



## 事例紹介

### 概要

世界最大の銅鉱業企業集団である南米・チリのコデルコ社では、同社の主力生産装置の一つであるテニエンテ式溶解炉への原料挿入において、耐磨耗プレートが異常磨耗するという問題を抱えていました。同社ではこの問題による連続操業への悪影響やコスト増加を懸念し、シミュレーションによる問題の根本解決を図ることにしました。

コデルコ社は南米最大の工学用コンピュータシミュレーションソフトのサプライヤーである ESSS 社の協力を得て、同社が開発した最新の DEM ソフトウェア”ROCKY”を用いて現象解析を行いました。両社のメンバーからなる設計改善チームは DEM による計算結果から改善ポイントを可視的・定量的に把握し、素早く改善案を提示し、その効果も定量的に予測することができました。

コンピュータシミュレーションによる問題解決により、コデルコ社のテニエンテ式溶解炉の問題点は素早く修正され、同社の不具合改善・コストダウンに大きく貢献することができました。

### 問題発生の際

銅精錬においては、採集した鉱石を溶解する必要があります。コデルコ社では、テニエンテ式溶解炉(Fig.1)を用いて操業を行っています。乾燥工程を経た鉱石はベルトコンベアーによって搬送され、ホッパーを経て鉱石シュートから炉内に投入されます。



Fig.1 テニエンテ式溶解炉

Fig.2 に示すように、原料鉱石は、エアージェクション式の鉱石シュートを通して溶解炉へと導かれます。この際に、シュートから落下する鉱石のせいで溶解炉への搬送経路にある耐磨耗プレートが激しく摩耗し、極めて短いスパンで交換を行わなければならないという事態が発生しました。

### コデルコ社と ESSS 社について

コデルコ(CODELCO)社は、南米・チリにある国営の鉱山公社です。チリの輸出総額の 50%以上が銅及び関連製品であり、また、2013 年における GDP 構成比率の 11.6%が銅関連製品です。コデルコを中心とする銅関連企業の国家歳入に占める割合(2013 年)は 14.2%となっており、まさにチリは銅で成り立っている国と言えます。そして、その中心となっているのが国営公社であるコデルコです。

ESSS 社はブラジル・サンパウロに本社をおく南米最大の工学用コンピュータシミュレーション技術のサプライヤーです。ANSYS 社の製品をはじめとして、自社製 DEM ソフトウェア”ROCKY”など、多様な製品とコンサルティングサービスを南米および北米の一部で提供しています。

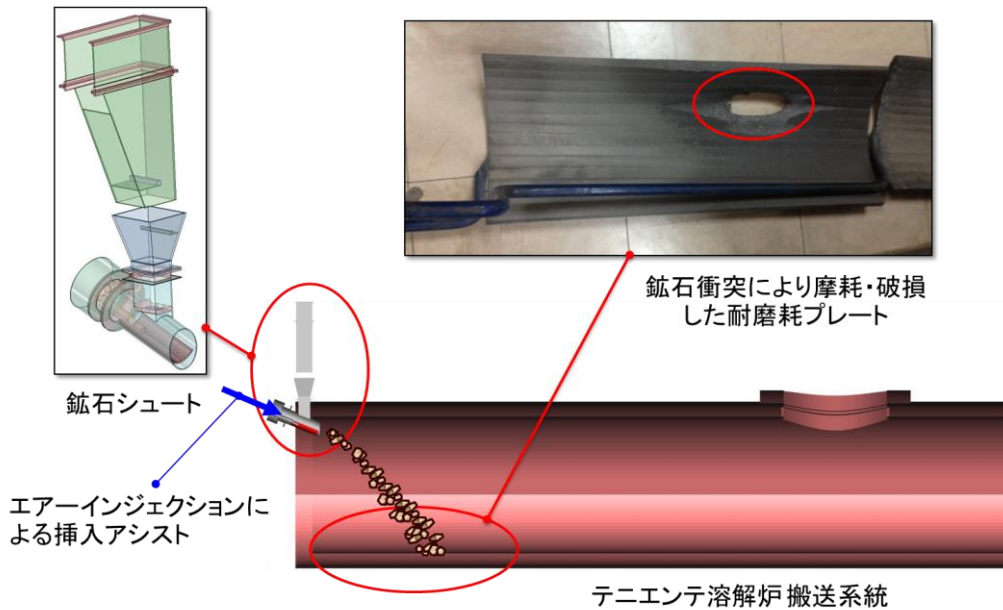


Fig.2 不具合発生の様相

この溶解炉設備は操作中は安全のため人が立ち入ることができません。そのため、問題を解決しようとしても溶解炉への搬送経路内で鉍石がどのような挙動をしているのかを目視で確認することが出来ませんでした。

