

画像処理による粒度分布調査と 土砂流出量予測に及ぼす効果について

岐阜大学工学部 社会基盤工学科
河川工学研究室
助教 大橋 慶介





「 画像処理による粒度分布調査と 土砂流出量予測に及ぼす効果について 」

＜ 発表内容 ＞

1. 画像処理技術の紹介
 2. 画像処理による粒度分布調査 ～画像処理法～
 3. 流域スケールでの土砂流出について
- 

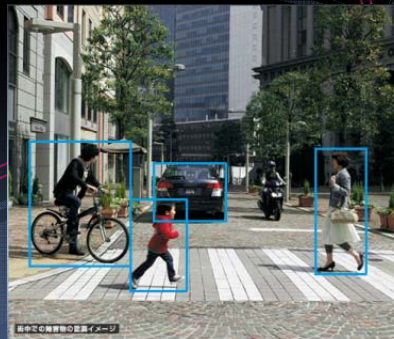
1. 画像処理について

画像処理（Image Processing）は，コンピュータによる情報処理技術のひとつで，携帯用デジタルデバイスの普及に伴い一般的な技術になっている。

最近での応用例としては，デジタルカメラの顔認識（パターンマッチング），自動車の予防安全技術（ステレオカメラによる距離検出，バックガイドモニターの透視投影変換）などに組み込み式の画像処理プログラムが用いられている。



<http://www.sony.jp/CorporateCruise/Press/200709/07-0904/>



<http://www.subaru.jp/legacy/b4/index2.html>



http://toyota.jp/dop/navi/lineup/option/back_monitor/index.html



画像処理ライブラリOpenCVについて

オープンソースの汎用画像処理ライブラリであり、フィルタ処理等の画像加工技術をはじめ、画像を使った様々なアルゴリズムが実装されている。

例として、

1. 二値化
 2. パターンマッチング（顔認識，形状認識）
 3. オプティカルフロー
 4. 透視投影変換（極座標系）
- ．．． など

ライブラリーダウンロード：

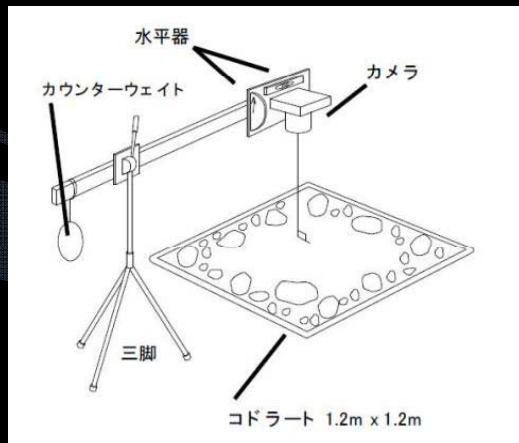
<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/>

元々はIntelの開発，現在はWillow Garageが開発を引き継いでいる。

<http://www.willowgarage.com/>

利用言語はC++が親和性が高い。また，C++ Express edition を使えば，ライブラリもコンパイラもすべて無料で開発環境が揃う！！

2. 粒度分布調査の目的



河床材料の粒度分布は、土砂水理学（もちろん生態学も！）において重要な情報である。ただし、その調査は非常に労力がかかり、広範囲での連続的なデータ採取は現実的に不可能である。



効率の良い粒度分布調査法として、画像処理法を提案し、流域広範囲に亘る粒度分布のデータ整備を目的とした技術開発を目指すものである。

さらに、画像処理のプログラムにはオープンソースのライブラリ OpenCV を用いて技術の共有を視野に入れた開発を行っている。

粒度分布を知って何に使うか？

- 例えば，砂防ダムの河床変動計算など



粒度分布を知って何に使うか？

- 例えば，電力ダムへ流入する土砂量の予測



粒度分布調査の種類と方法

粒度分布調査は、
1) 標本のサンプリング
2) 標本の大きさを決定する粒度分析
の2つの工程がある。

- 容積法
 - ⇒ ふるい分け試験
- 表面法
 - 面格子・線格子法 ⇒ ふるい分け試験
 - 写真法
 - ※ ここではアナログ写真による方法を写真法、デジタル写真による方法を画像処理法と区別する

コドラート（正方枠）を用いた 面格子法の一例

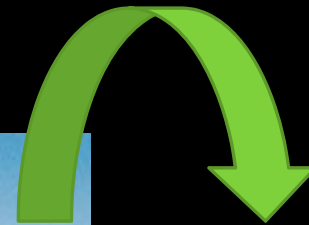
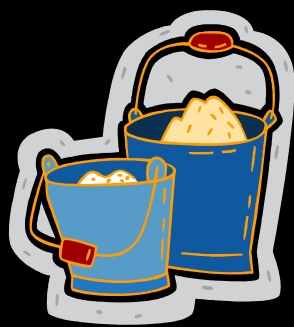


100 kgを超えることも！



- 格子点下の石礫をサンプルして持ち帰る

ふるい分け試験の一例



大変！



from 東京スクリーン株式会社website
http://www.tokyo-screen.com/catalog_shikenki.html

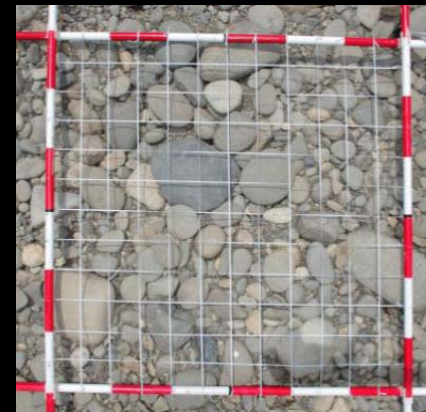
- 石礫サンプルを小分け(例えば数100 gごと)して、震盪機に投入し10～20分篩った後、質量を測る.

画像処理法の種類

- AGS (Automated Grain Sizing)
自動粒度分析

究極の目標；

現段階ではどうしてもコンピュータが判別しない石礫が少なからずある



- MGS (Manual Grain Sizing)
手動粒度分析

自動処理ができない場合や調査数が少ない時に用いる。

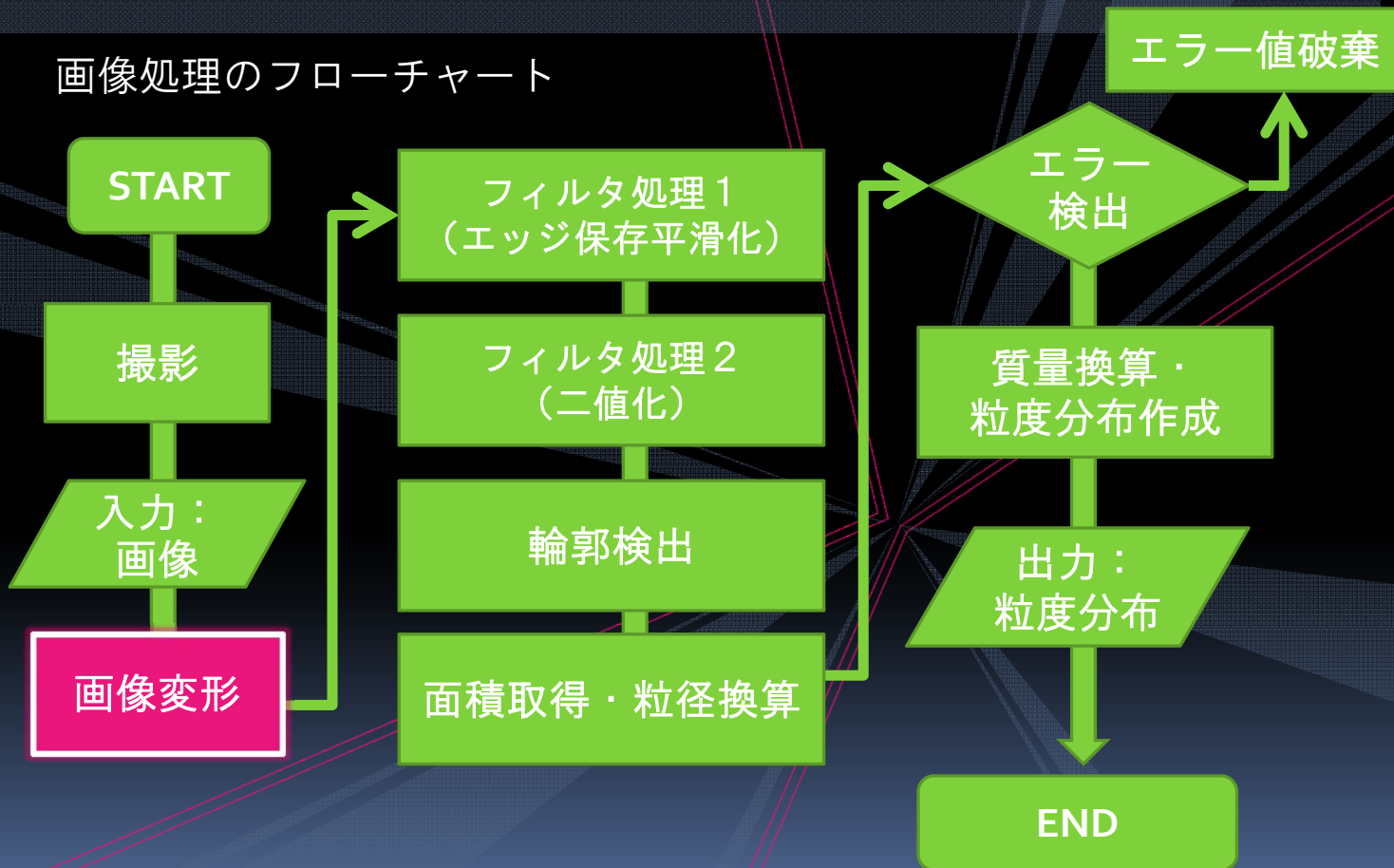
AGSより確実な粒子判別ができる。

時間がかかる。（11×11 点のサンプルで30分程度）



画像処理の流れ

画像処理のフローチャート



大橋・安田・伊原, OpenCVを用いた画像処理による河床粒度分布調査および石礫検出精度について, 応用利用技術論文集, vol. 19, 2010.



画像変形について

河床面に対して鉛直に撮影

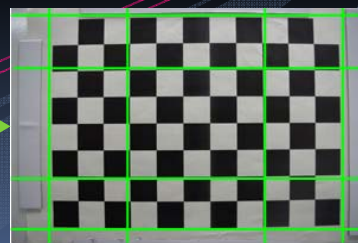


予め取得している
レンズ歪み
パラメータを使って

円周方向の歪み修正式

$$\begin{aligned}x_{corrected} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\y_{corrected} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]\end{aligned}$$

キャリブレーション用画像



レンズ歪みを除去

半径方向の歪み修正式

$$\begin{aligned}x_{corrected} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\y_{corrected} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)\end{aligned}$$

