NeonDough: 光る粘土を用いた粘土細工の提案

山岡　潤一[†]　　筧　康明[‡]

従来の色付き粘土などを用いた粘土造形は，柔軟な形状に対して色彩は静的であり，動的な粘土を用いることで創造性が刺激されると考えられる．本研究 NeonDough は電子回路やセンサ，LED を内蔵したモジュールを含む光る粘土を用いた粘土細工である．具体的にはモジュールに内蔵された電極間の抵抗値を計測し，各モジュールのフルカラーLED の色を変化させる．くっつけると色が混色され，伸ばすことでゆるやかに色が変化する．本稿ではシステムの設計，実装および体験者の様子と展望について述べる．

NeonDough: A Proposal for Clay Crafting With Glowing Clay

JUNICHI YAMAOKA[†]　　YASUAKI KAKEHI[‡]

In general, it is assumed that clay crafting with dynamic clay draws out creativity more than with common colored clay of which the color is static in contrast to its flexible form. NeonDough is clay crafting with dynamic glowing clay which contains a module that consists of electronic circuits, sensors and LEDs. To be specific, the colors of the LEDs are altered according to the resistance between the modules' electrodes. Pressing pieces of clay together mixes their colors, while stretching pieces apart changes the color gradually. In this thesis we describe the design and implementation of the device, the objective reactions from its use and future prospects.

1.　はじめに

粘土造形においては形状を作り上げるのみならず，配色の設計が重要な要素である．配色を行うには，広く市販されているカラー小麦粘土やカラー油粘土などの色付きの粘土を用いるのが一般的であるが，これらは物理的な混色のみであり，色彩変化の自由度は多くない．中には thinking putty [1)]など時間によって色が変化する特殊な粘土素材なども開発されているが，色を自在に操作するという点においては表現の幅に制限がある．

色彩と対象との間の関係性については，特に幼児の発達段階から自然に発見するようになると言われている．Lowenfeld はこの段階を「客観的色彩の段階」と呼び，同一物に対して同一色彩を反復し経験することで色彩様式を獲得し，また色彩様式は必ずしも固定されるものではないと述べている [2)]．また中西らの研究 [3)]では色から連想するものを調査し，自然界の事象との関係性を示した．白はうさぎ，赤はリンゴなど色の違いによって連想される形は変化する．このように色と形は互いに影響を与え合うことから，粘土造形においても色の配置を動的にすることで表現の幅が広がると期待される．

本研究では，粘土そのものを素材とし，内部に電子回路を内蔵することで動的に色の変わる，光る粘土を用いた粘土細工を提案する．粘土は，容易に変形させたり，伸ばす・ちぎるなどの行為を促す素材である．筆者らの以前の取り組み [4)]では，粘土内部にセンサ類を内蔵し，粘土の形状を認識する手法を提案してきた．本研究では，それらの手法から特にくっつける／ちぎる／伸ばすことを検出する技術を用いた光る粘土細工 NeonDough（図 1）を提案する．本研究では導電性粘

図1 NeonDough

† 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University
‡ 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information, Keio University

土と LED やセンサの内蔵されたモジュールによって，粘土を介したユーザのこれらの操作を認識し，粘土の発光パターンを制御することを目的とする．また制御可能な発光パターンを用いることによって，通常の粘土遊びにはないような表現に繋がると考えられる．本稿では，通常の粘土遊びにデジタル技術を取り入れた，光る粘土細工 NeonDough について述べる．

2. 関連研究

電子回路を内蔵した知育玩具等を用いて幼児の新たな創作活動を支援する研究はこれまで数多く行われてきた． Resnick らは電子回路を内蔵した知育玩具を用いることで，従来子供には高度であると考えられてきたデジタル操作を理解し，新たな創作活動に繋がると提言している [5]．

このようなデジタル知育玩具の代表的な例として，curlybot [6]は，ユーザの物理的な動きを記録し再現する教育用コンピュータ玩具である．ユーザが curlybot を掴み平面上で動かすことで，動いた軌跡を内蔵されたマイコンに記録し，デバイスが動き再現される．またペンアタッチメントを装着することで LOGO 言語におけるタートル・グラフィクスのような絵を紙に描画することができる．また，Topobo [7]は複数のパーツからなる知育玩具で，各パーツに内蔵されたマイコンに関節の動きを記録することで歩行するキャラクタなどを自由につくることができる．これらの知育玩具は，デジタル情報の操作を学習することはできるが，ブロックなど固形の素材を用いているため，形状の自由度が不足し，柔軟な造形を行うことは難しい．

