情報処理学会論文誌 Vol.62 No.4 1029–1038 (Apr. 2021)

プログラムに対する欠陥限局の適合性計測

佐々木 唯[1,2,a)] 肥後 芳樹[1,b)] 松本 真佑[1,c)] 楠本 真二[1,d)]

受付日 2020年8月3日, 採録日 2021年1月12日

概要：欠陥限局とはプログラムに含まれる欠陥箇所を推測する技術である．なかでも近年，Spectrum-Based Fault Localization（SBFL）に関する研究がさかんに行われている．SBFL は，テストケースごとの成否と，どの文が実行されたかという情報を用いて，プログラム中の欠陥箇所を推測する技術である．同一機能のプログラムであってもプログラムの構造が異なれば，同じテストケースによって実行される文が変化するため，SBFL の精度に違いが生じる可能性がある．本論文では，プログラムが SBFL にどの程度適しているかを，そのプログラムに対する SBFL 適合性として提案する．SBFL 適合性は，あるプログラムに対する SBFL の精度を表している．また，本論文では SBFL 適合性の 1 つの評価指標として，SBFL スコアの計測手法を提案する．提案手法は，すべてのテストケースを通過するプログラムに対し，ミューテーションテスト技術を活用して意図的に欠陥を発生させ，SBFL によってその欠陥箇所をどの程度正確に特定できたかを計測する．リファクタリングを題材に，プログラム構造の違いによる SBFL スコアの違いを分析した結果，同一条件分岐先で実行される文の総数が，SBFL スコアに影響を与える要素であることを確認した．

キーワード：欠陥限局，ミューテーションテスト，ソフトウェア保守性

Measurement of Program Suitability for Fault Localization

Yui Sasaki[1,2,a)] Yoshiki Higo[1,b)] Shinsuke Matsumoto[1,c)] Shinji Kusumoto[1,d)]

Received: August 3, 2020, Accepted: January 12, 2021

Abstract: Fault Localization is a technique to localize faulty code fragments of a given program. Recently, Spectrum-Based Fault Localization (in short, SBFL) has been actively studied. SBFL utilizes the execution paths, which are the information about which program statements are executed by each of the success or failure test cases. If two programs have the same functionality but different program structures, the execution paths can vary; as a result, it may cause differences in the accuracy of identifying faults using SBFL. In this paper, we propose a characteristic to what extent a program is suitable for SBFL as SBFL-Suitability. SBFL-Suitability is a degree of accuracy of identifying the fault of a program. We also propose a technique for measuring the SBFLScore which is one metric of SBFL-Suitability. The proposed technique generates many slightly-variant programs from a given program using mutation testing techniques, and then measures how accurately SBFL can localize the changed statements in the variant programs. We conducted an experiment to investigate how the differences in program structures affect SBFLScore. As a result, we found that the fewer statements executed at the same conditional branch, the higher SBFLScore tends to be.

Keywords: spectrum-based fault localization, mutation testing, software maintainability

[1] 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita, Osaka 565–0871, Japan
[2] 株式会社日本総合研究所
The Japan Research Institute, Limited, Shinagawa, Tokyo 141–0022, Japan
[a)] s-yui@ist.osaka-u.ac.jp
[b)] higo@ist.osaka-u.ac.jp
[c)] shinsuke@ist.osaka-u.ac.jp
[d)] kusumoto@ist.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ソフトウェア開発において，デバッグは多大な労力とコストを必要とする作業である．デバッグ作業がソフトウェア開発コストの過半を占めるという報告もある [1], [2]．このため，デバッグ支援に関する研究がさかんに行われている．

デバッグ支援の研究分野の1つに欠陥限局技術がある．欠陥限局とは，欠陥が含まれている箇所を推測する技術である．なかでも近年，実行経路情報を用いた欠陥限局（Spectrum-Based Fault Localization，以降，SBFL）に関する研究がさかんに行われている [3]．SBFL は，失敗するテストケースによって実行される文は欠陥を含む可能性が高いという考えに基づき，テストケースごとの成否と，プログラム中で実行される文の情報（以降，実行経路情報）を用いて，欠陥を含む文を推測する技術である．SBFL 技術では，プログラム中の各文に対して欠陥を含む可能性（以降，疑惑値）が数値化される．欠陥を含む文の疑惑値が他の文と比べてより高い値であるほど，SBFL 結果がより正確であるといえる．

ソフトウェアには様々な品質の観点が存在する．ISO/IEC 25010 [*1]で定義されているソフトウェア製品の品質モデルでは，8つの品質特性，および各特性から派生する副特性が定義されている[*2]．品質特性の1つである Maintainability（保守性）の副特性に Analysability（解析性）がある．解析性とは，ソフトウェアの不具合の原因を診断することや，修正すべき箇所を識別することに対する有効性や効率の程度を示す[*3]．

高水準言語には様々な記述方法が用意されており，開発者は自身の好みや組織あるいはプロジェクトの方針に従って，必要な機能の実装方法を決定する．実装方法が変わるとテストケースごとの実行経路情報が変わる可能性があり，さらに文の疑惑値やその順位も変わる可能性がある．したがって，プログラム自体が SBFL を用いた欠陥箇所の特定にどの程度適しているかという特性を持っていると考えることができる．

そこで本論文では，あるプログラムに対する SBFL を用いた欠陥限局の結果がどの程度正確かを，プログラムの**SBFL 適合性**として提案する．これは，あるプログラムに対する SBFL 適用技術との親和性の一種であり，品質特性である保守性，およびその副特性である解析性に含まれる1つの観点と見なすことができる．ソフトウェアの品質特性の1つの観点として SBFL 適合性を扱うことにより，下記の活動が可能になる．

- 現在のプログラムに対する SBFL 結果がどの程度信頼できるかを事前に把握する．信頼できると判断された場合は，SBFL 技術を利用することにより欠陥限局を行い，その結果を利用して開発者がデバッグ作業を行えばよい．
- SBFL 適合性が低いプログラムに対し，SBFL 適合性が向上するようなプログラム変換を行う．

本論文では，SBFL 適合性の1つの評価指標として，SBFL スコアの計測方法を提案する．具体的には，すべてのテストケースを通過するプログラムに対して，ミューテーションテスト [4] の技術を活用し，様々な箇所に意図的に欠陥を発生させ，SBFL を実行する．SBFL によってどの程度正確に欠陥箇所を特定できたかを計測することにより，元のプログラムの SBFL スコアを計測する．

本論文ではリファクタリングを題材に，プログラム構造の違いによる SBFL スコアの計測結果を比較した．その結果，同じ条件分岐先で実行される文の数が少ないほど SBFL スコアが向上することを確認し，SBFL スコアを向上させるプログラム構造の変換例を発見した．

