

論文 最適化および流体解析によるコンクリートレオロジー評価手法の検証

根本 泰則*1・小池 亜門*1・キム ホソブ*1・木村 浩彰*2

要旨：数値流体解析ではビンガム流体の特性を持つものとして、レオロジー定数をパラメータとして解析を行うが、せん断速度に関して評価する手法は確立されていない。そこで、筆者らはせん断速度を未知数として実数値 GA と数値流体解析との連成によりパラメータの同定を行い、計測されたスランプに合わせ込む検証を行った。文献による検証および実験結果との比較検討から、本手法によって得られたせん断速度の最適解によりほぼ一致したスランプが得られたため、実験との合わせ込みが十分可能であることが示唆された。

キーワード：スランプ, CFD, 実数値 GA, せん断速度, 最適化

1. はじめに

フレッシュコンクリートに関するスランプ試験を用いたコンシステンシーの評価に関してこれまでに数多くの報告がされている¹⁾²⁾。これはスランプ試験が現場で行う上で安価で簡易的であり、コンクリートの流動性のある程度正確に測定できることなどによるためである。ただ試験のみで、測定中の流動状況の把握をすることは現実的に難しい。そのため、近年ではコンピュータの演算性能向上に伴い、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) による数値流体解析が盛んに行われている³⁾⁴⁾。特にコンクリートの多くはビンガム流体の特性を持つものとして数値流体解析手法に関するアプローチが多く挙げられている⁵⁾。ところで、ビンガム流体の流動を解くのに最も単純なニュートンモデルを考えた場合、 μ を塑性粘度、 τ_0 を降伏応力、 $\dot{\gamma}$ をせん断速度、 τ をせん断応力とすれば、以下の式を解く必要がある。

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

そのため、数値流体解析をする上で物性値に関する情報 (例えば、降伏応力、塑性粘度、せん断速度)、つまりレオロジー定数である。しかしながらこれらを測定しようとすればスランプ試験の評価だけでは難しい。そのため、従来の研究においてスランプ試験によるスランプとスランプフローの関係からモデル式が導出されている⁶⁾⁷⁾。中でも降伏応力と塑性粘度に関してはスランプや塑性粘度の適用範囲はあるものの多くの経験式・理論式が提案され、実験との比較からよく一致していることが確認されている⁸⁾⁹⁾。しかしながらスランプ試験では実際の流動中のコンクリートからせん断速度の大きさを測定する

ことは困難であることから評価式が確立されていない。筆者らは未知数を含みながら数値流体解析を行い、スランプ試験の実験結果から未知数の同定 (以下、パラメータフィッティング) 方法があれば実現象の再現ができるのではないかと考えた。パラメータフィッティングの手法として再帰計算可能な勾配法をベースとした非線形最小 2 乗法が挙げられるが、初期値の与え方によって大域収束性を保証できないことがある。そこで筆者らは実数値を使用した遺伝的アルゴリズム (Real-coded Genetic Algorithms: 以下、実数値 GA)¹⁰⁾¹¹⁾によるパラメータフィッティングの手法を提案する。実数値 GA では目的関数の勾配に関する情報を用いずに直接探索により最適値を求めることができ、かつ大域的な解を得ることが可能である。従来の研究においては与えられた実験式による未知数のパラメータフィッティングを行い、求めた最適解をもとに CAE 解析との比較検証が行われている¹²⁾¹³⁾。さらに、CFD シミュレータを援用した入力パラメータの最適化に関する研究も行われている¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。本報告ではまず文献 9 で提唱されている降伏応力や塑性粘度を求める式とスランプ試験結果を参考として、スランプが 120 mm 以上 200 mm 以下の事例をもとに CFD シミュレータを援用したせん断速度の最適化に関して検証をした。妥当な検証結果が得られたところで実際の試験結果に基づいて最適化手法の検証を行った。

2. CAE 解析モデルの構築

2.1 CAE 解析に用いる物性値の算出

フレッシュコンクリートの流動解析を行うために CFD シミュレータに必要な物性値は、密度、塑性粘度、およびせん断弾性率である。また、せん断弾性率を求めるた

*1 株式会社ポセイドン CAE 技術部 (正会員) (〒363-0012 埼玉県桶川市末広 2-5-14)

