

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02354

研究課題名（和文）フレッシュモルタル流動則の一般化と流動解析への実装およびレオロジーへの理論展開

研究課題名（英文）Generalization of flow regularity of fresh mortar for its implementation to the flow simulation and theoretical extension to rheology

研究代表者

岸 利治（KISHI, Toshiharu）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,700,000円

研究成果の概要（和文）：二重円筒型の回転粘度計で測定された非ニュートン流体の既存の流動速度分布の規則性を詳細に検討した結果、流動速度が増加して流動場が拡大すると、稼働端近くにはニュートン流動する領域が出現すること、および、残りの非線形領域の流動速度分布は2次関数もしくは3次関数で近似できることを明らかにした。そして、レオロジーの分野で“エネルギー逸散の系”と解釈されている非ニュートン流動に、流動速度分布の関数形を微分して得られる1次関数（2次関数の微分）もしくは2次関数（3次関数の微分）に従ってせん断応力が減衰するという明確な応力伝達の減衰メカニズムが存在することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

どろどろの流体の科学と称されるレオロジーでは、粘度が主たる興味の対象であるが、MRIを用いて計測されたスラリー等の既存の流動速度分布のデータを詳細に分析した結果、全ての流動速度分布は2次関数もしくは3次関数の何れかで近似できることと、流体のせん断応力伝達には比較的単純で明確な減衰メカニズムが存在することを明らかにしたことの学術的意義は高い。また、広い空間では、力のつり合いが成立しナビエ・ストークス方程式が適用できる水に代表されるニュートン流体の流動も、狭小空間中では極めて高い粘性を示すことから、本研究で明らかにした流動の一般的な規則性の中に特殊な理想形態として包含される可能性が指摘できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, various velocity profiles of different viscous fluids obtained by using MRI technique at different rpm values are analytically analyzed to find the flow regularity and understand the shear stress reduction mechanism in Couette flows. Initially, the Newtonian region was identified in some velocity profiles of Non-Newtonian fluids near the rotor and the Newtonian velocity equation is applied to exclude the Newtonian region from the whole sheared region to identify the rest of Non-Newtonian region present. Subsequently, it was found that this remaining Non-Newtonian region found in almost 50 velocity profiles can be either fitted by the quadratic equation or the cubic equation. This indicates that there exists a simple and clear mechanisms for the shear stress reduction and the energy dispersion during the shear transfer in Couette flows, which are represented by the differential of these velocity functions.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：セメント・コンクリート 流動速度分布 せん断速度 レオロジー 減衰

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 極めて水セメント比の低い超高強度コンクリートの開発と過密配筋箇所へのコンクリートの確実な充填にとって、セメント粒子の分散性能とフレッシュコンクリートの流動性は極めて重要な特性であるが、分散剤の技術開発が長足の進歩を見せる一方で、セメント粒子の凝集分散構造の実態や高性能 AE 減水剤 (SP) の作用機構の理論的な解釈は十分とは言えない状況であった。このような背景の下、申請者らは、二重円筒型の回転粘度計を用いてフレッシュモルタルの見かけのせん断速度 (X 軸) - せん断応力 (Y 軸) 関係を取得し、SP 添加率を変化させた場合のこれらの関係を外挿した直線群が、X 座標・Y 座標とも負である第三象限において焦点を結ぶという規則性と、その焦点位置が回転粘度計のローターの回転数を切り替えてからの経過時間に依りて動的にシフトし、その軌跡が正の傾きを持った線形関係を示すという規則性を発見した。そして、焦点軌跡が示す意味について塾考した結果、数 mm サイズの細骨材(砂)を含むフレッシュモルタルを用いた実験では、ローターと容器の間のクリアランスを 8mm 程度に設定して実験を実施しており、この状況では、レオロジー分野で一般的に想定している単純ずりの想定とせん断速度の線形性の仮定を置くことの妥当性に疑義が生じ、ビンガム流体と規定される流体の規則性を詳細に解明することで、レオロジーにおける前提条件である上記の想定と仮定の妥当性を検証する必要があると考えるに至った。

(2) また、SP 添加率を変化させた場合の見かけのせん断速度 - せん断応力関係の直線群が焦点を共有するという事実は、この焦点が発生するせん断応力を決定付けるせん断速度の基点であることを示しており、回転粘度計のローター極近傍のせん断速度が、原点からの見かけのせん断速度よりも焦点の X 座標の絶対値分だけ実際には速いということを示している。そして、仮想的にクリアランスを変化させて焦点が焦点軌跡上の特異点に位置する場合の規則性について考えると、焦点軌跡の X 切片上に焦点がある状態は容器のクリアランスと流体のせん断流動領域が一致した状態と考えられ、焦点軌跡の Y 切片上に焦点がある状態は、ビンガムが細管を用いた実験で降伏値の存在を発見したのと同様に、単純ずりの想定とせん断速度の線形性の仮定がほぼ完全に成り立つと考えられるほどにクリアランスが狭い状態と考えられた。このようなフレッシュモルタルのせん断速度 - せん断応力関係を論理的に説明することができる解釈が正しいとすれば、ビンガム流体と見做すことができるフレッシュモルタルの流動特性として、X 切片の絶対値分だけローター極近傍のせん断速度は見かけのせん断速度よりも大きく、流体には固有のせん断流動範囲が存在するということになり、二重円筒型の回転粘度計における比較的クリアランスが大きい一般的な実験条件では、レオロジーの常識である単純ずりの想定とせん断速度の線形性の仮定が多くの場合で成り立っておらず、非ニュートン流体の現実の流動速度分布 (せん断速度分布) は非線形性を示すものと考えられた。

