Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00267

Received date : 25 August, 2021

Accepted date : 6 February, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 14 February, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

ホッパーにおける樹脂ペレットの流動性に及ぼすペレット形状の影響

劉 継紅^{*1}, 谷本 健次郎^{*2}

Effects of pellet shape on the flowability of resin pellets in hopper

Jihong LIU^{*1} and Kenjiro TANIMOTO^{*2}

^{*1} Technical and Innovation Center, Daikin Industries, Ltd.

1-1 Nishi-Hitotsuya, Settsu-shi, Osaka 566-8585, Japan

^{*2} Chemical Divisions, Daikin Industries, Ltd.

1-1 Nishi-Hitotsuya, Settsu-shi, Osaka 566-8585, Japan

Abstract

There is a growing demand for higher performance and thinner communication cables (LANs and USBs) that can transfer data in large volumes at high speed in the era of IoT, 5G. Fluorine resins having a lower dielectric constant and a lower dielectric dissipation factor are used as coating materials for high performance electric wires. To coat the electric wires stably at high speed, it is necessary for resin pellets to flow smoothly from hopper into cylinder in an extruder. In this paper, we propose a simulation method based on the dynamic explicit FEM (Finite Element Method) to evaluate the flowability of resin pellets which are filled into the hopper by free-fall and then flow out from the hopper by gravity. First, we verify simulation results by statistical method to ensure the randomness of the filled state of resin pellets in the hopper and validate the simulation method with experiment results. Next, using the simulation method, we clarify that the shape of resin pellets has a great influence on their flowability and find an optimal pellet shape that can improve the flowability of resin pellets from the hopper to the cylinder in the extruder. Finally, we confirm that the optimal resin pellet shape is in dependent of the amount of pellet, kind of material and angle of hopper.

Keywords : Resin pellet, Flowability, Pellet shape, Hopper, Finite element method, Dynamic explicit, Simulation

1. 緒 言

情報化時代において、データを大量かつ高速に転送できる通信ケーブル (LAN や USB) の高性能化と細線化に対する要求が高まっている。そのため、誘電率と誘電正接が低くかつ優れた耐候性や耐熱性、難燃性等を有するフッ素樹脂が高性能な電線の被覆材として使われている (Teng, 2012)。

通信ケーブルに用いられる電線は押出成形機で樹脂が被覆される。電線の高性能化において被覆状態 (被覆層厚) の安定化が求められるが、細線化に伴う押出成形機の小型化などにより被覆状態の安定化が難しくなる。その原因の一つとして、被覆過程において押出成形機のホッパーからシリンダーに流れる樹脂ペレットの流量が一定にならずに、シリンダーにおいて樹脂が安定的に電線の被覆に供給されないことが挙げられる。電線を高速かつ安定的に被覆するため、押出成形機において樹脂ペレットがホッパーからシリンダーに円滑に流れていく必要がある。

ホッパーにおける樹脂ペレットの流動挙動は樹脂ペレットの大きさや形状の影響を受けることが経験的に知られているが、最適な大きさや形状などについては明確になっておらず、従来、経験と勘に基づいて樹脂ペレットの設計が行われていた。一般的に樹脂ペレットの大きさ (体積) を減少するとその流動性が向上するが、大きさの減少に伴い樹脂表面の帯電量が大きくなり、その取り扱い性が低下する。これに対して、樹脂ペレットは大き

No.21-00267 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00267]

本論文は、第 29 回と第 32 回計算力学講演会 (CMD2016 No.16-4, CMD2019 No.19-19) の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, ダイキン工業 (株) テクノロジー・イノベーションセンター (〒566-8585 大阪府摂津市西一津屋 1-1)

^{*2} ダイキン工業 (株) 化学事業部

E-mail of corresponding author: jihong.liu@daikin.co.jp

さが同じ場合であっても、形状が流動性に影響を及ぼすことも経験的に知られているが、樹脂ペレットの流動現象が複雑なため、理論的または数値解析的な検討がほとんどなされていない。これは、樹脂ペレットは離散的で相互作用が複雑なため、その運動を一義的に定める支配方程式は理論的にまだ確立されていないことに加えて、数値解析的にその運動を解明するには解析モデルの規模や計算時間などの制約により、実対象をそのまま解析することが困難であることにも原因があると考えられる。到来する IoT, 5G 時代に求められる高性能な電線の被覆状態の品質安定性を向上させるには、樹脂ペレットの流動性に及ぼす樹脂ペレット形状の影響を解明し、流動性の高い樹脂ペレットの開発が望まれている。

