CRDを用いた コードクローンの生存期間と修正回数に関する調査

堀田 圭佑[1,a)]　肥後 芳樹[1,b)]　楠本 真二[1,c)]

概要：これまでに，コードクローンの進化の様子を分析し，その特徴を調査する研究が多数行われている．しかし，これまでの調査手法には，コードクローンに対して大きな修正が加えられた場合に追跡に失敗するおそれがあるという課題がある．また，ソフトウェア保守に悪影響を与えるコードクローンがどの程度存在するのか，という点や，コードクローンが修正される時期に何らかの特徴があるか，という点は明らかになっていない．本研究では，ソースコードに対する修正に強いコードクローン追跡手法である CRD を用いて，これまでに明らかにされていない事項に対する調査を行った．調査の結果，コードクローンの多くは短命であり，かつ修正されにくいという既存研究の知見を改めて確認した．また，コードクローンは生存期間の前半に修正されやすいことが明らかになった．さらに，生存期間が長く，かつ修正回数の多いコードクローンが全体の約 3.3%存在することがわかった．

キーワード：コードクローン，CRD，ソフトウェア進化

A CRD-based Analysis on Survival Periods and Modifications of Code Clones

Keisuke Hotta[1,a)]　Yoshiki Higo[1,b)]　Shinji Kusumoto[1,c)]

Abstract: Many researchers analyzed evolution of code clones based on clone tracking. However, clone tracking used in previous research has an issue that it might miss links of clones among revisions if a large modification was applied to them. In addition, there are some characteristics that the previous research did not reveal. This research revisits findings of previous research with a clone tracking technique that ahas a good change-tolerance, named CRD. Our experimental results support findings of previous research, including 'most of clones are short-lived', and 'there are a few clones that are modified multiple times'. In addition, the results showed that about 3.3% of clones are long-lived and modified multiple times. Moreover, we found that there is no obvious trends on the timing when clones are modified.

Keywords: Code Clone, CRD, Software Evolution

1. まえがき

コードクローン (ソースコード中の同一，あるいは類似するコード片) が効率的なソフトウェア保守を阻害する要因として糾弾され，注目を集める研究分野となって久しい [1], [2]．コードクローンによってもたらされる弊害を防ぐために，ソースコード中からコードクローンを自動的に検出する手法や，その除去作業を支援する手法がこれまでに多数提案されている [3], [4].

コードクローンへの効率的な対処 (除去や監視など，コードクローンに対して注意を払うすべての行為 [1]) を実現するためには，コードクローンが持つ特性を理解する必要がある．この考えに基づき，コードクローンを分析する研究

[1] 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
[a)] k-hotta@ist.osaka-u.ac.jp
[b)] higo@ist.osaka-u.ac.jp
[c)] kusumoto@ist.osaka-u.ac.jp

が多数行われている [5], [6], [7], [8]．コードクローンの分析を行うために，修正前後のソースコード間でコードクローンの対応付けを行うこと，すなわちコードクローンの追跡を行うことが必要となる．既存研究は，コード片の文字列の類似度を算出し，高い類似度を持つコード片を対応付けることでコードクローンの追跡を実現している．しかしこの追跡方法には，コードクローンを構成するコード片に大きな修正が施された場合，対応付けができず，追跡に失敗するおそれがある，という課題点が存在する．

また，近年の調査の結果，すべてのコードクローンがソフトウェア保守に悪影響を与えているとは言い難く，一部のコードクローンのみが対処を必要とするものであることが指摘されている [6], [9]．対処を必要とするコードクローンの特性として，以下のものが挙げられる．

- 生存期間が長いこと
- 頻繁に修正されること

生存期間の短いコードクローンへ対処を行った場合，対処したコードクローンがすぐに消滅してしまうため，かけた労力に見合う恩恵が得られない [5]．また，コードクローンによってもたらされる悪影響の最たるものとして，修正漏れによる不具合が指摘されていることから，修正されない安定したコードクローンへ対処を行うことも効果的であるとは言い難い [9], [10]．しかし，これまでの調査では，生存期間が長くかつ多数修正されているコードクローンがどの程度存在するのかという点は明らかにされていない．

また，コードクローンがその生存期間のどの時点で修正されるのか，という点も効率的なコードクローンへの対処を考える上で重要である．例えば，コードクローンが生成された直後に頻繁に修正され，その後安定するのであれば，生成直後に対処を行うことが必要であると考えられる．

そこで本研究では，ソースコードに対する修正に強いコードクローン追跡手法である CRD [11] を用いることで既存研究の課題点を解決するとともに，まだ明らかにされていないコードクローンの特性を調査する．

6 つのソフトウェアに対する調査の結果，以下のことが明らかになった．

- コードクローンの多くは短命であること，また複数回修正されるコードクローンは少ないことが報告されているが，CRD を用いた場合でもそれらが成り立つ．
- コードクローンの生存期間と修正回数の間に相関はない．
- コードクローンは生存期間の前半に修正されやすい傾向にある．
- 生存期間が長く，かつ複数回修正されるコードクローンは，すべてのコードクローンのうち約 3.3%である．