なお，SBFL スコアの計測はすべてのテストケースを通過するプログラムを対象としているため，テストに失敗するプログラムに対する SBFL 結果の信頼度を事前に把握したいという場面では，SBFL スコアを活用することができない．しかし，本論文の結果をもとに計測方法や評価指標に関する研究を発展させることで，より実用的な場面で SBFL 適合性を取り扱うことができると考えられる．

本論文による貢献は以下の点である．

- プログラムに対する SBFL 適合性を提案．
- SBFL 適合性の1つの評価指標である SBFL スコアについて，ミューテーションテストを用いた計測手法を提案．
- リファクタリングを題材として，プログラム構造の違いによって SBFL スコアが異なる事例を確認．
- SBFL スコアを向上させるプログラム構造の特徴と変換例を発見．

2. 関連研究

プログラム中の欠陥箇所を推測する手法の1つとして，実行経路情報を用いた欠陥限局（以降，SBFL）に関する研究がさかんに行われている [3]．SBFL は，各テストケースの成否と実行経路情報を用いて，文ごとの疑惑値，すなわち欠陥である可能性を示す値を算出する．実行経路情報とは，各テストケースがプログラム中のどの文を実行したかという情報である．直感的には，失敗するテストケースが多く通過する文は，成功するテストケースが多く通過する文より欠陥を含む可能性が高いと考えることができる．これまでに多くの SBFL 手法が提案されている [5], [6], [7] が，各手法における疑惑値の計算方法はそれぞれ異なる．Abreu らは SBFL 手法で用いられる計算式の有効性を評価するため，2つの SBFL ツール，および分子生物学の分野

[*1] ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models

[*2] ISO/IEC 25010 に準ずる JIS X 25010 では，8つの品質特性を機能適合性・性能効率性・互換性・使用性・信頼性・セキュリティ・保守性・移植性と定義している．

[*3] ISO/IEC 25010 における Analysability の定義は以下のとおり．Degree of effectiveness and efficiency with which it is possible to assess the impact on a product or system of an intended change to one or more of its parts, or to diagnose a product for deficiencies or causes of failures, or to identify parts to be modified.

において用いられる Ochiai の類似係数 [8] を対象に調査した結果，Ochiai の計算式が最も優れていると結論づけている [9]．

SBFL はテストケースごとの実行経路情報に基づくため，テストケースの内容に結果が左右される．失敗するテストケースをもとに他のテストケースを生成することで，より効率的に SBFL を行う研究が行われている [10], [11]．

また，テストスイートの欠陥検出能力を評価する方法として，ミューテーションテストに関する研究が行われている [4]．ミューテーションテストでは，すべてのテストケースを通過するプログラムに対して意図的に変更を加えた大量のプログラムが生成される．変更が加えられたプログラムをミュータントと呼ぶ．各ミュータントに対してテストを実行した際，テストが失敗すれば，そのテストはミュータントの変更箇所，すなわち欠陥を検出する能力があると判断できる．ミューテーションテストには様々なツールが提案されており [12], [13], [14]，企業のソフトウェアに対するミューテーションテストの実用性も報告されている [15]．

ミューテーションテストを SBFL に応用する研究も行われている．ミューテーションテストでは意図的に変更が加えられるため，その変更箇所，すなわち欠陥の混入箇所は明らかである．欠陥の箇所が未知であるプログラムと，そのプログラムから生成された特定のミュータントが，共通のテストケースで失敗する場合，欠陥の箇所も共通である可能性が高い．この考えに基づき，欠陥限局の精度を向上させる手法が提案されている [16], [17]．

3. SBFL 適合性

著者らは，プログラム自体が SBFL にどの程度適しているかという特性を持っていると考える．本論文では，この特性を **SBFL 適合性**として提案する．プログラムの機能やテストスイートが共通であっても，構造が異なることで SBFL を用いた欠陥限局の精度に違いが生じることがある．本章では，プログラム構造の違いによる SBFL 適合性の違いについて，具体的事例を用いて説明する．

図 1 は，2 つの入力値を受け取り，少なくとも一方が正の数であれば true を，そうでなければ false を返す処理を，2 通りの記述で表している．図 1 (a) では結果を変数 result に代入して，最後にまとめて結果を返しているが，図 1 (b) では結果が確定したタイミングで逐次返している．図 1 (b) は図 1 (a) に対して，リファクタリングが適用された状態である．このように return 文によって早く処理を抜ける書き方は early return と呼ばれる [18]．

このプログラムのテストスイートには図 1 (c) を用意した．図 1 の各プログラムは同じ条件式に欠陥を含んでいる．図 1 (a) の s_4 と図 1 (b) の s'_4 は変数 b が 0 である場合も true を返してしまうため，テストケース t_4 は失敗する．

図 1 (a)，1 (b) の右側には，各テストケースの結果（P：通過（成功），F：失敗）と実行経路情報，および Ochiai の計算式により算出した文の疑惑値（suspiciousness，図では susp と記載）も記載している[*4]．疑惑値のとりうる値は 0 以上 1 以下であり，1 が最も疑惑が強いことを示す．図 1 より，欠陥を含む文 s_4，s'_4 は異なる疑惑値であると確認できる．

プログラム (入力: a, b)	*susp*	t_1	t_2	t_3	t_4
s_1: **boolean** result = **false**;	0.50	✓	✓	✓	✓
s_2: **if** (0 < a)	0.50	✓	✓	✓	✓
s_3: result = **true**;	0.00	✓	✓		
🐞 s_4: **if** (0 <= b) // correct: 0 < b	0.50	✓	✓	✓	✓
s_5: result = **true**;	0.50	✓	✓	✓	✓
s_6: **return** result;	0.50	✓	✓	✓	✓
テスト結果：		P	P	P	F

(a) リファクタリング前

プログラム (入力: a, b)	*susp*	t_1	t_2	t_3	t_4
s'_2: **if** (0 < a)	0.50	✓	✓	✓	✓
s'_3: **return true**;	0.00	✓	✓		
🐞 s'_4: **if** (0 <= b) // correct: 0 < b	0.71			✓	✓
s'_5: **return true**;	0.71			✓	✓
s'_6: **return false**;	-				
テスト結果：		P	P	P	F

(b) リファクタリング後

テストケース	入力 (a, b)	期待値	実際の値
t_1:	(1, 1)	true	true
t_2:	(1, 0)	true	true
t_3:	(0, 1)	true	true
t_4:	(0, 0)	false	true

(c) テストスイート

図 1 構造の異なる 2 つのプログラムの SBFL 結果
Fig. 1 SBFL results of different program structures.