樹脂ペレットについては、今までは離散要素法 (DEM: Discrete Element Method) による押出成形機内での流動 (Michelangeli et al., 2011) や圧縮 (福澤他, 2015) に関するシミュレーションが報告された。また離散要素法を使った粉粒体の流動シミュレーションにより、ホッパーの形状最適化 (片桐他, 2016) やホッパー形状が偏析性へ与える影響検討 (渋谷他, 2018) に関する研究が行われた。離散要素法は基本的に摩擦のある剛体球状粒子群の数値解析手法で、離散要素法を使ったシミュレーションでは球状以外の粉粒体形状を精確に表現することに困難を伴うのが一般的である。これらに対して、クエットせん断セル内における密な粉粒体の流動を有限要素法でモデル化した研究 (Kabir, et al., 2008) も発表されたが、粒子の断面が円形の二次元有限要素モデルが使われ、粒子の流動に及ぼす粒子の形状の影響については言及されなかった。樹脂ペレットのホッパーでの流動性とその形状との関係に関する報告は、著者らの研究 (劉他, 2016, 劉, 2017, 2019, Liu, 2018, 2019) 以外に見当たらない。これらの研究において、著者らが初めて樹脂ペレットを弾性変形体として扱い、その流動性の評価に三次元の有限要素モデルによるシミュレーションと統計的な手法を取り入れ、樹脂ペレットの流動性とその形状との関係解明を試みた。

本論文では、ホッパーにおける樹脂ペレットの流動性を評価するシミュレーション手法を提案する。このシミュレーション手法は動的陽解法を用いた有限要素解析に基づく。具体的には、まず樹脂ペレットが出口を閉じたホッパーに自由落下することにより、ホッパーにおける樹脂ペレットのランダムな充填状態を生成する。次にランダムに充填された樹脂ペレットが出口を開けたホッパーから重力により流出する過程を解析する。ここでは、樹脂ペレットのホッパーからの流出時間をもってホッパーにおける樹脂ペレットの流動性を評価するとする。そして樹脂ペレットのホッパーからの流出時間の計算結果と実験結果はほぼ一致していることにより、シミュレーション手法の妥当性確認をした。最後にこのシミュレーション手法を用いて、ホッパーにおける樹脂ペレットの流動性に及ぼすペレットの形状や大きさの影響を解明し、流動性が向上する樹脂ペレットの最適な形状を見いだした。またこの最適な形状は、樹脂ペレットの質量と材質およびホッパーの角度に依存せずに成立することを解明した。

2. 樹脂ペレットと電線の被覆と通信ケーブル

樹脂ペレットは、樹脂などの工業原料を加工しやすいように数ミリ程度の粒子状にしたものである。図 1 に示すように、樹脂ペレットは製造方法により回転楕円体に近い形状を有するホットカットペレットと、円柱体に近い形状を有するストランドカットペレットに大別される。本論文では、ホットカットペレットを回転楕円体とみなし研究対象とする。

Hot cut pellets (Spheroidal shape)

Strand cut pellets (Cylindrical shape)

Fig.1 Shape of resin pellets.

電線は導体ワイヤに絶縁体を被覆することによって作られる．図2に熱可塑性樹脂（例えば，フッ素樹脂 FEP：tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene copolymer）の場合，原料の樹脂ペレットがホッパーに投入されシリンダーに流出しシリンダーの中で熔融，混練しながらスクリューで押し出される．押し出された樹脂は，先端のクロスヘッドにある成形金型を通して導体ワイヤの上に被覆され，絶縁体になる．

通信ケーブルは複数本の電線が信号伝送の目的に応じて撚り合わされるものである．電線の被覆状態により撚り合される電線から構成される通信ケーブルの性能が大きく変わる．

3. ホッパーにおける樹脂ペレットの流動シミュレーション手法

本論文では，樹脂ペレットのホッパーへの充填過程とホッパーからの流出過程の流動シミュレーション手法を，動的陽解法を用いた有限要素解析に基づいて提案する．このシミュレーション手法は，ホッパーに充填される樹脂ペレットのランダムな充填状態を数値的に生成するステップと，充填された樹脂ペレットのホッパーからの流出過程を解析するステップと，樹脂ペレットのホッパーからの流出時間を算出するステップから構成される．ここでは，この流出時間をホッパーにおける樹脂ペレットの流動性評価の指標とする．