これらの調査結果を総合すると，生存期間が長いコードクローンの中にはほとんど修正されないものもあれば，頻繁に修正されるものも存在しており，コードクローンへの対処が効果を発揮する事例が実在するといえる．また，コードクローンは生存期間の前半に修正されやすいという知見は，なるべく早期にコードクローンに対処を行うことが重要であることを示唆している．ただし，コードクローンの多くは生存期間が短く，かつ修正されにくいものであるということも改めて確認できたという点から，対処するコードクローンを慎重に選択する必要性があるといえる．

2. 調査の目的

2.1 コードクローンの進化に関する既存研究

これまでに，コードクローンがどのように進化しているのかを調査する研究が行われている．Kim らの研究はそれらのさきがけとなったものである [5]．この研究では，CCFinder を用いて検出されたコードクローンを追跡し，その生存期間の長さを調査している．調査の結果，コードクローンの多くは生存期間が短いことが明らかとなった．

Göde と Koschke はコードクローンがその進化の過程でどの程度修正されているのかを調査した [6]．その結果，コードクローンのほとんどは修正回数が 1 回以下であり，複数回修正されるものは全体の約 12%程度であったことが報告されている．

Thummalapenta らはコードクローンに加えられる修正のパターンに関する調査を行った [12]．その結果，コードクローンに対する修正漏れはほとんど起きていないことが明らかになった．その一方で，コードクローンに対する修正漏れは数こそ少ないものの，不具合に直結する危険性が高いということも報告されている．

これら以外にも，コードクローンに対する修正漏れの発生頻度は低いこと [13]，また，コードクローンに起因する不具合の数は多くないこと [7] が指摘されている．

さらに，コードクローンに加えられる修正の頻度を比較することでコードクローンの有害性を調査する研究が多くの研究者によって行われている [9], [10]．これらの研究の結果，コードクローンはコードクローンとなっていない箇所と比較して修正されにくいことが明らかになっている．

その一方で，コードクローンに対する修正漏れが多数存在し，またそれらによって多くの不具合が引き起こされているとする結果も報告されている [14]．

これらの調査結果は，「すべてのコードクローンが有害とはいえないが，一部有害なコードクローンが実在する」ことを示唆している．したがって，コードクローンに対して効率的に対処を行うためには，有害なものを特定し，それらに注力することが必要であるということができる [6]．

2.2 調査項目

本研究では，コードクローンの追跡を通じてコードクローンの進化の様子を分析し，その特性を明らかにすることを目指す．本調査の目的は以下の 2 点である．

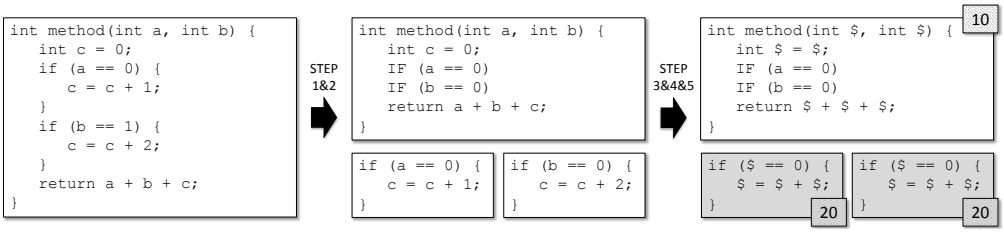


図 1 コードクローン検出手法の概要
Fig. 1 An Overview of the Clone Detection Method

- コードクローンの追跡を行う際に，修正に強い追跡手法を用いることで，これまでの研究で得られた知見に差異が生じるか否かを確認する．
- これまでの研究で明らかにされていないコードクローン進化の特性を明らかにする．

これらの調査目的を達成するために，以下に挙げる 4 つの研究課題を設定した．

RQ1: 既存研究 [5] から得られた‘コードクローンの多くは生存期間が短い’という知見は CRD を用いた場合でも成立するか．

RQ2: 既存研究 [6] から得られた‘複数回修正されるコードクローンは少ない’という知見は CRD を用いた場合でも成立するか．

RQ3: コードクローンの生存期間の長さとコードクローンに加えられる修正回数の間に正の相関はあるか．

RQ4: コードクローンは生存期間の前半に修正されやすい傾向にあるか．

このうち，RQ1 と RQ2 は既存研究で調査されている項目であり，修正に強い追跡手法を用いた場合でも同様の知見が得られるのかを確認するために設定した．今回は比較対象として，Kim らの研究 [5]，及び Göde らの研究 [6] を選定した．これらの研究を比較対象として選択した理由は，これらの研究から得られている上述の知見がコードクローン分析の研究に与えている影響が大きいためである．