耐摩耗プレートは本来消耗品で交換を前提に作られているものですが、このままでは予想を超える頻度で運転停止をし、耐摩耗プレートの交換をしなければならなくなります。結果として予備品の準備費用、運転停止に伴う保守コストの増大、そして工場にとって最重要ファクターとなる生産力の低下が懸念される事態となりました。

そこで、コデルコ社はコンピュータ解析によって問題を可視化し、不具合の根本解決を図ることとしました。コデルコ社は南米における最大のコンピュータ解析専門企業である ESSS に連絡を取り、同社が開発・販売している DEM ソフトウェア”ROCKY”を用いて問題解決を図ることとなりました。

### コンピュータ解析の実施

コンピュータ解析によって問題解決をするため、コデルコ社は ESSS の協力のもと、以下のようなステップで問題解決を実施しました。

- (1) **現行の鉍石シュート形状**を用いて流体-DEM の片方向カップリング計算を行い、その結果から衝突エネルギー評価を行って、耐摩耗プレートの磨耗状態を予測する。
- (2) **改善型の鉍石シュート形状**を用いて流体-DEM の片方向カップリング計算を行い、その結果から衝突エネルギー評価を行って、耐摩耗プレートの磨耗状態を予測する。
- (3) 上の(1)および(2)の結果を比較して改善形状が有効であることを確認する。

具体的な手順について、以下に説明していきます。

#### ① 操業データ・粒子データの収集

コデルコでは、現場で実測を行って鉍石シュートからの投入量、粒子のバルク密度、コンベヤーのスピードを測定しました。その結果を Table.1 に示します。

Table.1 操業データ

Propiedad	Valor
Max flow. material [ton/h]	47
Min flow. material [ton/h]	10
Bulk density of material [ton/m <sup>3</sup> ]	2,17
Feed belt speed[m/min]	59,85

続いて、投入される銅鉱石の粒径分布についても測定を行いました。検討の結果シミュレーションの速度を不必要に落とさないようにするため、直径 13.2mm 以上の 3 階級を用いて計算を行うことになりました。測定結果と、計算に使用した粒径分布を Table.2 に示します。

Table.2 粒径分布

実測分布		シミュレーションに用いた分布	
Particle diameter [mm]	Cumulative Percent [%]	Particle diameter [mm]	Cumulative Percent [%]
25,4	100,00	25,4	100,00
19,05	91,98	19,05	91,98
13,2	78,54	13,2	78,54
9,5	64,43		
6,7	46,29		
4,75	30,41		
3,32	14,64		
2,36	8,81		
1,40	5,56		
0,15	1,36		

続いて、非球形粒子を用いて安息角計算を行い、実際の粒子の安息角と大きな違いがないことを確認します。実際の鉱石の形状を参考にしながら粒子の形状を調整し、Fig.3 に示すように安息角を合わせ込んでいきました。

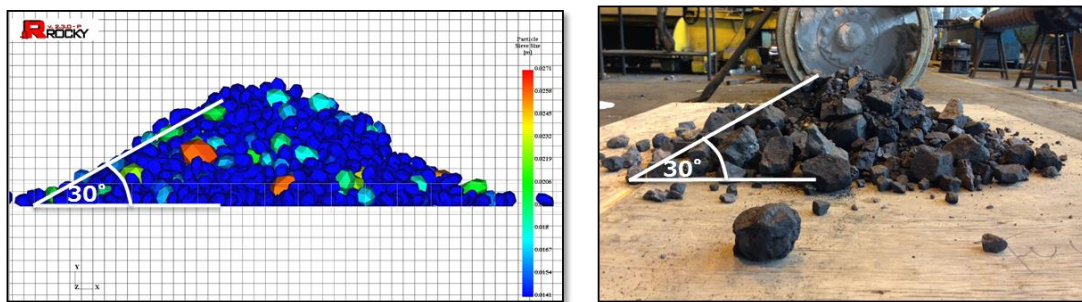


Fig.3 シミュレーションによる安息角(左)と、実測による安息角(右)