透視投影変換

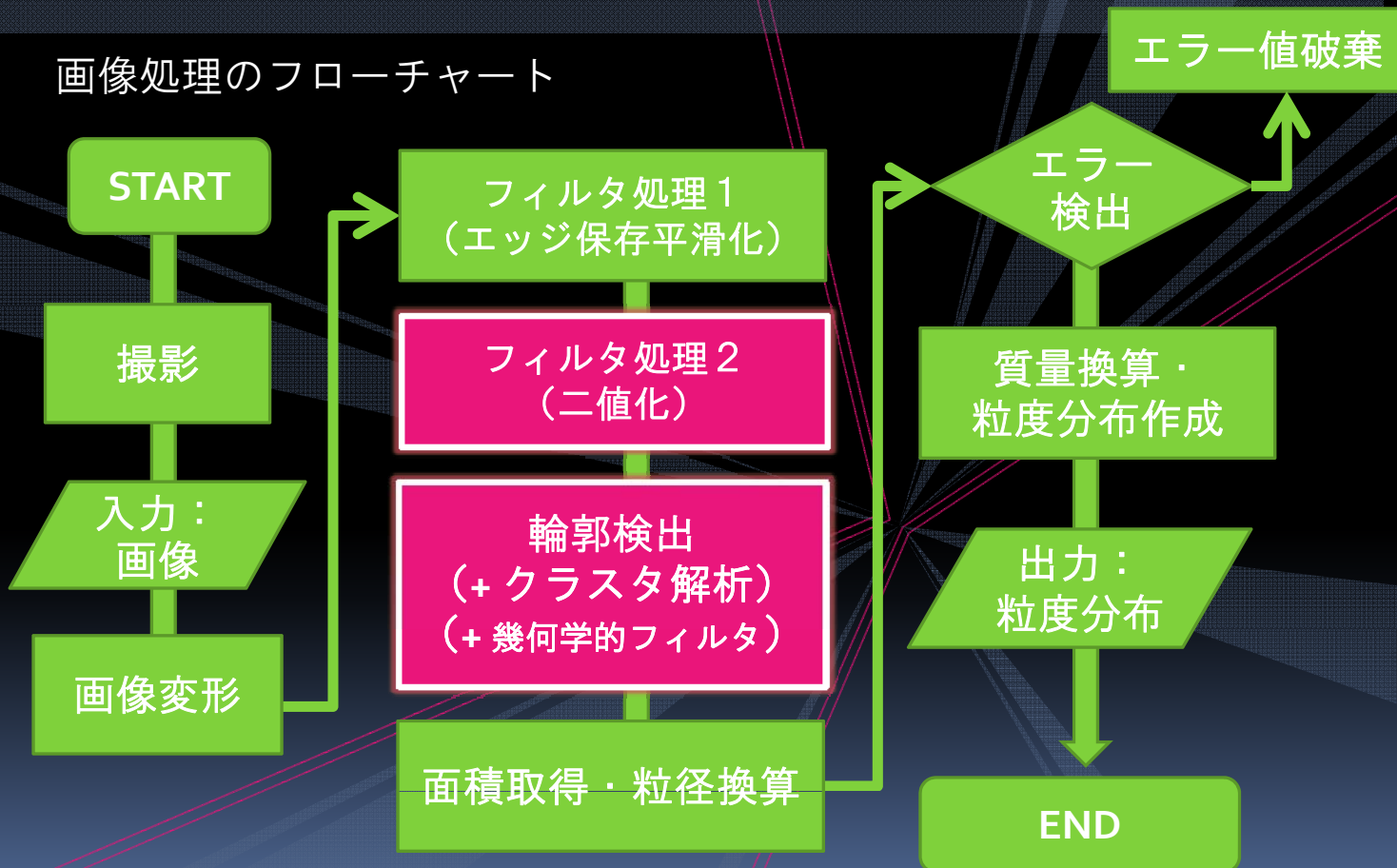
正方形画像に変換





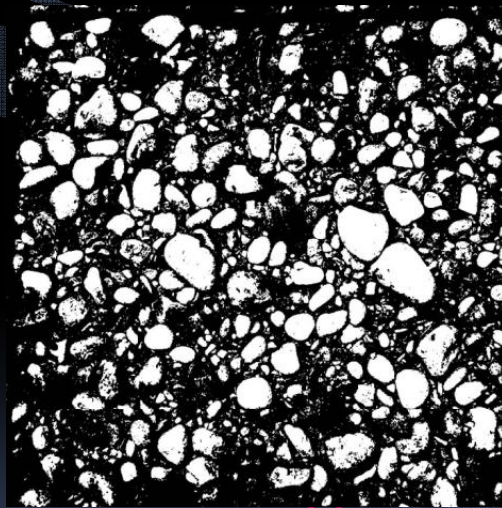
輪郭検出について

画像処理のフローチャート

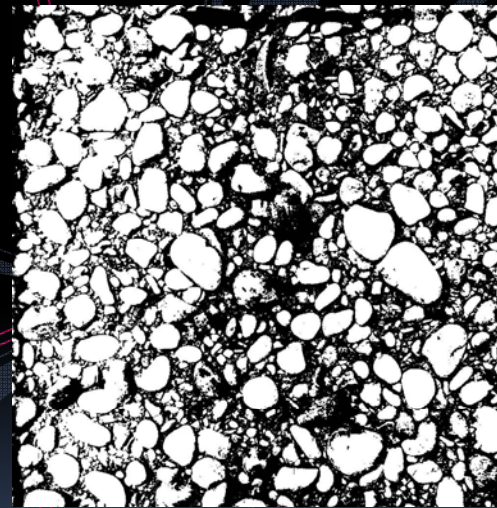


動的二値化の有用性

通常の二値化処理では画面全体で石礫の輪郭を浮かび上がらせることができない。一方、動的二値化は周辺ピクセルの輝度に応じて閾値を変化させるので輪郭が明瞭になる。しかし、最適なパラメータが不明。



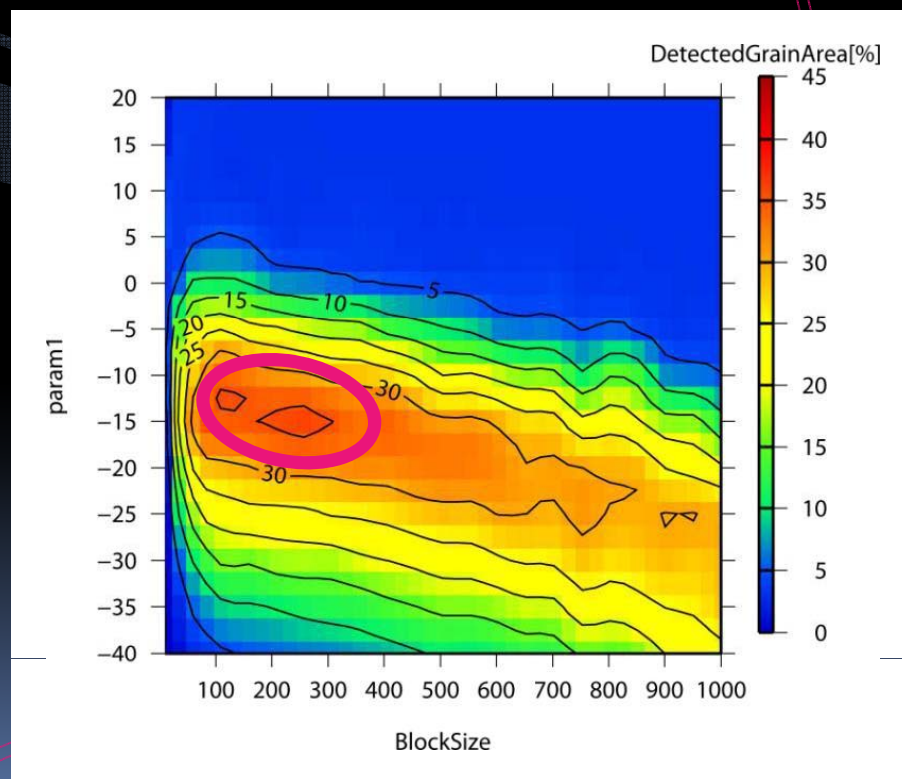
通常の二値化
(閾値平均輝度値)
関数: `cvThreshold()`



動的（適応型）二値化
(閾値平均輝度値)
関数: `cvAdaptiveThreshold()`

二値化パラメータの最適化（検出面積）

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ
param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



1024 X 1024 pix

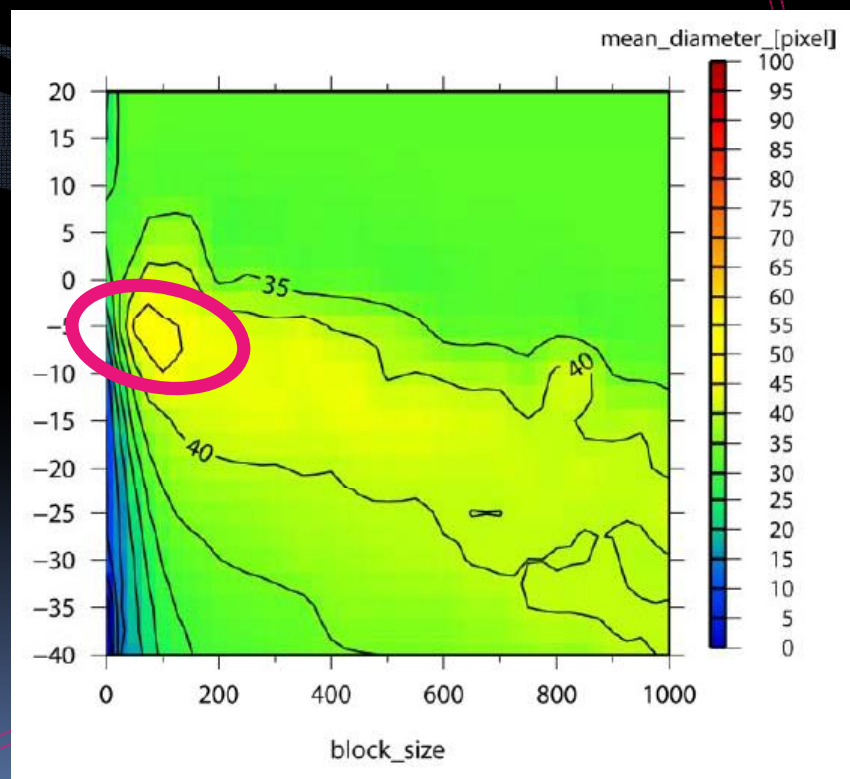
最適値？

Block_size : 100~200

Param1 : -10~-20

二値化パラメータの最適化(検出平均粒径)

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ
param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



1024 X 1024 pix

最大値

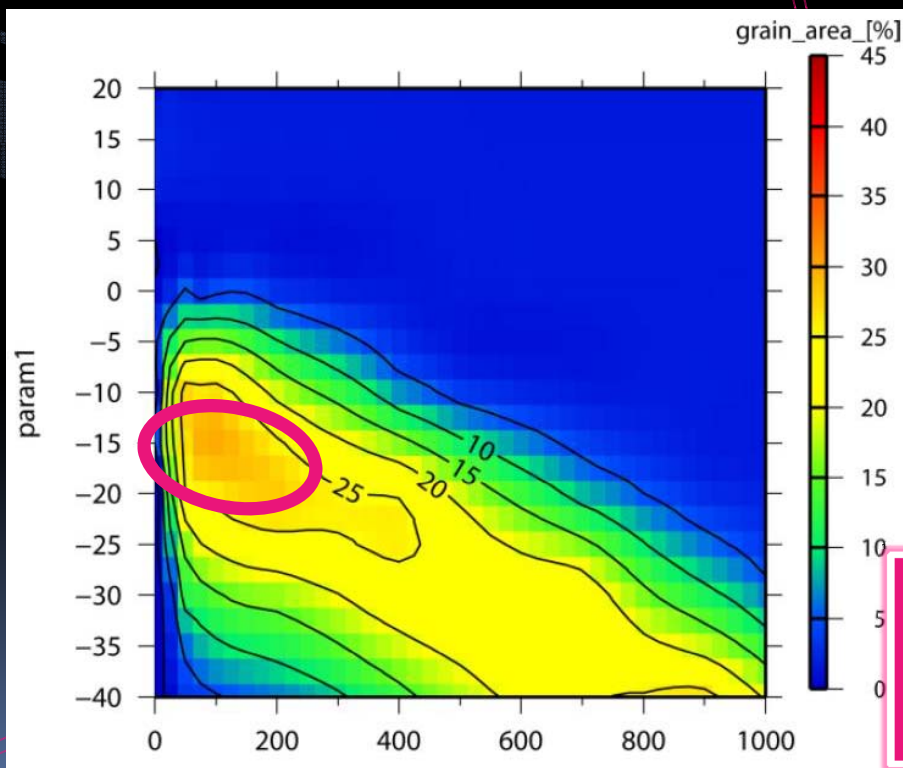
Block_size : 70~100

Param1 : -5~-10

画像が小さいとき

二値化パラメータの最適化（検出面積）

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ
param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



512 x 512 pix

最適値？

Block_size : 100~200

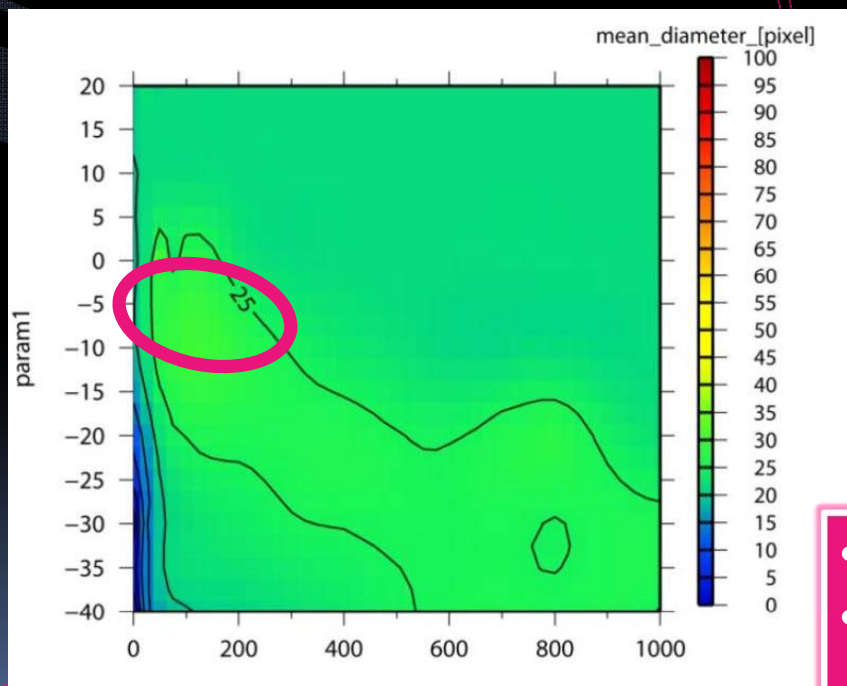
Param1 : -10~-20

- 分布の傾き約2倍
- 最大値パラメータ
1024と変わらない

画像が小さいとき

二値化パラメータの最適化(検出平均粒径)

