配管内のスラリーシミュレーション

Simulation of Slurry Flow in Pipelines

野々上 友也[*1]、高橋 公紀[*2]
Tomoya Nonoue[*1], Kiminori Takahashi[*2]

*1 テクノロジーイノベーションセンター 技術イノベーション部、*2 エンジニアリング本部 EN テクノロジーセンター
*1 Technology Innovation Department, Technology Innovation Center, *2 EN Technology Center, Engineering Division

要旨
当社は、配管を流れるスラリーの固体粒子の堆積と圧力損失を把握するシミュレーション手法を開発した。本稿では、開発したシミュレーションの検証事例およびその信頼性に関して紹介する。

Abstract:
JGC has developed a simulation method to predict solid deposition and pressure drop of slurry flows in pipelines. In this article, some case studies for validation of simulation methods by comparing the results of simulation with those of experiments are described. In addition, we have pointed out some considerations for the CFD simulation of slurry behavior.

１．はじめに

固体粒子が液体中に懸濁したスラリーを取り扱う分野は多岐にわたる。例えば当社が開発したJCF®（JGC Coal Fuel）プロセス *では、石炭スラリーを取り扱う。この他に、超重質油やオイルサンド、オイルシェールといった非在来型資源を扱うプロセス、メタルマイニング等のプロセスにおいても、スラリーの輸送、混合、貯留を伴う。したがって、スラリーハンドリング技術はこのようなプロセスを扱う上で非常に重要である。

Fig.1 に示すように、スラリーを取り扱う際、固体粒子の堆積による流路の閉塞および固体粒子の壁面への衝突によるエロージョンが主な問題となる[1)]。これらは粒子の 3 次元の挙動に起因する現象である。閉塞やエロージョンを回避するためには、適切な流速を選定して設計することが重要である。しかし、既存のプロセスシミュレータでは粒子の 3 次元の挙動を扱わないため、これを活用して適切な流速を選定することはできない。プロセ

---

* JCF®プロセス(JCF® Process)：亜瀝青炭(れきせいたん)、褐炭(かったん)などの低品位炭(LRC: Low-Rank Coal)を高温高圧水(熱水)を用いて改質し重油と同等の流動性を持つ石炭スラリー燃料とする、当社が開発したプロセス(http://www.jgc.co.jp/jp/04tech/04coal/jcf.html)。

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

ス設計時に必要となる圧力損失に関しても、スラリーを扱う際の計算手法が確立されていない。

3 次元の流動状態を把握できるシミュレーション手法として、数値流体力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）がある。CFD を用いて固体粒子の堆積やエロージョンを把握することができれば、適切な流速の選定が可能となる。圧力損失に関しても、精度よく計算することができれば、プロセス設計の信頼性向上につながる。

固体粒子の沈降によって濃度分布ができる現象に関して、Ekambaraらは、配管内スラリーの流動に関してCFDを適用し、実験値と比較・検証した[2)]。しかし、この報告では固体粒子が堆積する場合を含めたモデル化手法は確立できていない。さらに、計算に時間がかかりすぎるという課題がある。また、エロージョンに関しては、気体中のエロージョンを対象とした報告が多いものの、スラリーによるエロージョンの報告は少ない。

当社は、配管を流れるスラリーの固体粒子の堆積と圧力損失に関して、CFD を活用してシミュレーションする手法を開発した。本稿では、これらの現象に関するシミュレーションの検証事例を紹介する。

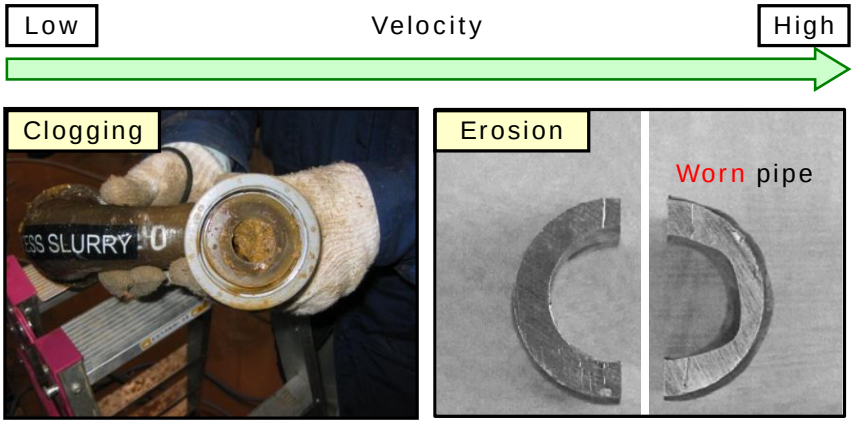


Fig.1　Typical problems in slurry handling.