欠陥箇所が未知である状態において，SBFL 結果をもとに欠陥の箇所を特定しようとする作業を考える．文ごとの疑惑値が算出されているため，作業者は疑惑値の高い順に文を確認する．図 1 (a) の場合，欠陥を含む文の疑惑値は最も高いものの，同じ疑惑値を持つ文が計 5 つ存在するため，最大で 5 つの文を確認しなければ発見できない．一方で，図 1 (b) であれば，2 つの文を確認すれば欠陥箇所を発見することができる．したがって，図 1 (a) に比べて図 1 (b) の方が SBFL 結果の精度が高いといえる．

4. SBFL スコア

本論文では，プログラムの SBFL 適合性を評価するために，**SBFL スコア**という指標を提案する．本論文において，SBFL 適合性と SBFL スコアは下記のとおり区別する．

SBFL 適合性：ソフトウェアの品質特性として提案．性質を表すものであり，直接的な数値化はできない．

SBFL スコア：SBFL 適合性の 1 つの評価指標として提案．具体的な数値を持つ．

[*4] 用意したテストスイートでは図 1 (b) の文 s'_6 は実行されないため，文 s'_6 の疑惑値の情報は存在しない．

SBFL スコアを計測するための基本的なアイデアは，与えられたプログラムに対して意図的に変更を加えたプログラムを複数生成し，その変更箇所を欠陥と見なして，SBFL でどの程度正確に特定できるか計測することである．プログラムに意図的に変更を加える方法として，ミューテーションテストを活用する．本来ミューテーションテストとは，テストスイートがミュータントをどの程度正確に欠陥として検出できるかを計測するが，本手法は，ミュータントに含まれる欠陥箇所を，SBFL がどの程度正確に識別できるかを計測する．

4.1 SBFL スコアに影響する要素

プログラム p の SBFL スコアは次の 2 つの要素に影響を受ける．

- テストスイート T
- ミュータント生成器 G

テストスイートに含まれるテストケースの内容によって SBFL の精度に違いが生じる可能性がある．例として，図 1 (b) においてテストケースが t_3，t_4 のみである場合を考える．この 2 つのテストケースの実行経路情報は同一であるため，実行経路情報から計算される疑惑値は，少なくとも実行される文 s'_2，s'_4，s'_5 において同じ値となる．元のテストスイートによる SBFL 結果であれば，文 s'_2 より文 s'_4，s'_5 の方に欠陥が含まれている可能性が高いと判断できる．

本論文では，ミュータントを生成する仕組みをミュータント生成器と呼ぶ．ミューテーションテストにおいて，ミュータントを生成するためのプログラムの変換ルールをミューテーション演算子と表現する．ミューテーション演算子の種類は，ミュータント生成器を構成する要素の 1 つである．なお，複数のミューテーション演算子をプログラムの複数箇所に適用してミュータントを生成することも可能ではあるが，本提案手法におけるミュータントの生成は，1 つのミューテーション演算子をプログラムの 1 カ所にのみ適用することを前提とする．

4.2 算出方法

プログラム p の SBFL スコアは，テストスイート T，ミュータント生成器 G に依存するとして，$SBFLScore^{T,G}(p)$ と定義する．SBFL スコアは 0 以上 1 以下の値をとり，値が高いほど SBFL 適合性が高いものとする．

SBFL スコアの算出の流れを**図 2** に示す．SBFL スコアは次の 3 つのステップによって算出される．

(1) プログラム p から複数のミュータントを生成．
(2) 各ミュータントに SBFL を実行し，意図的に発生させた欠陥の疑惑値の順位を算出．
(3) 各ミュータントに含まれる欠陥の疑惑値の順位から，SBFL スコアを算出．

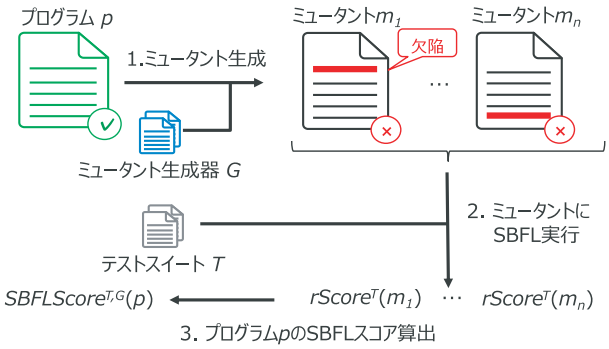


図 2 SBFL スコア算出の流れ
Fig. 2 Process of the *SBFLScore* calculation.

ステップ 1. ミュータント生成

プログラム p にミュータント生成器 G を用いて，ミュータントを生成する．このとき，各ミュータントは元のプログラムに対して 1 カ所だけが変更されるよう生成する．この変更が加えられた箇所を欠陥として扱うが，この時点ではテストを実行していないため，変更箇所が本当に欠陥となるかどうかは分からない．生成されたミュータントの集合を $M^G(p)$ と定義する．

ステップ 2. ミュータントに SBFL を実行

生成された各ミュータントに対して，テストスイート T を用いて SBFL を実行する．T に含まれるすべてのテストケースを通過したミュータントが存在した場合は，そのミュータントの欠陥を検出できるようテストスイートを修正のうえ，改めて SBFL を実行し，すべてのテストケースを通過するミュータントが存在しない状態とする[*5]．

$M^G(p)$ に含まれる各ミュータントに対し，文ごとの疑惑値を算出し，順位付けを行う．ここで，あるミュータント $m \in M^G(p)$ に含まれる各文 s について，以下を定義する．

- $susp^T(s)$：文 s の疑惑値
- $rank^T(s)$：文 s の疑惑値の順位
- $rScore^T(s)$：文 s の疑惑値の正規化順位

疑惑値の算出には Ochiai の計算式を用いる．テストスイート T を実行したときのある文 s の疑惑値 $susp^T(s)$ は，Ochiai の計算式によって以下のとおり算出される．以下の式において，$fail^T(s)$ は文 s を実行した失敗テストケースの数，$pass^T(s)$ は文 s を実行した成功テストケースの数，$totalFail^T$ は失敗テストケースの総数である．

$$susp^T(s) = \frac{fail^T(s)}{\sqrt{totalFail^T \times (fail^T(s) + pass^T(s))}} \quad (1)$$

次に疑惑値の順位 $rank^T(s)$ を算出する．ある文の疑惑値の順位は，疑惑値の高い順に文を並べた際最大で確認し

[*5] プログラムの記述次第では，どのようなテストケースも通過してしまう可能性がある．たとえば `a = b + c; a = d;` という 2 つのプログラム文が並んで記述されている場合，1 文目の代入結果が 2 文目によって上書きされるため，1 文目の代入式に変更を加えてもテストケースで検出することができない．このような場合はプログラムを見直してステップ 1 から実行し直す必要がある．

プログラム (入力: a, b)	*susp*	*rank*	*rScore*
s_1: **boolean** result = **false**;	0.50	5	0.20
s_2: **if** (0 < a)	0.50	5	0.20
s_3: result = **true**;	0.00	6	0.00
s_4: **if** (0 <= b) // correct: 0 < b	0.50	5	0.20
s_5: result = **true**;	0.50	5	0.20
s_6: **return** result;	0.50	5	0.20

(a) リファクタリング前

プログラム (入力: a, b)	*susp*	*rank*	*rScore*
s'_2: **if** (0 < a)	0.50	3	0.33
s'_3: **return true**;	0.00	4	0.00
s'_4: **if** (0 <= b) // correct: 0 < b	0.71	2	0.67
s'_5: **return true**;	0.71	2	0.67
s'_6: **return false**;	-	-	-

(b) リファクタリング後

図 3 ミュータントへの SBFL 実行結果
Fig. 3 SBFL results of mutants.

