

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420133

研究課題名(和文)透明形状記憶ゲルの先駆的熱物性データベースの構築と超サーマルメカニカルゲルの開発

研究課題名(英文) Measurements of the thermal conductivity and thermal effusivity of a shape memory gel by a thermal probe with instantaneous point contact

研究代表者

赤松 正人 (Akamatsu, Masato)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40315320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：連携研究者の古川らは、世界で初めてスイッチング温度を境に形状記憶機能を発現するゲルを開発した。特異な熱的特性を持つゲルであるが、その熱物性は不明である。本研究では、高橋と榎森により開発された熱物性テスターを用いて形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率を測定した。結果、含水率17%の形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率はフッ素樹脂のそれらとほぼ同様の値を持つことを明らかにした。さらに、含水率40%の形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率は含水率17%の形状記憶ゲルのそれらより、それぞれ1.48倍および1.09倍大きい値を示すことを明らかにした。また、これら結果から形状記憶ゲルの比熱容量と熱拡散率も示した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to clarify the thermal conductivity and thermal effusivity of a shape memory gel by using a thermal probe with instantaneous point contact. This tool, called a thermophysical handy tester, enables in situ measurement in the short term, and can measure both the thermal conductivity and thermal effusivity of specimens. With these thermophysical properties in hand, the specific heat capacity and thermal diffusivity can be calculated from the definitional equations. The present measurements showed that the thermal conductivity and thermal effusivity of the shape memory gel with water content of 17% were almost identical to those of a fluorocarbon resin. Furthermore, the thermal conductivity and thermal effusivity of the shape memory gel with water content of 40% were 1.48- and 1.09-fold greater than those of the shape memory gel with water content of 17%.

研究分野：伝熱工学

キーワード：形状記憶ゲル 熱物性測定 熱伝導率 熱拡散率 比熱容量

1. 研究開始当初の背景

形状記憶ゲルは 90 年代に開発され、人工筋肉やロボットへの応用などが期待された夢の新素材である。しかしながら、従来の形状記憶ゲルは白濁して不透明であり、割れやすく脆弱であった。原因は、ゲル合成中に不溶成分が生じると不均質化が進み、その不均一性がゲル内部に永久的に固定されるためである。この結果、ゲルは不透明で割れやすくなる。このような状況下において、連携研究者ら(古川英光、宮瑾)は、世界で初めてスイッチング温度を境に形状記憶機能を発現する透明なゲルを開発した。具体的には、図1に示すように室温下のゲルを 50 に加熱すると約 7 倍に伸びる。これをスイッチング温度まで冷却すると、その変形を維持する。しかし、再び 50 まで加熱すると素早く元の形に戻る。また、合成条件によりスイッチング温度の制御も可能である。現在、透明形状記憶ゲルの応用として、連携研究者が開発したオリジナル 3D ゲルプリンターを活用したスマートなゲル眼内レンズなどの開発が進行中である(Kabir, M.H., Gong, J., Watanabe, Y., Makino, M., Furukawa, H., “The applications of shape memory gel as a smart material,” *Proc. of the 12th Asia Pacific Physics Conf.*, pp. 012048-1–012048-4, (2014).)。

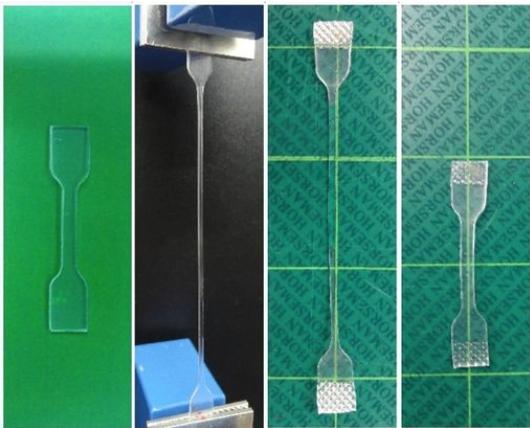


Figure 1 Shape-memory property of the SMG developed by Furukawa's group.

