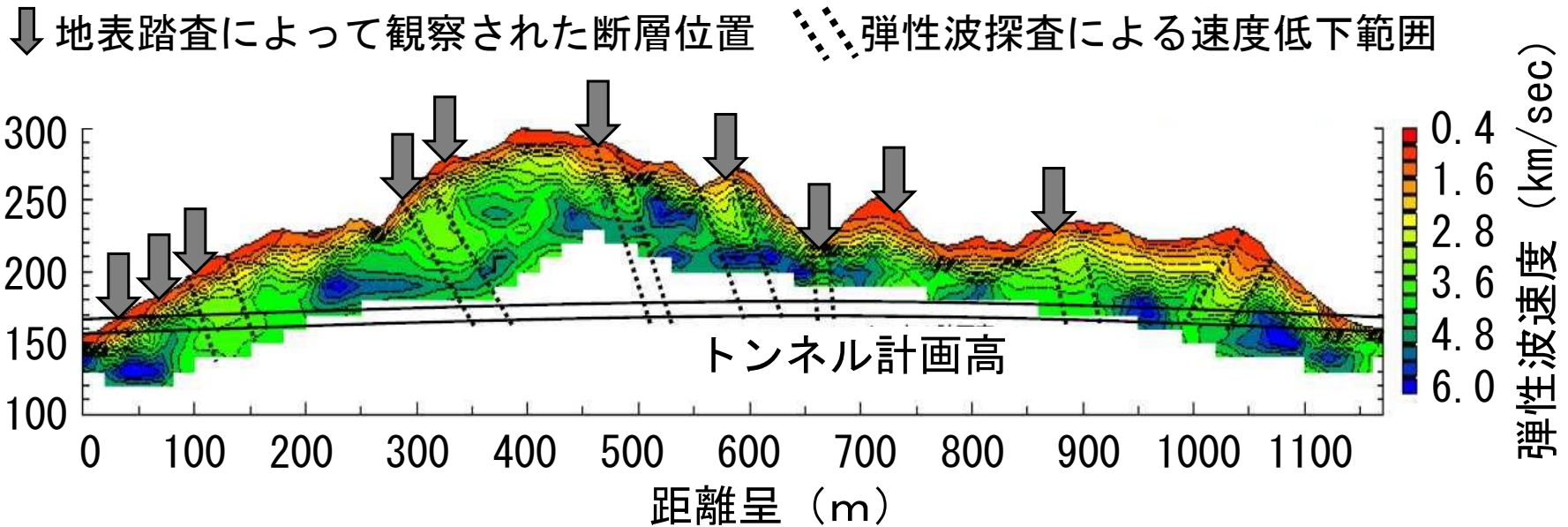
6. ロックボルト打設



# 発破掘削方式の標準的施工サイクル



# 山岳トンネルの設計



↓

当初設計：弾性波探査他

↓

修正設計：観察・計測・解析

## 施工時のトラブル



# 切羽観察の課題と理想

現状：

現場技術者が観察・評価を実施

地質学的知識が不足

→ 場合によっては、不適切な評価

理想：

施工現場に地質専門家を配し、評価支援



# 研究開発のコンセプト

切羽の適切な評価：地質専門家と同程度

◎現場技術者を排除するものではない

◎現場技術者のサポート



# ディープラーニング適用に際しての工夫

- ・教師あり学習

過去の切羽観察記録利用

※ 地質専門家による見直し

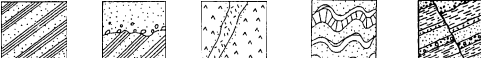
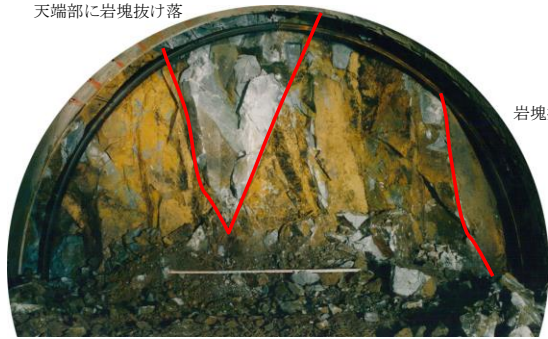
- ・転移学習

