

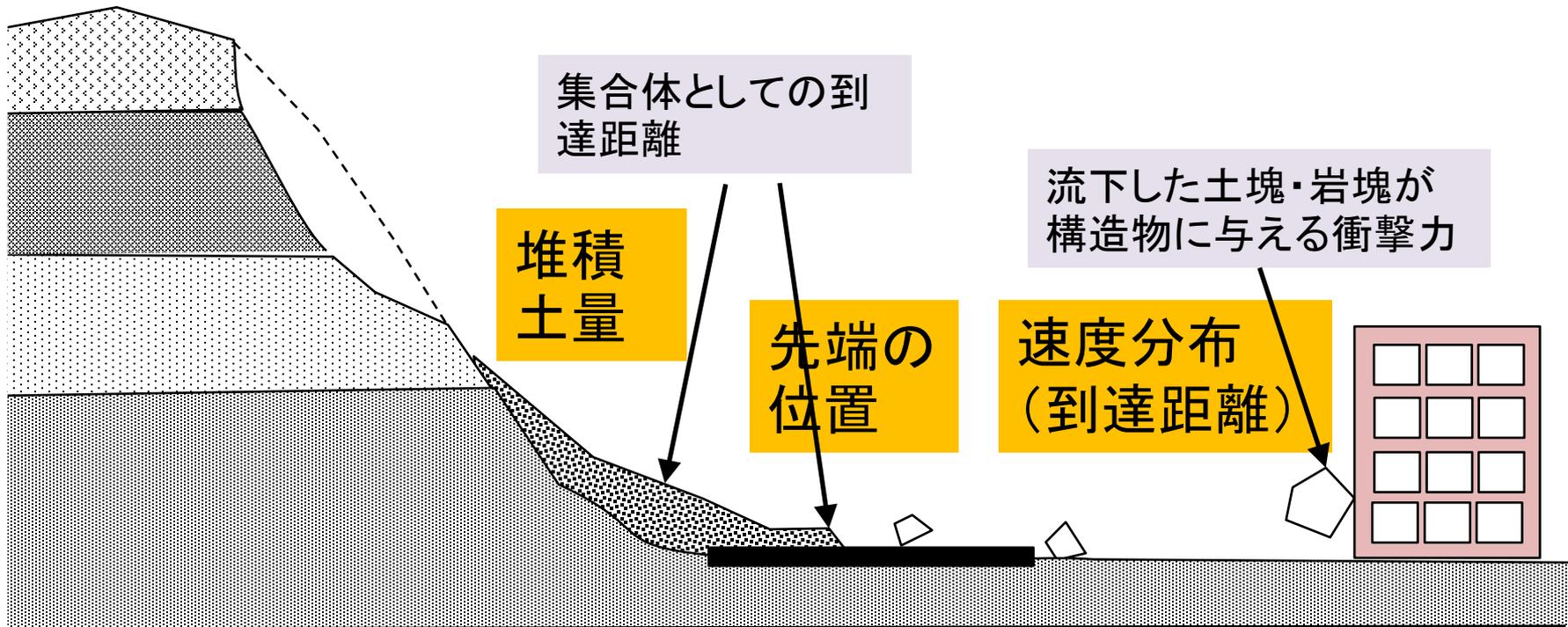
個別要素法に関する検証と 妥当性確認

東電設計 中瀬仁

土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価小委員会

斜面崩落影響評価WG (PRAの枠組み：確率分布ベースの評価)

