

非球形粒子対応・GPU 計算対応・流体連成計算対応
 高機能科学・工学用 DEM 解析
 ソフトウェアパッケージ



事例紹介 No.2 ブラジル VALE 社の事例
 2015 年 2 月 9 日

概要

世界最大の鉄鉱石採掘・生産企業である VALE(ヴァーレ)社は、Rocky と ANSYS を用いたシミュレーションを行い、プラント内の機器の設計・運転の最適化を行うことによって生産効率向上を図り、大幅なコスト削減を達成しました。

鉱業分野においてコスト削減をするための主なアプローチは、メンテナンス時間や摩耗を低減させて装置のメンテナンスコストを軽減すること、およびプロセス中の原材料の損失を減少させることにあります。ANSYS と Rocky などのコンピュータシミュレーションソフトウェアを用いる事によって、生産プロセスや機器の運転をコンピュータによってモデル化し検討することができます。そして、不具合の原因解析や装置運転条件の最適化を行うことによって装置トラブルを最小限にし、装置の耐久性を向上することによって最終的なコスト削減を達成することができます。

本稿では、VALE 社のシミュレーションを用いたプロセス改善への取り組みについてご紹介いたします。

Rocky と ANSYS のソフトウェアの組み合わせ

科学・工学用汎用シミュレーションソフトである”Rocky”、および”ANSYS”は、南米地区ではブラジルのシミュレーションソフトウェア企業である ESSS 社によって販売されています。(※ESSS 社は Rocky の開発元であり、ANSYS 製品の南米における最大の販売代理店です)

鉄鉱石採掘分野で世界最大の企業である VALE 社は、2013 年から Rocky および ANSYS を用いた解析を行っています。また、VALE 社は ESSS 社が提供するソリューションサービス(受託解析・コンサルティングサービス)を利用しています。VALE-ESSS の共同プロジェクトは、ブラジルのパラ(Para)州に位置するカラジャス鉄鉱山でのコスト削減プロジェクトにおいて非常に大きな成果をあげました。



カラジャス採掘場

VALE 社の機器保守・機器自動化技術グループ(GAAUN)のマネジメントエンジニアである Ueld Jose da Nobrega 氏は、Rocky と ANSYS を用いたプロジェクトの成果について、以下のように述べています:「昨年と今年初めに、私たちはシミュレーションソフトの力を借りたいくつかの改善・改修プロジェクトを実施しました。そのプロジェクトは主と

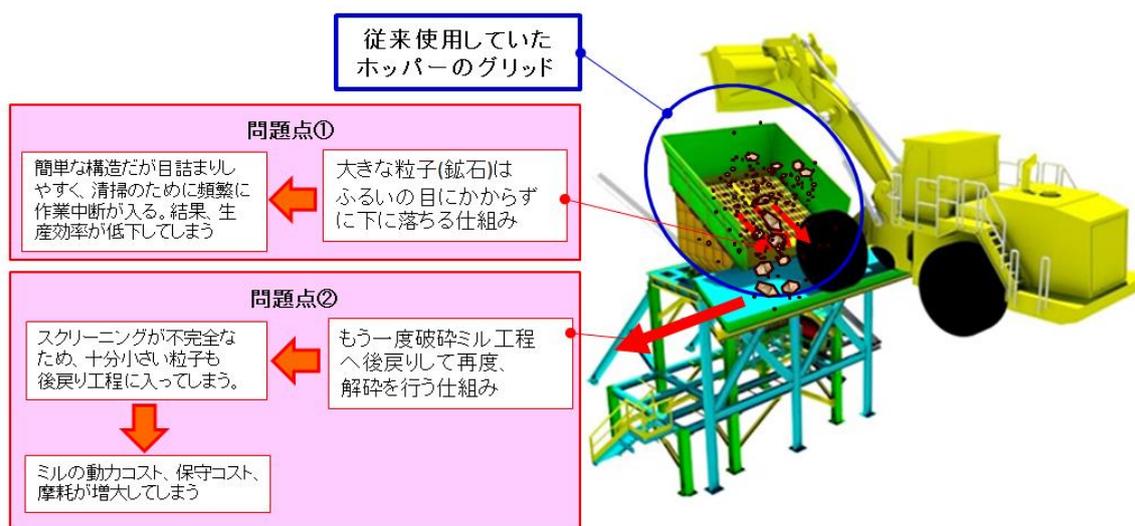
してプラントシステムの保護・機能性向上を目的にしており、当社の No.3 プラントおよび No.4 プラントについて実施しました。このプロジェクトの実施コストは 4 千万リアル(18 億円(※シミュレーションだけでなく装置改修コスト等含む))でしたが、プロジェクト実施後たった3ヶ月の運転で、No.3 プラントおよび No.4 プラントにおけるコスト削減効果はお金に換算すると、それぞれ 1000 万米ドル(120 億円)ずつでした。」彼はまた、プロジェクトを実施した後の機器の動作・運転時の挙動等に関して技術的評価を行ったところ、その動作・挙動は事前にシミュレーションで推定したものとほぼ同様であったことを確認しています。

