ソフトウェア工学 103−21
（1995. 3. 10）

オブジェクト準等価関係に基づいたクラス階層構造の再構成

黄 錫炯　辻野 嘉宏　都倉 信樹
大阪大学基礎工学部情報工学科
大阪府豊中市待兼山町 1-3

近年，オブジェクト指向設計やプログラミング分野では，品質と再利用の面でより優れたクラス階層を構築するためのクラス階層構造の再構成手法が提案されている．しかし，従来の再構成手法では，主に継承階層だけを対象としており，クラス間の **part_of** 関係からなる集約階層の再構築について取り扱っていない．

本研究では，継承階層及び集約階層を考慮したクラス階層間のオブジェクト準等価関係を定義し，その関係に基づいたクラス階層構造の基本再構成法を提案する．また，これらの基本再構成法に対する，正当性，完全性，そして最小性を証明する．

和文キーワード　オブジェクト指向，クラス階層構造，オブジェクト準等価，再構成

A Reorganization Framework of the Class Hierarchy Based on the Object Semi-Equivalence

Suk-hyung HWANG　Yoshihiro TSUJINO　Nobuki TOKURA
{hwang, tsujino, tokura}@ics.es.osaka-u.ac.jp
Dept. of Information and Computer Sciences, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560 JAPAN

In recent years there has been renewal of interest in the reorganization and transformations of classes for object-oriented design and programming. Numerous attempts have been made by researchers to show the algorithms and hueristics to produce "good" and "reusable" class organizations based on the inheritance hierarchy. However, little attention has been given to the reorganization of the aggregation hierarchy which forms the **part_of** relationship between classes.

In this article, we are concerned with the inheritance and aggregation hierarchies, and define the **Object Semi-Equivalence** relation between the Class Hierarchies by extending the object-equivalence relation. And also we consider a minimal set of primitive transformations which forms a foundation for reorganization between class hierarchies based on the object semi-equivalene. This set is proven to be correct, complete, and minimal.

Key words　Object-Oriented, Class Dictionary Graph, Object Semi-Equivalence, Reorganization

1 まえがき

近年，オブジェクト指向設計やオブジェクト指向プログラミングの分野では，既存のクラスライブラリを再利用し，より品質の良いクラス階層構造を再構築するための手法が研究されている[1][2][4]．[1]では，クラスの継承階層構造を再構成するための変形アルゴリズムを提案している．また，[4]では，オブジェクト指向フレームワーク上でのクラス階層の変換手法として，継承から集約への変換及びその逆変換について研究が行なわれている．

一方，[2]ではクラス階層モデル(*Class Dictionary Graph*)に基づき，クラス階層の間のオブジェクト等価関係を保つ再構成手法を提案している．与えられた2つのクラス階層から各々生成できるオブジェクトの集合が等しい場合，両クラス階層はオブジェクト等価関係にあるという．既存のクラス階層に[2]で提案された再構成操作を施すことによって，生成オブジェクトの集合の等しい別の新しいクラス階層を構築できる．このような再構成手法では，既存のクラスライブラリを十分再利用できるという利点がある．

しかし，[1][2][4]の研究では，主に継承階層だけを対象としており，他のオブジェクトを深いレベルでネストして構成された複雑な集約階層構造をもつクラス階層の再構成は取り扱っていない．本研究では，他のいくつかのオブジェクトを部品として集約している合成オブジェクト[5]がなす集約階層に注目し，拡張したオブジェクト等価関係を満たすクラス階層構造の再構成について考える．

まず，2節でクラスとクラス間の関係を表す *Class Dictionary Graph*を導入する．3節では，*Class Dictionary Graph*におけるオブジェクト等価関係を示し，それを拡張したオブジェクト準等価関係を定義する．次の4節では，オブジェクト準等価関係を保つ基本再構成操作を提案し，基本操作に対する正当性，完全性，そして最小性などについて証明を行なう．

2 Class Dictionary Graph

オブジェクト指向設計の段階では，各クラスにそのクラスから生成できるオブジェクト(インスタンス)のデータ構造を表すデータメンバとオブジェクトの振舞いを表すメンバ関数が属性として定義される．また，各クラスのインスタンス間のつながりを明示するために，クラス間には継承と集約というクラス間の関係がある．継承関係にある両クラス(親クラス/子供クラス)間では，継承機構を用いて親クラスに定義された属性を子供クラスが受け継ぐ．一方，あるクラスのデータメンバの型として他のクラスが定義された場合，両クラスは集約関係にあるという．また，各クラスはオブジェクト生成可能な具象クラスと，オブジェクト群を分類するためにいくつかのクラスから共通する属性を抽象化した抽象クラス(オブジェクト生成不可)に分類される．