Image Netによる構築モデルを利用

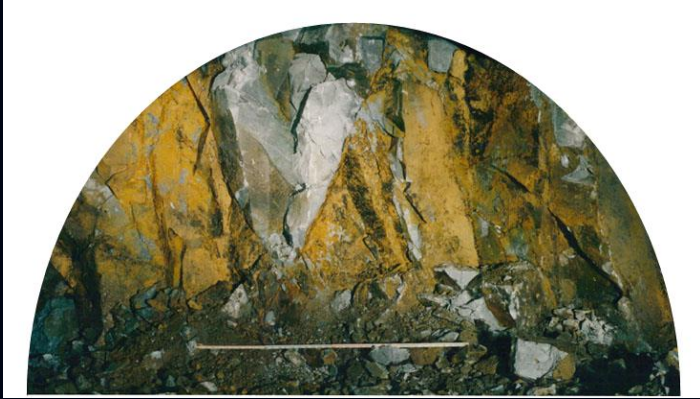
- ・アルゴリズム

特徴抽出: AlexNet、分類: SVM

# 教師データ：切羽観察記録

| 切 羽 観 察 記 録                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|--------------|--|-------|------|--|
| トンネル名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 〇〇トンネル                                                                                                                          | 位 置                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 起点からの距離程 k m                            |                                          | 坑口からの距離程 k m |  | 支保No. |      |  |
| 土 被 り                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | △△ m                                                                                                                            | 総 合 判 断                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 地山区分あるいはパターン区分の判定                       |                                          |              |  |       |      |  |
| 岩 種                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | G                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 岩 石 名                                   | 砂岩及び頁岩                                   |              |  |       |      |  |
| 特殊条件状態                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 膨張性土圧・偏圧・流動性・土被り小 ( ) m・重要構造物接近・谷の直下<br>その他特殊な条件：                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 補助工法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 長尺先受け ( 本 )・短尺先受け ( 本 )・鏡ボルト ( 本 )・地盤改良                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 地質構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1. 互 層 2. 不整合 3. 岩脈貫入 4. 褶 曲 5. 断 層 6. その他<br> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 掘削地点の地山の状態と挙動                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| A 切羽の状態                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1. 安定                                                                                                                           | 2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3. 鏡面の押出しを生じる                           | 4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出                       | 2            |  |       |      |  |
| B 素掘面の状態                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1. 自立                                                                                                                           | 2. 時間がたつと緩み肌落ちする                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 3. 自立困難掘削後早期に支保する                       | 4. 掘削に先行して山を受けおく必要が                      | 2            |  |       |      |  |
| C 圧縮強度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃ではね返る                                                                                    | 2. $100 > \sigma_c \geq 20$ ハンマー打撃でくだける                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3. $20 > \sigma_c \geq 5$ ハンマーの軽い打撃で砕ける | 4. $5\text{MPa} > \sigma_c$ ハンマーの刃先がくい込む | 2            |  |       |      |  |
| D 風化変質                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1. なし・健全                                                                                                                        | 2. 岩目に沿って変色、強度やや低下                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3. 全体的に変色強度相当に低下                        | 4. 土砂状、粘土状破砕、当初より未固結                     | 3            |  |       |      |  |
| E 破砕部の切羽に占める割合                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1. 5% > 破砕                                                                                                                      | 2. 20% > 破砕 $\leq$ 5%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3. 50% > 破砕 $\leq$ 20%                  | 4. 切羽面の大部分が破砕されている状態                     | 3            |  |       |      |  |
| F 割れ目の頻度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$                                                                                                        | 2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$    | 4. $5\text{cm} > d$ 破砕当初より未固結            | 3            |  |       |      |  |