２．固体粒子の堆積

２．１　水平配管での検証

スラリーを扱う際の二相流のモデル化には多くの手法があるが、適用するモデルによって計算結果が異なってくる。そこで、RocoとShook[3)]が報告している水平配管を流れるスラリーの流動実験結果を対象として、数多くの実験条件についてモデルを検証した。

Fig.2に、水平配管における鉛直方向の砂の濃度分布を CFD で計算した結果の一例を示す。一般的によく使用されるモデル（**Fig.2** 中 CFD(unmodified)）では、計算値が実験値から大きく離れている。しかし、

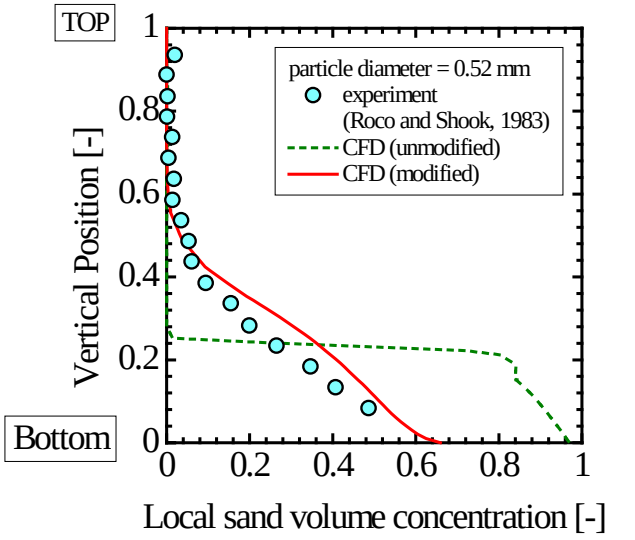


Fig.2　Local concentration profile of settling slurry flow in horizontal pipe.

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

当社で開発したモデル（**Fig.2** 中 CFD(modified)）では、実験値を良好に再現できるようになった。

計算手法に関しても改良を重ね、数百メートルの実機配管を対象としたシミュレーションを短時間でできるようになった。

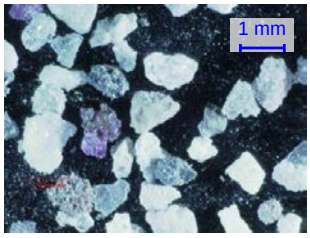
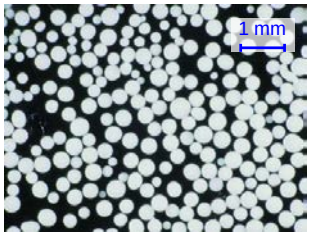
２．２　実機配管を模擬した実験装置での検証

実際のスラリーの流動状況を把握するために、**Fig.3** に示す実機配管を模擬した実験装置を製作した。配管は透明塩化ビニル樹脂製で、水平配管、垂直配管、曲がり配管で構成されている。

この装置を用いて、水と砂のスラリー（以下、水-砂スラリーと呼ぶ）および水とアルミナ粒子のスラリー（以下、水-アルミナスラリーと呼ぶ）を対象に、流動状況を観察した。**Table 1** に使用した砂およびアルミナ粒子の一例を比較して示す。この例では、砂は非球形粒子、アルミナ粒子は球形粒子という違いがあったが、両者の沈降速度はほぼ等しいことが確認された。

Fig.3　Experimental setup.