以上のことに基づいて，プログラミング言語に依存しないで，クラス階層構造を形式的な形で表現するためのモデルとして *Class Dictionary Graph*(以降，*CDG*と呼ぶ)がある．次に*CDG*の定義を示す．

定義 1 (*Class Dictionary Graph*)*CDG* $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ は次の要素からなる有向グラフである．

$$V = VC \cup VA,\quad VC \cap VA = \emptyset$$
$$E = EC \cup EA,\quad EC \cap EA = \emptyset$$
$$VC = \{v \in V \mid \forall w \in V\ (v,w) \notin EA\}\ \text{(具象頂点)}$$
$$VA = \{v \in V \mid \exists w \in V\ (v,w) \in EA\}\ \text{(抽象頂点)}$$
Λ : ラベルの有限集合
$$EC \subseteq V \times V \times \Lambda\ \text{(ラベル付きの集約辺)}$$
$$EA \subseteq VA \times V\ \text{(継承辺)}$$

---

*CDG*は具象クラスと抽象クラスに各々対応する具象頂点(construction vertex，四角形で表す)と抽象頂点(alternation vertex，六角形で表す)を持ち，クラスの間の継承と集約関係を各々頂点間をつなぐ継承辺(alternation edge，⇒で表す)と集約辺(construction edge，→で表す)という2種類の辺で表す(図1)．但し，*CDG*では，具象クラスから具象クラスへの継承は認めず，抽象クラスから具象クラスあるいは抽象クラスへの継承だけを考える．

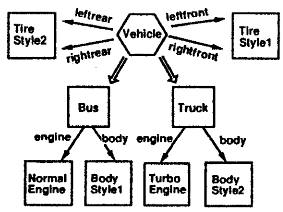


図 1: *Class Dictionary Graph*の例

以下，CDGの定義に基づいてクラス階層構造における諸定義を行なう．

定義 2 (派生到達可能) 任意の CDG $\Gamma = (V_\Gamma, \Lambda, E_\Gamma)$ の任意の頂点 v, wにおいて，次の条件を満たす頂点 v から wまでの経路 $\rho(v,w)$,

$$\rho(v,w) = \langle v_0, v_1, \cdots, v_{k-1}, v_k \rangle$$

但し，

$v_0 = v, v_k = w, 0 \leq j \leq k-1 : (v_j, v_{j+1}) \in EA_\Gamma$
が存在する時，頂点 wは vから派生到達可能であるといい，$(v \overset{*}{\Rightarrow} w)$ と表す．経路$\rho(v,w)$ の長さはその経路上に存在する辺の数とし，$|\rho(v,w)|$ で表す．

- $v = w \implies (v \overset{*}{\Rightarrow} w)$ *where*, $|\rho(v,w)| = 0$
- $\exists u \in V_\Gamma : (v,u) \in EA_\Gamma \wedge (u \overset{*}{\Rightarrow} w)$, $|\rho(u,w)| = n$
  $\implies (v \overset{*}{\Rightarrow} w)$ *where*, $|\rho(v,w)| = n+1$

また，任意の頂点 vから wへ 1 個以上の継承辺を経って派生到達可能である場合，$(v \overset{+}{\Rightarrow} w)$ で表す．

$$(v \overset{+}{\Rightarrow} w) \equiv \exists x, y \in V[(x,y) \in EA \wedge (v \overset{*}{\Rightarrow} x) \wedge (y \overset{*}{\Rightarrow} w),\ |\rho(v,w)| \geq 1]$$

派生到達可能の概念は，CDG上の継承階層に関して議論する時に有用である．例えば，$(v \overset{*}{\Rightarrow} w)$ は，クラス wがクラス vから継承された，または $w = v$であるということを表し，任意のクラスから派生されたクラスを求める場合に役立つ．

任意の CDG Γ上に存在する継承階層について議論する場合，Γから継承階層構造だけを取り出して構成した部分グラフが役立つ．以上のことに基づき，次に継承部分グラフを定義する．

定義 3 (継承部分グラフ) 任意の CDG $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ の継承部分グラフ $IG_\Gamma = (V', EA)$ は，次の要素からなる有向グラフである．

$$V' = VA \cup \{v \in VC | \exists u \in VA : (u,v) \in EA\}$$

EA : CDG Γの継承辺の集合

即ち，CDG Γの継承部分グラフ IG_Γは，Γの抽象頂点の集合 VA と，Γの任意の抽象頂点から派生到達可能な頂点の集合との和集合を頂点の集合とし，Γの継承辺の集合 (EA_Γ) を辺の集合とする有向グラフである．