*2 株式会社フローサイエンスジャパン 技術部 (〒111-0041 東京都台東区元浅草 1-6-13 元浅草 MN ビル 7F)

めにはせん断応力が必要になる。

スランプ試験において密度に関しては測定された比重から求めた。降伏応力および塑性粘度に関してはスランプが 120 mm 以上 200 mm 以下における文献 8, 9 で提唱されている式 (2) - (4) を用いた。

$$\mu = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot T \quad (2)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347} (300 - S) + 212 \quad (3)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \approx \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \quad (4)$$

ここで、 μ : 塑性粘度 (Pa・s), ρ : 密度 (kg/m³), T : スランプ試験により計測したスランプ時間 (s), τ_0 : 降伏応力 (Pa), S : スランプ試験によるスランプの測定値 (mm), τ : せん断応力 (Pa), G : せん断弾性率 (Pa) を示す。

2.2 CAE 解析に用いる CFD シミュレータの数値流体解析条件

数値流体解析では、解析領域の離散化を行い、連続の式および運動量輸送式に基づいて圧力ポアソン方程式を解き、速度や圧力等の各物理量を更新していく。離散化手法は様々あるが、本解析で用いる CFD シミュレータでは離散化手法を有限差分法、格子は直交格子で圧力振動抑制のためにスタガード格子を使用している。加えてスランプ試験におけるフレッシュコンクリートの流動は自由表面流れになることから、自由表面の取り扱いが重要になる。CFD シミュレータでは Hirt ら¹⁷⁾ により開発された VOF 法 (Volume of Fluid) を使用している。VOF 法は検査体積内の流体の占有率 (以下、流体率 F) の輸送方程式 (式 (5)) をドナー・アクセプター法で解くことにより各時刻の界面形状を決定している。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (Fu) = 0 \quad (5)$$

ここで、 F : 流体率, t : 時間, u : 各方向成分の速度である。

CFD シミュレータで用いる解析領域とグリッド、およびコンクリートの初期条件を図-1 に示す。解析領域は 2 次元軸対称モデルとし、X 軸方向では 250 mm、Y 軸方向では 400 mm とした。解析に使用した 2 次元直交要素の要素数は約 1400 である。コンクリートの初期形状は高さ 300 mm、底面の幅 100 mm とした。

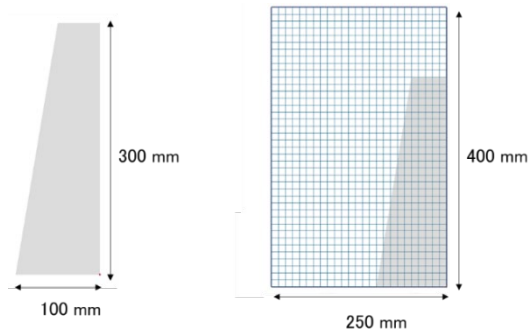


図-1 2次元軸対称モデルにおけるスランプ解析の初期条件および解析領域

3. 実数値 GA におけるパラメータ推定

実数値 GA は集団を生成し、選択、交叉、世代交代を繰り返し行うことで、目的関数を評価し、最適解を探索する手法である。

CFD シミュレータと実数値 GA を用いた本解析における最適解の探索手順を図-2 に示す。最適解の探索手順のアルゴリズムの流れに関して以下に記述する。

(1) 初期集団の生成

初期個体を生成するためには設計変数が必要になる。ここでは設計変数を未知数であるせん断速度とし、一様乱数によってランダムに生成する。ただし、設計変数の生成範囲が大きいと最適解へ収束させるために多くの世代数と個体数が必要になることから、設計変数の生成範囲を指定している。また、一様乱数によって生成される設計変数の偏りを防ぐためラテン超方格を用いている。

(2) 入力パラメータと数値流体解析

生成した設計変数を使用して CFD シミュレータで必要とするせん断弾性率を式(4)から求めて、材料特性の入力パラメータとする。式(2), (3)から求めた塑性粘度および降伏応力も合わせて CFD シミュレータの入力パラメータに加え、数値流体解析を行う。