Table 1　Properties of sand particles and alumina beads

Particle	Sand	Alumina beads
Shape	 non-spherical	 spherical
Mean diameter[mm]	0.84	0.33
Settling velocity [m/s]	0.09	0.06

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

Fig.4 に、**Table 1** で示した粒子を用いた水-砂スラリーと水-アルミナスラリーの、水平配管、曲がり配管での流動状況を示す。固体粒子の沈降速度が等しければ、粒子の形状によらず配管内での固体粒子の堆積状況が等しくなる。そこで、固体粒子の沈降速度を用いて粒子の堆積をモデル化した。

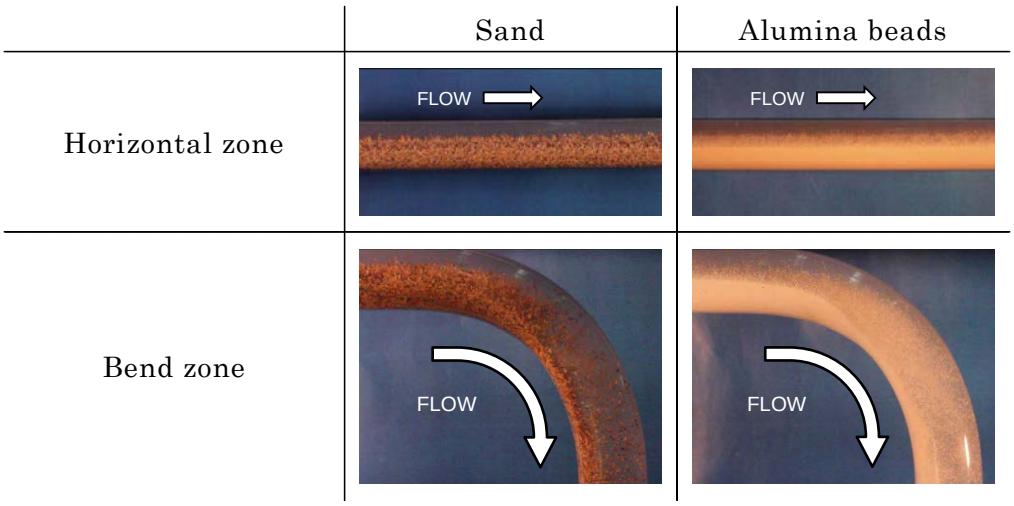


Fig.4　Comparison of flow patterns between sand-water slurry and alumina-water slurry.

Fig.5 に、水平配管における水-砂スラリーの流動実験結果および計算結果を示す。実験結果と計算結果を比較すると、粒子の堆積量が少ない条件では、CFD でのシミュレーション結果が実験結果を良く再現できることが分かった。一方、流速が遅く、粒子の堆積量が多い条件では、CFD では堆積量が少なく計算される傾向となった。これは固体粒子の堆積量が多くなると、本モデル化手法では考慮していない、粒子と壁面および粒子と粒子の間に働く力の影響が大きくなるためと推察される。

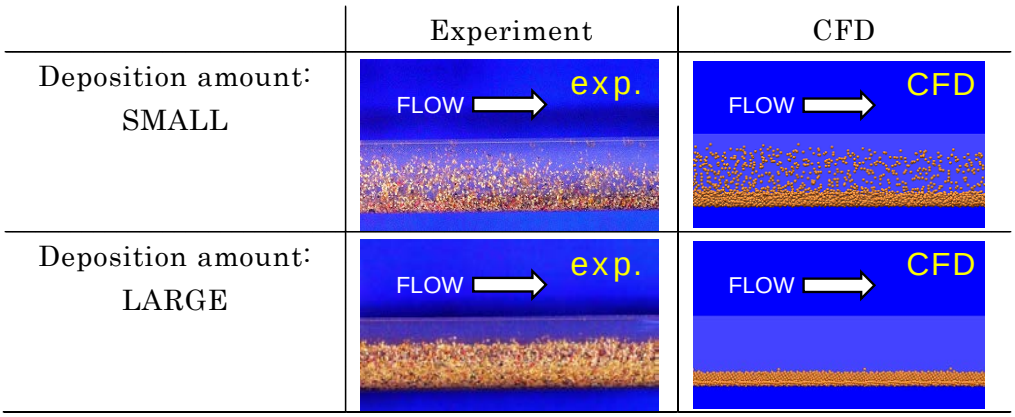


Fig.5　Comparison of sand-water slurry flow patterns between experimental and CFD results at a horizontal zone.