容易に変形する素材として，本研究と同様に粘土に着目したインタフェース研究としては，Illuminating Clay [8]が挙げられる．これは，天井に設置されたレーザスキャナによって粘土の形状を認識し，等高線などを上部のプロジェクタより投影する．また，Reed の研究 [9]では磁気型モーションキャプチャを利用し，粘土の内部に複数のマーカを分散させることによって，粘土の形状を解析する．

これらのシステムでは，直感的な操作を提供できるものの，カメラなどのセンサを粘土の外側に配置する必要があるため，手の遮蔽や，装置の大規模化などの問題を抱えている．これに対し，本研究では粘土の導電性に着目し，状態の認識を行う．Squishy Circuits [10]も同じく導電性粘土と絶縁性粘土を用いたインタフェースであるが，これは子供でも電子回路の仕組みを理解することを目的とした教材／知育玩具であるのに対して，筆者らの研究は光る粘土を用いた粘土細工を行うために，導電性粘土の特性を粘土の形状や接触・分離などの状態を認識するために用いる．

3. NeonDough

3.1 システム概要

本研究で提案するコンピュータ玩具 NeonDough は，違う色に光る粘土同士をくっつけ，伸ばすことで光の混色や明滅を行い，粘土の形状のみならず色や発光パターンを組み立てることを可能にする．具体的には，例えば赤色と緑色に発光する粘土をくっつけると，橙色の粘土が生成され，伸ばしていくと緩やかに元の原色に戻っていき，完全に分離すると元の色に戻る．さらに，このような基本インタラクションに加えて，本システムでは，混ぜた色を分離後も粘土に留めておく``ロック機能''や，LED に明滅発光パターンを付与する機能を切り替える粘土板型デバイスを用意し，細かい色や発光パターンの制御を支援する．これらの操作や機能を用いて，光り方から発想を得た造形や，造形後の色の変更などを行うことができる．

本システムは導電性粘土，LED・センサ類を内蔵したモジュール，およびそれらのモジュールを接続するための粘土板型デバイスから構成される（図 2）．モジュールを内蔵した導電性粘土同士を接続することで，モジュール内の電極間に電気が流れ，抵抗値の変化によって電極間の距離を推定し，粘土同士の接続／分離や，粘土の伸び具合を取得することができる．

抵抗値の変化をモジュール内のフルカラーLED の配色に割り当て，加法混色による色の変更を行う．各モジュールは光の三原色（赤色／緑色／青色）のいずれかに発光し，別の粘土と接触すると相手の色が混色され，モジュールの電極間の距離により混色の程度が変化する．また粘土板型デバイスに配置されたスイッ

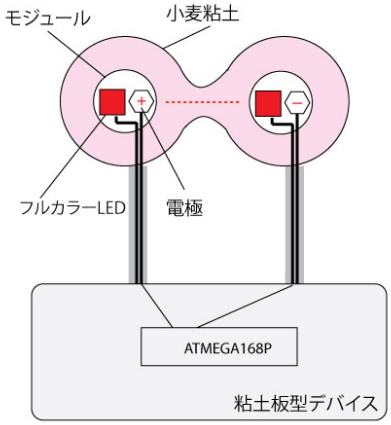


図2 システム図

チに粘土を接触させることにより，色にロック機能や明滅機能を適応することができる．

3.2　システムの設計

本システムの導電性粘土，モジュール，粘土板型デバイスから構成されるハードウェアと抵抗値の変化を用いた配色を行うソフトウェア，またそれらを統合した実装と具体的な作品例について述べる．

3.2.1　ハードウェアの設計

本研究で用いる導電性粘土は，一般的な小麦粘土を用いた．小麦粘土は成分に塩と水が含まれているため，高い導電性を持ち，抵抗値によって接触などを検出することができる．さらに内部に LED などを入れた際，光を拡散させ粘土全体が発光しているように見えることが特徴である．また小麦粘土は一般的に市販されており，原材料が小麦粉や水など安全な素材からできており，子供にも安心して使用することができる．

NeonDough で用いる小麦粘土は市販されているものではなく，Squishy Circuits の Web サイト [11]で公開されているレシピを元に制作した粘土を使用している．これは通常の小麦粘土よりも高い導電性があることが特徴であり，手が触れている状態でも安定したインタラクションが可能になる．