## ② 流体シミュレーション

Fig.1 で示したように、今回計算するシュートは工場の圧縮空気ラインからのエアージェクションを用いて挿入アシストが行われています。そのため、以下の要領で ANSYS-Fluent を用いて CFD 計算を行い、その結果を③の DEM 計算にカップリング(片方向)させます。

Table.3 CFD 計算条件

Parameter	Value	Data provider
Mass flow rate [kg/s]	0,97	CODELCO
Air pressure [bar]	1,4	CODELCO

Fig.4 に示すようにコンベヤーを通して運ばれてきた銅鉱石はホッパーを通して鉱石シュートに入り、エアージェクション装置から噴出される圧縮空気によって吹き飛ばされながら装置内に挿入されていきます。CFD パートでは、ANSYS-Fluent によってエアージェクション装置周りでの空気の流れを計算しました。計算結果のベクトル図を Fig.4 に示します。

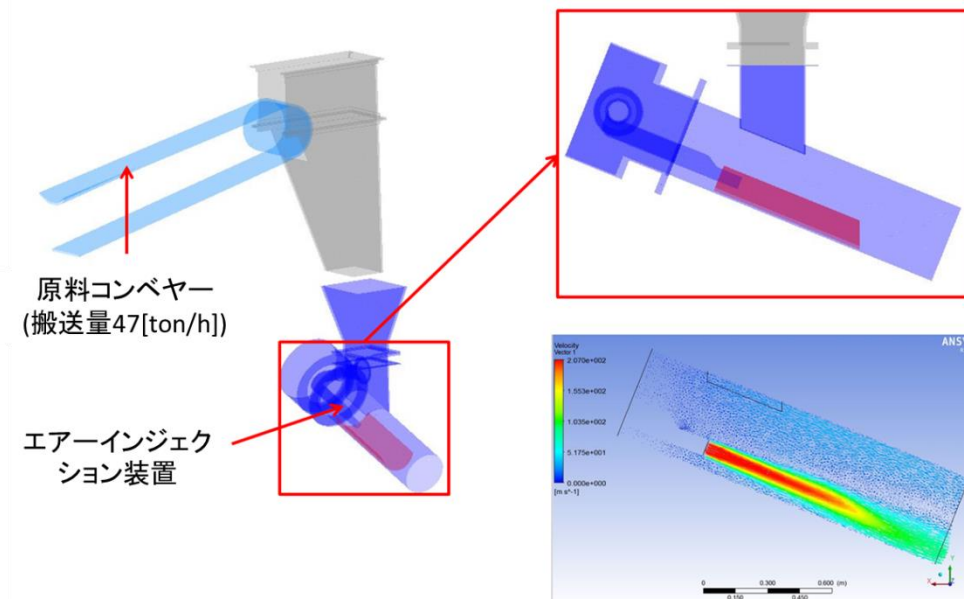


Fig.4 CFD 計算箇所およびシミュレーションの結果

#### DEM シミュレーション

今回の計算では、ESSS 社製の汎用 DEM パッケージ”ROCKY”を用いて DEM シミュレーションを行いました。  
④で計算したエアージェクションによる流体力を片方向連成させて計算を行いました。

ROCKY は Fluent とのカップリングが可能であると同時に、GPU 計算機能と非球形粒子計算機能を用いることにより、リアリスティックな形状の粒子を短時間で計算できることが大きな特徴です。