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

Fig.6 に、曲り配管における水-砂スラリーの流動実験結果および計算結果を示す。曲がり配管においても、水平配管のときと同様に、粒子の堆積量が少ない条件では CFD で粒子の堆積を再現でき、粒子の堆積量が多い条件では CFD での堆積量は実験よりも少ない結果となった。

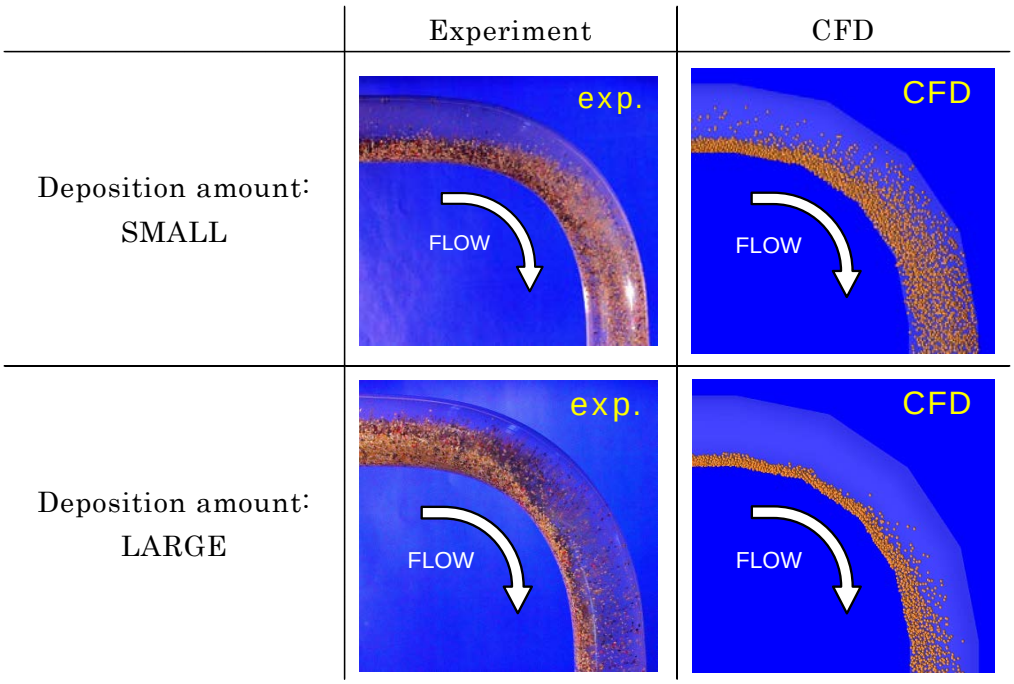


Fig.6 Comparison of sand-water slurry flow patterns between experimental and CFD results at a bend zone.

２．３　粒子堆積量が多い場合のシミュレーション手法（DEM）

２．２節で述べたように、固体粒子の堆積量が多い場合は、粒子-壁面、粒子-粒子の間に働く力を考慮することによって、シミュレーションの精度を高めることができると考えられる。そこで、個々の固体粒子に対して、粒子に作用する力を考慮して粒子の挙動を解析する離散要素法（DEM: Discrete Element Method）を導入して、検証を進めた。

Fig.7 にDEMによるボールミル*のシミュレーション結果を示す[4)]。DEMを用いて実験と等しい安息角†を再現できており、DEMを用いて表現される固体の粒子堆積状況が妥当であることを示している。

---

* ボールミル（ball mill）：セラミックや金属などの硬質ボールを用いて、回転する円筒型胴体内で原料をすりつぶし、微細な粒子へと粉砕する装置。

† 安息角（angle of repose）：土や粉体などの粒状体を積み上げたときに、自発的に崩れることなく安定を保つ斜面の角度。ここでは、水平面に対する、堆積した固体粒子層の傾斜した角度を安息角としている。