クラス階層について議論する際，正しい形のクラス階層を保つために次の条件を考える．

1. 任意の抽象クラスに対して，そのクラスから継承経路を通じて辿り着く具象クラスが必ず存在する．
2. 継承経路上には閉路は存在しない．即ち，任意のクラスに対して，そのクラスから自分自身への継承は存在しない．
3. 任意のクラスに対して，そのクラスに定義された，または親クラスから継承されたデータメンバ名は一意に決まる．

任意のクラス階層が上記の 3 つの条件を満たす場合，正当なクラス階層と呼ぶ．以上のことを CDGの定義に基づいて定義する．

定義 4 (正当な CDG) 任意の CDG $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ が次の条件を満たす時、Γは正当 *(***legal***)* な *Class Dictionary Graph* であるという。

1. **Abstraction condition:**
$$\forall v \in VA[\exists w \in VC : (v \overset{+}{\Rightarrow} w)]$$
2. **Cycle-free condition:** $\nexists v : (v \overset{+}{\Rightarrow} v)$
3. **Unique labels condition:**
$$\forall v, w, w', x, y \in V, l \in \Lambda[\ [(w \overset{*}{\Rightarrow} v) \wedge (w' \overset{*}{\Rightarrow} v) \wedge (w, x, l) \in EC \wedge (w', y, l) \in EC] \implies (w, x, l) = (w', y, l)]$$

以後で扱うクラス階層は正当な CDGとする．

3 CDGの等価関係

本節では，CDGの定義に基づいて，オブジェクト等価関係 [2] を示し，それを拡張したオブジェクト準等価関係を定義する．

3.1 オブジェクト等価関係

オブジェクト等価関係の定義を行う前に，まず，CDGに基づいて，任意の頂点に対する *Associated Set*と *PartCluster*の定義 [2] を示す．

定義 5 任意の CDG $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ が与えられた時、その任意の頂点 $v \in V$に対して次の集合を定義する．

Associated Set : $AS(v) = \{w | w \in VC \wedge (v \overset{*}{\Rightarrow} w)\}$

PartClusters : $PC_\Gamma(v)$

$$PC_\Gamma(v) = \{(l, AS(w)) | \exists v' (v' \overset{*}{\Rightarrow} v) \wedge (v', w, l) \in EC\}$$

$AS(v)$ は，オブジェクト生成時にクラス vに割り付けられるオブジェクトを生成できるクラスの集合である．この時，対象となるクラス vがオブジェクト生成不可能な抽象クラスである場合には，クラス vから派

生到達可能なクラスの中でオブジェクトを生成できる具象クラスの集合を求めることになる．これは，抽象クラスからはオブジェクトを生成できないが，その抽象クラスに定義したデータメンバやメンバ関数を継承した子供クラスであるような具象クラスからオブジェクトが生成される場合があるからである．

また，$PC_\Gamma(v)$ は，クラス vのデータメンバに他のクラス wが部品として集約された場合，その部品名と部品であるオブジェクトを生成できるクラスの集合 $(AS(w))$ との組からなる集合である．

以上の諸定義に基づいて，任意の CDG Γ_1,Γ_2の間のオブジェクト等価関係について定義する．

定義 6 (オブジェクト等価 [2]) 任意の 2 つの CDG Γ_1とΓ_2とはオブジェクト等価である．

$$\Gamma_1 \equiv \Gamma_2 \Longleftrightarrow \begin{cases} VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}, \\ \forall v \in VC_{\Gamma_1}[PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v)] \end{cases}$$

即ち，与えられた 2 つの CDGにおいて，具象クラスの集合が等しく，かつ，各具象クラスのデータメンバに定義されたメンバ名と，各データメンバのクラスの集合との組からなる集合が等しい場合，両 CDGはオブジェクト等価関係にあるという．

3.2 オブジェクト準等価関係

あるクラスのデータメンバの型として他のクラスが定義された場合，両クラス間は集約関係にあるという．集約関係にあるいくつかのクラスを部品としてもつクラスを合成クラスと呼び，合成クラスの部品として集約されたクラスを部品クラスと呼ぶ．ここでは，前節のオブジェクト等価関係を拡張して，合成クラスをも考慮したオブジェクト準等価関係を定義し，オブジェクト等価関係との関係を示す．

任意の CDG Γに対してその集約階層について議論する場合，Γから集約階層構造だけを取り出して構成した集約部分グラフが役立つ．次に集約部分グラフを定義する．

定義 7 (集約部分グラフ) 任意の CDG $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ の任意の頂点 $v \in V_\Gamma$に対して，vの集約部分グラフ $AG_\Gamma(v)$ を次のように定義する．

$$AG_\Gamma(v) = (X, \Lambda', U)$$

ここで，X, Uは，

$$v \in X,\ U \supseteq \{(v_1, v_2, l) | v_1 \in X, (l, v_2) \in LPS_\Gamma(v_1)\}$$
$$X \supseteq \{v_2 | v_1 \in X, (v_1, v_2, l) \in U\}$$

