

# シンセシスにおけるアブダクションの役割と定式化

## Roles and formalization of abduction in synthesis

武田 英明\*<sup>1</sup>  
Hideaki Takeda

吉岡 真治\*<sup>1</sup>  
Masaharu Yoshioka

富山 哲男\*<sup>2</sup>  
Tetsuo Tomiyama

\*<sup>1</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics

\*<sup>2</sup> 東京大学人工物工学研究センター  
RACE, The University of Tokyo

In this paper, we discuss roles of abduction in synthesis for design. Synthesis is one of the most typical synthesis processes but not well investigated yet. Assuming synthesis for design is abduction, we explicate its characteristics. Although many researchers in computer science defined abduction in logical inference, there is a common problem, i.e., they assumed that knowledge is perfect. Peirce's abduction should not assume "perfect" knowledge, rather imperfect knowledge is necessary condition to realize abduction. Abduction is to expand or to revise imperfect knowledge by bridging an observed fact and the existing knowledge. Since knowledge is divided into many domain knowledge in engineering, abduction for design is to treat imperfectness of inter-domain knowledge and domain knowledge. We re-organize our work with this perspective, i.e., integration of design experience and superposition of concepts are abduction with completeness of domain knowledge and incompleteness of inter-domain knowledge, and circumscription and model-based abduction are that with incompleteness of domain knowledge and completeness of inter-domain knowledge. The whole discussion leads a new conclusion for synthesis; synthesis for design is integration of knowledge or domain theories so that iteration of abduction can evolve knowledge.

### 1. はじめに

著者らは日本学術振興会未来開拓学術推進事業の「シンセシスの科学」分野の一つのプロジェクトである「シンセシスのモデル論」プロジェクトにおいて、設計におけるシンセシスについて一連の研究を行ってきた[富山 2001]。この中でシンセシスのモデル化の基礎概念としてアブダクションを措定して、さまざまな研究を行った。本稿では設計におけるシンセシスとアブダクションの関係について整理を行い、アブダクションの役割を明らかにする。

シンセシスは部分から全体を作り出すような行為を指しているが、科学や工学の世界においてはアナリシスの対語として使われる。アナリシスが基本的に調べる行為であるのに対して、シンセシスは新たに作り出す行為である。シンセシスは後に述べるパースのように「発見の科学」の中で議論されてきた。ここでいう発見は主に科学的発見であった。設計はより典型的なシンセシスの過程であるが、これまでその対象として考えられることが少なかった。ここでは設計におけるシンセシスの特徴がどんなものであるかが考察の対象である。

### 2. 設計問題の定義

設計問題をどう定義するかについてはこれまでもさまざまな議論がなされているが、ここでは後の議論のために基本的な枠組みとして以下のように考える。

設計とは要求を実現する実体を見出す行為である。設計が機能から属性を見出すという場合 [吉川 1979]、ここで属性とは実体を指し示すための情報であり、機能は(属性以外の)要求を指し示すための情報であることを意味している。

では、属性や機能を正確に定義することで設計を定義することができるであろうか。何が属性あるいは実体の記述であるかは実体の実現可能な技術によって決まるものである。また、機能あるいは要求の記述は設計物が使われる社会的な文脈に依存す

る面がある。すなわち、属性や機能そのものはこれら外的事情から切り離してまったく独立に定義することはできない。見方を変えれば、機能は対象世界と(その設計物をつかう)社会的な世界との中間にあるということである。対象世界からみれば(にかぎれば)実体から機能は導き出されるものであり、社会的な世界からみれば機能は社会的な状況から導き出されるものである。「設計」という場合、一義的には前者の対象世界での関係に専念する、すなわち機能から属性を見出す行為である<sup>1</sup>。

しかし、これだけでは普通いわれる「設計」とくらべて範囲が広すぎると思われる。例えば偶然の発見と設計を区別できない。

そこでここでは設計には法則性の前提が必要であると考える。これは二つの側面がある。まず対象としている世界に法則性があることである。物理的世界を対象としている場合物理法則がその世界を律しているということを目指す。これが前提とされない世界では設計は成り立たない。次に設計者の法則性へ依存があることである。設計者が法則を明に暗に利用することで設計が進行するということである。たとえば適当にくみ上げていったらいつの間にか要求を満たすものができたといったことを設計とはいわないであろう。ただし設計者のもつ法則は対象世界自身もつ法則と同じものである必要性はない<sup>2</sup>。