なければならない文の総数とする．たとえば，疑惑値 1.0 の文が 2 つ，0.9 の文が 1 つ存在する場合は，疑惑値 1.0 の文はどちらも 2 位と扱い，疑惑値 0.9 の文は 3 位とする．

疑惑値の順位は，順位の母集団となる文の総数により異なる価値を持つ．たとえば，10 個の文のうちの 10 位と，100 個の文のうちの 10 位とでは，後者の方が順位としての価値が高い．そこで，各文が文全体の中でどの程度上位に登場するかを示すため，順位を 0 以上 1 以下の範囲に線形に正規化する．文 s の正規化順位 $rScore^T(s)$ は以下のとおり算出する．1 が最も順位が高く，0 が最も順位が低いことを示している．以下の式において，$totalStatements^T$ はテストスイート T によって実行される文の数である．

$$rScore^T(s) = 1 - \frac{rank^T(s) - 1}{totalStatements^T - 1} \quad (2)$$

また，ミュータント m に含まれる欠陥の疑惑値の正規化順位を $rScore^T(m)$ と定義する．各ミュータントに含まれる欠陥はただ 1 つの文であるため，この値はミュータントごとに一意である．ミュータント m の欠陥を含む文を ${s^m}_{fault}$ とすると，$rScore^T(m)$ は文 ${s^m}_{fault}$ の疑惑値の正規化順位である．

$$rScore^T(m) = rScore^T({s^m}_{fault})$$

ミュータントの $rScore$ が高いほど，そのミュータントの SBFL 結果の精度が高い，すなわち欠陥箇所を正確に特定できることを意味する．例として，図 1 のプログラムをミュータントと見立てた場合の SBFL 結果を**図 3** に示す．欠陥を含む文 s_4，s'_4 の $rScore$，およびこのミュータント自体の $rScore$ はそれぞれ 0.20 と 0.67 である．3 章で述べたとおり，リファクタリング後の方が SBFL 結果の精度が高いという事実を，$rScore$ によって示すことができている．

ステップ 3. SBFL スコアの算出

プログラム p から生成された各ミュータントの $rScore$ の平均値を SBFL スコアとし，以下の式で算出する．

$$SBFLScore^{T,G}(p) = \frac{1}{|M^G(p)|} \sum_{m \in M^G(p)} rScore^T(m)$$

5. 実験

Java を対象として提案手法を実装し，プログラム構造の違いにより SBFL スコアがどのように変化するか確認するための実験を行った．

5.1 準備

本実験で用いるミューテーション演算子は，オープンソースのミューテーションテストツールである PIT [19] を参考とした．PIT の Web サイトではミューテーション演算子のカテゴリと内容が公開されている．PIT 自体はバイトコードとしてのミュータントしか生成しないため，ソースコードとしてミュータントを生成するよう，PIT のデフォルトカテゴリに含まれる 11 種類のミューテーション演算子を本実験のために実装した．本実験で用いるミューテーション演算子を**表 1** に示す．本論文では表 1 の括弧内の表記を各ミューテーション演算子の略称として使用する．

本論文では，プログラム構造の違いとしてリファクタリングを題材とした．リファクタリングには様々なパターンが存在する [20] が，今回は，「条件式の簡素化」に分類される 8 種類のリファクタリングパターンの中から選定した．このカテゴリから選定した理由は，条件式の分岐によってテストケースごとの実行経路情報が変化するため，リファクタリングによって SBFL 結果が変化しやすいと考えたためである．また，本実験では SBFL を Java メソッド単位で実行し，対象となるメソッド内で文の順位を計算するよう提案手法を実装している．そのため，複数のメソッドにまたがるリファクタリングパターンを題材とすることができない．そのようなリファクタリングパターンについては，挙動の似ている別のリファクタリングパターンで代用した．たとえば，「条件記述の分解」は本来，条件文中の記述を他のメソッドに切り出すリファクタリングであるが，メソッドではなく変数に切り出す「変数の切り出し」で代用した．また，「条件式の統合」は本来，一連の条件式を単一の条件式に統合し，他のメソッドに切り出すリファクタリングであるが，ここでは統合するのみとした．代用が難しい 3 種類のリファクタリングパターンは対象から除外し，残った 5 種類のリファクタリングパターンを実験対象の題材として選定した．選定したリファクタリングパターンを**表 2** に示す．

各プログラムはミューテーション演算子がなるべく多くの箇所に適用されるよう配慮して作成した．詳細は後述するが，本実験ではリファクタリング前後で同じ記述箇所に発生させた欠陥に対して特定のしやすさの変化を確認す

表 1 実験で用いるミューテーション演算子
Table 1 Mutation operators.

ミューテーション演算子		説明	変換例	
			変換前	変換後
(CB)	Conditional Boundary	関係演算子の境界を変更する	`a<b`	`a<=b`
(INC)	Increments	インクリメントとデクリメントを入れ替える	`n++`	`n--`
(INV)	Invert Negatives	負の数を正の数に置き換える	`-n`	`n`
(MA)	Math	算術演算子を置き換える	`a+b`	`a-b`
(NC)	Negate Conditionals	関係演算子を置き換える	`a==b`	`a!=b`
(VM)	Void Method Calls	何の値も返さないメソッド呼び出しを削除する	`method();`	`;`
(PR)	Primitive Returns	プリミティブ型の戻り値を 0 に置き換える	`return 5;`	`return 0;`
(ER)	Empty Returns	戻り値の型に応じて空を表す値に置き換える	`return "str";`	`return "";`
(FR)	False Returns	戻り値を false に置き換える	`return true;`	`return false;`
(TR)	True Returns	戻り値を true に置き換える	`return false;`	`return true;`
(NR)	Null Returns	戻り値を null に置き換える	`return object;`	`return null;`

表 2 対象リファクタリングと SBFL スコアの計測結果
Table 2 Target refactorings and results of *SBFLScore*.