一方、現在共同研究を行っている山野ら(Yamano, M., Ujiie, K., Goto, D., Tadakuma, R., Gong, J., Furukawa, H., Tsumaki, Y., “Development of the systems for the deformation of the robot hands made of shape memory gel,” *Proc. of the 2014 JSME Conf. on Robotics and Mechanics*, pp. 3A1-I13(1)–(2), (2014).) は、古川らによって開発された形状記憶ゲルを利用して、図2に示すような柔軟性や変形機能を持ったロボットハンドを開発中である。

2. 研究の目的

連携研究者によって開発された透明形状記憶ゲルは医療分野や食品分野などから非常に注目され、様々な応用研究が進行中であ

る。しかしながら、透明形状記憶ゲルは熱によって特異な材料力学特性を示すにもかかわらず、その熱的特性はまだ明らかにされていない。

そこで本研究では、世界で初めて開発された夢の透明形状記憶ゲルの熱伝導率、比熱容量、そして熱拡散率を研究代表者が有する点接触式温度プローブを用いた高精度熱物性測定技術、熱物性解析技術、および伝熱実験技術を用いて明らかにすることを目的とする。そして、透明形状記憶ゲルの熱物性データベースを世界に先駆けて構築する。また、熱物性データをゲル開発にフィードバックすることで透明形状記憶ゲルの熱機能性と自己復元性をさらに向上させた超サーマルメカニカルゲルを開発する。そして、測定した熱物性データを用いて定量的な温度制御による微小変位制御が可能な新方式の超サーマルメカニカルゲル製ロボットハンドアクチュエータを開発する。



Figure 2 Robot hands developed by Yamano's group using the SMG of Furukawa's group.

3. 研究の方法

形状記憶ゲルの熱物性は、高橋と榎森(I.Takahashi, M.Emori, *Netsu Bussei*, 13(1999) 252)によって開発された図3に示す点接触式温度プローブ(熱物性テスター)と測定原理(I.Takahashi, M.Emori, *Netsu Bussei*, 13(1999) 246)に基づいて測定された。



Figure 3 Thermal probe with instantaneous point contact (thermophysical handy tester).

本熱物性測定で使用した測定装置を図4に示す。熱物性テスターは X, Y, Z ステージ (ALZ-906-E1P, ALS-115-E1P; Chuo Precision Industrial) に固定され、測定中、その動作は制御装置によってコントロールされた。熱物性テスターの温度制御は直流電源 (PMC18-5A; Kikusui) を用いて行われた。

熱物性テスターの測定部と試料の温度は E 型熱電対によって測定され、そのデータはデータロガー (NR-500, NR-TH08; Keyence) によって収集された。

なお、測定中の室温は K 型熱電対 (SCHS1-0; Chino) によって測定され、そのデータはデータ収集システム (Model 2701; Keithley) によって記録された。

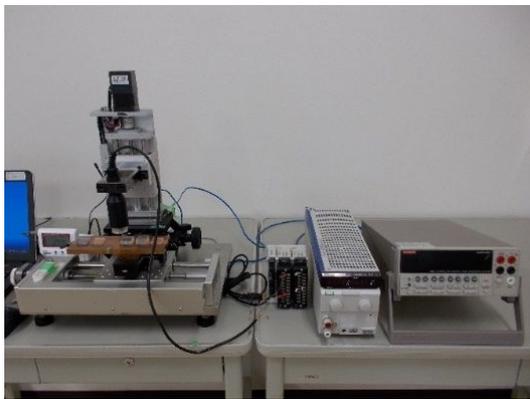


Figure 4 Experimental apparatus.

4. 研究成果

まず初めに、熱物性テスターのプロープ定数を決定するために、熱伝導率と熱浸透率が既知であるポリ塩化ビニル、アクリル樹脂、フッ素樹脂、ソーダガラス、そしてほうけい酸ガラスのそれらを室温下で測定した。プロープ定数を決定することによって、未知の試料の熱伝導率と熱浸透率が熱伝導率比と熱浸透率比から算出することができる。

次に、熱物性テスターの測定精度を明らかにするために、再び、ポリ塩化ビニル、アクリル樹脂、フッ素樹脂、ソーダガラス、そしてほうけい酸ガラスの熱伝導率と熱浸透率を室温下で測定した。測定結果を図5と図6に示す。

