Oracle® Developer Studio 12.5: スレッドアナライザユーザーズガイド

Part No: E71959
2016 年 6 月

ORACLE

Part No: E71959

ドキュメントのアクセシビリティについて

オラクルのアクセシビリティについての詳細情報は、Oracle Accessibility ProgramのWeb サイト(http://www.oracle.com/pls/topic/lookup?ctx=acc&id=docacc)を参照してください。

Oracle Supportへのアクセス

サポートをご契約のお客様には、My Oracle Supportを通して電子支援サービスを提供しています。詳細情報は(http://www.oracle.com/pls/topic/lookup?ctx=acc&id=info)か、聴覚に障害のあるお客様は (http://www.oracle.com/pls/topic/lookup?ctx=acc&id=trs)を参照してください。

目次

このドキュメントの使用法

- **概要** – スレッドアナライザの紹介と 2 つの詳細なチュートリアルが収録されています。一つはデータの競合の検出を扱い、もう一方はデッドロックの検出を扱います。また、スレッドアナライザで認識される API と役立つヒントが、付録に収録されています。
- **対象読者** - アプリケーション開発者、システム開発者、アーキテクト、エンジニア
- **必要な知識** - プログラミング経験、ソフトウェア開発テスト、ソフトウェア製品を構築およびコンパイルできる能力

製品ドキュメントライブラリ

この製品および関連製品のドキュメントとリソースは http://www.oracle.com/pls/topic/lookup?ctx=E71939 で入手可能です。

フィードバック

このドキュメントに関するフィードバックを http://www.oracle.com/goto/docfeedback からお聞かせください。

♦ ♦ ♦ 第 1 章

1 スレッドアナライザとその機能

スレッドアナライザは、マルチスレッドプログラムの実行の分析に使用できる Oracle Developer Studio ツールです。スレッドアナライザは、POSIX スレッド API、Oracle Solaris スレッド API、OpenMP ディレクティブ、またはこれらの組み合わせを使用して作成されたコード内でデータの競合やデッドロックなどのマルチスレッドプログラミングのエラーを検出できます。

この章では、次の内容について説明します。

スレッドアナライザの概要

スレッドアナライザは、このドキュメントで説明されているように、データの競合およびデッドロックを検査するために特別に作成できる実験で、これらのエラーを表示できます。

スレッドアナライザはスレッド分析実験を検査するために設計された、パフォーマンスアナライザの特殊なビューです。詳しくは、15 ページの「スレッドアナライザのインタフェース」を参照してください。

データの競合とは

スレッドアナライザは、マルチスレッドプロセスの実行中に生じたデータの競合を検出します。データの競合は、次のすべての条件に当てはまるときに生じます。

- *単一プロセス*内の 2 つ以上のスレッドが、同じメモリー位置に同時にアクセスする
- 少なくとも 1 つが書き込みのためのアクセスである
- どのスレッドも、そのメモリーへのアクセスを制御するための相互排他ロックを使用していない

この 3 つの条件が揃うとアクセス順序が定まらないため、実行するたびにその時の順序によって計算結果が異なる可能性があります。データの競合には、害のないもの (メモリーアクセスをビジーウェイトに使用するときなど) もありますが、データの競合の多くはプログラムのバグによるものです。

スレッドアナライザは、POSIX スレッド API、Oracle Solaris スレッド API、OpenMP、またはこれらの組み合わせを使用して作成されたマルチスレッドプログラムで動作します。

デッドロックとは

デッドロックとは、2 つ以上のスレッドが互いを待機しているために処理がまったく進まない状況を指します。デッドロックの原因は多数あります。スレッドアナライザは、相互排他ロックの不適切な使用によって生じたデッドロックを検出します。この種のデッドロックは、マルチスレッドアプリケーションでよく生じます。

2 つ以上のスレッドから成るプロセスは、次の条件がすべて揃うとデッドロックを生じることがあります。

- すでにロックを保持しているスレッドが新しいロックを要求する
- 新しいロックの要求が同時に行われる
- チェーン内の次のスレッドで保持されているロックを各スレッドが待機するという巡回チェーンを、2 つ以上のスレッドが形成する