ケース：リファクタリングパターン	*SBFL* スコア	
	前	後
1: 変数の切り出し（「条件記述の分解」の代用）	0.81	0.53
2: 条件式の統合（メソッド抽出なし）	0.95	0.72
3: 重複した条件記述断片の統合	0.69	0.53
4: 制御フラグの削除	0.61	0.67
5: ガード節による入れ子条件記述の書き換え	0.83	0.95

る．欠陥箇所に偏りがあると，実験の評価に影響を与える可能性があるため，このような配慮を行った．たとえば，条件式に boolean 型の変数だけを書くとミューテーション演算子が適用されないため，`var == true` のように関係演算子を用いて NC 演算子が適用されるようにしている．

テストスイートは，C2 カバレッジ（条件網羅）が 100%となるように生成した．これは，なるべく多くのテストケースを用いることで，各プログラム文の疑惑値を分散させるためである．ただし，提案手法により生成されるミュータントによっては，元のプログラムのテストスイートの C2 カバレッジが 100%にならない可能性がある．たとえば，プログラムの条件式に算術演算子が含まれる場合，MA 演算子の適用により条件式中の境界値が変わる可能性がある．そのため，まずは提案手法のステップ 1 においてミュータントの生成を行い，すべてのミュータントの C2 カバレッジが 100%となるテストスイートを手作業で作成した．

対象プログラムを**図 4**，**図 5**，**図 6**，**図 7**，**図 8** に示す．このうち，図 4〜6 は以降の節にて詳細を述べるため，生成されたミュータントに関する情報も掲載している．

5.2 結果と考察

SBFL スコアの計測結果を表 2 の右側に示す．ケース 1〜3 はリファクタリング前の SBFL スコアが高く，ケース 4，5 ではリファクタリング後の SBFL スコアが高いという結果となった．

rScore

ミュータント:	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
ミューテーション演算子:	NC	CB	INV	NC	CB	INV	INV	PR
s_1: **int** result = 0;	0.67	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67
s_2: **if** (x > 0)	**0.67**	**0.50**	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67
s_3: result = -10;	0.50	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
s_4: **else if** (y > 0)	0.33	0.00	0.00	**1.00**	**0.83**	0.83	0.83	0.50
s_5: result = -20;	0.00	0.00	0.00	0.83	1.00	**1.00**	0.00	0.00
else	-	-	-	-	-	-	-	-
s_6: result = -30;	0.17	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	**1.00**	0.33
s_7: **return** result;	0.67	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	**0.67**

(a) リファクタリング前 ($SBFLScore = 0.83$)

rScore

ミュータント:	m'_1	m'_2	m'_3	m'_4	m'_5	m'_6	m'_7	m'_{8a}	m'_{8b}	m'_{8c}
ミューテーション演算子:	NC	CB	INV	NC	CB	INV	INV	PR	PR	PR
s'_2 : **if** (x > 0)	**1.00**	**0.75**	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.75	0.50
$s'_{\{3,7\}}$: **return** -10;	0.75	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**	0.00
s'_4 : **if** (y > 0)	0.50	0.00	0.00	**1.00**	**0.75**	0.75	0.75	0.75	0.00	0.75
$s'_{\{5,7\}}$: **return** -20;	0.00	0.00	0.00	0.75	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	**1.00**
$s'_{\{6,7\}}$: **return** -30;	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	**1.00**	**1.00**	0.00	0.00

(b) リファクタリング後 ($SBFLScore = 0.95$)

図 4 ケース 5：ガード節による入れ子条件記述の書き換え
Fig. 4 Case 5: Replace nested conditional with guard clauses.

例としてケース 5, 1, 3 のプログラムと生成されたミュータントに関する情報を図 4〜6 に示す．(a) がリファクタリング前，(b) がリファクタリング後であり，それぞれの左側にプログラム，右側に各ミュータントにおける各文の *rScore* を表示している．*rScore* は数値と棒グラフで表示されており，各ミュータントのうち元のプログラムから変更された文，すなわち欠陥を含む文の *rScore* は太字で表現されている．この値は 4.2 節で述べたとおりミュータントの *rScore* でもある．たとえば，図 4 (a) のミュータント m_1 では，文 s_2 に対して NC 演算子が適用されており，*rScore* が 0.67 であることを示している．太字で表現しているミュータントの *rScore* の平均値が *SBFLScore* である．

図 4 の文 s_2 と s'_2 のようにリファクタリング前後で互い

		rScore						
ミュータント:		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7
ミューテーション演算子:		NC	CB	INC	NC	CB	INC	PR
s_1:	**if** (0 < n)	**0.67**	**0.50**	0.50	0.50	0.25	0.25	0.75
s_2:	n--;	0.33	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.25
s_3:	**else if** (n < 0)	0.00	0.00	0.00	**1.00**	**0.75**	0.75	0.00
s_4:	n++;	-	0.00	0.00	0.25	0.75	**1.00**	0.25
s_5:	**return** n;	0.67	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	**0.75**

(a) リファクタリング前 ($SBFLScore = 0.81$)

		rScore						
ミュータント:		m'_1	m'_2	m'_3	m'_4	m'_5	m'_6	m'_7
ミューテーション演算子:		NC	CB	INC	NC	CB	INC	PR
s'_{1a} :	**boolean** f1 = (0 < n);	**0.40**	**0.33**	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50
s'_{3a} :	**boolean** f2 = (n < 0);	0.40	0.33	0.33	**0.33**	**0.17**	0.17	0.50
s'_{1b} :	**if** (f1)	0.40	0.33	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50
s'_2 :	n--;	0.20	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.17
s'_{3b} :	**else if** (f2)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.83	0.83	0.00
s'_4 :	n++;	-	0.00	0.00	0.17	0.83	**1.00**	0.17
s'_5 :	**return** n;	0.40	0.33	0.33	0.33	0.17	0.17	**0.50**

(b) リファクタリング後 ($SBFLScore = 0.53$)

図 5 ケース 1：変数の切り出し
Fig. 5 Case 1: Extract variables.

		rScore						
ミュータント:		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7
ミューテーション演算子:		NC	CB	MA	MA	MA	MA	PR
s_1:	**int** result = 0;	0.57	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.57
s_2:	**int** tmp = 0;	0.57	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.57
s_3:	**if** (x > 0) {	**0.57**	**0.29**	0.29	0.29	0.29	0.29	0.57
s_4:	tmp = y * 2;	0.29	0.86	**0.86**	0.00	0.86	0.00	0.00
s_5:	result = y + tmp;	0.29	0.86	0.86	0.00	**0.86**	0.00	0.00
	} **else** {							
s_6:	tmp = y * 3;	0.00	0.00	0.00	**0.86**	0.00	0.86	0.29
s_7:	result = y + tmp;	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	**0.86**	0.29
	}							
s_8:	**return** result;	0.57	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	**0.57**