一方，RQ3 及び RO4 はこれまでの研究で得られていない特性を明らかにするために設定した項目である．生存期間の長さと修正回数の間に正の相関があれば，生存期間の長いものは修正の回数が多くなるため，生存期間の長いものに注力をすることが修正回数が多いものに注力することにもつながるといえる．また，コードクローンがその生存期間の前半に修正されやすい傾向にあるのであれば，コードクローンに対して何らかの対処を行う場合，そのコードクローンの生存期間の早い段階，すなわち生成された後なるべく早い段階で対処を始めることが，効率的なコードクローンへの対処の実現につながると考えられる．

3. コードクローンの検出方法

本調査では，対象ソフトウェアのすべてのリビジョンに対してコードクローン検出を行う必要がある．そのため，調査を実現するためには高速なコードクローン検出方法を用いる必要がある．

そこで本研究では，ブロック単位のコードクローン検出手法を採用した．このコードクローン検出手法における処理の手順は以下の通りである．

ステップ 1: 字句解析及び構文解析
ステップ 2: ブロックの特定
ステップ 3: 正規化
ステップ 4: ハッシュ値の算出
ステップ 5: コードクローンの特定

図 1 に本研究で用いるコードクローン検出手法の概要を示す．以降，それぞれのステップについて述べる．

ステップ 1: 字句解析及び構文解析

入力として与えられたソースコードに対して，字句解析及び構文解析を行う．

ステップ 2: ブロックの特定

このステップではブロックの特定を行う．ここで “ブロック” には，各種ブロック文に加え，クラス，メソッド，関数なども含まれている．さらに，このステップではサブブロックを特殊な文字列に置き換える処理も併せて行う．この特殊な文字列には以下の情報が含まれている．

- ブロックの種類
- 条件式 (条件式を持つ場合のみ)
- シグネチャ (メソッド，関数の場合のみ)
- クラス名 (クラスの場合のみ)

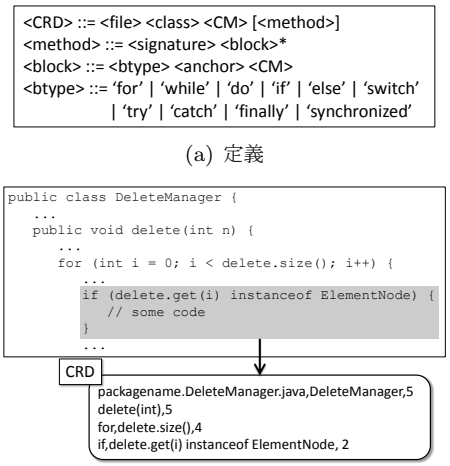
この処理により，ブロックで行われている処理の流れは同じであるが，サブブロックで行われている処理が異なる場合であっても，それらのブロックをコードクローンとして検知することが可能となる．

ステップ 3: 正規化

各ブロックに含まれる変数名並びにリテラルを特殊文字に置換する．これにより，変数名やリテラルのみが異なるようなコードクローンを検出することが可能となる．

ステップ 4: ハッシュ値の算出

正規化後の各ブロックを文字列に変換し，その文字列を



(a) 定義

(b) 例

図 2 CRD の定義と例
Fig. 2 Definition and Example of CRD

もとにハッシュ値を算出する．

ステップ 5: コードクローンの特定

各ブロックから得られたハッシュ値を比較し，コードクローンの検出を行う．複数のブロックが同じハッシュ値を持っている場合，それらのブロックは正規化後の文字列がすべて等しい．したがって，同じハッシュ値を持つブロックの集合が 1 つのコードクローンであるとみなされる．

4. コードクローンの追跡

4.1 Clone Region Descriptor

Clone Region Descriptor (以降，**CRD**) とは，Duala-Ekoko と Robillard によって提案された，コードクローンを構成するコード片のおおよその位置情報を示す表現形式である [11]．**図 2** に CRD の定義，及びその具体例を示す．CRD の定義は**図 2(a)** のようになっている．CRD は Java を対象に定義されているため，ブロックの種類には Java に存在するもののみが現れている．ここで，定義中の anchor はそのブロック特有の文字列を表しており，条件式などが該当する．また，signature はメソッドのシグネチャを，CM は各ブロックのメトリクス値 (サイクロマチック数+fan-out 数) をそれぞれ表している．次に，CRD の例を**図 2(b)** に示す．この例には，最もネストの深い位置に存在する `if` 文に対する CRD を記載している．あるブロックに対する CRD は，そのブロックに加えてその外側に位置するすべてのブロックの情報を用いて定義される．この例の場合，1 行目から 3 行目までの文字列は `if` 文の外側のブロックの情報を用いて算出されたものであり，4 行目の文字列が着目している `if` 文そのものの情報を用いて算出されたものとなっている．なお，この例は文献 [11] で用いられているものと同じものである．