| G 割れ目状態                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1. 密着                                                                                                                           | 2. 部分的に開口                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3. 開口                                   | 4. 粘土をはさむ、当初より未固結                        | 2            |  |       |      |  |
| H 割れ目形態                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1. ランダム方形                                                                                                                       | 2. 柱状                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3. 層状、片状、板状                             | 4. 土砂状、細片状当初より未固結                        | 3            |  |       |      |  |
| I 湧水目視での量                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1. なし、滲水程度                                                                                                                      | 2. 滴水程度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3. 集中湧水 ( l/分 )                         | 4. 全面湧水 ( l/分 )                          | 2            |  |       |      |  |
| J 水による劣化                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1. なし                                                                                                                           | 2. 緩みを生ず                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3. 軟弱化                                  | 4. 崩壊・流出                                 | 2            |  |       |      |  |
| 合 計 24                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 割れ目の方向性                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 縦断方向 (切羽鏡面)                                                                                                                     | 1. 水平 ( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) 2. さし目 ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. さし目 ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 流れ目 ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 流れ目 ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直 ( $\theta \geq 80^\circ$ ) [最大傾斜角]           |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 横断方向 (切羽鏡面)                                                                                                                     | 1. 水平 ( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) 2. 右から左へ ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. 右から左へ ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 左から右へ ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 左から右へ ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直 ( $\theta \geq 80^\circ$ ) [見掛けの傾斜角] |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 未固結地山の場合は、下記項目の追記を要す<br>地山の状態<br>1. 単一土層 2. 互層 (1. 水平 2. 傾斜) 3. レンズのはさみ層 (1. なし 2. あり) 4. その他 ( ) 5. 崖堆積物 6. 段丘堆積物 7. 火山砕屑岩 8. 泥流層 9. 岩盤との境界部 10. 断面外の上部に軟弱層あり 11. 埋土・盛土 12. その他 ( )<br>不連続面<br>1. 割れ目発達 2. シーム 3. 断層 4. 不整合 5. その他 ( )<br>土質<br>1. 粘性土 2. 砂質 3. 礫質土 4. 特殊土 (1. まさ土 2. 火山灰土 3. しらす 4. 有機質土) 5. その他 ( )<br>状態<br>1. 軟らかい ( $4 > N$ ) 2. 中位 ( $8 > N \geq 4$ ) 3. 硬い ( $15 > N \geq 8$ ) 4. 非常に硬い ( $30 > N \geq 15$ ) 5. 固結 ( $N \geq 30$ )<br>特殊土を<br>1. 緩い ( $10 > N$ ) 2. 中位 ( $30 > N \geq 10$ ) 3. 密な ( $50 > N \geq 30$ ) 4. 非常に密な ( $N \geq 50$ )<br>土質<br>1. ルーズ 2. 締っている<br>1. 2~5cm 2. 5~20cm 3. 20~75cm 4. 75~300cm 5. 300cm以上<br>1. 30%以上 2. 30~50% 3. 50%以上<br>地山の特性<br>N値<br>透水性<br>1. 透水層 2. 不〜難透水性 3. 両者の互層 4. その他 ( )<br>地下水頭 (掘削時)<br>FLより± m上 備考 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 【切羽画像・スケッチ】<br>天端部に岩塊抜け落<br> 岩塊抜け落ち                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 【記 事】<br>_____<br>_____<br>_____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       |      |  |
| 記載者氏名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                         |                                          |              |  |       | 〇〇〇〇 |  |