図5は、室温における5つの参照試料の測定された熱伝導率とそれらの文献値との比較である。●はポリ塩化ビニル、▲はアクリル樹脂、■はフッ素樹脂、▼はソーダガラス、そして◆はほうけい酸ガラスのそれを示す。表1は、図5に示した測定された熱伝導率の平均値、平均値の平均誤差、そして文献値からの%偏倚である。

図6は、室温における5つの参照試料の測定された熱浸透率とそれらの文献値との比較である。●はポリ塩化ビニル、▲はアクリル樹

脂、■はフッ素樹脂、▼はソーダガラス、そして◆はほうけい酸ガラスのそれを示す。表2は、図6に示した測定された熱浸透率の平均値、平均値の平均誤差、そして文献値からの%偏倚である。

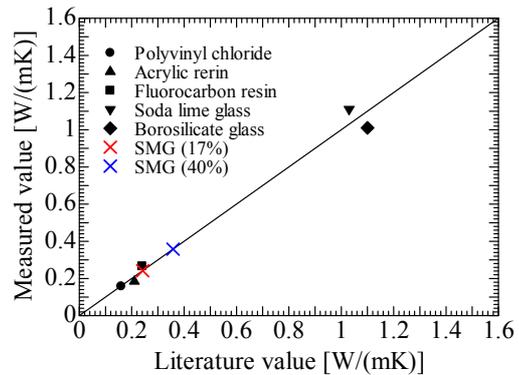


Figure 5 Comparison between the measured thermal conductivities of five reference specimens and their values in the literature at the room temperature.

Table 1 Average values of the measured thermal conductivities, average error of the average value, and percent deviation of the measured value from the values in the literature for each of the five reference specimens.

Reference specimen	Average value [W/(mK)]	Average error	Percent deviation [%]
Polyvinyl chloride	0.158	±0.00415	-1.25
Acrylic resin	0.184	±0.00371	-12.4
Fluorocarbon resin	0.266	±0.0200	+10.8
Soda lime glass	1.11	±0.0284	+7.77
Borosilicate glass	1.01	±0.0682	-8.18

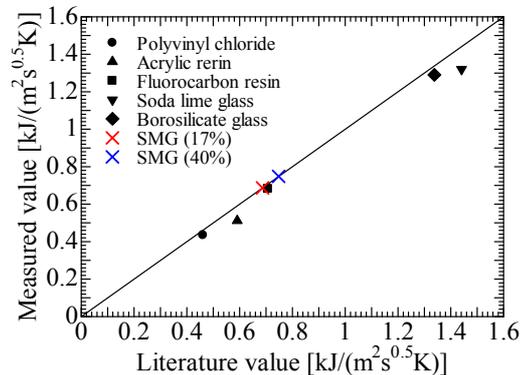


Figure 6 Comparison between the measured thermal effusivities of five reference specimens and their values in the literature at the room temperature.

Table 2 Average values of the measured thermal effusivities, average error of the average value, and percent deviation of the measured value from the values in the literature for each of the five reference specimens.

Reference specimen	Average value [kJ/(m ² s ^{0.5} K)]	Average error	Percent deviation [%]
Polyvinyl chloride	0.435	±0.0265	-5.64
Acrylic resin	0.512	±0.0216	-13.4
Fluorocarbon resin	0.682	±0.0436	-3.54
Soda lime glass	1.32	±0.0159	-8.33
Borosilicate glass	1.29	±0.0250	-3.73

形状記憶ゲルの最大重量基準含水率は40%である。このゲルを室温に約一か月間放置しておく、含水率は17%で一定となった。図5と図6中の×と×は、室温における測定された含水率17%と40%の形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率である。含水率17%の形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率はフッ素樹脂のそれらとほぼ同様の値を持つことがわかった。さらに、含水率40%の形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率は含水率17%の形状記憶ゲルのそれらより、それぞれ1.48倍および1.09倍大きい値を示すことがわかった。

表3と表4は、図5と図6に示した測定された形状記憶ゲルの熱伝導率と熱浸透率の平均値、そして平均値の平均誤差である。

Table 3. Average values of the measured thermal conductivities and average error of the average value for the SMGs with water content of 17% or 40%.