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

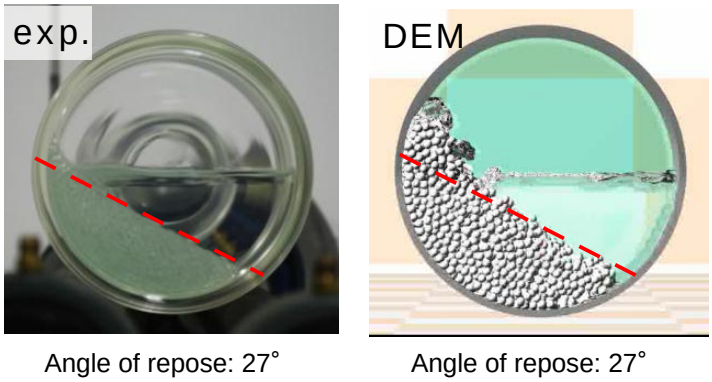


Fig.7　Comparison of solid deposition in a ball mill between experimental and simulation results.

次に、**Fig.3** に示した実験装置のスラリー流動シミュレーションへ DEM を適用した。ここでは、液体の流動には CFD を用い、固体粒子の運動・堆積に DEM を適用した（以下、CFD+DEM と記す）。**Fig.8** に、下り曲がり配管における CFD および CFD+DEM によるシミュレーション結果を、実験結果と並べて示す。

実験では水平配管の半分の高さまで粒子が堆積した。これに対し CFD のみを用いた解析では、粒子の堆積量は実験のおよそ半分と計算された。CFD+DEM では、CFD のみを用いた場合と比べて堆積量が改善し、粒子の堆積量は実験結果に近くなった。これは粒子-壁面および粒子-粒子の間に働く力を考慮する DEM の特徴が反映された結果といえる。DEM におけるモデル化手法を確立していくことで、今後さらにシミュレーションの精度が向上することが期待される。

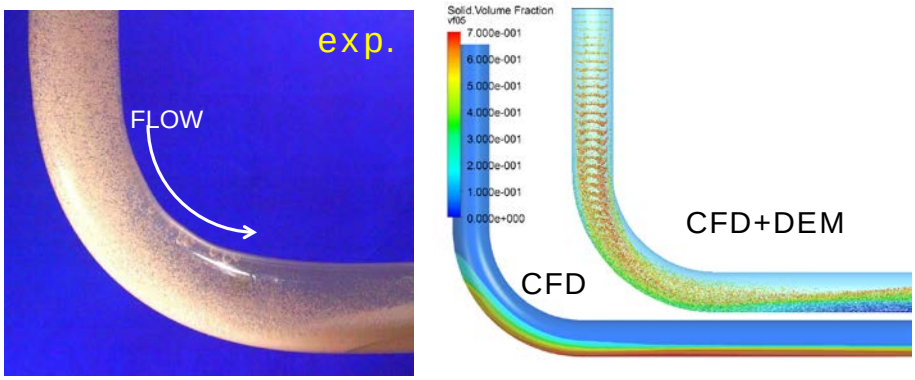


Fig.8　Comparison of solid deposition between experimental and simulation results at the downpipe bend.