(3) スランプの評価

数値流体解析により得られた最終形状からフレッシュコンクリートの底面からの高さを出し、元の形状の高さからの差分からスランプを求めた。得られたスランプの結果に基づいて実数値 GA を用いた評価を行う。ここではスランプ試験の計測値との残差平方和が最小となるような目的関数を評価する。つまり、目的関数を $f(x)$ 、数値流体解析によるスランプを S_a とすると、式(6)を解くことに帰着する。

$$\text{Minimize: } f(x) = (S - S_a)^2 \quad (6)$$

目的関数により評価された個体を親個体とする。

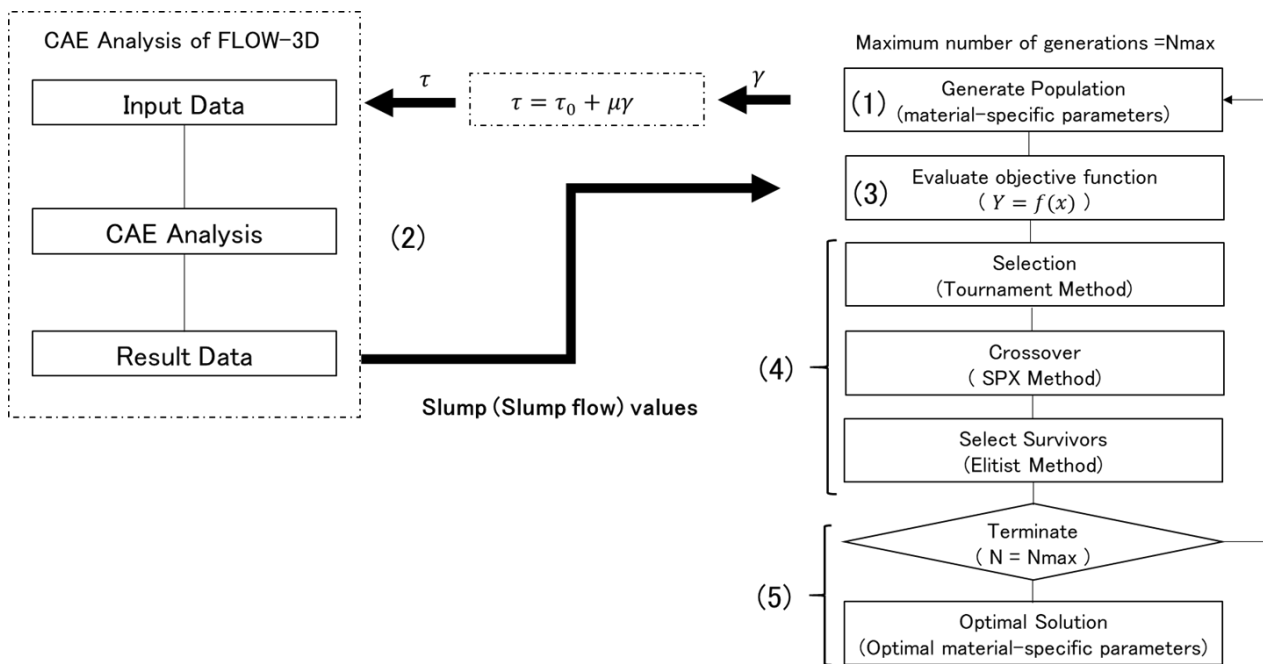


図-2 実数値 GA と数値流体解析との連成によるスランプ評価手法のアルゴリズム

(4) 選択/交叉/世代交代

親個体を使用してまず個体の選択を行う。個体の選択では、子個体を生成するために交叉に必要な分だけ親個体を選択する。選択された親個体を使用して、選択された親個体が持つ平均や分散などの統計量をもとに交叉による子個体を生成する。最後に親個体から一定数の個体を淘汰し、交叉で生成した子個体と残った親個体で次世代の集団を生成する。

(5) 推定終了

(4)で生成した集団を使用して再度(2)~(4)までの評価を繰り返し、世代数に達したら全世代の中での最適個体を出力する。

ここで、検証ケースにおいて最適化における用いた各手法は選択法をルーレット法、交叉法を SPX（シンプレックス交叉）、世代交代モデルを Elitist GA（エリート保存戦略）である^{18),19),20)}。

表-1 2次元軸対称モデルの解析における実数値 GA で用いたモデル、個体数、および世代数

Model(Method) /Size / Generations	
Generation Alternation Model	Elitist (Elitist population size: 1)
Selection	Roulette
Crossover	SPX
Population size	10
Max generations	3

