

## The Roles of Mental Animations and External Animations in Understanding Mechanical Systems

Mary Hegarty, Sarah Kriz, and Christina Cate

発明家，エンジニア，デザイナーなど

ダイナミックなプロセスとテキストをつなぐさまざまなグラフィックデバイスの発展

- ・ ダイナミックなプロセスの言語記述を伴う静的な図
- ・ 機械の部品の動きを示す矢印と静的な図
- ・ 複数の図

これらの図は静的なものであるが，ダイナミックなプロセスは，運動学的，動的なものであり，理解には，しばしば，メンタルプロセス(Hegarty,1992)能力に依存する．

近年，コンピュータグラフィック技術の発展

機械の動きのアニメーションの表示が可能になる：*external animations*

アニメーションを含むコンピュータベースインストラクション

- ・ 自動車製造業
- ・ 軍隊
- ・ 解剖学

(e.g., Chumley-Jones, Dobbie, & Alford, 2002; Van Matre, Ellis, Montague, & Wulfeck, 1993)

本論文において，

- ・ 静的な図のみ
- ・ メンタルアニメーションを誘導される図
- ・ コンピュータアニメーション
- ・ メンタルアニメーションとアニメーション双方

において，人々はどのように機械を理解するのかを検討する

## UNDERSTANDING MECHINES FROM COMPUTER ANIMATIONS AND OTHER MEDIA

機械や生物学的のようなダイナミックなシステムの理解：さまざまなタイプの知識が必要  
(Chi, de Leeuw, Chiu, & LaVancher, 1994; Hegarty & Just, 1993; Narayanan & Hegarty, 1998)

( 1 ) システムの基礎的な構成要素

例．何でできているのか，機械の構成要素

( 2 ) 構成要素がどのように動き，それぞれの動きにどのように関係するのか

例．機械の挙動

( 3 ) 機械の機能

例．どのようにデザインされているのか

近年の研究

テキスト，図，アニメーションや他の関連したメディアから，人はどのように機械や，因果連鎖を学ぶのかということが強調されている．

Mayer らの効果的なマルチメディアプレゼンテーション研究

- ・ 関連した視覚と言語情報が空間においてできる限り近くに提示(Mayer & Gallini, 1990)
- ・ アニメーションと同時の注釈(Mayer & Sims, 1994)
- ・ 視覚情報と言語情報は異なるモダリティにおいて表示(Mayer & Moreno, 1998)

他の重要な話題

コンピュータグラフィックの発展：静的な表示よりも，より正確，質的に異なるメンタルモデルを示すのか？

コンピュータグラフィックの利点

- ・ 他のデバイスと比べ，装置の運動の結びつけがより効果的である(Lowe, 1999)
- ・ 時間的な変化を明示的に示し，単にこれらの変化を知覚すればよい．

静的な図

- ・ 変化を推測する能力が必要であり，一般的により努力を必要とし，困難なプロセスである．

しかしながら...

どのように機械が動くのかを説明するにあたり，これまでの文献は静的なメディアに対するアニメーションの利点を示せていない．

#### Tversky et al.(2002)

静的なグラフとアニメのグラフからの学習に関する 20 以上の研究をレビュー

領域：物理，コンピュータインタラクション，生物学，メカニクスなど

結論：静的な図に対するアニメーションの利点はなし

利点を示した小数の研究が存在するが(e.g., Park & Gittlman, 1992; Rieber, 1990, 1991)それらは，静的な図に対してアニメーションがより多くの情報が提示されている．

アニメーションとは対象的に，静的な図からの機械の動きの予測は成功を示している．  
(Hegarty, 1992; Narayanan, Suwa, & Motoda, 1994, 1995; Schwarz & Black, 1996)

#### 本論文

相対的に複雑な機械的なシステムである flushing cistern を対象にし，コンピュータアニメーションとメンタルアニメーションにおける効果を測定する．

Flashing cistern の例：トイレのタンク 図 1, 2

#### Flashing cistern の先行研究(Hegarty et al., 1999; Narayanan & Hegarty, 2002)

コメントのついたアニメーションと，テキストのついた静的な図による学習の比較  
理解に差はなし

この結果の一つの可能性：アニメーション，図，テキストからなにも学ばなかったのでは？

(この装置は大変複雑なために，限られた教示では理解するのが難しかったのでは)