デッドロック状況の簡単な例を次に示します。

- スレッド 1 はロック A を保持し、ロック B を要求する
- スレッド 2 はロック B を保持し、ロック A を要求する

デッドロックには*潜在的*デッドロックと*実*デッドロックの 2 種類があります。潜在的デッドロックは、所定の実行で必ず起きるわけではありませんが、スレッドのスケジュールや、スレッドによって要求されたロックのタイミングに依存したプログラムの実行で起きる可能性があります。実デッドロックは、プログラムの実行中に発生するものです。実デッドロックでは、関係するスレッドの実行がハングアップしますが、プロセス全体の実行がハングアップする可能性もあります。

スレッドアナライザ使用モデル

次の手順は、スレッドアナライザでのマルチスレッドプログラムのトラブルシューティングプロセスを示しています。

1. データの競合の検出を行う場合、プログラムを計測します。
2. データの競合の検出またはデッドロック検出の実験を作成します。
3. 実験結果を検討し、スレッドアナライザで明らかになったマルチスレッドプログラミングの問題が、正当なバグまたは影響のない現象であるかどうかを判断します。

4. 本物のバグを修正し、入力データ、スレッド数、ループスケジュール、さらにはハードウェアなど、さまざまな要素を変更しつつ追加実験 (前述の手順 2) を作成します。これを繰り返すことで、決定論的ではない問題の突き止めに役立ちます。

前述の手順 1 から 3 については、以降のセクションで説明します。

データの競合を検出するための使用モデル

データの競合を検出するには、次の 3 つの手順を実行する必要があります。

1. データの競合の検出を有効にするコードを計測する
2. 計測したコードで実験を作成する
3. データの競合の実験結果を検討する

データの競合を検出するコードを計測する

アプリケーションでデータの競合の検出を可能にするには、実行時にメモリーアクセスをモニターするコードをあらかじめ計測しておくこと、つまり、実行時にメモリーアクセスをモニターし、データの競合が発生しているかどうかを判別するために、実行時サポートライブラリ `libtha.so` の呼び出しをコードに挿入しておく必要があります。

コードの計測方法としては、コンパイル中にアプリケーションのソースレベルで行う場合もあれば、バイナリに対し追加ツールを実行することによってアプリケーションのバイナリレベルで行う場合もあります。

ソースレベルの計測は、コンパイルに特別なオプションを指定して行います。また、使用する最適化レベルおよびその他のコンパイラオプションを指定できます。ソースレベルの計測は、コンパイラが一部の分析と計測を少ないメモリーアクセスで行うことができるため、実行時間がより短縮されます。

バイナリレベルの計測は、ソースコードが使用できない場合に役立ちます。ソースコードがある場合でもバイナリ計測を使用することがあります。ただしこの場合、アプリケーションが使用している共有ライブラリはコンパイルできません。`discover` ツールを使用したバイナリ計測では、バイナリだけでなく、開かれている共有ライブラリすべてを計測します。

ソースレベルの計測

ソースレベルで計測するには、特別なコンパイラオプションを付けてソースコードをコンパイルします。

`-xinstrument=datarace`

このコンパイラオプションを付けてコンパイラで生成されたコードが、データの競合の検出用に計測されます。

-g コンパイラオプションも、アプリケーションバイナリの構築時に使用する必要があります。このオプションを付けると、スレッドアナライザでデータの競合を報告するときにソースコードおよび行番号情報を表示するための追加データを生成できます。

バイナリレベルの計測

バイナリレベルで計測するには、discover ツールを使用する必要があります。バイナリが a.out という名前の場合、次のように実行することによって、計測済みのバイナリ a.outi を作成できます。

```
discover -i datarace -o a.outi a.out
```

discover ツールでは、開かれている共有ライブラリを、それがプログラム内で静的にリンクされているか、dlopen() によって動的に開かれているかにかかわらず、すべて自動的に計測します。デフォルトで、ライブラリの計測済みコピーは、ディレクトリ $HOME/SUNW_Bit_Cache に書き込まれます。

有効な discover コマンド行オプションの一部を次に示します。詳細は、discover(1) のマニュアルページを参照してください。

-o *file*	計測済みバイナリを、指定したファイル名で出力する
-N *lib*	指定したライブラリを計測しない
-T	どのライブラリも計測しない
-D *dir*	キャッシュディレクトリを *dir* に変更する