## 切羽評価項目



- ①強度
- ②風化変質
- ③割目間隔
- ④割目状態
- ⑤走向傾斜
- ⑥湧水量
- ⑦湧水による劣化度合

ディープラーニングによる切羽評価の可否を探る

# 学習および検証データ

切羽観察事例：6現場70ヶ所

地山等級：DⅢ～CⅠに相当

学習用70%、テスト用30%

岩種：花崗岩  
流紋岩

砂岩  
粘板岩  
泥岩  
頁岩  
凝灰岩  
凝灰角礫岩



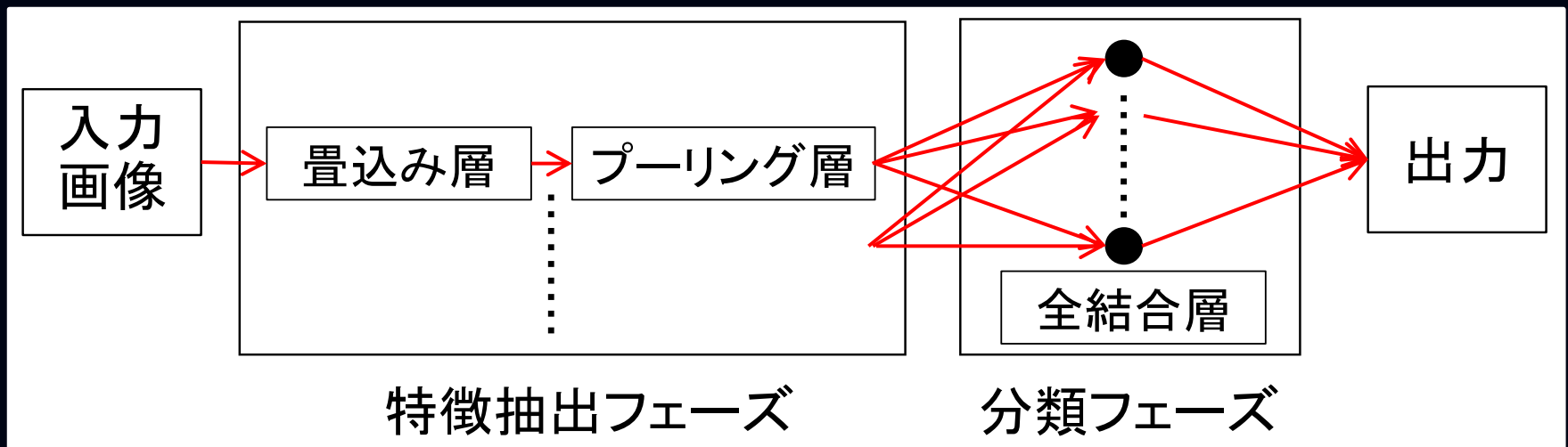
# AlexNetとSVMの活用

特徴抽出フェーズにAlexNet使用

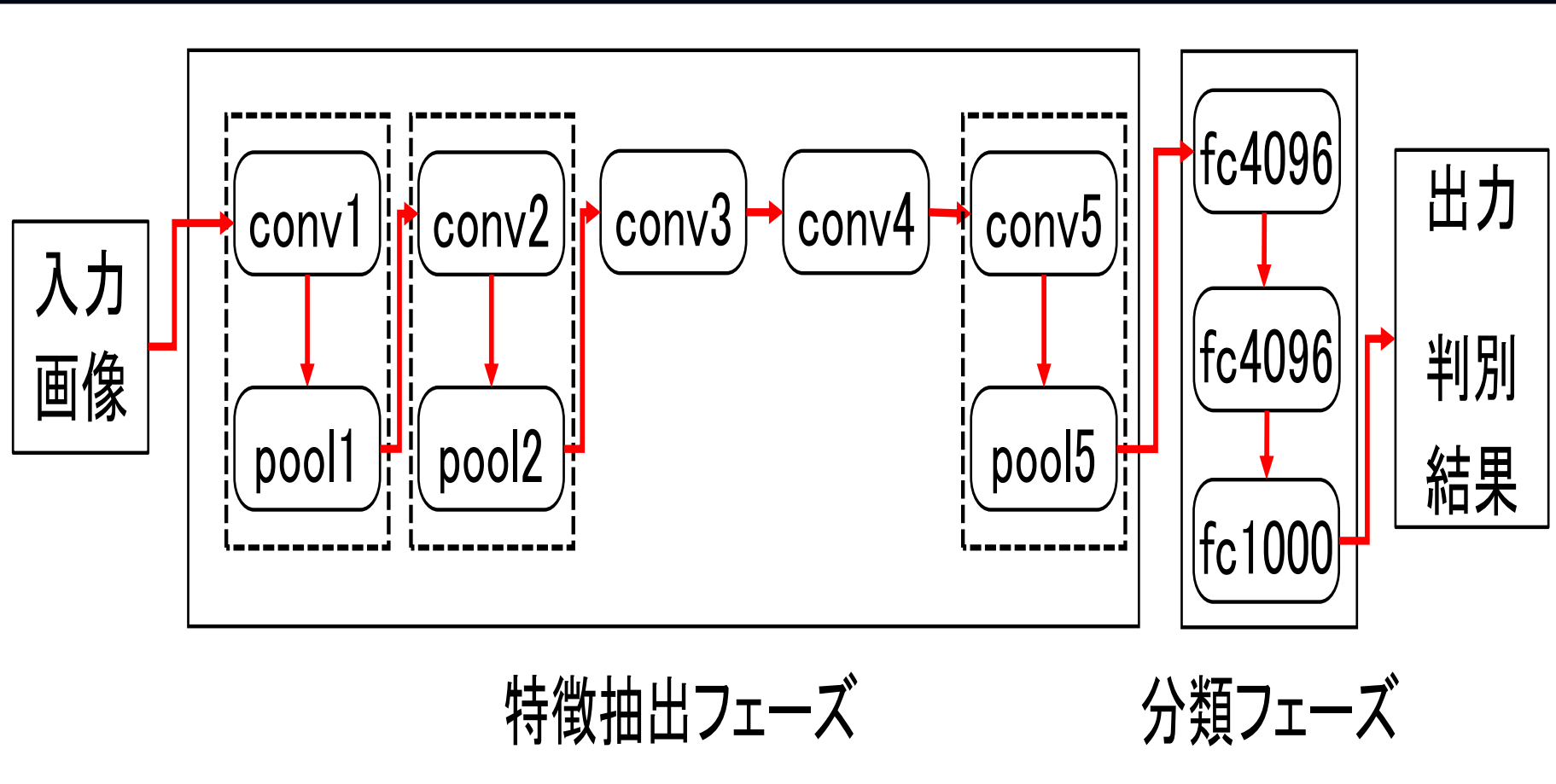
トロント大学で開発(2012年ILSVRCで優勝)