本研究では，なにも教示を与えられない統制群との比較を行う．

#### もう 1 つの可能性

静的な図からメンタルアニメーションを行えた可能性

メンタルアニメーションに関する検討を行う

#### 他の先行研究から

- ・ 単に静的な図を見るだけではダイナミックなメンタルモデルを構成できない
- ・ 予測することがアニメーションからの学習を促進
- ・ メンタルアニメーションは空間能力に大いに関連

これらの側面から

- ・ 予測
- ・ 空間能力

についての検討を行う。

## EXPERIMENT 1

(a) アニメーションを見る

(b) 機械的な動作の予測（どのように flushing cistern が動くのか）

の2点についての検討を行う。

統制群：静的な図 どのように装置が動くのかの情報なし

予測群：静的な図 flushing cistern のサイクルにおける3フェーズの図を提示  
どのようにシステムが動くのかを予測

アニメーション群：静的な図 flushing cistern のアニメーション

コンビネーション群：静的な図 3フェーズの図+アニメーション

アニメーション：先行研究における効果的なアニメーションと一致するようにデザイン  
(Faraday & Sutcliffe, 1996, 1997; Mayer & Moreno, 1998 など)

メディア効果の測定

(1) システムの挙動の記述能力

先行研究(Hegarty,1992)のメンタルアニメーションに基づき,因果連鎖を記述

(2) トラブルシューティング能力

(3) 機能に対する記述能力

## Methods

### *Participants*

大学生100名：心理学の授業の要件

Paper Folding test(Ekstrom, French, Harman, & Derman, 1976)の成績に基づいて群分けを行う。

テストの平均値 = 11.93 SD = 3.65

本研究における群分け(全実験)

12以上：high-spatial 群

12未満：low-spatial 低成績群

	high-spatial	low-spatial
統制群	13	12
予測群	12	13
アニメーション群	13	12
コンビネーション群	12	13

#### 参加者

平均で 1.32 (SD=1.81) 個の物理の授業をとっていた  
 機械の修理を試みたことのある参加者は平均で 2.87 (SD=2.59)  
 空間能力, 物理学の背景, 経験に統計的差はなし.

#### Materials

##### *Static diagram.*

flushing cistern の断面図及び, 部品名  
 8・1 / 2 × 1 1 インチに印刷されている.  
 図 1 参照

##### *Animation.*

Macromedia 社の Director で作成  
 Power Macintosh 8500/1080 : 1 6 インチモニター (1024 × 768) において表示.  
 第 1 サイクル: 出力システムの説明  
 第 2 サイクル: 注入システムの説明  
 秒数: 78 秒  
 アニメーション終了後 2 つのオプション

- ・ コメントつきで再度再生
- ・ コメントなしで再度再生 (19 秒)

##### *Phase diagrams and prediction questions.*

予測ステージ: トイレのタンクの異なるフェーズの 3 つの図が示される (図 2)  
 図を見ている間に次のような予測質問をされる.

1. ハンドルを下ろしたときに, トイレのタンクのすべてのパーツにおいて何が起こるか  
 を説明してください.
2. ハンドルを下ろしたときに, 上下のディスクでは何が起こりますか?
3. 水位が上がると, 浮きはどうなりますか?
4. 接続棒が上がると, 浮きはどうなりますか?
5. 水がサイフォンパイプから便器に流れると浮きのアームはどうなりますか?

### *Test questions.*

どのようにトイレのタンクは動くのかという質問

質問文：どのようにトイレのタンクが動くのか説明しなさい。トイレのハンドルを下ろした時を想像し、言葉で、ステップバイステップでそれぞれのパーツがどのようになるのかを説明しなさい。

(ハンドルを下ろすのが第一ステップで、そして次に... など)

### 機能についての質問

下のディスクの穴、浮きと浮きのアーム、連結棒、注入バルブについての機能を説明するように求められ、

### 4つのトラブルシューティング問題を聞く

1. トイレのハンドルを下ろしたが、水が流れてこなかった状況を想像してください。なにが悪いのかすべての可能性を説明しなさい
2. トイレの水を流したあと、タンクに水が流れつづけている状況を想像してください。なにが悪いのかすべての可能性を説明しなさい
3. トイレの水を流したあと、水が止まらない状況を想像してください。なにが悪いのかすべての可能性を説明しなさい
4. トイレの水が流し終わったあと、トイレのタンクから水があふれてきた、なにが悪いのかすべての可能性を説明しなさい

### *Spatial abilities test*

Paper Folding test(Ekstrom et al., 1976)にて測定

### *Background questionnaire*

背景アンケート

学力検査の成績

### *Procedure*

個人で30～45分間のセッション

初めに、2分間トイレのタンクの図を提示

図と部品の構成要素を学ぶようにいわれる

### *Control condition.*

テスト質問を与えられる。

### *Prediction condition.*

3つの図を見て1分それを学習(図2)

その後, 予測質問(前述したもの)を行い, テスト質問へ

### *Animation condition.*

コンピュータアニメーションを見る.