4. 2次元流動解析の最適化結果

2次元流動解析で使用した最適化手法および世代数および個体数を表-1に示す。式(3)から得られた降伏応力、および2次元流動解析の最適化により得られたせん断速度とスランプの結果を図-3に示す。図中の横軸は文献9から引用したスランプが120mm以上200mm以下の試料名を示している。スランプはほぼ一致した結果が得られたが、特に150mm以下ではせん断速度が非常に小さい値となっている。また、150mm以上の事例の中でも、同じスランプでありながらせん断速度が小さく評価されてしまう事例がみられた。この要因としてスランプが降伏応力に依存することを考慮すると、式(3)から密度を用いて算出された降伏応力が小さいことが影響しているためと考えられる。また、スランプが180mm以上の事例においてせん断速度が急激に大きくなる。おそらく2次元解析では奥行方向の流動は考慮されない（奥行方向は1セル分として計算される）ため、せん断速度の影響を加味することができない。すると水平方向に広がる流動の影響のみでせん断速度が調整されるため、特にスランプが大きい事例では最適解が大きく算出されてしまうことが考えられる。以上のことを踏まえてまず降伏応力については、降伏応力を算出する式(3)の切片を調整し再評価を行った。

また本解析を3次元に拡張し、せん断速度において改善が見込まれるかにおいて検討を行った。

5. 3次元流動解析の最適化結果

前節における検討の結果、切片の値を712とした。また、3次元に拡張したときのCFDシミュレータで使用する

る最適化の各手法を表-2に,初期条件と解析領域を図-4に示す。解析領域内で使用する要素数は196000である。実数値 GA の選択法および各種パラメータを変更したのは,3次元への拡張に伴い,設計変数の範囲を変更したためである。再評価を行った降伏応力,および最適化により得られたせん断速度とスランブの結果を図-5に示す。図中の横軸は文献9から引用したスランブが120mm以上200mm以下の試料名を示している。スランブはほぼ一致した結果が得られ,せん断速度についてもスランブの増加とともに大きくなる傾向が得られた。

以上の結果から3次元におけるCFDシミュレータによる数値流体解析と連成した最適化において良好な結果が得られていると考え,実際の実験でのパラメータフィッティングが行えるかについての検証を行った。

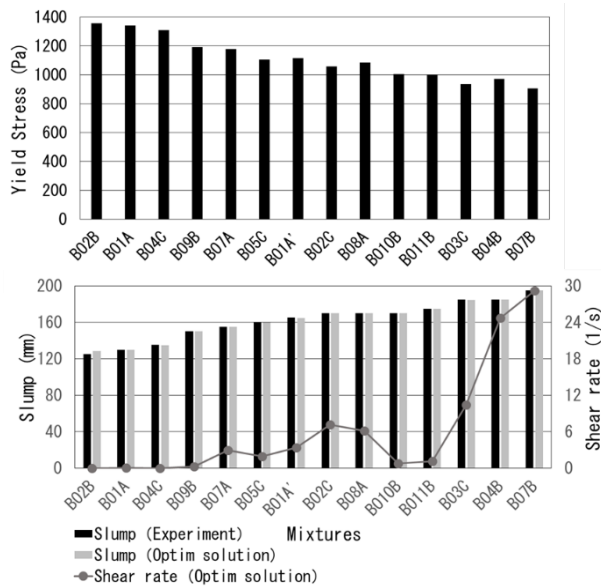


図-3 数値解析で使用した降伏応力と最適化によって得られた文献9から引用した試料のせん断速度およびスランブ

表-2 3次元モデルの解析における実数値 GA で用いたモデル(手法),個体数,および世代数

Model(Method) /Size / Generations	
Generation Alternation Model	Elitist (Elitist population size: 2)
Selection	Tournament (Number of size: 2)
Crossover	SPX
Population size	10
Max generations	4