以下，上記のシミュレーション手法の詳細について説明する．本論文では，樹脂ペレット単体については，連続体の三次元有限要素を用いてモデル化を行う．また樹脂ペレット群は樹脂ペレット単体の集合体であるとする．

3・1 解析モデル

本節では，回転楕円体の形状を有するホットカットの樹脂ペレットについて考える．図3と図4に示すように，樹脂ペレット単体はソリッド要素で，ホッパーはシェル要素でそれぞれモデル化する．また樹脂ペレット群は樹脂ペレット単体の集合体で，ホッパーの上部に配置されその初期状態は静止状態である．樹脂ペレット単体の三次元有限要素モデルは，回転楕円体の赤道半径と極径とからなる断面を分割した二次元有限要素を，極径を中心に360度回転20分割することにより生成する．なお，樹脂ペレット単体の要素数は160で節点数は243である．

Fig.2 Resin pellets flow from hopper to cylinder for electric wire coating.

Fig.3 Shape of a single hot cut pellet and its finite element meshes (160 elements, 243 nodes).

Fig.4 Analytical model of pellets filling into hopper and outflow from hopper.

シミュレーションにおいては、まず図4に示すように、ホッパーの上部に配置された静止状態の樹脂ペレット群が自由落下することにより、出口を蓋で閉じたホッパーに樹脂ペレット群の充填状態を生成する。次に充填された樹脂ペレット群は重力により出口を開けたホッパーから流出する。最後に樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間を算出する。

3・2 シミュレーション結果の妥当性確認

本節では、高性能な電線の被覆に使用されるフッ素樹脂 FEP のペレットを対象に、初期配置状態が異なる樹脂ペレット群の自由落下によるホッパーへの充填とホッパーからの流出について、上記の解析モデルと解析手法を用いてシミュレーションを行う。フッ素樹脂 FEP とホッパーの材料物性を表1に示す。シミュレーションに用いる樹脂ペレットの直径と高さはそれぞれ 3.5mm と 1.6mm で、ホッパーはステンレス（SUS304）製で、その入口と出口の内径および傾斜角はそれぞれ 87.0mm と 11.7mm および 40.0 度である。また樹脂ペレットとホッパーとの間、ならびに樹脂ペレットどうし間の摩擦係数は 0.2（Zeus, 2021）であるとする。なお、シミュレーションには非線形動的陽解法の有限要素解析ソフトウェア LS-DYNA（LSTC,2012）を使用し、解析の時間刻みは解の安定限界を保证するためのクーラン条件による時間増分に 0.9 を乗じた値を用いる。

Table 1 Material properties.

Material name	Young modules [MPa]	Poisson's ratio	Density [$\times 10^3$ kg/m ³]
FEP (Pellet)	500.0	0.34	2.34
SUS304 (Hopper)	193,000.0	0.30	7.93

3・2・1 樹脂ペレットの充填状態の生成とランダムネスの検証

本項では、質量が 10.0g で初期配置状態が異なる 7 種類（No.1~7: 樹脂ペレットを横置きか縦置きに、または横置きと縦置きを適当に組み合わせて配置した状態）の樹脂ペレット群（433 粒、69,280 要素、105,219 節点）と、それらの自由落下により生成されたホッパーにおける樹脂ペレット群の充填状態を図5に示す。この図から 7 種類の樹脂ペレット群の充填状態にはランダムネスの差異がないように見えると推察される。また各々の充填状態における個々の樹脂ペレットの要素節点間距離の分布を図6に示す。これによると、各々の樹脂ペレットの充填状態はほぼ同等の分布を示すことから、同等のランダムネスをもち、それらに差はないと判断できると考える。

一例として初期配置状態 No.7（横置きと縦置きを組み合わせた配置状態）の樹脂ペレット群の自由落下によるホッパーへの充填過程とホッパーからの流出過程を図7に示す。

3・2・2 樹脂ペレットのホッパーからの流出時間

本項では、質量がそれぞれ 10.0g, 20.0g, 30.0g で初期配置状態が異なる上記 7 種類（No.1~7）の樹脂ペレット群

Fig.5 The FEP pellet aggregates of 10.0g with different initial placement state (upper) and the filled state of the pellets in the hopper due to the free-fall (lower). It seems that there is no difference in randomness in the filled state of the pellets corresponding to the initial placement state No.1 to No.7.