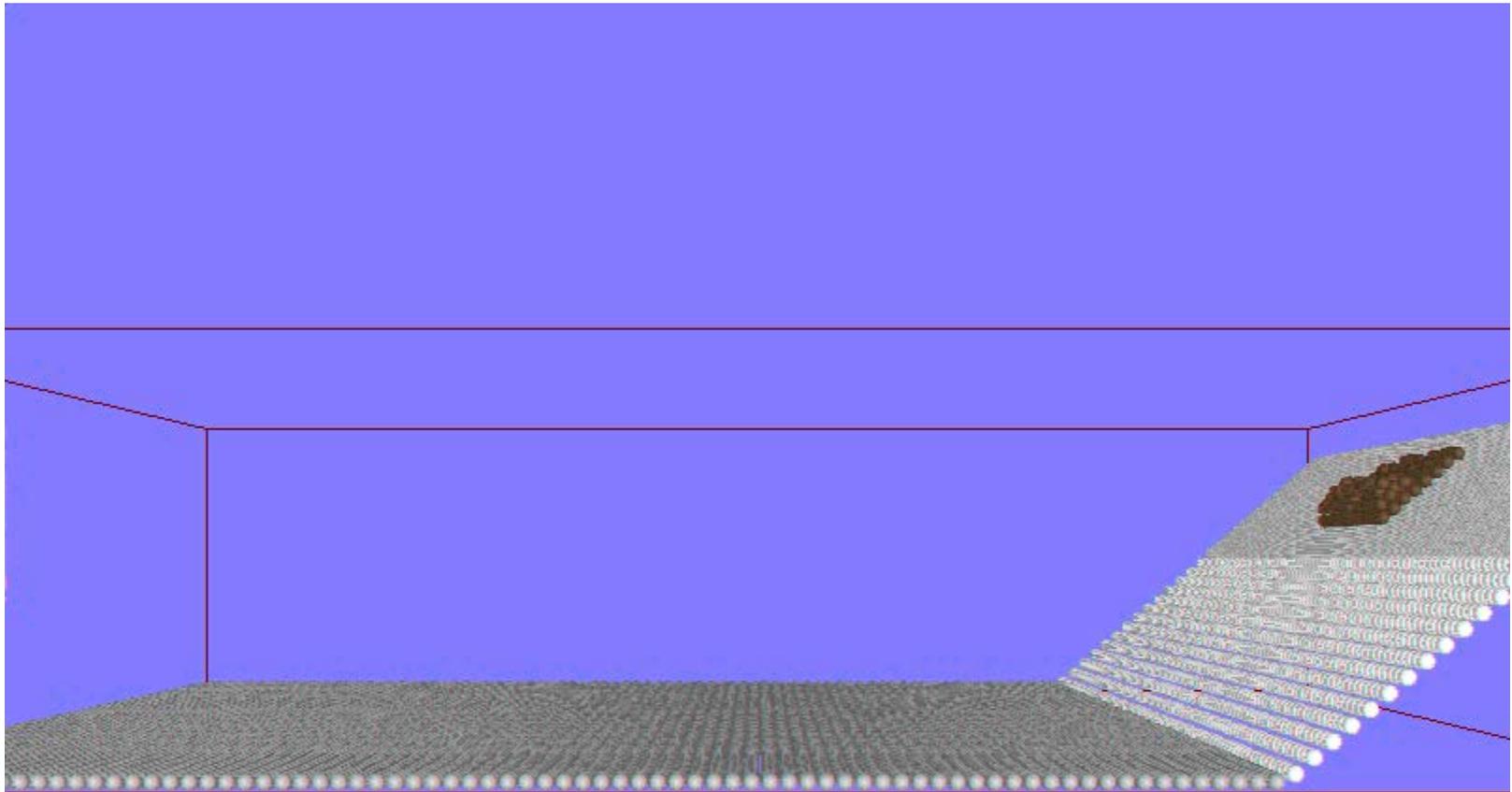
設計外力を超えた
場合の挙動評価



着目する現象・指標

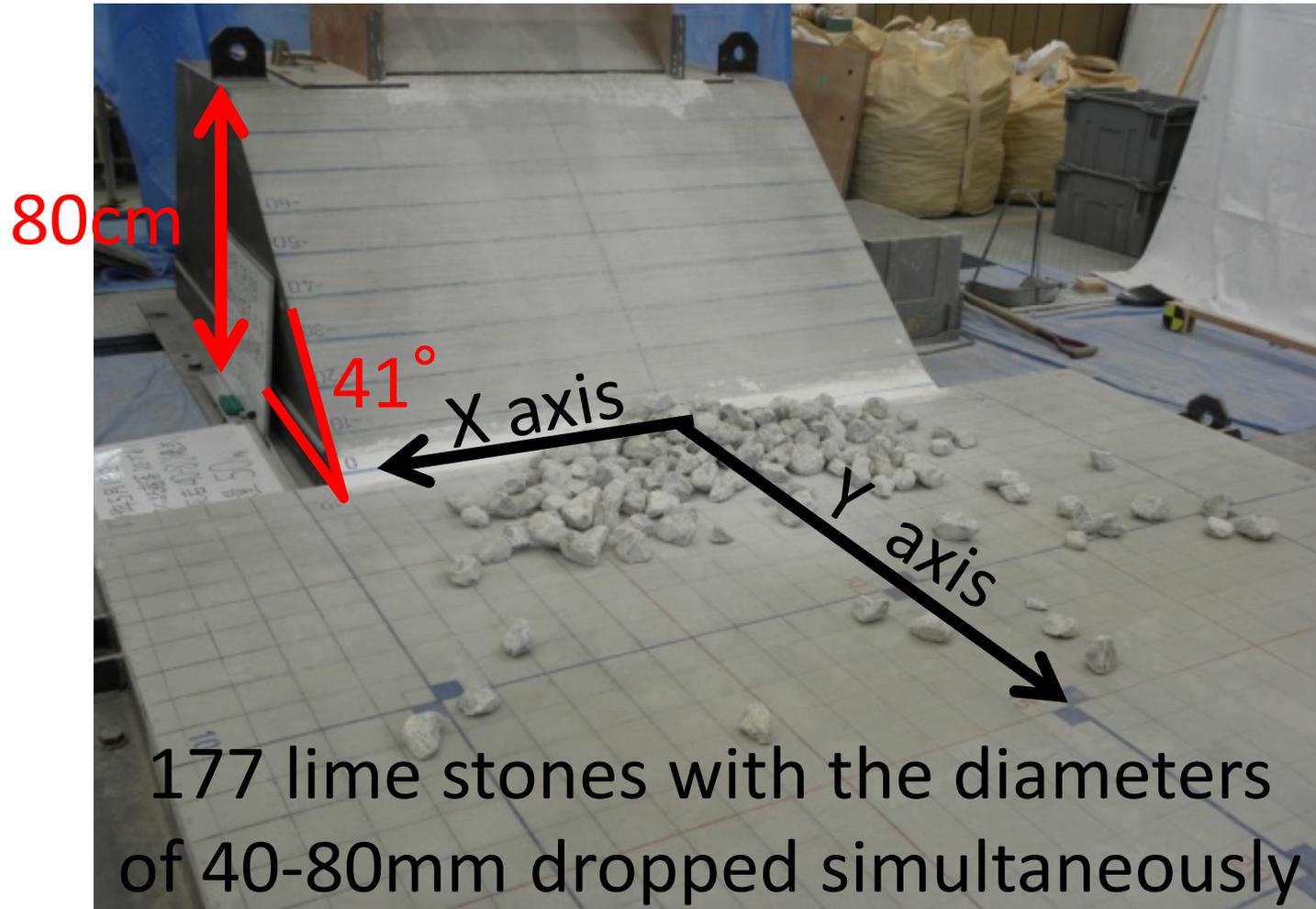
Reality of interest

個別要素法による簡易モデル



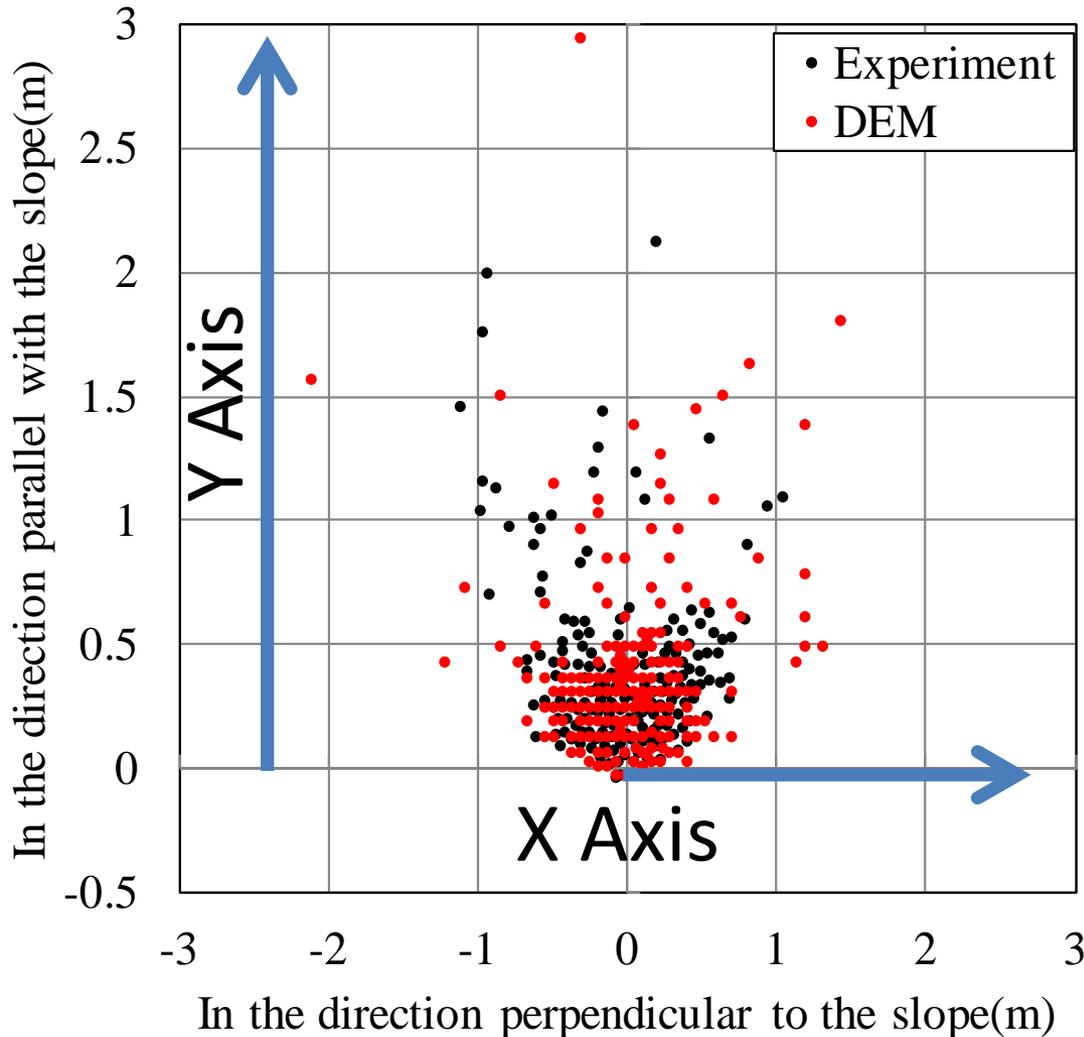
time= 0.00000 (sec.)

Validation of the model



Target: Rock drop test

Comparison of distributions of stopped rock positions by experiment and simulation

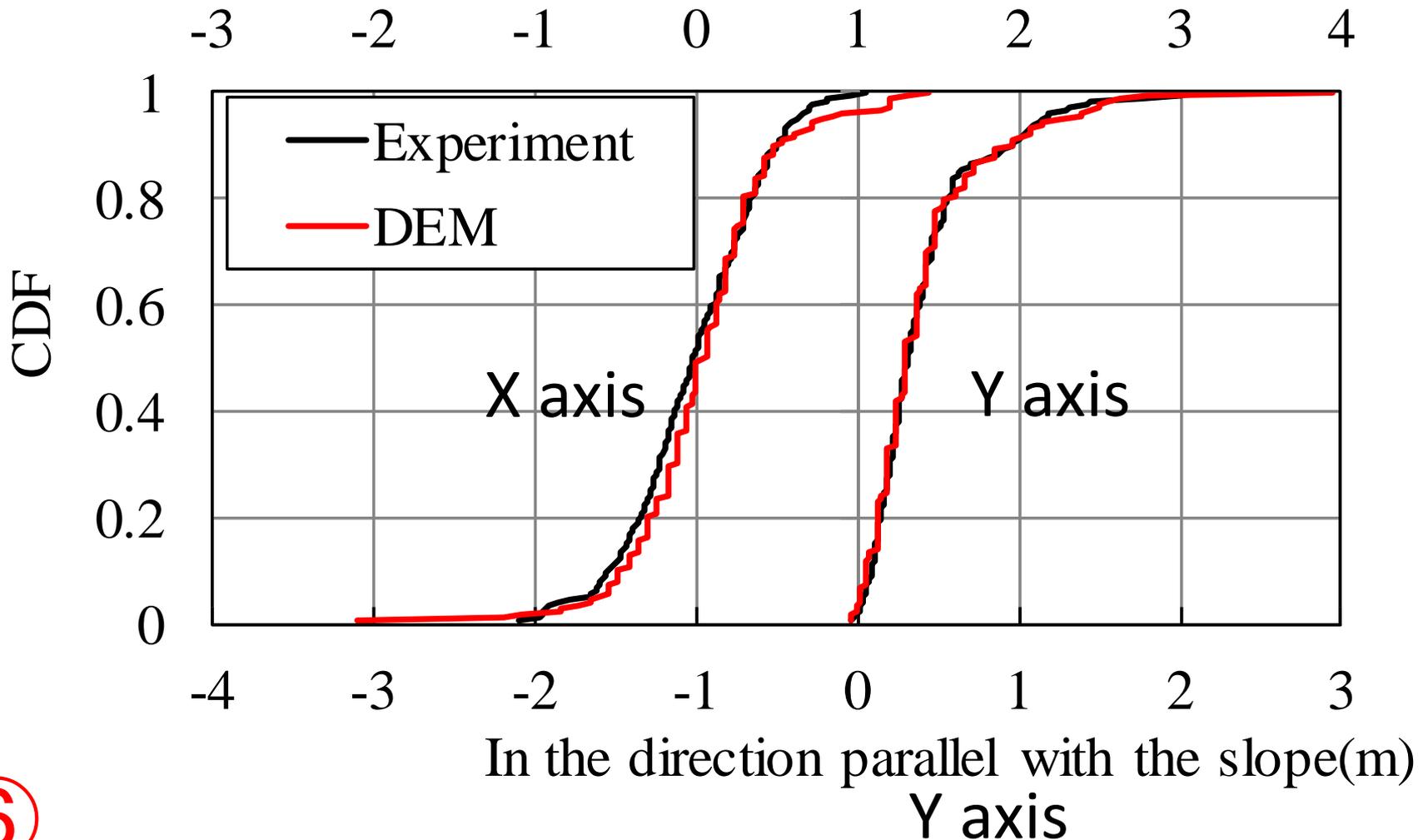


Black points are experiment and red points are dem.

Of course they are not corresponding with one by one accurately, but the range of distribution generally correspond.

Comparison of cumulative distributions of stopped rock positions

X axis In the direction perpendicular to the slope



モデル

モデル化すべき項目

- 岩塊の形状
- 岩塊の物性
- 斜面,底面の凹凸
- 斜面,底面の物性 (コンクリート, 表土, アスファルト)

適用範囲

- 単相(間隙水の影響なし)

モデル

モデル化の方法

M1: 岩塊の形状->球要素を直径間隔に配置

M2: 岩塊の物性+斜底面の物性->反発係数と摩擦係数

M3: 斜面,底面の凹凸->球要素を忠実に配置

	検証 (Verification)	妥当性確認 (Validation) -> ユーザ
要素モデル (材料特性)	Code Ver. -> プログラマ ① アルゴリズムが正しいか Calculation Ver.->ユーザ ①' 離散化が正しいか	②
全体系モデル (線形)	Code -> ③ Calculation->③'	④
全体系モデル (非線形)	Code -> ⑤ Calculation->⑤'	⑥

- A 理論との比較 -> ①' ③' ⑤'
- B 時間間隔やメッシュサイズと誤差の関係の調査, エネルギー収支-> ①' ③' ⑤'
- C 検証の済んだ他のプログラム結果との比較 -> ① ③ ⑤ ①' ③' ⑤'
- D 創成解->① ③ ⑤ ①' ③' ⑤'
- E 要素試験との比較②
- F 弾性材料(範囲)の模型実験, 観測結果との比較④
- G 非線形の模型実験, 観測結果との比較との比較 ⑥
- H 実被害との比較-> ⑥

Uncertainty Qualification 私見

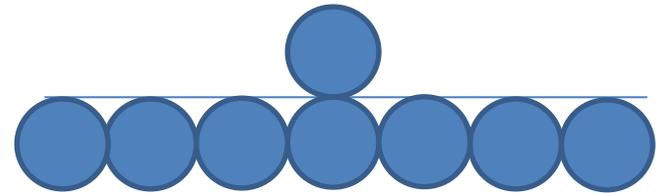
- U1 実験・観測値のばらつきを参照する(材料試験, 模型, 実被害)
- U2 要素モデルのV.V.の不確かさに対して取り得る範囲内で複数のシミュレーション検討を実施しその応答値のばらつきを把握する
- U3 入力の不確かさに対して複数のシミュレーション検討を実施しその応答値のばらつきを把握する
- U4 異なるモデル間, 計算手法間の応答値のばらつきを把握する

...

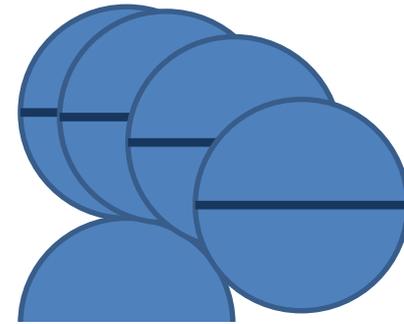


Verification

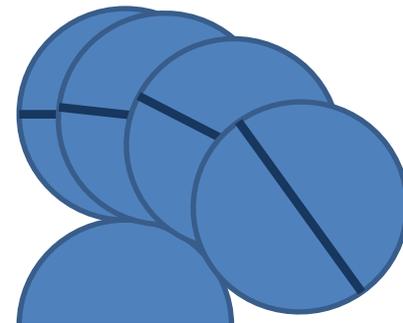
Bounce



Slippage



Rotation



反発実験

岩球, 直径10cm



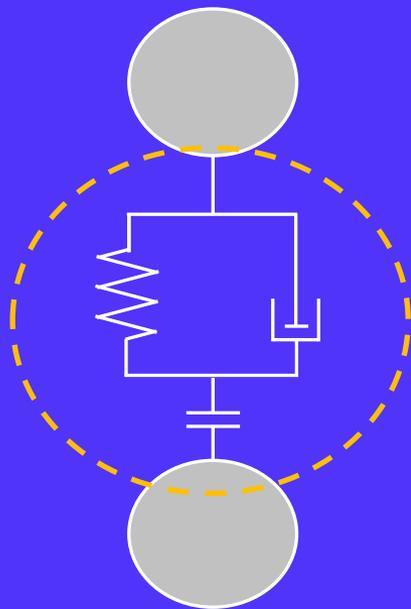
反発係数=0.6



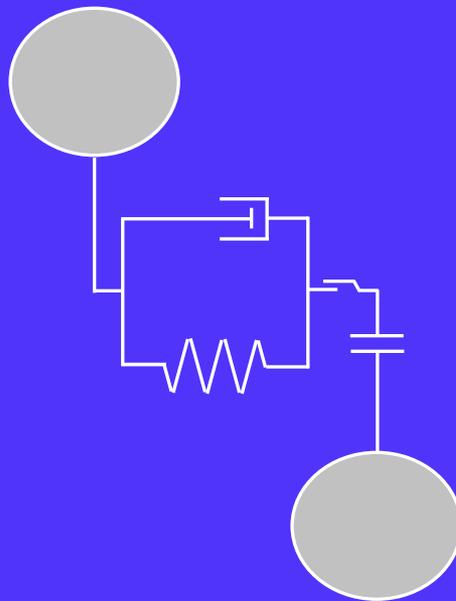
反発係数=0.45

変動係数0.2程度

DEMの接触モデル



法線方向



接線方向

—— : バネ, K

—— : ダッシュポット, C

—— : スライダー

—— : no tension
ジョイント

理論式

$$c = hc_{cr} = h \cdot 2\sqrt{mK} = 2\sqrt{mK} \left(-\frac{\ln e_r}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e_r)^2}} \right)$$

