Mathematical Representation of the Design

Kaira Sekiguchi

July 17, 2013

もくじ

注意点

本エッセイの文章は断定的になっていますが，それだけ確実なことを表現しているわけではありません．これは，設計に関する議論において刺激的な役割を担って欲しいという筆者の想いと，学術的な文章においてはあいまいな表現が避けられるという慣例に従ったためです．本エッセイが提供する情報を利用する際は各自の判断と責任において行って下さい．

本エッセイにおいては文面以上の隠れたメッセージといったものは表現していません．

i　数式化のうれしいところ

本エッセイでは設計論に数式の表現を与える．

初めに，設計論を数式化する目的をまとめる．ここで設計論として大きく二つのものを考えることにする．ひとつ目は「倫理レベルからの設計」と「言説による設計」を合わせたものである．これらは筆者らが体系化してきたものである [Sekiguchi 10a, Sekiguchi 10b, Sekiguchi 11]．これらは階層的なアプローチであり主に変化を扱うものである．二つ目は「存在そのものに関するネットワーク」（以下単に「ネットワーク」と呼ぶ）的なものである．こちらも筆者が過去に発表した設計論 [関口 12] を扱うことにする．

設計論を数式化する目的は次の三つである．

- i　設計論の統一
- ii　検証方法の導出
- iii　オリジナルシステムの設計

以下，ひとつずつ見ていくことにする．

ひとつ目として，設計論の統一ために数式化を行う．上述したように設計論には二つのアプローチがあった．階層的なアプローチとネットワーク型のアプローチであった．前回のエッセイで，筆者はこれら二つのアプローチの間に数学的な関連があることを示した [Sekiguchi 13]．本エッセイはその取り組みをさらにすすめるものである．具体的には，曖昧なままだった「微分」と「積分」の比喩について精査し妥当性のある概念ツールとして設計論に加えていくことにする．

二つ目として，実現可能な検証方法を見つけるために数式化を行う．ここで検証とは，設計論を体系化する際に取り入れた仮定を確かめるためのものとする．重要なことは，数式化し連立させることで検証方法の選択肢が増えることである．検証項目を別の項目で置き換えられるからである．

三つ目として，システムの設計の一部として数式化を行う．例えば，数式化することでプログラムで実装するのがより容易になる．これは時代の波を捉える設計支援システムになる．またこれは上述した検証を行うための実験装置にもなる．

要するにまとめると，より良い世界の実現をより確かにできるようにするために行うということである．なぜなら，数式化することによって設計論の体系がより明確になり，その運用がより確実に実施できるようになるからであった．

ii 「AをBに変えると，CがDに変わる」の式

本章では全ての基本となる数式を導くことにする．それは「AをBに変えると，CがDに変わる」という記述の式である．

振り返り

本節では，「AをBに変えると，CがDに変わる」という記述がもつ意味を振り返る．まず，人工物は階層表現として理解できる．図1はその人工物の階層表現の全体像である．

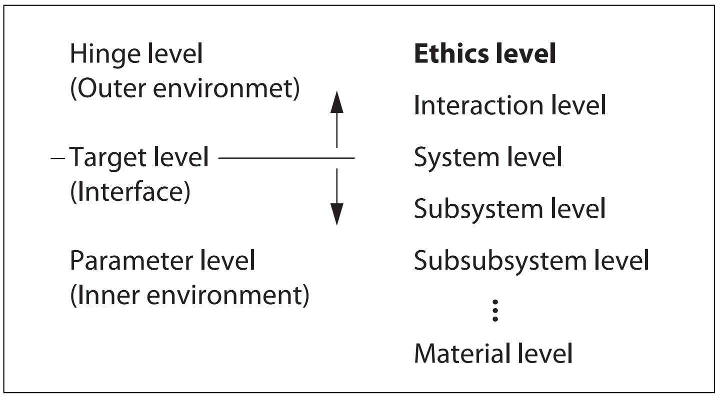

図1: 人工物の階層表現の全体像

設計では上位のレベルが目的に対応し，下位のレベルが手段に対応する．前者は結果に対応し，後者は原因に対応する．設計では何らかのレベルを「ターゲットのレベル（Target level）」として設定することになり，そこでは目的が表現されることになる．それより下位のレベルでどのように実現するかを構成していくことになる．

「AをBに変えると，CがDに変わる」という表現は，このレベル間の因果関係を扱ったものである．もう少し具体的に書けば「（パラメタのレベルで）AをBに変えると，（ターゲットのレベルで）CがDに変わる」となる．図2はこの記述を可視化したイメージである．

図2からも分かるように，筆者らの設計論では主部と述部を分けている．今回の例で言うと，AとCが主部であり，BとDが述部である．主部は存在物を表し，述部はその性質を表す．ある存在物の性質が変化することで他の存在物に変化を与えることを機能と定義する．これを目的達成のために意図的に制御できるよう計画していくことが設計である．

要するにまとめると，「何をどう変えると，何がどう変わるか」を表現し目的達成のために構成していくことが設計の本質であった．

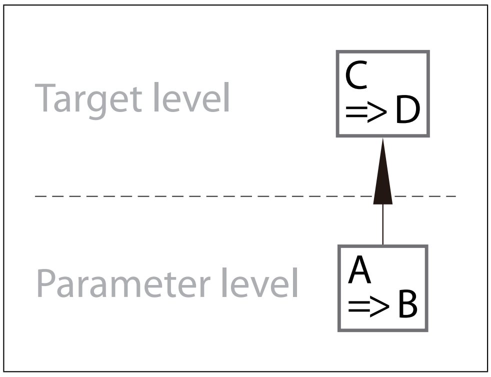

図 2: 「(パラメタのレベルで) A を B に変えると, (ターゲットのレベルで) C が D に変わる」という記述を可視化したイメージ

本質は偏微分

C と A の間に関数 f の関係があるとする．全ての変化は時間 t の関数であると考えられるので，

$$C = f(t, A) \tag{1}$$

と書くことができる．(1) 式は最も単純な式であり，実際に扱う式はもっと複雑なものとなる．実際の設計ではもっと複雑な関係を扱うからである．この関数 f がネットワーク的な表現を形成することになる．

具体的に f がどのような形かは本エッセイでは考えないことにする．C と A の関係を関数として理解できることのみが今は重要だからである．

(1) 式を全微分すると，

$$dC = \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A}dA \tag{2}$$

となる．この式が「何をどう変えると，何がどう変えるか」という記述に対応する．今回は全微分の公式の結果のみを用いることにした．全微分の定義から考え導出していくことも重要だが今回は割愛する．

本エッセイでは，例えば dC と ΔC との区別はしない．一般に d は無限小の変化を表し，Δ は有限小の変化を表すが，今回は d でもって両方の意味を持たせることにする．今回の数式化の目的は，他の変数を変えないという条件の下である変化に注目するという偏微分の考え方を適用することにあるからである．この区別をすると議論が煩雑になってしまう．

続いて (2) 式を B や D を用いて表すことにする．A の初期状態を B_0，変化後の状態を B と書き，C の初期状態を D_0，変化後の状態を D と書くこと

にする．人工物の状態についても引き算が成り立つとし，

$$dC = D - D_0 \tag{3}$$
$$dA = B - B_0 \tag{4}$$

と書けば，(2) 式より，

$$D - D_0 = \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A}(B - B_0) \tag{5}$$

となる．よって変化後の C の状態 D は，

$$D = D_0 + \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A}(B - B_0) \tag{6}$$

と表せる．設計において B_0，D_0，$\frac{\partial f}{\partial t}$，および $\frac{\partial f}{\partial A_1}$ は知識から想定されることになる．初期状態を明確に意識して「何をどう変えると，何がどう変わるか」を考えているときにはこの考え方をしていることになる．

(2) 式あるいは (6) 式の意味は，設計によって手元の何かを変化させることで，現状に対して別の何らかの変化を生じさせるということである．もちろん，変化させないという設計もあり得る．変化させないという変化を加えることとして理解できるからである．

偏微分を考えることで，f を考えるよりも必要な情報が軽減されることは容易に理解できる．例えば，カレーを作るとする．関数 f を考えることは全ての材料を洗い出しそれらの相互作用を考えることに対応する．それに対して偏微分は,「このカレーにもう少しカレー粉を加えると，もっととろみが出てもっとおいしくなる」といったアプローチである．

要するにまとめると，設計論において偏微分は重要ということであった．なぜなら，設計というのは何かを変化させることで目的とする変化を生み出すための活動だからであった．

図による考察

より直感的な理解のために，本節ではグラフを用いて考えることにする．今回は簡単のため時間 t は考えないことにして，

$$C = f(A) \tag{7}$$

という式を考えることにする．これも「A を B に変えると，C が D に変わる」を表す式となっている．ここでのポイントは次の二つである．

i　A が独立変数で，C が従属変数
ii　B や D は具体的な値

以下，もう少し噛み砕いて見ていくことにする．

まず，A が変数であり B が具体的な値である．「A を B に変えると」という部分に注目すると，「B_0」が隠れていて，「A を B_0 から B に変えると」となる．

次に，「C が D に変わる」に注目する．ここにも同様に「D_0」が隠れており「C を D_0 から D に変えると」と書ける．また C が変数であり D が具体的な値である．

