公益社団法人地盤工学会
落石対策技術講習会

落石の速度と運動エネルギー

平成24年6月19日(火)
中央大学駿河台記念館

(株)第一コンサルタンツ
右城　猛

- ◆ 斜面の痕跡調査，落石実験
- ◆ 調査から明らかになったこと
  運動形態，速度、エネルギー，跳躍量
- ◆ 落石シミュレーションの適用事例

経験則による落石速度の推定

●落石の速度

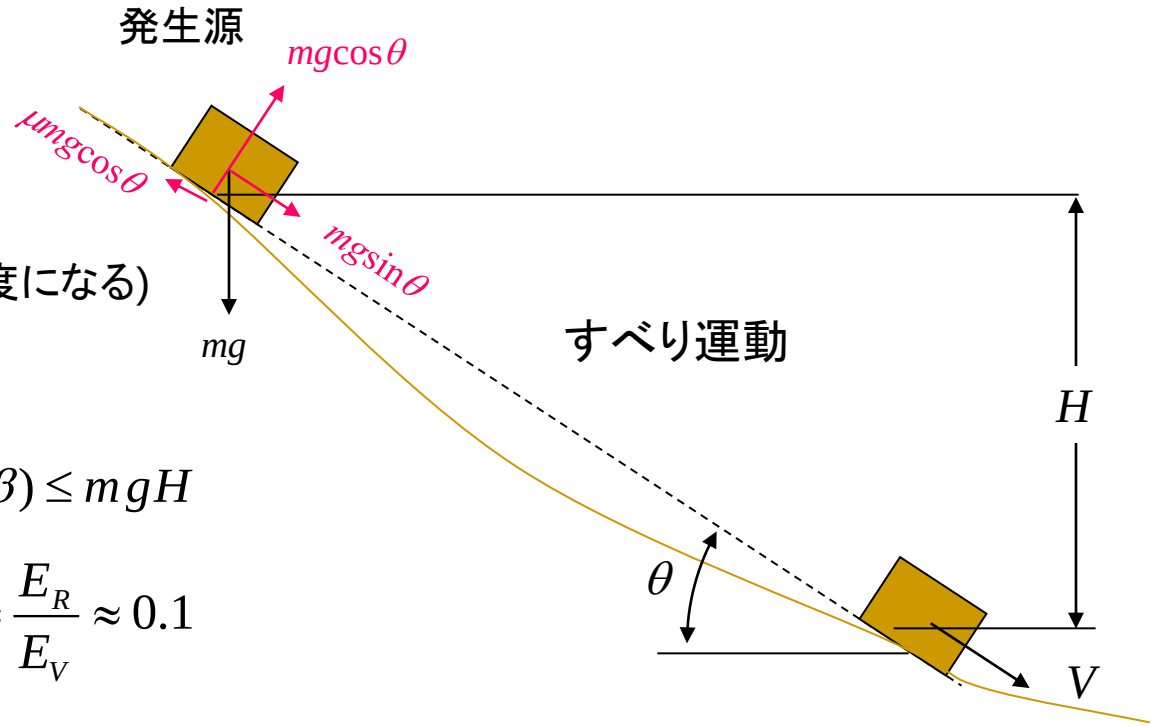
$$V=\sqrt{2gH\left(1-\frac{\mu}{\tan\theta}\right)}$$

$H \le 40\mathrm{m}$ (40mで終端速度になる)

●落石エネルギー

$$E=mgH\left(1-\frac{\mu}{\tan\theta}\right)(1+\beta)\le mgH$$

回転エネルギー係数 $\beta=\frac{E_R}{E_V}\approx 0.1$



●逆算等価摩擦係数

$$\mu=\left(1-\frac{V^2}{2gH}\right)\tan\theta$$

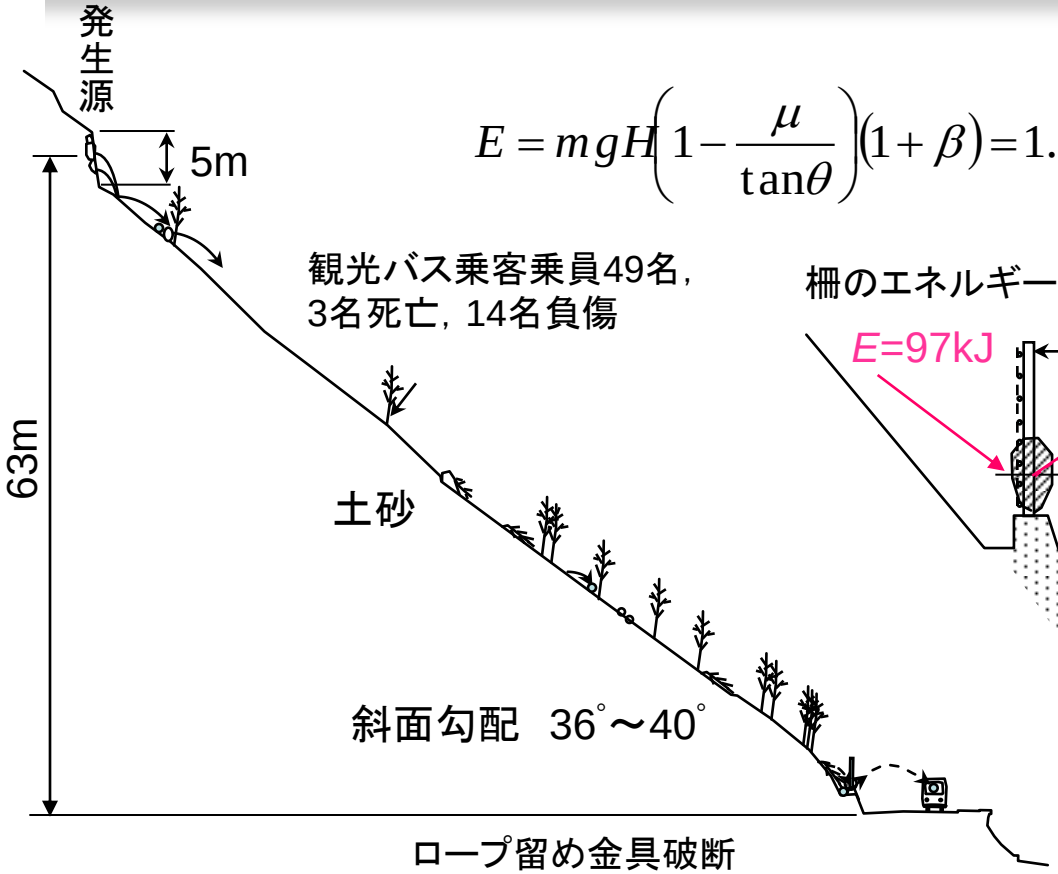
$$\mu=\left(1-\frac{E}{mgH(1+\beta)}\right)\tan\theta$$

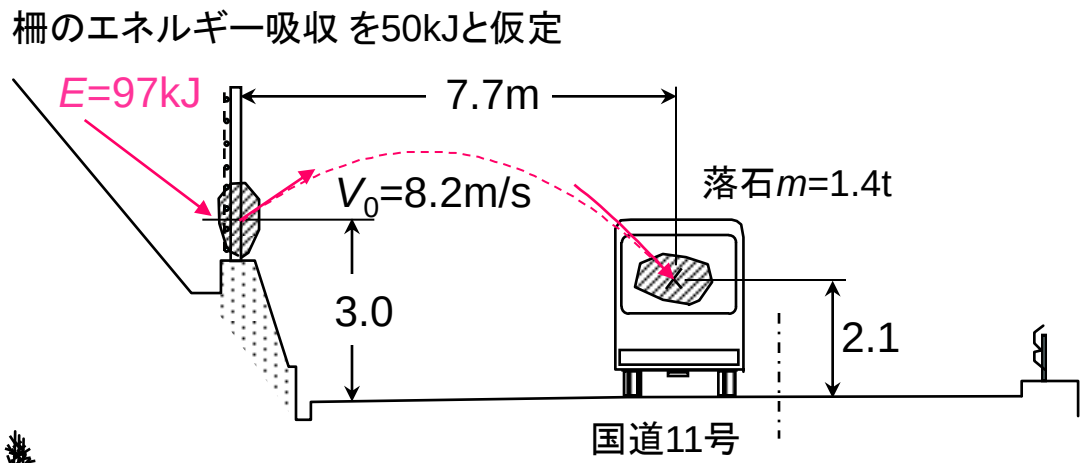
等価摩擦係数μの値

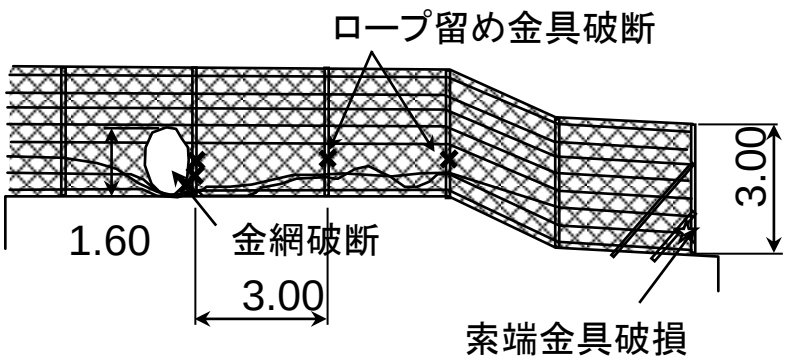
区分	落石形状	地質	凹凸	立木	μ
A	丸状	軟岩	小	なし	0.05
B	丸状～角状	軟岩	中～大	なし	0.15
C	丸状～角状	土砂，崖錐	小～中	なし	0.25
D	角状	崖錐，巨礫混じり崖錐	中～大	なし～あり	0.35

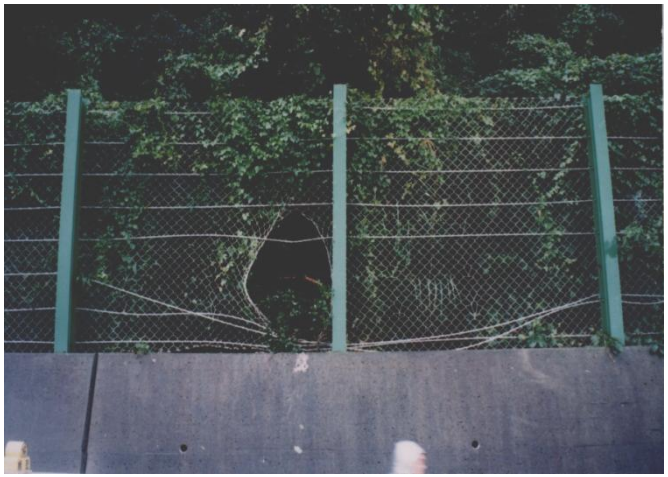
国道11号鳴門市北灘 1990年10月

$$E = mgH\left(1-\frac{\mu}{\tan\theta}\right)(1+\beta) = 1.0\times 9.8\times 63\times\left(1-\frac{0.35}{\tan 36}\right)\times 1.1 = 352\text{kJ}$$