(3) 以上のことから、フレッシュモルタルの流動の規則性を本質的に明らかにすることで、セメント系材料やビンガム流体に留まらず、非ニュートン流動を扱うレオロジー全般への理論展開が可能になるのではないかと考えた。また、フレッシュモルタルの流動の規則性を明らかにすることにより、流動解析に組み入れるべき構成則の高度化が図れるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

フレッシュモルタルを含むスラリーが示す流動の規則性を詳細に分析して、ビンガム流動の支配機構の解明を目指すこと、また、流動場における流動速度分布の規則性に対する詳細な分析を通して、ビンガム流動に留まらず、偽塑性流動、ダイラタント流動などの非ニュートン流動全般を包含する流動の規則性のメカニズムを明らかにすること、さらに、提案する理論が、水に代表されるニュートン流体が微小空間中で示す特徴的な流動挙動をも包含できる一般性の高い規則性であることを検証し、理論の一般化を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 当初、二重円筒型の回転粘度計を用いた実験により、フレッシュモルタルを含むスラリーのせん断速度 - せん断応力関係を取得して、研究開始当初の背景として多くの示唆を得ていた焦点軌跡上の焦点の動的なシフトについての検討を行うことでビンガム流動理論の一般化に向けた検討を行う予定であったが、事前の検討を重ねた結果、非ニュートン流体の現実の流動速度分布 (せん断速度分布) の非線形性の規則性を詳細に検討することが、ビンガム流体を含む非ニュートン流体の流動の規則性の本質に迫る手段として有効と考えられたことから、当初の計画を変更して、非ニュートン流体の流動規則性の理解とレオロジー全般への展開を図るために、せん断場における流動速度分布に関する文献調査を行い、既往のデータを用いて、せん断場における流動速度分布の規則性を詳細に検討することとした。その結果、2000 年代の約 10 年間の間に、MRI を用いて非ニュートン流動のせん断場における流動速度分布を詳細に測定したデータが 10 編程度存在することが確認できたので、これらのデータを詳細に分析することで、流動の規則性の検討を行うこととした。

(2) 回転粘度計の流動場における流動速度分布を MRI で測定する手法では、MRI 測定部分が大きかりであるために、相当に大規模な実験設備を整えなければ自前での実験の実施が困難であることと、トルクが測定できる駆動部と流動速度分布が測定できる流動場が遠く離れてしまい厳密なせん断速度 - せん断応力関係が取得できないということから、石灰石微粉末サスペンションを対象として回転粘度計を用いて流動場表面における流動速度分布を簡易に測定できる計

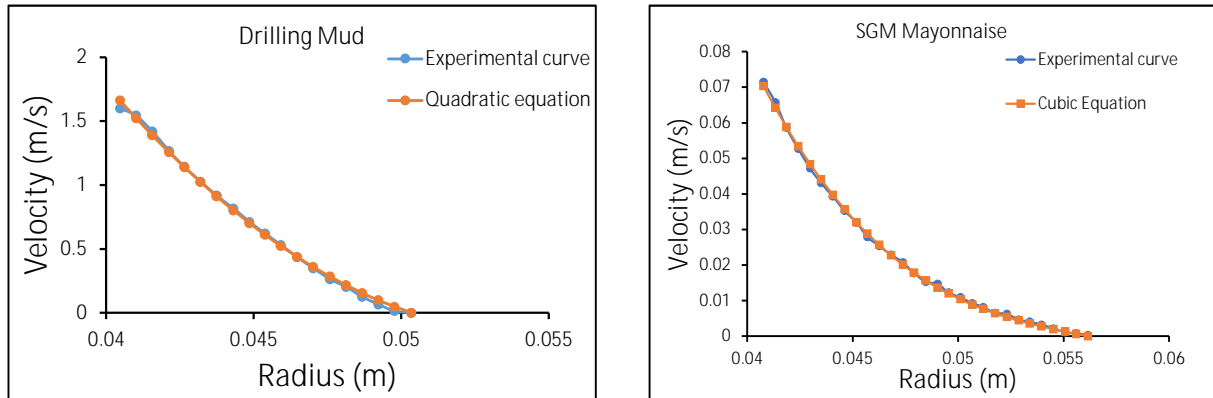


Fig. 1 : Fitting of velocity profile by (a) Quadratic equation (b) Cubic Equation

測手法の開発を行った。この手法の開発は、せん断流動開始前の静的な状態から、ローターの回転速度の上昇に伴って、瞬間的に全域流動するという流動開始初期の流体の固体的な挙動や、その後座屈したように流動を開始する状況を詳細に観察することに寄与した。