最後に，A が独立変数であり C が従属変数であることは，「(パラメタのレベルで) A を B に変えると，(ターゲットのレベルで) C が D に変わる」という関係から分かる．

以上の三つの考察をグラフにまとめたのが図 3 である．ここから (7) 式の関係は自明である．

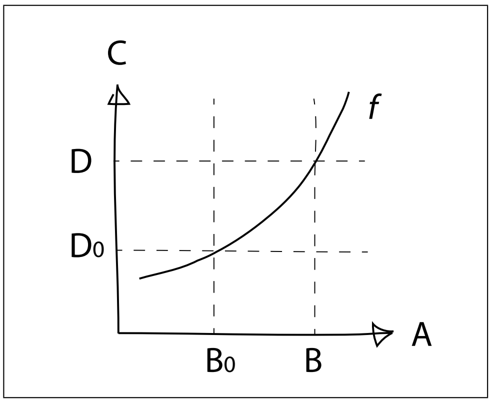

図 3: $C = f(A)$ **をグラフにしたイメージ：初期条件** (B_0, D_0) **とある点** (B, D) **を通る関数**

ここでも先述したように f の具体的な形は考えてはいない．重要なことは，このような関数 f を想定することで設計がより明確に理解できることである．

人工物の速度

研究室にいたころ，知識を速度のように捉える見方を筆者は教わった．(2) 式からは，このような人工物の速度の相互関連を表す式を導出することもできる．ここで速度とは，人工物の状態の時間変化のこととする．言い換えれば，物理学的な位置の時間変化という意味での速度よりもさらに広い意味で用いることにする．以下，特にベクトル表記は用いないが，この速度も何らかの向きを持つものと理解することにする．例えば，座標的な向きであったり，あるいは意味的な方向性などとする．

例えば，C の速度を v_C，A の速度を v_A と書くとにして，

$$v_C = \frac{dC}{dt} \tag{8}$$

$$v_A = \frac{dA}{dt} \tag{9}$$

などと定義する．

(14) 式の両辺を dt で割ると，

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial A}\frac{dA}{dt} \tag{10}$$

となるので，先の速度の定義より，

$$v_C = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial A} v_A \tag{11}$$

となる．この式の意味は，人工物の速度は，自分自身の時間変化と関連する人工物の速度にその関わり方を勘案した値を合成した値になるということである．

要するにまとめると，設計において偏微分のアプローチを取るとは，このように人工物をその速度の相互関連から見ていくことに対応するということであった．

設計における二つの時間

本節では設計における時間についてもう少し詳しく見ていくことにする．設計においては二つの時間を考える必要があった [Sekiguchi 11]．それは「内的時間」と「外的時間」であった．図 4 はこれら二つの時間を表したものである．

またこのように時間を加えて考えることで，設計の表現が四次元まで拡張していく様子を表したのが図 5 である [Sekiguchi 11]．

ひとつの結論として，時間 t を考えることが四次元の表現を考えることである．これは存在そのものの表現についても，変化についての表現についても言える．変化について見るときは，dt を消した例えば速度についての (11) 式について考えることになる．

内的時間と外的時間の違いは時間の微小変化を考えているかどうかである．微小変化を考えている際に主として扱う時間は内的時間である．例えば，(2) 式や (6) 式は内的時間を扱っている．一方で，(1) 式や (11) 式では微小変化を扱っていないので，内的時間は外的時間の一部として表現される．

以上が内的時間と外的時間についての現在の解釈である．ここをより明確にすることは今後の課題でもある．

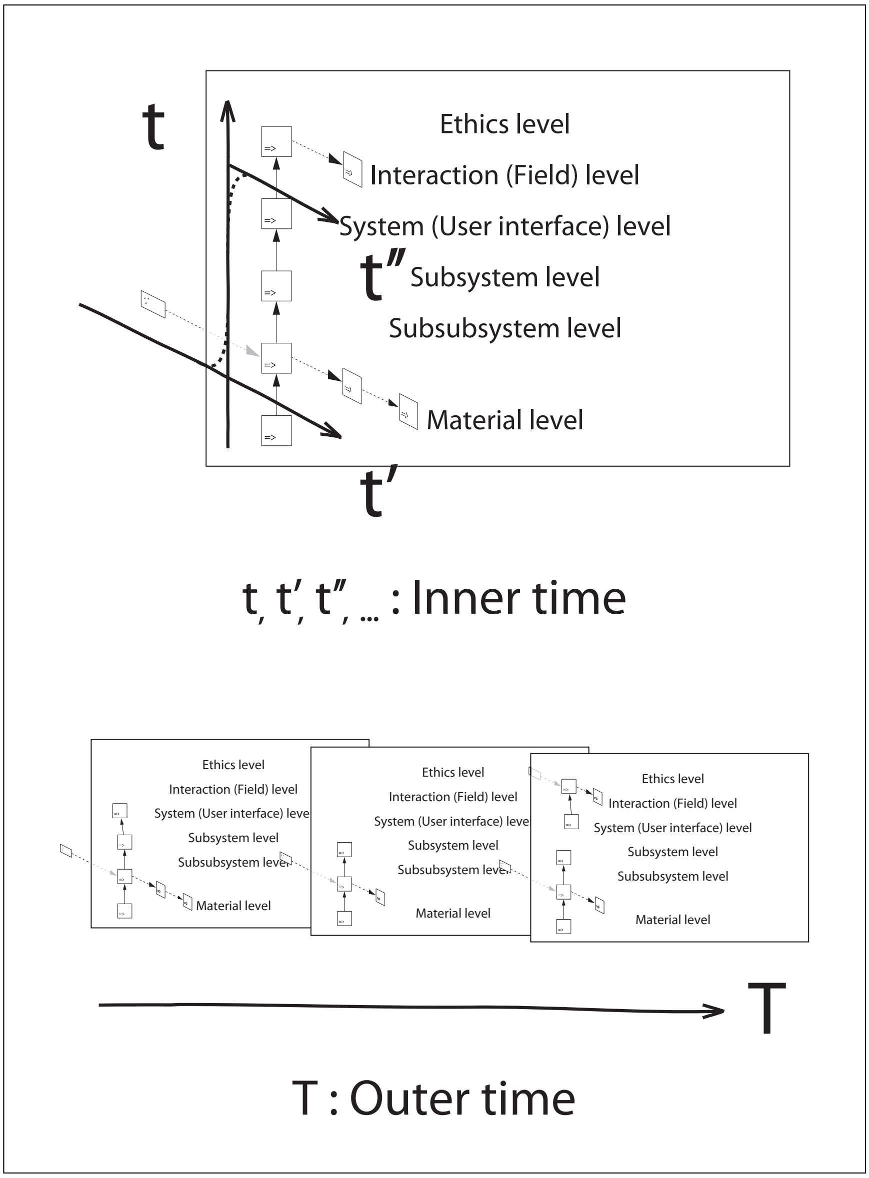

図 4: 「内的時間」と「外的時間」のイメージ

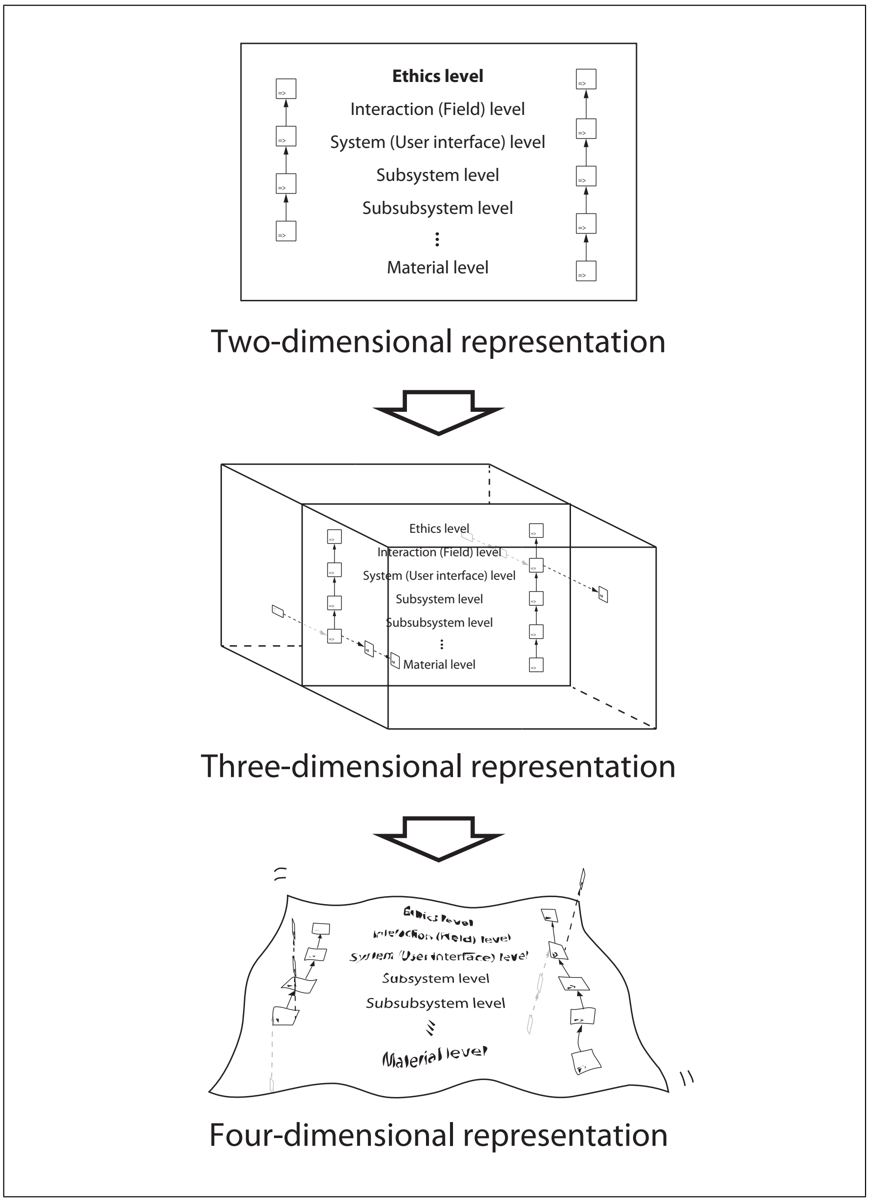

図 5: 人工物の「何をどう変えると，何がどう変わるか」の表現が拡張していくイメージ

原因がたくさんある場合

次に，原因がたくさんある場合について考える．今まで用いてきた他の用語で言うと「独立変数」,「手段」,「パラメタ」あるいは「関連する下位のシステム」がたくさんある場合である．図 6 はそのような場合のイメージである．