多層型ニューラルネットワーク

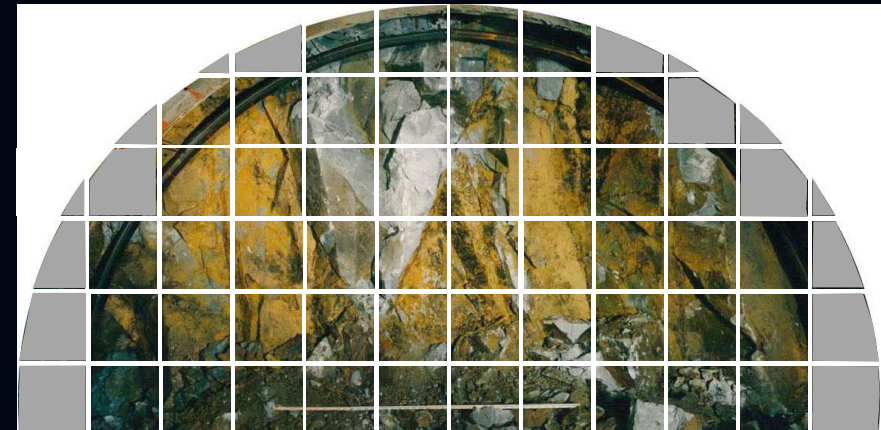
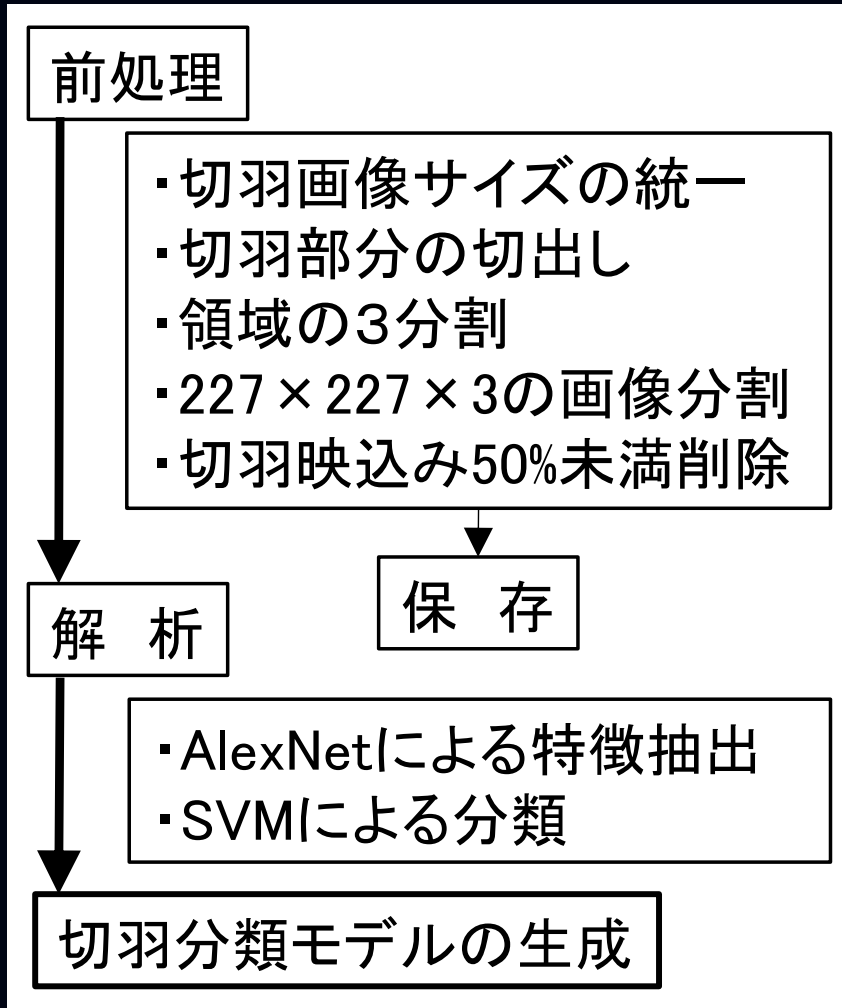
分類フェーズにSVM(サポートベクターマシン)使用