粘土内に配置するモジュールはフルカラーLED，抵抗値を計測する電極，および粘土板型デバイスに繋げるためのケーブルからなる．フルカラーLED は粘土内部からの発光の減衰を抑えるため，高輝度なチップフルカラーLED（日亜化学工業製，NSSM009BT）を用いた．また電極部分は，抵抗値に影響の少ない小型のキャップ付きナットを使用し，食塩水の電気分解による腐食した際に交換しやすいものを用いた（図 3）．

図3 粘土内モジュール

表現を拡張するための機能として，粘土板デバイス表面にロック機能と明滅機能を有するスイッチを配置した．ロック機能は生成した色を保持する機能である．図 4 のように通常は分離すると元の原色に戻るが，ロック機能を適応すると混色や中間色で保持される．明滅機能は LED の点灯と消灯を交互に切り替える機能である．これらの機能は，モジュールで用いた技術を利用しており，金属からなるスイッチとマイコンをケーブルで繋げ，粘土とスイッチが接触したことを抵抗値で検出している．

3.2.2　ソフトウェアの設計

粘土同士の接続や伸び方による色の変化量は，粘土板型デバイス内マイコン内のソフトウェアにて算出される．抵抗値の計測には，マイコン（ATMEGA168P）の 8bit A/D コンバータを用いた．図 5 に 1 つの電極に対する回路図を示す．本システムでは，複数のモジュールを使用し，任意の 2 つの極間の抵抗値を計測する．その際，同時に計測すると電極同士が干渉するため，トランジスタを用いて高速スイッチングを行い計

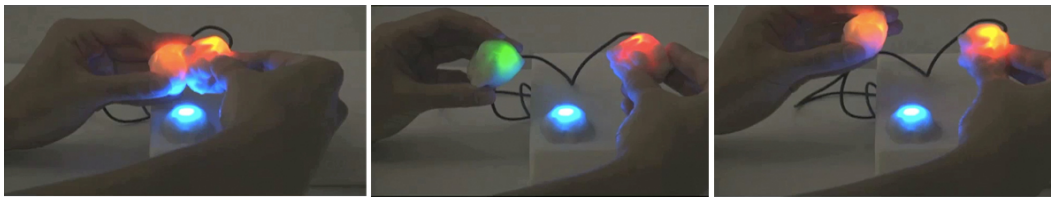


図4 ロック機能

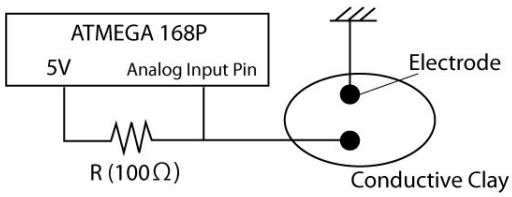


図5 抵抗値測定の回路図

測している．

粘土内の 2 極間の抵抗値 R(Ω)は式(1)で示される [12]．粘土の電気抵抗率を ρ (Ωcm)，2 極間の距離を L(cm)，電極の表面積を A(cm^2)をそれぞれ表す．

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{1}$$

本研究では，常に粘土内に配置されるような小型の電極を用いることで電極の表面積が一定となり，電極間の距離の変化のみを計測することができる．

また本研究で使用する小麦粘土を用いて，電極間の抵抗値と長さの関係を実験によって明らかにした．実験では本システムで使用したモジュール内電極とマイコンを用い，シリアル通信によりコンピュータに抵抗値を送信し計測した．電極間の粘土の太さは約 3cm と一定にし，長さを変更し計測した．図 6 に 1 試行の実験結果のグラフを示す．この試行では粘土の長さ 1cm～21cm に対して約 250~500Ω の変化が確認できた．現在のところ 1 試行のみの結果であるが，この結果から，抵抗値と距離との間に線形な関係が期待できる．

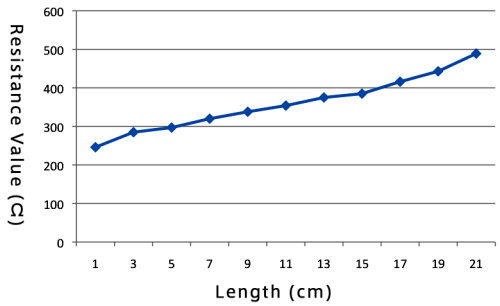


図6 電極間の長さと抵抗値の関係

NeonDough では抵抗値の変化によって混色の混ざり具合を変更できる．粘土同士が接続され電極間の距離が近い場合，抵抗値が低下するので接続している粘土の色が多く混合される．粘土が伸ばされている場合，抵抗値は上昇するので元の原色に戻る（図 7）．