6. 実験結果と3次元流動解析の最適化の結果比較
最適化に用いた各手法および世代数と個体数について

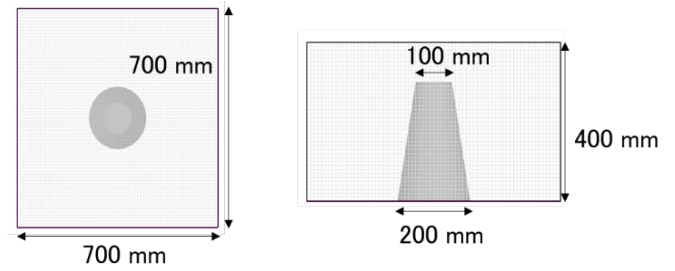


図-4 3次元モデルの解析における解析領域および初期条件

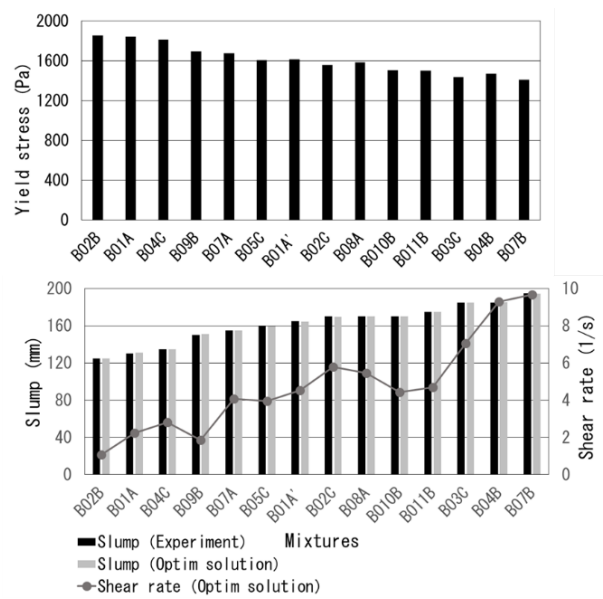


図-5 再評価により得られた降伏応力と最適化によって得られた文献9から引用した試料のせん断速度およびスランブ

表-3に示す。スランブ試験による密度とスランブ時間,およびスランブ値を表-4に示す。ここで,算出された降伏応力1606.81 Pa,塑性粘度は161 Pa·sである。CFDシミュレータで用いた初期条件および解析領域は前節と同じである。

表-3 スランブ試験における実数値 GA で用いたモデル(手法),個体数,および世代数

Model(Method) /Size / Generations	
Generation Alternation Model	Elitist (Elitist population size: 2)
Selection	Tournament (Number of size: 2)
Crossover	SPX
Population size	50
Max generations	4

表-4 スランプ試験で用いた比重, スランプ時間, スランプおよびスランプフロー

Experiment Data	
Density (kg/m ³)	2300
Slump Time (s)	2.8
Slump (mm)	165
Slump Flow (mm)	280

最適化によって得られた解析結果について図-6~8に示す。図-6は実験と解析結果の残差平方和（以下、評価値）の推移を示しており、第3世代における集団内でせん断速度の最適解が6.0806(1/s)、評価値が約16(mm²)、つまり実験との誤差が約4mmであることがわかる。評価値の推移をみると世代が進むにつれてばらつきが小さくなっていく様子が示された。また、図-7において各世代のスランプとスランプフローの値を示す。初期集団および第1世代ではばらつきが大きい、第2世代以降から実験値に近づいていく様子がわかる。これは世代が進むにつれて、選択法により評価値が良くない個体が選択されにくくなることで生成される子個体が最適解近傍に収束していくこと、世代交代モデルによって評価値が良い個体が次世代に引き継がれる効果が挙げられる。

実験によるスランプ形状、最適化によって得られたスランプ3次元形状、および断面形状を図-8に示す。形状はほぼ一致した結果が得られているが、頭頂部の窪みとコンクリート底面より少し上の部分が丸みを帯びてはらみだす変形が解析結果の方がやや大きい。これは配合される粗骨材の影響とスランプコーンの引き上げによる効果が影響していると示唆されるため、今後はスランプコーンおよび粗骨材の影響を加味して最適化を行う検証も必要だと考えられる。