計測済みアプリケーションで実験を作成する

データの競合の検出実験を作成するには、-r race フラグを付けて collect コマンドを使用して、アプリケーションを実行し、プロセスの実行中に実験データを収集します。-r race オプションを使用すると、競合を起こしたデータアクセスの対を収集データから知ることができます。

データの競合についての実験結果を検討する

データの競合を検出する実験を検討するには、tha コマンドを使用します。このコマンドにより、スレッドアナライザのグラフィカルユーザーインタフェースが起動します。er_print コマンド行インタフェースも使用できます。

デッドロックを検出するための使用モデル

デッドロックの検出には、次の 2 つの手順が必要です。

1. デッドロック検出実験を作成する。
2. デッドロック実験結果の検討

デッドロックを検出するための実験を作成する

デッドロック検出実験を作成するには、`-r deadlock` フラグを付けて `collect` コマンドを使用して、アプリケーションを実行し、プロセスの実行中に実験データを収集します。`-r deadlock` オプションを使用した場合、巡回チェーンを構成するロックの保持とロックの要求が収集データに含まれます。

デッドロックの実験結果を検討する

デッドロックを検出する実験を検討するには、`tha` コマンドを使用します。このコマンドにより、スレッドアナライザのグラフィカルユーザーインタフェースが起動します。`er_print` コマンド行インタフェースも使用できます。

データの競合およびデッドロックを検出するための使用モデル

データの競合とデッドロックを同時に検出するには、13 ページの「データの競合を検出するための使用モデル」で説明した 3 つの手順に従いデータの競合を検出し、`r race,deadlock` フラグを付けた `-collect` コマンドでアプリケーションを実行します。これで競合検出とデッドロック検出の両方のデータが実験結果に含まれます。

スレッドアナライザのインタフェース

スレッドアナライザは `tha` コマンドで起動できます。

スレッドアナライザは、マルチスレッドプログラムの解析向けに設計されたパフォーマンスアナライザ (`analyzer`) のインタフェースを採用しています。パフォーマンスアナライザの通常のビューの代わりに、「競合」、「デッドロック」、および「デュアルソース」ビューが表示されます。パフォーマンスアナライザを使用してマルチスレッドプログラムの実験結果を調べる場合、データの競合とデッドロックのためのビューとともに、「関数」、「呼び出し元-呼び出し先」、「逆アセンブリ」など従来のパフォーマンスアナライザにあるビューが表示されます。

♦ ♦ ♦ 第 2 章

2 データの競合のチュートリアル

この章は、スレッドアナライザを使用してデータの競合を検出し修正する方法を学ぶ詳細なチュートリアルです。

このチュートリアルは、次のセクションから構成されています。

データの競合チュートリアルのソースファイル

このチュートリアルでは、データの競合を含んだ 2 つのプログラムを使用します。

- 最初のプログラムは素数を見つけます。このプログラムは C 言語で作成され、OpenMP 指令で並列化されています。ソースファイルは `prime_omp.c` と呼ばれます。
- 2 番目のプログラムも素数を見つけるもので、やはり C 言語で作成されます。ただし、これは OpenMP 指令でなく POSIX スレッドで並列化されます。ソースファイルは `prime_pthr.c` と呼ばれます。

データの競合チュートリアルのソースファイルの入手

このチュートリアルで使用するソースファイルは、Oracle Developer Studio 開発者ポータルのダウンロードエリア (`http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/solarisstudio/downloads/index.html`)からダウンロードできます。

サンプルファイルをダウンロードして展開したあと、`OracleDeveloperStudio12.5-Samples/ThreadAnalyzer` ディレクトリからサンプルを見つけることができます。サンプルは、`prime_omp`

および prime_pthr サブディレクトリにあります。各サンプルディレクトリには、手順に関する DEMO ファイルと Makefile ファイルが 1 つずつ含まれていますが、このチュートリアルではそれらの手順に従わず、Makefile も使用しません。代わりに、コマンドを個別に実行していきます。