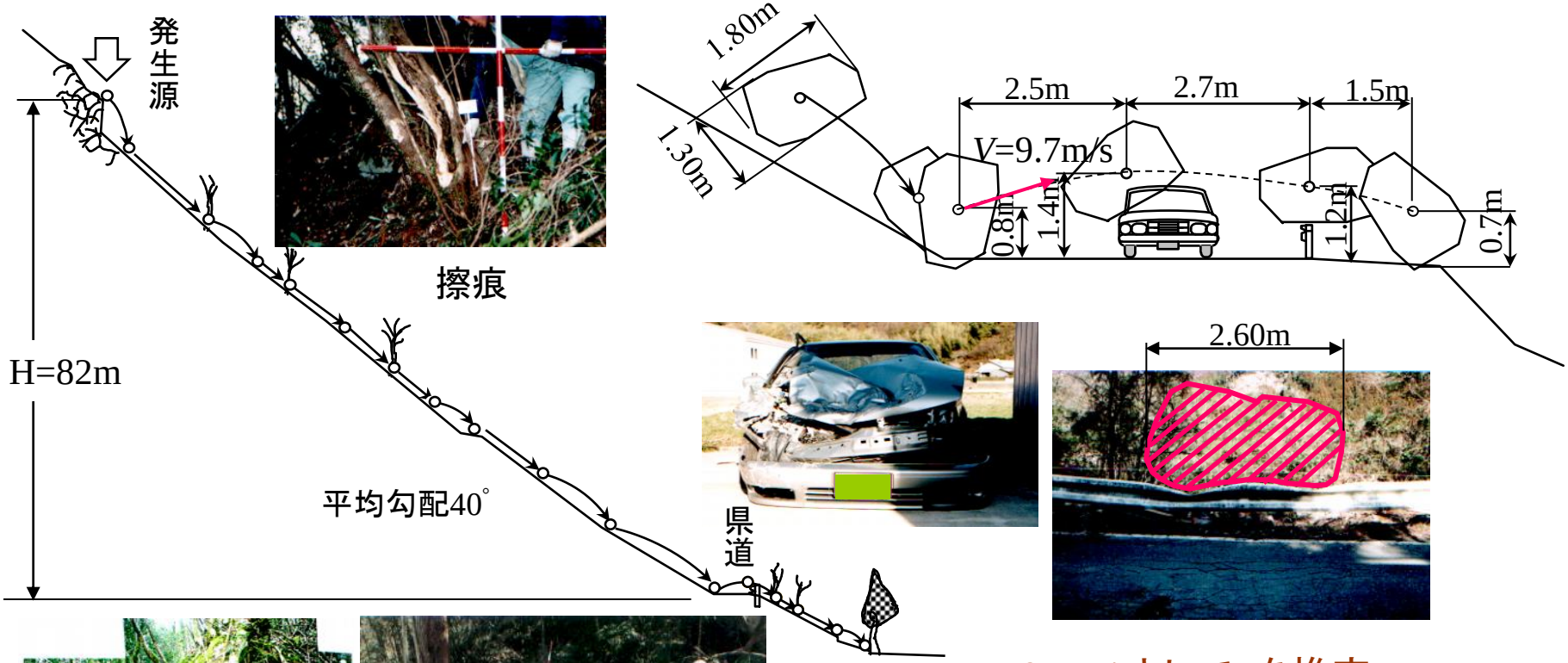








高知県道東洋安田線・北川村島1996年



擦痕

落石発生源

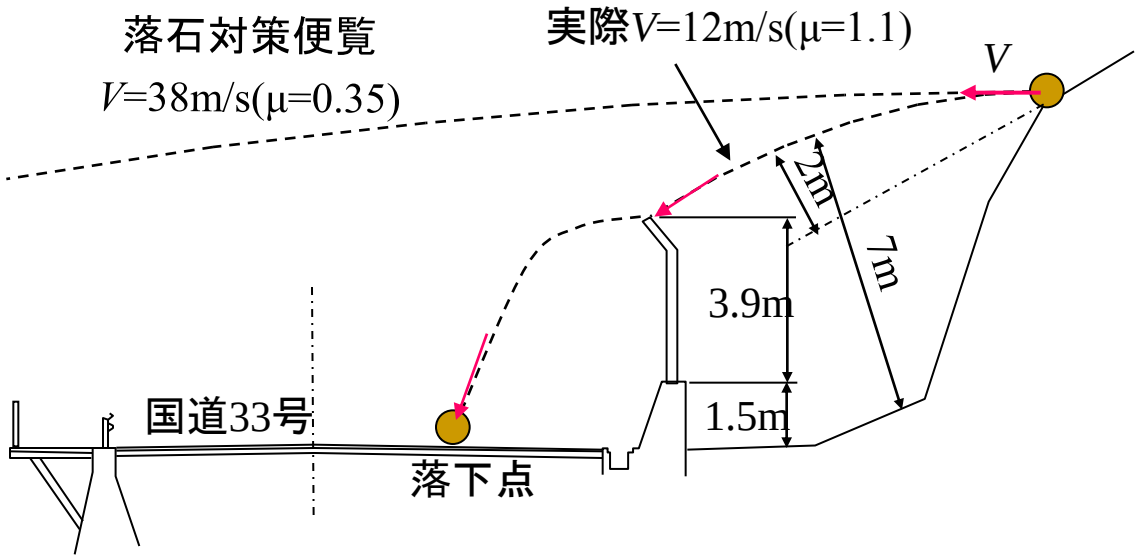
約10tの落石

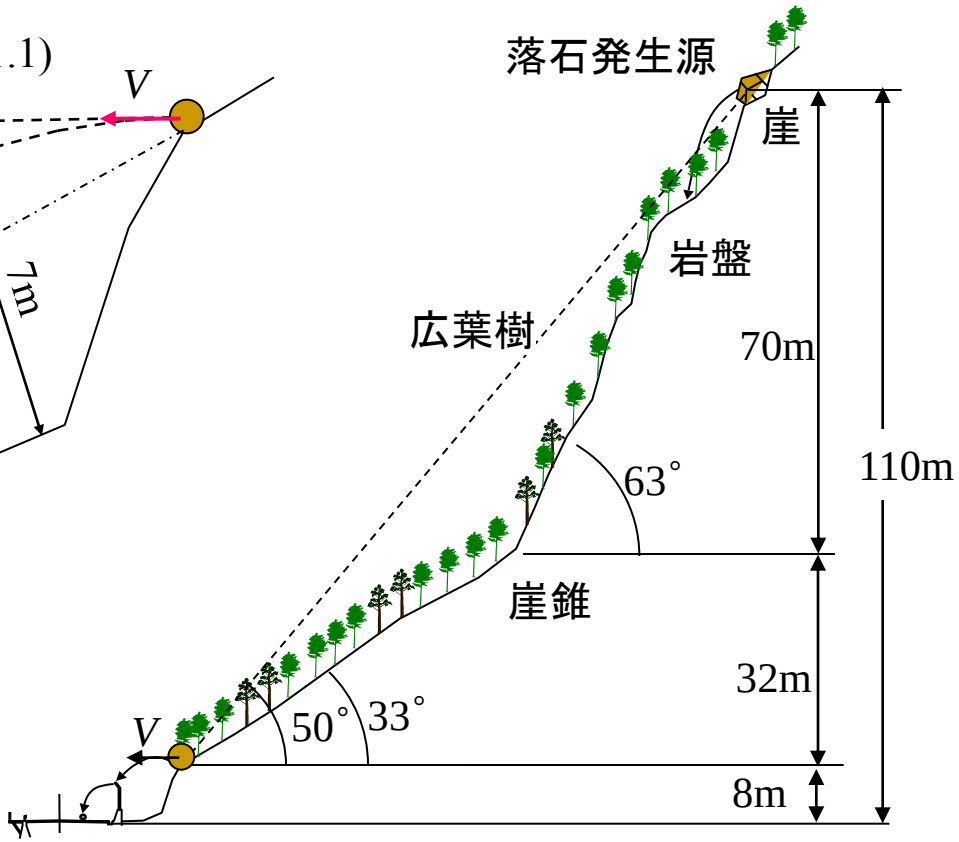
V=9.7m/sとしてμを推定

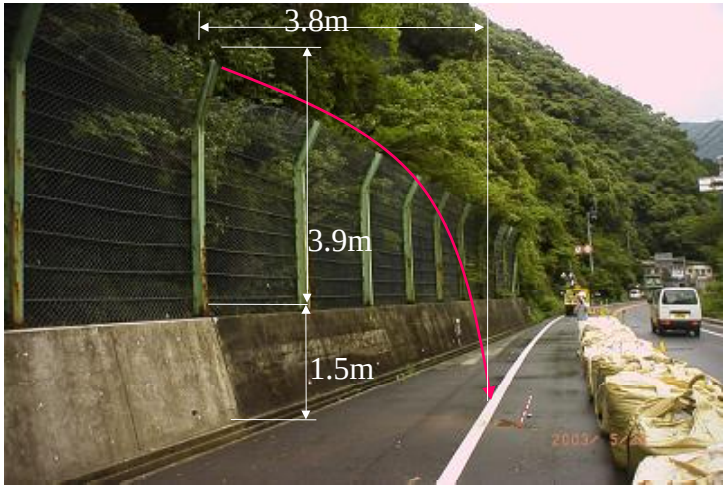
$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right)\tan\theta$$

$$= \left(1 - \frac{9.7^2}{2 \times 9.8 \times 82}\right)\tan 40 = 0.79$$

国道33号吾北村大渡　2003年5月



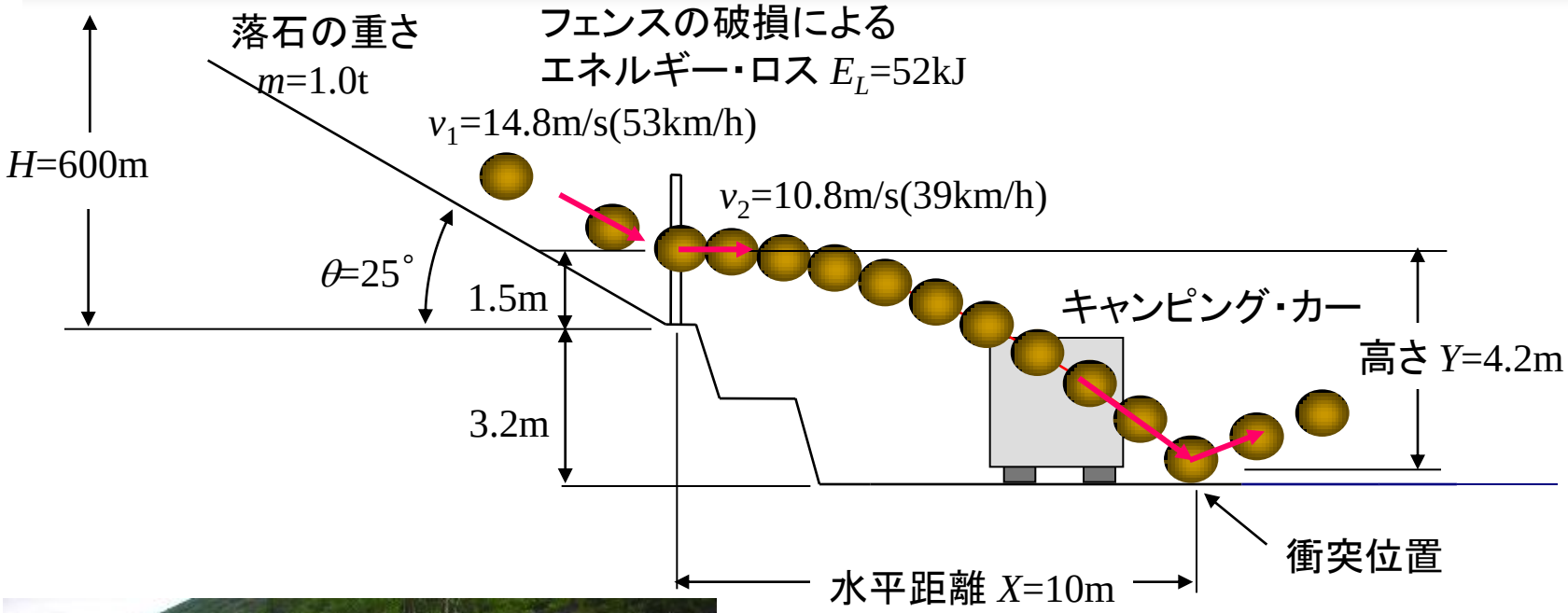




逆算等価摩擦係数

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right)\tan\theta = \left(1 - \frac{12^2}{2\times 9.8\times 102}\right)\tan 50 = 1.1$$

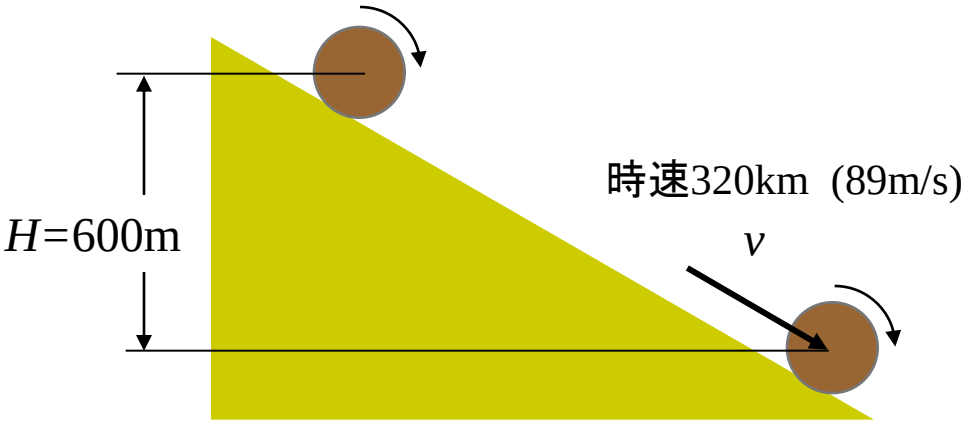
富士山五合目駐車場落石事故の事例　2009年7月



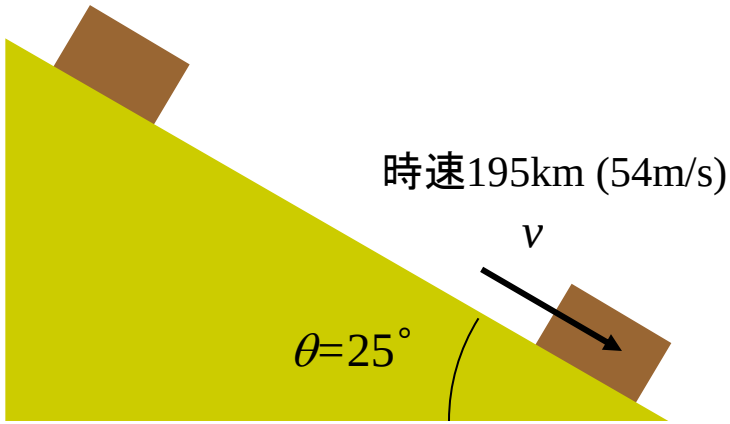
$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right)\tan\theta = \left(1 - \frac{14.8^2}{2 \times 9.8 \times 600}\right)\tan 25 = 0.46$$