4.2 コードクローンの系譜

本小節では，コードクローンの系譜の定義を与える．なお以降の説明では，対象ソフトウェアのそれぞれのリビジョンにはその識別のために一意な整数 (リビジョン番号) が割り当てられており，また連続するリビジョン間のリビジョン番号は連続しているものと仮定している．

はじめに，互いにコードクローン関係にあるブロックの集合であるクローンセットを定義する．

定義 4.1 (クローンセット) B_r をあるリビジョン r に存在するブロックの集合とする．また，$hash(b)$ をブロック b のハッシュ値とする．このとき，'ハッシュ値が同じ' であることを同値関係としたときの同値類をクローンセットと呼ぶ．また，以降ではリビジョン r に存在するすべてのクローンセットからなる集合を C_r と表記する．

次に，連続する 2 つのリビジョン間におけるブロック及びクローンセットの対応関係をそれぞれ以下に定義する．

定義 4.2 (ブロックの対応関係) b_r, b_{r+1} をそれぞれリビジョン r, $r+1$ に存在するブロックであるとする．b_r の CRD と b_{r+1} の CRD が一致するとき，b_r と b_{r+1} は対応関係にあるといい，$b_r \leftrightarrow b_{r+1}$ と表記する．

定義 4.3 (クローンセットの対応関係) リビジョン r に存在するクローンセット c_r と，リビジョン $r+1$ に存在するクローンセット c_{r+1} を考える．c_r と c_{r+1} が以下の式 (1) を満たすとき，c_r と c_{r+1} は対応関係にあるといい，$c_r \Leftrightarrow c_{r+1}$ と表記する．なおこの対応関係は対称律を満たすため，$c_r \Leftrightarrow c_{r+1}$ が成り立つ場合，$c_{r+1} \Leftrightarrow c_r$ も成り立つ．

$$\exists b_r \in c_r,\ \exists b_{r+1} \in c_{r+1}[b_r \leftrightarrow b_{r+1}] \tag{1}$$

これらを用い，コードクローンの系譜を以下に定義する．

定義 4.4 (コードクローンの系譜) 互いに対応関係にあるクローンセットの集合をコードクローンの系譜 (以降，系譜) と呼ぶ．すなわち，C_{ALL} を検査対象期間において検出されたすべてのクローンセットからなる集合としたとき，以下の式 (2)，及び式 (3) をともに満たす，クローンセットの集合 g を系譜と定義する．

$$\forall c \in g, \forall c' \in C_{ALL}[(c \Leftrightarrow c') \rightarrow (c' \in g)] \tag{2}$$

$$\forall c \in g, \exists c' \in g[c \Leftrightarrow c' \wedge c \neq c'] \tag{3}$$

4.3 コードクローンの生存期間

それぞれの系譜 g について，その始端リビジョン，終端リビジョン，並びに生存期間を以下のように定義する．

定義 4.5 (始端リビジョン，終端リビジョン，生存期間) T を分析対象となるリビジョンすべてからなる集合であるとする．このとき系譜 g について，式 (4) を満たすリビジョン $\mathit{first} \in T$ を g の始端リビジョンと定義する．

$$\exists c_{\mathit{first}} \in C_{\mathit{first}}[c_{\mathit{first}} \in g] \wedge \forall l \in T[l < \mathit{first} \rightarrow \forall c_l \in C_l(c_l \notin g)] \tag{4}$$

同様に，式 (5) を満たすリビジョン $\mathit{last} \in T$ を g の終端

リビジョンと定義する．

$$\exists c_{last} \in C_{last}[c_{last} \in g] \wedge \forall l \in T[last < l \rightarrow \forall c_l \in C_l(c_l \notin g)] \quad (5)$$

さらに，g の生存期間 R を以下の式 (6) に定義する．

$$R = \{r \in T | first \leq r \leq last\} \quad (6)$$

4.4 コードクローンへの修正

本研究では，系譜 g に加えられた修正の回数を以下のように算出する．

定義 4.6 (修正回数) ある系譜 g，及びその生存期間に含まれるあるリビジョン r を考える．g，r が以下の式 (7) 及び式 (8) のうち 1 つ以上を満たすとき，g はリビジョン r において修正されたと定義する．

$$\exists c_r \in C_r[c_r \in g \wedge \exists b_r \in c_r, \exists b_{r+1} \in B_{r+1} [b_r \leftrightarrow b_{r+1} \wedge hash(b_r) \neq hash(b_{r+1})]] \quad (7)$$

$$\exists c_r \in C_r[c_r \in g \wedge \exists b_r \in c_r, \forall b_{r+1} \in B_{r+1}[(b_r \not\leftrightarrow b_{r+1}) \vee (b_r \leftrightarrow b_{r+1} \wedge \forall c_{r+1} \in C_{r+1}[b_{r+1} \notin c_{r+1}])]] \quad (8)$$

式 (7) は対応関係にあるブロックのハッシュ値が異なる，すなわちブロックを構成する文字列に修正が加えられた場合を表している．また式 (8) は対応関係にあるブロックがリビジョン $r+1$ に存在しない場合，あるいは対応関係にあるブロックがリビジョン $r+1$ ではいずれのクローンセットにも含まれていない場合を表している．