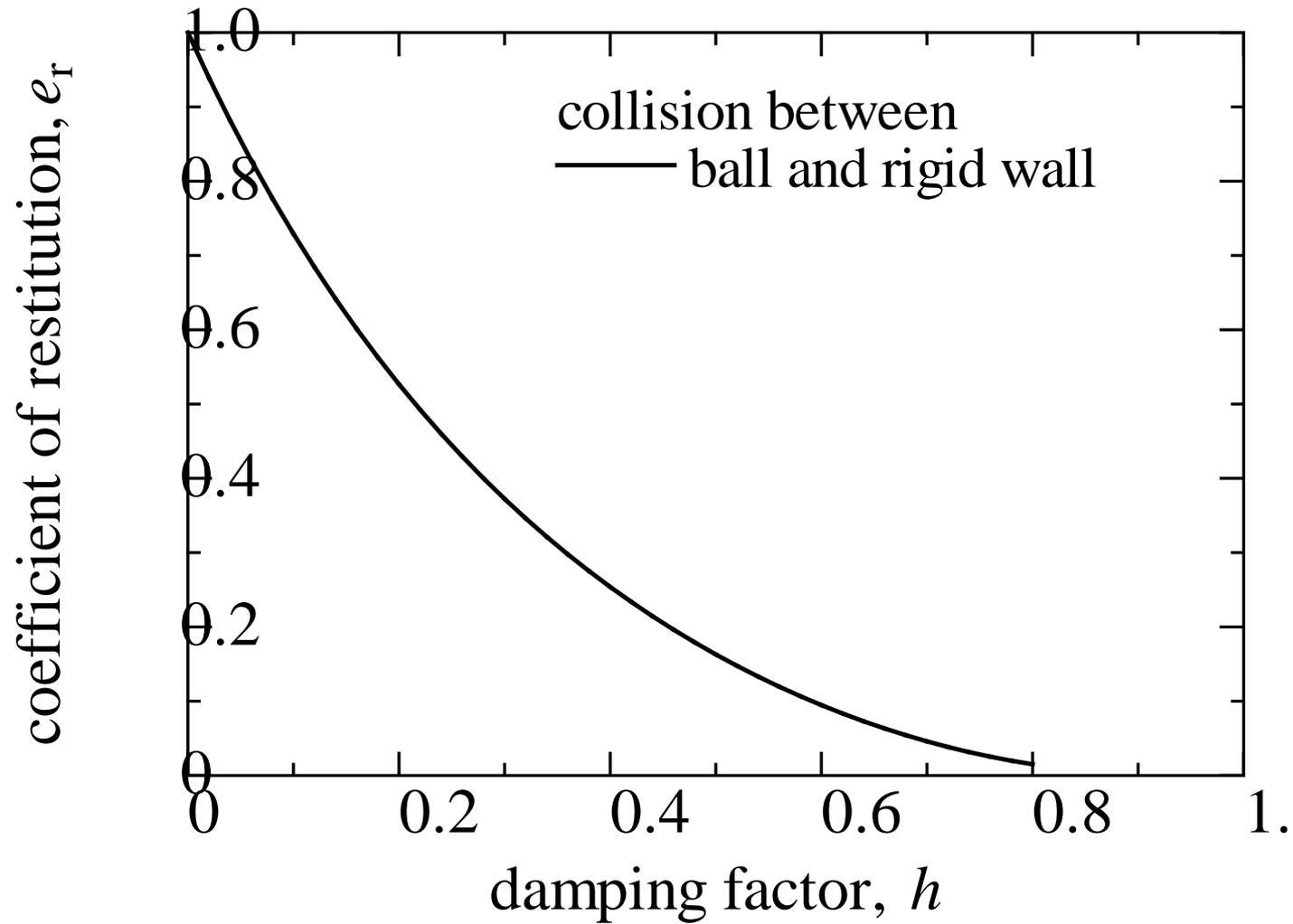
e_r : 反発係数

c : 粘性減衰係数

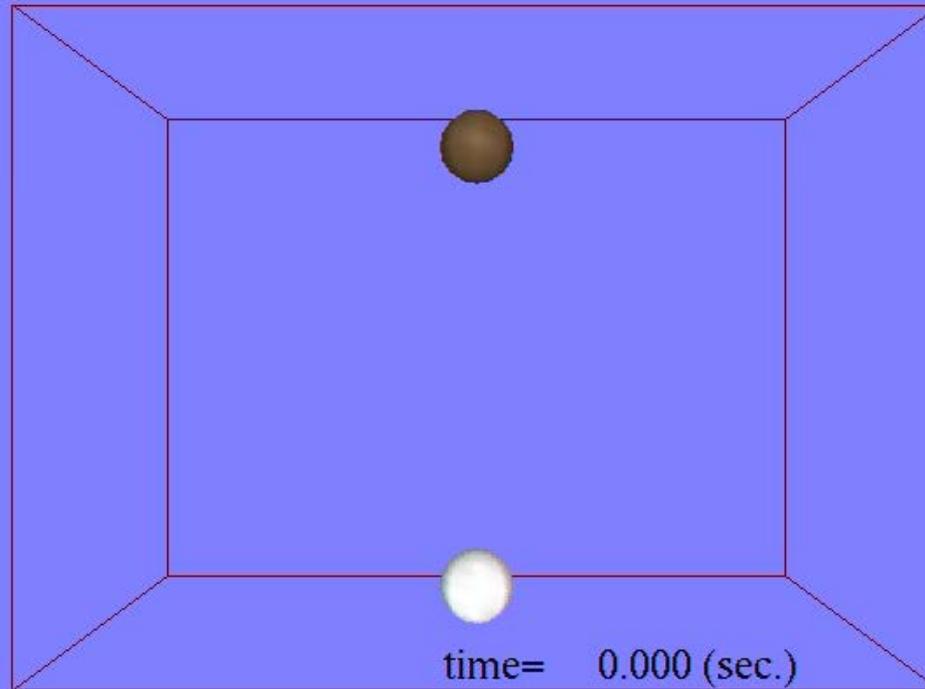
h : 粘性減衰定数

m : 質量

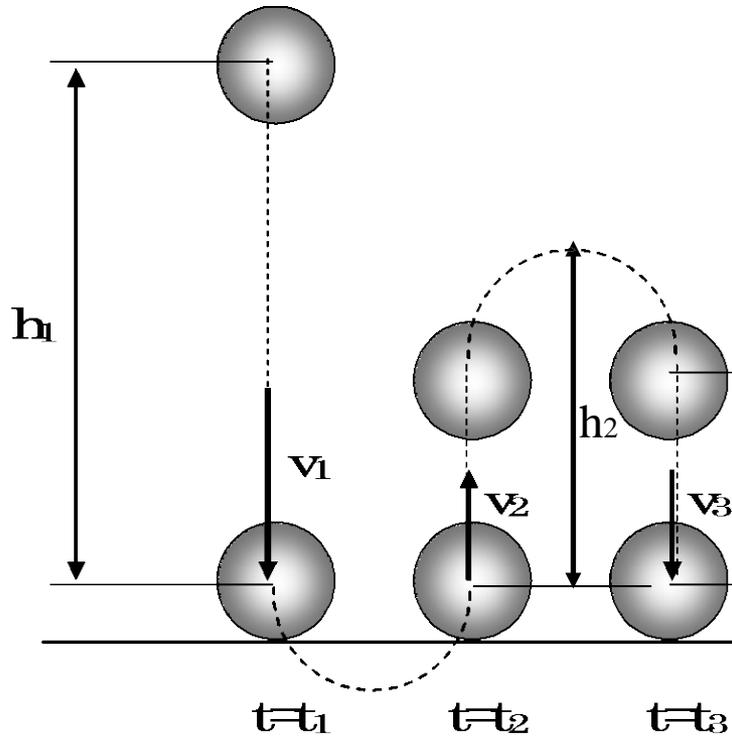
K : ばね係数



反発係数0.445



Verification to Bounce



$$R = v_2/v_1 = (h_2/h_1)^{0.5} \quad (1)$$

R: Coefficient of restitution

v_1 : Velocity at the moment before the collision

v_2 : Velocity at the moment after the collision

h_1 : Initial height

h_2 : Bounce height

Table 1 Target coefficient of restitution and analysis parameters

Target coefficient of restitution	Element mass (kg)	Spring coefficient (N/m)	Viscous damping coefficient (N·s/m)
0.250	8.78kg	3.67×10^7	1.45×10^4
0.445	8.78kg	3.67×10^7	8.96×10^3

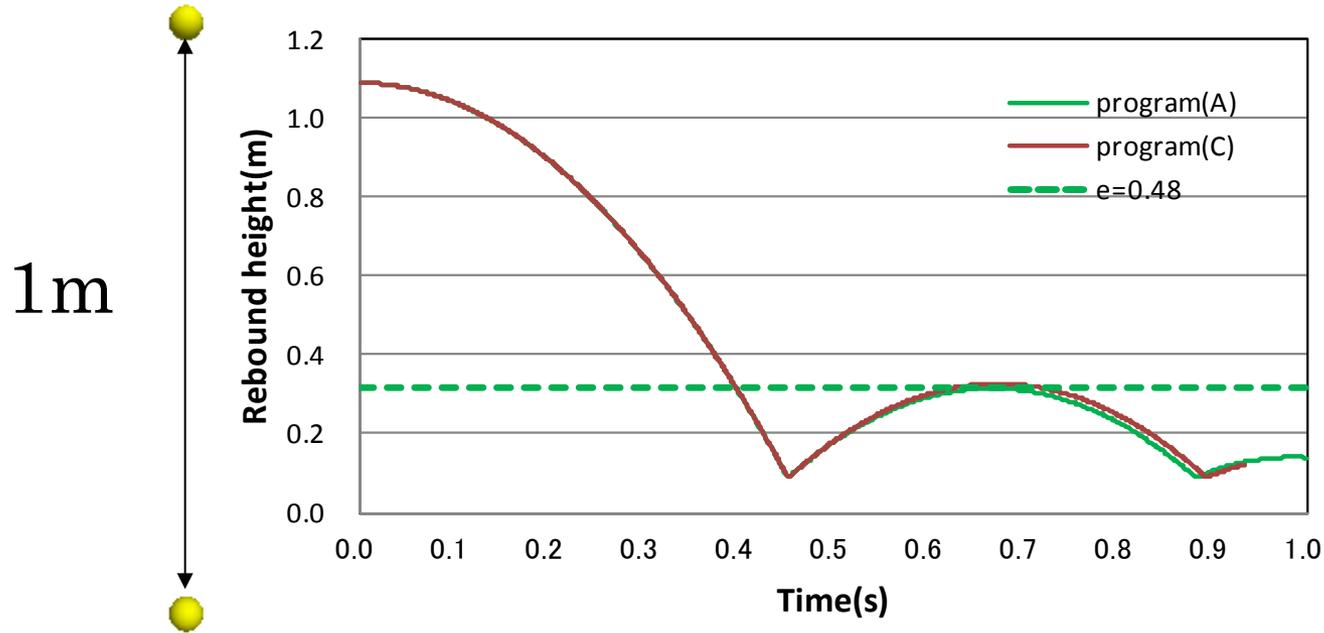
Table 2 Experimental results

Targets	results
0.250	0.249
0.445	0.445

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

手法の検証

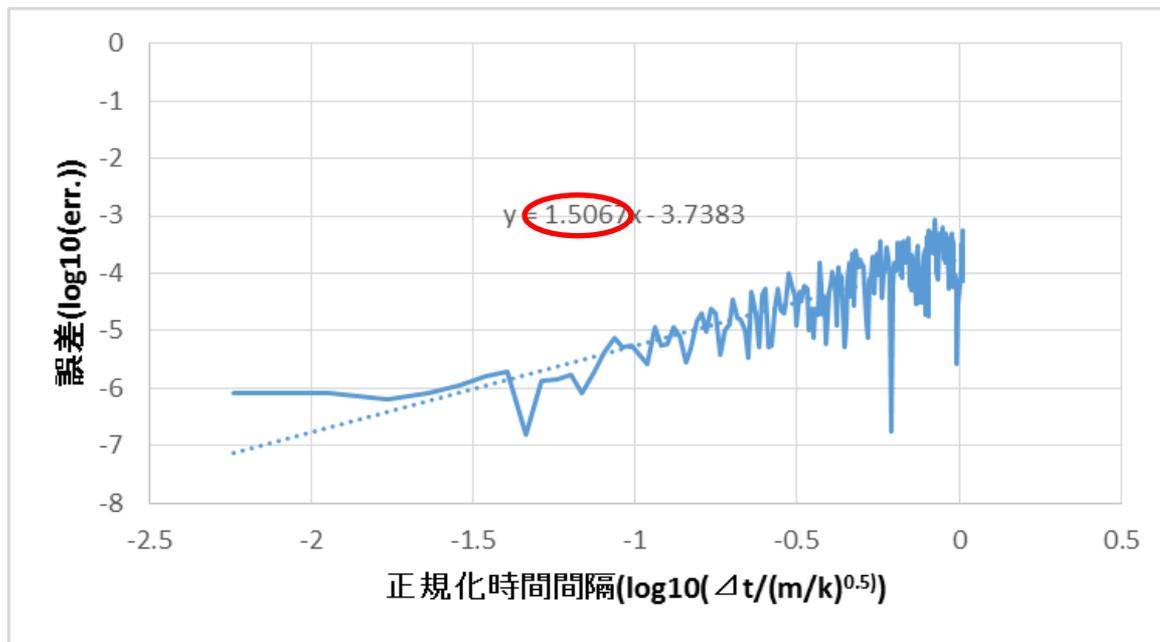
—反発—



最大反発係数	0.39	0.48	0.54
	シミュレーション結果(誤差)		
program(a)	0.372(4.7%)	0.475(1.0%)	0.532(1.5%)
program(b)	0.372(4.7%)		0.533(1.3%)
program(c)	0.381(2.3%)	0.487(1.5%)	0.542(0.4%)
program(d)	0.371(4.8%)		0.532(1.5%)