(a) リファクタリング前 ($SBFLScore = 0.69$)

		rScore					
ミュータント:		m'_1	m'_2	m'_3	m'_4	$m'_{\{5,6\}}$	m'_7
ミューテーション演算子:		NC	CB	MA	MA	MA	PR
s'_1 :	**int** result = 0;	0.33	0.17	0.17	0.17	0.33	0.33
s'_2 :	**int** tmp = 0;	0.33	0.17	0.17	0.17	0.33	0.33
s'_3 :	**if** (x > 0)	**0.33**	**0.17**	0.17	0.17	0.33	0.33
s'_4 :	tmp = y * 2;	0.17	1.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00
	else						
s'_6 :	tmp = y * 3;	0.00	0.00	0.00	**1.00**	0.17	0.17
$s'_{\{5,7\}}$:	result = y + tmp;	0.33	0.17	0.17	0.17	**0.33**	0.33
s'_8 :	**return** result;	0.33	0.17	0.17	0.17	0.33	**0.33**

(b) リファクタリング後 ($SBFLScore = 0.53$)

図 6 ケース 3：重複した条件記述断片の統合
Fig. 6 Case 3: Consolidate duplicate conditional fragments.

に対応する文は同じ数字を添字として付与している．たとえば図 4 の文 s_2 と s'_2 はリファクタリング前後で変化はなく，図 5 の文 s'_{1a} と s'_{1b} はリファクタリングによって文 s_1 から分割されたことを示している．また，図 6 の文 $s'_{\{5,7\}}$ は，文 s_5，s_7 がリファクタリングによって 1 つの文に集約

```
s1: if (x > 0)
s2:   return 10;
s3: if (y < 0)
s4:   return 10;
s5: if (z == 0)
s6:   return 10;
s7: return 20;
```

(a) リファクタリング前

```
s'{1,3,5} : if( (x>0)
              || (y<0)
              || (z==0))
s'{2,4,6} :   return 10;
s'7       : return 20;
```

(b) リファクタリング後

図 7 ケース 2：条件式の統合
Fig. 7 Case 2: Consolidate conditional expression.

```
s1: int r = 0;
s2: boolean found = false;
s3: for (int i : array) {
s4:   if (found != true) {
s5:     if (i == 0)
s6:       found = true;
s7:     result = result + i;
      }}
s8: return result;
```

(a) リファクタリング前

```
s'1: int r = 0;
s'3: for (int i : array) {
s'5:     if (i == 0)
s'9:       break;
s'7:     result = result + i;
    }
s'8: return result;
```

(b) リファクタリング後

図 8 ケース 4：制御フラグの削除
Fig. 8 Case 4: Remove control flag.

されたことを示している．

また，互いに対応する文，すなわち同じ数字を添字に持つ文に同じミューテーション演算子が適用されて生成されたミュータントを，ミュータントのペアと呼ぶ．たとえば，図 4 の m_1 と m'_1 は，文 s_2 と s'_2 に NC 演算子が適用されたミュータントのペアである．ペアとなるミュータントは同じ数字を添字として付与している．以降，ミュータントのペアは，$\langle m_1, m'_1 \rangle$ と表現する．ペアとなるミュータントの *rScore* を比較することで，同じ記述箇所に発生した欠陥の正規化順位，すなわちその欠陥箇所の特定のしやすさが，リファクタリング前後でどれだけ変化するかを確認することができる．

5.2.1 SBFL スコアが向上した例

例としてケース 5 について考察する．ケース 5 で適用した「ガード節による入れ子条件記述の書き換え」とは，後続処理の対象外となる条件が満たされれば return する処理を先頭に記述することで，早く処理を終了させるよう書き換えるリファクタリングである．3 章で用いたリファクタリング例と同様，このような書き方は early return とも呼ばれる．これらはソースコードのネストが深くなることを抑制する効果がある．

図 4 よりミュータントのペアを比較すると，$\langle m_1, m'_1 \rangle$，$\langle m_2, m'_2 \rangle$，$\langle m_8, m'_{8a} \rangle$，$\langle m_8, m'_{8b} \rangle$，$\langle m_8, m'_{8c} \rangle$ はリファクタリング後に *rScore* が向上，$\langle m_5, m'_5 \rangle$ はリファクタリング後に *rScore* が低下，それ以外は変わらなかった．リファクタリング前の各ミュータントにおいて，文 s_1，s_2，s_7 は同じ *rScore* であることに着目する．この文が欠陥箇所であ

表 3 条件分岐先ごとの文の分類（ケース 5）
Table 3 Statements by conditional branch (Case 5).

(a) リファクタリング前

条件分岐先 $C(s_2, s_4)$	該当文
C(*, *)	$\{s_1, s_2, s_7\}$
C(T, *)	$\{s_3\}$
C(F, *)	$\{s_4\}$
C(F, T)	$\{s_5\}$
C(F, F)	$\{s_6\}$

(b) リファクタリング後

条件分岐先 $C(s'_2, s'_4)$	該当文
C(*, *)	$\{s'_2\}$
C(T, *)	$\{s'_{\{3,7\}}\}$
C(F, *)	$\{s'_4\}$
C(F, T)	$\{s'_{\{5,7\}}\}$
C(F, F)	$\{s'_{\{6,7\}}\}$

るミュータントは m_1，m_2，m_8 であり，リファクタリング後に *rScore* が向上したミュータントのペアに含まれる．*rScore* の計算過程を確認したところ，これらの文の疑惑値もまた互いに同じ値であった．4.2 節で述べたとおり，提案手法では同じ疑惑値を持つ文が多いほど，その文の順位が下がるような順位付けを行っている．文 s_1，s_2，s_7 はどのテストケースにおいても必ず実行される文であるため同じ疑惑値であったが，リファクタリング後は return 文が挿入されたことで，必ず実行される文が s'_2 のみとなったため，順位および *rScore* が向上したと考えられる．

式 (1) において，実行されるテストケースが共通である文，すなわち同じ条件分岐先[*6]で実行される文は，つねに同じ疑惑値を持つ．同じ条件分岐先で実行される文を明確にするため，条件分岐先ごとに文を分類した．その結果を**表 3** に示す．この表において，$C(s_2, s_4)$ は文 s_2 と s_4 にそれぞれ含まれる条件式の結果に応じた条件分岐先を意味する．条件式の結果のとりうる値は，$\{T, F, *\}$ の 3 通りであり，それぞれ真，偽，影響なしを示す．たとえば C(*, *) は，いずれの条件式にも影響を受けない条件分岐先であり，リファクタリング前は文 s_1，s_2，s_7 が，リファクタリング後は s'_2 が該当する．表 3 より，C(*, *) に該当する文の数はリファクタリングによって 3 から 1 に減っており，それ以外は数に変わりはない．同じ条件分岐先の文が少ないことは，同じ疑惑値を持つ文が少ないことを意味しているため，同じ条件分岐先の文が少ないほど，SBFL スコアが向上すると考えることができる．