がホッパーに充填され、ホッパーから流出する時間のシミュレーション結果を図 8 に示す。なお、質量が 20.0g と 30.0g の樹脂ペレット群はそれぞれ 866 粒（138,560 要素，210,438 節点）と 1,299 粒（207,840 要素，315,657 節点）の樹脂ペレットから構成される。図 8 によると、各々の初期配置状態の違いにより、樹脂ペレット群の流出時間にわずかな差異が見られることがわかった。また流出時間の結果を統計処理し、シミュレーション数と流出時間の変動係数との関係を図 9 に示す。これによると、樹脂ペレット群の流出時間の変動係数は 2.0%以下と低いことが明らかである。またシミュレーション数を増やすと、変動係数が安定的になっていくと予想される。さらに樹脂ペレット群の質量を増やすと、変動係数が低下していくことが図 9 から読み取れる。例えば、質量が 10.0g の樹脂ペレット群の場合は変動係数が 1.5~2.0%であるのに対して、質量が 30.0g の樹脂ペレット群の場合は変動

Fig.6 Appearance frequency distributions of the distance between nodes of elements modeling FEP pellet aggregates of 10.0g. It is seen that the each filled state of the pellets shows almost the same distribution, and it can be judged that they have equivalent randomness and that there is no difference between them.

Fig.7 Filling process of the FEP pellets of 10.0g into a hopper and the outflow process of the filled FEP pellets from the hopper. This figure shows an example of simulation results.

係数が 1.0%以下に低下していくことが明らかになった。

シミュレーション結果に関する上記分析結果を総合すると、いずれの初期配置状態の樹脂ペレット群を使用しても、ホッパーにおける樹脂ペレット群の充填状態と、ホッパーからの樹脂ペレット群の流出時間のシミュレーション結果に統計的に影響を与えないことが予想される。すなわち、どの初期配置状態の樹脂ペレット群を用いてシミュレーションしても、樹脂ペレットのホッパーへの充填状態とホッパーからの流出時間は、統計的には同様なランダムネスを有すると考えられる。

3・2・3 樹脂ペレット群の質量とホッパーからの流出時間との関係

いずれの初期配置状態を用いても、樹脂ペレット群の充填状態と流出時間のシミュレーション結果は統計的に差異がないことが明らかになった。そこで、本項では、初期配置状態 No.7 を使用して樹脂ペレット群の質量を 80.0g まで 10.0g 間隔で増やした場合について、樹脂ペレット群のホッパーへの充填過程とホッパーからの流出過程のシミュレーションを行う。

質量の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 10 に示す。また図 10 に樹脂ペレット群の質量と流出時間との関係を表す近似曲線も一緒に描く。これによると、樹脂ペレット群の質量と流出時間との関係は $y = 0.0299x$ という線形関数式で近似的に表現できることがわかった。ここでは、 y は樹脂ペレット群の流出時間 (s) で、 x は樹脂ペレット群の質量 (g) である。この線形関数式を使えば、任意質量の樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間を簡単に計算することが可能となる。

Fig.8 Changes in outflow time due to the differences in initial placement state of FEP pellets and in mass. It is found that there is a slight difference in the outflow time of the pellets due to the differences in initial placement state.

Fig.9 Number of simulations and coefficient of variation of outflow time of FEP pellets with different mass. It is found that the coefficient of variation of the outflow time of the pellets is as low as 2% or less in either case. It can be also seen from this figure that the coefficient of variation of the outflow time decreases with an increase in the amount of the pellets.

Fig.10 Relationship between mass of FEP pellets and its outflow time from hopper. It is easy to predict the outflow time of the FEP pellets of arbitrary mass using the approximate formula described in the figure, where x (g) is mass, and y is outflow time (s).