さらに，対象ソフトウェアの最終リビジョンに存在しない系譜は開発期間の途中で消滅しており，その消滅のきっかけとなる何らかの修正が加えられていると考えられる．このような理由から，本調査では系譜が最終リビジョンに存在しない場合，その系譜は終端リビジョンにおいて修正されたとみなす．すなわち，T を対象ソフトウェアのすべてのリビジョンからなる集合とし，$last_g$ を系譜 g の終端リビジョンとしたとき，以下の式 (9) が成立すれば g は $last_g$ において修正されたとみなす．以降，式 (9) により特定された修正を “消滅に関わる修正” と呼ぶ．

$$\exists r \in T[last_g < r] \quad (9)$$

また，系譜 g が修正されたリビジョンの数を g に加えられた修正回数と定義する．

4.5 追跡の例

図 3 にコードクローンの追跡の例を示す．この例には，A，B，C，D，E，及び F の 6 つのクローンセットから構成される系譜が 1 つ存在する．リビジョン r に存在するクローンセットは，次のリビジョンへの修正によりハッシュ値が変化している．したがって，式 (7) より，この系譜はリビジョン r において修正されたと判断される．次に，リビジョン $r+2$ への修正により要素数が増加しているが，本研究では要素数の増加は修正とみなさないため，リビジョン $r+1$ では修正は行われなかったものとみなされる．リビジョン $r+2$ からリビジョン $r+3$ への修正により，系譜に枝分かれが生じている．このとき，式 (7) が成立するため，この系譜はリビジョン $r+2$ において修正されたとみなされる．次にリビジョン $r+3$ からリビジョン $r+4$ への修正によって，D のクローンセットを構成するコード片に対応するブロックがリビジョン $r+4$ に存在しなくなっている．したがって，式 (8) より，この系譜はリビジョン $r+3$ で修正されたと判断される．以上より，この系譜に加えられた修正回数は 3 となる．

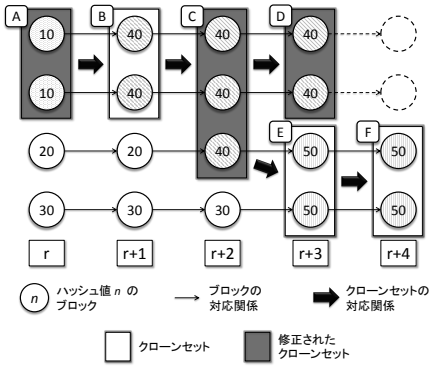


図 3 コードクローン追跡の例
Fig. 3 An Example of Clone Tracking

5. 調査の準備

5.1 調査手法の実装

本研究では, 4 で述べた調査手法を実装したツール **CloneTracker** を用いて調査を行う．CloneTracker は Java で記述されており，3 で述べたコードクローン検出機能を内含している．CloneTracker は現在のところ，Java で記述されており，かつバージョン管理システム Subversion を用いて管理されているソフトウェアのみを解析可能である．なお，文字列からのハッシュ値計算には，String 型が提供する hashCode メソッドを使用している．

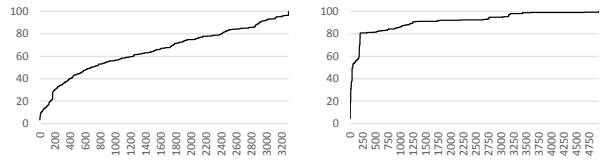
5.2 調査対象

本研究では，6 つのオープンソースソフトウェアを対象に調査を行った．それぞれのソフトウェアの概要を**表 1** に示す．表中の “リビジョン数” は分析対象となったリビジョンの数，すなわちソースファイルに修正が加えられたリビジョンの数を示している．また “行数” は終了リビジョンにおける，調査対象以下のソースコードの行数を表している．

これらはすべて Java で記述されたソフトウェアであり，Subversion を用いて管理されている．これらのソフトウェアを選択した理由は以下の通りである．

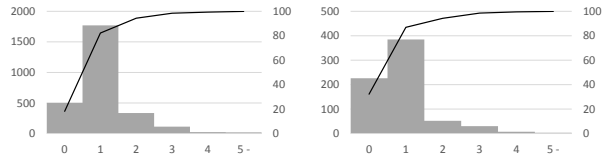
表 1 対象ソフトウェア
Table 1 Target Software Systems