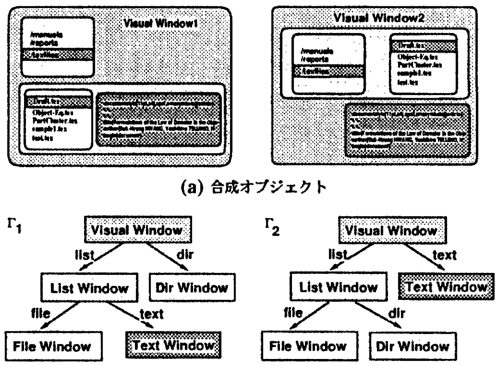
Λ' は Uの枝のラベルの集合

を満たす最小集合である．但し，

$$LPS_\Gamma(v) = \{(l, v') | v' \in AS(w), (l, AS(w)) \in PC_\Gamma(v)\}$$

即ち，集約部分グラフ $AG_\Gamma(v)$ は，クラス vまたは vの先祖クラスに直接集約された部品クラスだけでなく，さらに各部品クラスの部品として集約されたクラスなど，クラス vの部品として多段階に渡って集約された全てのクラスからなる集約階層構造を表す．この時，頂点 vを集約部分グラフ $AG_\Gamma(v)$ のアンカー (anchor) と呼ぶ．また，$AG_\Gamma(v)$ 上の任意の頂点 wに対し，頂点 vから wに到達するまでに通る集約辺の数を頂点 wの集約深さという．

図 2(a) にいくつかの部品が集約された合成オブジェクトの例を示す．各 Visual Window オブジェクトは図 2(b) のようなクラス階層構造を持つとする．この場合，各々の集約階層の構造は異なるが，各合成クラス Visual Window が持つ部品クラスの集合は等しい．この時，集約階層上の各部品を取り替えることによって，同じオブジェクトを生成できるクラス階層に変換できる．以下では，CDGにおけるオブジェクト準等価関係について考える．



(a) 合成オブジェクト

(b) 合成オブジェクトのクラス階層構造

図 2: 合成オブジェクトの例

まず，任意の合成クラスに集約された全ての部品クラスの集合を求めることを考える．

定義 8 (*AllParts*) 任意の CDG $\Gamma = (V, \Lambda, E)$ に対して，その任意の頂点 $v \in V$に対する全ての集約部品の集合 $AP_\Gamma(v)$ を次のように定義する．

$$AP_\Gamma(v) = \bigcup_{v' \in X_{AG_\Gamma(v)}} PC_\Gamma(v')$$

上記の定義から，集約部分グラフに基づいて，任意のクラス(または，その先祖クラス)のデータメンバとして直接集約されたクラスだけではなく，さらに集約の集約など，多段階に渡って集約されたクラスまで求められる．即ち，任意の頂点 vに対する集合 $AP_\Gamma(v)$ は，頂点 vをアンカーとする集約部分グラフ上の各頂点 v'の *PartClusters*集合 $PC_\Gamma(v')$ の和集合からなる．

以上の定義に基づいて，オブジェクト等価関係 [2] を拡張したオブジェクト準等価関係を定義する．

定義 9 (オブジェクト準等価) 任意の 2 つの *CDG* Γ_1 とΓ_2に対して，

$$\Gamma_1 \cong \Gamma_2 \iff \begin{cases} VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}, \\ \forall v \in VC_{\Gamma_1}[(\forall w \in V_{\Gamma_1} : (w,v,l) \notin EC_{\Gamma_1}) \\ \qquad\qquad \Longrightarrow [AP_{\Gamma_1}(v) = AP_{\Gamma_2}(v)]\ ]. \end{cases}$$

$\Gamma_1 \cong \Gamma_2$のとき，Γ_1とΓ_2はオブジェクト準等価関係にあるという．

即ち，与えられた 2 つの *CDG*から生成されるオブジェクトの集合が等しく，かつ，両グラフから生成される各合成オブジェクトに集約された全ての集約部品の集合が等しい場合，両グラフはオブジェクト準等価関係にあるという．

以下では，オブジェクト等価とオブジェクト準等価との間の関係について考える．

Lemma 1 任意の *CDG* Γ_1, Γ_2に対して，

$$\begin{aligned} &[(VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}) \\ &\ \wedge(\forall v \in VC_{\Gamma_1} : PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v))] \\ &\qquad \Longrightarrow \forall v \in VC_{\Gamma_1}[AG_{\Gamma_1}(v) = AG_{\Gamma_2}(v)] \end{aligned}$$