3・2・4 樹脂ペレット群のホッパーからの流出実験

本項では、樹脂ペレット群のホッパーからの流出実験を行い、前項で導出した樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間を計算する線形関数式の妥当性確認をする。実験の詳細は以下の通りである。

図 11 に示したフッ素樹脂ペレット群 (FEP: ダイキン工業 (株) 製, グレード NP-102, ロット番号 NP02D61001) を 300.4g 秤量し、図 12 に示した JIS K 6891 で定義される見かけ密度測定用のステンレス製のホッパーに充填する。図 11 に写した樹脂ペレットは、上から見た形が直径 3.5mm の円で、横から見た形が長径 3.5mm, 短径 1.6mm の楕円で近似でき、図 3 の有限要素モデルと同様な形状と寸法を有する。実験においては、樹脂ペレット群の充填状態が流出時間に影響を及ぼすことが予想されるため、樹脂ペレット群をサンプル袋からホッパーに移した後、樹脂ペレット群の粉面を馴染したり押し固めたりすることは行わない。スパチュラでホッパーに軽く触れ静電気を除去した後、底板を勢いよく引き抜いた時刻をゼロ点とし、ストップウォッチで樹脂ペレット群の流出時間を測定する。樹脂ペレット群の流出の完了の判定は目視で行い、樹脂ペレット群の最後の粒がホッパーから排出された時間でストップウォッチを停止させる。上述の測定は 4 回実施し、実験結果は表 2 に示し、平均値を実測値として採用する。この平均値は 9.54s で標準偏差は 0.054s である。

質量が 300.4g の樹脂ペレット群がホッパーに充填された場合について、樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の実験結果と上記線形関数式による計算結果との比較を表 3 に示す。ここでは、充填状態のランダムネスに

Fig.11 Aggregate of FEP pellets and sizes of a single pellet, the top view shape is approximated by a circle with a diameter of 3.5mm, and the side view shape is approximated by an ellipse with a major axis of 3.5 mm and a minor axis of 1.6 mm.

Fig.12 Apparent density measuring instrument (JIS K 6891).

よるシミュレーション結果の変動係数を 1.0%とした。これによると、計算結果は実験結果との平均誤差が 5.87%と工学的には十分良好な精度を有することが明らかになった。計算結果は実験結果をほぼ再現できたことにより、本論文で用いたシミュレーション手法の妥当性確認はできたと考える。なお、計算結果と実験結果の相違の原因として、樹脂ペレット群とホッパーと、樹脂ペレットどうし間の摩擦係数の不確かさ（詳細は省略するが、摩擦係数が大きくなると樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間が線形的に増大することがシミュレーションで確認している。摩擦係数を大きく設定すれば、シミュレーション結果を試験結果と一致させることが可能である）や、シミュレーションでは一様な形状と大きさの樹脂ペレットを用いたが、実験ではすべての樹脂ペレットが完全に一様な形状と大きさでないことなどが挙げられる。

3・2・5 小括

本節では、動的陽解法を用いた有限要素解析に基づいて、小規模な解析モデルでのシミュレーション結果の妥当性確認を間接的にを行い、工学的には十分に良好な精度を有する樹脂ペレット群の流動シミュレーション手法を確立した。また小規模な解析モデルのシミュレーション結果から大規模な実現象の結果を計算できることを確認した。このシミュレーション手法により、樹脂ペレット群のホッパーへの充填とホッパーからの流出の挙動を計算することができるようになる。またホッパーにおける樹脂ペレット群の流動性に及ぼす樹脂ペレット形状の影響を解明し、流動性を向上させる樹脂ペレット形状を探索することが可能となる。

4. 樹脂ペレットの流動シミュレーション結果

本章では、上記のシミュレーション手法を用いて、樹脂ペレット群の流動性に及ぼす樹脂ペレットの大きさと形状の影響を明らかにし、最適な樹脂ペレット形状を探索する。

本章では、まず形状が相似で大きさが異なる樹脂ペレットのホッパーにおける流動シミュレーション結果を示す。次に体積が一定で形状を変化させた樹脂ペレットのホッパーにおける流動シミュレーションの結果を述べる。

4・1 樹脂ペレットの形状が相似形の場合

分かりやすくイメージするため、赤道径と極径との比 α が一定で大きさが異なる相似形の樹脂ペレットの形状

Table 2 Measured test outflow time of FEP (NP-102) pellets of 300.4g.