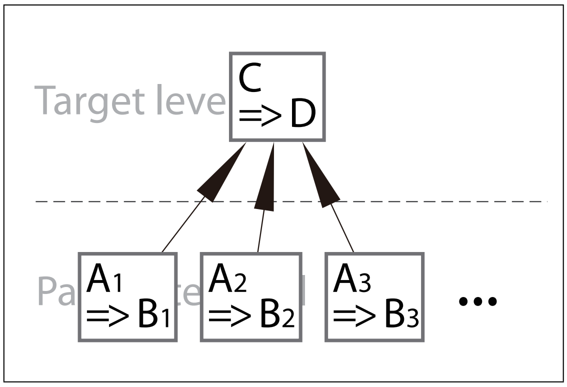

図 6: 「何をどう変えると，何がどう変えるか」の表現で原因がたくさんある場合のイメージ

この場合は独立変数がたくさんあるということだから，

$$C = f(t, A_1, A_2, A_3, \cdots) \tag{12}$$

と書ける．一方で，A_1,，A_2，A_3，$\cdots$ などの図 6 内での隣同士の関係は，設計解の選択肢の多さに対応している．f は柔軟である．関数の形だけでなく，従属変数として何を持つか，幾つもつかなども常に変化する可能性がある．自然に変化する場合もあるが，設計行為によって新しい従属変数を加えたり，取り除くことも可能である．

(12) 式を全微分すると，

$$dC = \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A_1}dA_1 + \frac{\partial f}{\partial A_2}dA_2 + \frac{\partial f}{\partial A_3}dA_3 + \cdots \tag{13}$$

となる．他の条件が変わらないとし，時間 t と A_1 のみを変化させると，

$$dC = \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A_1}dA_1 \tag{14}$$

となる．

C の初期状態を D_0 とすると，新しい状態 C は，

$$\begin{aligned} C &= D_0 + dC && (15) \\ &= D_0 + \frac{\partial f}{\partial t}dt + \frac{\partial f}{\partial A_1}dA_1 && (16) \end{aligned}$$

と近似できる．この (14) 式のように，他の定数が変わらないと仮定し，ある要素のみを変化させて見ることが，設計者の頭の中で考えれていることである．

要するにまとめると，設計においてパラメタが多くなると，全微分の式の右辺に項がたくさん並ぶということであった．

結果がたくさんある場合

次に，結果がたくさんある場合について考える．今まで用いてきた他の用語で言うと「従属変数」,「目的」,「ターゲット」あるいは「関連する上位のシステム」がたくさんある場合である．図 7 はそのような場合のイメージである．

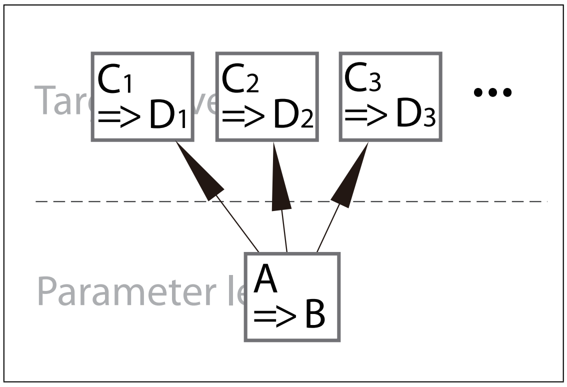

図 7: 「何をどう変えると，何がどう変えるか」の表現で結果がたくさんある場合のイメージ

この場合は従属変数がたくさんあるということだから，

$$C_1 = f_1(t, A) \tag{17}$$

$$C_2 = f_2(t, A) \tag{18}$$

$$C_3 = f_3(t, A) \tag{19}$$

と書ける．式 (17)〜(19) 内にある f_1, f_2, f_3 の添字 $_{1, 2, 3}$ は，それぞれ従属変数との対応を示している．

要するにまとめると，設計においてひとつの操作の結果がたくさんある場合は，関数の数がそれだけ増えるということであった．

三次元の場合

本章では，設計の表現が三次元になった場合について考えることにする．ここで「三次元」とは，筆者が過去に発表したエッセイで提案したモデルに基

づくものとする [Sekiguchi 10b]．三次元の表現を考えるとは，要するに図 8 にあるような表現を合わせて考えることである．

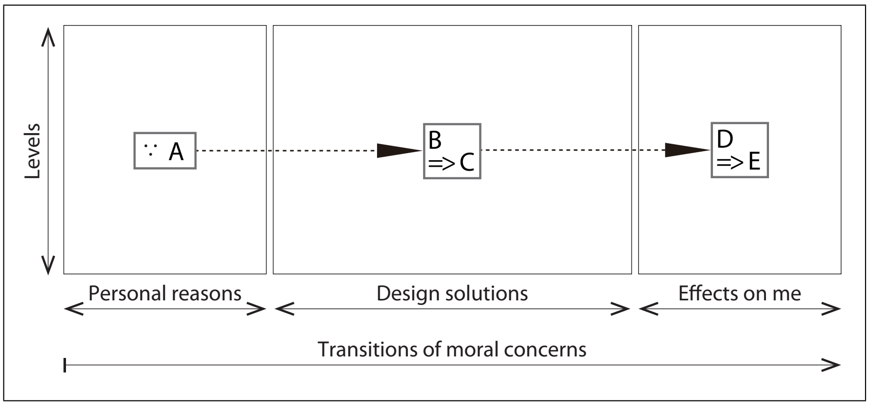

図 8: 「A という個人的理由で、B を C に変えると、（それが実現したら）私に関して D が E に変わる」という記述を可視化したイメージ

前章までで扱ってきたのは二次元の表現であった．これらは設計に関する一般的な現象のみを表現している．例えば,「自動車の最高速度をもっと速くすれば，人々の移動時間が短くなる」とか,「自動車の排気ガスをもっと減らせば，環境に与える負荷が軽減できる」といったことである．

これに対して，個々の存在にとっての価値も設計においては重要である．例えば,「自動車の最高速度がより速くなっているなら，あそこの銀行の貯金を半分使って購入してみようかと思う」とか「自動車の排気ガスが減れば，うちのベランダに干してる洗濯物がちょっときれいになってうれしい」などの個別のものである．この軸を合わせて三次元ということにする．

ここで記述されるのは「A という個人的理由で、B を C に変えると、（それが実現したら）私に関して D が E に変わる」という表現である．より一般的には「これこれこういう個人的理由で、何をどう変えるという設計をすると、（それが実現したら）私に関して何がどう変わるか」というものである．広い意味ではこれも「何をどう変えると，何がどう変わるか」の派生系である．この記述をを数式化すると，

$$B = g_B(t, A) \tag{20}$$

$$D = g_D(t, B) \tag{21}$$

となる．式 (20)〜(21) 内にある g_B, g_D の添字 $_B, _D$ は，それぞれ従属変数との対応を示している．

g_B は個別性から一般性へ，g_D は一般性から個別性へ変換する関数である．また，両者ともに個別性同士の関連を表す関数となる場合もある．

図 8 では全ての記述が平面に描かれている．本節の最後に，これが三次元の表現であるという理論的な背景について述べることにする．図 9 はそのような三次元表現の理論的背景を描いたイメージである．