である．

(証明)
$$\begin{aligned} & (VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}) \\ & \quad \wedge(\forall v \in VC_{\Gamma_1} : PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v)) \\ \Rightarrow\ & \langle \text{定義 } 7 : LPS_\Gamma(v) \rangle \\ & (VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}) \\ & \wedge(\forall v \in VC_{\Gamma_1} : LPS_{\Gamma_1}(v) = LPS_{\Gamma_2}(v)) \\ =\ & \langle \text{定義 } 7 : AG_\Gamma(v) \rangle \\ & \forall v \in VC_{\Gamma_1}[AG_{\Gamma_1}(v) = AG_{\Gamma_2}(v)]\ \blacksquare \end{aligned}$$

Lemma 2 任意の *CDG* Γ_1, Γ_2に対して，$VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}$とする．このとき，任意の具象頂点 $v \in VC_{\Gamma_1}, VC_{\Gamma_2}$に対して，

$$\begin{aligned} &\forall v \in VC_{\Gamma_1}[PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v)] \\ &\qquad \Longrightarrow \forall v \in VC_{\Gamma_2}[AP_{\Gamma_1}(v) = AP_{\Gamma_2}(v)] \end{aligned}$$

である．

(証明) (仮定 1)：$VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}$
(仮定 2)：$\forall v \in VC_{\Gamma_1}[PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v)]$

$$\begin{aligned} & AP_{\Gamma_1}(v) \\ =\ & \langle \text{定義 } 8 \rangle \\ & \bigcup_{v' \in X_{AG_{\Gamma_1}(v)}} PC_{\Gamma_1}(v') \\ =\ & \langle (\text{仮定 } 1,2),\ \text{Lemma 1} \rangle \\ & \bigcup_{v' \in X_{AG_{\Gamma_2}(v)}} PC_{\Gamma_2}(v') \\ =\ & \langle \text{定義 } 8 \rangle \\ & AP_{\Gamma_2}(v)\ \blacksquare \end{aligned}$$

オブジェクト等価関係とオブジェクト準等価関係との間には次のような定理が成り立つ．

定理 1 任意の *CDG* Γ_1, Γ_2が与えられた時，Γ_1とΓ_2とがオブジェクト等価関係にあれば，両 *CDG*はオブジェクト準等価関係にある．

(証明)
$$\begin{aligned} & \Gamma_1 \equiv \Gamma_2 \\ =\ & \langle \text{定義 } 6 \rangle \\ & (VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}) \\ & \quad \wedge(\forall v \in VC_{\Gamma_1}[PC_{\Gamma_1}(v) = PC_{\Gamma_2}(v)]) \\ \Rightarrow\ & \langle \text{Lemma 2} \rangle \\ & (VC_{\Gamma_1} = VC_{\Gamma_2}) \\ & \quad \wedge(\forall v \in VC_{\Gamma_1}[AP_{\Gamma_1}(v) = AP_{\Gamma_2}(v)]) \\ =\ & \langle \text{定義 } 9 \rangle \\ & \Gamma_1 \cong \Gamma_2\ \blacksquare \end{aligned}$$

$[\Gamma_1 \not\equiv \Gamma_2\ \wedge\ \Gamma_1 \cong \Gamma_2\ ]$である$\Gamma_1, \Gamma_2$を図 2(b) に示す．また，次の定理が成立する．

定理 2 オブジェクト準等価関係は同値関係である．
即ち，

1. $\forall \Gamma_1[\Gamma_1 \cong \Gamma_1]$
2. $\forall \Gamma_1, \Gamma_2[(\Gamma_1 \cong \Gamma_2) \Rightarrow (\Gamma_2 \cong \Gamma_1)]$
3. $\forall \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3[(\Gamma_1 \cong \Gamma_2) \wedge (\Gamma_2 \cong \Gamma_3) \Rightarrow (\Gamma_1 \cong \Gamma_3)]$