すなわち、設計とは対象世界にある法則性を理解し利用することで要求から実体を見出す行為であるといえる。ここで設計者が理解し利用する法則性が後でいう知識に対応する。

ただし、この知識は設計においてはきわめて種類が多く、そのあり方も多様である。設計における知識の特徴としては

1. 領域ごとにあるいは抽象度の違いで知識が分かれている。
2. 領域の知識の一部は形式的に整理されている(〇〇学的領域)。

<sup>1</sup> 価値工学(value engineering)は一部後者に対する取り組みであるといえる。

<sup>2</sup> ただし、認識論的に考えると、対象世界に法則性があるということと設計者が法則性を理解するということが厳密に区別することはできない。

3. 整理されていない領域知識は実体を中心にまとめられていることが多い。
  4. 領域を統合する知識は経験的なものが多い
- 2 においては対象世界の法則性がよく知られている場合(対象世界の法則性≈設計者の利用する法則性)であり、3 の領域は対象世界の法則性が必ずしも明らかでない場合など、ヒューリスティックスとして表現されている場合である。

### 3. アブダクションの問題

パースはアブダクションを科学的発見の第一段階として“説明仮説”(explanatory hypothesis)を採用する過程である[米盛 1981] [Peirce 1985]。また推論の拡張的モード(ampliative mode)である総合的推論(synthetic reasoning)とも位置付けている。彼は次のような例を挙げている。

1. 驚くべき事実 C が観察される
2. もし A が真であれば、C は当然のことである
3. よって、A が真であることを疑う理由がある ……………(1)

彼は abduction は完全な論理推論である、あるいは Modus ponens を逆さに使う推論という一方、まったくの直観的推論であるとも述べている。パースのアブダクションの概念は必ずしも一貫したものではない。しかし、“発見の論理”において多大な影響を与えている。

計算機科学とくに人工知能ではこのアブダクションを logic programming の中で定式化することが行われ、その場合は仮説推論と呼ばれていることが多い。典型的な定義としてはつぎのようになる[Kakas et al. 1995]。

論理式集合である理論 T と論理式である観察 G が与えられたとき仮説的説明 Δ は以下の条件を満たすものである。

- $$T \cup \Delta \models G$$
- $$T \cup \Delta \text{ は無矛盾} \dots\dots\dots(2)$$

たとえば Poole のデフォルト推論[Poole 1988]はその実現の一方法である。ところがこの定式化はパースがいうところの拡張的推論あるいは新しいアイデアの発見といったものを実現していないといわれる[Hoffmann1997] [Aliseda1997]。(2)は一見(1)をそのまま定式化したようにみえるが、何が問題であろうか。

それは観察事象と知識の関係と知識自身のあり方にあると考えることができる。これは(1)では“驚くべき事実”とあることに対する対応が(2)にはないことに端的に表現されている。この“驚くべき”ということは心理的效果というより認識的效果を指していると考えべきであり、これは自分のもつ知識や状況に合っていないということのサインであると考えられる。これは少なくとも(2)で想定しているような完全な知識では起こりえない。完全な知識の元では必ず“合う”(否定されるか肯定されるかは別として判断可能)はずであるので、驚くという状況は想定できない。

しかし興味深いことにまったくの未知であるというわけでもない。その事象が認識できたということは、それが記号(sign)によって表現できたということである。その記号に関するなんらかの知識をもっていることを示している。すなわち、欠けているのは間をつなぐ部分である[Hoffmann 1997]。アブダクションはここでは“新しい状況におけるこれまで得た認知的習性の適用”といえる。

このような不完全な知識をどう取り扱うかはさまざまな方法がありえる。[Hoffmann 1997] では最も原始的な定義として無限数の仮説を仮定して、その選択としてアブダクションを説明している。[Aliseda 1997]はアブダクションのトリガーとしての“驚くべき事実”を既存の知識に関係において仮説的新規性(abductive novelty)と仮説的変則性(abductive anomaly)に分け、前者の場合は知識は拡張(expansion)され、後者の場合は改定(revision)されるとしている。[Leake 1995]は日常的アブダクションとして事