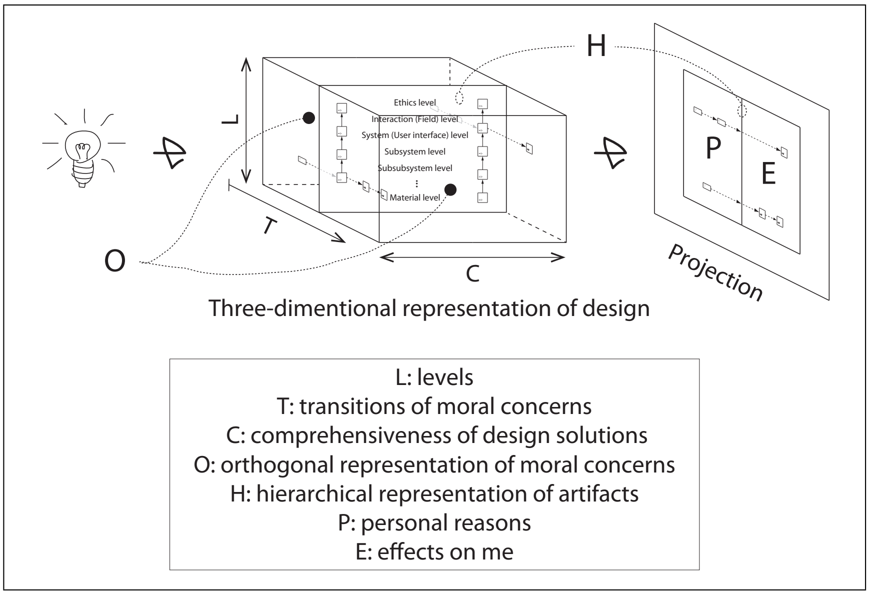

図 9: 三次元の表現を投影して展開図とするための理論的背景

図 9 からも分かる様に，ここでは投影法を利用している．

要するにまとめると，三次元の場合でも数式上は二次元の場合と本質的には変わらないということであった．

数珠つなぎを考える

実際の設計では,「A を B に変えると，C が D に変わる」を二次元，三次元あるいは四次元に考えていくことになる．これらの変化もネットワークを形成するが，存在そのものに関するネットワークとは異なった性質のノードを持つことになる．なぜなら，ここでのノードは変化を表すことになるからである．図 10 は実際に設計をした例である．ここから図 2 の変化の記述がタテやヨコにつながっていくイメージがつかめる．

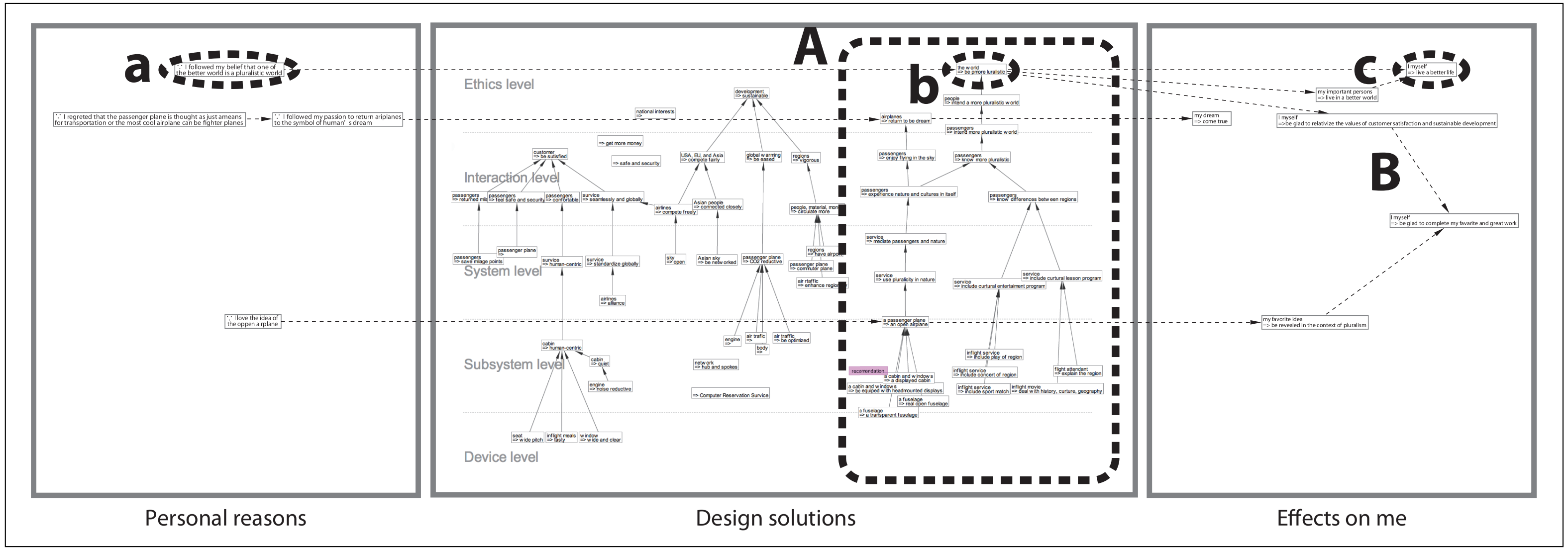

図 10: 旅客機の再設計を可視化したイメージ：(A) the part I redesigned, (B) a downward arrow, (a) ∵ I followed my belief that one of the better worlds is a pluralistic world, (b) the world => be more pluralistic, and (c) I myself => live a better life.

以下，簡単のためタテのつながりのみに注目することにする．図 11 はそのようなつながりの部分を取り出したイメージである．

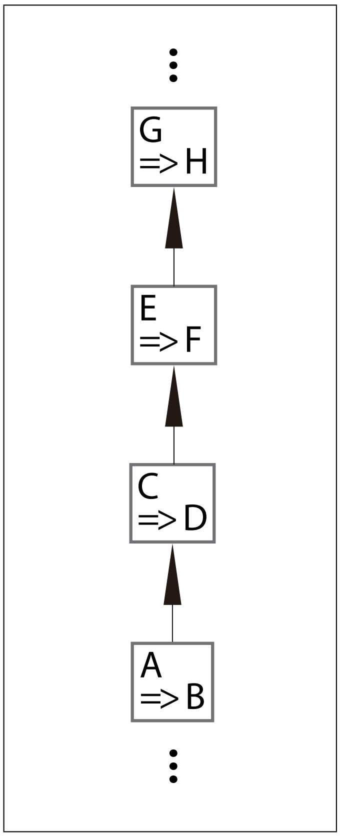

図 11: 「何をどう変えると，何がどう変えるか」の表現が数珠つなぎのようにつながっていくイメージ

図 11 中の四つの四角いアイテムとそれらをつなぐ矢印に注目する．これらは次の三つの関係を可視化したものである．

i A を B に変えると，C が D に変わる
ii C を D に変えると，E が F に変わる
iii E を F に変えると，G が H に変わる

数式化すると連立できて，

$$C = f_C(t, A) \tag{22}$$
$$E = f_E(t, C) \tag{23}$$
$$G = f_G(t, E) \tag{24}$$

となる．式 (22)〜(23) 内にある f_C, f_E, f_G の添字 $_{C, E, G}$ は，それぞれ従

属変数との対応を示している．それらの具体的な形は今回も考えないでおく．そのような関数が想定できるとしている事が今は重要だからである．

ヨコのつながり，つまり個別的な議論に関しても同様の議論ができるが今回は割愛する．また，前説までで述べた「原因がたくさんある場合」や「結果がたくさんある場合」の議論も個別的であっても同様に成り立つのが，これも詳細は割愛する．

要するにまとめると，記述が数珠つなぎになっているときは数式は連立方程式になるということであった．

iii　仮定のチェック

前章まででで設計論に数式表現を与えた．これを用いて本章では体系化の際に導入した仮定が数式からどのように理解できるかを見ていくことにする．

一般性と個別性は直交する

最初に見ていくのは三次元化のところで入れた一般性と個別性が直交するという仮定である．もちろん，一般的な表現と個別的な表現が重なる場合もある．ここでは両者を明確に分離するルールを定義していくことにする．

図 12 は三次元の表現内の三つの場の関係をベン図で表したものである．図 12 中の「area1」と「area2」がその重なりに対応している．「unique1」,「general」,「unique2」は図中で示すそれぞれの円部分を表している．

結論から言うと，area1 と area2 は一般性においてのみ表現するように定義する．これによって，図 8 の三つの表現場の独立を保証することにする．今，Personal reasons の領域を $S_{p.e.}$，Design solution の領域を $S_{d.s.}$，Effects on me の領域を $S_{e.m.}$ と書くとすると，

$$
\begin{aligned}
S_{d.s.} &= general && (25)\\
S_{p.r.} &= unique1 - area1 && (26)\\
&= unique1 - (S_{p.r.} \cap S_{d.s.}) && (27)\\
S_{e.m.} &= unique2 - area1 && (28)\\
&= unique2 - (S_{e.m.} \cap S_{d.s.}) && (29)
\end{aligned}
$$

である．unique1 の中で一般性を持つ存在は一般的な原因の一部となる．同様に，unique2 の中で一般性を持つ存在は一般的に結果を受け取る存在となる．以上で一般性と個別性の分離の定義はできた．これと C が「独立変数」か「従属変数」かを合わせて考えることで，三次元の表現の枠組みが自然にできてくる様子を示したのが図 13 である．

図 13 で g に対応する矢印は破線で表した．図 8 では他の表現とは異なり「=>」を用いずに「∵」を用いたアイテムがある.「個人的理由（personal reasons）」のところである．これは想いは変化ではなくすでにそこにある定数として理解できるからであった．図 13 ではこれらの表現の区別はしなかった．図 13 にあるように「独立変数か従属変数か」と「一般性を扱うかどうか」の区別からのみで四つの表現場の区別ができるからである．