3.3 システムの実装

これらのシステムを実装し，ロック機能や明滅機能を用いて制作した作品例を図 8 に示す．(a) は複数のモジュールを用いて怪獣を表現した例で，(b) は明滅機能を用いて宇宙船を表現した例である．このように NeonDough は制御可能なフルカラーLED と粘土の形状を認識する技術を用いることで，通常の粘土遊びにはない色の表現が可能である．またそれら独自の発色パターンから着想を得て，表現した作品を生み出すことができる．

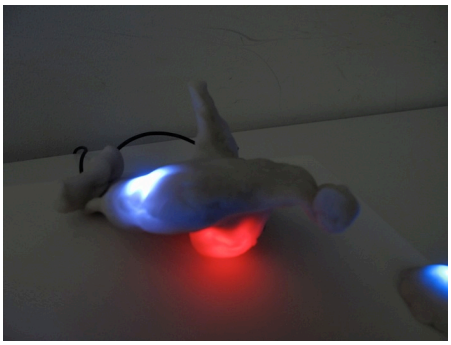
4. ユーザ体験の様子

本研究の成果をいしかわ夢未来博（2011 年 10 月 28, 29 日 石川県産業展示館），慶應義塾大学 SFC オープンリサーチフォーラム（2011 年 11 月 22，23 日 東京ミッドタウン）にてデモ展示を行った．

前者の展示では，比較的子供の来場者が多く見受けられた（図 9）．来場者の様子として，光る粘土をく

図7 粘土を伸ばした際の発光の変化

(a) 怪獣



(b) 宇宙船

図8 NeonDough による作品例

っつけ色が変わることを楽しんでいたが，中には造形を行う子供もいた．例えば図 10 (a)のように光る部分を目に見立てた作品が見受けられた．また光の変化が創作に影響を与えた例として，初めはメロンを作っていたが，赤い粘土をくっつけることでオレンジを作り，形状もミカンに変化させていた子供や，図 10 (b)のように初めは赤いロケットを制作した後，混色させることで白が作れることが分かり，ロケットの色を変化させていった事例もあった．

体験の後にアンケートによる調査を行った所，”NeonDough を使った粘土遊びは楽しかったですか”という問いに対し 5 段階評価（5.とても楽しかった 4.まあまあ楽しかった 3.どちらでもない 2.あまり楽しくなかった 1.全然楽しくなかった）では回答数 17，平均 4.7,分散 0.34 という結果であった．また，普段の粘土遊びとの差を調査した所，”普段の粘土遊びと比べて楽しかったですか”という問いに対し 5 段階評価（5.とても楽しかった 4.まあまあ楽しかった 3.どちらでもない 2.あまり楽しくなかった 1.全然楽しくなかった）で回答数 17,平均 4.58,分散 0.38 という結果であった．

自由記述欄からは，光で色の変化を表現することが普段の粘土遊びと違って面白い／光る場所を考えながら作れることが面白いなどの意見を多く得られた．また，混色を学習できるという意見も多く聞かれ，粘土をくっつけて離すことで色が明滅することを楽しむ姿が見られた．これらのことから，NeonDough は，通常の粘土遊びとは異なる体験を提供できたことが示唆され，創造行為のきっかけになったと考えられる．

また後者の展示では，大人の来場者が多く，前者のキャラクタなどの造形を行う子供の来場者と異なり，触ったり伸ばしたりすることで色が変化する様を楽しむ様子が見られた．特徴的な様子としては，可変抵抗器の機構を再現し，粘土の棒を転がすことで色のグラデーションを表現する姿が見られた．来場者の反応としては，抵抗の変化によるグラデーションの表現が面白いという意見や，形を生成してから色を変更できるのが良いという点を評価する意見が多かった．その一方，ケーブルが邪魔なのでワイヤレスで光る粘土にして欲しいなどの意見もあり，モジュールなどの改良によって，より直感的な操作を可能にする方法を今後検討する．