アニメーションは何度見てもよく, 終了後テスト質問へ

### *Combination condition.*

**Prediction condition + Animation condition**

質問について

質問については10分, 機能, トラブルシューティング課題は各問題2分で解答

### *Scoring*

因果連鎖の評定

Flushing cistern のハンドルを下ろした時の結果を, 19ステップの因果連鎖にまとめたものを使用.(表1)

2人の評定者の相関

正しいステップについて: .93

ステップの順番について: .94

正しくないステップについて: .78

正しくないステップの記述はほとんどない(1以下)のために, 本論文では以後, 正しいステップのみを扱う.

トラブルシューティングについての評定

質問で問われている症状が原因となる箇所について, 2人で独立に評定を行い, 83%について同意. 矛盾点は話し合いにおいて決定

機能についての評定

妥当な記述かどうかを, 2人で独立に評定を行い, 91%について同意

## Results

### *Performance in the Prediction Phase of the Experiment*

予測フェーズ（予測群とコンビネーション群のみ）

参加者は、3フェーズの図から、複雑なメカニカルシステムを正確に推測していた。

初めの質問の結果

平均 7.88 (SD=2.45) の正確なステップ

平均 0.31 の不正確なステップ

他の4つの質問に関しても平均 3.00(SD=1.00)の正確なステップ

空間能力については有意差なし ( $F < 1$ )

これより、3フェーズの図からの予測は、全ての生徒に対し、正確であるが、不完全な記述を導いていた。

### Effects of Instructional Treatments on Learning Outcomes

#### *Written descriptions of the causal chain.*

コンピュータアニメーションとシステムの動きの予測：システムの動きの記述能力を改善

アニメーション群 > アニメーションなし群

( $F(1,92)=41.18$ ,  $MSE=9.78$ ,  $p < .001$ )

予測群 > 予測なし群

( $F(1,92)=10.97$ ,  $p = .001$ )

実験群間における相互作用はなく ( $F < 1$ )、2つの操作の効果は独立していることを示す。

High-spatial 群は因果連鎖のより完成された記述を行っていた。

( $F(1,92)=8.66$ ,  $p < .01$ )

ただし、それぞれの実験群間において、相互作用はなし

アニメーションから学んでいたことの更なる証拠として

予測質問の初めについて比較（この解析は予測、コンビネーション群のみに関係する）

コンビネーション群

アニメーションを見た後に、平均 4.72 (SD = 2.79) のさらなる記述

プレ、ポストテストの差：予測群に比べて有意に向上 ( $M=1.50$ ,  $SD=2.36$ ,  $t[37]=4.35$ ,  $p < .001$ )



### *Troubleshooting.*

図 4

予測群 > 予測なし群 ( $F(1,92)=6.05, p < .01$ )

アニメーション群 > アニメーションなし群 ( $F(1,92)=28.43, p < .05$ )

High-spatial > Low-Spatial ( $F(1,92)=9.19, p < .001$ )

相互作用なし

### *Functional understanding.*

システムの構成要素の機能についての質問

平均 3.12(SD=1.26)

実験群間に有意差なし

### **Discussion**

実験 1 の結果

- ・ 静的な図による、システムの挙動の予測：メカニカルデバイスの理解を促進  
(ただし、正確であるが、不完全)
- ・ アニメーションによる理解の促進  
(ただし、予測群との有意差はなし)

実験 1 の不明瞭な点

アニメーション自身を見ること、コメントを聞くこと、双方か???