ソフトウェア	調査対象	開始リビジョン (日付)		終了リビジョン (日付)		リビジョン数	行数	系譜の数
Ant	/ant/core/trunk/src/main/	268,623	(2001/2/9)	909,962	(2010/2/14)	5,154	211,958	715
ArgoUML	/trunk/src/	1	(1998/1/27)	19,893	(2012/7/10)	3,918	362,783	2,760
CloneTracker	/	1	(2012/6/19)	419	(2013/5/3)	152	22,872	66
Carol	/trunk/carol/src/	9	(2002/8/6)	1,335	(2007/10/22)	250	17,251	258
DNSJava	/trunk/org/xbill/DNS/	2	(1998/9/6)	1,670	(2012/10/26)	1,285	22,512	406
JabRef	/trunk/jabref/src/java/net/	6	(2003/10/17)	3,718	(2011/11/11)	1,489	113,277	703



(a) Ant (b) DNSJava

図 4 生存日数
Fig. 4 Alive Days



(a) ArgoUML (b) JabRef

図 5 修正回数
Fig. 5 The Number of Modifications

- 長い開発期間を有しており，また広く利用されているソフトウェアであるため (Ant, ArgoUML).
- 著者らが開発したソフトウェアであり，詳細な分析が可能であるため (CloneTracker).
- 既存研究で用いられているソフトウェアであるため (Carol, DNSJava, JabRef).

6. 調査結果

6.1 RQ1: ‘コードクローンの多くは生存期間が短い’という知見は CRD を用いた場合でも成立するか

図 4 に Ant 及び DNSJava における系譜の生存日数を示す．このグラフの x 軸は日数を，y 軸は生存日数がその日数以下である系譜数の百分率をそれぞれ表している．例えば Ant の場合，生存期間が 400 日以下の系譜が全系譜のうち約 40%を占めていることがわかる．

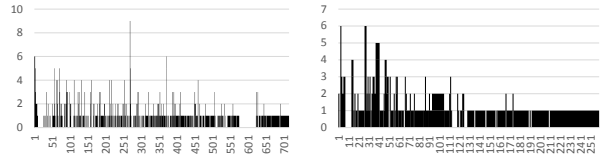
いずれのソフトウェアについても，グラフの左側では急激に上昇しているが，右側では上昇が緩やかになっている．他のソフトウェアについても同様の傾向がみられた．この傾向は特に DNSJava において顕著であり，生存期間が開発日数の 5%である 250 日以下という系譜が約 80%を占めている．

この結果から，RQ1 には **Yes** と回答することができる．

6.2 RQ2: ‘複数回修正されるコードクローンは少ない’という知見は CRD を用いた場合でも成立するか

図 5 に ArgoUML 及び JabRef における系譜の修正回数を示す．グラフの x 軸は修正回数を棒グラフは修正回数が x 軸の値である系譜の数を表している (左軸)．また折れ線グラフは累積度数の百分率を表している (右軸)．

図 5 より，ほとんどの系譜がまったく修正されないか 1 回だけ修正されるかのいずれかであることがわかる．他のソフトウェアも同様の傾向にあった．



(a) Ant (b) Carol

図 6 各系譜の修正回数
Fig. 6 The Number of Modifications on Individual Genealogies

したがって，RQ2 に対する回答は **Yes** となる．

6.3 RQ3: コードクローンの生存期間の長さとコードクローンに加えられる修正回数の間に正の相関はあるか

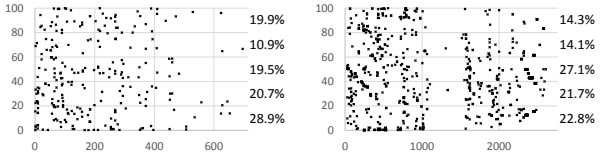
図 6 に Ant 及び Carol におけるの各系譜ごとの修正回数を示す．グラフの x 軸は各系譜を生存期間 (リビジョン数) の降順に並べたものであり，左側ほど生存期間の長い系譜となる．

また，生存期間と修正回数の間に相関があるか否かをスピアマンの順位相関係数を用いて判定した (**表 2**)．その結果，Ant，CloneTracker，DNSJava については有意水準 5%で相関がみられなかったが，ArgoUML，Carol，JabRef については相関がみられた．ただし，相関がみられた 3 つのソフトウェアについても，正負にはばらつきがあり，かつ強い相関ではなかった．

この結果から，RQ3 には **No** と回答することができる．

6.4 RQ4: コードクローンは生存期間の前半に修正されやすい傾向にあるか

図 7 に Ant 及び ArgoUML について，各系譜に加えられた修正の時期を示す．グラフの x 軸は系譜を表しており，



(a) Ant (b) ArgoUML

図 7 修正の時期
Fig. 7 Timing of Modifications

図 6 と同様に生存期間の降順に並べられている．グラフ中の各点は 1 つの修正を表しており，y 軸はそれぞれの修正が加えられた時期を表している．y 軸は各系譜の生存期間が 100 になるように正規化した値となっており，0 に近い位置に点が存在する場合は，生成後すぐに修正されたことを示している．またグラフ右側の数値は，その時期に加えられた修正が全体に占める割合 (百分率) を表しており，例えば一番下の数値 (Ant の場合，28.9%) は生成直後から生存期間の 20%が経過するまでの間に加えられた修正の割合を示している．なお，ここでは生存期間の途中で加えられた修正の時期を分析することを目的としているため，消滅に関わる修正は考慮していない．