時間離散化に対する収束性について

反発係数1のシミュレーションの誤差



計算の時間間隔
 $\Delta t = \alpha \times (m/k)^{0.5}$

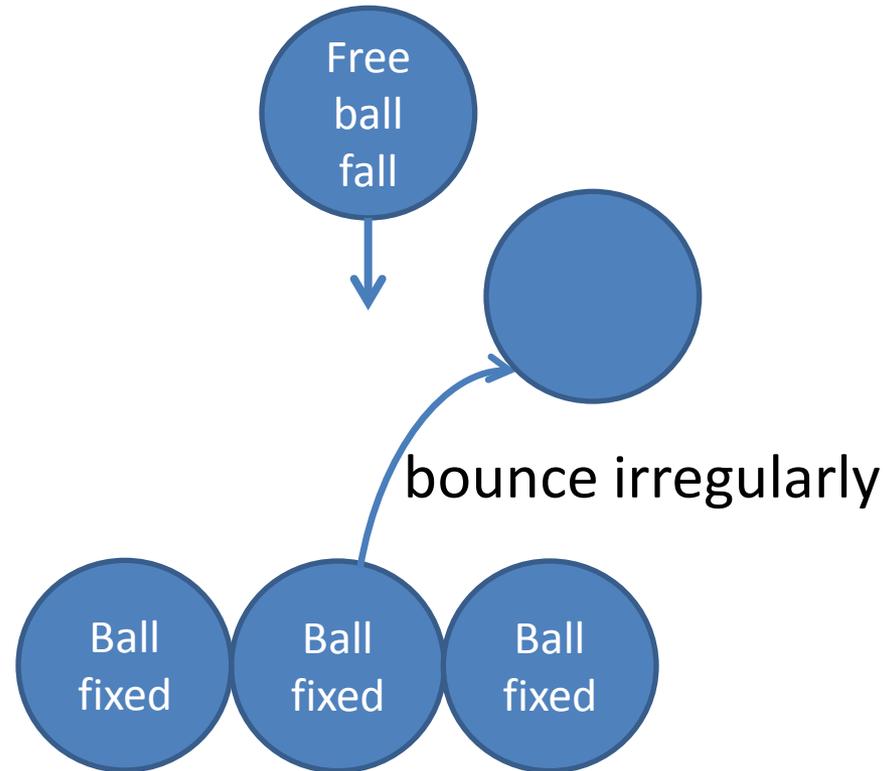
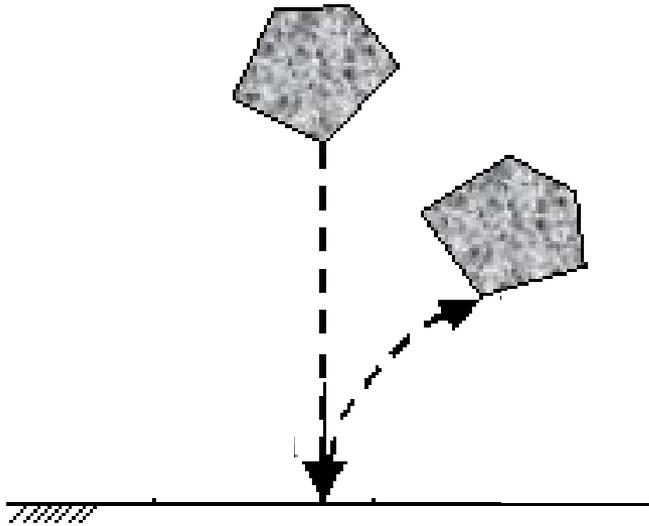
横軸: $\text{Log}_{10}(\alpha)$

時間積分は LEAP FRAG法なので離散化の次数は1.5次

筆者は, $\alpha < 0.3$ としている
反発係数が小さい程誤差が大きくなる

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

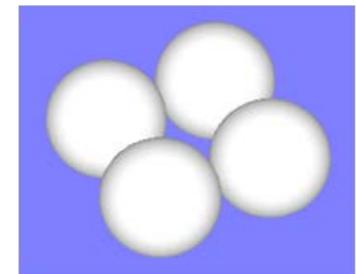
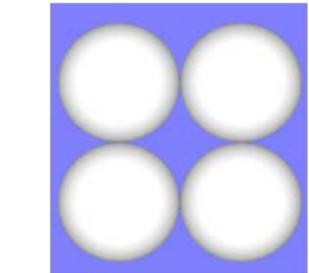
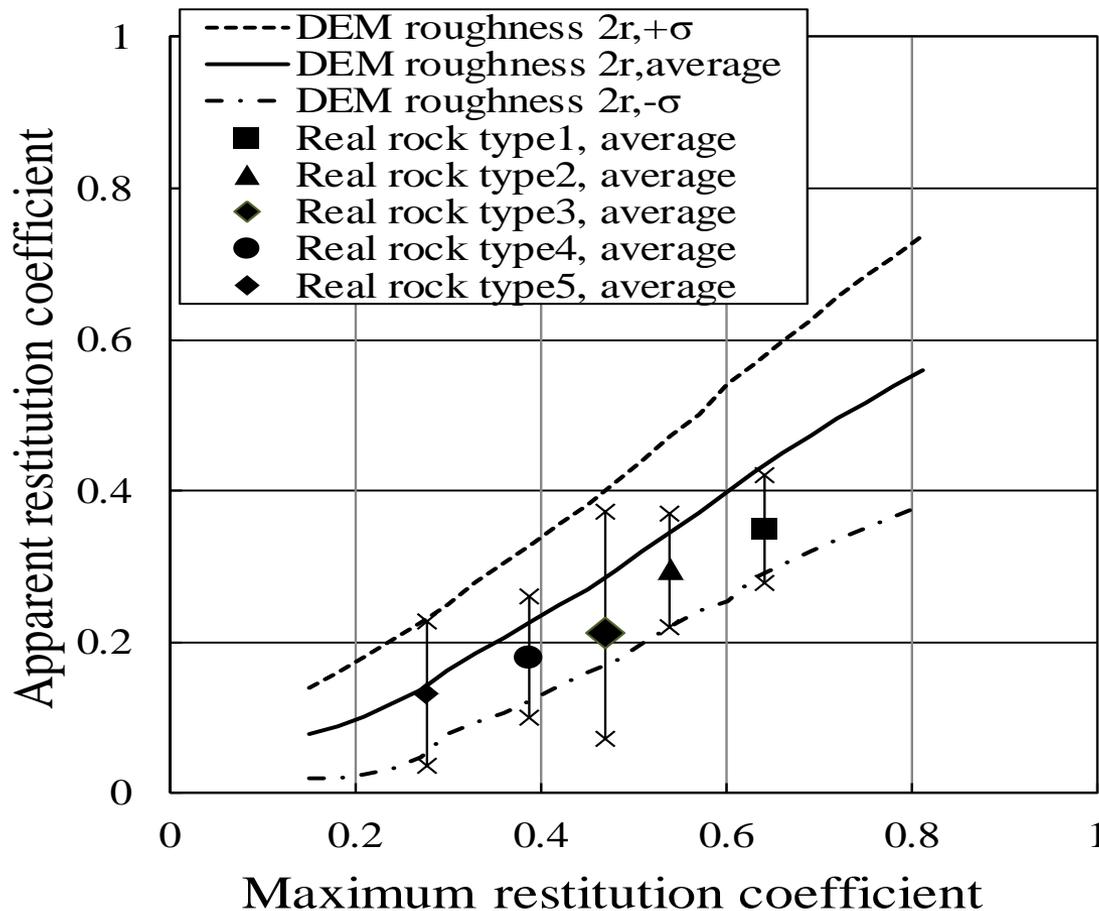
The model of single bounce



Irregular bounces of a real rock mass can be expressed by the impaction in spherical surface.

(We used fixed ball which size is as same as free ball)

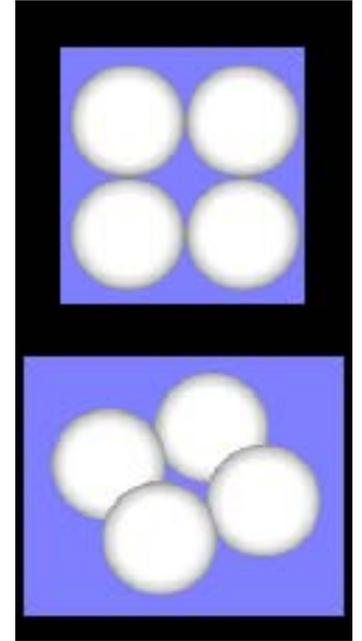
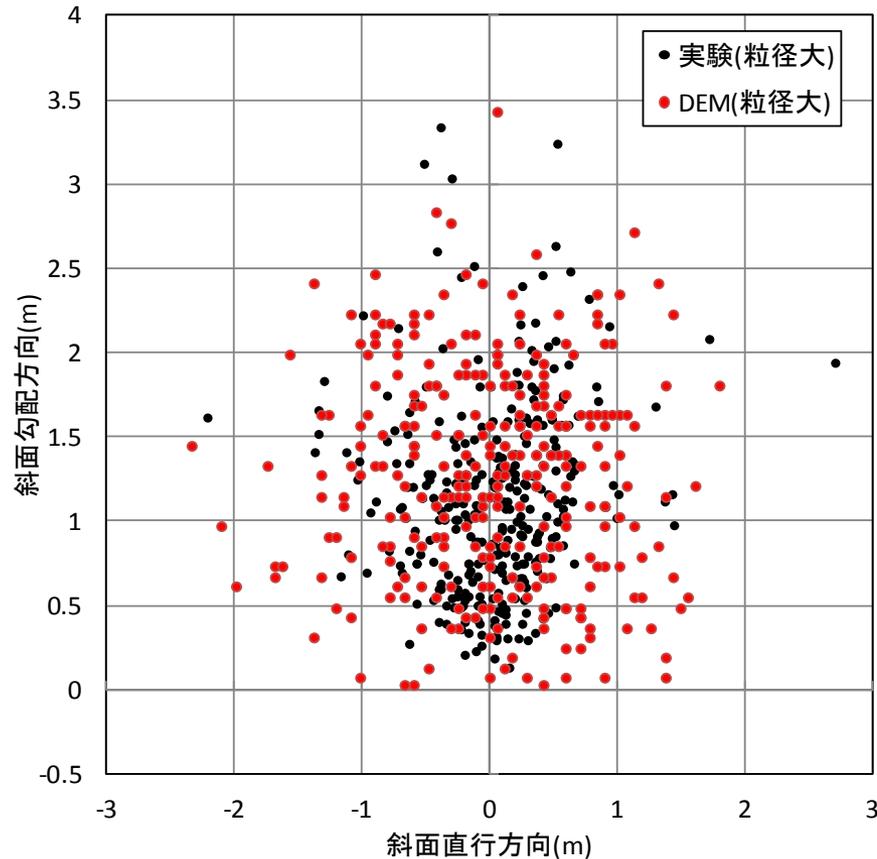
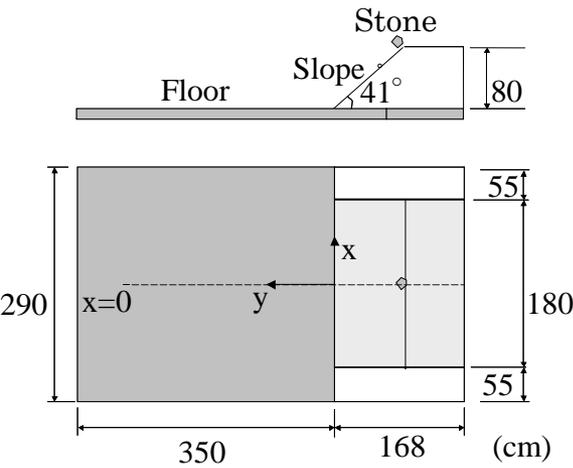
The relationship between maximum restitution coefficient and apparent restitution coefficient