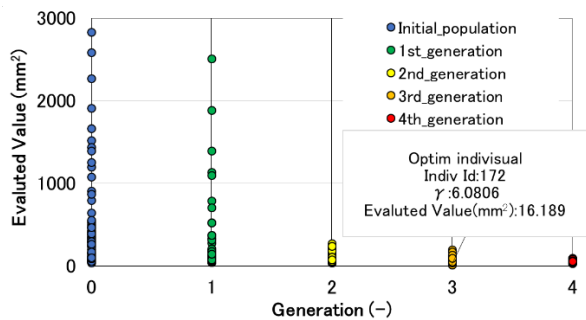


図-6 最適化によって得られた各世代の評価値（残差平方和）

7. 結論

本報告では実数値 GA を用いて CFD シミュレータを援用した最適化により、未知数であるせん断速度のパラ

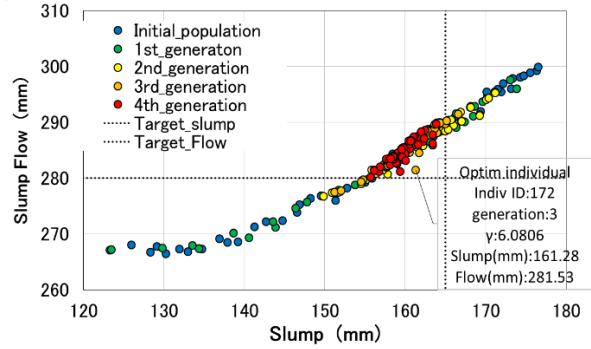


図-7 各世代のスランプとスランプフローの分布

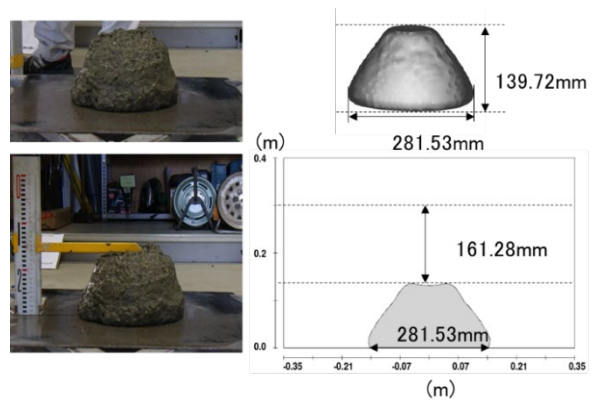


図-8 実験と最適解のフレッシュコンクリートの比較

メータフィッティングを行い、文献 9 を用いた検証と実際の実験への適用を行い本手法の妥当性を検証した結果、以下のことが得られた。

1. 文献 9 を用いて降伏応力と塑性粘度を求め、2次元軸対称モデルを用いてせん断速度の最適化を行った。その結果、スランプが 150 mm 以下の事例ではせん断速度が非常に小さくなり、150 mm 以上の事例で同スランプでもせん断速度の差が大きくみられた。そのため降伏応力の式の調整および 3次元への拡張をした結果、スランプの一致とせん断速度において妥当な結果が得られた。
2. 実際に行った実験結果をもとに本手法を用いてせん断速度のパラメータフィッティングを行い、実験結果のスランプおよびスランプフローに合わせる事ができるかを検証した。その結果、4mm 程度の誤差で合わせ込むことができた。ただし、コンクリート底面より少し上の部分が丸みを帯びてはらみだす変形が解析結果の方がやや大きい点に関しては、粗骨材やスランプコーンの引き上げによる影響を加味した最適化を行う必要があると示唆され、今後の課題といえる。