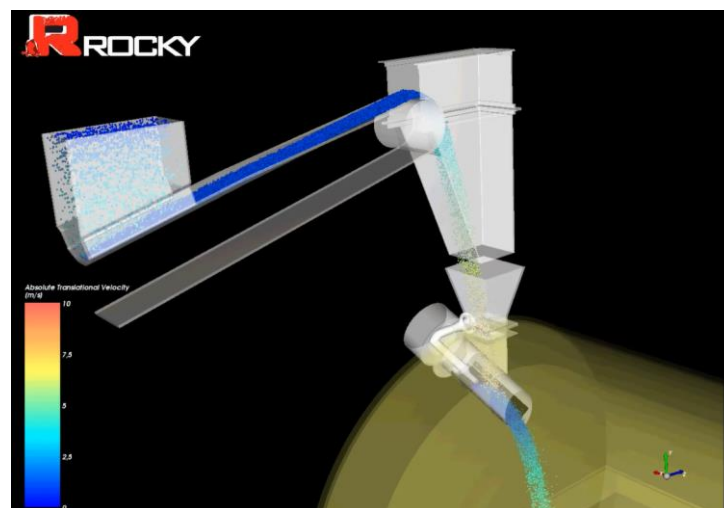


Fig.5 ROCKY による DEM 計算

更に、ROCKY の特徴的な機能である摩耗シミュレーションを行い、粒子の衝突によるプレートの摩耗を計算しました。その結果を、Fig.6 に示します。

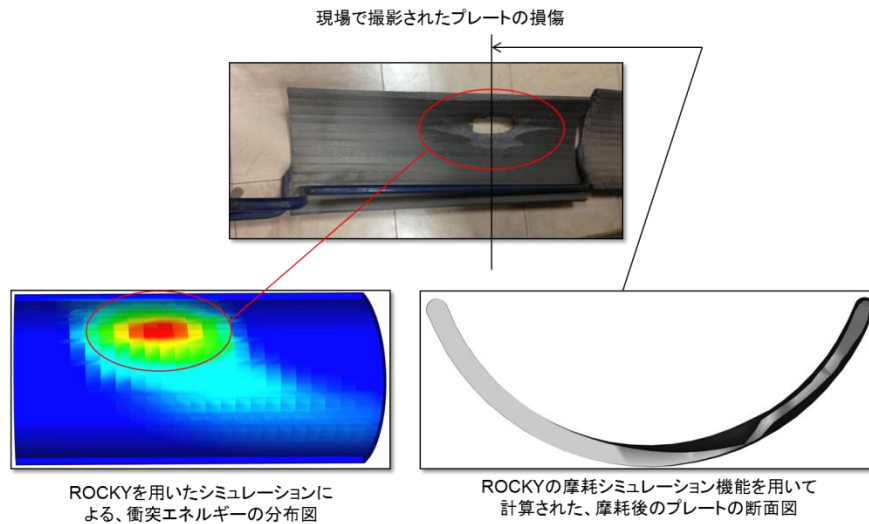


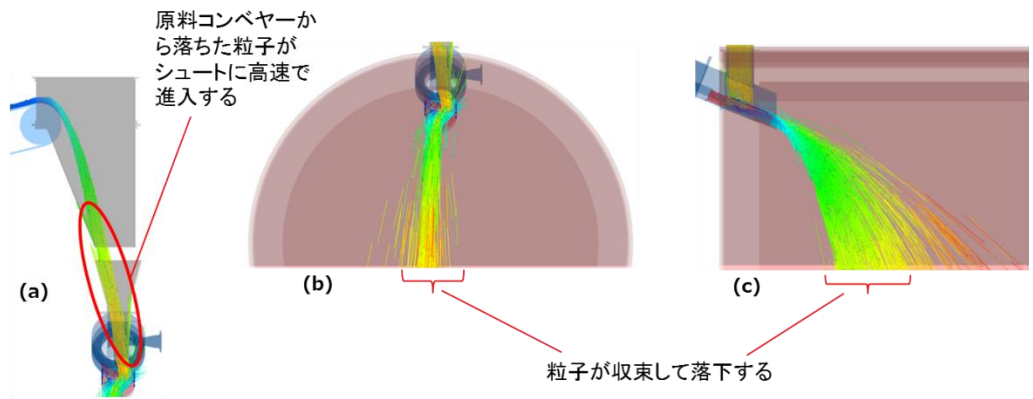
Fig.6 ROCKY による計算結果と、実際の損傷状況の比較

③ 設計改善と評価

DEM シミュレーションによって現状がよく捉えられていることを認識した上で、コデルコ-ESSS のチームは設計改善に乗り出しました。

設計改善チームはFig.7の(a)に示されるように、原料コンベヤーから落下した銅鉱石粒子が、ほとんどホッパーと接触することなく、高速でダイレクトに落下していることに着目しました。このため、銅鉱石は高いスピードをもったまま、分散することなく炉内に落下していることが判明しました。