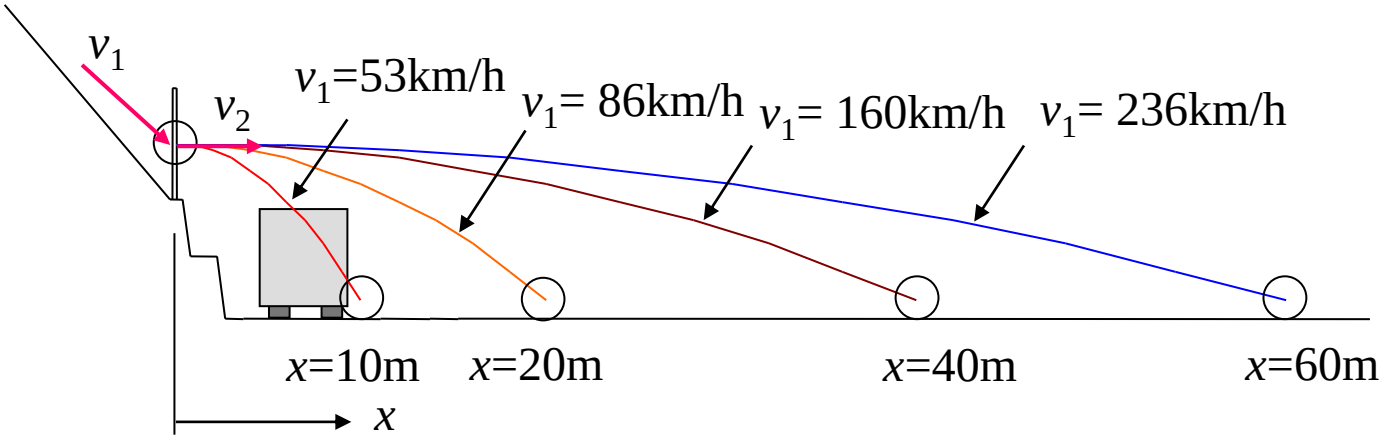
富士山五合目駐車場落石事故の事例　2009年7月

円柱の転がり運動



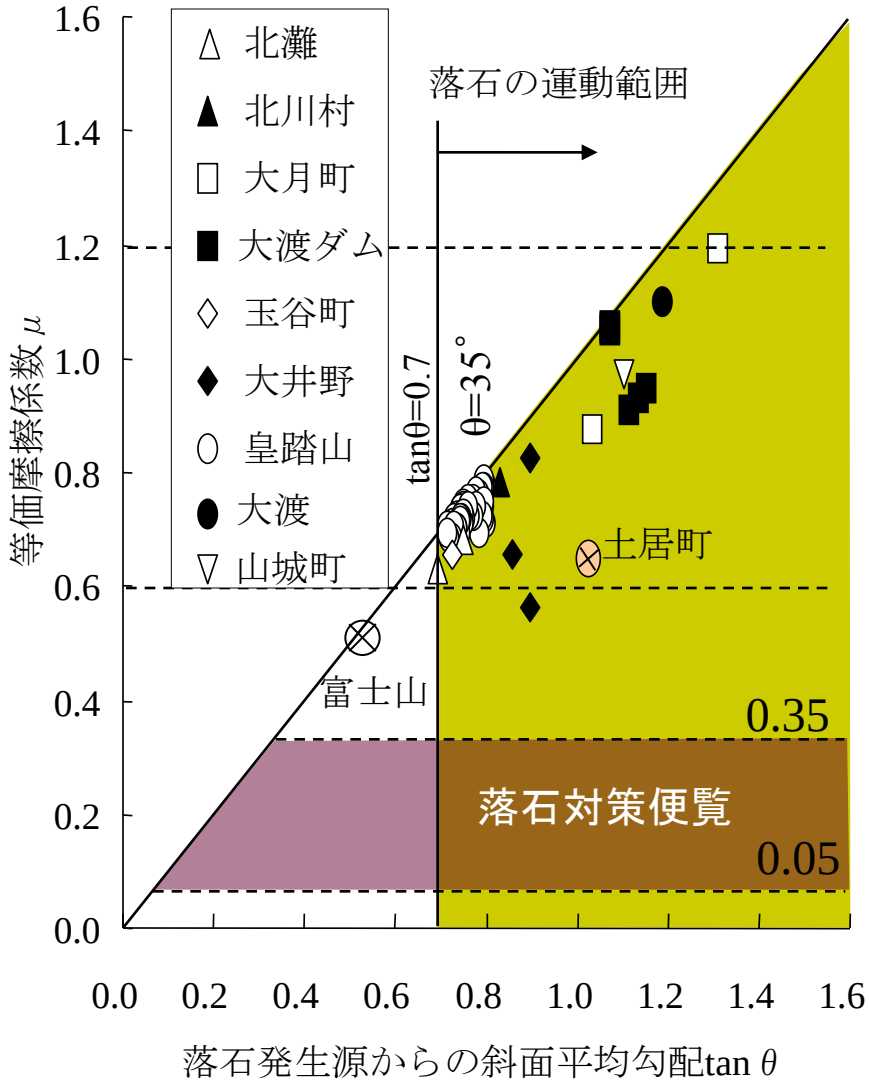
すべり運動(μ=0.35)