(3) 構築を目指す流動構成則の流動解析への実装可能性を検討するため、既存の流動解析ソフトを使用した検討を行ったが、一般的な流動解析ソフトでは連続体における力の釣り合いやニュートン流動を仮定したナビエ・ストークス方程式の成立を前提としていることから、非ニュートン流動の詳細解析には適さないことを確認し、せん断場における流動速度分布の既存の文献データをを用いた非ニュートン流動の規則性の理論的な検討に注力することとした。

4. 研究成果

(1) 二重円筒型の回転粘度計と MRI を使用して測定された各種非ニュートン流体の流動速度分布に関するデータを公表されている文献から多数収集し、それらの流動速度分布の規則性の検討を行った結果、既往の文献における非ニュートン流体の流動速度分布約 10 個の半数が 2 次関数形で近似できることを発見した (Fig.1(a))。

(2) また、残りの半数の流動速度分布の規則性の検討を行った結果、それらの流動速度分布は 3 次関数形で近似できることを発見した (Fig.1(b))。

(3) 次に、この規則性は回転粘度計の流動場内の不動領域と流動領域の境界である流動先端側で明確に認められる特徴であり、流動速度が増加して流動場が拡大すると、稼働端近くでは流動速度分布の非線形性が薄れて線形分布、すなわち単純ズリに近い流動速度分布となることを確認した。このことは、回転速度の上昇に伴ってローター近傍の流動場にニュートン流動する領域が出現することを意味している。

(4) ローター近傍のニュートン流動する領域を除外することにより、残りの流動先端側の流動場における流動速度分布は、2 次関数 (Fig.1(a)) もしくは 3 次関数 (Fig.1(b)) の何れかで精度良く近似できることがさらに明確となった。

(5) このことは、レオロジーの分野で“ エネルギー逸散の系 ” と解釈されている非ニュートン流動に、流動速度分布の関数形を微分して得られる 1 次関数 (2 次関数の微分) もしくは 2 次関数 (3 次関数の微分) に従ってせん断応力が減衰するという明確な応力伝達の減衰メカニズムが存在することを意味している。

(6) また、せん断速度が高くなるとローター近傍に出現するニュートン流動する領域では、せん断領域内での“ 力の釣り合い ” が成立していることから、せん断速度が低い時には存在していた応力伝達の減衰メカニズムが、せん断速度の増加によって消失することが明らかとなった。

(7) 既往の研究 (引用文献) で明らかにされている球状固体の辛子種の円筒状回転粘度計内における移動速度分布では、停止端に近い側では粒の回転が主たる運動モードで、稼働端に近い側では粒間のスリップが主たる変位モードであることを考えると、流体の非ニュートン流動領域では層内の微小体の回転に伴う微小体間の擦れによるエネルギー損失でせん断応力が減衰し、ニュートン流動領域では層内の微小体の回転が停止することで減衰メカニズムは消失して層間のスリップがせん断ズリの支配機構となって力の釣り合いが成立するとの仮説を提示した。

(8) また、流動速度分布を表す 2 次関数もしくは 3 次関数の一次項の係数の回転速度の増加に対する大小の変化の傾向と、レオロジーにおける偽塑性流動とダイラタント流動の区分の間に密接な対応関係が存在する可能性があることを指摘した。

(9) 狭小空間中では液状水の粘性が指数関数的に高まることが知られているが、粘性が大きくなるという解釈は、ニュートン流体としての規則性の成立を前提としたものである。しかし、広い空間ではナビエ・ストークス方程式に従うニュートン流体も、狭小空間中では、流動の開始に最低限のせん断力を要するビンガム流動の特殊形態として一般化されることが想定される。

< 引用文献 >

D. Mueth, et. al.: Signature of Granular Microstructure in Dense Shear Flows, Nature, 2000

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤成幸, 岸利治	4. 巻 Vol.39, No.1
2. 論文標題 二重円筒内の流動速度分布とせん断応力 - せん断速度関係の定式化に関する検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1165-1170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中俊成, 岸利治	4. 巻 Vol.49, No.1
2. 論文標題 サスペンションの流動曲線郡が結ぶ焦点位置の時間変化挙動についての粘土特性に基づいた考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1101-1106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shunsei Tanaka, Shigeyuki Sato, Toshiharu Kishi
2. 発表標題 Study on rheological characteristics based on the shape of flow velocity distribution in rotational cylinder
3. 学会等名 Proc. of the 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, YRGS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中俊成, 岸利治
2. 発表標題 回転粘度計内部の流動速度分布とせん断応力の同時測定およびその考察
3. 学会等名 第45回土木学会関東支部技術発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中俊成、岸利治
2. 発表標題 サスペンションせん断開始直後の弾性的ひずみ挙動の観察
3. 学会等名 第72回セメント技術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中俊成、岸利治
2. 発表標題 画像処理によるスラリーの流動範囲自動測定手法の開発と検証
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gaddam Pruthvi Raj, Kishi Toshiharu
2. 発表標題 A Hypothesis for Attenuation of the Shear Rate Transfer of Slurries Based on the Analytical Fitting of Velocity Profiles in Viscometer
3. 学会等名 日本レオロジー学会第47年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----