改善前



改善後

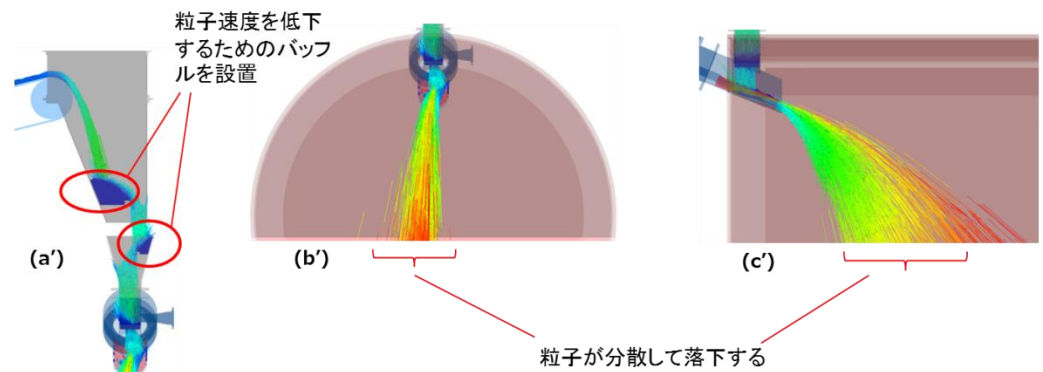


Fig.7 設計改善の概要と、ROCKY によって計算された粒子軌跡

上の解析結果を踏まえて、設計改善チームはホッパー内にバッフル(仕切り板)を設けて、銅鉱石粒子の落下速度を落とすとともに、シュートから炉内に落ちる粒子の分布をより分散化するというアイデアを思いつきまし



た。そして、設計改善チームはこのアイデアが本当に有効かどうかを確かめるため、設計改善した形状を用いて再度 DEM シミュレーションを実施しました。

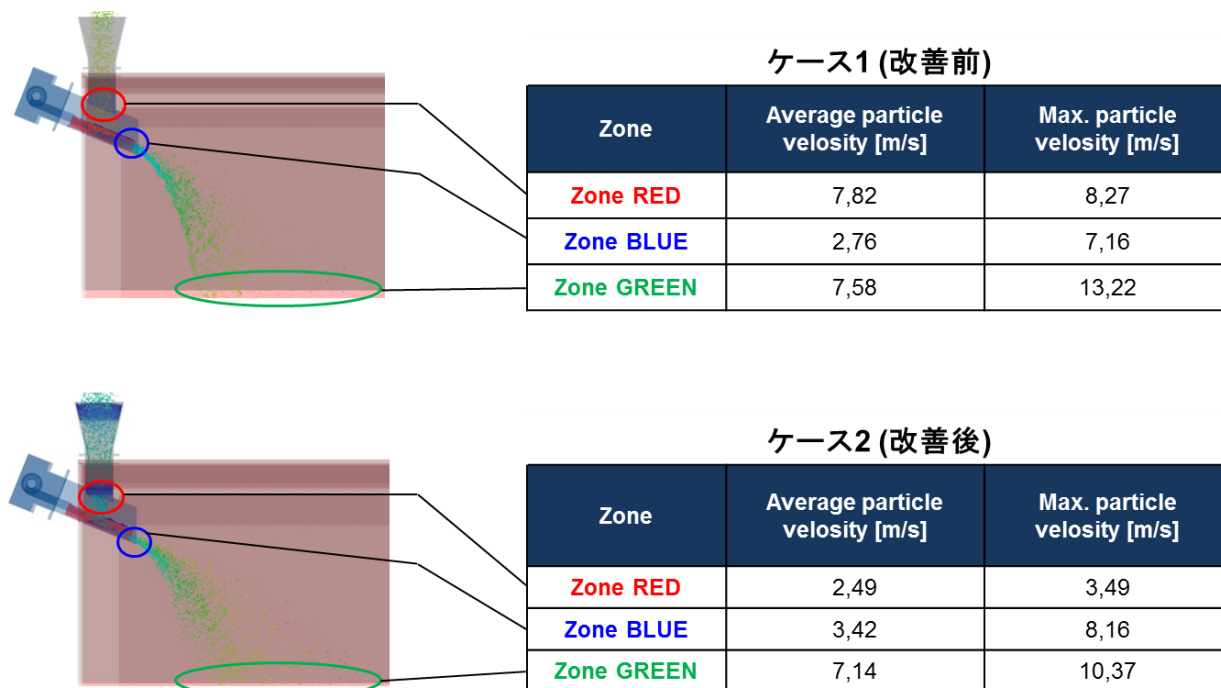


Fig.8 設計改善による効果

計算の結果、設計改善によって粒子の最大速度を低下させることができると判明しました。続いて、それがプレートの摩耗に及ぼす影響についても調査を行いました。衝突による摩耗は、Archardの摩耗の法則により、物体が滑る距離と物体にかかるせん断力に比例します。つまり、衝突による仕事(単位時間あたりの衝突エネルギー)を評価することによって、将来の磨耗状態を予測できるようになります。