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ
param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



512 x 512 pix

最大値

Block_size : 70~100

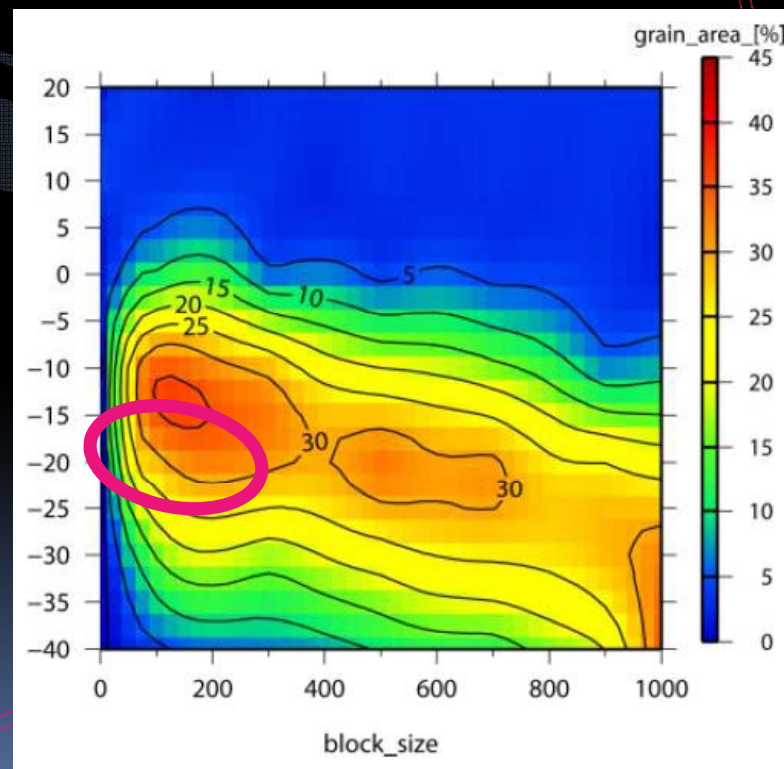
Param1 : -5~-10

- 分布の傾き約2倍
- 最大値パラメータ
1024と変わらない

画像が明るいとき

二値化パラメータの最適化（検出面積）

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ
param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



- 分布の傾き：同じ
- 最大値の分布が広がっている

最適値？

Block_size : 100～200

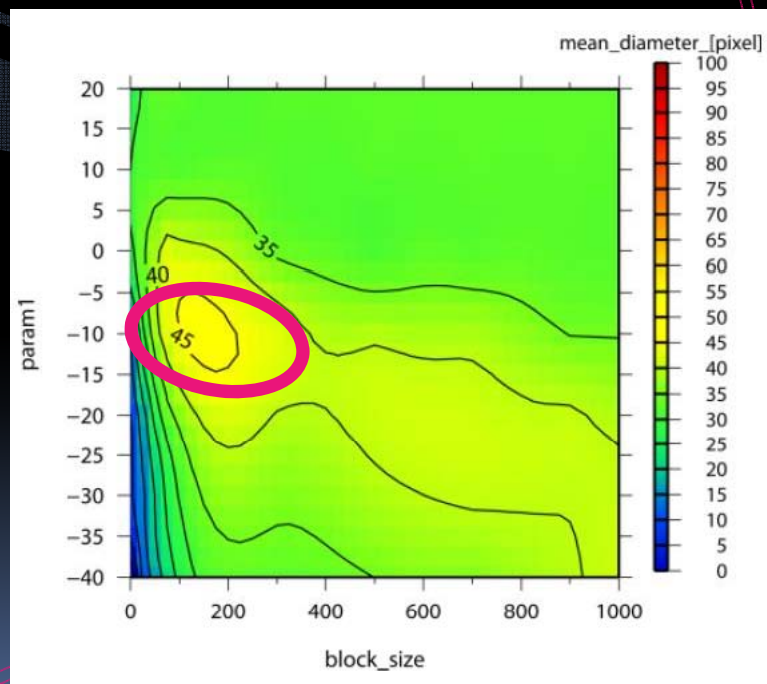
Param1 : -10～-20

画像が明るいとき

二値化パラメータの最適化(検出平均粒径)

block_size : 閾値処理する画素周辺の平均輝度を求める際のピクセルの大きさ

param1 : 平均輝度から差し引く輝度値



- 分布の傾き : 同じ
- 最大値の分布が広がっている
- block_size=400付近に値が小さくなる領域がある

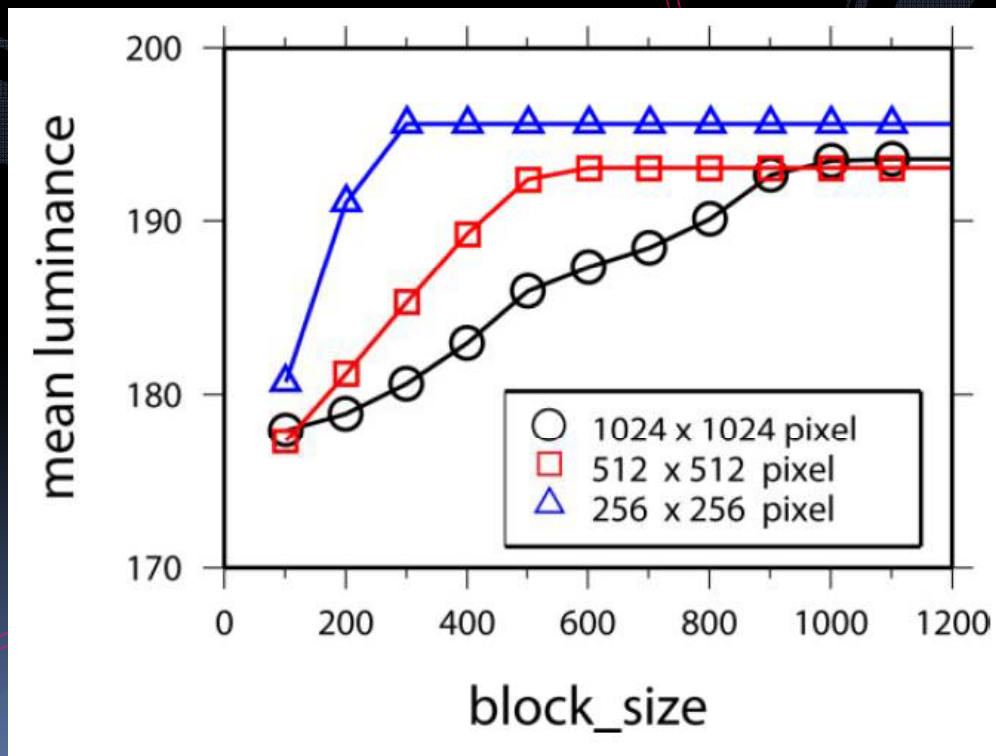
最大値

Block_size : 70~100

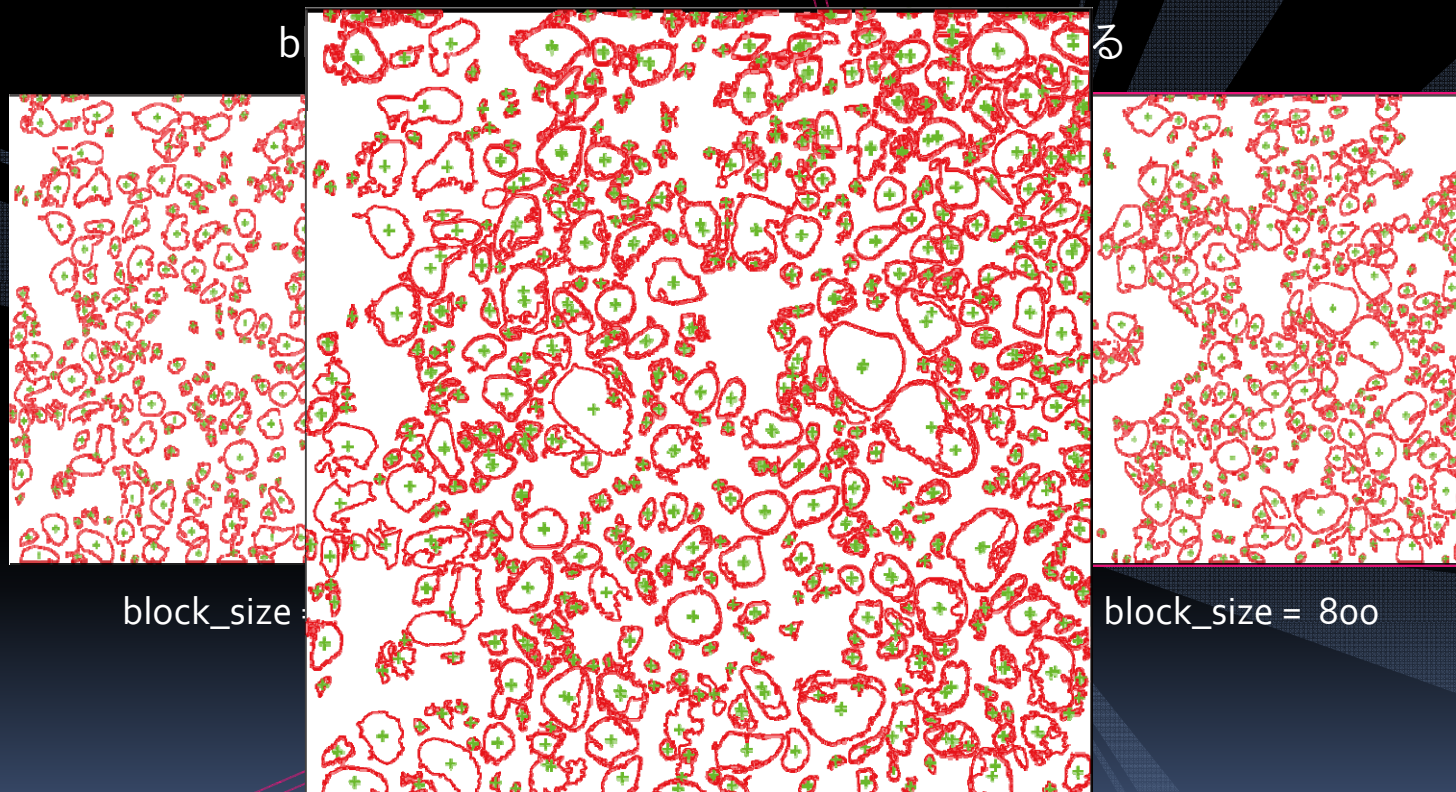
Param1 : -5~-10

パラメータ `block_size`と平均輝度の関係

画像サイズが小さくなるにつれて、`block_size`の増加に対する影響が大きくなり、画像サイズと`block_size`が等しくなるとき、通常の二値化処理と等価となり平均輝度は収束する