要するにまとめると，三次元の表現に出てくる直交性は自ずと生じるということであった．

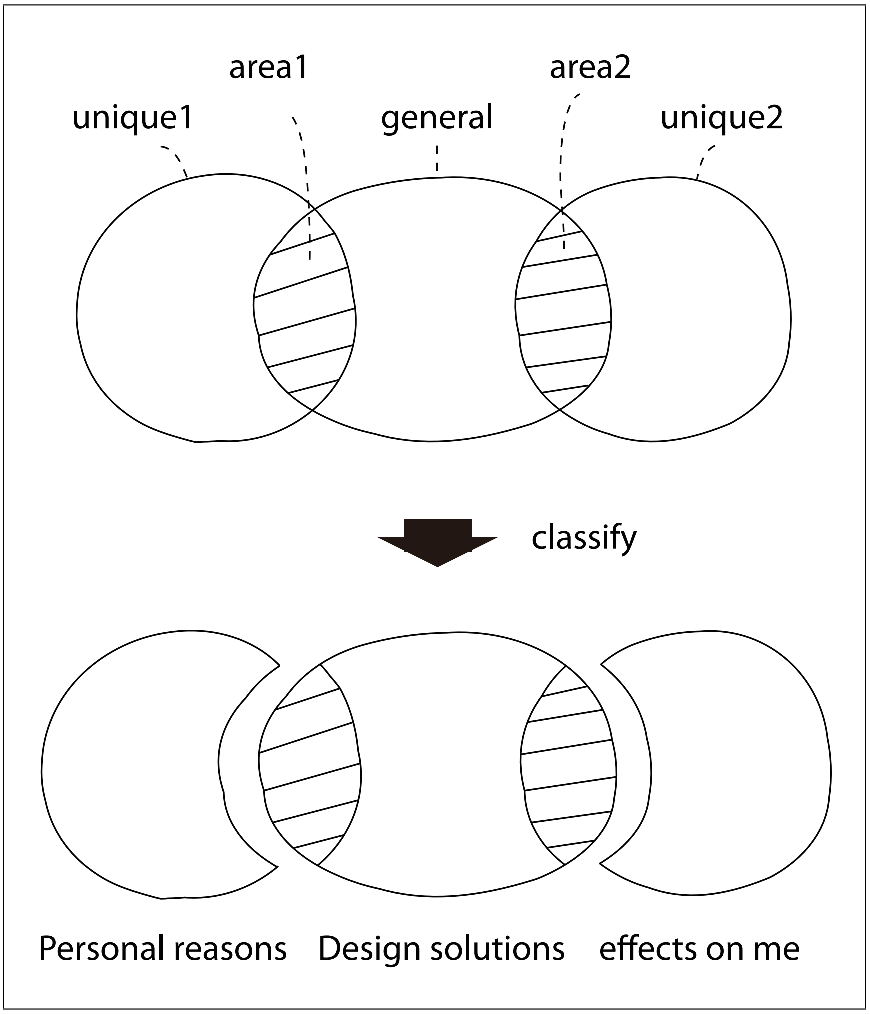

図 12: 三次元の表現における個別性と一般性の分離方法を示したベン図

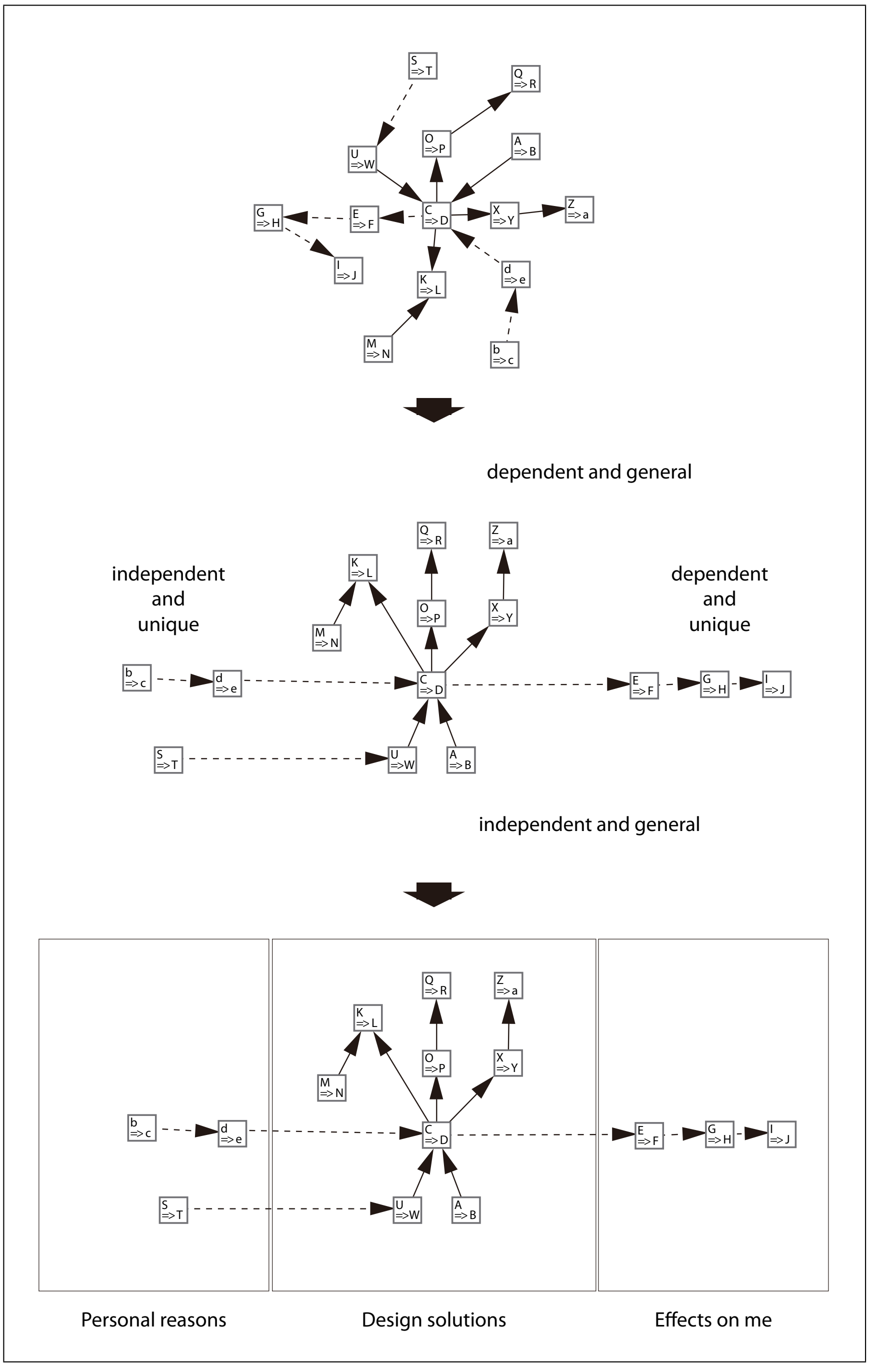

図 13: 「何をどう変えると，何がどう変わるか」の記述のネットワークが，二つの指標から三次元の枠組みを構成していくイメージ．指標 1：一般的（general）か個別的（unique）か，指標 2：独立変数（independent variable）か従属変数（dependent variable）か

自然現象の記述

自然現象の記述は関数 f や g に含まれているが，偏微分することによってそれらの要素の多くが無視されることになる．

設計とは，何も手を加えないと実現されるであろう状態に対して，意図的な介入を行うことで目的とした変化を実現するための活動である．筆者らはこれを「何をどう変えると，何がどう変わるか」の表現として定義してきた．今回のエッセイでは「A を B に変えると，C が D に変わる」と言ってきたものである．

注意が必要なことは，設計を行わなくても変化が起きることである．それらは自然現象としての変化である．これらの変化にも原因となる要素が存在する．それらの要素も (13) 式にある t，A_1，A_2，$\cdots$ に含まれることになる．ただし，これら要素のうち意図的に変化させないものは図 2 や図 8 の表現から外れることになる．

一方で，設計の表現は偏微分であり (2) 式のようなものである．それゆえ図 2 や図 8 の記述によってはほとんどの自然現象の変化は描かれないことになる．それらは初期条件であるか境界条件である．言い換えれば，それら全てを踏まえて描いたのが関数 f や g であり，ネットワーク型の表現であった．

要するにまとめると，設計で主に扱うのは世界そのものではなく変化の連鎖の部分だということであった．

統一理論の可能性

前回のエッセイ [Sekiguchi 13] では，階層的な表現とネットワーク的な表現を数学的につなぎ統一を目指した．本エッセイの内容を踏まえその議論をより厳密なものとする．

具体的には，次の三点を訂正する．

ひとつ目として,「何をどう変えると，何がどう変わるか」の表現を内的時間で積分すればネットワーク型の表現になるとしてきたが，そうとは限らない．ネットワーク型の表現は関数 f や g と対応する．これに対して,「何をどう変えると，何がどう変わるか」の表現はその偏微分に対応している．全微分の式である (13) 式を積分することで関数 f あるいは g が得られることからこの修正の必要性は明らかである．

二つ目として，三次元の表現を外的時間で積分したものが四次元の表現にはなるとは言えない．なぜなら，三次元の表現は時間 t のみで微分された表現ではないからである．それは時間以外のさまざまな要素による偏微分を含んでいる．図 14 は前回のエッセイで示したものと同じものである．階層表現とネットワーク型の表現のつながりをひとつの絵にまとめたものであった．本エッセイでは，キャプション内の説明部分の解釈のみを改めている．