5.2.2 SBFL スコアが低下した例

例としてケース 1，3 について考察する．ケース 1 では，条件文中の記述を変数に切り出す「変数切り出し」リファクタリングを題材とした．条件分岐先ごとに文を分類したところ，**表 4** のとおり，C(*, *) に該当する文の数が増加していることが確認できた．図 5 より，C(*, *) に該当する文が欠陥箇所であるミュータントのペアにおいては，リファクタリング後のミュータントの方が，*rScore* が低いことが読み取れる．条件式を別の文に切り出したことで同一条件分岐先で実行される文の数が増え，SBFL スコアが低下したと考えられる．

[*6] ここでは，文 s_1，s_2，s_7 のように必ず実行される文も，条件分岐に影響を受けない 1 つの条件分岐先と見なしている．

表 4 条件分岐先ごとの文の分類（ケース 1）
Table 4 Statements by conditional branch (Case 1).

(a) リファクタリング前

条件分岐先 $C(s_1, s_3)$	該当文
C(*, *)	$\{s_1, s_5\}$
C(T, *)	$\{s_2\}$
C(F, *)	$\{s_3\}$
C(F, F)	$\{s_4\}$

(b) リファクタリング後

条件分岐先 $C(s_{1b}, s_{3b})$	該当文
C(*, *)	$\{s'_{1a}, s'_{3a}, s'_{1b}, s'_5\}$
C(T, *)	$\{s'_2\}$
C(F, *)	$\{s'_{3b}\}$
C(F, F)	$\{s'_4\}$

表 5 条件分岐先ごとの文の分類（ケース 3）
Table 5 Statements by conditional branch (Case 3).

(a) リファクタリング前

条件分岐先 $C(s_3)$	該当文
C(*)	$\{s_1, s_2, s_3, s_8\}$
C(T)	$\{s_4, s_5\}$
C(F)	$\{s_6, s_7\}$

(b) リファクタリング後

条件分岐先 $C(s'_3)$	該当文
C(*)	$\{s'_1, s'_2, s'_3, s'_{\{5,7\}}, s'_8\}$
C(T)	$\{s'_4\}$
C(F)	$\{s'_6\}$

ケース 3 で適用した「重複した条件記述断片の統合」は，if-else の両方で実行される文を if 文の外に切り出すリファクタリングである．条件分岐先ごとに文を分類した結果を**表 5** に示す．C(*) に該当する文の数は増加し，C(T)，C(F) に該当する文の数は減少しており，ケース 5 と 1 の両方の事象が起こっている．図 6 よりミュータントのペアを比較すると，リファクタリングによって *rScore* が低下したミュータントのペアの方が，増加したミュータントのペアよりも多い．これは，リファクタリング後に文の数が増加した C(*) に多くの文が該当していることが理由であると考えられる．また，$\langle m_5, m'_{\{5,6\}} \rangle$ と $\langle m_6, m'_{\{5,6\}} \rangle$ のペアは，他のペアと比べてリファクタリング前後の *rScore* の差が大きい．これは，このミュータントの欠陥を含む文が該当する条件分岐先が，リファクタリングによって C(T)，C(F) から C(*) に変更となり，それらの分岐先で実行される文の数が 2 から 5 に大きく増えたことが理由であると考えられる．このことから，条件分岐先の文の数が少ない方から多い方へ文が移動したことが，SBFL スコアが低下した原因と考えることができる．逆に，図 6 (b) から 6 (a) への変換のように，多い方から少ない方へ文の移動を行うことで，SBFL スコアを向上させることができるといえる．

5.3 まとめ

実験結果より，同一の条件分岐先で実行される文の数が少ないほど，SBFL スコアが向上することを確認した．また，これを実現するためのプログラム構造の変換方法として，以下の手段が有効であると考えられる．

- early return を用いて条件分岐を早く終了させる．
- 同一の条件分岐先の文の数が多い方から少ない方へ文

を移動する．

6. 妥当性への脅威

本提案手法では，生成されたミュータントの *rScore* の平均値を SBFL スコアとした．しかし，ミュータントの *rScore* に外れ値が含まれていたり，*rScore* の分布に偏りがあったりする場合は，平均値を用いることは不適切である恐れがある．このような場合は，平均値ではなく中央値や箱ひげ図を用いた分析を行う方が望ましい．また，リファクタリングによって *rScore* が上がるケースと下がるケースの両方が存在する場合，値がどのように変化したかという情報を活用することも有用である可能性がある．

本論文では表 2 に記載の 5 種類のリファクタリングを実験対象とした．リファクタリングパターンは数多く存在するため，他のパターンで検証することで，新たな傾向を発見したり，今回発見した傾向を否定する例が現れたりする可能性がある．

本提案手法による SBFL スコアの計測結果は，テストスイートとミュータント生成器に影響を受けるため，それらの要素が変化することで今回の実験結果と異なる結果が得られる可能性がある．本論文では，それらの要素が SBFL スコアにどのような影響を与えるかを評価できていない．評価を行う場合は次の方法が考えられる．テストスイートについては，SBFL の精度を高めるためのテストケースを生成する既存研究 [10], [11] を活用することで，テストスイートの生成方法が結果にどのような違いをもたらすか検証する方法が考えられる．また，ミュータント生成器については，本論文で用いた 11 種類のミューテーション演算子に加え，別のミューテーション演算子を適用することで，ミュータント生成器による結果の違いを検証する方法が考えられる．

なお，リファクタリングはプログラムの内部構造の改善によってプログラムの保守性を高めるための技術であるが，本実験結果では，保守性を高めるためのリファクタリングが SBFL 適合性の低下につながるケースが存在した．反対に，SBFL 適合性を高めるためのプログラム変換が，かえって保守性を低下させることにつながる可能性もある．本論文ではプログラム構造の違いによる SBFL スコアの違いについてのみ着目したため，他の品質特性や副特性への影響についての評価ができていない．そのため，SBFL 適合性と他の品質特性との関係を明らかにすることは今後の重要な課題である．

7. おわりに

本論文では，プログラム自体が SBFL にどの程度適しているかという特性を持っていると考え，その特性を SBFL 適合性として提案した．また，SBFL 適合性を評価する 1 つの指標を SBFL スコアとし，ミューテーションテストを活用した SBFL スコアの計測手法を提案した．リファクタリングを題材に，プログラム構造の違いによる SBFL スコアの違いを確認した結果，同じ機能，同じテストスイートであっても，プログラム構造の違いにより SBFL スコアが変化することを確認した．また，SBFL スコアを向上させるプログラム構造の特徴を発見した．