このチュートリアルに従うには、サンプルディレクトリから prime_omp.c と prime_pthr.c ファイルを別のディレクトリにコピーするか、独自のファイルを作成し、次のコードリストからコードをコピーします。

prime_omp.c のソースコード

このセクションでは、prime_omp.c のソースコードを次に示します。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <stdio.h>
 6 #include <math.h>
 7 #include <omp.h>
 8
 9 #define THREADS 4
10 #define N 10000
11
12 int primes[N];
13 int pflag[N];
14
15 int is_prime(int v)
16 {
17     int i;
18     int bound = floor(sqrt(v)) + 1;
19
20     for (i = 2; i < bound; i++) {
21         /* no need to check against known composites */
22         if (!pflag[i])
23             continue;
24         if (v % i == 0) {
25             pflag[v] = 0;
26             return 0;
27         }
28     }
29     return (v > 1);
30 }
31
32 int main(int argn, char **argv)
33 {
34     int i;
35     int total = 0;
36
37 #ifdef _OPENMP
38     omp_set_dynamic(0);
39     omp_set_num_threads(THREADS);
```

```
40 #endif
41
42     for (i = 0; i < N; i++) {
43         pflag[i] = 1;
44     }
45
46     #pragma omp parallel for
47     for (i = 2; i < N; i++) {
48         if ( is_prime(i) ) {
49             primes[total] = i;
50             total++;
51         }
52     }
53
54     printf("Number of prime numbers between 2 and %d: %d\n",
55            N, total);
56
57     return 0;
58 }
```

prime_pthr.c のソースコード

このセクションでは、prime_pthr.c のソースコードを次に示します。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <stdio.h>
 6 #include <math.h>
 7 #include <pthread.h>
 8
 9 #define THREADS 4
10 #define N 10000
11
12 int primes[N];
13 int pflag[N];
14 int total = 0;
15
16 int is_prime(int v)
17 {
18     int i;
19     int bound = floor(sqrt(v)) + 1;
20
21     for (i = 2; i < bound; i++) {
22         /* no need to check against known composites */
23         if (!pflag[i])
24             continue;
25         if (v % i == 0) {
26             pflag[v] = 0;
27             return 0;
28         }
```

```
29     }
30     return (v > 1);
31 }
32
33 void * work(void *arg)
34 {
35     int start;
36     int end;
37     int i;
38
39     start = (N/THREADS) * (*(int *)arg);
40     end = start + N/THREADS;
41     for (i = start; i < end; i++) {
42         if ( is_prime(i) ) {
43             primes[total] = i;
44             total++;
45         }
46     }
47     return NULL;
48 }
49
50 int main(int argn, char **argv)
51 {
52     int i;
53     pthread_t tids[THREADS-1];
54
55     for (i = 0; i < N; i++) {
56         pflag[i] = 1;
57     }
58
59     for (i = 0; i < THREADS-1; i++) {
60         pthread_create(&tids[i], NULL, work, (void *)&i);
61     }
62
63     i = THREADS-1;
64     work((void *)&i);
65
66     for (i = 0; i < THREADS-1; i++) {
67         pthread_join(tids[i], NULL);
68     }
69
70     printf("Number of prime numbers between 2 and %d: %d\n",
71            N, total);
72
73     return 0;
74 }
```

prime_omp.c および prime_pthr.c でのデータの競合の影響

コードに競合状態が存在する場合は、メモリーアクセスの順序が定まらないため、実行するたびにその時の順序によって計算結果が異なります。prime_omp および prime_pthr プログラムの正しい答えは 1229 です。

例をコンパイルして実行できるので、prime_omp または prime_pthr を実行すると、コード内のデータの競合によって誤ったまたは矛盾した結果が生じることがわかります。

次の例では、プロンプトにコマンドを入力して、prime_omp プログラムをコンパイルし実行します。

```
% cc -xopenmp=noopt -o prime_omp prime_omp.c -lm
%
% ./prime_omp
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1229
% ./prime_omp
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1228
% ./prime_omp
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1180
```

次の例では、プロンプトにコマンドを入力して、prime_pthr プログラムをコンパイルし実行します。

```
% cc -mt -o prime_pthr prime_pthr.c -lm
%
% ./prime_pthr
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1140
% ./prime_pthr
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1122
% ./prime_pthr
Number of prime numbers between 2 and 10000: 1141
```