# AlexNetの層構造



# 学習データ作成の流れ

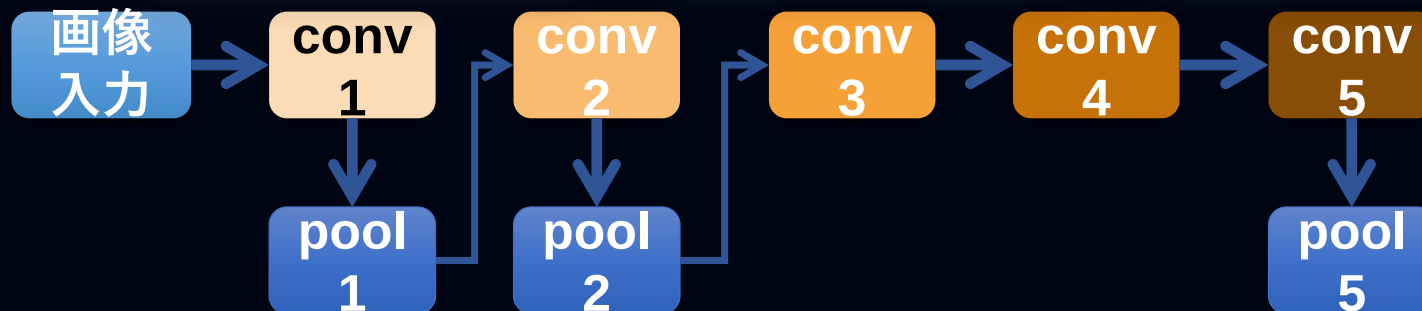
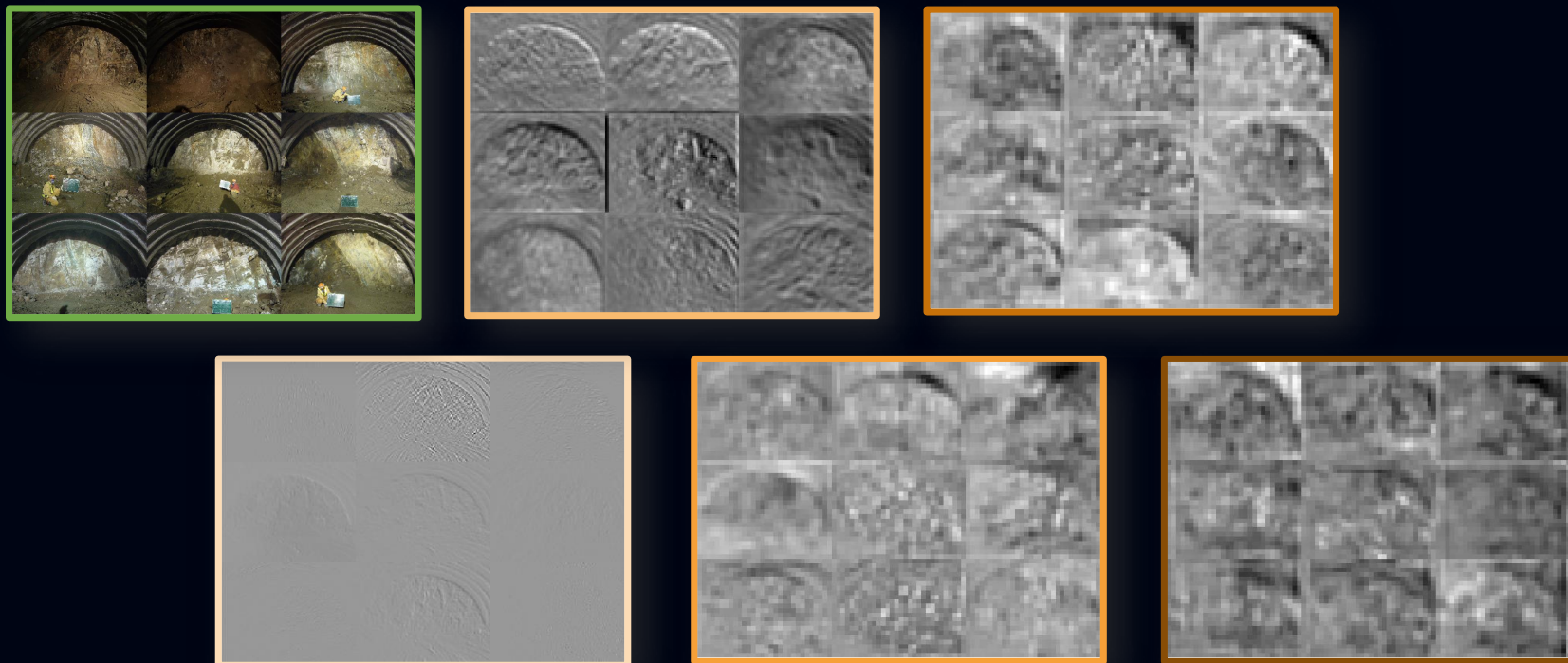


# 学習に利用した切羽画像の一例





# 特徴抽出フェーズにおける処理例





# 解析結果例：風化変質ヒートマップ

## 凡例

- 1: 概ね新鮮
- 2: 割目沿いの風化変質
- 3: 岩芯まで風化変質
- 4: 土砂状風化、未固結土砂



## 検証結果①【風化変質】

|      |                | ディープラーニングによる予測評価 |               |              |                |
|------|----------------|------------------|---------------|--------------|----------------|
|      | 評価区分           | 概ね新鮮             | 割目沿いの<br>風化変質 | 岩芯まで<br>風化変質 | 土砂状風化<br>未固結土砂 |
| 実質評価 | 概ね新鮮           | 74               | 35            | 1            | 0              |
|      | 割目沿いの<br>風化変質  | 41               | 742           | 17           | 2              |
|      | 岩芯まで<br>風化変質   | 1                | 22            | 80           | 3              |
|      | 土砂状風化<br>未固結土砂 | 0                | 9             | 2            | 6              |

的中率:  $902/1035=87\%$

## 検証結果②【割目間隔】

|      |                                    | ディープラーニングによる予測評価   |                                  |                                    |                                   |                  |
|------|------------------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
|      | 評価区分                               | $d \geq 1\text{m}$ | $1\text{m} > d \geq 50\text{cm}$ | $50\text{cm} > d \geq 20\text{cm}$ | $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$ | $5\text{cm} > d$ |
| 実質評価 | $d \geq 1\text{m}$                 | 2                  | 1                                | 3                                  | 0                                 | 0                |
|      | $1\text{m} > d \geq 50\text{cm}$   | 0                  | 176                              | 126                                | 2                                 | 3                |
|      | $50\text{cm} > d \geq 20\text{cm}$ | 1                  | 129                              | 448                                | 3                                 | 2                |
|      | $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$  | 0                  | 0                                | 4                                  | 57                                | 24               |
|      | $5\text{cm} > d$                   | 0                  | 1                                | 3                                  | 22                                | 28               |