	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

斜面落石実験の再現解析

単体落下n=300, 直径の間隔

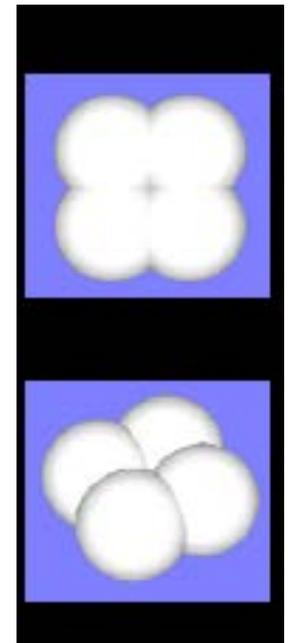
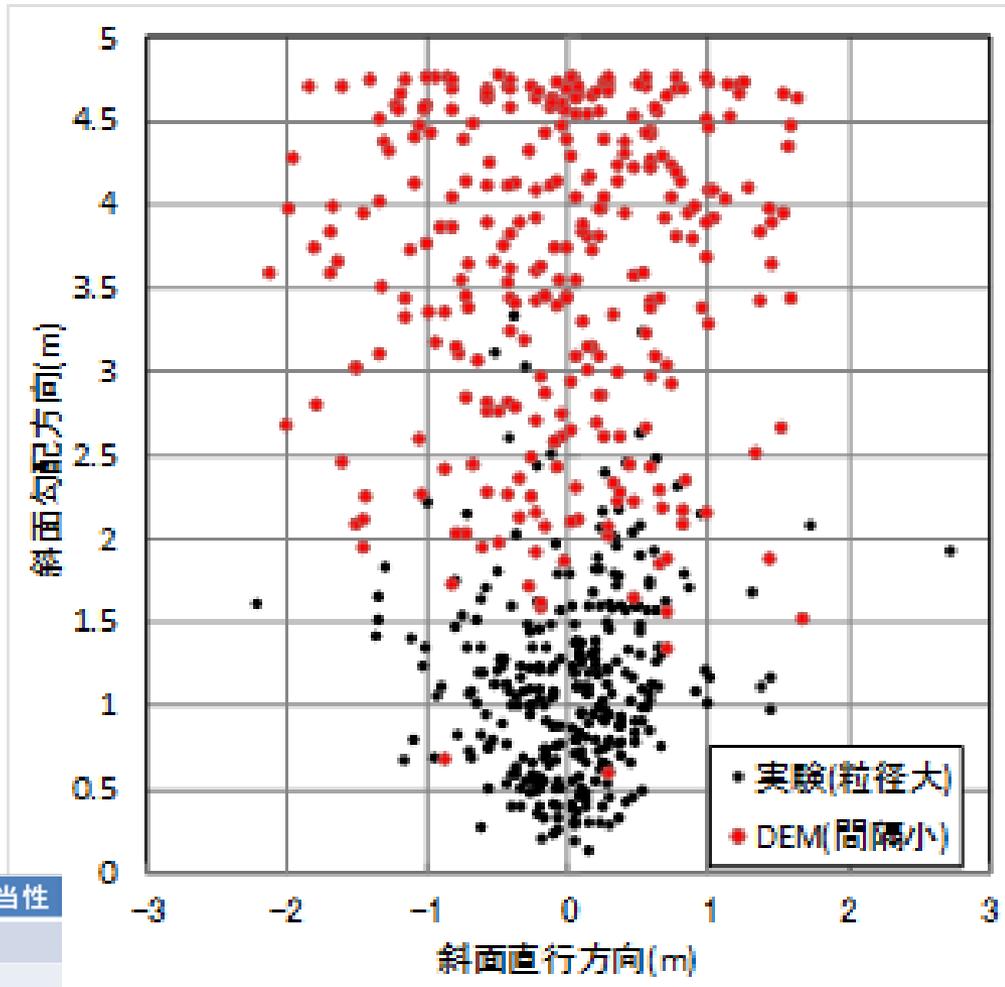


岩塊の到達位置の分布の比較

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

斜面落石実験の再現解析

単体落下n=300, 直径の間隔



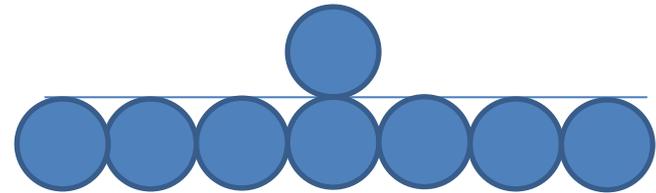
	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

岩塊の到達位置の分布の比較

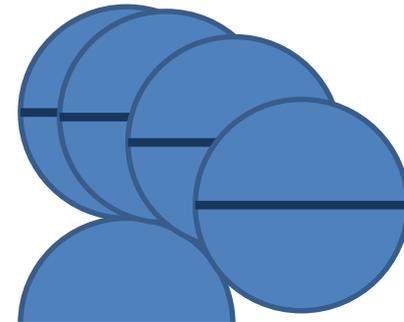


Verification

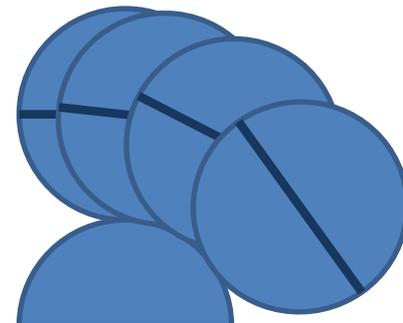
Bounce



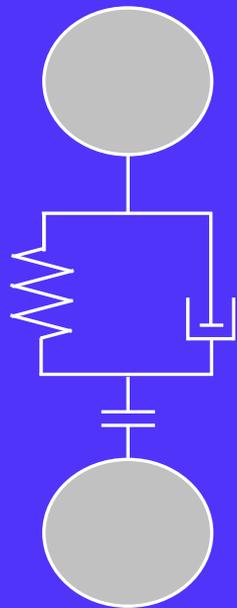
Slippage



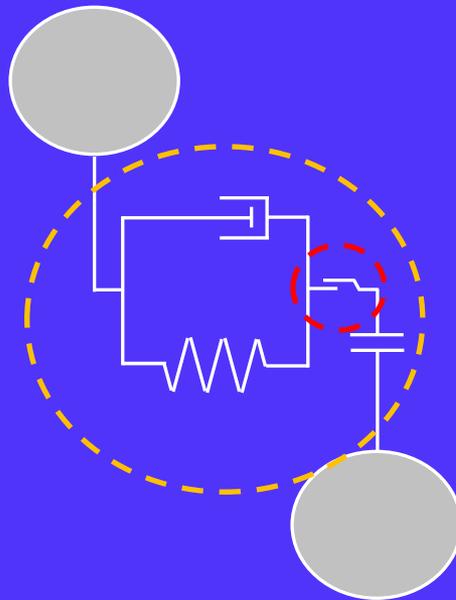
Rotation



DEMの接触モデル



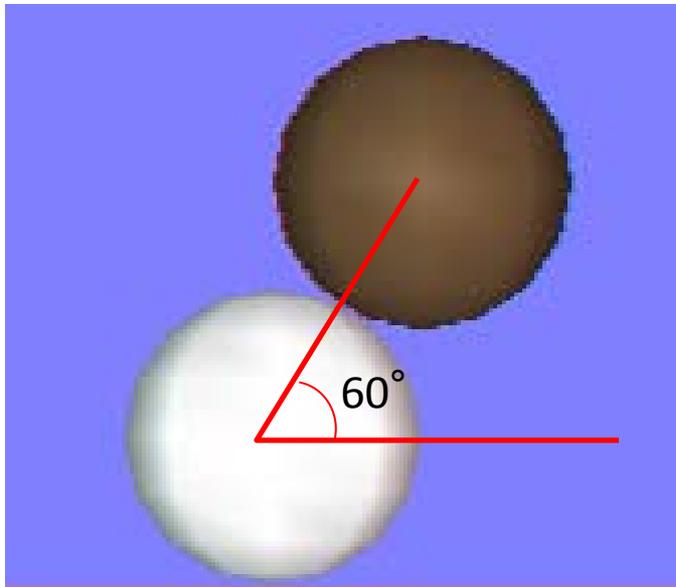
法線方向



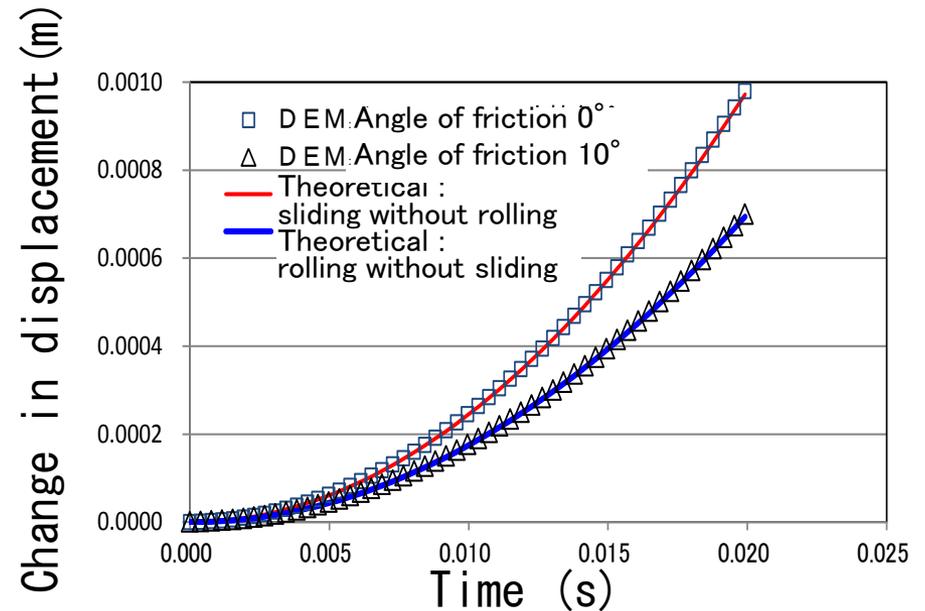
接線方向

- — : バネ
- — : ダッシュポット
- — : スライダー
-  : no tension
ジョイント

Verification to slippage and rotation



Initial condition of analysis:
Brown element comes in
contact with the fixed



Results of the rotate and slip simulation

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

完全弾性衝突(まさつ0)

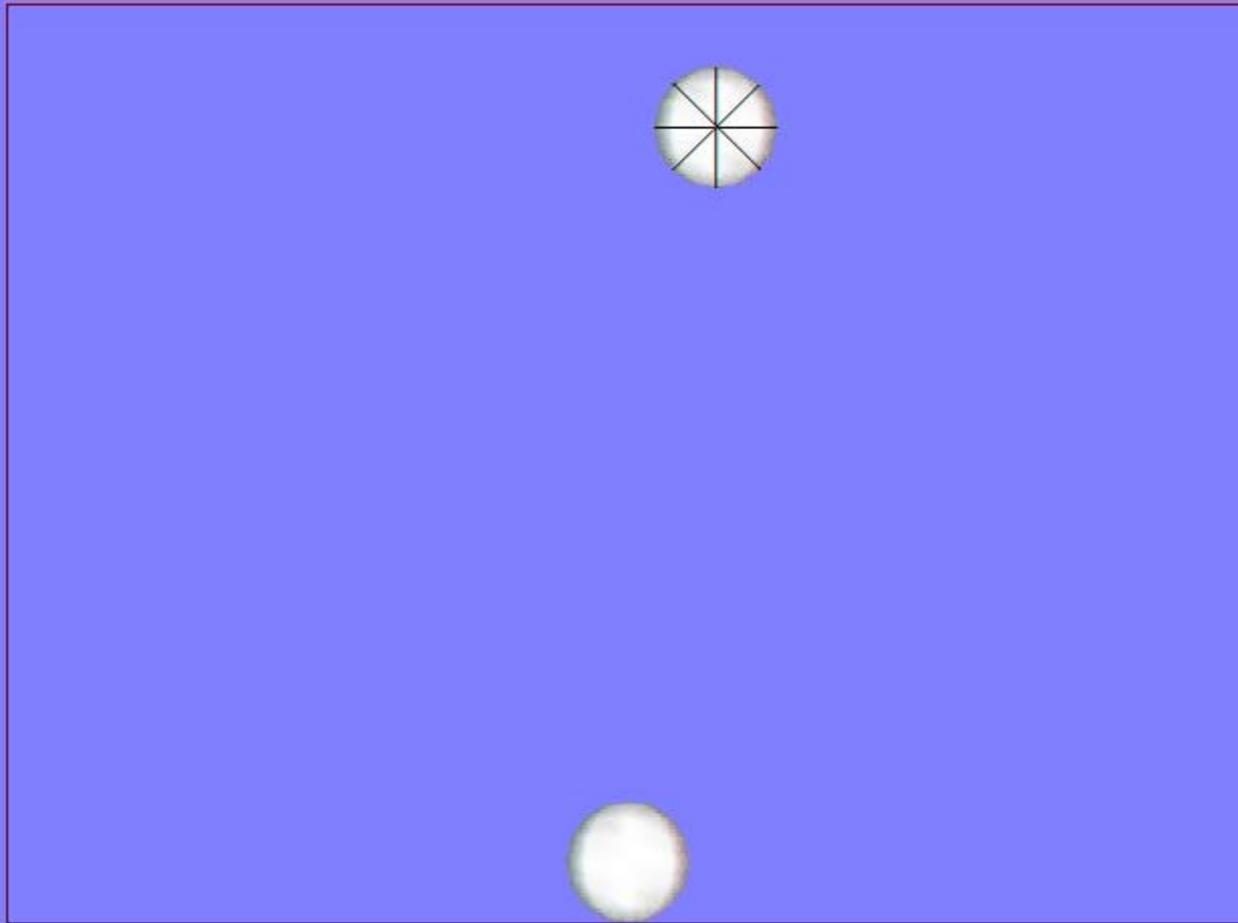
固定球右45°の地点に衝突させる

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

衝突前後で鉛直方向の速度 v が0となり水平方向に速度 v が発生していることを確認

time= 0.000 (sec.)