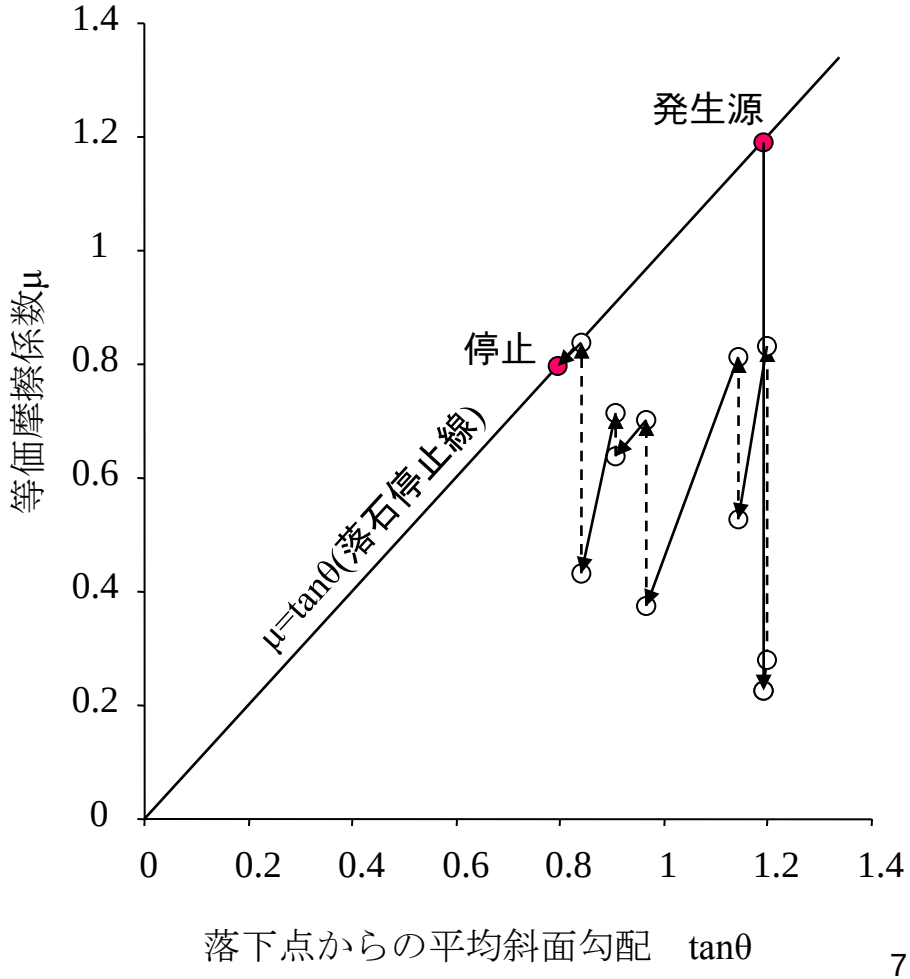


落石が新幹線のように速ければキャンピングカーの上を飛び越える。
落石事故は起きなかったはず。

逆算される等価摩擦係数は0.6～1.2

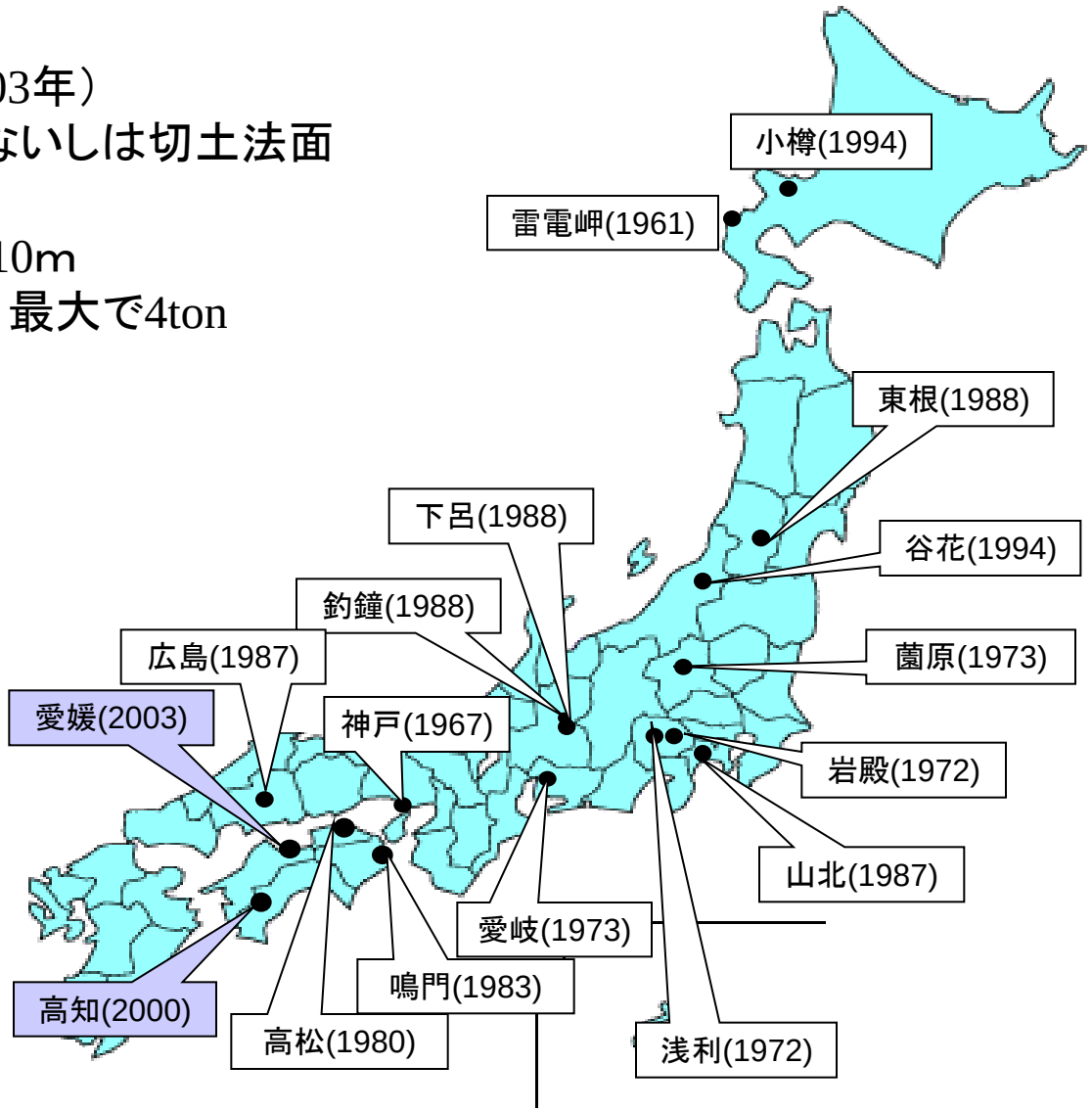


斜面を落下する1個の石に着目

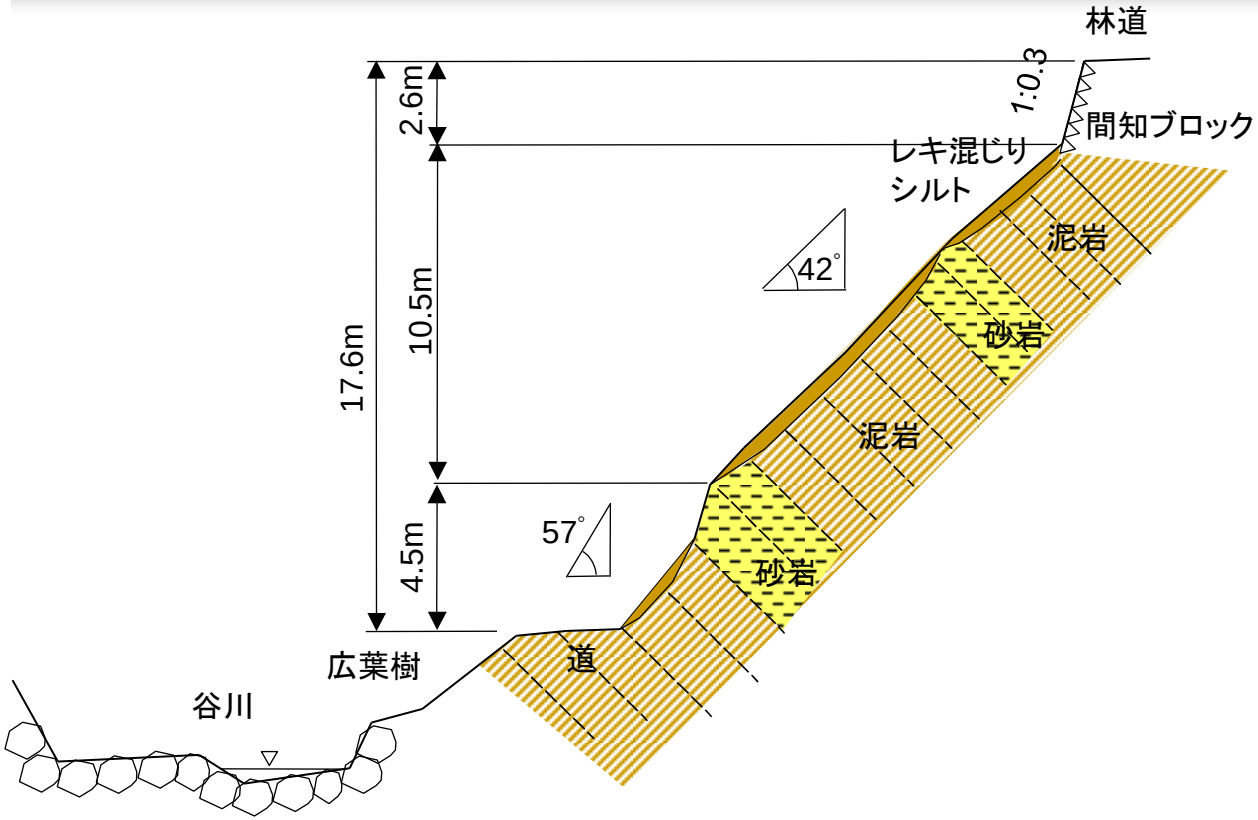


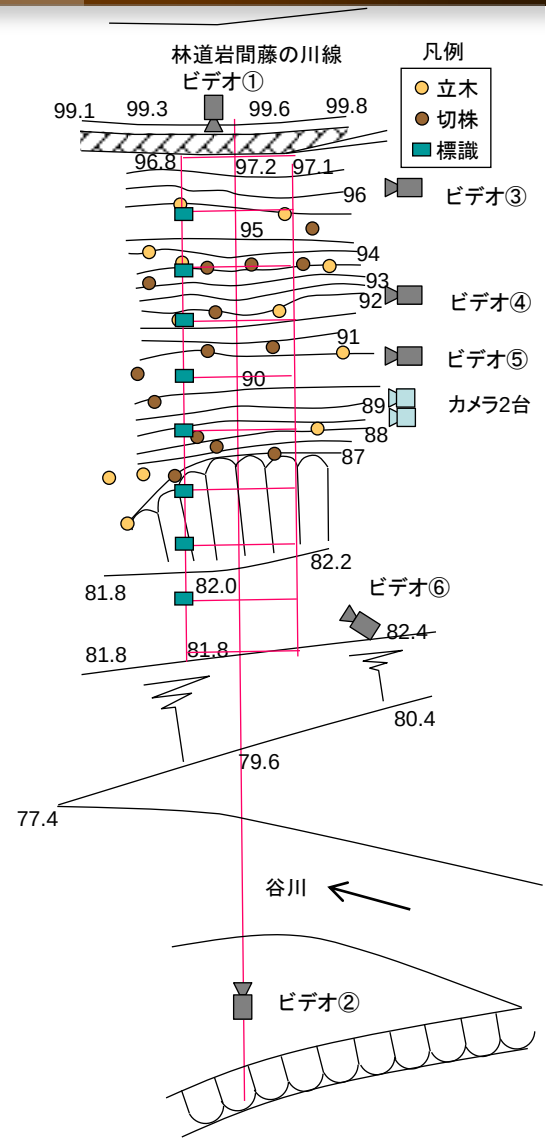
既往の主な現場落石実験(松尾修の図に加筆)

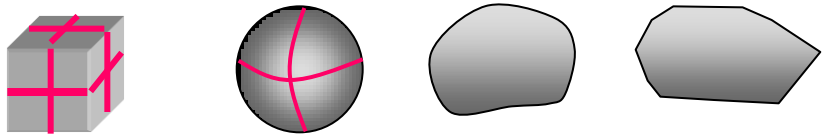
- 国内で17事例（1961年～2003年）
- ほとんど裸地の自然斜面、ないしは切土法面
- 斜面勾配：40～50度
- 斜面高：20～60m、最高で110m
- 落石質量：数10～数100kg、最大で4ton



高知県四万十市西土佐2000年



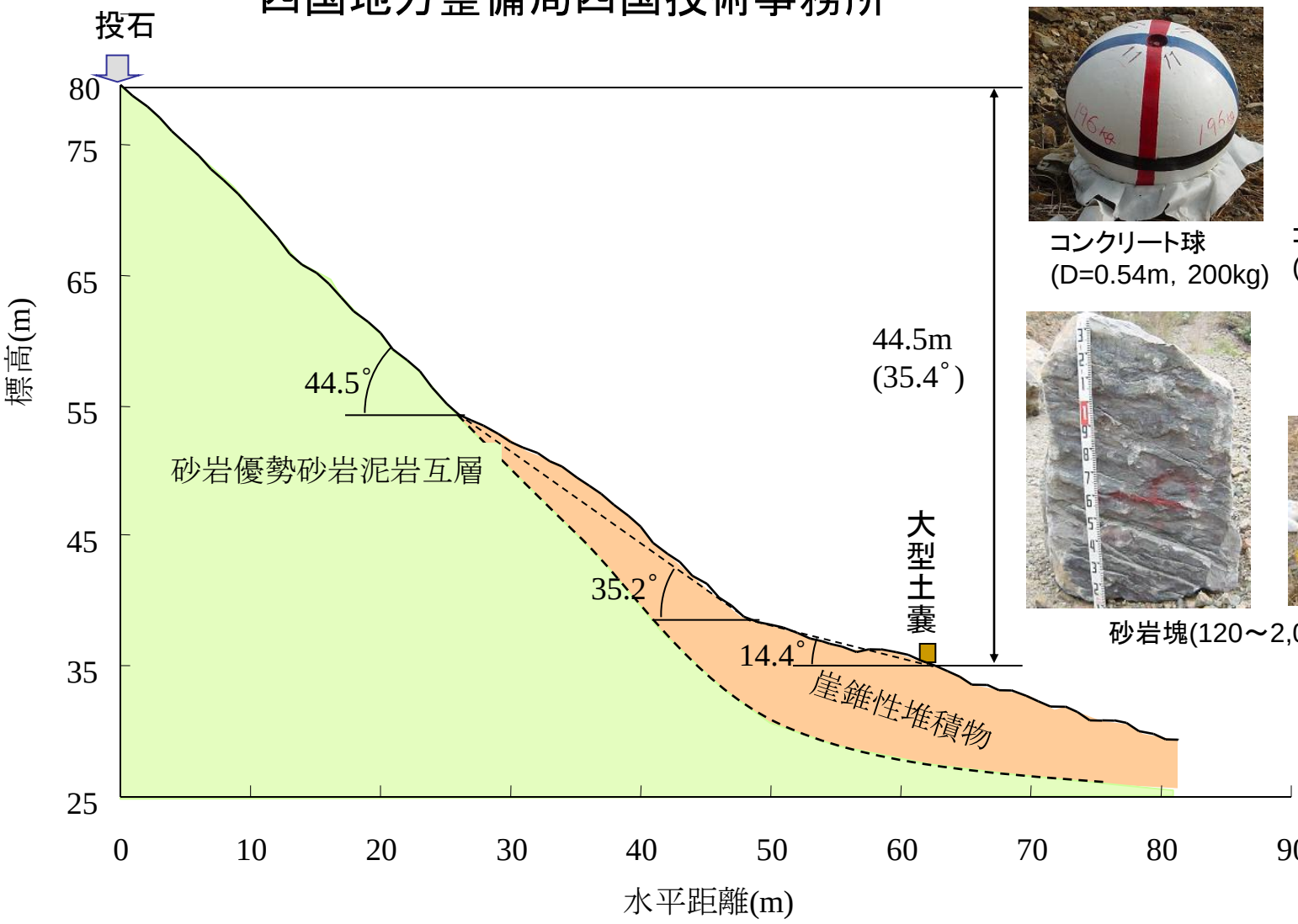




コンクリート	コンクリート	砂岩玉石	砂岩砕石
38kg 13個	16kg 3個	21～48kg 4個	16～200kg 49個

愛媛県土居町での落石実験2003年

四国地方整備局四国技術事務所



コンクリート球
(D=0.54m，200kg)

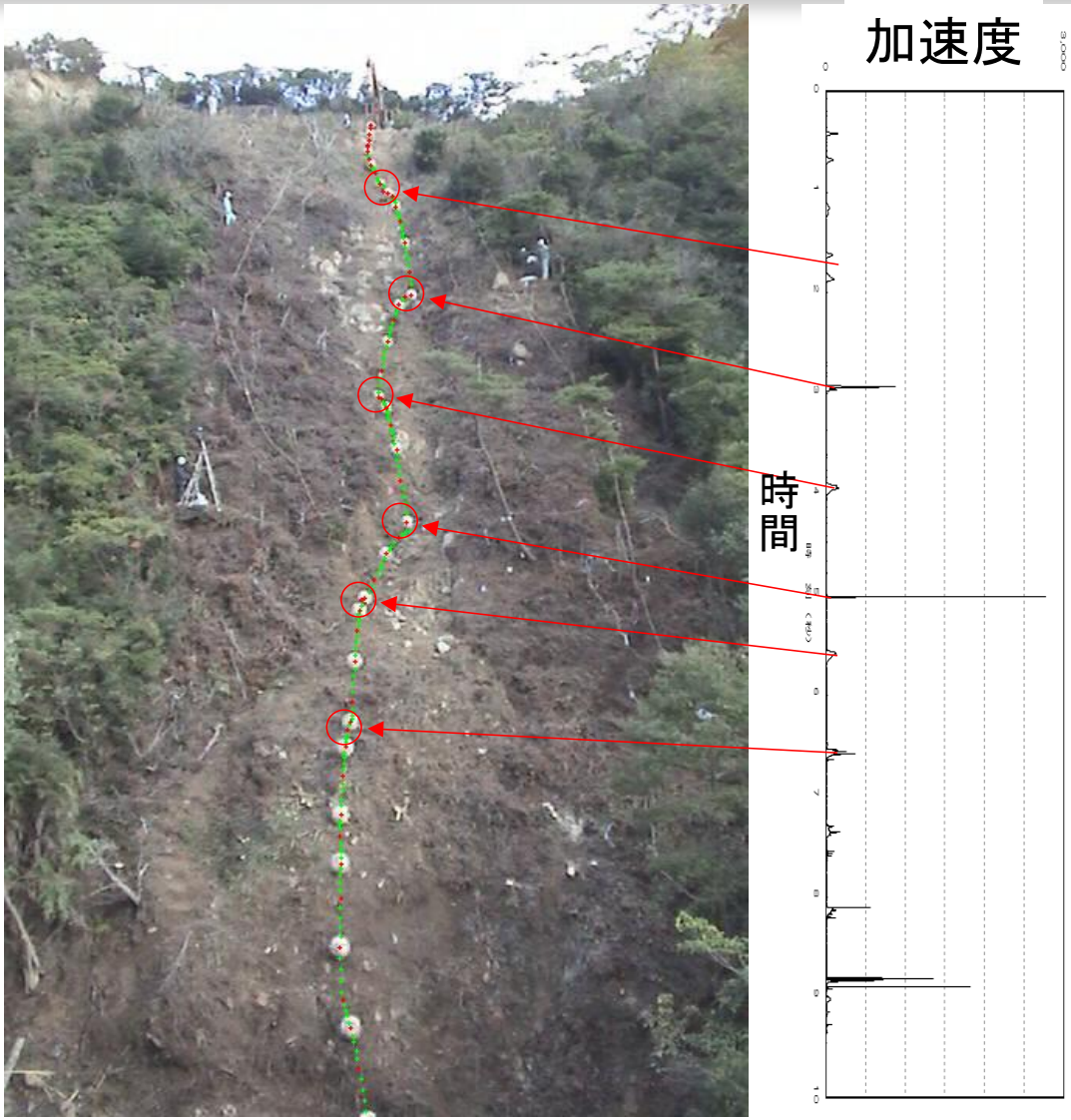
コンクリート立方体
(D=0.6m，520kg)