実験 2, 3 へ

### **EXPERIMENT 2**

コメントのついたアニメーションとテキストのついた静的な図との比較

(以後 animated media と static media)

### **Method**

#### *Participants*

100 名の大学学部生：心理学の授業要件

	high-spatial	low-spatial
static media 群	13	12
animated media 群	12	13
予測+static 群	12	13
予測+animated 群	12	13

## *Materials*

*Static Diagram*…実験 1 と同様

*Animated instruction*…実験 1 のアニメーション&コメントと同様

*Static instruction*…アニメーション群のコメントをテキストにしたもの

## *Procedure*

個人で約 45 分のセッション

2 分間トイレのタンクの図を提示され，構成要素の名前を学ぶように教示される．

### *Static media condition.*

テキストと図を 6 分間学習

だれかに説明するために，システムを理解するように教示

### *Animated media condition.*

アニメーション+コメントを 6 分間学習

教示は *static media condition* と同様

アニメーションは何度見てもよい

### *Prediction plus static media.*

3 フェーズの図（図 2）を 1 分提示され，その後，5 つの予測質問を受ける．

その後，テキストと図を 6 分間学習

### *Prediction plus animated media.*

静的なラベル付き図の学習後，3 フェーズの図を 1 分提示．その後予測質問を口頭で返答

その後 6 分間アニメーション

## **Results**

### *Performance in the Prediction Phase of the Experiment*

実験 1：予測群：正確であるが，不完全な知識であった

予測群について

初めの質問平均で 8.1 (SD=2.28) の正確なステップ

残り 4 つについて，平均 2.76 (SD=1.02)

空間能力の影響はなし．

## Effects of Instructional Treatments on Learning Outcomes

### *Written descriptions of the causal chain.*

図 3

animated media > static media 有意傾向 (F(1,92)=3.35, p = .07)

予測群 > 予測なし (F(1,92)=10.70, p < .01)

high-spatial > low-spatial (F(1,92)=5.03, p < .05)

アニメーションをみることに有意なアドバンテージなし

変数間に相互作用なし

フォーマットによる差はなかった

### *Troubleshooting.*

static vs. animate...メディアの効果なし (F(1,92)=3.23 p < .08)

相互作用もなし

### *Functional understanding.*

群間に差はなし

## Discussion

実験 2 の結果

コメントのついたアニメーションとテキストのついた静的な図において有意な差はなし

このことは先行研究と一致(Hegarty et al., 1999; Narayanan & Hegarty, 2002; Tversky et al., 2002)

一つの可能性

言語記述のみで学習か？

実験 3 へ

実験 1 , 2 共に予測群がよい結果を示す

予測すること：よりアクティブな学習

または... 3 フェーズの図の効果か？

3 フェーズの図の効果を測定

## EXPERIMENT3

### Method

#### *Participants*

58人の大学学部生：心理学の授業の要件

	high-spatial	low-spatial
diagram-only 群	8	10
phase-diagram 群	10	10
animation 群	10	10

#### *Materials*

静的な図：実験1，2と同様

アニメーション：コメントが聞けないことを除いてほかは同様

3フェーズの図：実験1，2と同様

#### *Procedure*

約30分のセッション

初めに2分間トイレのタンクについての静的な図を示される。

#### *Control condition*

テスト質問へ

#### *Animation condition*

コメントなしのアニメーションへ

アニメーションの見方は自分のペース

#### *Phase-diagrams condition*

3フェーズの図(図2)を見る

その後テスト質問へ

## Results

#### *Causal Descriptions*

平均 7.33 (SD=2.95) の正しいステップの記述

統制群 < フェーズ群 ( $p < .004$ )

統制群 < アニメーション群 ( $p < .01$ )

フェーズ群, アニメーション群間 有意差なし

### *Troubleshooting Performance*

平均 4.15 の妥当な説明

統制群 < フェーズ群 有意傾向

フェーズ群, アニメーション群間 有意差なし

### *Discussion*

実験 3 の結果

メカニカルシステムのアニメーションを見ることは静的な図単体を見るのよりも有効であることを示す。

(因果連鎖についてののみであるが...)

言語記述なしにおいても, メカニカルシステムのなんらかの側面を理解することを示すが, アニメーション単体では, 3 フェーズの図との差はないことを示す。

静的な図とアニメーションの同等性が言語記述を含まなくても示される

## **DETAILED ANALYSIS OF STUDENTS' MENTAL MODELS**

メンタルモデルのより質的な違いを検討

static diagram only 群 (実験 1 と実験 3 の統制群)

kinematic diagrams 群 (実験 1 の予測群, 実験 3 の 3 フェーズ図群, アニメーション群)

diagram plus verbal 群 (実験 1 のアニメーション群, 実験 2 の static animated 群)

prediction plus diagram plus verbal 群

(実験 1 のコンビネーション群, 実験 2 の prediction + static 群, prediction + animation 群)