まず、設計経験それぞれを  $de_i=(Ds_i, Ko_i, P_i, O_i), \dots, de_n=(Ds_n, Ko_n, P_n, O_n)$  とする。

$$Ds_k \cup Ko_k \models P_k, Ds_k \in O_k, Ko_k \in O_k, P_k \in O_k \quad (1 \leq k \leq n)$$

- (1) 設計経験の集合を形成する。  
 $DE = \{de_1, de_2, \dots, de_n\}$
- (2) それらの経験を包含するモデルを形成する  
 $O_1, O_2, \dots, O_n$  に関して妥当な置換  $\phi$  を求める。  
 $O = O_1 \phi, O = O_2 \phi, \dots, O = O_n \phi,$   
 $de_1' = (Ds_1', Ko_1', P_1', O_1') = de_1 \phi = (Ds_1 \phi, Ko_1 \phi, P_1 \phi, O),$   
…  
 $de_n' = (Ds_n', Ko_n', P_n', O_n') = de_n \phi = (Ds_n \phi, Ko_n \phi, P_n \phi, O)$   
 $de_n' = (Ds_n \phi, Ko_n \phi, P_n \phi, O),$   
 $Ko' = Ko_1 \phi \cup \dots \cup Ko_n \phi$
- (3) “新しさ”を求める要素を極小化する。  
例えば、 $|Ds| < |Ds_k| \quad (1 \leq k \leq n)$  なる  $Ds$  を求めることは設計解の複雑さにおいて最小のものを求めるということに相当する。

図 1 設計経験の重合による発見

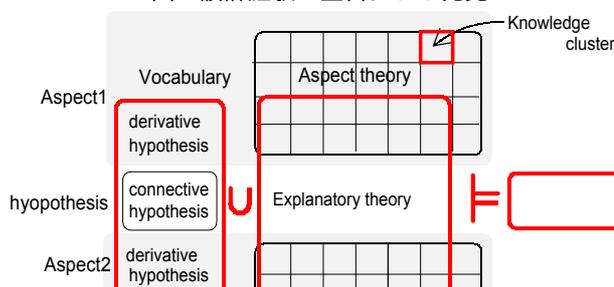


図 2 重合による仮説生成

例ベース推論を位置付けて、事例として知識を表現することで不完全な知識が表現可能なことを示し、“驚くべき事実”は知識の変則性を発見し適用することで推論可能になると述べている。

### 4. 設計におけるアブダクション

1 章で述べたようにここでは設計をアブダクションと措定して研究を行ってきた<sup>1</sup>。2 章で述べたように社会的世界を無視して対象世界だけに限れば機能は属性によって規定されるものである(逆はない)。このため論理的視点からは機能から属性を求める行為はアブダクションとなる。

また、設計における知識が 3 章で述べたような知識の状態(不完全な知識)であることも明らかであり、これは 3 章でのアブダクションの可能性がそのまま適用できることを意味している。

ただし、設計における知識は 2 章で述べたように領域知識としてのまとまりがあるという特徴がある。領域があるということは、それぞれに視点(perspective)があるということであり、これは 3 章でいうところの認知的習性としてある程度用意されたものがあるということである。これは無限の視点を扱うというのではなく、有限の視点を対象にすればよいということであり、無限の仮説を扱うのではなく有限の仮説ですむということである。しかし、当然のことながら異なる視点での知識と観察事実の関係はわからないのであり、これは“発見”されなければならない。

<sup>1</sup>設計がアブダクションであるか演繹であるかということに関しては議論がある。[柳生 1995]では明確に逆であると論じている。[柳生 1995]が想定している知識はまさに 3 章で述べた完全な知識であり、そのときにはアブダクションも演繹も推論としては差がなくなる。しかし、問題なのは不完全な知識のときである。