砂岩塊(120～2,060kg)11個

落石の運動形態はバウンドが主体的

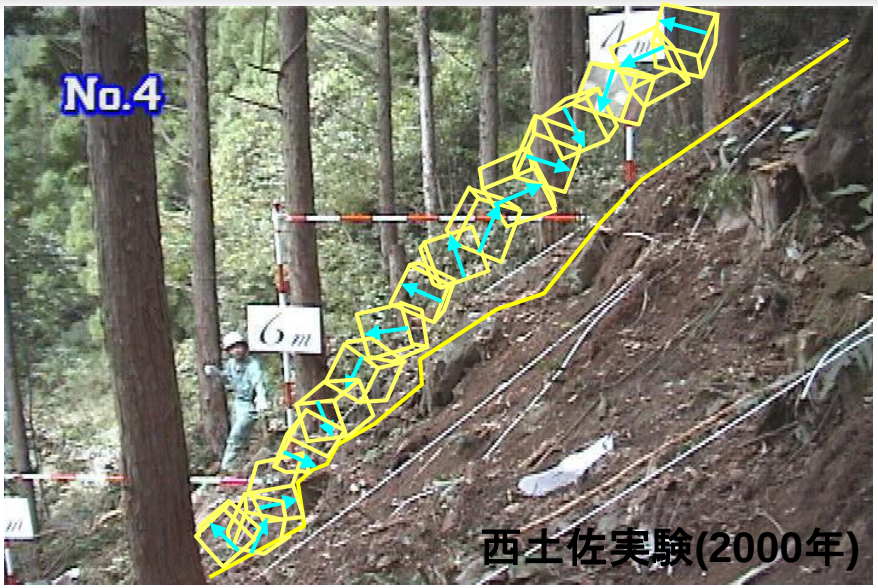
西土佐実験(2000年)

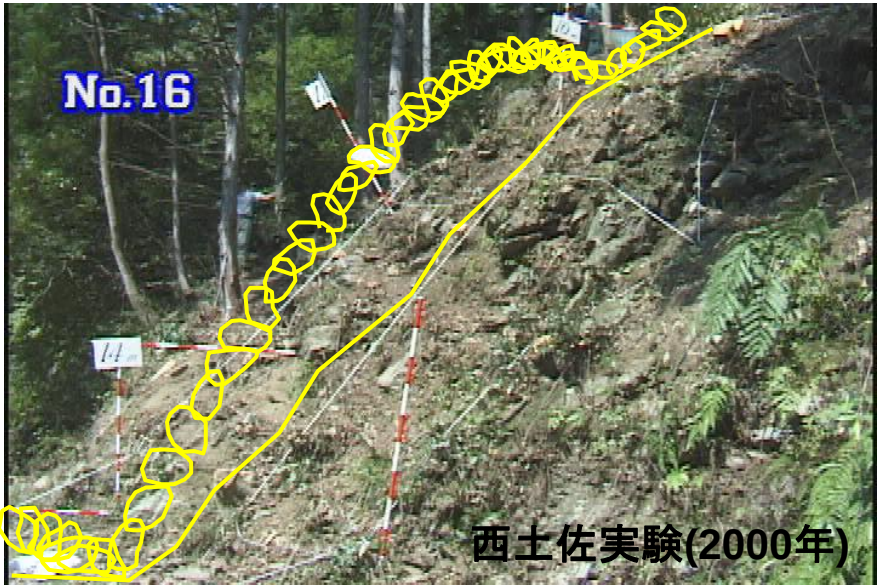
土居町実験(2003年)



土居町実験(2003年)

落石の運動は三次元的，突起で大きく跳躍





飛行中の回転は三次元的

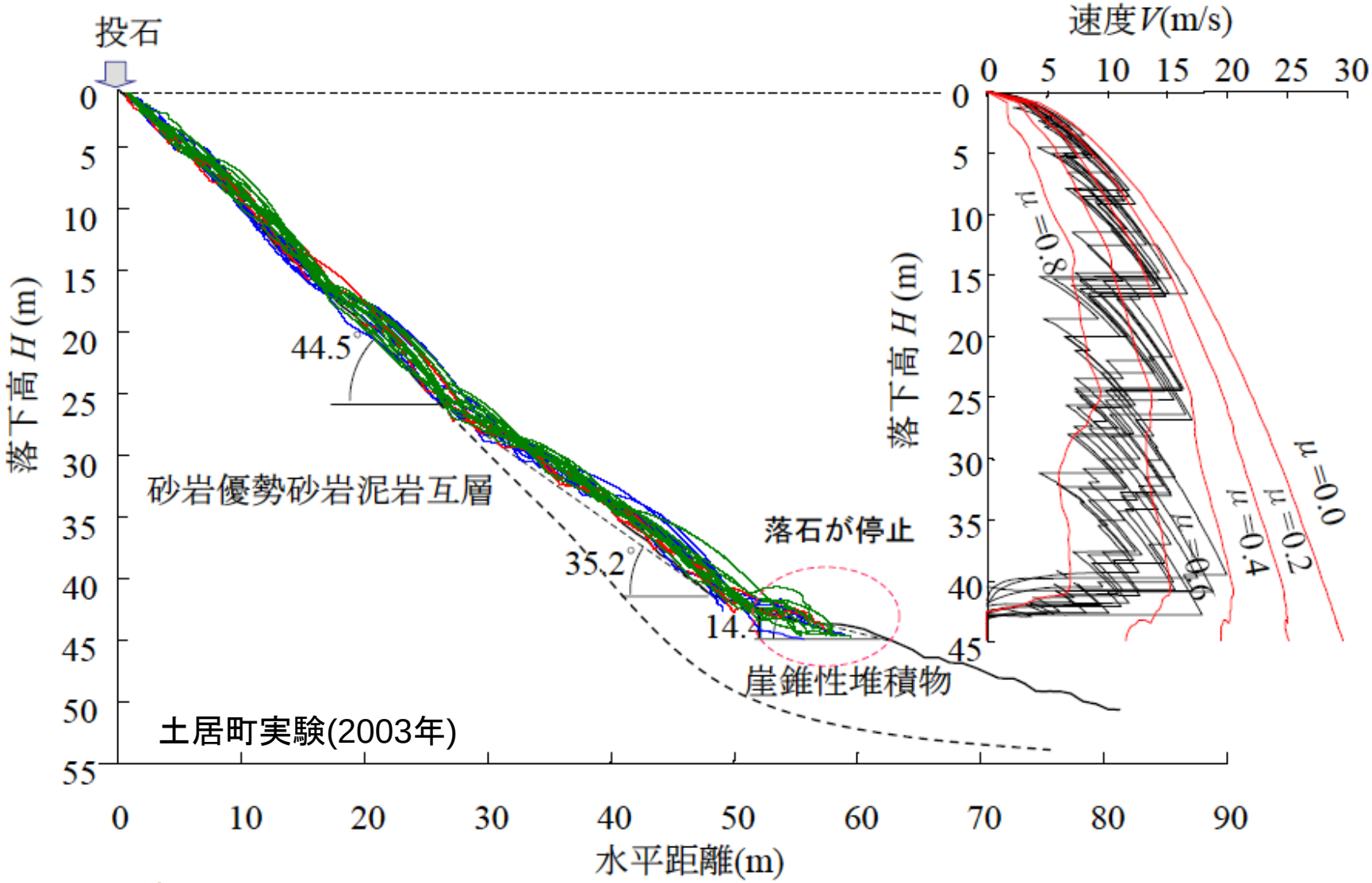
回転エネルギーは不明

$$E = \frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

$$\frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}\left(I_x\omega_x{}^2 + I_y\omega_y{}^2 + I_z\omega_z{}^2\right)$$