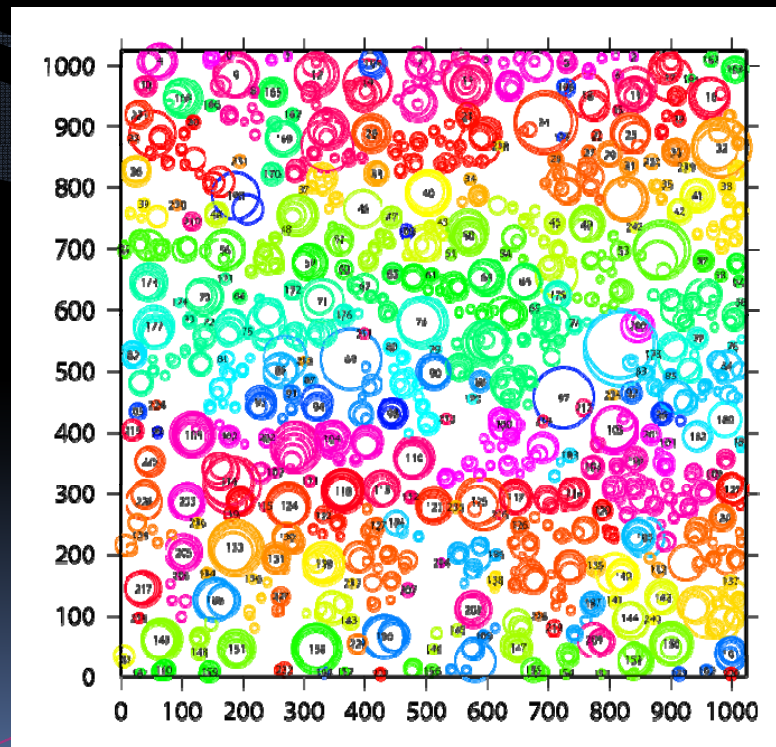
block_sizeによる検出の違い



パラメータ毎をレイヤー化して統合して輪郭処理する

輪郭の重心位置によるクラスター処理

同じ石礫が複数の輪郭を持つため、同じ石礫かどうかをcvPartition関数によって判別する。



引数は
重心座標 (x_g, y_g) と
重心間距離 $dist$

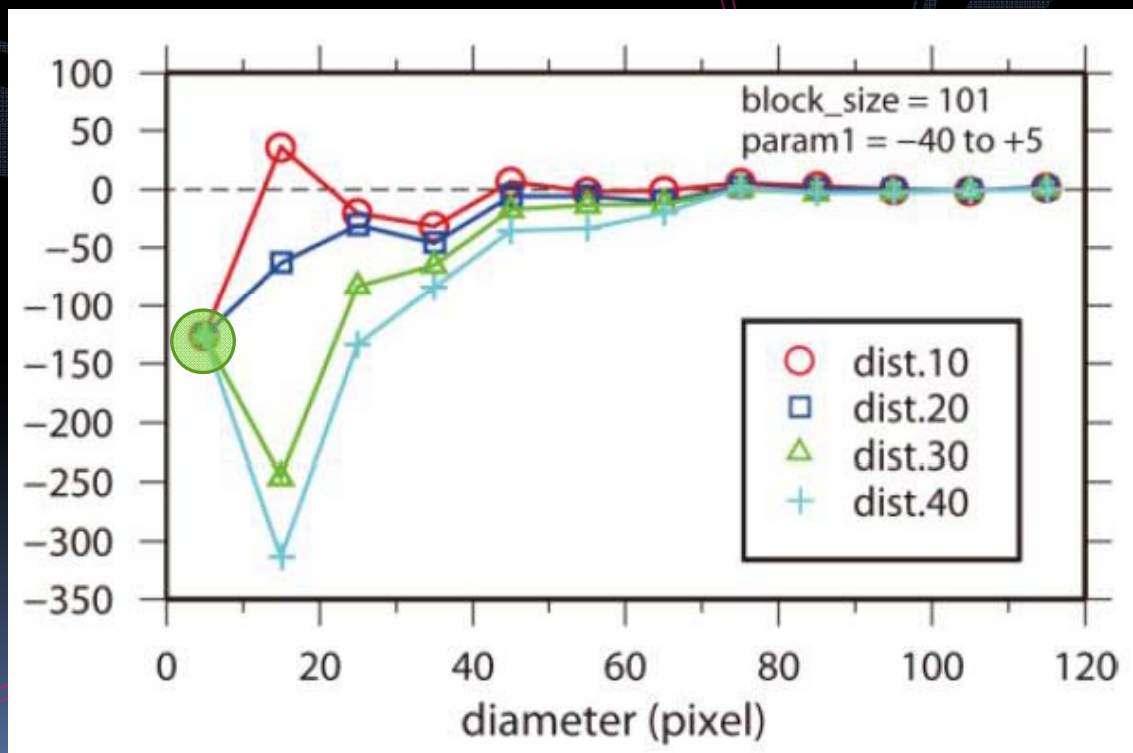
石礫が色とラベルによっ
て分類されている

同じ石礫での平均値を検
出粒子径とする

クラスタリング cvPatition()の効果

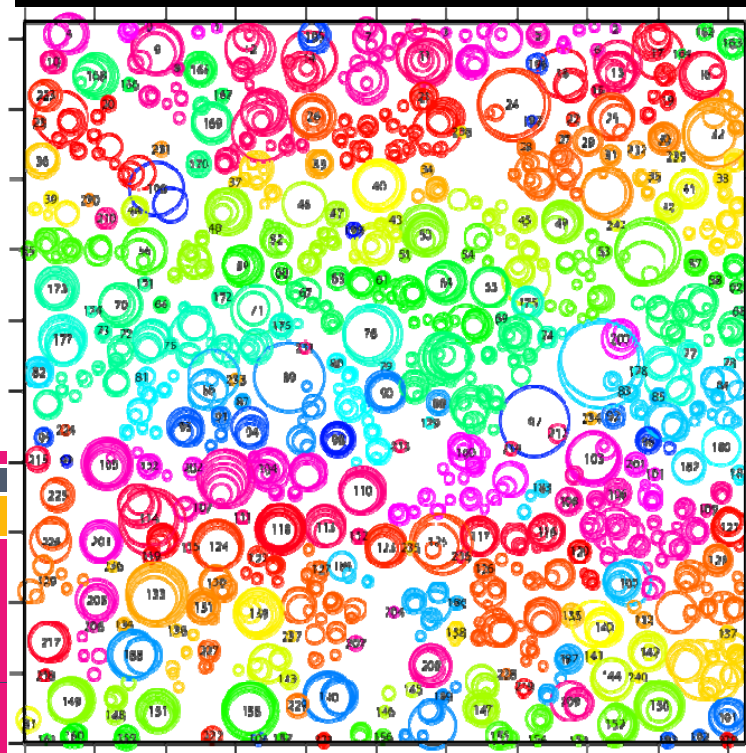
手動検出による粒子数の比較 (= 手動検出数 - 自動検出数)