各プログラムを 3 回実行した結果が矛盾していることに注意してください。矛盾した結果が表示されるまで、4 回以上プログラムを実行する必要がある場合もあります。

次に、データの競合が生じている位置を特定できるように、コードを計測し、実験を作成します。

スレッドアナライザを使用したデータの競合の検出方法

スレッドアナライザは、Oracle Developer Studio パフォーマンスアナライザが使用するものと同じ "収集-分析" モデルに従います。

スレッドアナライザを使用するには、次の 3 つの手順を行います。

1. 21 ページの「コードを計測する」
2. 23 ページの「データの競合の検出実験を作成する」
3. 23 ページの「データの競合の検出実験を検証する」

コードを計測する

プログラムでデータの競合の検出を可能にするには、実行時にメモリーアクセスをモニターするコードをあらかじめ計測しておく必要があります。計測機構の組み込みは、アプリケーションの

ソースコードまたはアプリケーションバイナリで行えます。このチュートリアルでは、プログラムを計測する両方のメソッドの使用方法を示します。

ソースコードを計測する

ソースコードを計測するには、特別なコンパイラオプション `-xinstrument=datarace` を使ってアプリケーションをコンパイルする必要があります。このオプションは、データの競合の検出用に生成したコードを計測するようにコンパイラに指示します。

`-xinstrument=datarace` コンパイラオプションを、プログラムのコンパイルに使用する既存のオプションセットに追加します。

注記 - `-xinstrument=datarace` を使ってプログラムをコンパイルするときには、スレッドアナライザの全機能を有効にするための追加情報を生成するため、必ず `-g` オプションも指定してください。データの競合の検出用にプログラムをコンパイルするときには、高度な最適化を指定しないでください。`-xopenmp=noopt` を使って OpenMP プログラムをコンパイルしてください。高度な最適化を使用した場合、行番号や呼び出しスタックなど、報告された情報が間違っていることがあります。

このチュートリアル用にソースコードを計測するには、次のコマンドを使用できます。

```
% cc -xinstrument=datarace -g -xopenmp=noopt -o prime_omp_inst prime_omp.c -lm

% cc -xinstrument=datarace -g -o prime_pthr_inst prime_pthr.c -lm
```

例では、バイナリが計測済みバイナリであることがわかるように、出力ファイルの末尾に `_inst` と指定されています。これは必須ではありません。

バイナリコードを計測する

ソースコードの代わりにプログラムのバイナリコードを計測するには、`discover` ツールを使用する必要があり、このツールは、Oracle Developer Studio に含まれ、`discover`(1) のマニュアルページと『Oracle Developer Studio 12.5: Discover および Uncover ユーザーズガイド』に記載されています。

チュートリアルの例では、次のコマンドを入力してコードをコンパイルします。

```
% cc -xopenmp=noopt -g -o prime_omp prime_omp.c -lm

% cc -g -O2 -o prime_pthr prime_pthr.c -lm
```

続いて、`discover` を、作成した `prime_omp` および `prime_pthr` 最適化済みバイナリで実行します。

```
% discover -i datarace -o prime_omp_disc prime_omp
```

```
% discover -i datarace -o prime_pthr_disc prime_pthr
```

これらのコマンドは計測済みバイナリ、prime_omp_disc および prime_pthr_disc を作成するので、これらのバイナリを collect で使用して、スレッドアナライザで検証する実験を作成できます。

データの競合の検出実験を作成する

-r race フラグを付けて collect コマンドを使用してプログラムを実行し、プロセスの実行中にデータ競合の検出実験を作成します。OpenMP プログラムの場合、使用されるスレッド数が 1 より大きいことを確認してください。チュートリアルの例では 4 つのスレッドが使用されます。

ソースコードを計測して作成したバイナリから実験を作成するには、次のスレッドを使用します。

```
% collect -r race -o prime_omp_inst.er prime_omp_inst

% collect -r race -o prime_pthr_inst.er prime_pthr_inst
```

discover ツールを使用して作成したバイナリから実験を作成するには、次のようにします。

```
% collect -r race -o prime_omp_disc.er prime_omp_disc

% collect -r race -o prime_pthr_disc.er prime_pthr_disc
```

データの競合を検出する可能性を高めるには、-r race フラグ付きで collect を使用して、複数のデータの競合の検出実験を作成することをお勧めします。実験ごとに異なるスレッド数と異なる入力データを使用してください。

たとえば prime_omp.c では、スレッド数は次の行で設定されます。

```
#define THREADS 4
```

この 4 を 1 より大きな他の整数 (たとえば 8) に変えると、スレッド数を変更できます。

prime_omp.c の次の行は、2 ～ 3000 の素数を検出するようにプログラムを制限します。

```
#define N 3000
```

N の値を変更して別の入力データを指定すると、プログラム作業量を増減できます。

データの競合の検出実験を検証する

スレッドアナライザ、パフォーマンスアナライザ、er_print ユーティリティーで、データ競合の検出実験を検証できます。スレッドアナライザおよびパフォーマンスアナライザはどちらも GUI イン