切り株や岩盤の突起に
衝突すると大きく跳躍

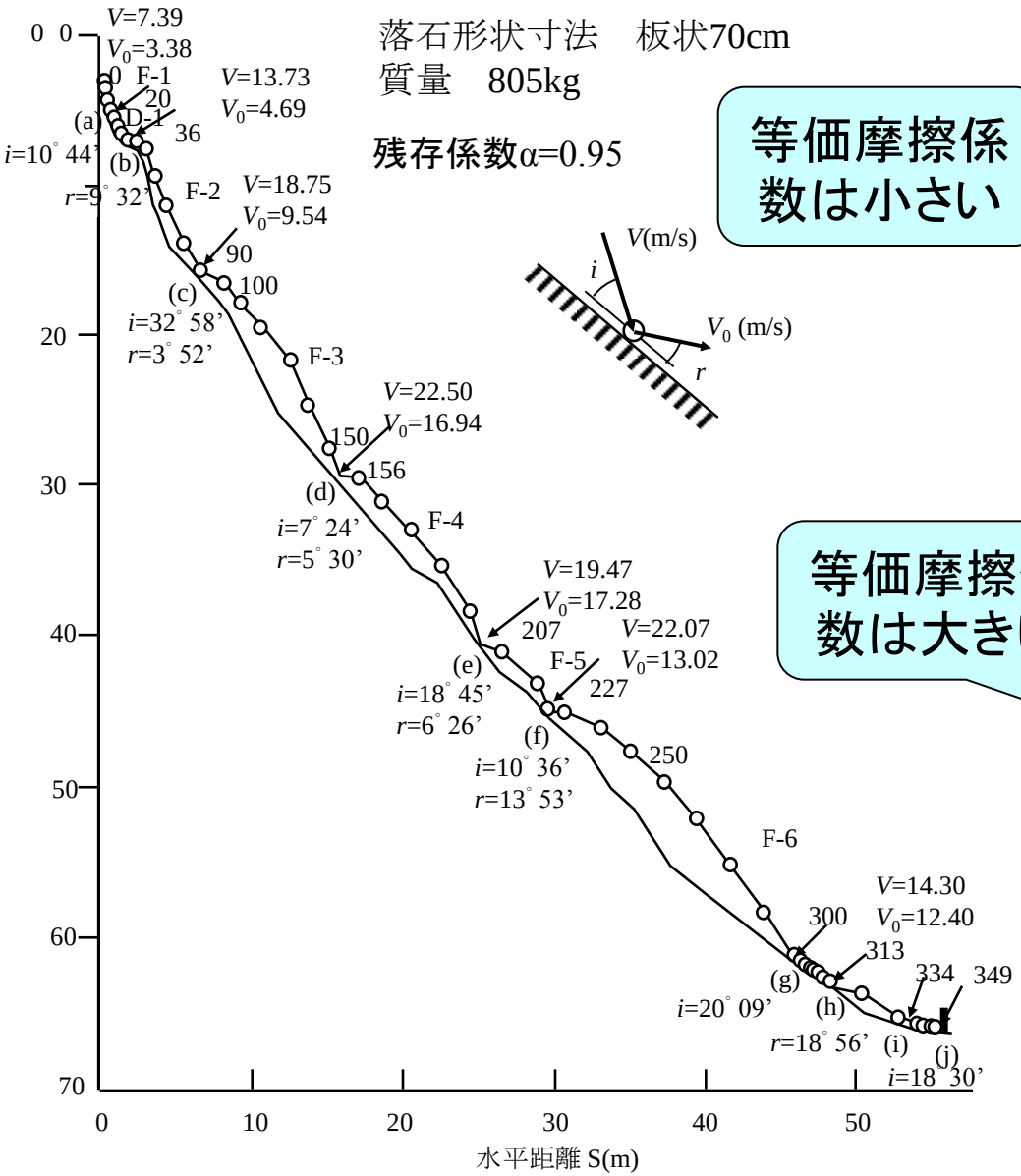
落石の軌跡，速度，等価摩擦係数

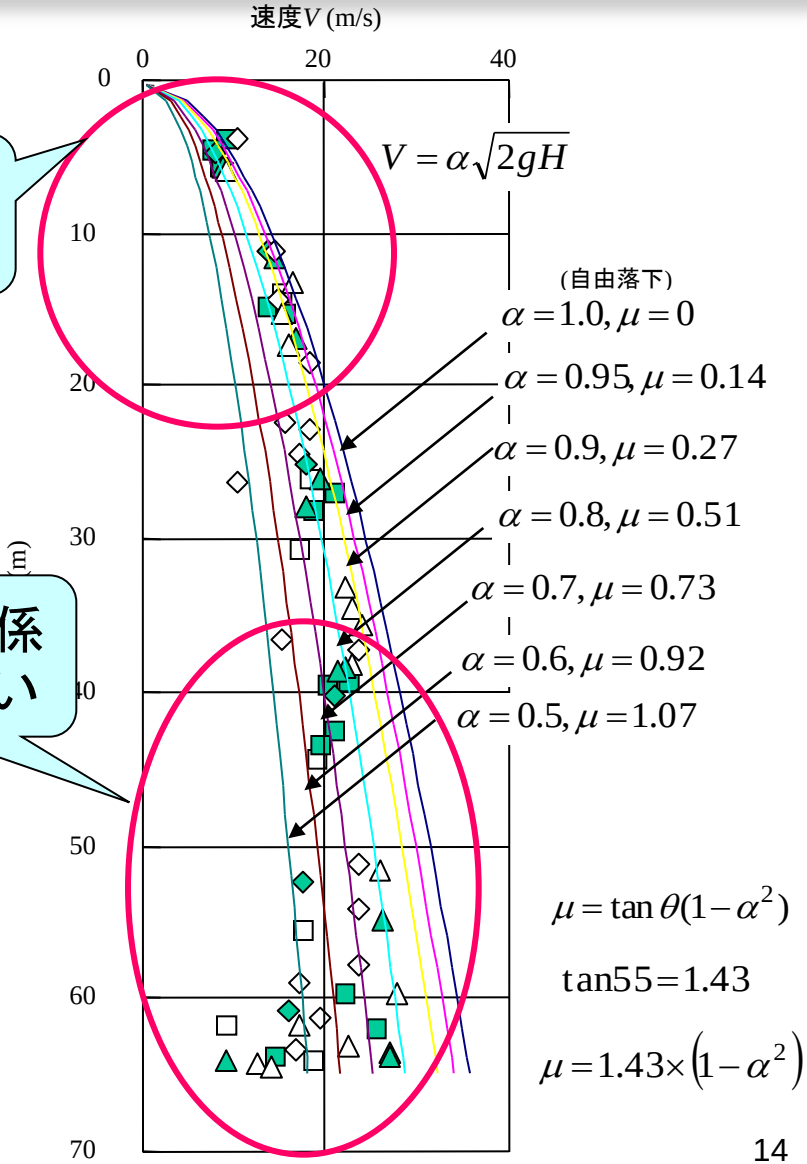


等価摩擦係数は一定ではなく、落下に伴って変化する(この例では0～0.8の間で変化)

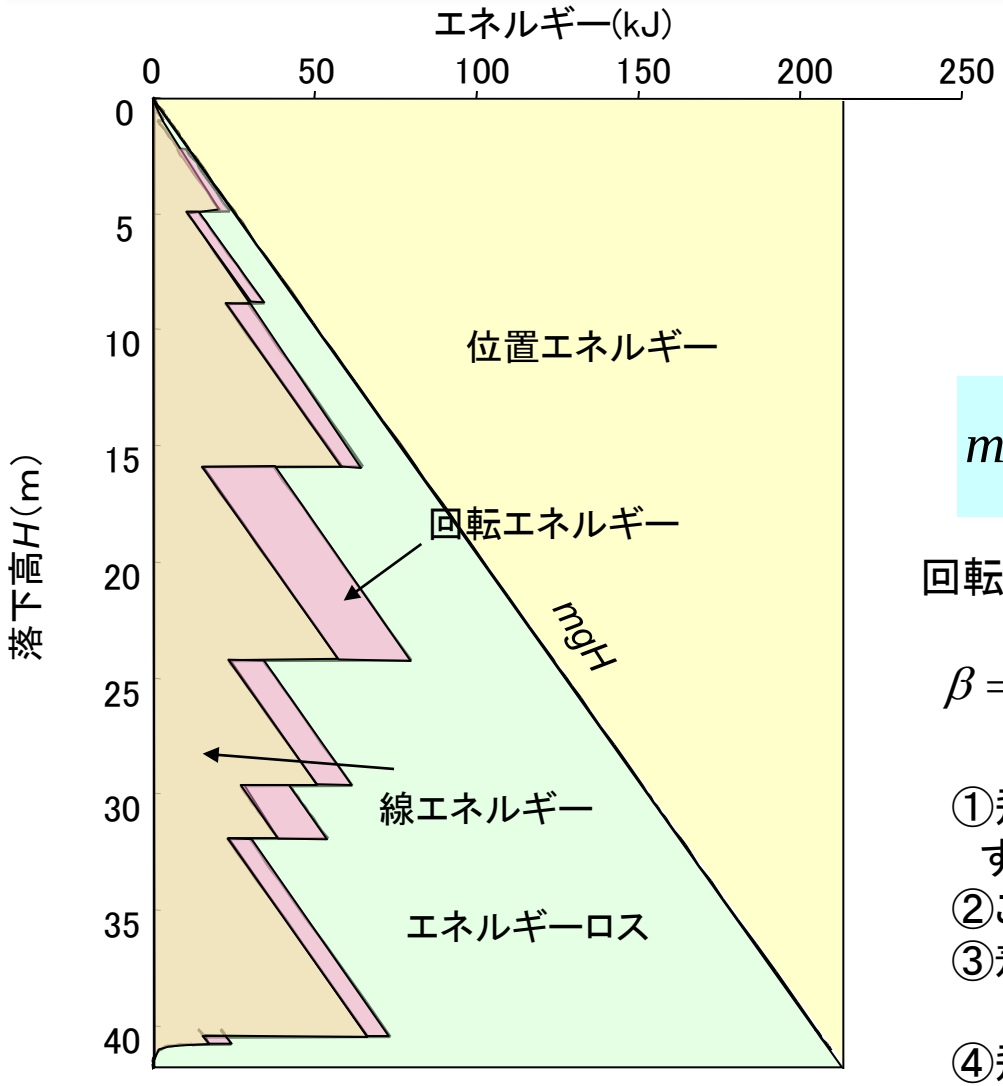
13

薗原ダムサイトの落石実験(1973年)





落石の運動エネルギー



土居町実験(2003年)

運動エネルギー

位置エネルギー　線エネルギー　回転エネルギー　エネルギーロス

$$mgH + \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + E_L = \text{const.}$$

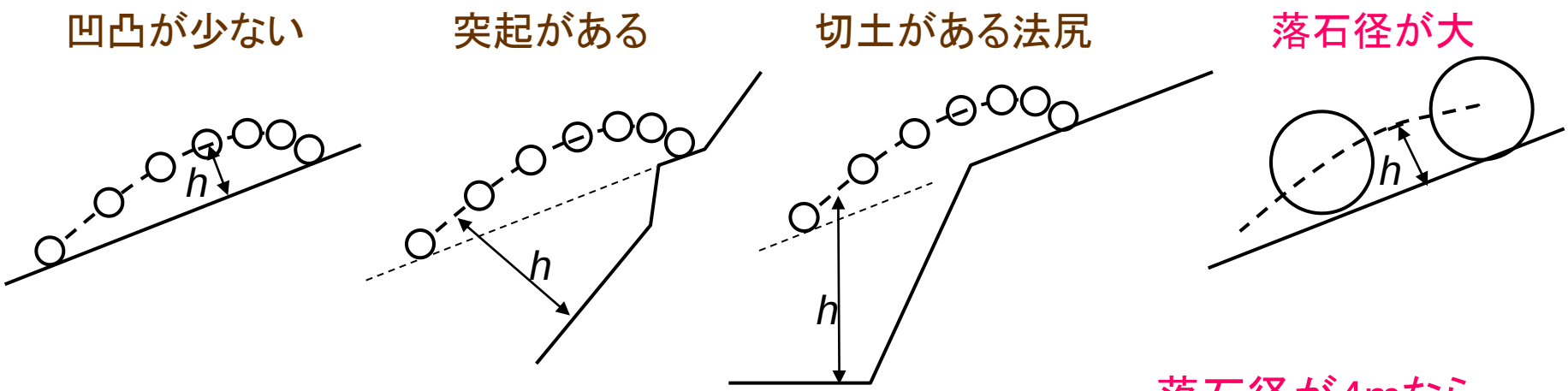
回転エネルギー係数は飛行中変化する

$$\beta = \frac{E_r}{E_v} = \frac{1/2I\omega^2}{1/2mV^2 + mgz} \approx 0.1\sim0.3$$

①飛行中に線運動エネルギーは増加するが，回転エネルギーは変化しない
②このため飛行中エネルギー比は変化する
③着地時のエネルギー比の平均値は0.1
（落石対策便覧と同じ）
④飛び出し時のエネルギー比の平均値は0.3

跳躍量

- 凹凸の比較的少ない斜面での最大跳躍量は2m以下
- 斜面上に局部的な突起や凹凸の多い斜面では、跳躍量が2m以上になることがある。
- 自然斜面下に切土がある場合の法尻での跳躍量は2m以上になることがある。