本論文では，SBFL スコアという評価指標を用いることで，SBFL 適合性の高いプログラム構造を発見することができたが，SBFL スコアは使用できる場面が限定的である．具体的には，SBFL スコアの計測にはすべてのテストケースを通過するプログラムが必要であるため，SBFL を用いて欠陥限局を行う前に SBFL 結果の信頼度を把握したいという要求に応えることができない．また，本実験における SBFL スコアの計測対象が非常に少なく，SBFL 適合性が高いと判断するための SBFL スコアのしきい値も不明瞭である．より実用的な場面で SBFL 適合性を活用するためには，実在するプログラムの計測による実験データの収集，SBFL スコア計測手法の前提条件の緩和，あるいは SBFL スコア以外の新たな評価指標についての検討など，さらなる研究が求められる．

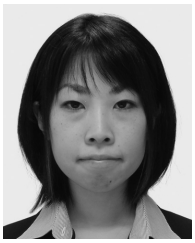
加えて，元のプログラムから SBFL 適合性の高いプログラムへの自動変換手法の提案にも今後は取り組みたい．6 章で述べたとおり，SBFL 適合性は保守性の 1 つの観点ではあるものの，他の保守性と相反する可能性がある．そのため，SBFL 適合性を向上させるプログラム変換内容は必ずしも人にとって分かりやすいものとは限らない．SBFL を実行する前に，SBFL 適合性が高いプログラム構造に自動変換することで，欠陥限局の精度を向上させることができる可能性がある．

謝辞 本論文の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）（課題番号：18H03222），基盤研究（B）（課題番号：20H04166）の助成を得て行われた．

参考文献

[1] Hailpern, B. and Santhanam, P.: Software Debugging, Testing, and Verification, *IBM Systems Journal*, Vol.41, No.1, pp.4–12 (2002).
[2] Britton, T., Jeng, L., Carver, G. and Cheak, P.: Reversible Debugging Software “Quantify the Time and Cost Saved Using Reversible Debuggers” (2013), available from ⟨http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.370.9611⟩.
[3] Wong, W.E., Gao, R., Li, Y., Abreu, R. and Wotawa, F.: A Survey on Software Fault Localization, *IEEE TSE*, Vol.42, No.8, pp.707–740 (2016).
[4] Jia, Y. and Harman, M.: An Analysis and Survey of the Development of Mutation Testing, *IEEE TSE*, Vol.37, No.5, pp.649–678 (2011).
[5] Jones, J.A., Harrold, M.J. and Stasko, J.: Visualization of Test Information to Assist Fault Localization, *Proc. ICSE*, pp.467–477 (2002).
[6] Chen, M.Y., Kiciman, E., Fratkin, E., Fox, A. and

Brewer, E.: Pinpoint: Problem Determination in Large, Dynamic Internet Services, *Proc. DSN*, pp.595–604 (2002).
[7] Dallmeier, V., Lindig, C. and Zeller, A.: Lightweight Defect Localization for Java, *Proc. ECOOP*, pp.528–550 (2005).
[8] da Silva Meyer, A., Garcia, A.A.F., de Souza, A.P. and de Souza Jr., C.L.: Comparison of Similarity Coefficients Used for Cluster Analysis with Dominant Markers in Maize (Zea Mays L), *Genetics and Molecular Biology*, Vol.27, No.1, pp.83–91 (2004).
[9] Abreu, R., Zoeteweij, P. and van Gemund, A.J.C.: On the Accuracy of Spectrum-Based Fault Localization, *Proc. TAIC PART*, pp.89–98 (2007).
[10] Wang, T. and Roychoudhury, A.: Automated Path Generation for Software Fault Localization, *Proc. ASE*, pp.347–351 (2005).
[11] Lu, H., Gao, R., Huang, S. and Wong, W.E.: Spectrum-Base Fault Localization by Exploiting the Failure Path, *Proc. ASE*, pp.252–257 (2016).
[12] Ma, Y.-S., Offutt, J. and Kwon, Y.-R.: MuJava: A Mutation System for Java, *Proc. ICSE*, pp.827–830 (2006).
[13] Just, R.: The Major Mutation Framework: Efficient and Scalable Mutation Analysis for Java, *Proc. ISSTA*, pp.433–436 (2014).
[14] Coles, H., Laurent, T., Henard, C., Papadakis, M. and Ventresque, A.: PIT: A Practical Mutation Testing Tool for Java (Demo), *Proc. ISSTA*, pp.449–452 (2016).
[15] Ramler, R., Wetzlmaier, T. and Klammer, C.: An Empirical Study on the Application of Mutation Testing for a Safety-Critical Industrial Software System, *Proc. SAC*, pp.1401–1408 (2017).
[16] Moon, S., Kim, Y., Kim, M. and Yoo, S.: Ask the Mutants: Mutating Faulty Programs for Fault Localization, *Proc. ICST*, pp.153–162 (2014).
[17] Papadakis, M. and Le Traon, Y.: Metallaxis-FL: Mutation-Based Fault Localization, *Journal of STVR*, Vol.25, No.5–7, pp.605–628 (2015).
[18] Boswell, D. and Foucher, T.: *The Art of Readable Code: Simple and Practical Techniques for Writing Better Code*, O'Reilly Media (2011).
[19] Coles, H.: PIT, available from ⟨https://pitest.org/⟩ (accessed 2020-08).
[20] Fowler, M.: *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*, Addison-Wesley (1999).



佐々木 唯

2013 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了．同年株式会社日本総合研究所入社．2019 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程入学．プログラムの品質に関する研究に従事．

肥後 芳樹 （正会員）

2002 年大阪大学基礎工学部情報科学科中退．2006 年同大学大学院博士後期課程修了．2007 年同大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻助教．2015 年同准教授．博士（情報科学）．ソースコード分析，特にコードクローン分析，リファクタリング支援，ソフトウェアリポジトリマイニングおよび自動プログラム修正に関する研究に従事．電子情報通信学会，日本ソフトウェア科学会，IEEE 各会員．

柗本 真佑 （正会員）

2010 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了．同年神戸大学大学院システム情報学研究科特命助教．2016 年大阪大学大学院情報科学研究科助教．博士（工学）．エンピリカルソフトウェア工学の研究に従事．

楠本 真二 （正会員）

1988 年大阪大学基礎工学部卒業．1991 年同大学大学院博士課程中退．同年同大学基礎工学部助手．1996 年同講師．1999 年同助教授．2002 年同大学大学院情報科学研究科助教授．2005 年同教授．博士（工学）．ソフトウェアの生産性や品質の定量的評価に関する研究に従事．電子情報通信学会，IEEE，IFPUG 各会員．