摩擦有



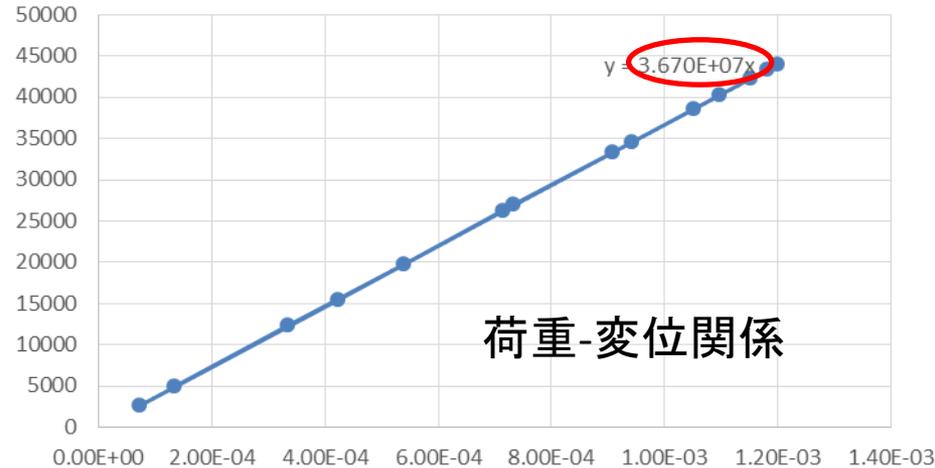
time= 0.000 (sec.)

Code Verification

「摩擦有」接触している間所定の作用力が発揮されているか

法線方向

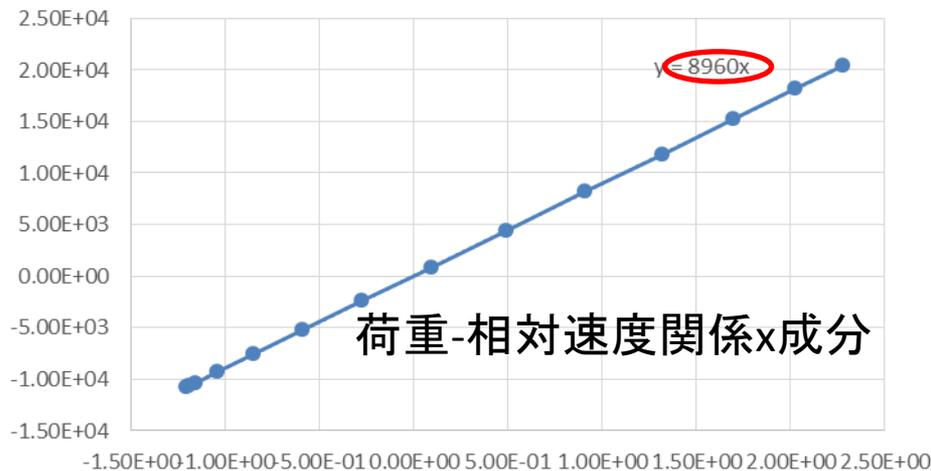
Un-Fkn



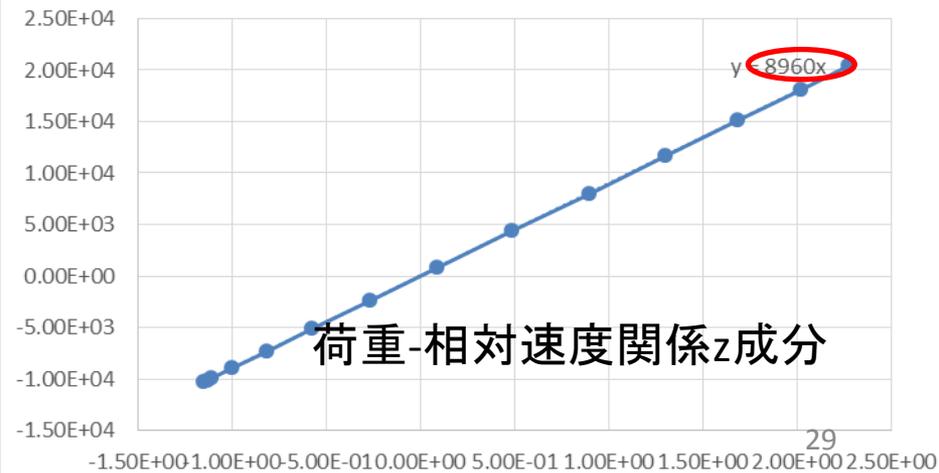
	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

Target coefficient of restitution	Spring coefficient (N/m)	Viscous damping coefficient (N·s/m)
0.445	3.67×10^7	8.96×10^3
	バネ係数	粘性減衰係数

vn1-Fcn1



vn3-Fcn3

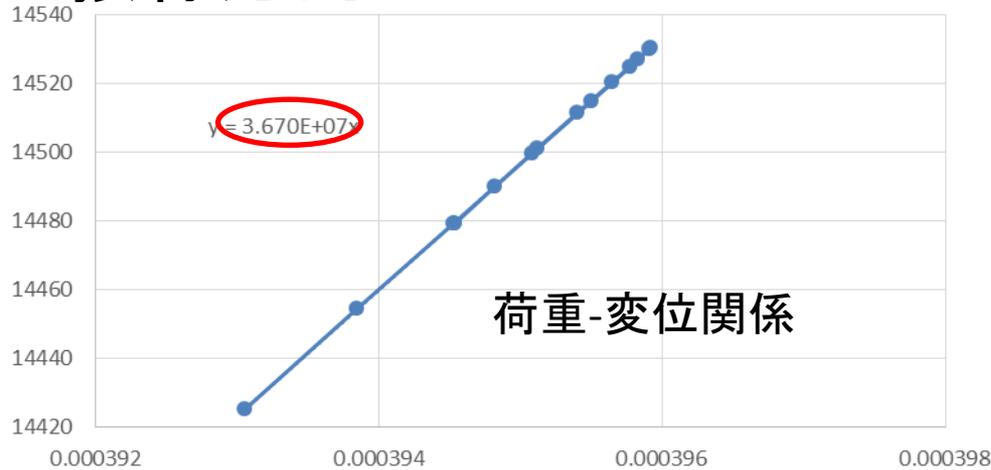


Code Verification

「摩擦有」接触している間所定の作用力が発揮されているか

接線方向

Ut-Fkt



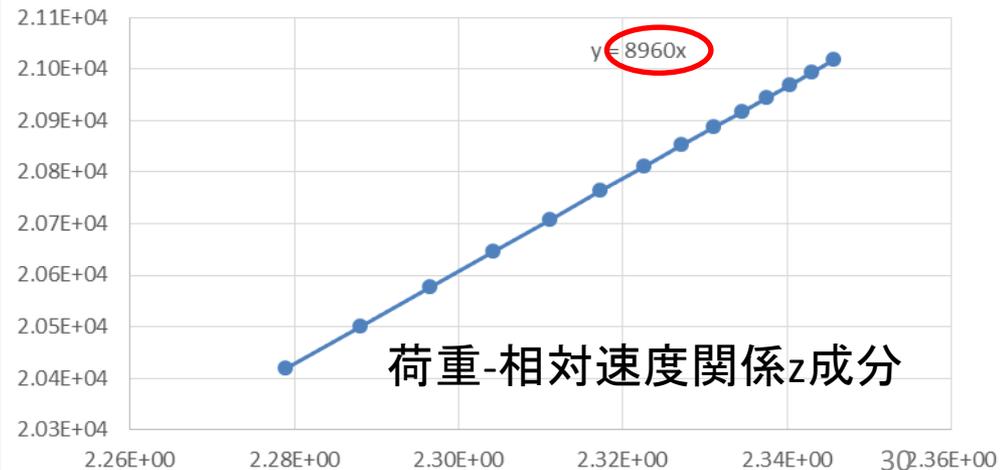
	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥

Target coefficient of restitution	Spring coefficient (N/m)	Viscous damping coefficient (N·s/m)
0.445	3.67×10^7	8.96×10^3
	バネ係数	粘性減衰係数

vt1-Fct1



vt3-Fct3



モデル

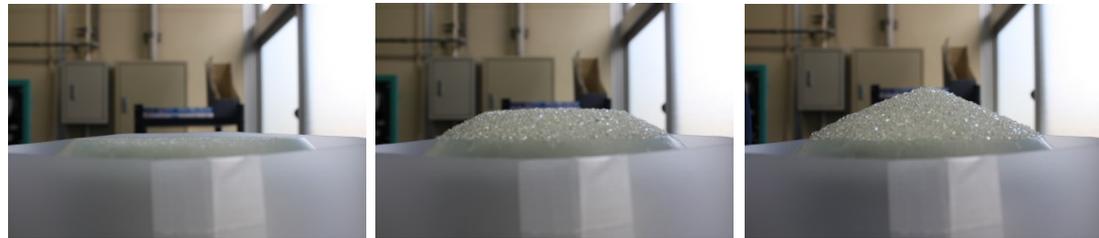
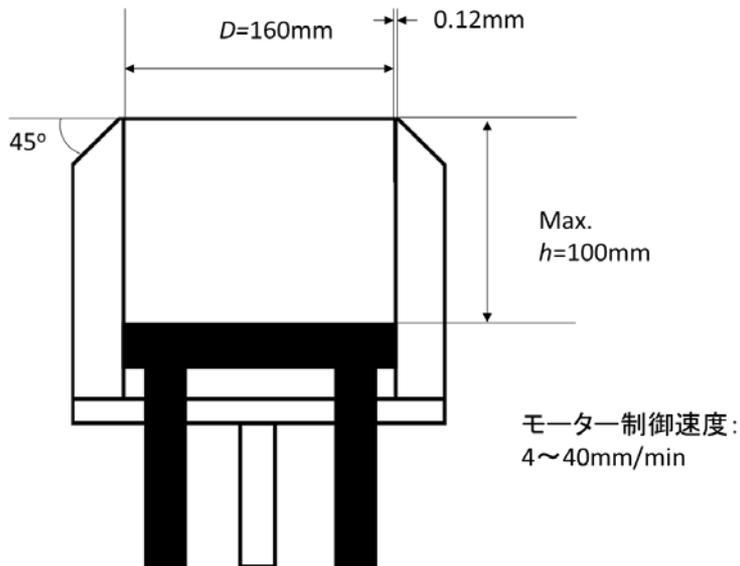
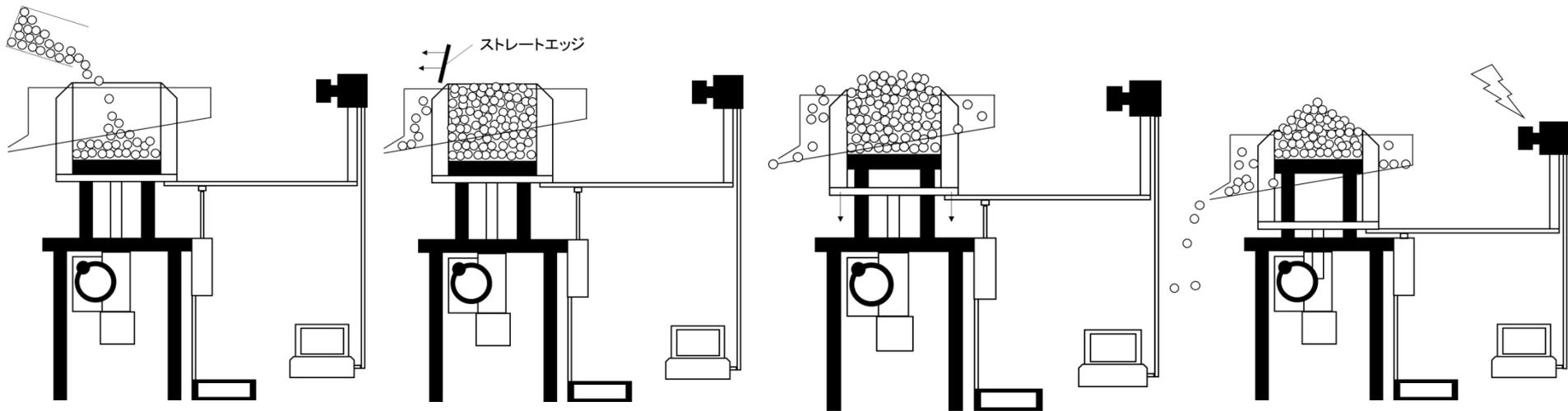
モデル化の方法