的中率:  $711/1035=69\%$

## 検証結果③【割目状態】

|      |                                 | ディープラーニングによる予測評価 |                                 |                                 |                    |                              |
|------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|
|      | 評価区分                            | 割目は密着            | 割目の一部が開口<br>幅 $\leq 1\text{mm}$ | 割目の多くが開口<br>幅 $\leq 1\text{mm}$ | 割目が開口<br>1mm<幅<5mm | 割目が開口<br>幅 $\geq 5\text{mm}$ |
| 実質評価 | 割目は密着                           | 34               | 42                              | 0                               | 0                  | 0                            |
|      | 割目の一部が開口<br>幅 $\leq 1\text{mm}$ | 21               | 770                             | 9                               | 2                  | 0                            |
|      | 割目の多くが開口<br>幅 $\leq 1\text{mm}$ | 0                | 7                               | 64                              | 4                  | 6                            |
|      | 割目が開口<br>1mm<幅<5mm              | 0                | 9                               | 3                               | 41                 | 4                            |
|      | 割目が開口<br>幅 $\geq 5\text{mm}$    | 0                | 5                               | 0                               | 3                  | 11                           |

的中率:  $920/1035=89\%$

## まとめ & 今後の課題

的中率は、風化変質(4分類): 87%

割目間隔(5分類): 69%

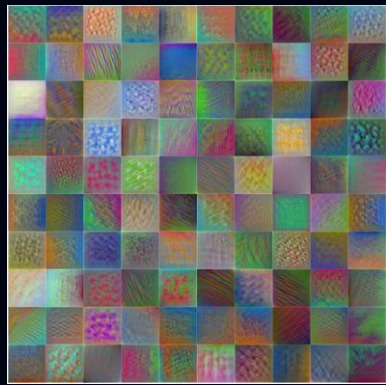
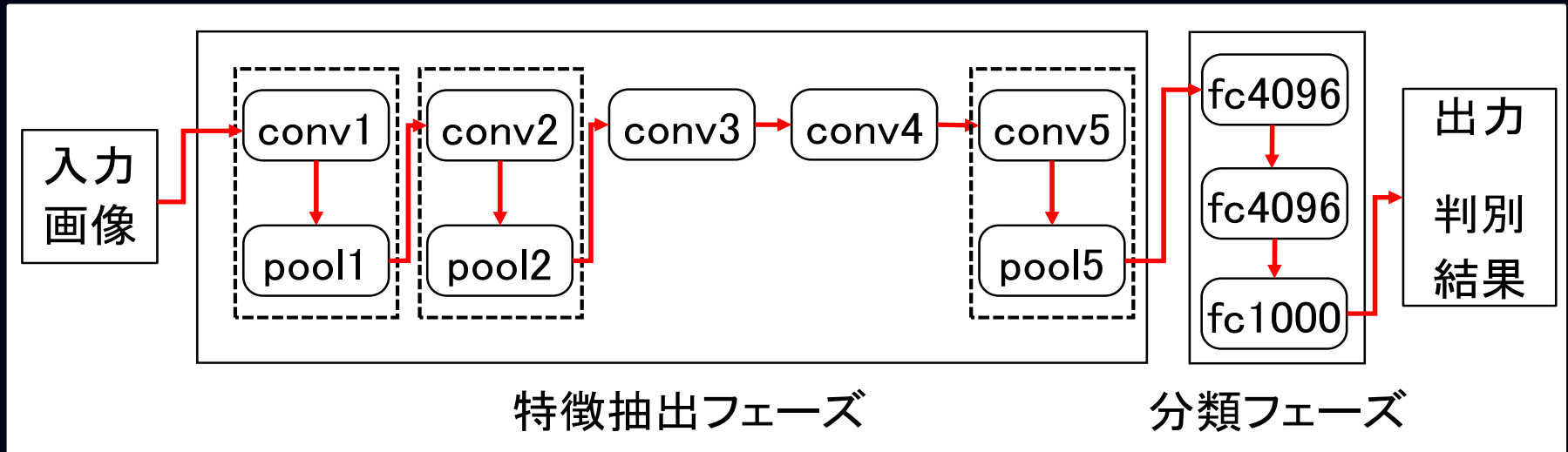
割目状態(5分類): 89%

.....