参考文献

- 1) 谷川 恭雄,森 博嗣: フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法- スランプ値からなにがわかるか-,コンクリート工学,Vol25,No5,pp4-16,1987.5
- 2) 谷川 恭雄,森 博嗣: フレッシュコンクリートの流動解析技術の現状,コンクリート工学, Vol.32, No.12, pp.30-40, 1994.12
- 3) Heirman, G.,: Modelling and quantification of the effect of mineral additions on the rheology of fresh powder type self-compacting concrete, Heverlee : Arenberg Doctoral School of Science, Engineering & Technology , 2011,327p
- 4) Roussel,N.: Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results,Materials and Structures (2006) 39:501-509
- 5) 西藤 潤,小野 耕平: 自由表面を有する非ニュートン流体の数値計算に関する基礎研究,土木学会論文誌 A2(応用力学),Vol. 68,No. 2 (応用力学論文誌 Vol. 15),I_179-I_186,2012
- 6) BARBOSA, M. P., MACIEL, G. F., CASTRO, A.L., REIS, J.F.A., LEMOS, K.A.A.: Determination of rheological parameters of mortar and concrete by alternative techniques, IBRACON Structures and Materials Journal, Volume 4, Number 3 ,August, 2011, p. 440-480 , ISSN 1983-4195
- 7) Karthikeyan Jayakumar : Rheological Behaviour of Binary and Quaternary Blended High Performance Concrete Mixes Using Modified Slump Cone Test, *International Journal of Advanced Engineering Applications*, Vol.2, Iss.5, pp.116-131 (2013)
- 8) Ferrarus, C.F. and de Larrard,F. : Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete, *Cement, Concrete, and Aggregates*,CCAGDP,vol.2, Dec. 1998 pp241-247
- 9) Ferrarus, C.F. and de Larrard,F: Testing and Modelling of fresh concrete rheology, *NIST (National Institute of Standards and Technology) Report 6094*.Washington: NIST
- 10) 小林 重信: 実数値 GA のフロンティア,人工知能学会論文誌,24 卷,1 号,p.147-162 (2009)
- 11) 佐藤 浩,小野 功,小林 重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価,人工知能学会論文誌,12 卷,5 号,p.734-744 (1997)
- 12) 小池 亜門,キム ホソブ,木村 浩彰: 熱硬化性樹脂解析における材料固有のパラメータの最適化手法の検証,プラスチック成形加工学会誌 成形加工_第 35 卷第 11 号技術報告(2023),p390-393
- 13) 小池 亜門,長尾 北斗,木村 浩彰: 高精度な発泡解析を行うための材料固有のパラメータの最適化,プラスチック成形加工学会誌 成形加工_第 34 卷第 12 号 (2022),p.460-464
- 14) Ando,H.,Minamide,D.,Takagi,Y.,Yano,K.,Nakamura,N., Sano,M.,Aoki,T.,Nemoto,Y.: Optimization of Ladle Tilting Speed for Preventing Temperature Drops in the Die Casting Process,Journal of Casting & Materials Engineering Vol. 6 No. 4 (2022) 69-75
- 15) Kanazawa, K., Yano, K.: Computational Fluid Dynamics Optimization of Shape of Sprue for Die Casting Considering Product Quality, 49th IEEE Conference on Decision and Control, December 15-17, 2010, Hilton Atlanta Hotel, Atlanta, GA, USA
- 16) Kanazawa, K., Yano, K., Nakada, T.: Motion Curve Optimization Algorithm Using Genetic Operations and Its Application to Bottling Machine, 51st IEEE Conference on Decision and Control, December 10-13, 2012. Maui, Hawaii, USA
- 17) Hirt, C. W., Nichols, B. D., Hotchkiss, R., SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries , Los Alamos Scientific Laboratory , (1980), pp.1- 32
- 18) 北野 宏明: 遺伝的アルゴリズム,人工知能学会論文誌,7 卷 1 号 p. 26-37 (1992)
- 19) 樋口 隆英,筒井 茂義,山村 雅幸: 実数値 GA におけるシンプレックス交叉の提案,人工知能学会論文誌, 16 卷, 147-155 (2001)
- 20) 廣安 知之,三木 光範,福永 隆宏: 遺伝的アルゴリズムにおける実数値ベクトル表現,世代交代モデル,母集団分割効果の検討: 同志社大学理工学研究報告,The science and engineering review of Doshisha University 44 (1),25-35,2003-04
- 21) Shyshko,S.: Numerical simulation of the rheological behavior of fresh concrete (2013)
- 22) Vanhove, Y., Djelal, C.: FRICTION MECHANISMS OF FRESH CONCRETE UNDER PRESSURE, (IJCIET), ISSN 0976 – 6308 (Print), 0976 - 6316(Online) Volume 4, Issue 6, November-December(2013), pp.67-81
- 23) 佐藤 史隆: MGG における個体数, 交叉回数, 交叉手法の検討, 2003. [Online] .Available : [http : //mikilab.doshisha.ac.jp/dia/monthly/monthly03/20031201/sato.pdf](http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/monthly/monthly03/20031201/sato.pdf)
- 24) 三島 直生,谷川 恭雄,森 博嗣,黒川 善幸: せん断ひずみ依存型粘塑性モデルを用いたフレッシュモルタルの流動シミュレーションに関する研究,日本建築学会構造系論文集 第 541 号,31-35(2001)