重心間距離 dist を大きくすると粒子数は減少
=> 別の粒子を同一と見なす誤差は逆に増加

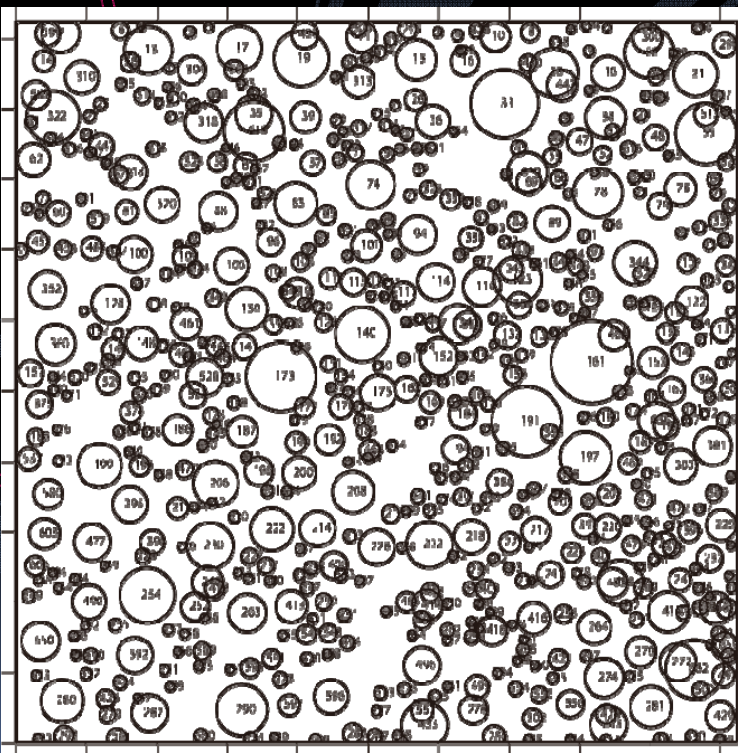


輪郭の重心位置によるクラスター処理

Before

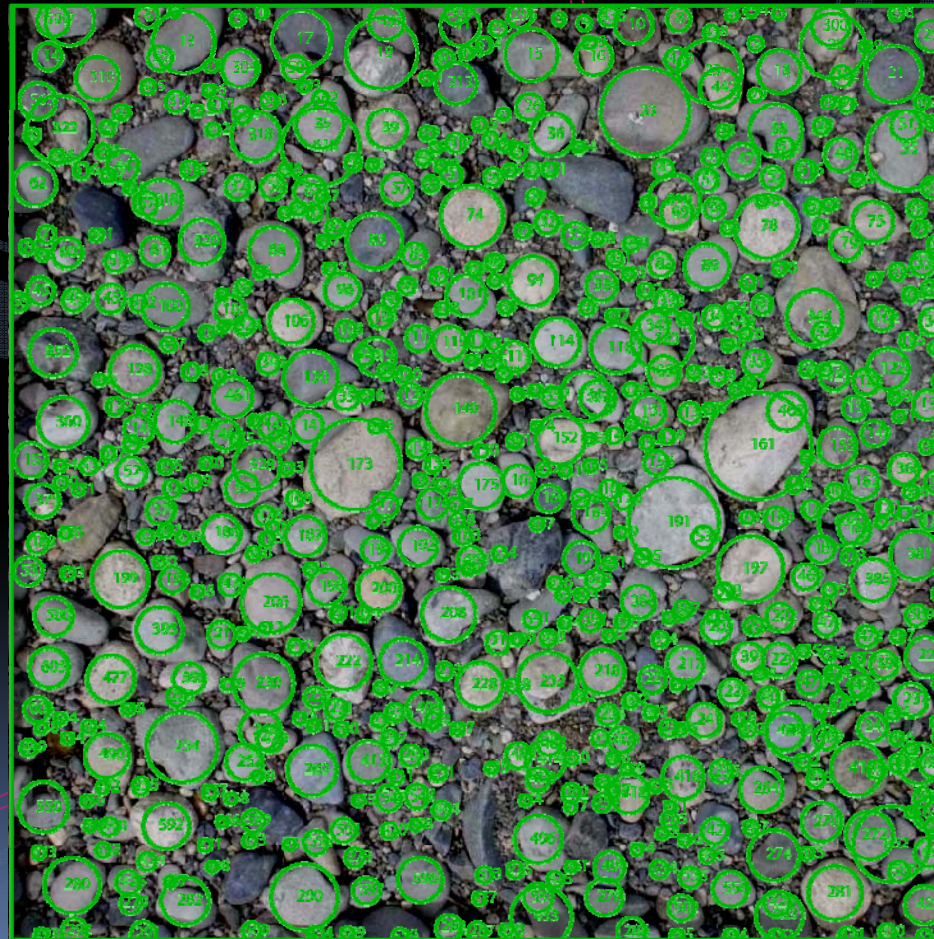


After



粒子単位で見ると誤検出は少なくない！？

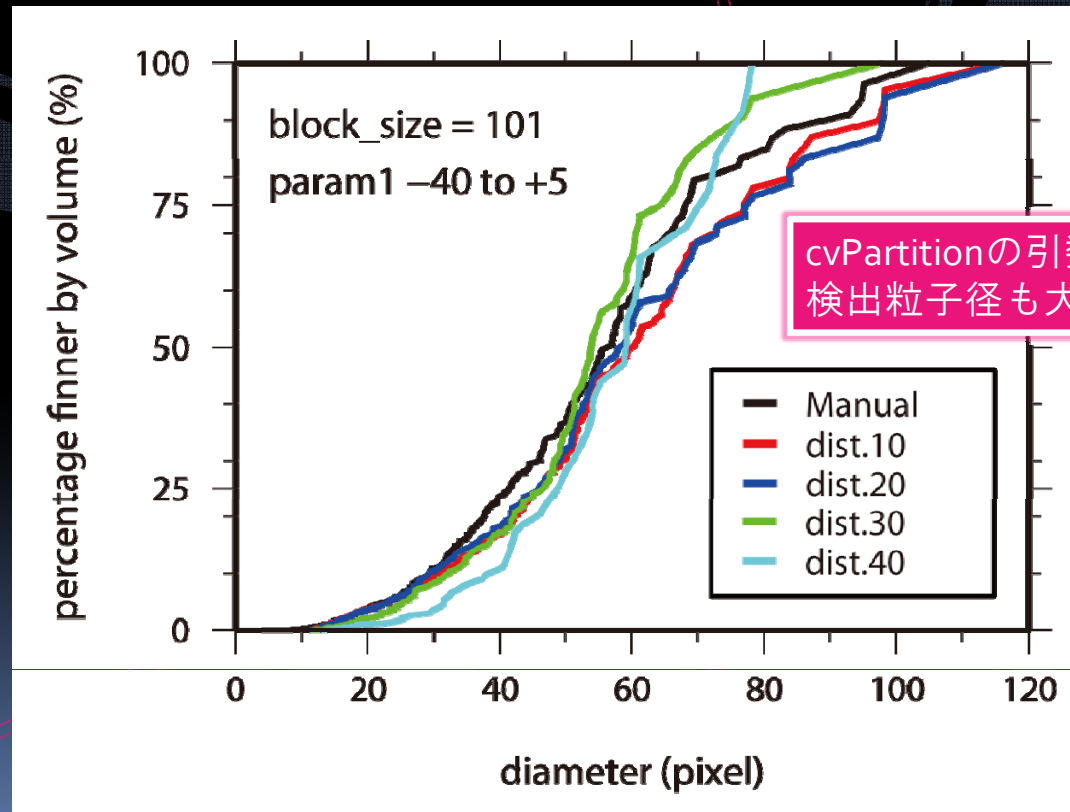
輪郭の重心位置によるクラスター処理





検出精度の検証（AGSと手動検出）

手動で輪郭座標を取得したデータと、クラスタ化のパラメータであるユークリッド距離（10～40 pixel）による粒度分布の違い

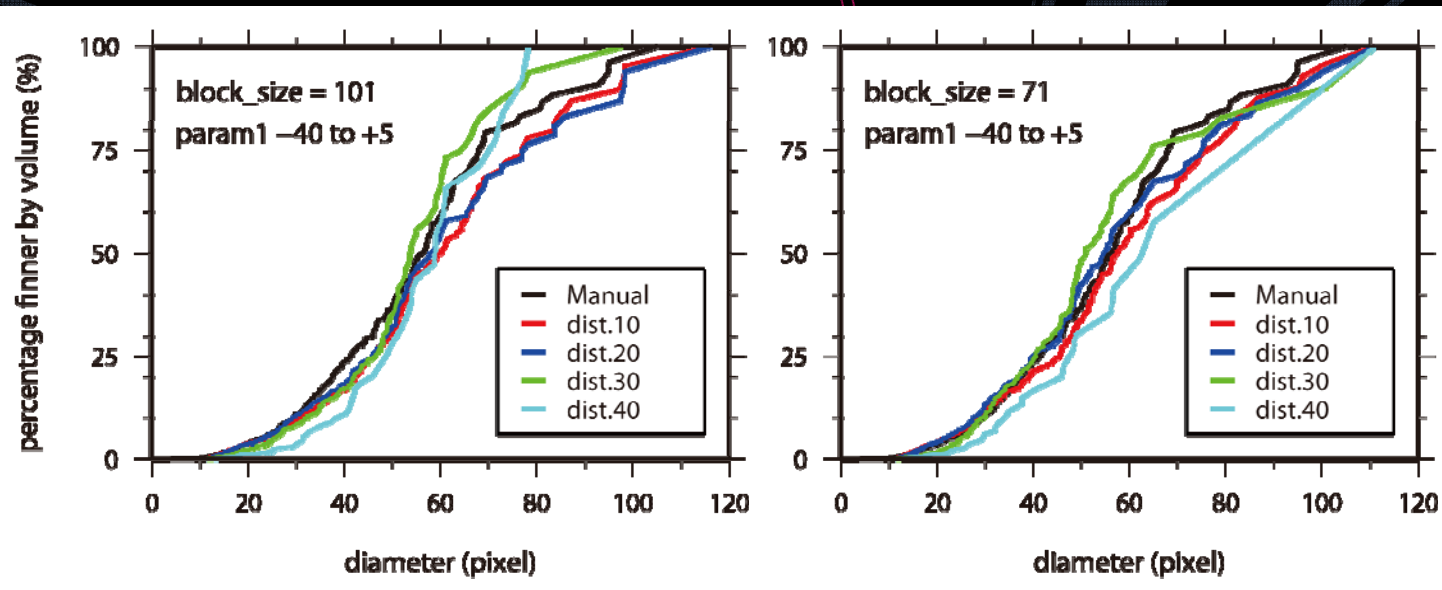


cvPartitionの引数が大きいと
検出粒子径も大きい

検出精度の検証

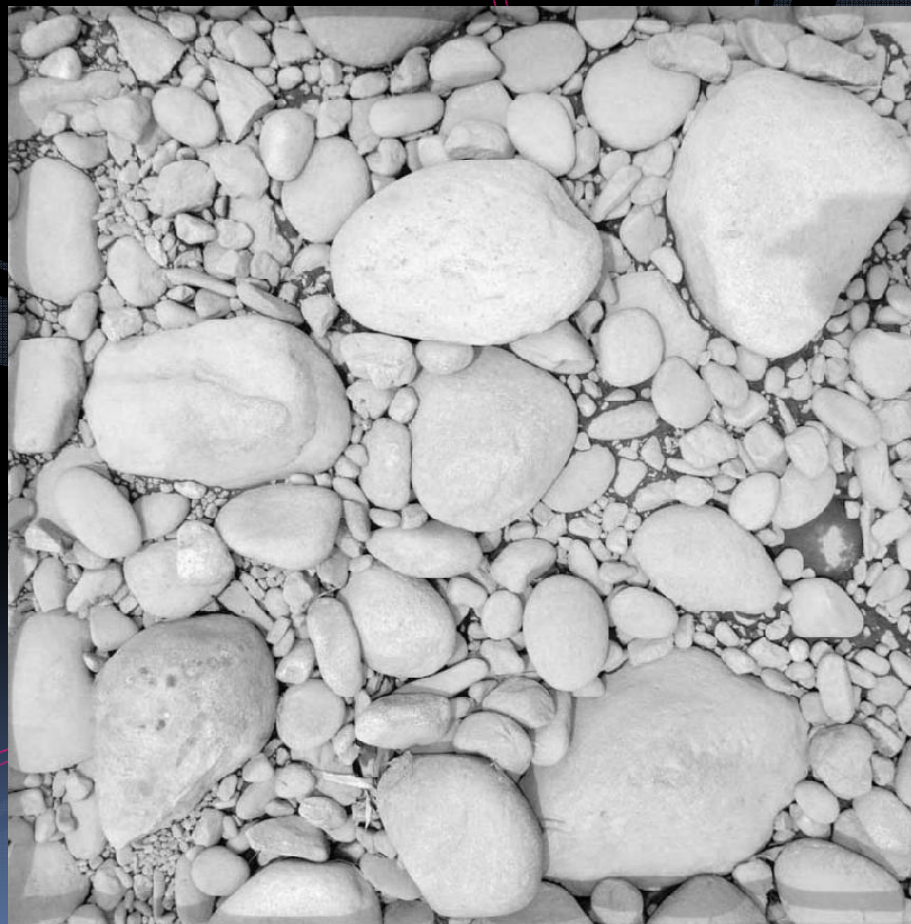
block_sizeが小さくなると
検出粒子径は小さくなる

block_size, dist. の最適値は存在粒子の粒径で決まるか？





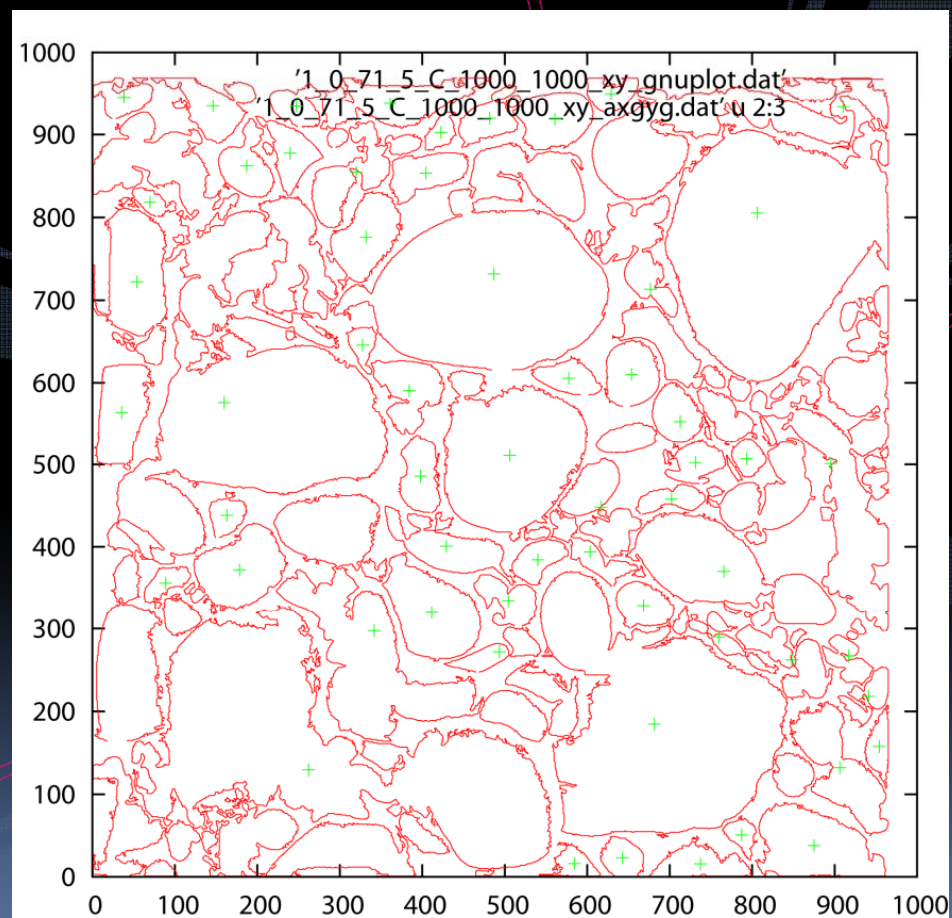
石礫検出失敗の例





失敗例 1

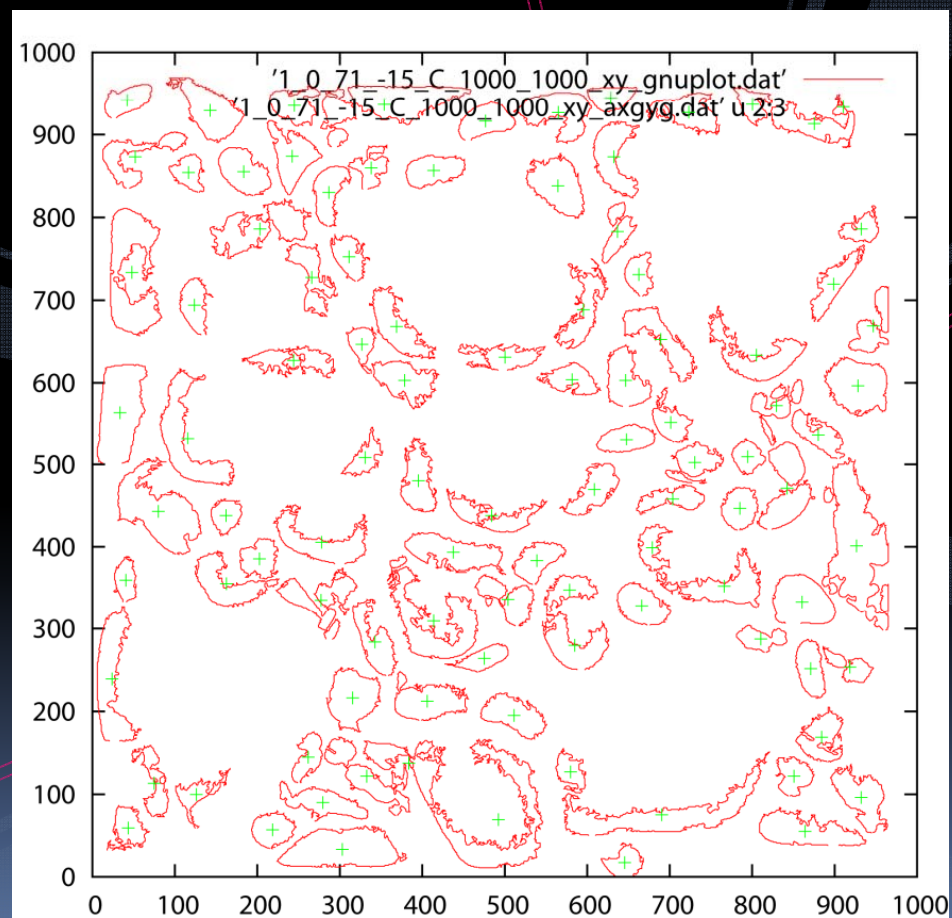
石礫同士がくっついて検出される





失敗例 2

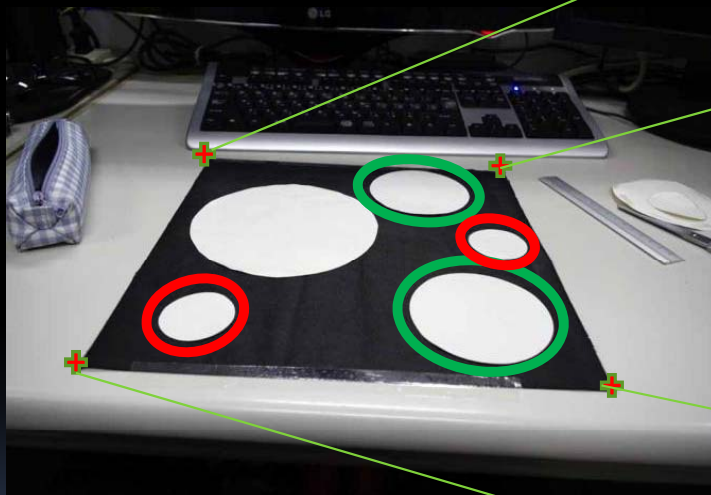
石礫表面の明るい部分が
石礫とみなされている



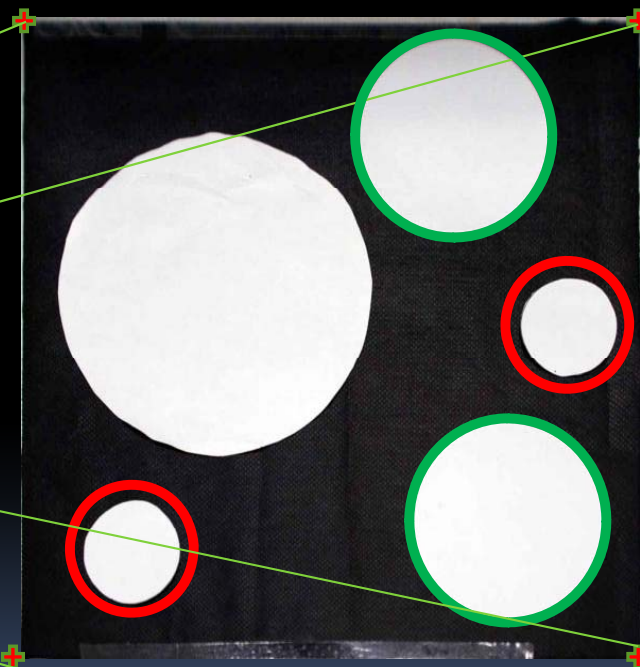
透視投影変換に伴う歪みについて

Before

※同じ色で囲んだ円は同じ大きさ



After



- レンズ歪み除去の後，指定の矩形領域を抽出する．
- 俯角90度の時の現実の物体の相対的な大きさが復元される．

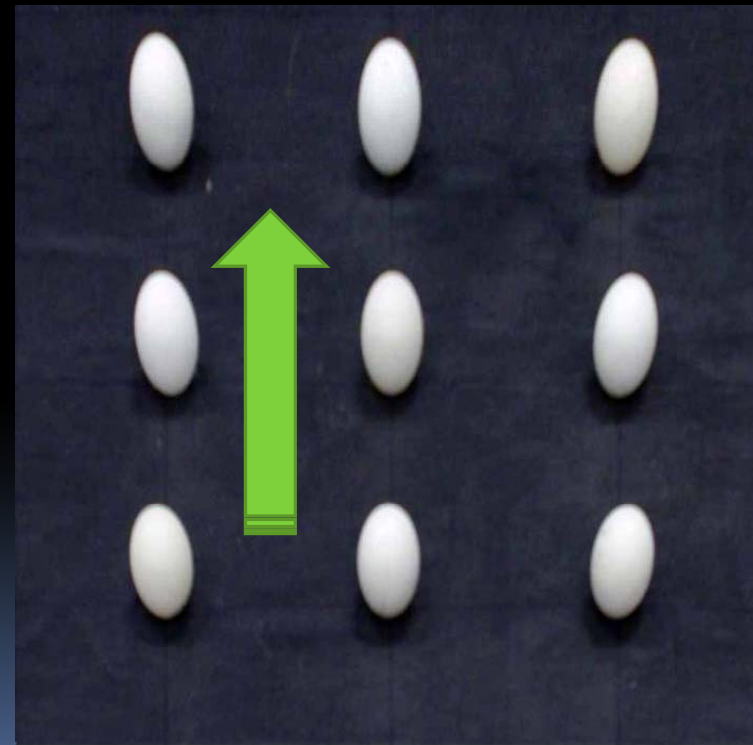
使用関数：cvGetPerspectiveTransform(), cvWarpPerspective()

透視投影変換に伴う歪みについて

石礫の高さが変換基準面と異なると歪みが発生する。

After (レンズ歪み除去・透視投影変換)

Before



画面奥へいくに従って歪みが大きくなる

現地での例（俯角90度, $F=18\text{mm}$ ）

Before