タフェースを表示します。スレッドアナライザはデフォルトビューの簡略セットを表示しますが、それ以外はパフォーマンスアナライザと同じです。

スレッドアナライザを使用したデータの競合実験の表示

スレッドアナライザを開始するには、次のコマンドを入力します。

```
% tha
```

スレッドアナライザをはじめて起動すると、開始画面が表示されます。

スレッドアナライザには、メニューバー、ツールバー、左側にデータビューを選択できる垂直のナビゲーションバーが表示されます。

デフォルトでは次のデータビューが表示されます。

- 「概要」画面には、ロードされた実験のメトリックの概要が表示されます。
- 「競合」ビューには、プログラム内で検出されたデータ競合と関連する呼び出しスタックトレースの一覧が表示されます。「競合」ビューである項目を選択すると、選択したデータ競合または呼び出しスタックトレースの詳細情報が「競合の詳細」ウィンドウに表示されます。
- 「デュアルソース」ビューには、選択したデータの競合の 2 つのアクセスに対応する 2 つのソースの位置が表示されます。データの競合アクセスが起きたソース行が強調表示されます。
- 「実験」ビューには、実験でのロードオブジェクトが表示され、エラーおよび警告メッセージが一覧表示されます。

「詳細ビュー」オプションメニューでほかのビューを表示できます。

er_print を使用したデータの競合実験の表示

er_print ユーティリティーは、コマンド行インタフェースを表示します。インタラクティブセッションで er_print ユーティリティーを使用して、セッション中にサブコマンドを指定します。コマンド行オプションを使用して、インタラクティブでない方法でもサブコマンドを指定できます。

次のサブコマンドは、er_print ユーティリティーで競合を調べるときに役立ちます。

- -races

  これは、実験で明らかになったデータの競合をすべて報告します。(er_print) プロンプトで races と指定するか、er_print コマンド行で -races と指定します。

- -rdetail *race_id*

  これにより、指定した *race_id* を持つデータの競合に関する詳細な情報が表示されます。(er_print) プロンプトで rdetail と指定するか、er_print コマンド行で -rdetail と

指定します。指定した *race_id* が **all** の場合、すべてのデータの競合に関する詳細情報が表示されます。それ以外では、最初のデータの競合を表す **1** などの単一の競合番号を指定します。

- -header

  これは、実験に関する記述的情報を表示し、すべてのエラーまたは警告を報告します。(er_print) プロンプトで header と指定するか、コマンド行で -header と指定します。

詳細は、collect(1)、tha(1)、analyzer(1)、および er_print(1) のマニュアルページを参照してください。

実験結果について

このセクションでは、er_print コマンド行とスレッドアナライザの両方を使用して、検出したデータの競合それぞれに関する次の情報を表示する方法について説明します。

- データの競合の一意の ID。
- データの競合に関連付けられた仮想アドレス、Vaddr。複数の仮想アドレスがある場合は、Multiple Addresses のラベルが括弧に囲まれて表示されます。
- 2 つの異なるスレッドによる仮想アドレス Vaddr へのメモリーアクセス。アクセスの種類 (読み取りまたは書き込み) のほか、関数、オフセット、およびアクセスが行われたソースコード内の行番号が表示されます。
- データの競合に関連付けられた呼び出しスタックトレースの総数。各トレースは、2 つのデータの競合アクセスが行われた時点で、スレッド呼び出しスタックの組を参照します。

  スレッドアナライザを使用している場合、「競合」ビューで個々の呼び出しスタックトレースを選択すると、2 つの呼び出しスタックが「競合の詳細」ウィンドウに表示されます。er_print ユーティリティーを使用している場合、rdetail コマンドによって 2 つの呼び出しスタックが表示されます。

prime_omp.c でのデータの競合

prime_omp.c でのデータの競合を調べるには、23 ページの「データの競合の検出実験を作成する」で作成したいずれかの実験を使用できます。

er_print で prime_omp_instr.er 実験のデータの競合情報を表示するには、次のコマンドを入力します。

```
% er_print prime_omp_inst.er
```