- ・残りの4項目の適用性検討
- ・試行モデル → 実用化
- ・特徴→分類に至る処理の流れの理解



# 特徴 → 分類至る処理の流れ(試行研究)



Conv2特徴量



Conv3特徴量



Conv4特徴量



Conv5特徴量

## AIを導入するに際しての課題

- 解決したい問題の要点理解・方法選定  
何をやりたいのか、解決策、AIの適用性？
- 人材  
内製化／アウトソーシング？
- 費用対効果  
高い、精度低い、効果乏しい？
- 処理のブラックボックス

## 大林組のIoT、AI取組み

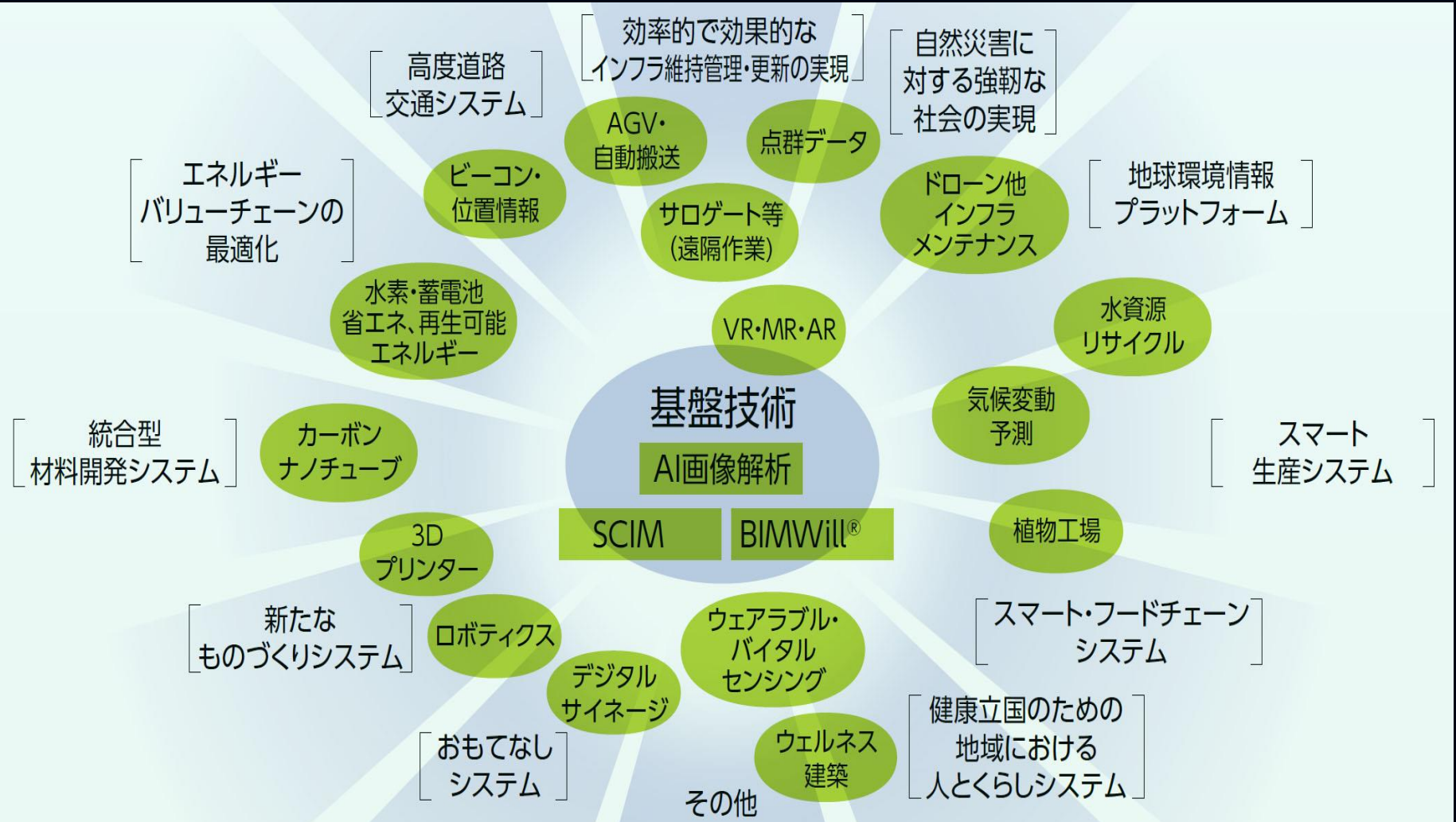
### ※ 中期経営計画2017

IoT、AI、ロボティクス活用 → 生産性向上

### ※ 施策の1つ: AI推進会議

- 建築工程認識AI: 集合住宅内装工事
- WellnessBOX: ビルマネージメントシステム

# Society 5.0を目指す大林組の開発技術



# MathWorks® 殿との連携

## Userにとってのメリット

- ・技術提案力が高い

AlexNet+SVM ← 試行段階

- ・専門知識レベルが高い
- ・研究開発の方向性を理解

山岳トンネルの修正設計を理解

- ・質問に対する回答が早い