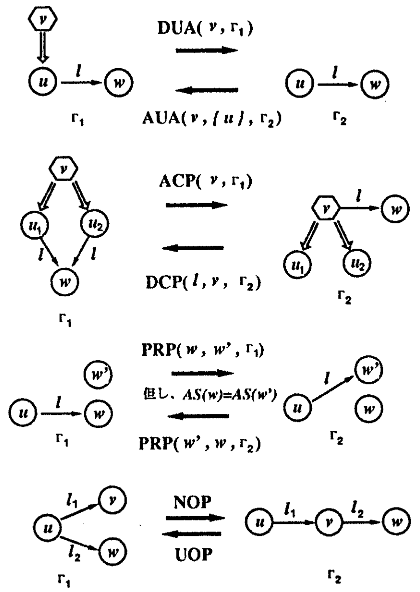


図 3: 基本再構成操作

4 CDGの再構成

ここでは，CDGにおけるオブジェクト準等価関係を保つ基本再構成操作を提案し，その正当性，完全性，最小性を証明する．

4.1 オブジェクト準等価関係を保つ基本操作

任意の CDG Γ_1, Γ_2 が与えられた時，Γ_1に再構成操作 (τ) を施してΓ_2が得られたとし，そのような再構成を$\Gamma_1 \xrightarrow{\tau} \Gamma_2$で表す．図 3に各基本再構成操作を示す (但し，丸の頂点は具象頂点または抽象頂点を表す)．

(1) 冗長な抽象頂点の除去 (DUA)

まず，任意頂点 vが冗長であることを $Useless(v)$ で表す．

$Useless(v) \equiv \forall x \in V_\Gamma, l \in \Lambda_\Gamma[$
$(v,x,l) \notin EC_\Gamma \wedge (x,v,l) \notin EC_\Gamma \wedge (x,v) \notin EA_\Gamma]$

任意の抽象頂点 vへ入っていく辺や頂点 vからの集約辺が存在しない場合，抽象頂点 vは冗長である．任意の抽象頂点 vが冗長である場合，CDG Γ_1から頂点 vと vから出ていく継承辺を除去して得られたΓ_2から生成されるオブジェクトの集合と，元のΓ_1から生成されるオブジェクト集合とは変わらない．DUA は冗長な抽象頂点を除去する．

DUA(v, Γ_1)
//入力：任意の抽象頂点 $v \in VA_{\Gamma_1}$, CDG Γ_1
//出力：Γ_1から再構成された Γ_2
$VC_{\Gamma_2} \leftarrow VC_{\Gamma_1}$; $VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_1}$;
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_1}$; $EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_1}$;
if $Useless(v)$ then
for each $w \in V_{\Gamma_2}$ do
$EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_2} - \{(v,w)\}$;
end_for
$VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_2} - \{v\}$;
End_of_DUA

(2) 冗長な抽象頂点の追加 (AUA)

与えられた CDG Γ_1に冗長な抽象頂点 $v \in VA_\Gamma$を指定された頂点 $w \in \Gamma_1$の親クラスとして追加する．この再構成操作 AUA は DUA の逆変換である．以下に手続き AUA を示す．

AUA$(v, T(v), \Gamma_1)$
//入力：Γ_1に追加する抽象頂点 $v \in VA_\Gamma$,
追加した頂点 vと継承辺で連結されるΓ_1の頂点の集合 $T(v) \subseteq V_{\Gamma_1}$, CDG Γ_1
//出力：Γ_1を再構成して構成した Γ_2
$VC_{\Gamma_2} \leftarrow VC_{\Gamma_1}$; $VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_1} \cup \{v\}$;
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_1}$;
for each $w \in T(v)$ do
$EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_1} \cup \{(v,w)\}$;
end_for
End_of_AUA

(3) 共通部分の抽象化 (ACP)

この再構成操作では，子供クラスに共通して定義されたデータメンバを継承階層に沿ってその親クラスへ引き上げ (抽象化)，親クラスから全ての子供クラスが共有できるように変換する．以上の操作を次の手続き ACP で表す．

ACP(v, Γ_1)
//入力：子供クラスに共通する集約部分を引き上げる時の目標頂点 $v \in VA_{\Gamma_1}$, CDG Γ_1
//出力：Γ_1から再構成された Γ_2
$VC_{\Gamma_2} \leftarrow VC_{\Gamma_1}$; $VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_1}$;
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_1}$; $EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_1}$;

if $\exists u, w \in V_{\Gamma_2}, l \in \Lambda_{\Gamma_2}[(v,u) \in EA_{\Gamma_2}$
$\wedge (u,w,l) \in EC_{\Gamma_2}]$ then
for each $u \in V_{\Gamma_2} : (v,u) \in EA_{\Gamma_2}$ do
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} - \{(u,w,l)\};$
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} \cup \{(v,w,l)\};$
end_for
End_of_**ACP**

(4) 共通部分の分配 (DCP)