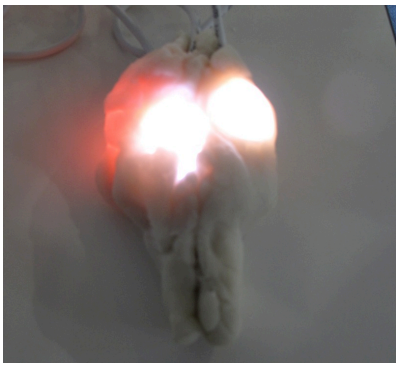
図9 展示の様子

5. まとめと今後の展望

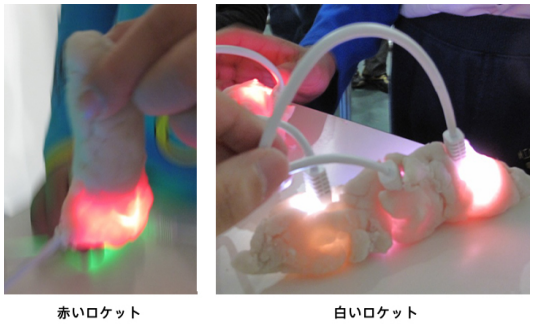
本稿では，通常の粘土遊びにデジタル技術を取り入れ，子供の想像力を刺激し新たな表現に繋げる，光る粘土細工 NeonDough について述べた．

デモ展示の来場者の評価からも発光する粘土と抵抗による色の変化が粘土造形に影響を与え，発光パターンの変化が表現のきっかけとなることが分かった．

今後の課題として，まずインタラクションの追加や改善が挙げられる．今回提案した NeonDough は，粘土をくっつける／ちぎる／伸ばすという行為を電極間の抵抗値によって読み取ったが，筆者らの以前の取り組みでは，にぎる／押す／触れるなども検出可能であ



(a) ガイコツ



(b) ロケット

図10 来場者の作品例

る．それらを統合したモジュールを用いることで，複雑な発光パターンを生成できると考えられる．またそのような発光パターンを記録／再生する際に，ケーブルを着脱可能な設計にすることで，場所に固定されるのではなく粘土を持ち歩くということが可能になる．具体的には図 11 のようにプレイマット上で粘土内モジュールと床のケーブルを接続し，粘土同士をくっつけたり，伸ばすことで混色を行い，ケーブルを外し，他の場所で発光パターンの生成や造形を行うことを想定している．そのためにバッテリーを内蔵し，触り方によって色が変化するセンシング技術を取り入れるなどモジュールの改良を行う必要がある．

また，今回用いた粘土の形状を認識するセンシング

図11 改良版モジュールを用いた造形体験のイメージ

技術や発光パターン生成などを利用し，今後はコンピュータグラフィックスにおけるキャラクタ操作などの他のアプリケーションへの応用を検討している．

謝辞　本研究の一部は JST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた．また，本研究をまとめるにあたり，日本バーチャルリアリティ学会アート&エンタテインメント研究委員会の論文化ワークショップで貴重なご意見を頂いたことに感謝する．

参　考　文　献

1) Crazy Aaron Enterprises, Inc., Thinking Putty, http://www.puttyworld.com/.
2) V.ローウェンフェルド著,竹内清他訳: 美術による人間形成，黎明書房，pp. 207-209(1975).
3) 中西いつ子，松本佳子: 色から見る幼児の自然認識，教育実践総合センター研究紀要 11，pp. 161-167(2002).
4) 山岡潤一，筧康明: 導電性粘土を用いた変形・分割可能なタンジブルインタフェースの基礎検討，エンタテインメントコンピューティング 2011 (2011).
5) M, Resnick., F, Martin., R, Berg., et al.: Digital Manipulatives: New Toys to Think With, Paper Session Proceedings of CHI 1998, ACM, pp.281-287(1998) .
6) P, Frei., V, Su., B, Mikhak., H, Ishii.: curlybot: designing a new class of computational toys, CHI '00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems,ACM(2000).
7) H, Raffle., A, Parkes., H, Ishii.: Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory, CHI '04 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems,ACM(2004).
8) Piper, B., Ratti, C., Ishii, H., Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis, CHI '02 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves(2002)
9) Reed, M., Prototyping digital clay as an active material, TEI '09 Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction(2009)
10) Johnson, S., Thomas, A.M., Squishy Circuits: A Tangible Medium for Electronics Education. Extended Abstracts of the ACM Conference on Computer Human Interactions 2010,Atlanta, GA(2010)
11) A,Thomas., Squishy Circuits Project Page., http://courseweb.stthomas.edu/apthomas/SquishyCircuits/conductiveDough.htm
12) Resistance of a Cylinder, http://www.physics.udel.edu/~watson/scen103/cylinder.html (1999)