After（レンズ歪み除去）



- 河床に対して垂直（鉛直下向きとは微妙に異なる）になるよう撮影している.

現地での例（俯角60度, F=18mm）

Before



After（レンズ歪み除去・透視投影変換）



- 変換後画像で上方に行くに従い石礫がやや歪んでいる。

現地の例（俯角45度, $F=18\text{mm}$ ）

Before



After（レンズ歪み除去・透視投影変換）



- 俯角が小さくなると歪みが更に大きくなる.

現地での例（俯角30度, $F=18\text{mm}$ ）

Before



After（レンズ歪み除去・透視投影変換）



カメラモデルによる変換後の歪み発生のしくみ

※ 画面内において俯角が異なっていることにも起因する

手前にある石礫ほど、
石礫の河床からの突出高さが大きいほど
変換に伴う歪みが大きくなる。

ここにあるものとして変換
される
(実際より大きく拡大され
る)

本当はここにあるはずの石礫が

焦点

撮影面

焦点距離 f
(ここでの f は物理レンズの焦点距離 F と
イメージセンサーの大きさとの積)

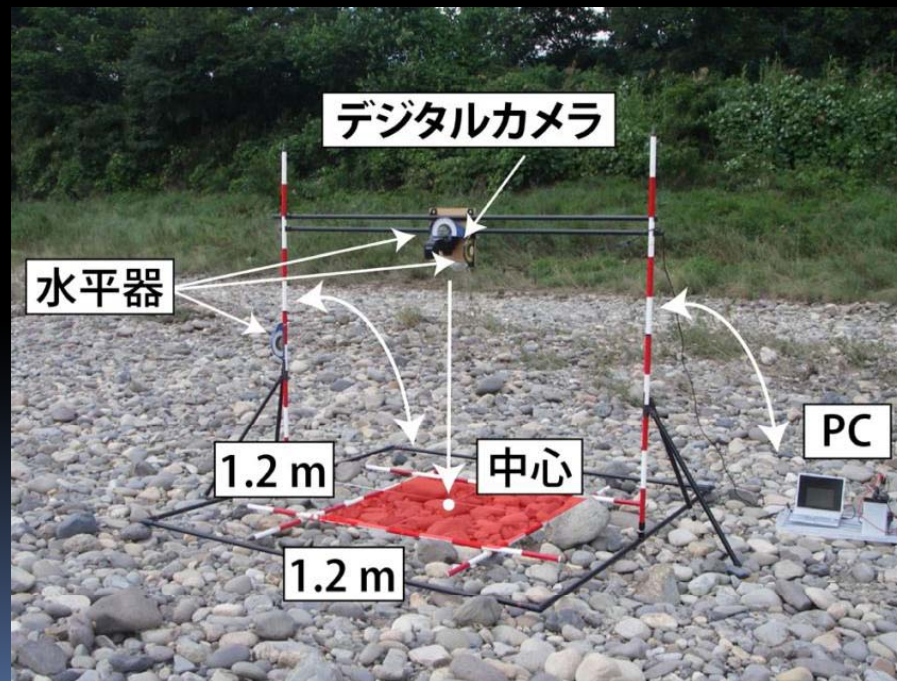
1111


$$C_{d''} = d'_v d'_h / d^2$$
$$\begin{aligned}d_v' &= R \sin \theta' \cdot (\tan \delta - \tan \beta) \\d_h' &= (\tan \delta + \tan \beta) \cdot R \sin \theta \cdot \tan \alpha'\end{aligned}$$

$$\gamma = \arctan(R \cos \theta' / R \sin \theta' - r)$$

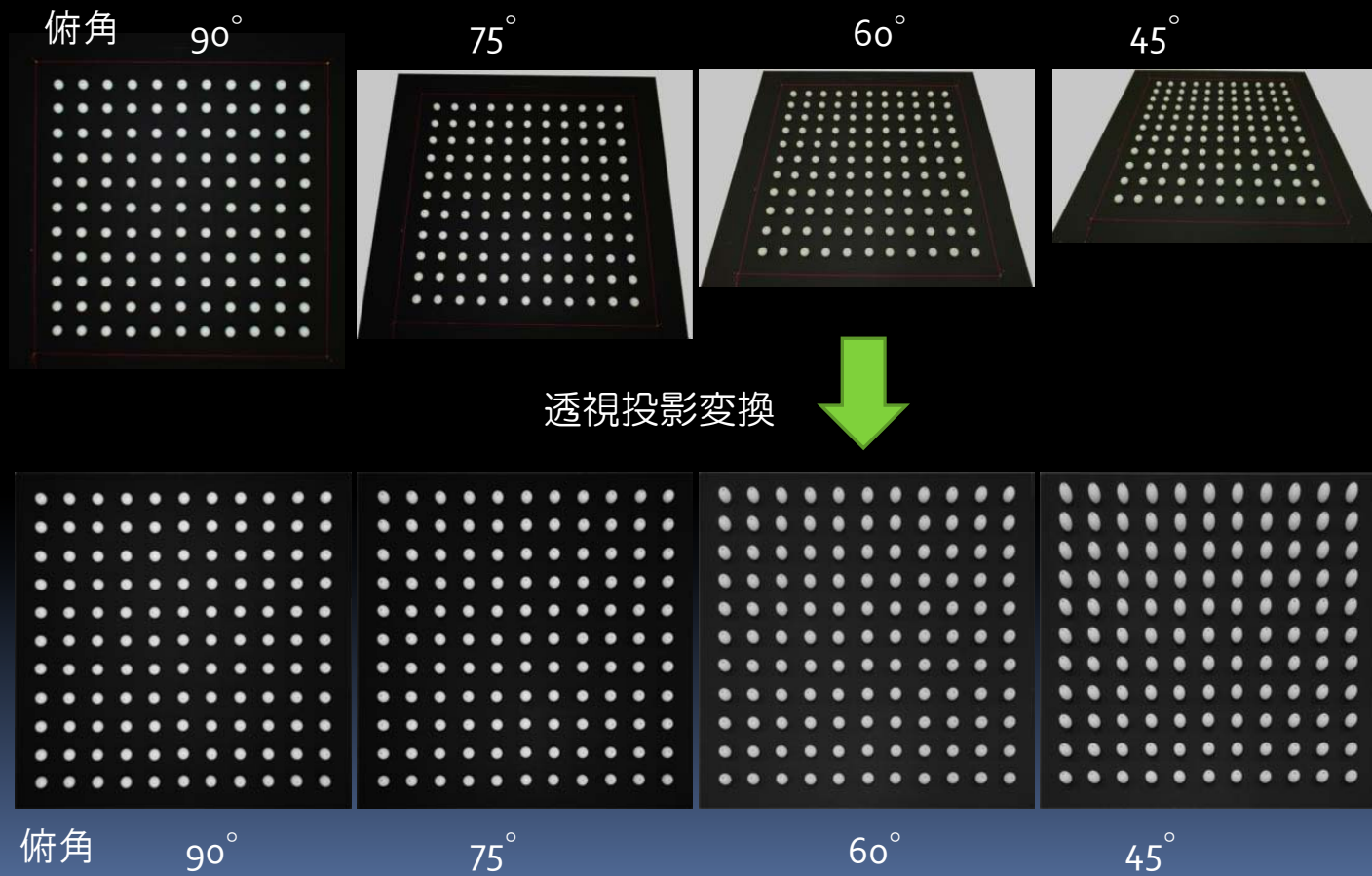
撮影俯角の違いによる 透視投影変換歪みの計測方法

コドラートの中心に対して任意の角度で撮影できる枠を作成し、
室内および現地において透視投影変換による物体の歪みを計測した。



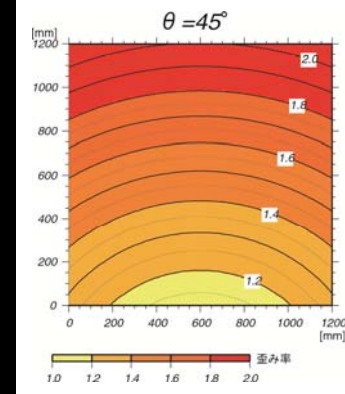
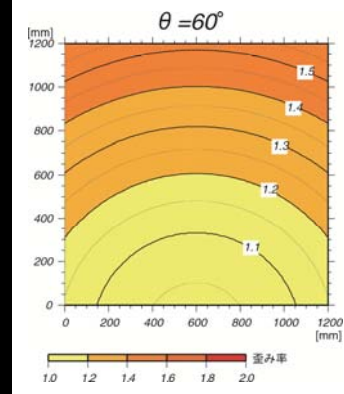
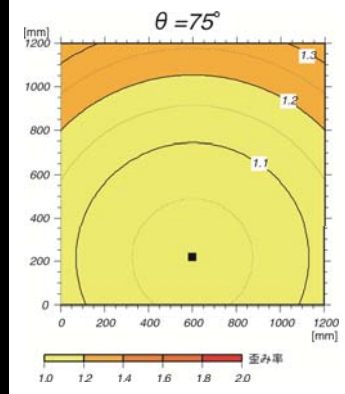
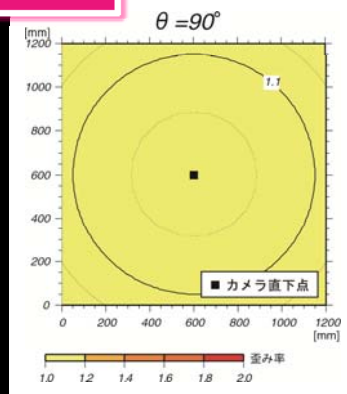
室内実験でのピンポン球の歪み計測