- (1) ある知識  $K_i$  を用いて設計解の近傍系を導出する
  - (a) 設計仕様として与えられた要求  $Th$  のうち、ある知識  $K_i$  で扱う事が出来る要求 ( $Th_i$ ) を設定する。
  - (b) 解候補集合  $Fd_i = \{e_1, e_2, \dots\}$  をクローズドワールドアサンプションを用いたアブダクションにより導出する。  
 $K_i \cup Fd_i \vdash Th_i$   
 $\{e_1 \rightarrow p_1, e_2 \rightarrow p_2, \dots, e_n \rightarrow f_1, \dots\} \cup Fd_i \vdash \{p_1, \dots, f_1, \dots\}$   
 ここで  $e_i$  は実体概念で、 $p_i$  は属性概念、 $f_i$  は機能概念である。
- (2) 各解候補について抽象的な実体概念の考え方にに基づき近傍系を調べ、解候補の存在可能領域  $Fd'_i$  を導出する。また、この近傍系に対して公理系を用いて演繹を行い、属性や機能の情報を導出し、設計解が持つ属性や機能に関する情報  $Th_i$  を増やす。
- (3) 1.の操作を異なる知識  $K_i$  に対して行い、同じく解候補の存在可能領域  $Fd'_i$  を導出する。
- (4)  $\bigcup_{\lambda=1}^n Th_\lambda \supset Th$  を満たす添数集合  $\Lambda$  に対し、 $\bigcap_{\lambda \in \Lambda} Fd'_\lambda$  を計算することにより解候補を絞り込む。

図3 モデルベースアブダクション

また領域知識そのものも不完全であるので、[Aliseda1997]のよう知識は改定されたり拡張されないといけない。すなわち、

- 領域知識間の関係の不完全性
- 領域知識の不完全性

の両方が設計におけるアブダクションを可能としている。

以上のように設計におけるアブダクションは二つの不完全性関わっていることがわかったが、この両方が同時に不完全であると考えることは困難な問題を引き起こす。そこでどちらかを“信じて”他方の不完全性のみを考えるというのが現実的な方策である。すなわち 2 通りが考えられる。この視点からこれまでの研究を概観する。

#### 4.1 領域間知識の不完全性の補完

ここでは基本的に領域知識が完全であるという仮定の元に領域間の知識の不完全性を発見する。

##### (1) 経験的知識の結合による発見

[武田 1998]では経験的知識の表現という立場から領域間の知識を統合する方式を定式化した(図1参照)。経験的知識という意味では[Leake 1995]の事例ベース推論での知識の扱いと似ている。ここでの知識はオントロジー、対象、対象の性質といったものを前提としている。事例ベース推論と異なるのは事例ベース推論が基本的に単一事例と現在の状況のマッチングから始まるのに対して、複数の経験(事例)を組み合わせたことができるかをいかに表現できるかを目的としている。このためオントロジーを統合することがその方式として提案されている。

##### (2) 概念の重合による発見

上記の方法では具体的な統合の方法については述べられていない。統合の一方法として[Takeda 1994]では概念の重合を提案している。異なる領域由来の概念をある目的の元で同一視するというものである。あるアブダクションを達成するとは、全体として無矛盾であるような、複数ある領域知識の中の知識を適当に組み合わせると仮説をつくることである。ここでの仮説とは特定の領域の中にある仮説(導出的仮説)と領域と領域を結びつけるような仮説(結合的仮説)と二つに分けられる(図2参照)。当然ながらこの結合的仮説はそれぞれの領域知識からはなにも示唆されない。そこで唯一のヒントが全体が全体を無矛盾であることとヒューリスティックスとしての最小性(“オッカムの剃刀”)である<sup>1</sup>。2つのインスタンスが1つになることは仮説が小さくなる

ことになる。そこで矛盾がおこらない範囲で異なる領域からくるインスタンスを同一視をしていき、最小のものを求めるのがこの方式である。この方法は拡張的仮説を提示するということが可能としているが、同一化をするときに結局は領域間の関係性の知識がある程度ないと多数の“無意味な”仮説が生成されてしまう。

#### 4.2 領域知識の不完全性の補完

ここでは反対に領域間知識が完全であることを前提に領域知識を発見していく立場となる。

##### (1) 問題の発見による知識の改定

なんかしらの問題を発見したとき、それを契機に知識の改定を行うということは日常的にもよく行われる思考過程である。これは[Aliseda1997]や[Leake 1995]のいうところの変則性に当たる。この変則性の認識はアブダクションがいつ起こるかということに関しても答えになっている。