Test No.	1	2	3	4	Average	σ
Time [s]	9.57	9.49	9.60	9.50	9.54	0.054

Table 3 Predicted and test outflow time of FEP pellets of 300.4g.

Results [s]		Error [%]		
Test	Prediction	Avg.	Max.	Min.
9.54±0.054	8.98±0.090	5.87	7.34	4.39

Fig.13 Some similar spheroidal pellets with the same ratio of equatorial diameter to polar diameter, α .

と有限要素モデルを図 13 に示す．ここで，赤道径の単位は mm で， α は 2.1875 である．質量と赤道径の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 14 に示す．これによると，質量が同じ場合においては，赤道径が小さいほど樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間が線形的に短くなることが明らかになった．これは，すなわち，相似形の場合は，樹脂ペレットが小さいほどホッパーからよりスムーズに流出することができ，流動性がよいことを意味する．なお，樹脂ペレットが小さくなると静電気が発生しやすくなる傾向にあるため，流動性と静電気とのバランスを考慮して実際の樹脂ペレットの大きさを決定する必要がある．

4・2 樹脂ペレットが等積の場合

本節では，等積（体積が一定）で赤道径と極径との比 α をパラメーターとして形状を変化させた樹脂ペレットのホッパーにおける流動シミュレーションの結果を述べる．

4・2・1 樹脂ペレットの赤道径と極径との比の影響

分かりやすくイメージするため，赤道系と極径との比 α の違いによる等積の樹脂ペレットの形状の変化と対応する有限要素モデルを図 15 に示す． α の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 16 に示す．これによると，赤道系と極径との比 α が 1 の真球の場合と比較し，1 より小さい扁長楕円体（長球）と 1 より大きい扁平楕円体（扁球）の場合にそれぞれ流動性がよい形状が存在することが明らかになった．具体的には赤道系と極径との比がそれぞれ約 0.47 の扁長楕円体（長球）と約 2.19 の扁平楕円体（扁球）の場合，樹脂ペレットは流動性が優れることが判明した．これは扁平楕円体（扁球）を有する樹脂ペレットの赤道径と極径との比

Fig.14 Equatorial diameter, mass, and outflow time of FEP pellets with the same α of 2.1875. It is revealed that when the mass is the same, the outflow time becomes linearly shorter as the equatorial diameter of the pellet becomes smaller. This means that, in the case of the pellets having a similar shape, smaller pellets can flow out more smoothly from the hopper and the flowability is better.

Fig.15 Finite element meshes of isovolumetric hot cut pellets with different ratio of equatorial diameter to polar diameter, α .

α が 2.19 のとき、ホッパーにおける樹脂ペレット群の充填状態がランダム最密充填 (Random Close Packing) になると考えられる。すなわち、 α が 2.19 の樹脂ペレット群をランダムにホッパーに充填したときに、最大体積分率が得られ最大充填密度に達するので、樹脂ペレット群がホッパーにおいて最もコンパクトになるため、ホッパーから流出する時間が最も短くなると推測される。扁長楕円体 (長球) を有する樹脂ペレットの赤道径と極径との比 α が 0.47 の場合についても、同様な考察ができると考える。

また最適な扁長楕円体 (長球) と最適な扁平楕円体 (扁球) は、それぞれの赤道径と極径との比が互いに逆数の関係 ($0.47 \times 2.19 \div 1.0$) にあるという興味深い現象が明らかになった。この現象についての考察を今後の課題としたい。

4・2・2 樹脂ペレットの質量と材質、ホッパーの角度の影響

樹脂ペレット群の質量を 20.0g に増やした場合について、赤道径と極径との比 α の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 17 に示す。これによると、樹脂ペレット群の質量が変わっても流動性向上に最適な樹脂ペレット形状は変わらないことが明らかになった。

Fig.16 Relationship between ratio of equatorial diameter to polar diameter and outflow time of FEP pellets of 10.0g. It is revealed that an optimal oblate spheroid and a prolate spheroid with good flowability compared to the sphere which is perceived to have the best flowability. Specifically, for example, when the ratio of equatorial diameter to polar diameter is about 2.19, it is found that the flowability of the pellets is the most excellent. On the other hand, in the optimal prolate spheroid, the ratio of equatorial diameter to polar diameter is about 0.47. It is strangely found that the optimal oblate and prolate spheroid have a reciprocal relationship ($0.47 \times 2.19 \div 1.0$) between ratios of equatorial diameter to polar diameter respectively.