縦横11列の計121個のピンポン球($d=40\text{mm}$)を10cm間隔で並べたものを撮影

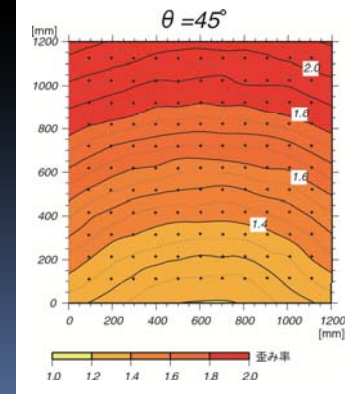
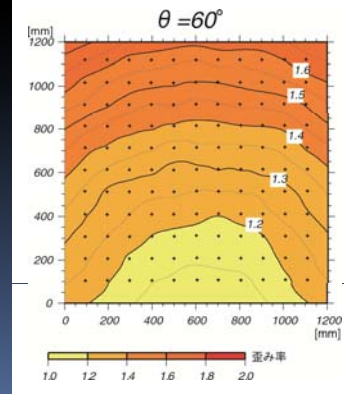
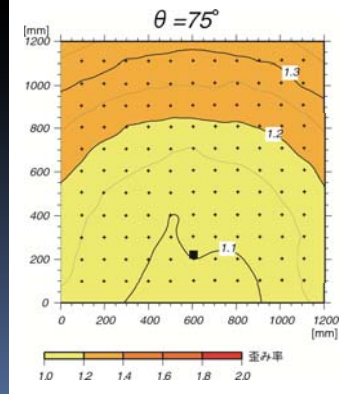
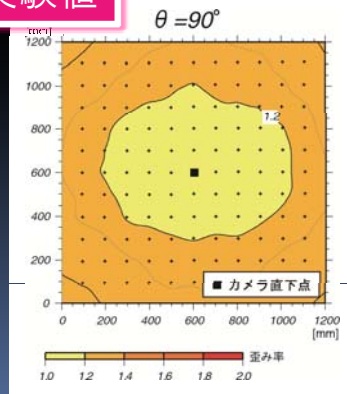


歪みの理論値と実験値の比較

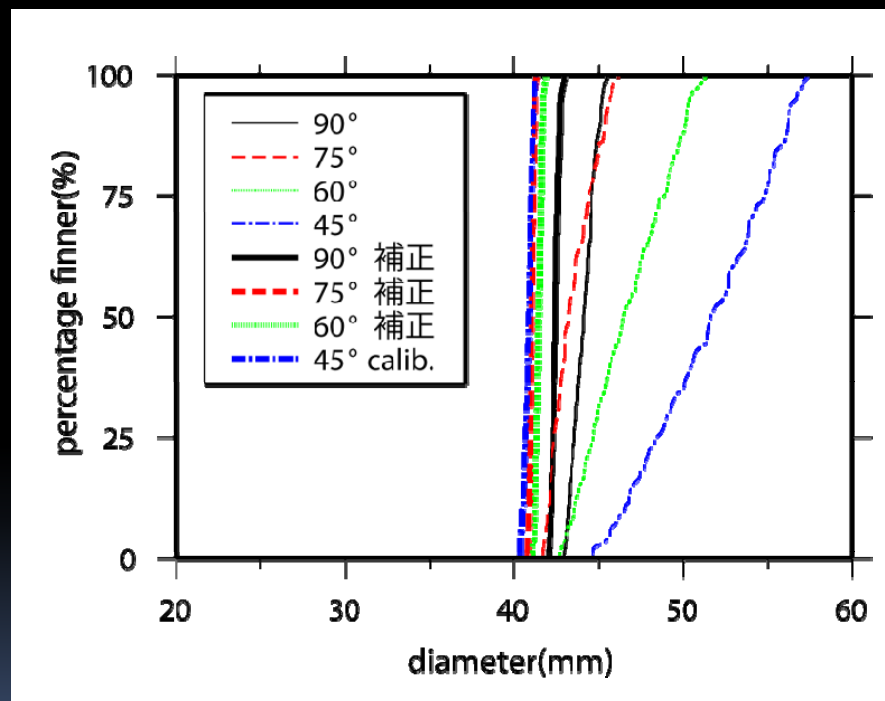
理論値



実験値



透視投影変換歪みの補正結果



俯角	直径 (mm)	標準偏差 (mm)
45°	50.8	3.6
60°	46.3	2.4
75°	43.4	1.2
90°	44.1	0.7



俯角	直径 (mm)	標準偏差 (mm)
45°	40.8	0.2
60°	41.5	0.2
75°	41.0	0.1
90°	42.5	0.2

全ての撮影俯角においてピンポン球の直径40 mm に近づいた

3次元空間から2次元空間への変換行列

移動行列

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

回転行列

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3次元空間の移動・
回転後の座標

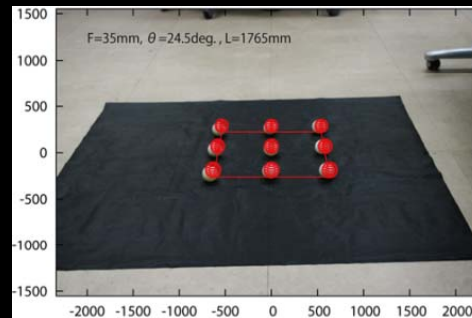
$$X' = TRX$$

2次元空間の座標

$$x_{80} = f_x \left(\frac{x'}{-z'} \right)$$
$$y_{80} = f_y \left(\frac{y'}{-z'} \right)$$

f_x, f_y : 焦点距離

3次元空間から2次元空間への変換モデル



カメラモデルによって計算
されたピンポン球の画像

2次元空間から正対画像への変換行列

正対画像の座標

$$\begin{matrix} tx'_{so} \\ ty'_{so} \\ t \end{matrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{so} \\ y_{so} \\ 1 \end{pmatrix}$$

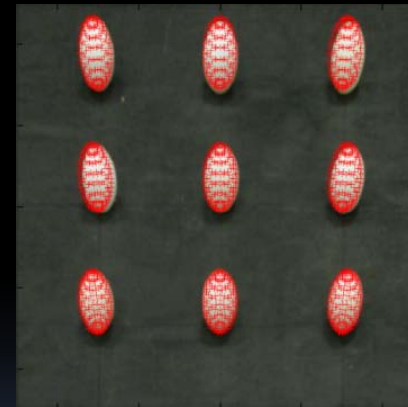
2次元空間から正対画像空間への変換モデル

変換行列A

$$A = \begin{pmatrix} S/L & -Sx_1/HL & 0 \\ 0 & SU/HL & 0 \\ 0 & (U-L)/HL & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} x'_{so} &= \left(\frac{S}{L} x_{so} - \frac{Sx_1}{HL} y_{so} \right) / \left(\frac{U-L}{HL} y_{so} + 1 \right) \\ y'_{so} &= \left(\frac{SU}{HL} y_{so} \right) / \left(\frac{U-L}{HL} y_{so} + 1 \right) \end{aligned}$$

透視投影変換後の座標



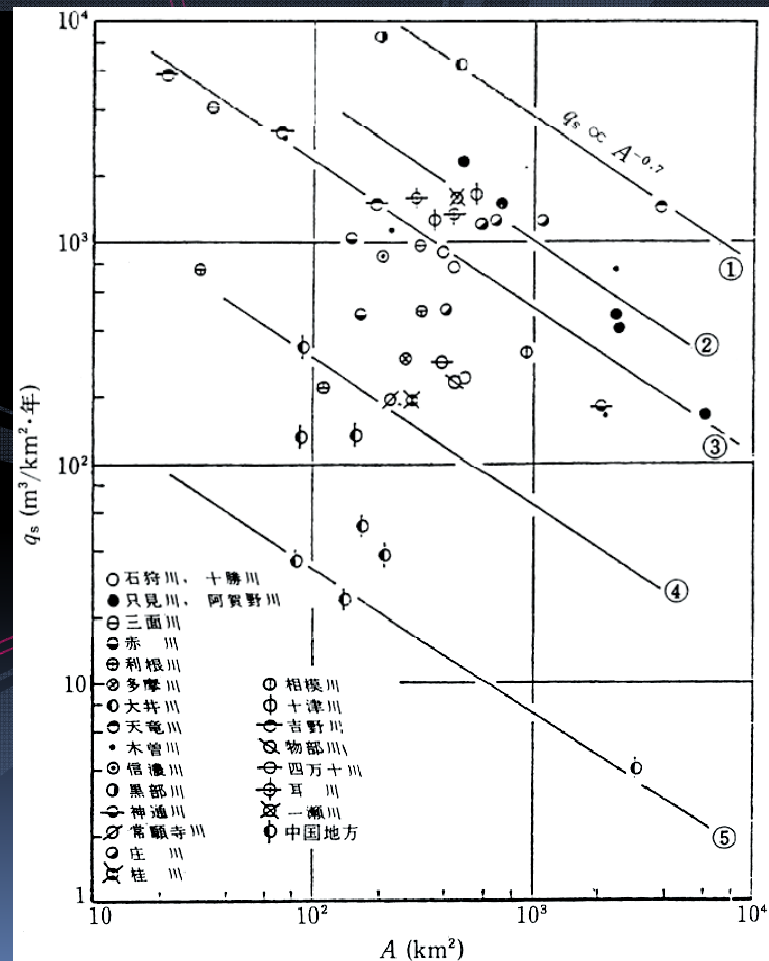
3. 流域スケールでの土砂流出現象について

比流砂量（面積あたりの流砂量 Q_s/A ）は，流域面積 A の-0.7乗に比例することが，芦田・奥道 (1974) によって示されている。

$$Q_s/A = KA^{-0.7}$$

ここで， Q_s は全流砂量，
 A は流域面積，
 K は流域・地域定数

なぜ？物理的な意味は？



流域降水位置エネルギーを用いた土砂流出量評価

大橋・藤田, 水工学論文集第51巻, 2007

土砂流送は流水の運動エネルギーによってなされる



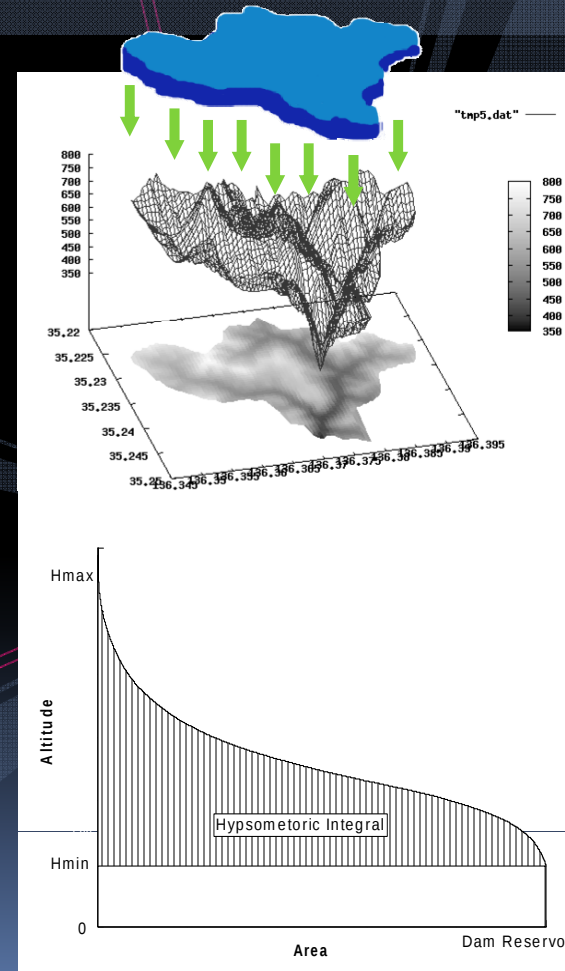
運動エネルギーは降水の位置エネルギー E_p が変換されたもの

(E_p は流域の高度・面積, 降水量で決まり, 年平均降水量を用いたとき, 仕事率 P として表すことができる.)