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

３．圧力損失

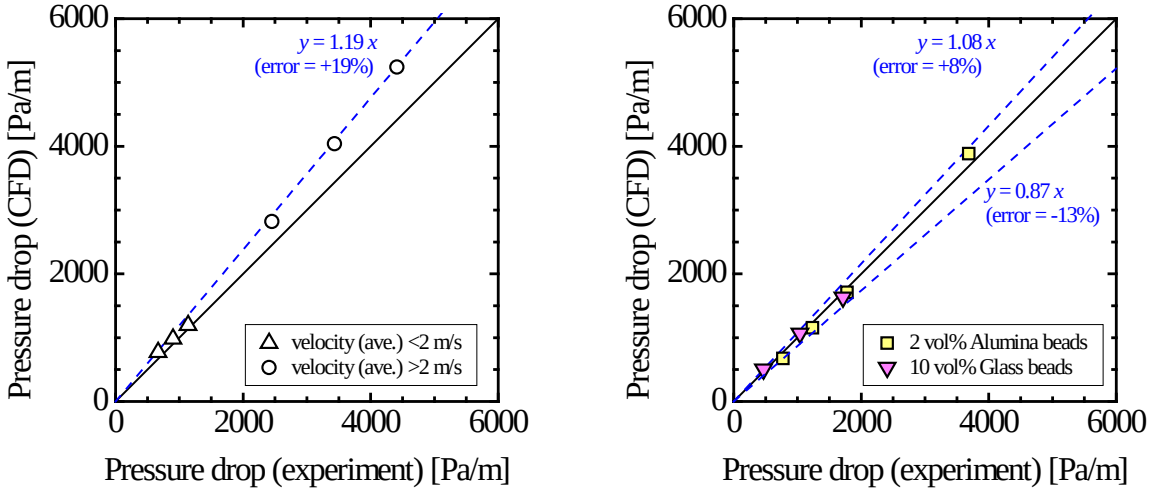
３．１　水平配管での検証

配管の圧力損失の計算では、流体の粘度を把握する必要がある。スラリーの粘度は粒子径分布・固体濃度・粒子形状・固体表面特性などによって変化する。したがって、スラリーの圧力損失の計算では、粘度の取り扱いが重要となる。

対象となるスラリーを分析し、適切なスラリー粘度推算式を用いることで、圧力損失を精度良く計算することができた。**Fig.9(a)**に示すように、水平配管での実験結果[3)]を用いた検証では、実験値に対して計算値の誤差は 20%以内であった。

３．２　実機配管を模擬した実験装置での検証

実機配管を模擬した実験装置（**Fig.3**）におけるスラリーの流動に関して圧力損失の測定を行い、CFD を用いた計算結果と比較した。**Fig.9(b)**に示すように、この場合も適切な粘度推算式を用いることで圧力損失を約±10%の誤差範囲で計算することができた。



(a) Flow in Horizontal pipe　　(b) Experimental Setup

Fig.9　Comparison of Pressure drop between CFD and experimental results.

３．３　実機配管での検証

当社顧客のプラントの配管を対象として CFD を用いた圧力損失シミュレーションの検証を行った。**Fig.10** に示すように、対象とした配管の流路は水平、垂直、曲がり配管で構成されている。配管径は約 40 mm、全配管長は約 50 m である。ここでの流量の調整には、ゴムチューブを押しつぶすことで流路を閉じるピンチ弁を使用している。

流路の途中 4 箇所に圧力計（**Fig.10** 中 PG1～PG4）を設置し、通常運転条件下における圧力測定を行った。また、圧力測定時に配管を流れていたスラリーをサンプリングして粘度等を分析した。その結果、スラリーの非ニュートン性が強いことがわかった。

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

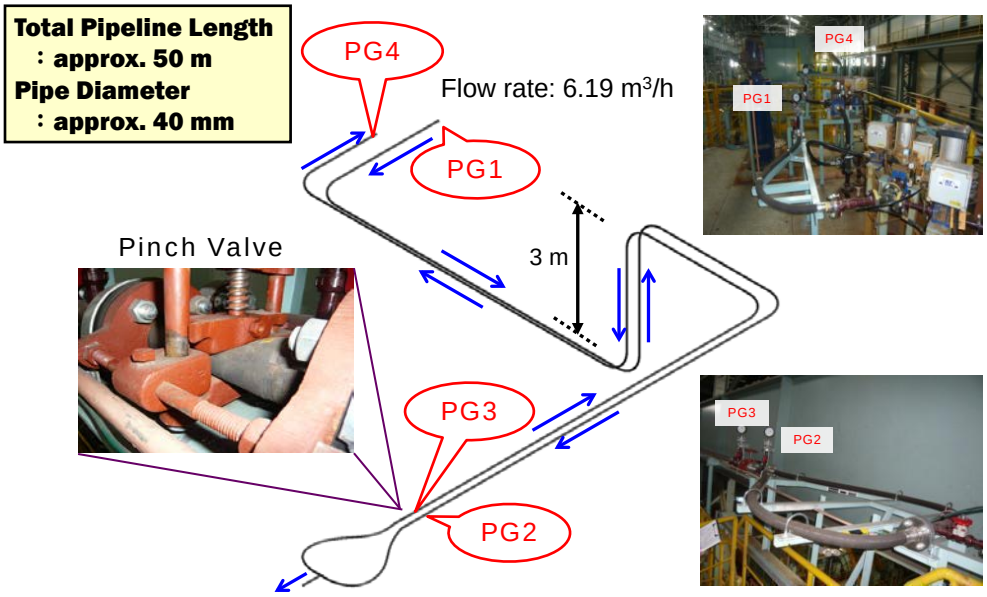


Fig.10　Schematic piping diagram of the pilot plant for a validation of CFD.