M1: 岩塊の形状->球要素を直径間隔に配置
→衝突時の挙動評価のため

堆積時の影響は？

ガラスビーズ等の球の粒状体に比べ、砂等凹凸のある粒子はインターロッキング効果によりせん断強度が大きくなる

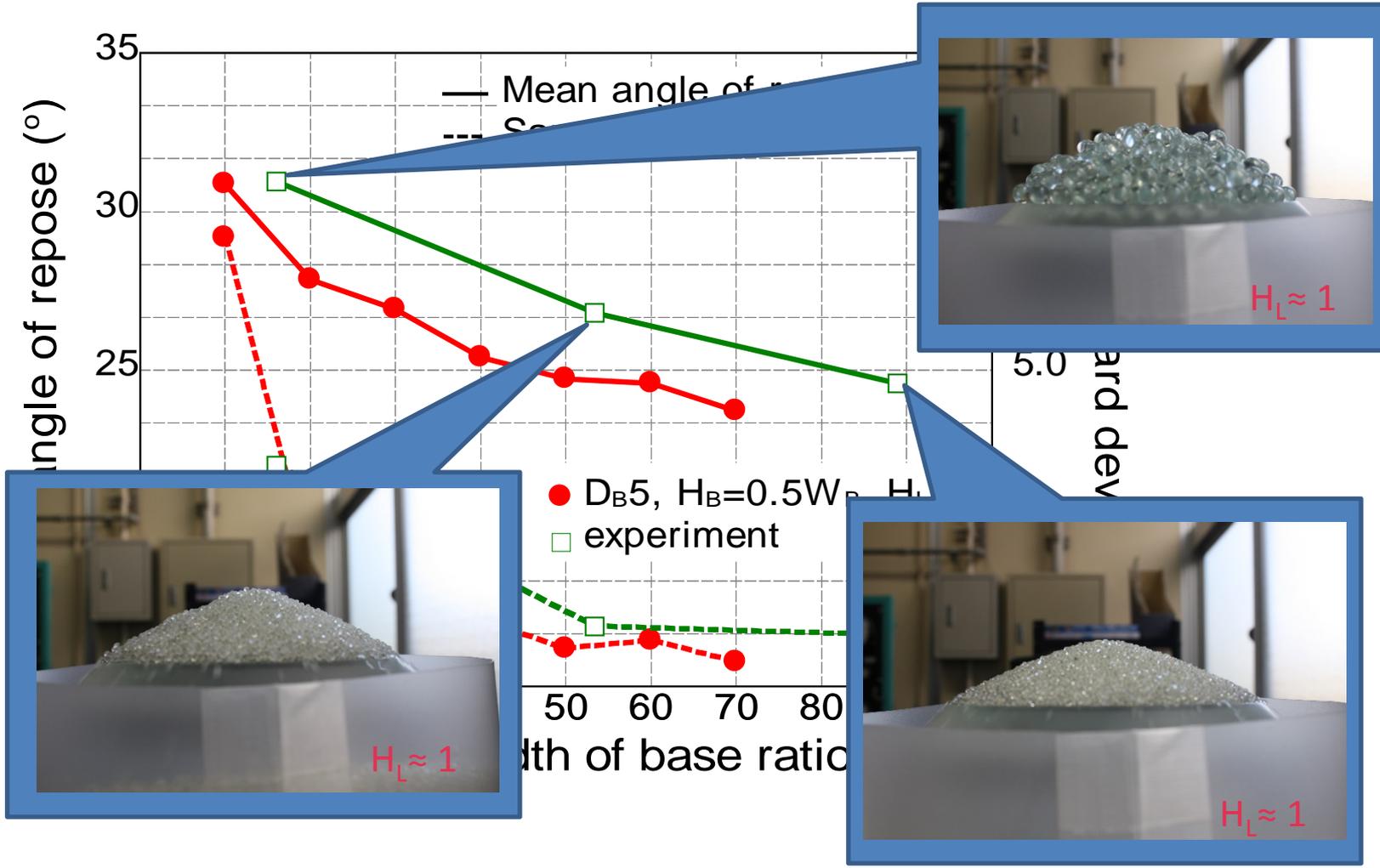
実験装置② (Round robin test)



箱の内部に粒状体を投入し、側面の壁を下方へ移動させることで安息角を発生させる。

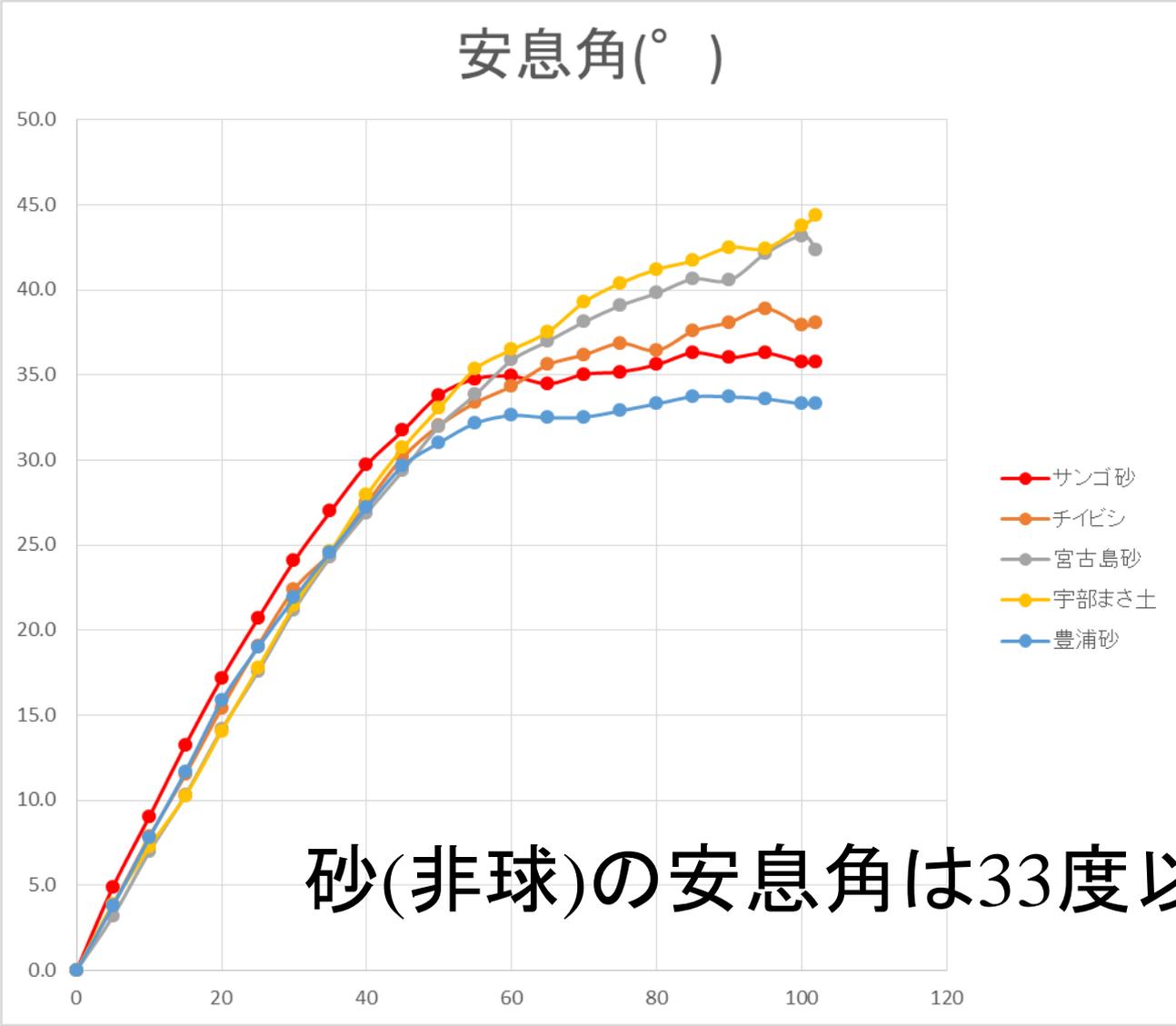
安息角が形成されていく過程も撮影可能。
山口大 中田先生, 梶山先生

Comparison of experiment and analysis for repose angle



細かいガラスビーズ(球)の安息角は25度

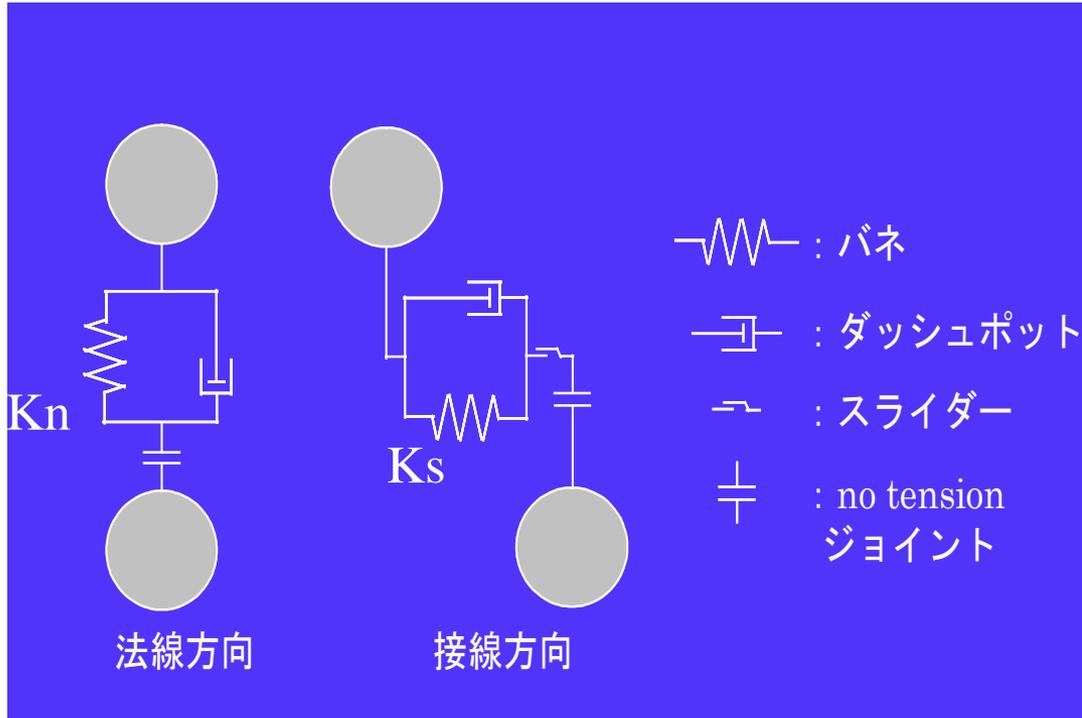
Comparison of experiment and analysis for repose angle