人工知能で非単調推論と呼ばれているものはこのような知識の改定を実現しているものと考えられる。[林 1989][武田 1992]では論理的矛盾を契機として *circumscription*[McCarthy 1980]が行われ、矛盾を取り除くという方式を提案している。このとき既存の論理式は例外を含むように変化させられる。例えば、

$$\text{ばね}(x) \rightarrow \text{荷重に比例して伸びる}(x) \dots \dots \dots (3)$$

(ばねは荷重に比例して伸びる)

という言明があったとき、

$$\{\text{ばね}(a), \text{過負荷}(a), \neg \text{荷重に比例して伸びる}(x)\} \dots \dots \dots (4)$$

(ばねは過負荷では比例して伸びない)

という状況にあったばあい、矛盾してしまう。このとき(3)の式の左辺に例外事象を示す項を付け加えて *circumscription* すると、

$$\text{ばね}(x) \wedge \neg \text{過負荷}(x) \rightarrow \text{荷重に比例して伸びる}(x) \dots \dots \dots (5)$$

(ばねは過負荷でなければ荷重に比例して伸びる)

と(3)式が変更になる。これは知識の改定を行っていることに相当する。このような方法は知識の整合性を高めていくときには有効であるが、“新しい”方法を発見するわけではない。また、結果的には異なる領域の知識が統合されることが可能になるが<sup>2</sup>領域の違いは陽には意識されない。

<sup>1</sup> “よい”仮説に対する基準については多くの議論があるが、決定的なものはない。これが本質的に妥当かどうかは当然疑問である。[Leake 1995]ではタスクごとの基準ということを提案しているが、タスクに依存するという以上のこととは分らない。

<sup>2</sup> 例えば先の例で、(3)式がある領域(ばねの知識)で(4)の現れる“過負荷”などが別の領域の知識だとすると、(5)式は結果的に二つの領域の知識をつなげていることになる。

## (2) 領域知識の個別的アブダクションの重ね合わせ

さまざまな領域知識でのアブダクションを重ね合わせることで全体としてアブダクションを構成する方法である。領域の知識が不完全である場合、全体として操作することはできない。しかし個別の領域ではそれぞれの領域独特によるアブダクションが可能である場合もある。そこでそういったさまざまなアブダクションを組み合わせることで全体のアブダクションを実現する。

設計の場合、この領域知識はモデルベース推論であることが多いので、モデルベースアブダクションと呼んでいる [吉岡 2000]。図3にそのアルゴリズムを示す。ここで近傍系をとることが含まれているということが“弱い法則性”あるいは知識の不完全性の表現になっている。ここでの論理推論においては知識の完全性を仮定して行っている。しかし、ここでの知識が対象世界を正確に表現しているとは仮定していない。そこで近傍をとるといってその差を埋めている。“弱い法則性”と近傍系の保証はそれほど難しい要求ではない。とくに実体を中心とする知識では近傍をとるといふ行為は比較的容易であると考えられる。

この場合、領域知識には二つの条件が必要となる。まず概念の対応は異なる領域で可能であることである。また、アブダクションの方向を決めている機能と属性といった概念のカテゴリーが決定可能であることも必要である。この二つの条件によって領域外の知識との対応は保証されるので、領域内のアブダクションの実現方法は問わなくてもよくなる。

概念の対応は 4.1(2)の方法の結果でもあるので、この方法と 4.1(2)は相補的であることがわかる。両方を繰り返すことで双方の知識が漸進的に増やすことが可能になると思われる。

## 5. なにがシンセシスであるか

本稿ではまずアブダクションの役割を再検討して、アブダクションはそもそも不完全な知識が前提であること、その不完全な知識をもちいて新しい状況に適応する仕組みであるということであることを示した。それは抽象的には無数の知識から関係性を発見していくプロセスである。

工学的知識は歴史的あるいは実用的理由から多くは領域ごとの知識としてまとめられている。工学的分野においては無数の知識の関係性は、領域知識間との関係性と領域内知識の関係性として捉えなすことができる。特に前者は多くはヒュリスティックとしてしか認識されていないことが多いが、アブダクションにおいては重要な役割をもっている。