Fig.17 Relationships between ratio of equatorial diameter to polar diameter, α and outflow time of FEP pellet mass of 10g and 20g. It is found that even when the amount of the pellets is changed, the optimal pellet shapes for improving flowability does not change. That is, the optimal pellet shapes do not depend on the amount of pellet.

樹脂ペレットの材質を FEP から PE (polyethylene, ヤング率 1080.0 MPa, ポアソン比 0.30, 密度 $0.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) に変化した場合, 赤道径と極径との比 α の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 18 に示す. これによると, 樹脂ペレットの材質が FEP と PE とのいずれの場合においても, 流動性の向上に最適な樹脂ペレット形状は変わらないことが判明した.

さらにホッパー角度を 40 度から 60 度に変化させた場合, 赤道径と極径との比 α の違いによる樹脂ペレット群のホッパーからの流出時間の変化を図 19 に示す. これによると, ホッパー角度が異なっても, 流動性の向上に最適な樹脂ペレット形状は変わらないことが明らかになった.

すなわち, 樹脂ペレット群の質量と材質, ホッパーの角度が変わっても流動性が向上する樹脂ペレットの形状は変わらないことが明らかになった.

Fig.18 Relationships between ratio of equatorial diameter to polar diameter and outflow time of the FEP and PE pellets of 10g. It turned out that even if the material type of the pellets is changed from FEP to PE, the optimal pellet shapes for improving flowability does not change. That is, the optimal pellet shapes do not depend on the material type.

Fig.19 Relationships between ratio of equatorial diameter to polar diameter and outflow time of FEP pellets of 10g with different hopper angles. It is seen that the optimal shapes for improving flowability do not change even if the hopper angle is different. This means that the optimal pellet shapes are independent of the hopper angle.

5. 結 言

本論文では, 動的陽解法を用いた有限要素法に基づいたシミュレーションにより, 樹脂ペレットのホッパーへの充填とホッパーからの流出を対象とした樹脂ペレットの流動性を評価した.

このシミュレーション手法により，ホッパーにおける樹脂ペレットの流動性を向上させた最適な樹脂ペレットの形状（赤道径と極径との比 α がそれぞれ約 0.47 の扁長楕円体（長球）と約 2.19 の扁平楕円体（扁球））を見いだした．また最適な樹脂ペレットの形状は，樹脂ペレットの質量と材質，ホッパーの角度に依存せずに成立し普遍性を有することもシミュレーションにより確認した．さらに最適な扁長楕円体（長球）と最適な扁平楕円体（扁球）はそれぞれの赤道径と極径との比 α が互いに逆数の関係にあることも興味深い現象である．この現象の解明は今後の課題である．

流動性を向上させた最適な扁平楕円体（扁球）形状は，フッ素樹脂 FEP ペレットの生産に適用され，商品価値の向上や電線被覆など樹脂成形品の品質安定性向上に寄与している．