三つ目として，図 14 中の (e) に関して，ネットワークに見えるのは正面か

らの視点に限らない．ネットワークは見る方向に限らずネットワークのままである．例えば，上面図，下面図や，背面図もネットワークを表現したものになる．

要するにまとめると，本エッセイの考察により統一理論の根拠となる数学的関連付けがより明確でより正確になった．

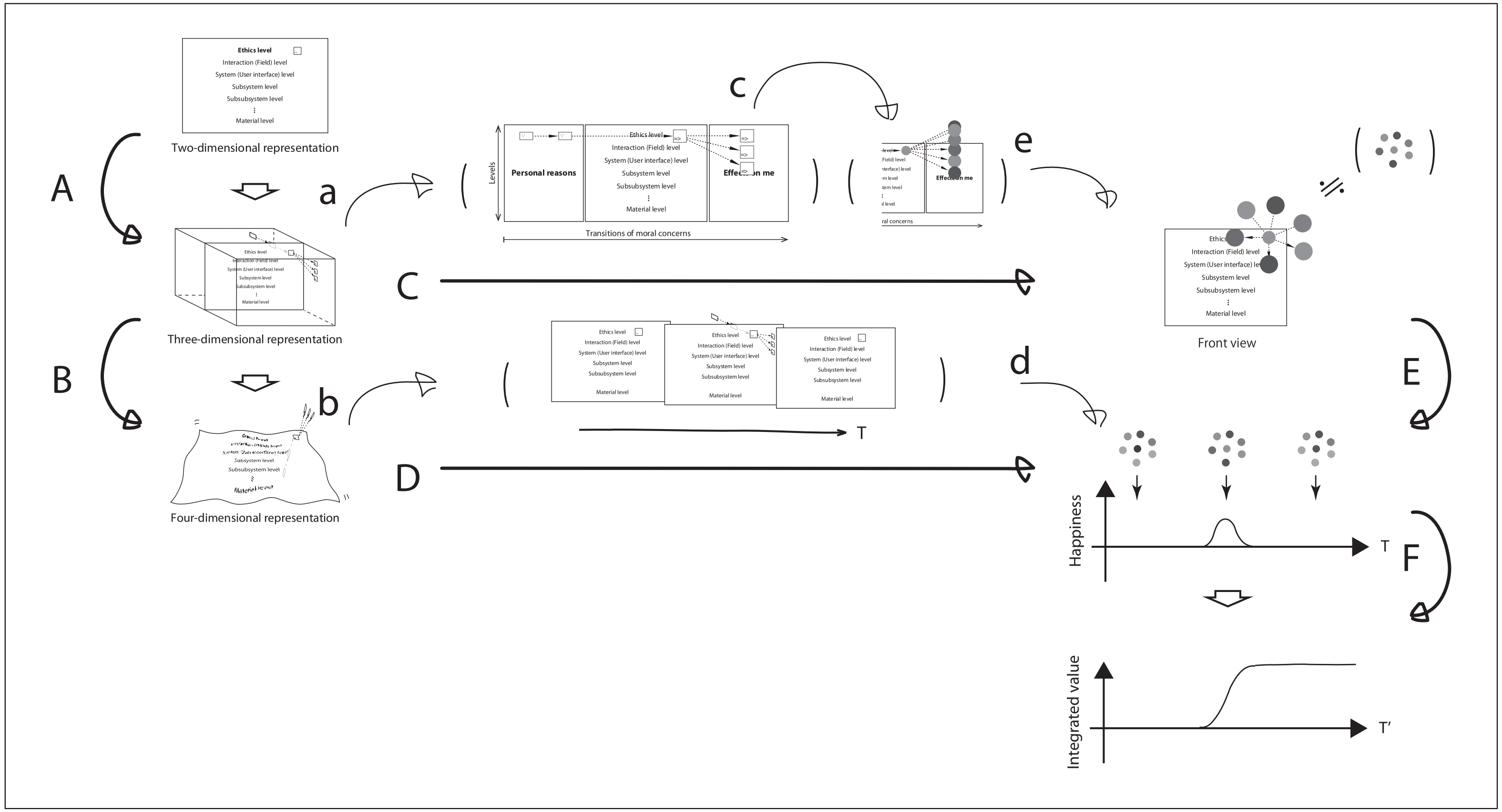

図 14: 階層表現とネットワーク的な表現の関連: (A) 個人的な表現の軸を加えて高次元化, (B, E) 時間 t にそって理解, (F) 時間 t にそって積分, (C, D, c, d) 全微分方程式を積分して関数 f および g を可視化, (a) 正面図と側面図を用いて三次元の階層表現を展開, (b) 時間 t で離散化, (e) 正面+側面図から，正面図へ視点変更

iv　エネルギーの波をとらえる

本章では人工物の持つエネルギーについて考えることにする．

まずエネルギーを E と書くことにする．E の式が導ければ理想だが，ここではこの式が導けない場合について考えていくことにする．現実にはおそらくそのような式は得られないと考えられるからである．

以下，エネルギーの微小変化を dE と書くことにし，任意の系 C に関するエネルギーの収支を考えることにする．図 15 のように $dE_{p.r.}$，dE_{A_i}，$dE_{o.e.}$，$dE_{e.m.}$ と書くものとする．

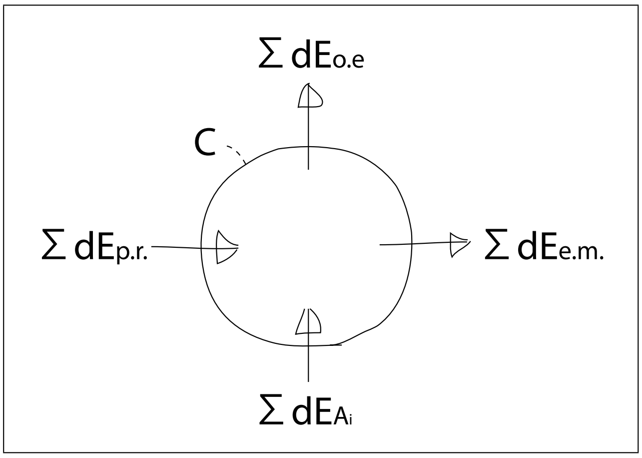

図 15: 任意の系 C についてエネルギーの流入と流出を可視化したイメージ

添字 $p.r.$ は personal reasons を表す．同様に，A_i はそれぞれの構成要素を，$o.e.$ は outer environment を，$e.m.$ は effects on me を表す．ここで $dE_{p.r.}$ は熱力学でいう熱源と解釈することができる．

個別性の持つエネルギーと一般性の持つエネルギーを分けて収支を考える．$dE_{p.r.}$ と $dE_{o.r.}$ が個別性に関するエネルギーで，$dE_{s.s.}$ と $dE_{o.r.}$ が一般性に関するエネルギーである．ここではエネルギーを重複して計算する問題が気になるが，今回はその問題は発生しない．個別性と一般性については図 12 のように分離して定義したからである．

同様の問題は系 C と任意の A_i についても生じ得る．今回は図 16 のように内部にあっても独立したある種の外部環境として分離するように定義する．

この関係を論理式で書くと，C の領域を S_C と，C' の領域を $S_{C'}$ などと書くことにすれば，

$$S_{C'} = S_C - S_A \tag{30}$$

となる．以上を踏まえ，任意の系 C についてエネルギーの収支を考えると，

$$dE_C = \Sigma dE_{p.r.} + \Sigma dE_{A_i} + \Sigma dE_{o.r.} + \Sigma dE_{p.e.} \tag{31}$$

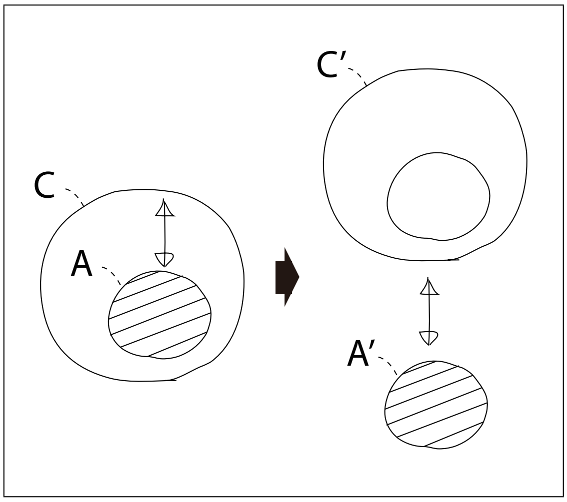

図 16: 内部システムを分離して外部システムとして扱うイメージ

となる．ここで Σ はそれぞれのエネルギーの微小変化について関連するもの全ての和をとることを意味する．

(31) 式を逐次的に解けば，エネルギー E を表す式が分からなくても変化の伝搬を予測することができる．関数 f や g が分かっていればどことどこの間にエネルギーの収支があるかを知ることができる．これは (31) 式と関数 f および g の式を連立することを意味している．この場合，それぞれの E の初期条件や境界条件をどのように見積もるかはなお大きな問題となる．