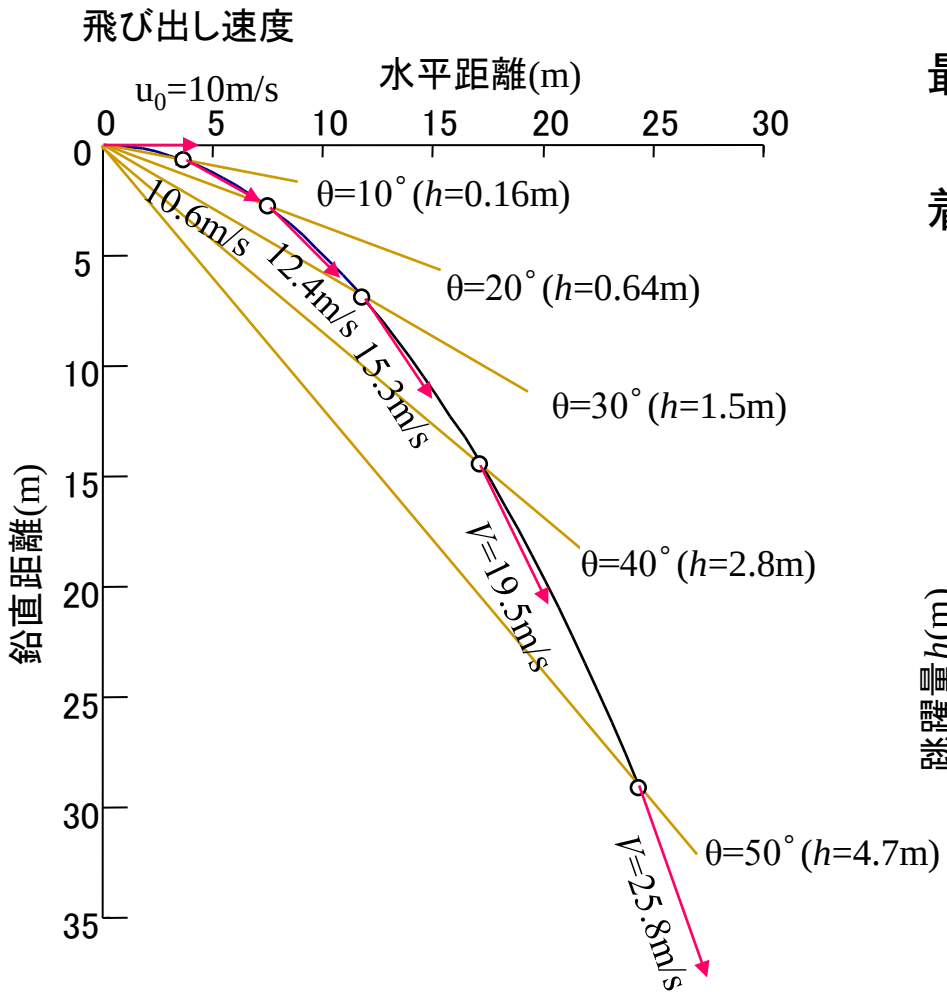


2m以下　　2m以上　　2m以上

落石径が4mなら
転がっても2mになる

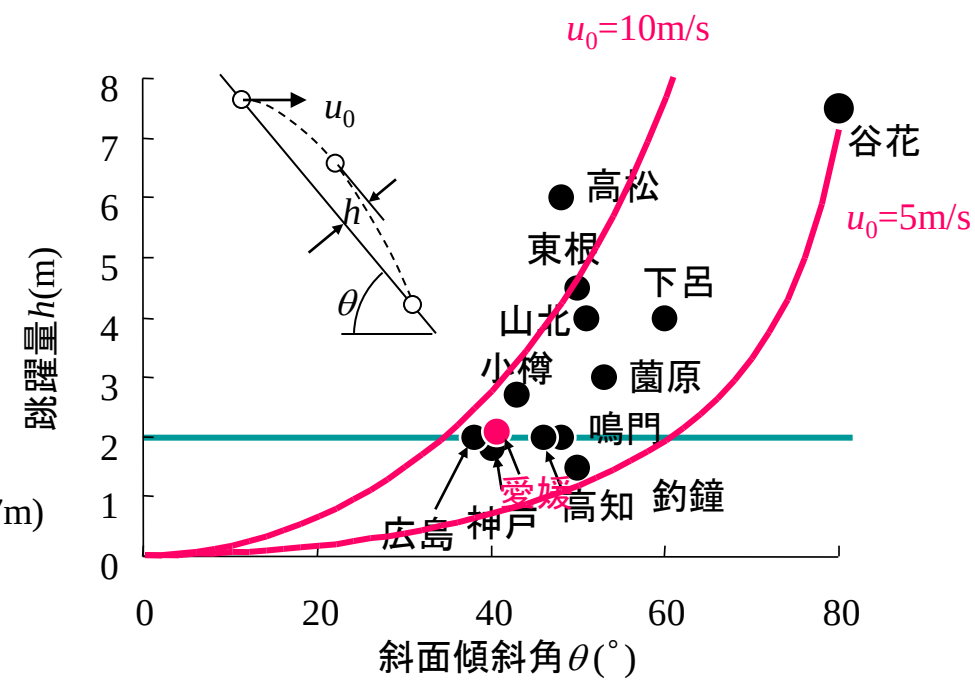
跳躍量は定義されていない

跳躍量と速度は斜面勾配に依存する



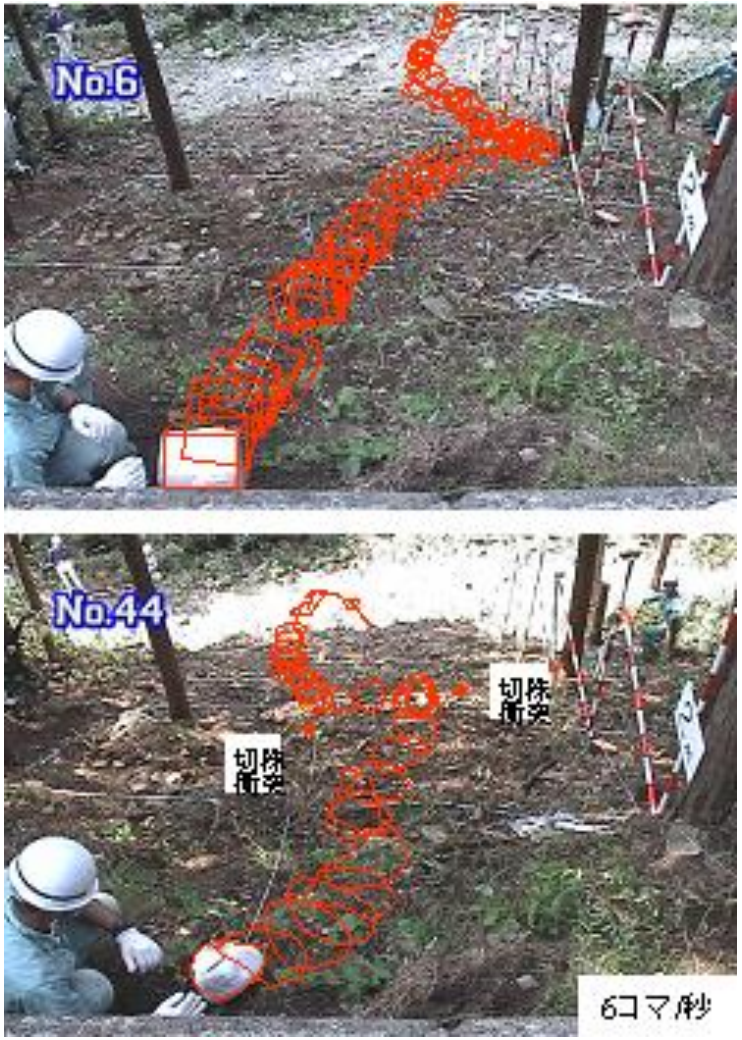
最大跳躍量 $h = \dfrac{(u_0 \sin\theta)^2}{2g\cos\theta}$

着地速度 $V = u_0\sqrt{1+4\tan^2\theta}$

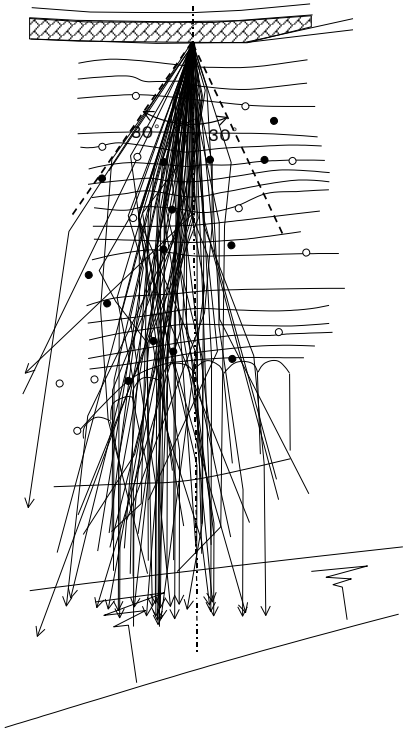


落差40mで終端速度というのは不合理

落下経路

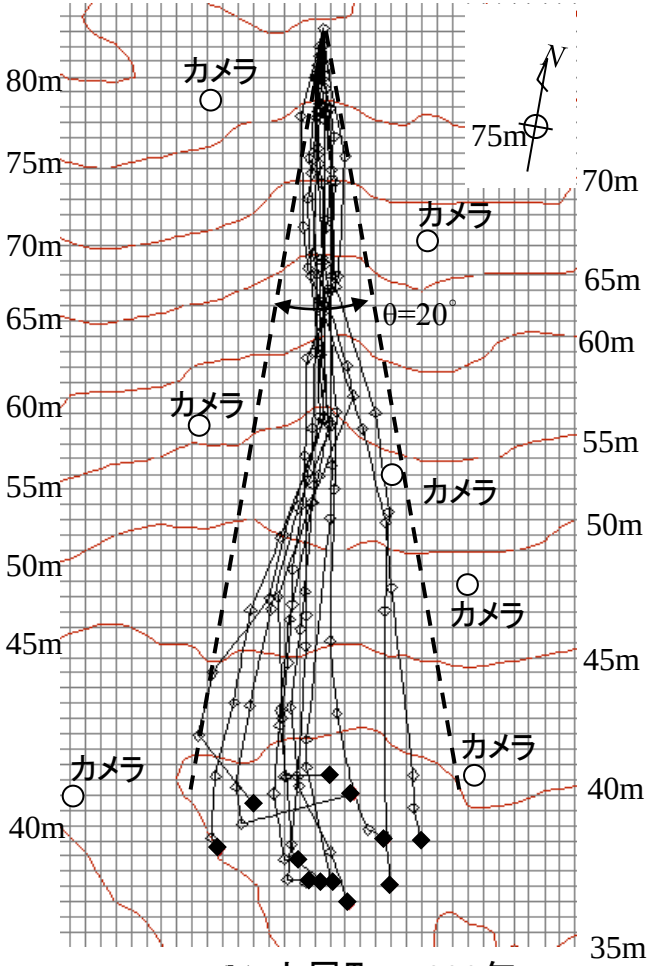


(西土佐実験2000年)