文 献

- 福澤洋平，重石高志，宗正和美，富山秀樹，山井三亀夫，越塚誠一，DEM による樹脂ペレットの圧縮挙動シミュレーションの開発，第 29 回数値流体力学シンポジウム (2015), C07-2.
- Kabir, M. A., Jasti, V. K., Higgs C. F., and Lovell, M. R., An evaluation of the explicit finite-element method approach for modelling dense flows of discrete grains in a Couette shear cell, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol.222 (2008), pp.715-723.
- 片桐淳，竿本英貴，粒子群最適化と個別要素法を用いたホッパーの形状最適化，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.72, No.1 (2016), pp.49-57.
- 劉継紅，樹脂ペレットの流動性に及ぼすペレット形状の影響，第 22 回計算工学講演会論文集，Vol.22 (2017), E-12-4.
- Liu, J., Optimization of resin pellet shape for high performance LAN cable manufacturing in the IoT era, 15th U.S. National Congress on Computational Mechanics, USNCCM15 Abstracts all (2019), p.452.
- Liu, J., Optimization of resin pellet shape for improving flowability, 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) and 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics, WCCM2018-Abstracts-FINAL (2018), pp.1853-1863.
- 劉継紅，IoT, 5G 時代の高速通信ケーブル用フッ素樹脂ペレットの形状最適化，第 32 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 (2019), F01-2.
- 劉継紅，谷本健次郎，下野武司，動的陽解法による樹脂ペレット流動性向上のためのペレット形状最適化，第 29 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集 (2016), F02-4.
- LSTC, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I & II, Version971 R6.1.0 (2012).
- Michelangelli, O. P., Yamanoi, M., Gaspar-Cunha, A. and Covas, J. A., Modelling pellet flow in single extrusion with DEM, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol.225 (2011), pp.255-268.
- 渋木一晃，加藤啓介，酒井幹夫，DEM シミュレーションによるホッパー形状が偏析性へ与える影響検討，粉体工学会誌，Vol.55, No.8 (2018), pp.439-444.
- Teng, H., Overview of the development of the fluoropolymer industry, Applied Sciences, Vol.2, No.2 (2012), pp.496-512. DOI:10.3390/app2020496.
- Zeus Industrial Products, Inc., Technical Resources, Summary of Material Properties, Lubricity (online), available from <<https://www.zeusinc.com/resources/summary-material-properties/lubricity/>>, (参照日 2021 年 12 月 28 日).

References

- Fukuzawa, Y., Shigeishi, T., Munemasa, K., Tomiyama, H., Yamanoi, M. and Koshizuka, S., Development of compression behavior for polymer pellets by the DEM simulation, Proceedings of the 29th Symposium on computational fluid dynamic (2015), C07-2 (in Japanese).
- Kabir, M. A., Jasti, V. K., Higgs C. F., and Lovell, M. R., An evaluation of the explicit finite-element method approach for modelling dense flows of discrete grains in a Couette shear cell, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol.222 (2008), pp.715-723.
- Katagiri, J. and Saomoto, H., Shape optimization of power hopper using particle swarm optimization and discrete-element method, Journal of Japan Society of Civil Engineers A2 (Applied Mechanics), Vol.72, No.1 (2016), pp.49-57 (in Japanese).

- Liu, J., Influence of Pellet Shape on Flowability of Resin Pellet, Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science CD-ROM, Vol.22 (2017), E-12-4 (in Japanese).
- Liu, J., Optimization of resin pellet shape for high performance LAN cable manufacturing in the IoT era, 15th U.S. National Congress on Computational Mechanics, USNCCM15 Abstracts all (2019), p.452.
- Liu, J., Optimization of resin pellet shape for improving flowability, 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) and 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics, WCCM2018-Abstracts-FINAL (2018), pp.1853-1863.
- Liu, J., Shape Optimization of Resin Pellets for Communication Cable Wire Coating in IoT, 5G Era, (Improving Flowability of Resin Pellets in Hopper), Proceedings of the 32nd Computational Mechanics Conference CD-ROM (2019), F01-2 (in Japanese).
- Liu, J., Tanimoto, K. and Shimono, T., Pellet shape optimization for flowability of resin pellets by dynamic explicit finite element method, Proceedings of the 29th Computational Mechanics Conference CD-ROM (2016), F02-4 (in Japanese).
- LSTC, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I & II, Version971 R6.1.0 (2012).
- Michelangelli, O. P., Yamanoi, M., Gaspar-Cunha, A. and Covas, J. A., Modelling pellet flow in single extrusion with DEM, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol.225 (2011), pp.255-268.
- Shibuki, K., Kato, K. and Sakai, M., Effect of Hopper Shape on Segregation by the Discrete Element Method, Journal of Society of Power Technology of Japan, Vol.55, No.8 (2018), pp.439-444 (in Japanese).
- Teng, H., Overview of the development of the fluoropolymer industry, Applied Sciences, Vol.2, No.2 (2012), pp.496-512. DOI:10.3390/app2020496.
- Zeus Industrial Products, Inc., Technical Resources, Summary of Material Properties, Lubricity (online), available from <<https://www.zeusinc.com/resources/summary-material-properties/lubricity/>>, (accessed on 28 December, 2021).