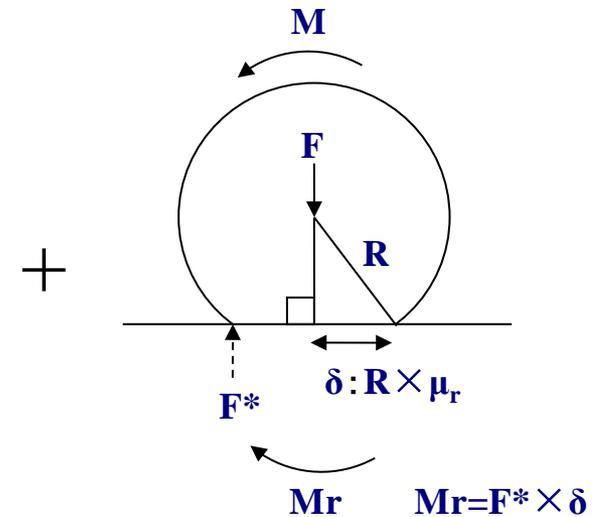
砂(非球)の安息角は33度以上

検討に用いるDEMの接触モデル

CUNDALLの接触モデル

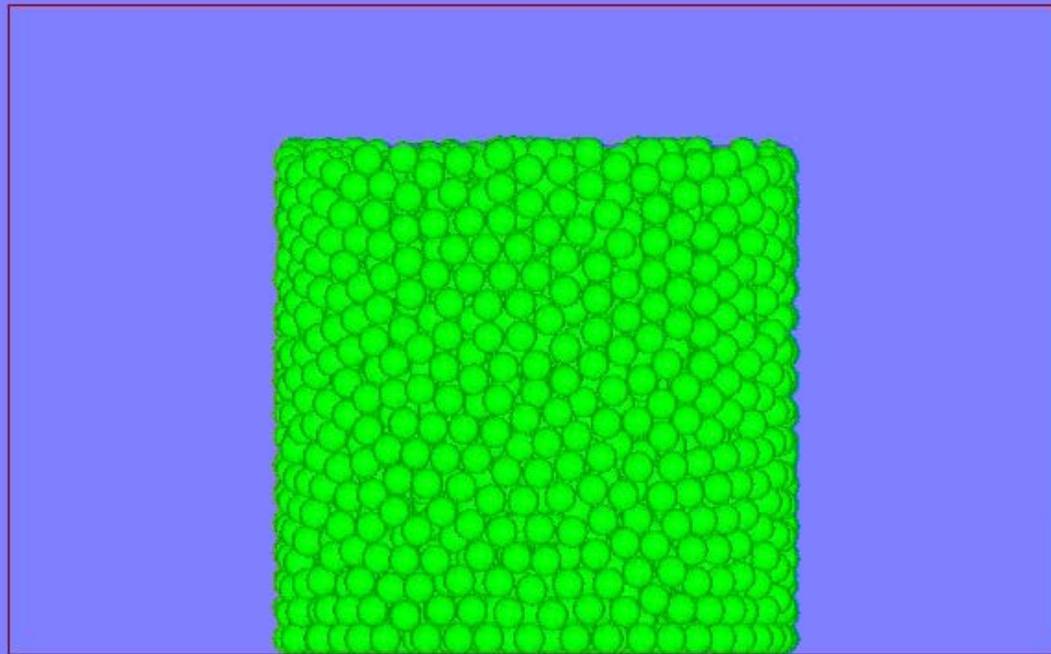


転がり摩擦



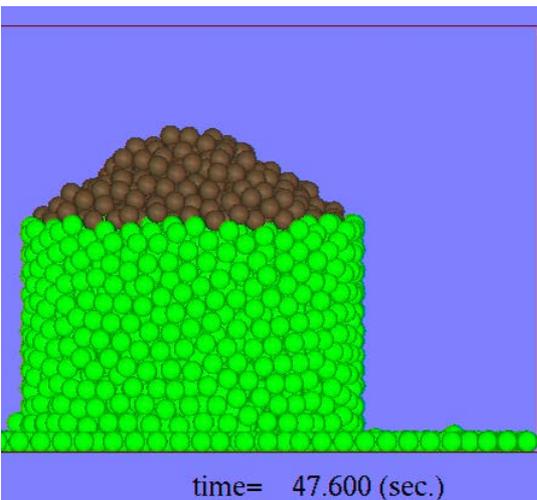
阪口モデル

Round robin testのシミュレーション

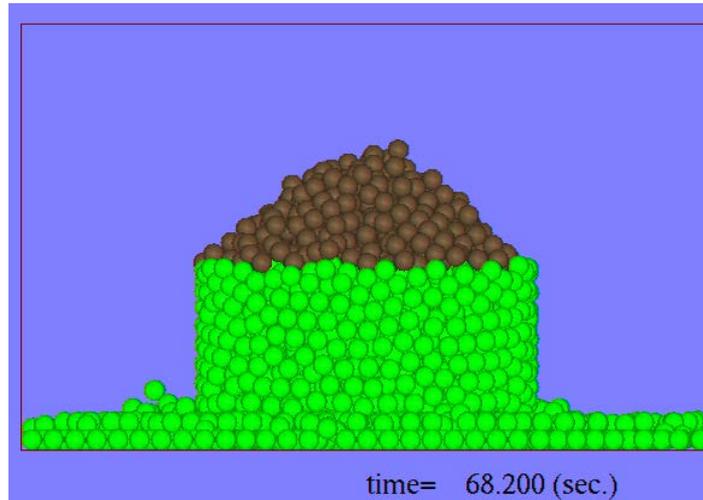


time= 0.000 (sec.)

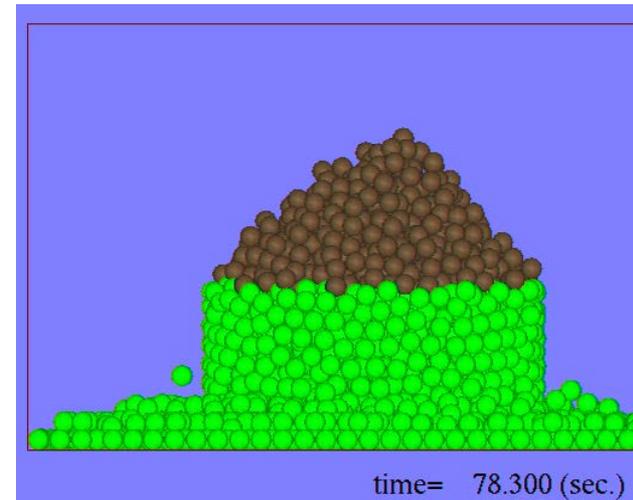
転がり摩擦のパラメトリックスタディ



転がり摩擦0. 0



転がり摩擦0. 05



転がり摩擦0. 1

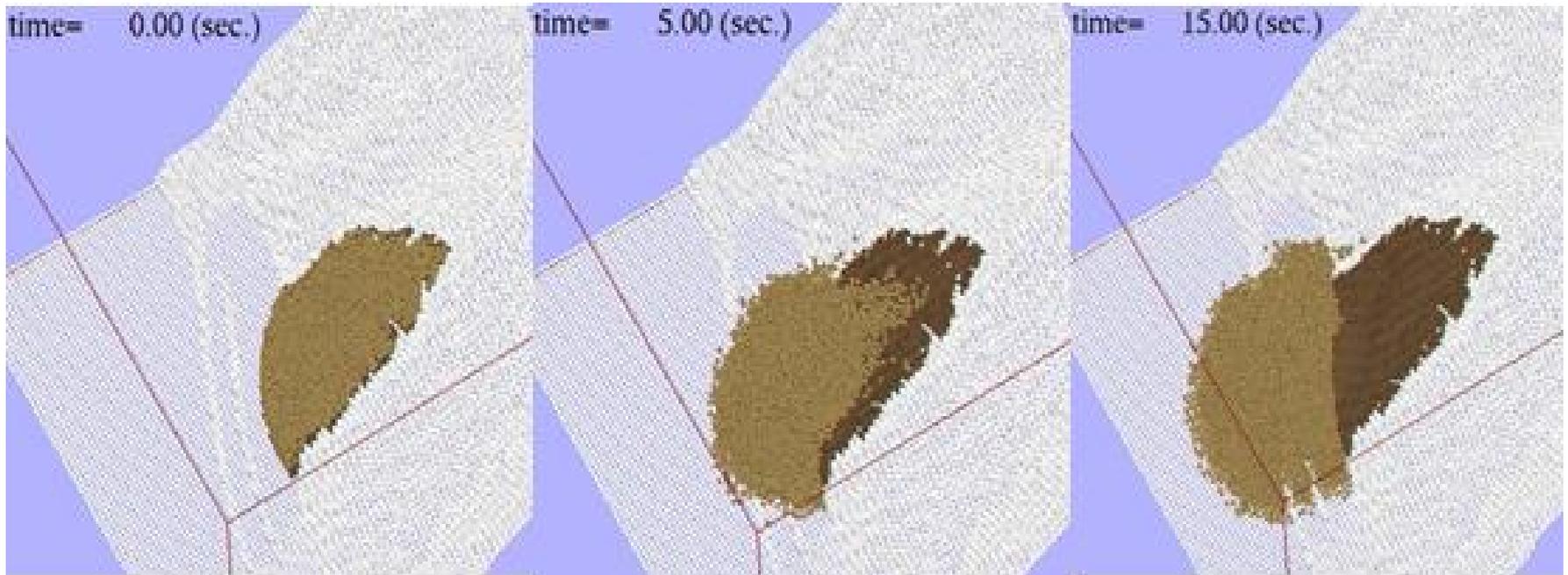
	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥ 37

実被害のシミュレーション

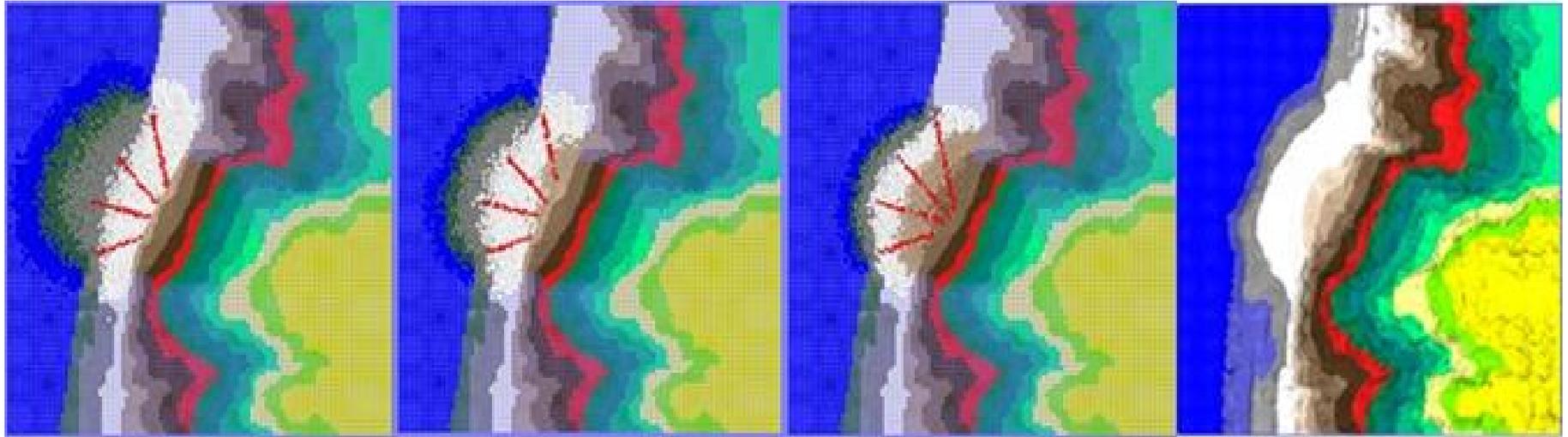


Bedrock collapse of Shono, Erimo-cho in 2004

実被害のシミュレーション



転がり摩擦のパラスタ



(a)Rolling friction 0 (b)Rolling friction 1.0 (c)Rolling friction 2.0 (d)Actual damage

Critical repose angle by survey line

Coefficient of Ristitution	0.1	0.1	0.1	0.1	actual
Rotational Friction	0	0.1	0.15	0.2	survey
line1	0.22	0.38	0.47	0.53	0.43
line2	0.36	0.34	0.53	0.57	0.51
line3	0.40	0.37	0.54	0.66	0.53
line4	0.38	0.42	0.60	0.69	0.60
average	0.34	0.37	0.53	0.61	0.52

	検証	妥当性
材料	①, ①'	②
モデル(線形)	③, ③'	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤'	⑥ 40

まとめ

	検証	妥当性
材料	①, ①′	②
モデル(線形)	③, ③′	④
モデル(非線形)	⑤, ⑤′	⑥

課題

- 自由な要素間衝突のVerification
->③, ③', ⑤, ⑤'
- アスファルト, 表土に対するValidation
- 斜面の凹凸に対するValidation
- ④は？

重量 1.60t, 形状 多面体, 底面形状 平底, 落下高さ 5m, 角落し



参考文献

- 中瀬仁・曹国強・田部井和人・栃木均・松島亘志; 個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性; 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4(地震工学論文集第34巻), I_476-I_492, 2015.
- 中瀬仁・岩本 哲也・曹国強・田部井和人・阪口秀・松島亘志; 個別要素法簡易モデルによる地震起因性斜面崩落土の堆積範囲評価法の提案; 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4(地震工学論文集第36巻), I_694-I_703, 2017.
- 栃木均: 地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発, 電力中央研究所報告, N08084, 2009.
- 栃木均: 地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響, 電力中央研究所報告, N09021, 2010.
- The effect of initial conditions on the variation of angle of repose simulation using a Discrete Element Method, S. Kajiyama & Y. Nakata, Geo-Mechanics from Micro to Macro in Research and Practice (IS-Atlanta 2018) (in print).