Specimen	Average value [W/(mK)]	Average error
SMG (17%)	0.242	± 0.00402
SMG (40%)	0.358	± 0.0159

Table 4. Average values of the measured thermal effusivities and average error of the average value for the SMGs with water content of 17% or 40%.

Specimen	Average value [kJ/(m ² s ^{0.5} K)]	Average error
SMG (17%)	0.687	± 0.0107
SMG (40%)	0.748	± 0.0186

表5に含水率17%と40%における形状記憶ゲルの熱伝導率、比熱容量、そして熱拡散率を示す。

Table 5. Thermal conductivities, specific heat capacities, and thermal diffusivities for the SMGs with water content of 17% or 40%.

Specimen	λ [W/(mK)]	ρc_p [kJ/(m ³ K)]	α [m ² /s]
SMG (17%)	0.242	1.95×10 ³	1.24×10 ⁻⁷
SMG (40%)	0.358	1.56×10 ³	2.29×10 ⁻⁷

本熱物性測定データは連携研究者らに提供されるとともに共著で学会発表を行ってきた。さらに、図2に示すような形状記憶ゲルを用いた柔軟性や変形機能を持ったロボットハンドの共同開発が進行中であり、共同研究者に本熱物性測定データを提供するとともにデータに基づいたロボットハンドの熱解析を現在行っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 8件)

- (1) 赤松正人, 面川一畝, 古川英光, 山野光裕, “異なる含水率における形状記憶ゲルの熱伝導率, 比熱容量, 熱拡散率”, 化学工学会第82年会, D309 p.1 [2017.3.6-8, 芝浦工業大学豊洲キャンパス]
- (2) Hyune OMOKAWA, Masato AKAMATSU, Hidemitsu FURUKAWA, Mitsuhiro YAMANO, “Effect of water content on the thermophysical properties of a shape memory gel”, 4th International Forum on Heat Transfer, pp. 1-6, November 2-4, 2016, Sendai, Japan.
- (3) 面川一畝, 赤松正人, 古川英光, 山野光裕, “形状記憶ゲルの熱物性測定”, 第37回日本熱物性シンポジウム, A112 pp.1-3 [2016.11.28-30, 岡山国際交流センター]
- (4) 穴戸太郎, 赤松正人, 古川英光, 山野光裕, “含水率が形状記憶ゲルの熱物性に及ぼす影響”, 日本機械学会東北支部第51期総会・講演会, USBメモリ講演論文集, pp.1-2 [2016.3.11, 東北大学工学部]
- (5) 穴戸太郎, 赤松正人, 山野光裕, 古川英光, “点接触式温度プローブによる形状記憶ゲルの熱3定数の測定”, 東北学生会第46回学生員卒業研究発表講演会, USBメモリ講演論文集, pp.1-2 [2016.3.4, 福島大学]

- (6) 河野義和, 板垣瑛紘, 赤松正人, 宮瑾, 古川英光, “熱物性テスターによる形状記憶ゲルの比熱容量測定”, 日本機械学会東北支部第50期総会・講演会, USBメモリ講演論文集, pp.1-2 [2015.3.13, 東北大学工学部]
- (7) 高橋慎太郎, 工藤智成, 赤松正人, 宮瑾, 古川英光, “透明形状記憶ゲルの熱伝導率の温度依存性”, 日本機械学会東北支部第50期総会・講演会, USBメモリ講演論文集, pp.1-2 [2015.3.13, 東北大学工学部]
- (8) 佐々木進太郎, 中谷佳巨, 赤松正人, 宮瑾, 古川英光, “形状記憶ゲルの熱拡散率”, 日本機械学会東北支部第50期総会・講演会, USBメモリ講演論文集, pp.1-2 [2015.3.13, 東北大学工学部]

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

赤松 正人 (AKAMATSU, Masato)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40315320

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

古川 英光 (FURUKAWA, Hidemitsu)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 50282827

宮 瑾 (GUN, Jin)

山形大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 30631759

(4)研究協力者 なし