VALE 社の技術的課題とその解析プロセス

Uled 氏の改善アイデアは、No.3 プラントおよび、No.4 プラントに設置されているホッパーのグリッド(ふるい)の効率を向上し、グリッド清掃の時間を短縮することで効率を上げることでした。

No.3 プラントおよび No.4 プラントは、それぞれ 2 つずつ、下図のような原料投入口をもっています。これらの投入口のグリッド(ふるい)は、プラントに投入される鉱石を分離し、適正な大きさの鉱石のみを取り出す役目を持っています。この投入口からは、破碎ミルによってサイズ調整された原料鉱石が、バケットローダーによって投入されます。サイズが適正な水準まで破碎された鉱石はグリッドを通過し、そのままヤードと貯蔵サイロに送られます。グリッドにひっかかった大きな鉱石は、破碎ミルを用いた破碎プロセスに戻され、再度適正な大きさまでサイジングされます。

このプロセスにおける選別機能が適正に動作しない場合、適正なサイズの功績まで後戻りで再度破碎工程にまわされてしまうこととなります。これによって、再破碎工程において破碎ミルの動力コストおよび摩耗・保守工数の増加、生産効率の低下が発生することとなります。



従来型のホッパーとグリッドの仕組み

カラジャスプラントの技術チームは、グリッドの周囲で発生している現象が複雑であるため、グリッド上の岩石の挙動を明らかにするためには Rocky と ANSYS を用いたシミュレーションが必要であると考えました。Rocky を用いて、サイズの異なる球形および非球形の粒子の挙動を明らかにし鉱石の流出速度の計算を行い、また、その結果を ANSYS と組み合わせることで、機器側に与える衝撃力を計算しました。

Uled 氏は、Rocky を選んだ理由について以下のように語っています：「計算の精度を高めるためには非球形粒子を用いることが必須でした。なぜなら、我々の取り扱う粒子は鉄含有量の高い鉄鉱石です。鉄鉱石の密度は高く、また非常に硬度が高いためです。鉄鉱石の角部が機器に当たった時の衝撃力などを評価するための精度は、球形粒子を用いた計算では全く不十分でした」

Rocky 上で計算されたデータは ANSYS 用のフォーマットでエクスポートされ、装置の構造・応力解析が行われました。エンジニアはコンピュータ上で仮想的に機器を改良した場合の効果を検証することができ、改良した場合の機器の挙動がどのようになるかを、コンピュータ上で表現することが可能でした。2つのソフトウェアのカップリング・ソリューションを使用することで、VALE はこのプロジェクトの開発にそのスタッフが費やす時間を、通常のプロジェクト

と比較して約 70%削減することができました。さらに、従来手法では実際に装置を導入して試行錯誤的に行っていた改造工事を事前検討でかなりのレベルまで詰めることが可能となりました。

Rocky で計算された結果は従来のグリッドにおける目詰まり等の問題を正しく再現できており、そのソルバーへの信頼性が確認されました。また、従来型のグリッドでの応力解析も、実際の現象を正確にとらえていることがわかりました。