この再構成操作DCPはACPの逆変換である．つまり，任意のクラスのデータメンバをその子供クラスに分配するように変換する．以下に手続きDCPを示す．

DCP(l, v, Γ_1)
//入力：データメンバ名 $l \in \Lambda_{\Gamma_1}$，データメンバlをもつ頂点 $v \in VA_{\Gamma_1}$, $CDG\ \Gamma_1$
//出力：Γ_1から再構成された Γ_2
$VC_{\Gamma_2} \leftarrow VC_{\Gamma_1};\ \ VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_1};$
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_1};\ \ EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_1};$
if $(v,w,l) \in EC_{\Gamma_2}$ then
for each $u \in V_{\Gamma_2} : (v,u) \in EA_{\Gamma_2}$ do
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} \cup \{(u,w,l)\};$
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} - \{(v,w,l)\};$
end_for
End_of_**DCP**

(5) 部分的な入れ換え (PRP)

任意の頂点 $w, w' \in V_{\Gamma_1}$に対して，各々の頂点の*Associated set*が等しい場合 $(AS(w) = AS(w'))$，両頂点(クラス)を入れ換えても生成されるオブジェクトの集合は等しい．以上のことに基づいて次に手続きPRPを示す．

PRP(w, w', Γ_1)
//入力：任意の頂点 $w, w' \in V_{\Gamma_1}$, $CDG\ \Gamma_1$
//出力：Γ_1から再構成された Γ_2
$VC_{\Gamma_2} \leftarrow VC_{\Gamma_1};\ \ VA_{\Gamma_2} \leftarrow VA_{\Gamma_1};$
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_1};\ \ EA_{\Gamma_2} \leftarrow EA_{\Gamma_1};$
if $AS(w) = AS(w')$ then
for each $u : (u,w,l) \in EC_{\Gamma_2}$ do
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} - \{(u,w,l)\};$
$EC_{\Gamma_2} \leftarrow EC_{\Gamma_2} \cup \{(u,w',l)\};$
end_for
End_of_**PRP**

(6) 集約部分のNesting(NOP)

任意クラス階層グラフ Γの頂点(クラス)$u, v, w \in V_\Gamma$に対して，集約辺 $(u,v,l_1), (u,w,l_2) \in EC_\Gamma$が存在する時，NOPは辺$(u,w,l_2)$を$(v,w,l_2)$に入れ換える．この時，頂点(クラス)$u$に属したメソッドのボディー部の内で，直接にメンバ名 l_2をアクセスする部分は，メンバ名 l_1を経由してアクセスするように変換する．

(7) 集約部分のUnnesting(UOP)

任意の頂点(クラス)$u, v, w \in V_\Gamma$に対して，集約辺 $(u,v,l_1) \in EC_\Gamma$が存在し，また，頂点(クラス)vから出ていく集約辺 $(v,w,l_2) \in EC_\Gamma$があるとする．この時，UOPは辺(v,w,l_2)を(u,w,l_2)に入れ換える．クラスvが具象クラスのときは，vのオブジェクトをuのオブジェクトにする必要がある場合がある．UOPは，再構成操作NOPの逆変換である．

4.2 証明

任意の$CDG\ \Gamma_1$と，それに(1)〜(5)の基本再構成操作を施して得られたΓ_2との間にはオブジェクト等価関係が成り立つ $(\forall \Gamma_1, \Gamma_2[\Gamma_1 \xrightarrow{\tau} \Gamma_2 \Rightarrow \Gamma_1 \equiv \Gamma_2])$[2]．また，定理1から $\forall \Gamma_1, \Gamma_2[\Gamma_1 \equiv \Gamma_2 \Rightarrow \Gamma_1 \cong \Gamma_2]$ である．従って，次の補題が成り立つ．

Lemma 3 $\tau \in$ {**DUA, AUA, ACP, DCP, PRP**} とした時，次のことが成り立つ．

$$\forall \Gamma_1, \Gamma_2[\Gamma_1 \xrightarrow{\tau} \Gamma_2 \ \Rightarrow\ \Gamma_1 \cong \Gamma_2]$$

4.2.1 正当性

補題3より任意の$CDG\ \Gamma_1$と，Γ_1にオブジェクト等価関係を保つ基本再構成操作を施して得られたΓ_2との間には，オブジェクト準等価関係が成り立つ．

また，任意の合成クラス vをアンカーとする集約部分グラフ $AG_\Gamma(v)$ に対して，再構成操作NOPとUOPを施しても，vの全部品クラスの集合は再構成前後に変化しない．これは，再構成前後のグラフ(各々Γ_1, Γ_2とする)において，集約部分グラフのアンカーとなる頂点vの集約部品の集合が等しい $(AP_{\Gamma_1}(v) = AP_{\Gamma_2}(v))$ ことから明らかである．