$$E_p = m_R g \Delta h$$

$$= \rho g R \int_0^{A_{\max}} h(A) dA$$

$$P = \rho g (R / T) \int_0^{A_{\max}} h(A) dA$$



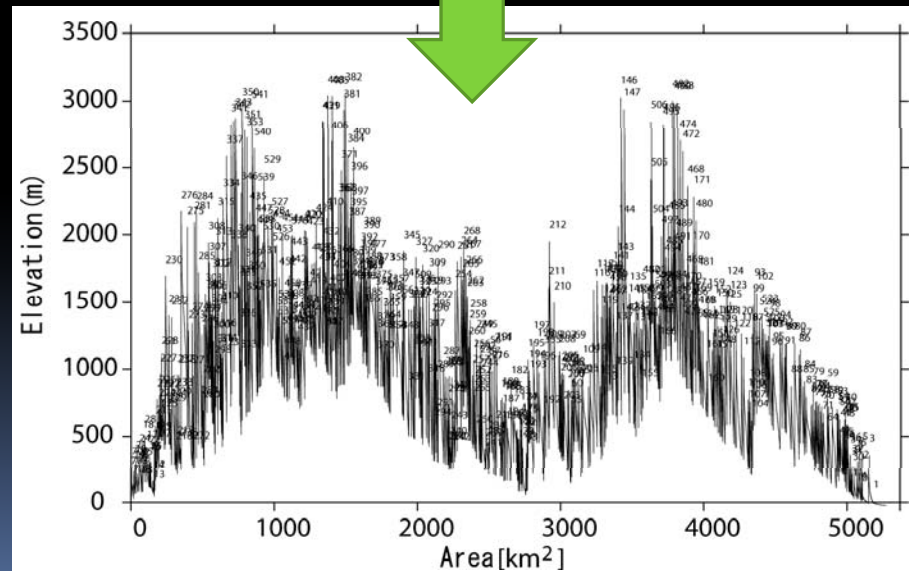
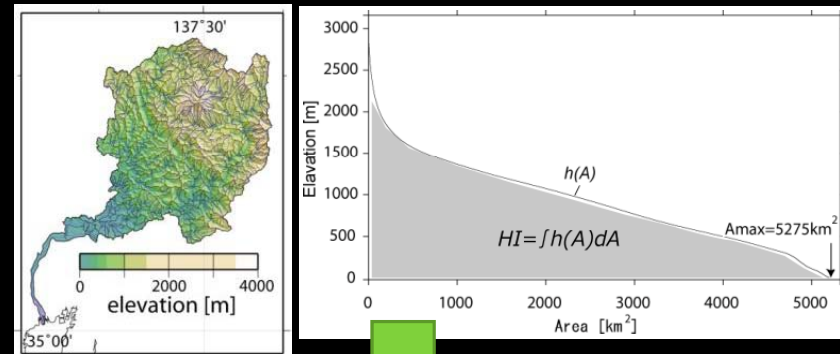
データセット
• DEM: 国土地理
50mメッシュ
• 流域: 国土数値情報
W15-52A
• 気候: 国土数値情報
G02-62M

合成面積高度曲線と流域形状について 木曽川の例

- 合成面積高度曲線は、通常の面積高度曲線と同じように、 h_o を基準標高として P を求めることができる。

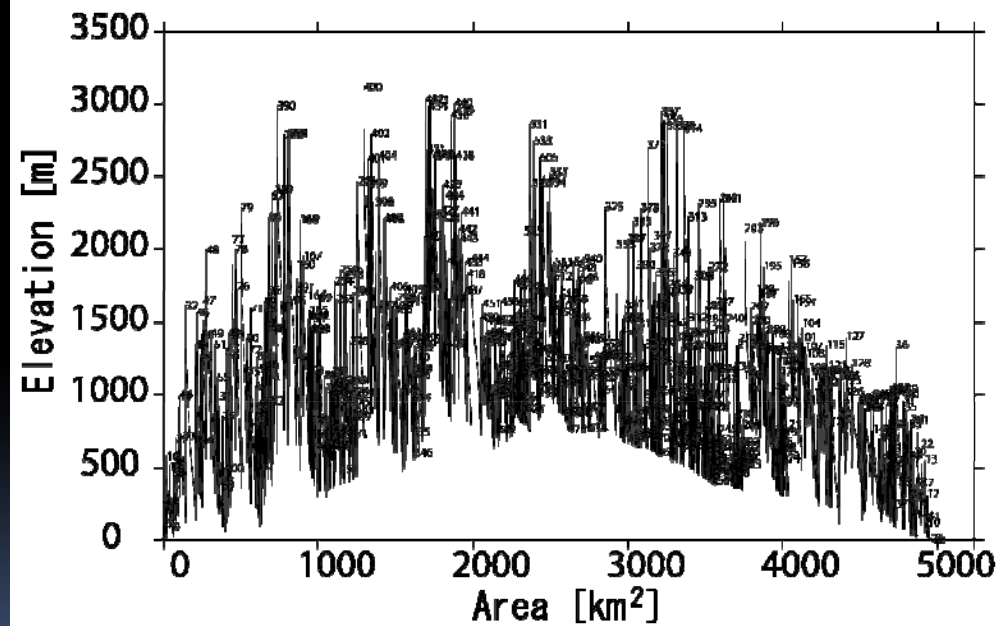
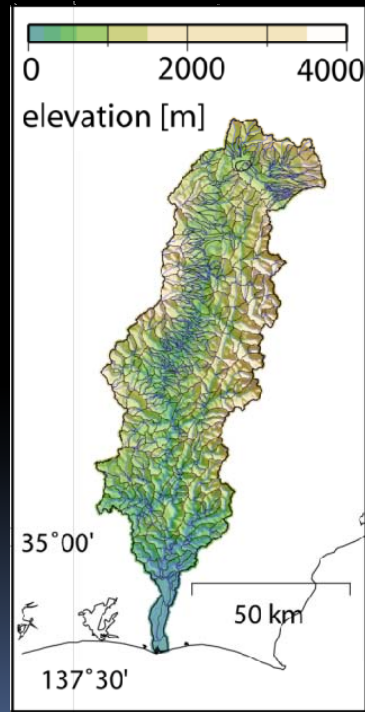
$$P = \sum_{i=1}^n \left(\rho g \int_0^{A_{\max}} R_i (h(A) - h_o) dA \right)$$

- また、合成面積高度曲線はおおよその流域形状を知ることができる。この木曽川流域の例では、ほぼ同じ規模である木曽川本川と飛騨川が合流している様子がわかる



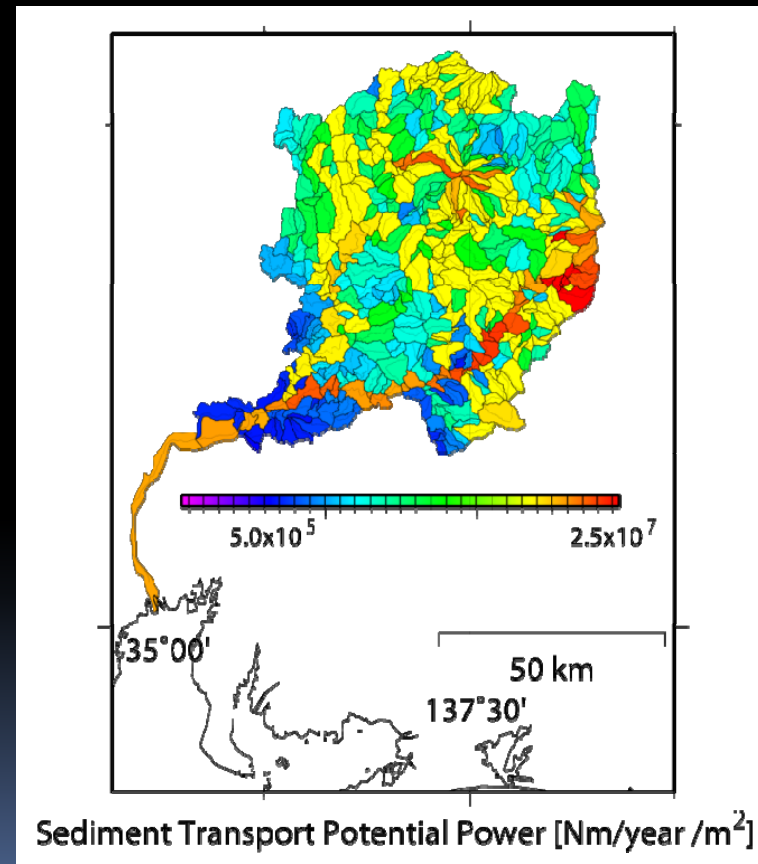
合成面積高度曲線と流域形状について 羽状流域・天竜川の例

合成面積高度曲線の中央にある諏訪湖まで、同程度の規模の流域が左右から合流していることがわかる。



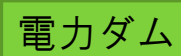
流域面積あたりの土砂流出ポテンシャルパワー P

- 土砂流出量が多い滑川付近で流域面積あたりの P が最も大きく、御嶽山麓、付知川と木曽川本川合流点付近において、流域面積あたりの P が大きくなっていることが分かる。
- 全体としては、上流部において P の密度が高い分が多く、 P が小さい下流の支川の合流とともに、つまり、流域面積が増えると面積あたりのエネルギーが減少していることから、土砂流出量も同様の傾向であることが予想され、芦田らの示した -0.7 乗と同じ傾向を示している。



河川によって傾きは異なるが点集全体では -0.6乗に比例する結果

位置エネルギーあたりの土砂流出量

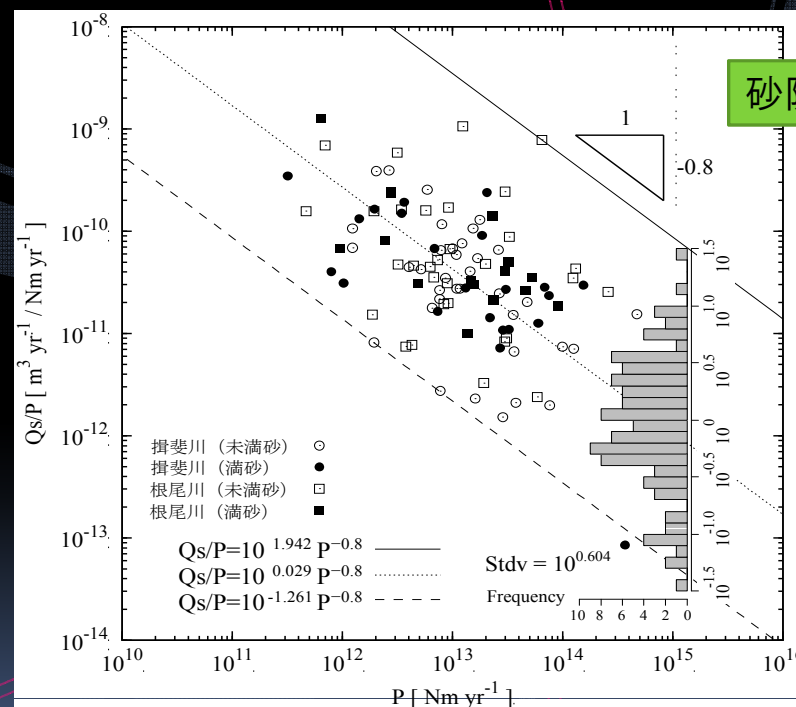


大橋・藤田, 土砂流出ポテンシャルパワーに基づく流域の地質構造と土砂流出量の考察, 水工学論文集第53巻, 2009

年平均降水の位置エネルギーと土砂流出量との関係

砂防堰堤では -0.8乗に比例する結果

位置エネルギーあたりの土砂流出量



砂防ダム

位置エネルギー

流域スケールでの土砂流出量予測の課題

- 予測精度が悪い.
現状では長期的な土砂流出傾向の把握にとどまる.
(Ex. 気象予報 ⇔ 気候予測)

- 物理的な説明付けの不足
 - 流域全体にわたる粒度分布が分からない

↑ 画像処理によって効率化された調査によって解決できそう？

- 流水のエネルギー消費は土砂移動に利用される量より、流下における消費が圧倒的に多い。しかし、その消費過程（どこで、どれだけ減るか）は不明。

↑ 観測による方法は不可能！室内実験によるモデル化とその検証？