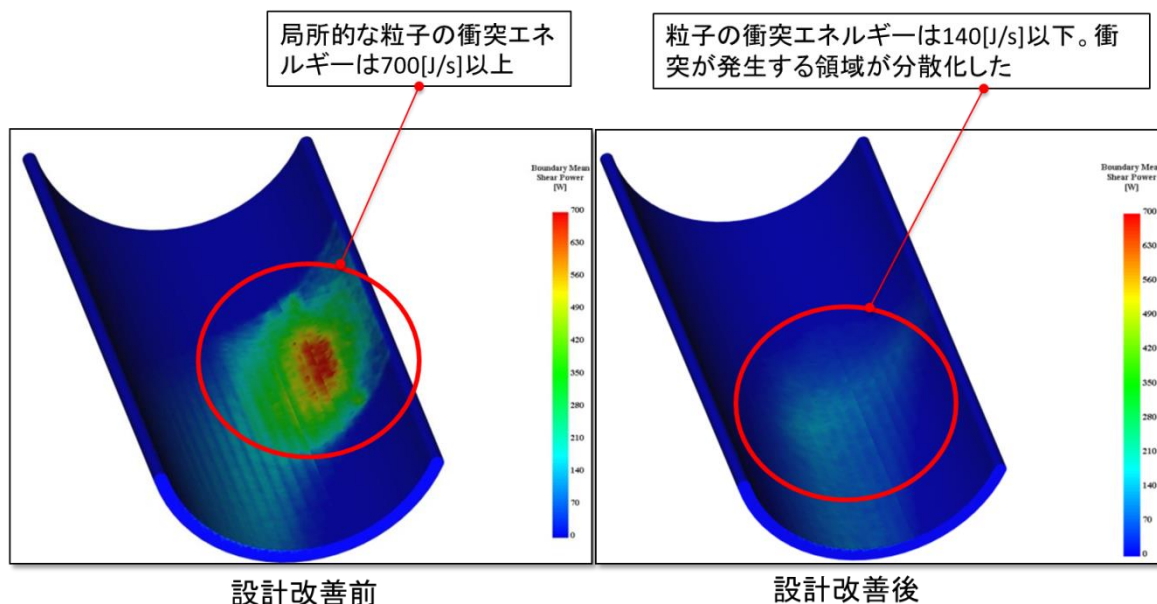


Fig.9 1秒間の衝突エネルギー(仕事)の評価

ROCKYによって粒子の衝突による仕事を計算した結果が、Fig.9になります。1秒間の衝突エネルギーの最大値は700[J/s]から140[J/s]に大きく減少し、衝突が発生する領域も、改善前が偏っているのに対して、よりプレートの中央寄りに広く分散していることがわかります。

以上の結果から、設計改善チームはこの設計変更が、磨耗状態の改善について効果があるものと判断し、実際の鉱石シュートの改造工事を行いました。その結果摩耗は大幅に減少し、プレート交換に伴うコスト発生・操業中断を防止することに成功しました。

#### まとめ

今回の事例を通して、以下のような結論が得られました。

1. ROCKY を用いて DEM 計算することで、不具合現象を正しく再現することができた。
2. シミュレーションを用いることで、閉ざされて見ることのできない空間での現象を可視化し、かつ定量的に評価することができた。
3. シミュレーションを用いた可視化評価・定量評価結果から、現状の問題点を素早くとらえ、具体的な改善案を提示することができた。
4. 改善案の効果についても、事前に可視的かつ定量的に評価をすることが可能であった。
5. 片方向のカップリングだけでも、現象再現に十分な効果を発揮するケースが確認できた。

---

ROCKY は他の汎用 DEM コードにはないユニークな特徴を持ち、高速でリアリスティックなシミュレーションを、使いやすいインターフェースで提供することができます。今後もこのような、ROCKY を用いた成功事例についてご紹介をしていきたいと考えております。ROCKY にご興味をお持ちの方は、下記までお気軽にご連絡ください。

ステイシフト株式会社 Rocky 担当  
TEL:044-455-7300 FAX:044-455-7301  
E-mail rocky-support@stay-shift.jp  
〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1  
かながわサイエンスパーク(KSP) 西 613