関数 f や g はが分からなくても偏微分のところだけ見積もることができる場合もある．例えば (2) 式のような関係である．この場合は，設計によって変化するエネルギーの収支のみを見積もることになる．例えば，人々の期待をエネルギーとして扱うことにすれば，この式から，対象とする設計についての期待値の波をシミュレーションすることができる．この場合では，例えば物理や化学などの自然科学的なエネルギーについては考えないことになる．例えば，人々の期待値のエネルギーを見積もることができればバブルの発生や破綻を捉えられるし，その制御も可能になると期待できる．

これら変化の予測と現実世界での観測値と比べることで，筆者らの設計論の検証が可能となる．今回の設計論では世界全体にとっての変化まで含めて扱うのが目的である．それゆえ，人工物の状態を全て検証していくのは困難である．エネルギーであれば共通のスカラー量として扱えるので検証がより容易になる．設計論の体系化においてたくさんの仮定を設けた．もちろんこれら全ての仮定がこのひとつの検証方法で確認できる訳ではないが，まずはこのような検証から始めるのが良いと考えている．

筆者はすでにこのシミュレーションを行うようなシステムの実装に着手している．今回の考察を踏まえてモデルを見直し，修正を加え，実験を行って

いくのは今後の予定である．
　要するにまとめると，エネルギーという視点から実験的な検証方法をひとつ提案できたということであった．

V　ニュートンの運動方程式が成り立つとすると

本章ではニュートンの運動方程式が成り立つと仮定して考察をすすめることにする．本節では太字でベクトルを表すことにし，力を $\boldsymbol{F}$ と書き，運動量を $\boldsymbol{P}$ と書くとすると，

$$\boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{P}}{dt} \tag{32}$$

である．以下簡単のため図 17 の要素からのみ成り立つ系について考える．

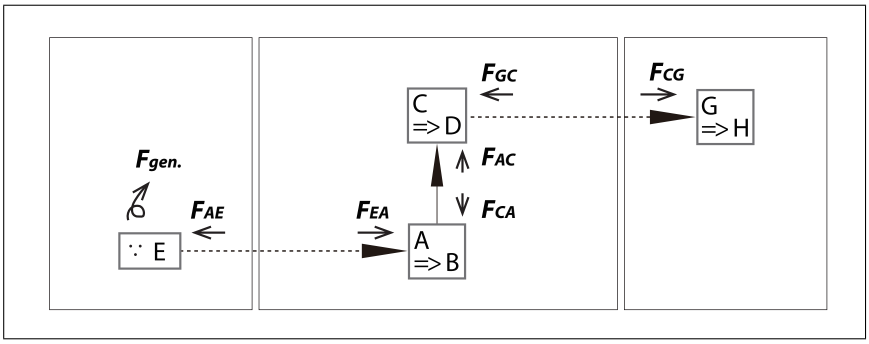

図 17: 「何をどう変えると，何がどう変わるか」の記述のつながりを力の釣り合いとして捉えたイメージ

力のつり合いの式から，

$$\boldsymbol{F_{gen.}} + \boldsymbol{F_{AE}} = \frac{d}{dt}(m_E \boldsymbol{v_E}) \tag{33}$$

$$\boldsymbol{F_{EA}} + \boldsymbol{F_{CA}} = \frac{d}{dt}(m_A \boldsymbol{v_A}) \tag{34}$$

$$\boldsymbol{F_{AC}} + \boldsymbol{F_{GC}} = \frac{d}{dt}(m_C \boldsymbol{v_C}) \tag{35}$$

$$\boldsymbol{F_{CG}} = \frac{d}{dt}(m_G \boldsymbol{v_G}) \tag{36}$$

となる．ここで質量を m_E と，速度を $\boldsymbol{v_E}$ などと書くことにした．また $\boldsymbol{F_{gen.}}$ は設計者の想いを生み出す内発的な力とした．

図 17 で示した以外に力が作用しないとすると，これら連立運動方程式を解いて整理すれば関数 f や g を得られる．実際には図 17 にある変化の記述は一部に過ぎない．これら以外にも作用する要素は他にあり，例えば自然現象を引き起こしているものである．それらとの間に働く全ての力 F も考慮して運動方程式が解ければ正確な関数 f や g を得ることができる．

次に，運動量の変化について考える．作用・反作用の法則より，

$$\boldsymbol{F_{AE}} + \boldsymbol{F_{EA}} = 0 \tag{37}$$

$$\boldsymbol{F_{CA}} + \boldsymbol{F_{AC}} = 0 \tag{38}$$

$$\boldsymbol{F_{GC}} + \boldsymbol{F_{CG}} = 0 \tag{39}$$

なので，(33) 式から (36) 式までを足すと，

$$\boldsymbol{F_{gen.}} = \frac{d}{dt}(m_E\boldsymbol{v_E} + m_A\boldsymbol{v_A} + m_C\boldsymbol{v_C} + m_G\boldsymbol{v_G}) \tag{40}$$

となる．(40) 式はこの設計による系全体の運動量の時間変化が設計者の想いによっていることを示している．逆に言えば，これ以外に意図して世界を変える原因となる力は存在しないことになる．注意が必要なことは，自然現象によっても運動量は変化していることである．またその分の要素が図 17 に必ずしも描かれているとは限らないことはすでに述べた．

ついでに，(40) 式の左右を入れ替えて積分をしておくと，

$$\Delta(m_E\boldsymbol{v_E} + m_A\boldsymbol{v_A} + m_C\boldsymbol{v_C} + m_G\boldsymbol{v_G}) = \int \boldsymbol{F_{gen.}}dt \tag{41}$$

となる．ここでは積分後の値を示すため Δ の記号を用いている．この式の意味は，設計においても想いをより長く持ち続けた方がより大きな変化を生じさせ得るということである．

要するにまとめると，設計者は自身の想いを大切にする必要があるということであった．なぜなら，それが世界を変える力となるからであった．

vi　関連研究との比較

本エッセイでは設計論に数式の表現を与えた．本章では関連研究との比較を行う．

一般設計学との比較

まずは「一般設計学」との比較を行う．筆者らの設計論が一般設計学として最も貢献できるのは「変化」に関するより厳密な議論を加えられる点である．言い換えれば「偏微分」の考え方を体系的に位置付けたところである．以下，吉川弘之の一般設計学を扱うことにする

吉川が採用した考察の方法は「集合論的モデルによって解明するという立場」（[吉川 81] p. 19）というものである.「集合論的モデル」による方法とは，

> **A2**（筆者注:「機能分析と実態分析」（black box 法）（[吉川 77] p. 23）のこと）と同じく，（筆者注: 設計過程の）入力集合ついて属性概念ないし機能概念を，出力集合として実体集合を考え，設計両集合間の写像としてとらえるが，**A2** と異なり実証的に両集合を調べるのではなく，モデルを出発点として，そのモデルから帰結を検討することによってモデルの正当性を検証するのである.（[吉川 77] p. 24）

というものとされる．ポイントは，写像つまり関数を考えていることと，モデル化することで設計論を検証可能にしていることである．いずれも本エッセイでも採用している立場である．

「一般設計学序説」[吉川 79] で実際に行われたのは，各種集合や空間の分類，定義，および構造の解明であった．例えば,「実体概念集合」,「抽象概念集合」,「属性空間」,「形態空間」や,「機能空間」などが扱われた．これらの相互関係を考えた上で，設計とは「写像」つまり関数とされる．設計のひとつのあり得る定義として，

> 設計とは，機能空間の点を属性空間の点へ移す写像である.（[吉川 81] p. 25）

が導かれた．

吉川の一般設計学では，本エッセイの用語で例えると，A と B の関係，C と D の関係や，これらをつなぐ関数 f を扱われていたものと理解できる．その一方で，本エッセイで中心的なテーマであった偏微分の考え方や時間に関する考察はほとんど全く触れられなかった．

筆者らの用いる意味での関数 f については「一般設計過程」[吉川 81] の「設計過程の現実的モデル」（[吉川 81] pp. 22–24）に関する議論が重なるところが多い.「計算モデル」（[吉川 81] pp. 22–23）とされたものが関数 f そのも

のを求めるアプローチに,「範例モデル」([吉川 81] pp. 23–24)とされたものが偏微分のアプローチに対応する.

以下,範例モデルについてより詳しく見ていくことにする.ここで吉川は次の二つの仮定をおく([吉川 81] p. 23).

仮定 1 機能的に類似している実体は類似した属性をもつ.逆も成り立つ.

仮定 2 設計者の実体概念は階層的である.

そして次にように述べる.

> 設計者は与えられた仕様に対応するものとして,すでに知っている実体のうち,もっともよく仕様を充足するものを選択することができ,それを s_1 とする.しかし一般にそれは仕様を完全には満足しない.そこで s_1 を階層の一段下の構成要素に分割し,構成要素のうちの幾つかを,これもすでに知っている別の要素と交換して s_2 を得る.それでも満足しないときはさらに階層を下げ,交換によって s_2 を得る.このような仮定によって得られる s_1, s_2, s_3 などは,仮定 1 によって下位に収束する有効点列であることが保証されているのである.([吉川 81] p. 23)

吉川が示すこの部分に関する図中には次のような数式が見られる([吉川 81] p. 24).

$$s_2 = s_1 + \Delta_1 \tag{42}$$

$$s_3 = s_2 + \Delta_2 \tag{43}$$

(42) 式や (43) 式は筆者の導いた (6) 式と対応している.偏微分を用いた数式化はされていないものの,これらは偏微分につながる考察がなされていたことを示している.