ここからわかることは、工学においてアブダクションを行うということは領域知識の統合を行うということの意味している。ただし、ここでの統合というのは一般的に可能なものではなく、ある目的の元でのみ可能になるものである。というのは元となる知識も不完全であるので、結果としての統合も当然不完全であり、一般性を保証していないからである。しかし、その積み重ねは知識をより豊富にするよう改定していくと考えられる。

すなわち設計におけるシンセシスとは多様な知識を統合(より直感的には融合)していく過程であるといえる。知識が集められ不完全な部分を補っていくことで個々の知識とその関係が改定あるいは拡張されていくということである。「シンセシスのモデル論」プロジェクトの中ではさまざまな視点から設計を形式化することについて研究を行ってきた。これらはそれぞれその視点の中にあっては有用であった。しかし、それらは設計プロセスそのものを説明には不十分であった。これは設計におけるシンセシスが知識の統合あるいは理論の統合プロセスであるということからみると理解可能である。設計における“設計らしさ”は統合化

のプロセスにあるので、個別の視点そのものを提示されても“設計らしさ”を見出すのが難しいのである。

## 6. おわりに

本稿では設計におけるシンセシスについて考察し、領域や理論を統合するアブダクションであるということのアブダクション自身の抱える問題と設計における知識の問題を組み合わせることで示した。本稿では統合化のプロセスとしてのアブダクションについてはその手がかりを示したにすぎない。まずはこの結論からこれまでの設計に関する研究を再整理することが必要である。その上で工学知識におけるアブダクションをより詳細に検討していくことが必要である。

## 参考文献

- [Aliseda 1997] A. Aliseda, "Peirce's Abduction in Accounts of Belief Change in Artificial Intelligence", *In Proceedings of the 6th Congress of the IASS-AIS, International Association for Semiotic Studies in Guadalajara, Mexico.*, pp13-18, 1997.
- [Hoffmann 1997] Michael Hoffmann, Is there a "Logic" of Abduction?, *In Proceedings of the 6th Congress of the IASS-AIS, International Association for Semiotic Studies in Guadalajara, Mexico*, 1997.
- [Kakas et al.1995] A.C. Kakas, R.A. Kowalski, F. Toni, Abductive Logic Programming. *Journal of Logic and Computation* 2 (6) 719-770, 1995
- [Leake 1995] David B. Leake. Abduction, Experience, and Goals: A Model of Everyday Abductive Explanation. *The Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*. 7:407-428, 1995.
- [McCarthy 1980] J. McCarthy. Circumscription - a form of non-monotonic reasoning. *Artificial Intelligence*, 13:27-39, 1980.
- [Peirce 1985] C.S.パース、パース著作集 1~3、米盛・内田・遠藤編訳、勁草書房、1985.
- [Poole 1988] D. Poole. A logical framework for default reasoning. *Artificial Intelligence*, 36:27-47, 1988.
- [武田 1998] 武田英明. シンセシスのための知識論(第 1 報) -- 経験的知識の表現-- . 1998 年度精密工学会秋季大会講演論文集, 1998
- [Takeda 1994] H. Takeda. Abduction for design. In J.S. Gero and E. Tyugu, editors, *Formal Design Method for CAD*, IFIP Transactions B-18, pages 221-244. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1994.
- [武田 1992] 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之. 設計過程の計算可能モデルと設計シミュレーション. *人工知能学会誌*, 7(5):877-887, 1992.
- [富山 2001] 富山哲男, 「シンセシスのモデル論」プロジェクト最終報告, 日本学術振興会未来開拓研究推進事業公開シンポジウム講演予稿集, 2001 年 3 月 3 日
- [林 1989] 林千登, 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之. 設計過程の分析と論理による形式化(第 3 報)--サーカムスクリプションとアブダクションによるモデル化-- . 1989 年度精密工学会春季大会講演論文集, 7-8, 1989
- [吉川 1979] 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.906-912, 1979.
- [吉岡 2000] 吉岡真治, 武田英明, 富山哲男. シンセシスの推論フレームワークに関する研究(第2報). *人工知能学会全国大会(第 14 回)論文集*, pages 468-471, 2000.
- [米盛 1981] 米盛 裕二, パースの記号学、勁草書房、1981.
- [柳生 1995] 柳生 孝昭, 人工物工学の課題—設計論と Abduction を中心に—, 精密機械工学誌, Vol.61, No.4, pp497-500, 1995.