Fig.11 に計算結果を示す。計算に用いる粘度として、実測された粘性をベースとしたビンガムモデルを用いた場合、スラリーの非ニュートン性が強く、せん断力により急激に粘性が変化することを CFD の計算モデルへ反映させることができず、圧力損失を再現できなかった。一方、見かけ粘度を用いることで、実機配管内スラリーの圧力損失が実測値とよく一致した。このことから、スラリーの非ニュートン性が強い場合には、見かけ粘度を用いることによって圧力損失の推算精度を向上できると考える。

ここでは、複雑な 3 次元空間の配管ライン、ピンチバルブによる絞りの形状を実測に基づきモデル化している。これらはプロセスシミュレータとは異なり、複雑な 3 次元形状を表現できる CFD のメリットが活かされている事例といえる。

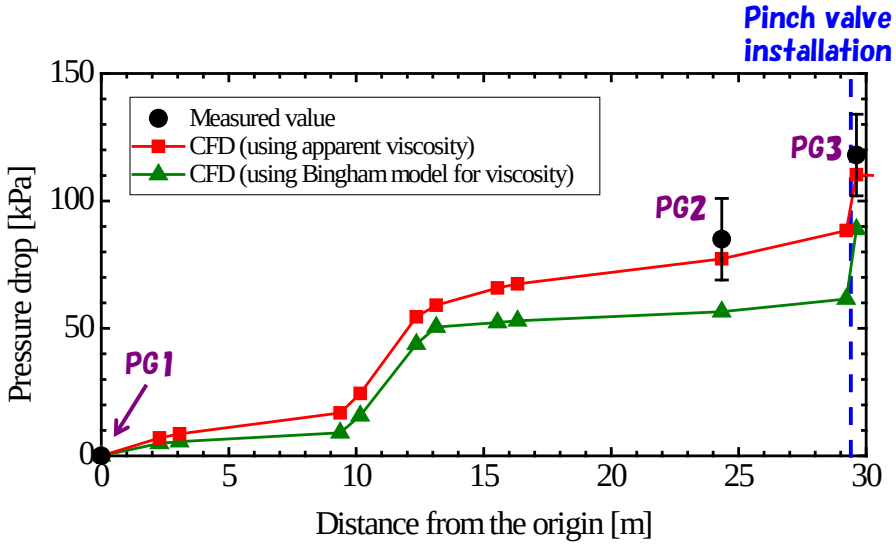


Fig.11　CFD results of pressure drop applied to a commercial scale pipeline.

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.

４．おわりに

以上述べてきたように、配管内スラリー流動に関して固体粒子の堆積を再現し、圧力損失を予測できるスラリーシミュレーション手法を開発した。

シミュレーションに際して、以下のようなスラリー性状の把握が重要となる。

- 粒子の沈降速度を反映した粒子径を使用する。
- 対象となるスラリーに適した粘度推算式を使用する。
- スラリーの非ニュートン性が強い場合は、見かけ粘度を使用する。

今後も実測値を用いた検証を重ね、重要な技術ポイントを明確にしていくことで、シミュレーションの信頼性を向上させていく。

堆積に関しては、配管に加え他のプラント機器への適用・検証を行い、事例を蓄積していく。さらに、本稿では対象としていなかったエロージョンへシミュレーションの適用範囲を拡大して、スラリーハンドリングの技術力を向上させていく。

参考資料

1) Brown G. Use of CFD to predict and reduce erosion in an industrial slurry piping System, *Proc 5th Int Conf on CFD in the Process Industries.* 2006.

2) Ekambara K, Sanders RS, Masliyah JH. Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS CFX, *Ind Eng Chem Res.* 2009;48;8159–8171.

3) Roco MC, Shook CA. Modeling of slurry flow: The effect of particle size, *Can J Chem Eng.* 1983;61;494–503.

4) 山田, 酒井, 高橋, 野々上, DEM-MPS 法による配管内固液混相流の数値解析, 粉体工学会 2011 年春期研究発表会, 2011.

Copyright(C) 2014 JGC All rights reserved.