最適化とシミュレーションによるテスト

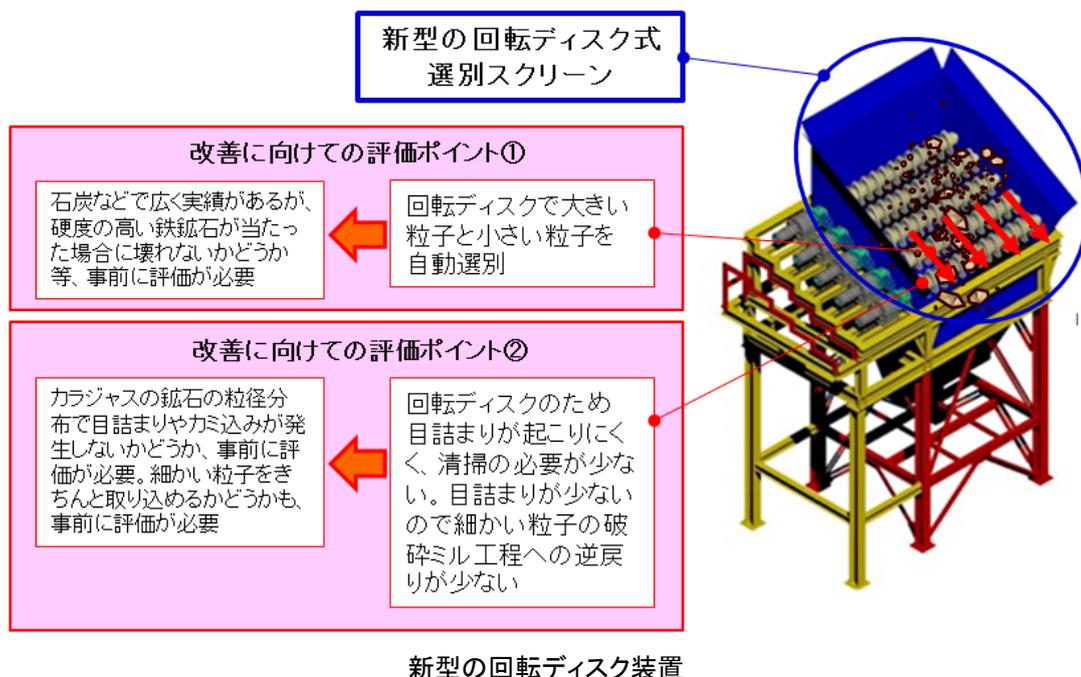
Ueld 氏ら、VALE のエンジニアが考えた解決策は、基本的にはふるいのスクリーンを新しい設計に変更することでオペレーションの最適化を図るものでした。彼らは装置メーカーとのディスカッションや独自の調査から、いくつかの異なる装置構成を紙上で評価し、そして回転ディスクシステムが最も可能性の高いものであると結論づけました。

この回転ディスクシステムは、石炭を用いた産業で広く使われているローラーシステムと同様の効果を狙ったものです。この装置はサイズによって石炭を正確に分別することができ、なおかつ動力で回転するために目詰まりが起りにくいのが特徴です。ただし、これを鉄鉱石に適用するためには石炭と鉄鉱石の物性の違いを評価する必要があります。

鉄鉱石と石炭の物性比較

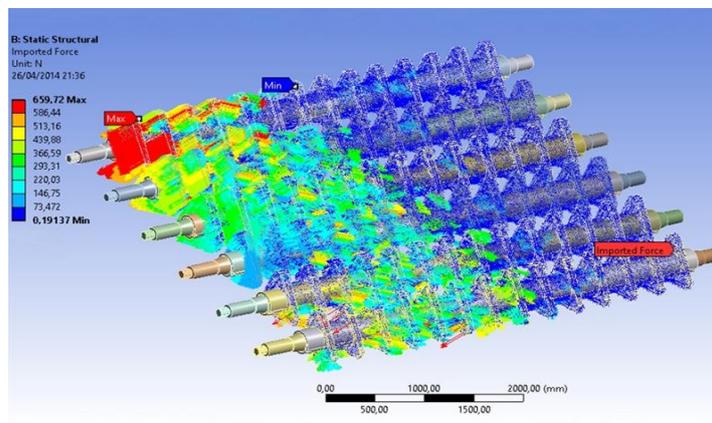
	鉄鉱石	石炭
密度	2.0～5.5	1.0～1.6
ビッカース硬さ	400～600	50～70

上表に示すように、石炭と比較して鉄鉱石は非常に密度が高く、そして硬度も高いことがわかります。選別性能として回転ディスク方式が優れていることは確実ですが、それが硬く重い鉄鉱石を取り扱っても壊れないかどうか最大の課題となりました。特にカラジャスの鉄鉱石は品質が高く密度も硬度も高いため、その懸念は一層大きなものとなっていました。