生存期間の前半と後半に加えられる修正回数に差があるか否かを χ^2 検定を用いて判定した．その結果を**表 3** に示す．表 3 の “前半” の列は生存期間の 50%が経過するまでの間に，“後半” の列は生存期間の 50%が経過した後に加えられた修正の回数をそれぞれ表している．いずれのソフトウェアについても前半の方が後半よりも修正回数が多いという結果となった．また，Ant，ArgoUML，及び DNSJava については有意水準 5%で有意な差となった．

以上より，RQ4 には **Yes** と回答することができる．

表 2 修正回数と生存期間に対するスピアマンの順位相関係数
Table 2 Spearman's Rank Correction Coefficients

ソフトウェア	ρ	p-value
Ant	−0.004515	0.9117
ArgoUML	−0.4130	2.2×10^{-16}
CloneTracker	−0.05487	0.6617
Carol	0.3320	4.736×10^{-8}
DNSJava	0.08566	0.08473
JabRef	−0.1393	0.0002124

表 3 修正時期に関する χ^2 検定
Table 3 χ^2-test for Timing of Modifications

ソフトウェア	前半	後半	χ^2	p-value
Ant	155	101	5.3407	0.02083
ArgoUML	540	305	32.7572	1.044×10^{-8}
CloneTracker	15	6	1.2228	0.2688
Carol	71	54	0.9042	0.3417
DNSJava	169	115	4.804	0.02839
JabRef	133	98	2.3707	0.1236

```
    …
 9: public class FinallyBlockInfo extends BlockInfo {
    …
15:     public FinallyBlockInfo(String core, List<String> types) {
16:         super(BlockType.FINALLY, core);
17:         this.types = new LinkedList<String>();
18:         this.types.addAll(types);
19:         StringBuilder builder = new StringBuilder();
20:         for (String type : types) {
21:             builder.append(type + " ");
22:         }
23:         this.concatenatedTypes = builder.toString();
24:         this.crdElement = new BlockCRD(bType);
25:     }
    …
40: }
```

図 8 生存期間が長く，かつ修正回数が多いコードクローンの例
Fig. 8 An Example of Long-Lived Clone which is Modified Multiple Times

7. 考察

7.1 生存期間が長く，修正回数が多いコードクローン

1 で述べたように，生存期間が長く，かつ修正される回数の多いコードクローンに注力することが，効率的なコードクローンへの対処を実現する上で重要である．そこで，そのようなコードクローンがどの程度存在するのかを分析した．その結果を**表 4** に示す．ここでは，‘生存期間が長い’ か否かの判別基準として，Kim らの研究 [5] で用いられている基準と同様に，‘分析期間の半分以上生存しているかどうか’ を用いた．表 4 より，生存期間が長く，かつ複数回修正されるようなコードクローンは全体の約 3.3%存在していた．したがって，すべてのコードクローンに対して平等に対処を行うことは効率的とは言い難く，対処するコードクローンを慎重に選択する必要があるといえる．

図 8 に生存期間が長く，修正回数の多いコードクローンの例を示す．この例は CloneTracker に存在するコードクローンであり，リビジョン 3 で生成されて以降，最終リビジョンまで生存していた．このコードクローンは計 6 回修正されており，修正が加えられたリビジョンは 17，19，24，121，234，及び 244 となっている．このコードクローンに対する修正漏れは存在していなかったものの，このように生存期間が長く修正回数の多いコードクローンは修正漏れの要因となる危険性が高い．早期にこのようなコードクローンへの対処を行うことで，修正漏れを効率的に防ぐことができると考えられる．

表 4 全期間の半分以上生存し，かつ複数回修正されている系譜の数
Table 4 The Number of Long-Lived Genealogies which are Modified Multiple Times

ソフトウェア	系譜数	全系譜に占める割合
Ant	52	7.27%
ArgoUML	48	1.74%
CloneTracker	4	6.06%
Carol	30	11.63%
DNSJava	4	0.99%
JabRef	23	3.27%
計	161	3.28%

7.2 結果の妥当性

本小節では，本研究の結果の妥当性を脅かすおそれのある要因について述べる．

対象ソフトウェア

今回の調査では，Java で記述されたオープンソースソフトウェアのみを対象としている．そのため，他の言語で記述されたソフトウェアや商用ソフトウェアを対象として調査を行った場合，本研究で得られた結果とは異なる結果が導かれる可能性がある．

コードクローンの検出方法

本研究では，調査に要する時間的コストを低減するために，ブロック単位のコードクローン検出手法を用いている．そのため，他の検出手法を用いて調査を行った場合，本研究と異なる結果が得られる可能性がある．また本研究で用いたコードクローン検出手法はサブブロックや変数名などの正規化を行っている．正規化の方法を変更することで，調査結果に影響が及ぶ可能性がある．