これらの群分けから, 因果連鎖についての分析

static diagram only 群 平均 7.09(SD=2.84, N=43)

kinematic diagrams 群 平均 9.51(SD=2.62, N=65)

diagram plus verbal 群 平均 13.27(SD=3.27, N=76)

prediction plus diagram plus verbal 群 平均 14.21(SD=3.27, N=75)

群間に有意差あり( $F(1,244)=73.26$ ,  $MSE 10.70$ ,  $p < .001$ )

事後検定において, それぞれについてお互いに有意差あり( $p < .01$ )

それぞれの群の特徴

static diagram only 群... 2つのサブシステム（排水，注入）の機能についてはいくらか理解するが，メカニカルな理解を示さなかった．

kinematic diagram 群... 注入についてのメカニズムについてよい理解を示した．

diagram plus verbal 群... 機能，メカニズム双方についてよい理解を示した．

## GENERAL DISCUSSION

本研究：コンピュータアニメーションとメカニカルシステムの理解におけるメンタルアニメーションの効果について測定

第一の疑問：言語記述の伴った図によって，メカニカルなシステムがどのように動くのかを学ぶことができるのか？

明確に YES！！

先行研究に一致する

驚くべき結果：図が静的かアニメーションかは関係しない

第二の疑問：装置の動きを予測することは装置の理解を促進するか？

明確に YES！！

### Why Are Animations No Better Than Static Diagrams?

先行研究において，アニメーションの効果がなかったこと：使われたアニメーションのクオリティの問題

よいアニメーションの特徴とはなになのだろうか？

アニメーションの効果を制限するいくつかの特徴

( 1 ) Scaife and Rogers(1996)による”*resemblance fallacy*”

機械の動き：構成要素は一度に動く

人間の理解：一つづつ，順番に動く

実験 3 の 3 フェーズ図群，他の実験における予測群

連続的なアニメーションと同様の効果を得ることができた

( 2 ) 単にアニメーション，実際の動きを見ることは正確な内的表象を導かない

静的な図の特徴：self-pace，インタラクティブ

理解に困難な状況においてスローダウンや，再読できる

インタラクティブなアニメーションが必要

( 3 ) 視覚注意の制限：複雑な機械は構成要素が一度に動く

本研究の例：一度に 2 つの要素が動く

(4) アニメーションを見ること：受動的なプロセス

よりアクティブな学習プロセスが効果的（例，自己生成，自己説明）

この規則と同様に，初めに予測することが学習を促進することを示した

### **Individual Differences**

先行研究と同様に，High-spatial 群が Low-spatial 群よりもよい理解を示した  
最も重要なこと：実験条件において空間能力における相互作用は表れなかった．

本研究で用いられた教示法は全ての生徒に同様の効果を示した

### **Mental animation**

先行研究と対照的に，実験 1，2 の予測フェーズにおいて，空間能力はメンタルアニメーションに影響しなかった．

先行研究との違い：3 フェーズの図により機械の操作における，重要なステージを見ることができたことと，先行研究においては 1 つの図しか用いられなかったことが原因だろう．

全ての生徒に対して有効な方法として異なるフェーズの図の有効性を示した

### **Conclusion**

近年のコンピュータ技術，グラフィックの発展は，ダイナミックなシステムや，より抽象的で，強力な視覚化を可能としており，現在，科学的発見や教育の現場に大きな刺激となっている．本研究においては，そのような“external animation”はいつも，我々の内的なメンタルアニメーションのプロセスに勝るわけではないことを示した．もし，我々の目標が外的な視覚化を発展させることにあるのならば，内的な視覚化プロセスの制限を理解することと同様に，外的な視覚化の効果を促進することが必要であろう．

## APPENDIX の訳

ハンドルを下ろすと、接続棒が持ち上がり、これより、下部のディスクが上がり、上部のディスクを押し、持ち上げます。水がサイフォンパイプの上部に達し、便器に達します。

ハンドルが放されると、2つのディスクは再度落ちて行き、お互いに分かれます。下部のディスクは穴が開いているために、水が流れていきます。水位が低くなると、サイフォンベルに空気が入り、サイフォンパイプへの吸引とパイプへ水が流れるのを阻止します。

タンクの水が空になると、浮きがタンクのそこへと落ちます。浮きが落ちると、浮きのアームが同様に落ち、吸気弁を引き、吸気弁をあけます。吸気弁が空くと、吸気パイプの栓がはずれ、水がタンクに入ります。水が入ってくると、浮き及びに浮きパイプの位置が上がり、水位、浮き、浮きパイプの位置が十分に高くなると吸入弁が閉じられ、水が止まる。