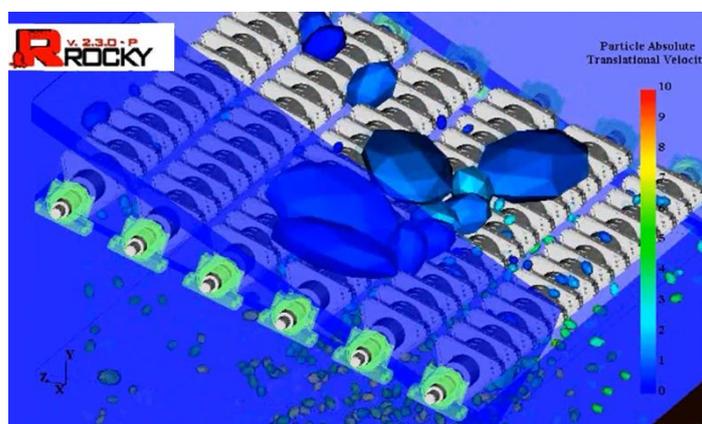


この課題は従来型の設計手法(机上計算)では解決できず、また実機試験をやるためには長い時間と大量のコストが必要となります。そのため、技術チームは ESSS 社と共同で Rocky と ANSYS を用いたシミュレーションによって検討を行うこととなりました。回転スピード、ティルト角、ディスク間の距離及び形状など、最適化しなければならないパラメータはいくつも存在しました。

技術チームは ESSH 社による支援のもと、Rocky によって粒子の挙動を計算し、その情報を ANSYS にエクスポートして機器側の応力評価を行いました。また、Rocky 単体での粒子の挙動評価も含めて装置の設計最適化を行いました。



回転ディスク装置に与える衝撃力(ANSYS による計算)



Rocky によって計算された、回転ディスクを通り抜ける粒子と引っかかる粒子の様子

Rocky と ANSYS を用いた設計最適化にもとづいて装置の設計が行われ、実際の装置の適用が行われました。

新設計の回転ディスクが完成し、選別装置には徹底的な改修が行われました。装置の制御システムは再設計され、そして装置のサポート部材も変更する必要がありました。これらの改修はカラジャスの No.3 および No.4 プラントに対して実施されました。

回転ディスク装置の実装の結果、プラント全体の生産効率が 11.4%アップし、併せて後戻り工程での保守費用や動力費用、メンテナンス費用が大きく削減されました。VALE の技術チームと ESSH 社の協力で設計された回転ディスク装置はカラジャスの硬い鉄鉱石からの衝撃に耐え、目詰まりをすることもなく安定した可動を達成しました。

世界最高の鉄鉱石

VALE 社の保有するカラジャス鉱山は世界最大の露天掘り鉱山です。カラジャスプラントは世界最高品質の鉄鉱石を数百万トンの単位で市場に投入していただくの能力と責任を持っています。鉱石処理プラントは 40 万トン/日の生産能力を持ち、日々採掘される鉱石の搬送は、100 台以上の巨大オフロードトラックによって支えられています。



カラジャス鉱山の鉄鉱石

これらの車両は、「VALE の巨人トラック」という通称で知られ、全長 15 メートル以上、高さ 8 メートルの大きさを誇っています。そのホイールの高さだけでも、人間の 2 倍程度の大きさをもっています。その荷台容積は巨大で、415 人乗りのボーイング 747 ジャンボ・ジェット機の機内容積とほぼ同等です。各トラックは、それぞれ 400 トンの鉄鉱石を搬送する能力を有しています。

VALE の最新の採掘残量レポートによると、カラジャスは 1 年間に 110 万トンを生産しました。そして次の年は 130 万トン/年の生産を目指しています。これは、パリのエッフェル塔を 15000 本建てるのに十分な量の鉄鉱石です。その目標を達成するために、同社は機器改善とともに研究開発に大きな投資をすることを計画しています。



カラジャス採掘場の巨大採掘装置



VALE の巨人トラック

この生産計画シナリオを達成するため、VALE のエンジニアはプロセスを最適化し、生産ロスを削減し、より効率的な機器を開発する必要があります。彼らはシミュレーションツールを用いたプロセス改善に信頼を置いており、投資に対する利潤と、回収するための時間についての計算を、シミュレーションツールによる計算結果にもとづいて予測しています。

Ueld 氏は VALE のシミュレーションツールによる評価について以下のように語りました：「カラジャスにおいては、シミュレーションによる検証を受けていない改善プロジェクトは許可されていません。コンピュータシミュレーションによる検証を経ているということは、今ではプロジェクトの「品質検査済み」という保証書のようなものになりつつあります」