コードクローンの追跡

本研究ではコードクローンの追跡に CRD を用いた．CRD はソースコードに対する修正に強いコードクローン追跡手法であるが，CRD を用いた場合でも，コード片が別のファイルに移動した場合など，位置情報が変わるような修正が行われた場合，コードクローンを適切に追跡できない可能性がある．また，本研究で用いた追跡手法は，系譜が途中で途切れることを考慮していない．すなわち，あるコードクローンが一旦消滅した後，再度出現した場合，消滅前後の系譜はそれぞれ別の系譜として扱われる．

8. あとがき

本研究では，コードクローン追跡手法 CRD を用いてコードクローンの進化の特性を分析した．分析を通じ，これまでの調査で報告されている，‘コードクローンの多くは生存期間が短い’，及び‘複数回修正されるコードクローンは少ない’という知見が成り立つことを改めて確認するとともに，コードクローンの生存期間の長さと修正回数に相関がみられないこと，及びコードクローンは生存期間の前半において修正されやすい傾向にあることを明らかにした．また，生存期間が長く，かつ修正される回数の多いコードクローンが全体の約 3.3%であることを示した．

今後の重要な課題として，生存期間が長く，かつ修正される回数の多いコードクローンを予測すること挙げられる．本研究を通じて注力すべきコードクローンの割合が高くないことが明らかになった．すなわち，効率的にソフトウェア保守を行うためには対処するコードクローンを慎重に選択する必要があるといえる．現存するコードクローンが今後長く生存するのか，また頻繁に修正されるのかを予測することで，対処すべきコードクローンの選択を支援することができる．

謝辞 本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S)(課題番号 : 25220003)，挑戦的萌芽研究 (課題番号 : 24650011)，特別研究員奨励費 (課題番号 : 25・1382)，文部科学省科学研究費補助金若手研究 (A)(課題番号 : 24680002)，及び独立行政法人情報処理推進機構技術本部ソフトウェア高信頼化センターが実施した「2012 年度ソフトウェア工学分野の先導的研究支援事業」の助成並びに支援を受けて行われた．

参考文献

[1] Koschke, R.: Frontiers on Software Clone Management, *Proceedings of the Frontiers of Software Maintenance in the 24th International Conference on Software Maintenance*, pp. 119–128 (2008).

[2] 神谷年洋，肥後芳樹，吉田則裕：コードクローン検出技術の展開，コンピュータソフトウェア，Vol. 28, No. 3, pp. 28–42 (2011).

[3] Rattan, D., Bhatia, R. and Singh, M.: Software clone detection: A systematic review, *Information and Software Technology*, Vol. 55, No. 7, pp. 1165–1199 (2013).

[4] 肥後芳樹，吉田則裕：コードクローンを対象としたリファクタリング，コンピュータソフトウェア，Vol. 28, No. 4, pp. 42–56 (2011).

[5] Kim, M., Sazawal, V., Notokin, D. and Murphy, G. C.: An Empirical Study of Code Clone Genealogies, *Proceedings of the 13th International Symposium on Foundations of Software Engineering*, pp. 187–196 (2005).

[6] Göde, N. and Koschke, R.: Frequency and Risks of Changes to Clones, *Proceedings of the 33rd International Conference on Software Engineering*, pp. 311–320 (2011).

[7] Rahman, F., Bird, C. and Devanbu, P.: Clones: What is that Smell?, *Proceedings of the 7th Working Conference on Mining Software Repositories*, pp. 72–81 (2010).

[8] Monden, A., Nakae, D., Kamiya, T., Sato, S. and Matsumoto, K.: Software Quality Analysis by Code Clones in Industrial Legacy Software, *Proceedings of the 8th International Symposium on Software Metrics*, pp. 87–94 (2002).

[9] Hotta, K., Sasaki, Y., Sano, Y., Higo, Y. and Kusumoto, S.: An Empirical Study on the Impact of Duplicate Code, *Advances in Software Engineering*, Vol. 2012 (2012).

[10] Harder, J. and Göde, N.: Cloned code: stable code, *Journal of Software : Evolution and Process* (2012).

[11] Duala-Ekoko, E. and Robillard, M. P.: Clone Region Descriptors: Representing and Tracking Duplication in Source Code, *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, Vol. 20, No. 1, pp. 3:1–3:31 (2010).

[12] Thummalapenta, S., Cerulo, L., Aversano, L. and Penta, M. D.: An empirical study on the maintenance of source code clones, *Empirical Software Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–34 (2010).

[13] Krinke, J.: A Study of Consistent and Inconsistent Changes to Code Clones, *Proceedings of the 14th Working Conference on Reverse Engineering*, pp. 170–178 (2007).

[14] Juergens, E., Deissenboeck, F., Hummel, B. and Wagner, S.: Do Code Clones Matter?, *Procedings of the 31st International Conference on Software Engineering*, pp. 485–495 (2009).