従って，任意のクラス階層グラフ Γ_1と，それに(1)〜(7)の各基本再構成操作を施して得られたグラフΓ_2との間には，オブジェクト準等価関係 $(\Gamma_1 \cong \Gamma_2)$ が成り立つ．

4.2.2 完全性

任意のクラス階層グラフΓ_1とΓ_2が与えられた時，$\Gamma_1 \cong \Gamma_2$ならば，前節で定義した基本再構成操作だけ

を用いてΓ_1をΓ_2に変換できる．

ここでは，各基本再構成操作を用いてΓ_1をΓ_2の形に変換する過程を示す．Γ_1の再構成は以下の順に行う．

1. 冗長な抽象頂点の追加 (**AUA**)

   Γ_2で求めた継承部分グラフ IG_{Γ_2}をΓ_1上に重ねる．

2. 共通部分の分配 (**DCP**)

   Γ_1上の抽象頂点から出ていく集約辺を取り出し，子孫クラスの中，具象クラスに分配する．

3. 部分的な入れ換え (**PRP**)

   Γ_1の任意の頂点 $u \in V_\Gamma$から $v \in V_{\Gamma_1}$への集約辺 $(u,v,l) \in EC_{\Gamma_1}$を，$AS(v) = AS(v')$ となる $v' \in V_{\Gamma_2}$に向かう集約辺 (u,v',l) に入れ換える．

4. 集約部分の Unnesting(**UOP**)

   任意の頂点 $v \in VC_{\Gamma_2}$の集約部分グラフ $AG_{\Gamma_2}(v)$ に合うように集約部分グラフ $AG_{\Gamma_1}(v)$ 上の頂点を unnesting する．

5. 集約部分の Nesting(**NOP**)

   任意の頂点 $v \in VC_{\Gamma_2}$の集約部分グラフ $AG_{\Gamma_2}(v)$ に合うように集約部分グラフ $AG_{\Gamma_1}(v)$ 上の頂点を nesting する．

6. 共通部分の抽象化 (**ACP**)

   Γ_1の各具象頂点から出ていく共通の集約辺を，Γ_1に新たに追加されたΓ_2の抽象頂点に向かって，ステップ 1(**AUA**) によって作られたΓ_1の新しい継承経路に沿って引き上げる．

7. 冗長な抽象頂点の削除 (**DUA**)

   再構成中のΓ_1から元のΓ_1にあった抽象頂点を除去する．

以上の再構成手続きによって，Γ_1をΓ_2に再構成できる．

4.2.3 最小性

任意の *CDG* $\Gamma_1, \Gamma_2(\Gamma_1 \cong \Gamma_2)$ において，Γ_1からΓ_2への再構成には，前節で定義した基本再構成操作が全て必要である．なぜならば，

- **DUA** を施さずに，抽象頂点の数を減らせない．
- **AUA** を施さずに，抽象頂点の数を増やせない．
- **ACP** を施さずに，集約辺の数を減らせない．
- **DCP** を施さずに，集約辺の数を増やせない．
- **PRP** を施さずに，任意の頂点に対する集約辺の入力次数を 0 から 1，または 1 から 0 に変えることはできない．
- **NOP** を施さずに，集約部分グラフ上の任意の頂点に対する集約深さを下げることはできない．
- **UOP** を施さずに，集約部分グラフ上の任意の頂点に対する集約深さを上げることはできない．

5 むすび

本研究では，クラスの継承及び集約階層に注目して *CDG*におけるオブジェクト等価関係を拡張したオブジェクト準等価関係を定義した．また，オブジェクト準等価関係を保つ基本再構成操作を提案し，その正当性と完全性，そして最小性について証明を行なった．オブジェクト準等価関係は，いくつかの部品からなる合成オブジェクトを生成するクラス階層構造を再構成する際の理論的なベースとして用いることができる．

今後の研究として，オブジェクトの振舞いを考慮したクラス階層の再構成と，クラス階層の再構成における品質評価尺度の提案などがあげられる．

参考文献

[1] Eduardo Casais. *Managing evolution in object-oriented environments: an algorithmic approach.* PhD thesis, University of Geneva, Geneva, Switzerland, May 1991.

[2] Paul L. Bergstein. Object preserving class transformations. *SIGPLAN Notices*, 26(11):299-313, Phoenix, AZ, November 1991. ACM Press.

[3] 本位田 真一，山城 明宏，オブジェクト指向システム開発，日経 BP 社，1993.

[4] Ralph E. Johnson, William F. Opdyke. Refactoring and Aggregation. In *Proceedings of the 1st International Symposium*, JSSST,Kanazawa, Japan, Nov. 1993.

[5] Won Kim, Introduction to Object Oriented Databases, The MIT Press, 1991.