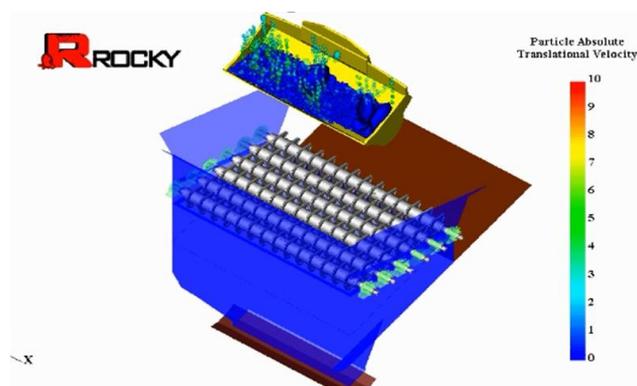
重要なことは、彼らの機器・設備は非常に巨大で、おいそれと実機試験やスケール・モデルでの実験などできないということです。「作ってみたら、動かなかった」という事態は最も避けなければならない事であり、VALE のエンジニアは日々それに頭を悩ませています。そういった彼らの経験にプラスして、シミュレーションツールによる評価を加えることで、彼らはより短い時間で、より精度の高い技術的決断を下せるのです。

この分野での機器のサイズは前述のとおり一般的に巨大であり、効率は規模が大きいほうが高くなります。しかしながら、開発費用や開発の困難さも、規模が原因で問題が発生します。プロトタイプ製作と何百万ドルもかかる新しい機器のテストを考えると、シミュレーション無しのエンジニアリングは絶望的なほどコストがかかるものです。プロトタイプを開発するために何百万ドルものお金と、膨大な時間を費やすことなく判断を可能とするシミュレーション技術は、鉱業や鉱業機器開発のために不可欠な技術です。

「シミュレーションによって、機器改善プロジェクトの効果と費用を事前に予測できるので、機器の新設や改造工事を、社内で正当なものとして評価してもらうことが可能であった」と Ueld 氏は説明しています。

Rocky と離散要素法

離散要素法 (DEM) は、コンピュータ技術の進歩によって徐々にポピュラーになってきている、比較的新しい手法です。このアプローチは、主に固体粒子の大多数から成る粒状材料のシミュレーションに使用されます。連続の式を用いるような CFD 的なアプローチは固体粒子に用いることは不向きで、正しい結果を得ることができません。個別要素法では、対象のシステム内のすべての固体粒子の運動を計算しています。そして、粒子同士の相互作用と、境界面と粒子の相互作用をタイムステップごとに計算して、コンピュータ上で複雑な粒子の動きを再現しています。



鉱石選別装置周りのシミュレーションの様子

ROCKY は粒状の力学的の問題に対して、コンピュータ上の CPU や、新しい技術である GPU の能力を活用して、迅速な問題解決を可能にする強力な DEM パッケージです。

また、Rocky は球形を結合した模擬的な非球形体でなく、「真の」非円形粒子の使用を可能にしています。ダイヤモンドカットしたような多面体、練炭のようなブロック形状、および円筒やカプセルのような形状は、コンピュータ上において、まるで現実世界の粒子のように振る舞うことができます。模擬的な非球形体を用いるアプローチと比較して、それぞれが単一のアイテムとして計算されるので、計算時間はより短くなり、全体の処理時間を短縮することが可能です。具体的には、切子型形状のコーナー1つが球体1つ分程度の計算負荷で済むこととなります。Rocky はほぼ無制限で粒子の形状及び粒径分布を変更することができ、500 万個以上 (2014 年製 Nvidia Titan Black GPU ポ

ード（オンボードメモリ 6GB）での値、それ以上も可能）の粒子をシミュレートすることができます。また、パラメータ変更によって湿った状態、乾燥した状態、およびダスト状になったような条件を与えてシミュレーションを行う機能を実現しています。Rocky の機能は様々なタイプの材料の挙動を再現することができ、移動境界や振動現象を条件として与えることも可能になっています。

ANSYS と有限要素法シミュレーション

ANSYS の FEA ツールは、応力、変形、及び振動特性を含む製品の構造的側面をシミュレートすることができます。ANSYS の FEA ツールは設計変更による構造的影響を、即座に検討することが出来るツールです。これらのツールは簡単に Rocky と錬成することができ、粒子の衝突による構造物への影響を数値的に評価することができます。

ROCKY は他の汎用 DEM コードにはないユニークな特徴を持ち、高速でリアル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行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