(a) 西土佐，2000年

θ=60°

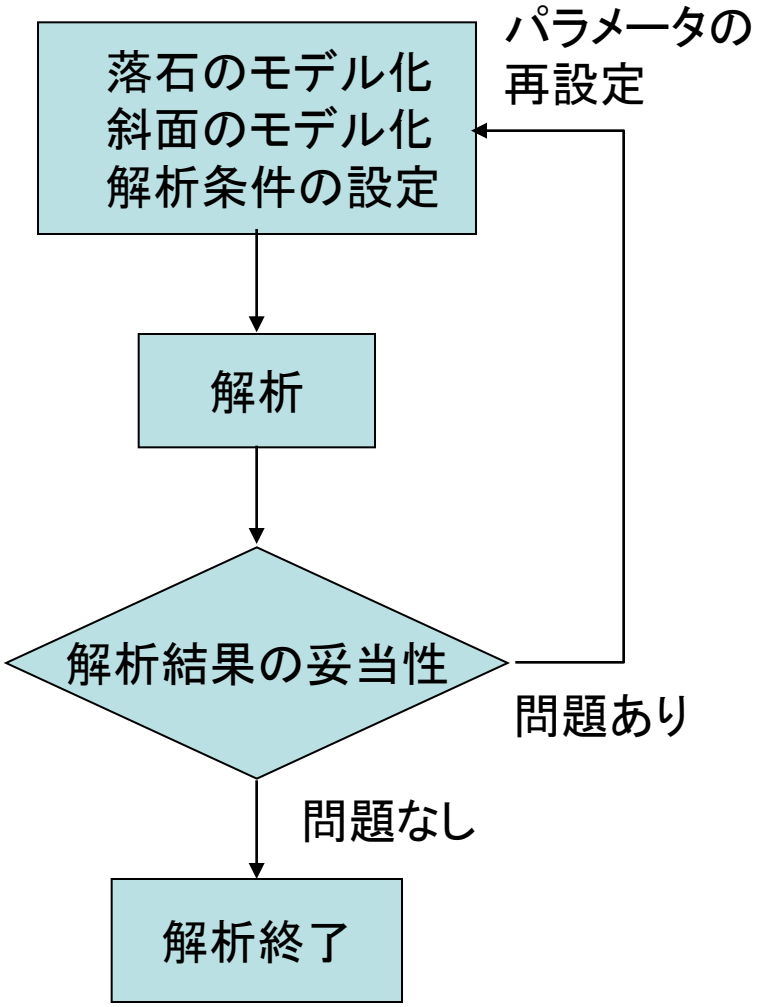


(b) 土居町，2000年

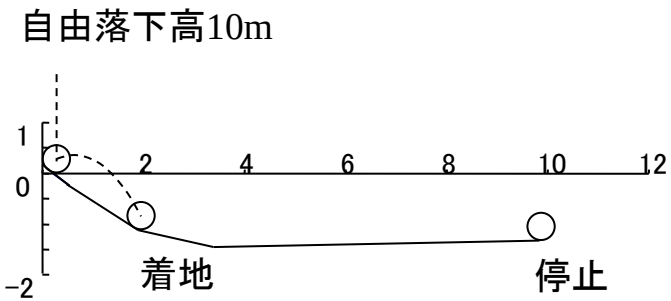
θ=20°

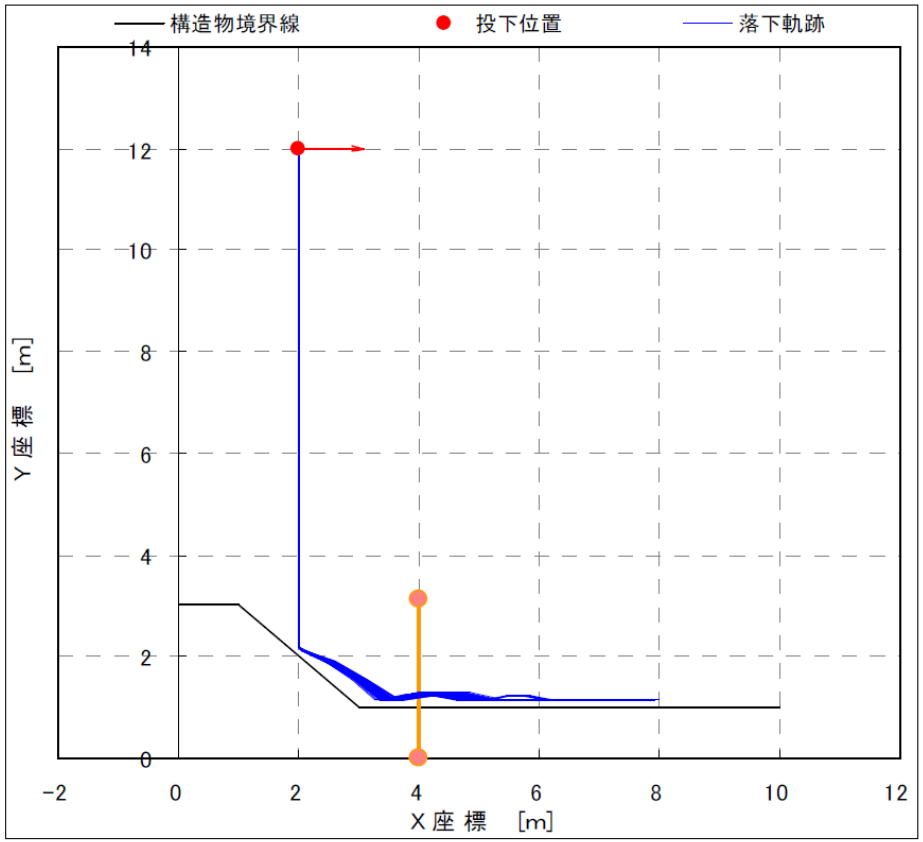
落石運動の予測手法

1. 経験則による方法
   ① すべり運動(等価摩擦係数)
   ② 跳躍量は2m
2. 質点系シミュレーション
   ① 吉田らの手法
   ② 古賀らの手法
   ③ 右城らの手法
   ④ 桝谷・小林らの手法
   ⑤ コロラド州の手法(CRSP)
   ⑥ トロント大学の手法(RocFall)
3. 非質点系シミュレーション
   ① 個別要素法(DEM)
   ② 不連続変形法(DDA)
4. 現場落石実験



シミュレーションに用いるパラメータの同定(1)

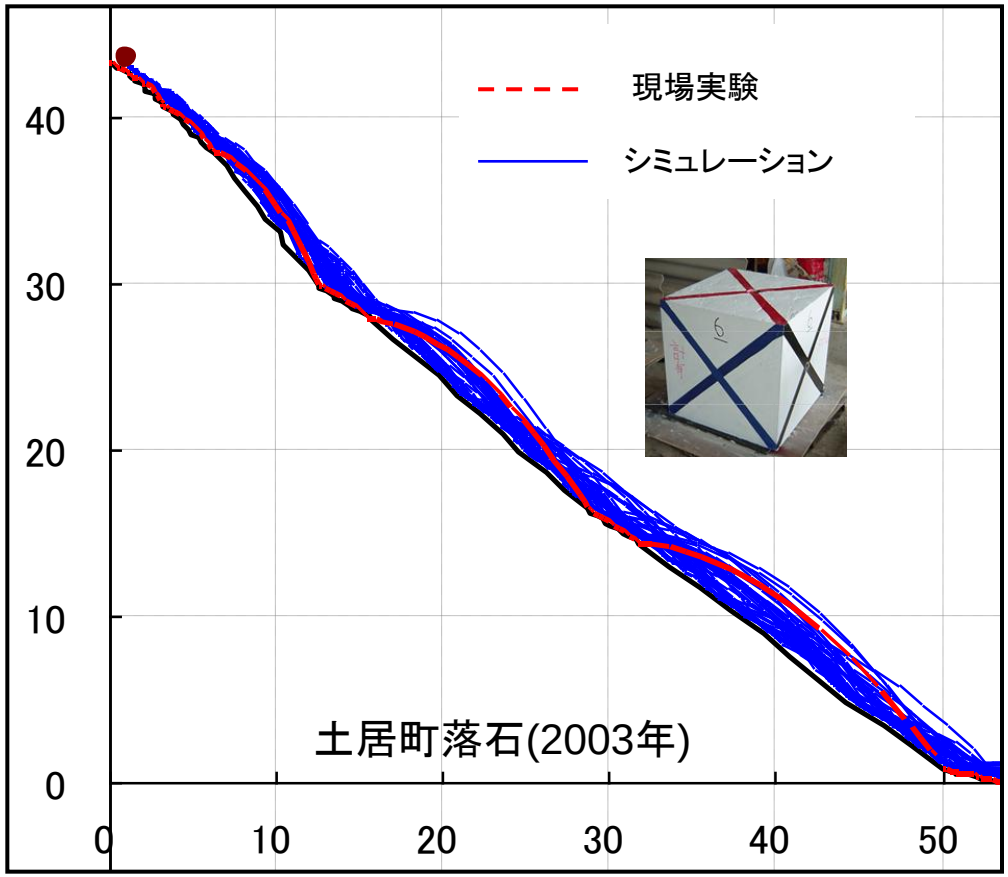


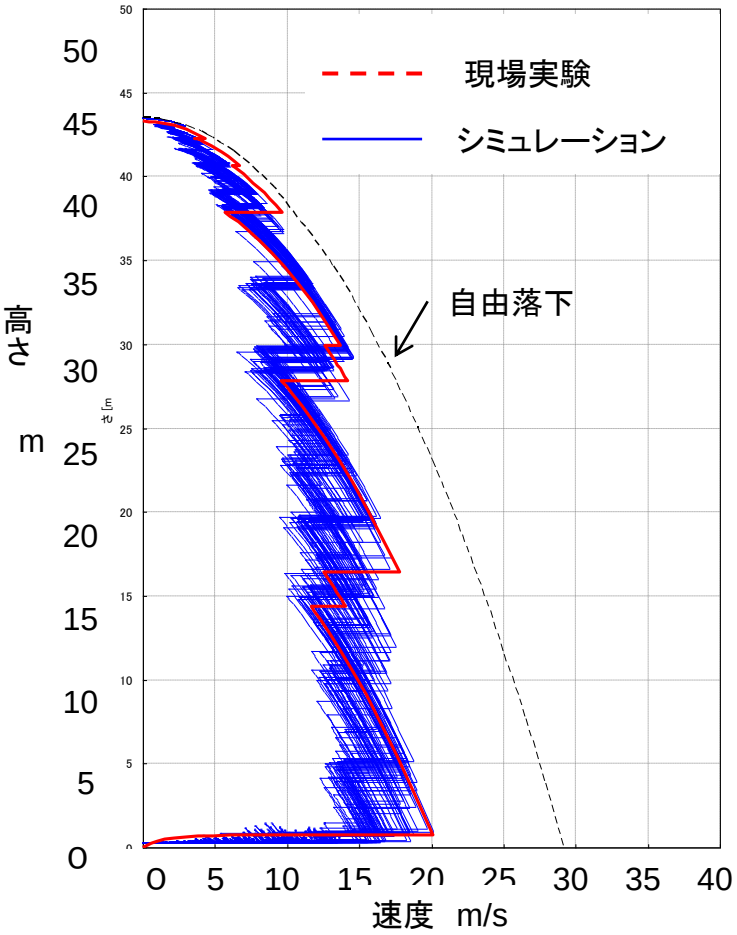


土居町実験(2003年)

シミュレーションに用いるパラメータの同定(2)

シミュレーション（300回）の結果は，投下実験40回の最大跳躍量2.48mを包絡する。



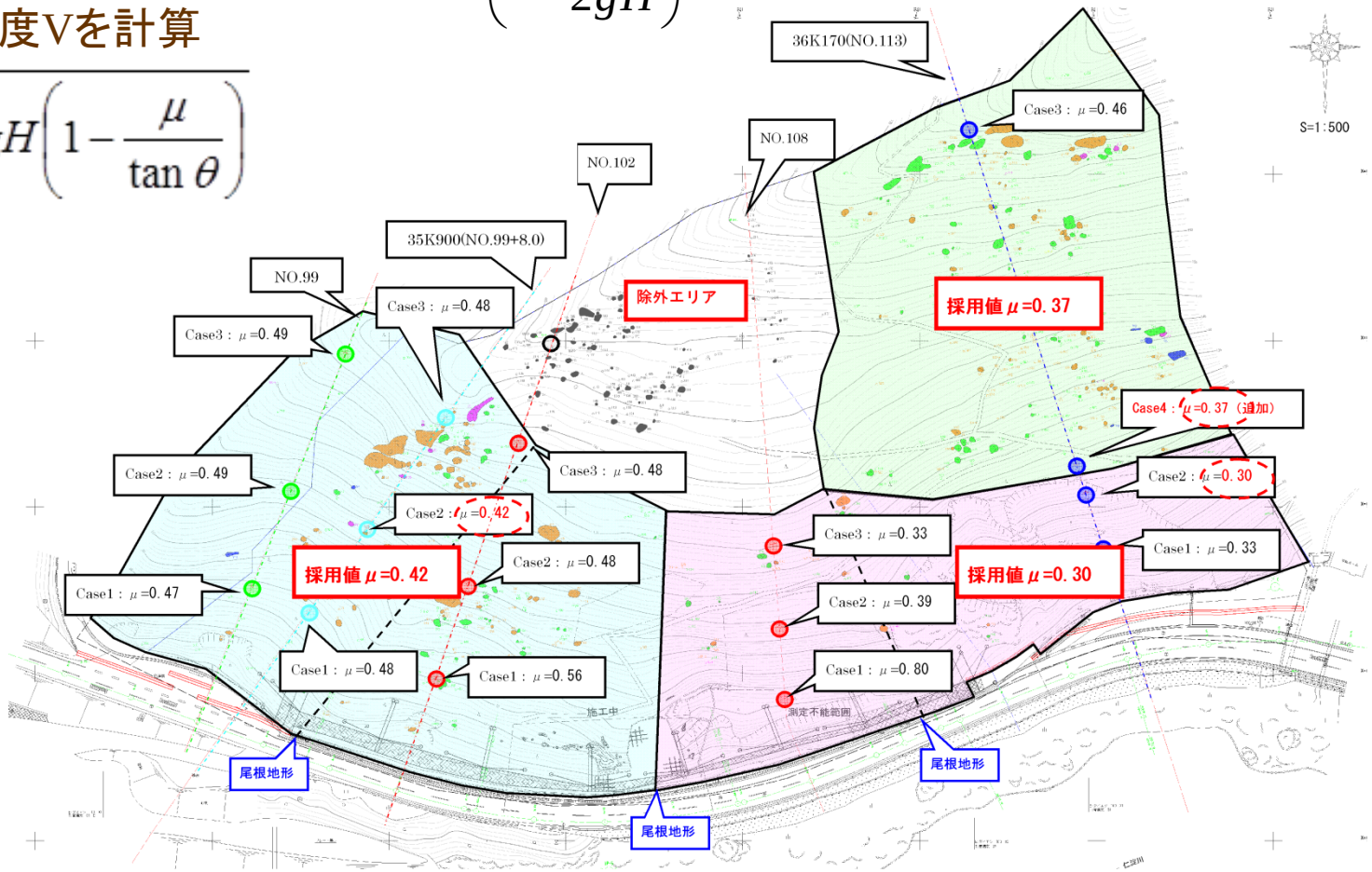


シミュレーション結果から逆算した等価摩擦係数

①シミュレーションで速度Vを算定
②エリア毎に等価摩擦係数μを決定
③μを用いて速度Vを計算

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right)\tan\theta$$

$$V = \sqrt{2gH\left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right)}$$



まとめ

1. 落石の運動はバウンド(衝突と飛行)が主体。
2. 落石の速度は自動車なみ(最大25m/s=90km/h)。
3. 落石現場の道路脇で逆算された等価摩擦係数は0.6～1.2。
4. 等価摩擦係数μは斜面固有の定数ではなく、落石の落下に伴って変化する。 $0 \le \mu \le \tan\theta$
5. 跳躍量の定義は明確でない。
6. 斜面勾配が急なほど着地速度と跳躍量が大きくなる。
7. 落下高40mで終端速度というのは不合理。
8. 落石の拡がり角は20～60度。
9. シミュレーション結果から逆算して求めた等価摩擦係数を用いて、落石の速度や運動エネルギーを推定するのが現実的。