筆者と異なるのはその解釈である.吉川によればこのアプローチはより満足する解に近づくために取る作戦である.一方で筆者はこれこそが設計の本質をなすと考えている.なぜなら,設計とは目的達成のために現状の世界になんらかの変化を加えるための活動だからである.変化に注目することが本質をなすという主張は,知覚論的にもサポートされる.この点については後述することにする.

要するにまとめると,「計算モデル」と「範例モデル」は微分・積分の関係でつながることになる.なぜなら,前者を偏微分して捉えたのが後者に他ならないからである.

FBS モデリングとの比較

一般設計学として貢献できるところは偏微分の体系的導入の他にもいくつか存在する.例えば,図 5,図 10 および,図 9 にあるように筆者らの三次元や

四次元まで見据えた枠組み，図 2 や図 8 にあるような記述方法やその可視化の手法，そして階層的表現とネットワーク的表現の数学的つながりの証明である．

以下，三つのポイントについて「FBS モデリング（Function-Behavior-State）」との比較をしながらより詳しく見ていく．

ひとつ目として，梅田らの「FBS モデリング」は「動詞を中心とした機能表現」（[吉岡 98]）である．一方で筆者らの設計論は主部と述部をセットにした表現である.「何をどう変えると，何がどう変わるか」を記述するものである．主部である「何」は存在物を表し，述部である「どう」の部分でその性質を表すことになる．これにより機能や挙動に関する階層関係だけでなく，人工物同士の階層関係もより明確に表現できるようになっている．

二つ目として，FBS モデリングは関数 f だけでなく g も扱うことのできる理論である．なぜなら，機能を主観的なものと捉えているからである．これに加え，筆者らは機能を一般性を持つものと個別的なものに分けている．一般性を持つと言えるのは表現に用いる言語あるいは記号が社会的な産物だからである．つまり，人工物を認識する人々の側にある程度共通の認識の枠組みがあると想定できるからである．この点に関して筆者はクリッペンドルフの考察に近い．

> 言語の中で、人工物は概念化され、構成され、コミュニケートされる。それらの意味は取り決められ、その運命が決められる．
> （[Krippendorff 09] p. 173）

ただし，全員が同じ価値を人工物から見いだすということではない．間主観的に決まるとするのが最も納得できる解答だろう．筆者はこれらのインタラクティブな価値取得の過程を一般性と個別性を直交させ，あるいは波として，繰り返す流れとして捉えていることは既に述べた．

FBS モデリングでは機能を主観的なものとし，挙動を客観的なものとしている．筆者らの人工物の階層表現では，階層の下位にいく程より客観的な現象に対応すると理解することになる．

三つ目として，FBS モデリングでは時間 t がない．言い換えれば，共時的なモデルであり通時的なものも合わせて考えるとより効果を発揮すると期待できる．本エッセイの考察から分かった事は，この時間 t にそって考えることが四次元の表現を扱うことと対応することであった．

要するにまとめると，FBS モデリングを発展させたものが筆者らの設計論と見なせるということであった．

サービス工学との比較

次に吉川の「サービス工学」との比較を行う．一般設計学と比べて特に重要なのはこちらでは微分の考え方が明示的に入っている点である．例えば，次

のような式が示されている（[吉川 08] p. 115）．

$$f_d = -k_d \cdot d(L_{d1})/dt \tag{44}$$

添字の $_d$ はサービスのドナーを示している．吉川による説明を引用すると，

> 健在機能 f（筆者注: 本エッセイで用いている関数 f とは異なるもの）は機能の出現速度であるが、これはサービス提供の時間速度であり、一般に言うサービスはこれに相当しているといってよいであろう。k は便宜的なもので、別に定義しなければならない。（[吉川 08] p. 115）

ということである．(44) 式は筆者の示した (8) 式および (9) 式に対応する．

本エッセイがこれらの考察に加えられる最も重要な知見は (11) 式によって示されている．これは人工物のもつ速度同士の関係を表す式であった．これによって，サービス工学と一般設計学をつなぐことができている．(11) 式では関数 f が重要な役割をなし，そしてこの関数を扱っていたのが一般設計学だったからである．さらに言えば，ここでの一般設計学は前述したように筆者の数式化が加わった新しいものとなっている．偏微分の考え方が入っているからである．

要するにまとめると，筆者らの設計論によってサービスもひとつの人工物として新しい一般設計学の中で扱えるということであった．

アフォーダンスとの類似

設計あるいはデザインの分野ではアフォーダンスを扱う理論が重要である．特にインタラクションの設計を行う際に重要とされている．ところで，設計過程もインタラクティブである．設計者と設計している人工物あるいは設計図などとの間に相互のやりとりが発生することになる．このとき，設計者も「知覚者」であるので，

> 知覚者が対象の変化から見ているのは「形（form）」ではなく、対象そのもの、それのリアルな「姿（shape）」である。「姿」は、形からではなく、それ自体は形をもたない「変形」から知覚されるのだ。
>
> 重要なのは、変化しないことではなく、変化することによって、対象の不変な性質が明らかになることである。知覚にとっては「変化という次元」こそが問題なのだ。「変化」の中に埋め込まれている「不変」が知覚されることなのだ。（[佐々木 94] p. 32）

という考察が同様に成り立つ．そしてこれは筆者らが偏微分によって理解しようとしていることに他ならない．

ちなみに,「不変な性質」について補足しておくと，本文中で例示されているのは，例えば,「知覚者自身の姿勢や速度」([佐々木 94] p. 33）である．あるいは，テーブルをいろいろな視点から見たときに，その見え方は様々な台形の形に歪んで見えてくるがその「台形の四つの角と辺の関係には常に変化しない一定の比率がある」([佐々木 94] pp. 48–49）ということが挙げられている．速度を不変項とみなすかどうかの議論は今回は割愛することにする．

要するに重要なことは，変化を通して知覚していくことが本質ということであった．

vii　まとめ

本エッセイでは設計論に数式の表現を与えた．数式化することによってこれまで曖昧だったところがより明確になった．特に重要であったのは設計論のふたつのアプローチが偏微分とそれらの積分として関連づけられることであった．また，ここから設計において表現されていることと表現されにくいことも明確になった．それらは初期状態や境界条件として理解できるのであった．

前回のエッセイについては，発表した直後にいくつかの誤りに気付くことになった．それ以来，正解を求めて勉強をし直し，考察を重ねてきた．本エッセイのスタート地点はその修正を行うことであった．ただ，書き終えた今も仮説を提示するので精一杯であったと痛感している．これから多くの批判を期待したい．

本エッセイにおいて，検証の方法をひとつ提示することができた．その妥当性についてもこれから議論が必要だと考えているが，ようやく自身で検証できるフェーズに入りつつあると楽しみでもある．

設計論の体系化を始めたのは世界をより良くしたいという想いがあったからであった．初心を忘れず，仲間達とともに，少しでも実現できたらと考えている．

本エッセイを書くにあたってたくさんの人や作品にお世話になったし，迷惑もかけてしまったと思う．この場を借りてお礼を述べたいと思う．本当にありがとうございました．

参考資料

[Krippendorff 09] クラウス・クリッペンドルフ著, 小林昭世, 川間哲夫, 國澤好衛, 小口裕史, 蓮池広威, 西沢弘行, 氏家良樹訳『意味論的展開 デザインの新しい基礎理論』エスアイビー・アクセス, 2009.

[佐々木 94] 佐々木正人著『アフォーダンス—-新しい認知の理論』岩波書店, 1994.

[Sekiguchi 10a] Sekiguchi, K.: "Design with discourse" for design from the "ethics level" — 2nd edition, August 7, 2010.

[Sekiguchi 10b] Sekiguchi, K.: The fifth rule of "design with discourse" for the orthogonal representation of moral concerns in design from the ethics level, October 30, 2010.

[Sekiguchi 11] Sekiguchi, K.: The sixth and the seventh rules of "design with discourse" for design from the ethics level, January 1, 2011. (in Japanese)

[関口 12] 関口海良：「設計して意味があるのか?」という問いに対するひとつの考え方, 4 月 7 日, 2012 年.

[Sekiguchi 13] Sekiguchi K.: Proof of the Existence of the Design Theory: Final Edition, January 28, 2013. (in Japanese)

[梅田 97] 梅田靖, 富山哲男, 吉川弘之: 機能設計支援のための FBS モデリングの提案, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 6. pp. 795–800, 1997.

[吉川 77] 吉川弘之: 設計学研究, 精密機械, Vol. 43, No. 1, pp. 21–26, 1977.

[吉川 79] 吉川弘之: 一般設計学序説 — 一般設計学のための公理的方法 —, 精密機械, Vol. 45, No. 8, pp. 906–916, 1979.

[吉川 81] 吉川弘之: 一般設計学過程, 精密機械, Vol. 47, No. 4, pp. 19–24, 1981.

[吉川 08] 吉川弘之: サービス工学序説 — サービスを理論的に扱うための枠組み —, Synthesiology, Vol. 1, No. 2, pp. 111–122, 2008.

[吉岡 98] 吉岡真治, Ralf Stefan Lossack, 冨山哲男: 入出力を中心とした機能表現と動詞を中心とした機能表現の比較と分析, 日本機械学会, 第 8 回設計工学・システム部門講演論文集, pp. 145–148, 1998.