(er_print) プロンプトで **races** と入力すると、次のような出力が表示されます。

```
(er_print) races
```

```
Total Races:  4 Experiment:  prime_omp_inst.er

Race #1, Vaddr: 0x21850
         Access 1: Write, line 25 in "prime_omp.c",
                   is_prime
         Access 2: Read, line 22 in "prime_omp.c",
                   is_prime
 Total Callstack Traces: 1

Race #2, Vaddr: (Multiple Addresses)
         Access 1: Write, line 49 in "prime_omp.c",
                   main
         Access 2: Write, line 49 in "prime_omp.c",
                   main
 Total Callstack Traces: 1

Race #3, Vaddr: 0xffbff534
         Access 1: Write, line 50 in "prime_omp.c",
                   main
         Access 2: Read, line 49 in "prime_omp.c",
                   main
 Total Callstack Traces: 1

Race #4, Vaddr: 0xffbff534
         Access 1: Write, line 50 in "prime_omp.c",
                   main
         Access 2: Write, line 50 in "prime_omp.c",
                   main
Total Callstack Traces: 1
(er_print)
```

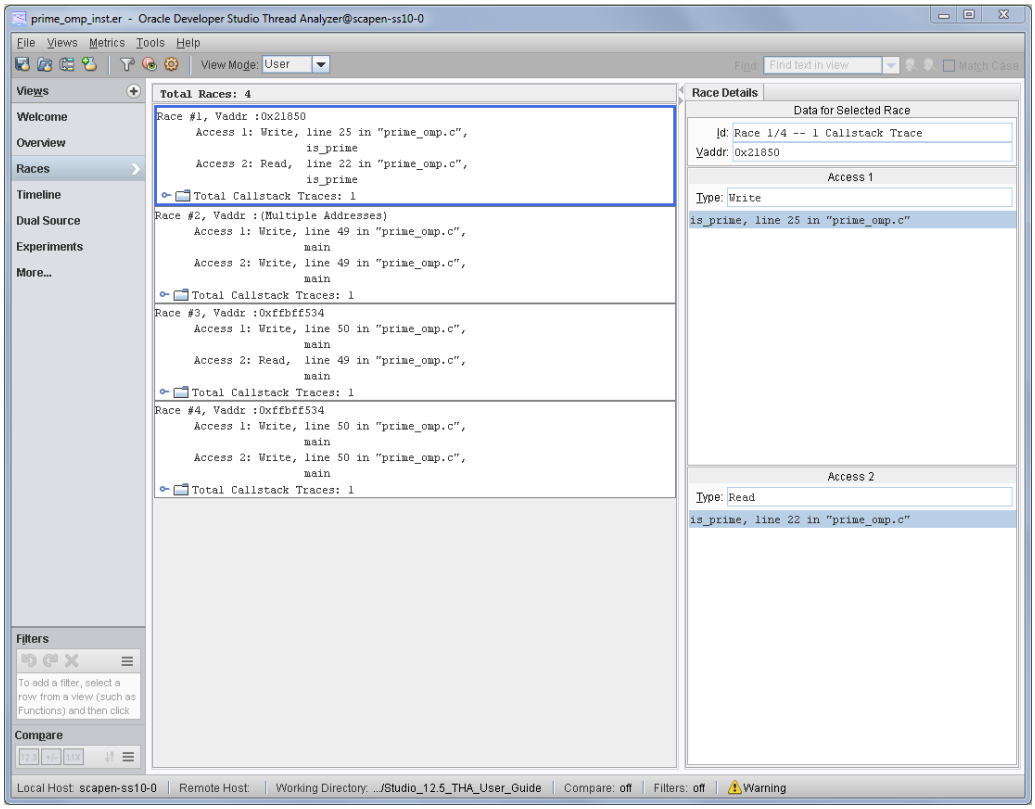
この特定のプログラム実行中に、4 つのデータの競合が生じました。

スレッドアナライザで `prime_omp_inst.er` 実験結果を開くには、次のコマンドを入力します。

```
% tha prime_omp_inst.er
```

次のスクリーンショットには、スレッドアナライザに表示された、`prime_omp.c` で検出された競合が示されています。

図 1 prime_omp.c で検出されたデータの競合



prime_omp.c には、次の 4 つのデータの競合が示されています。

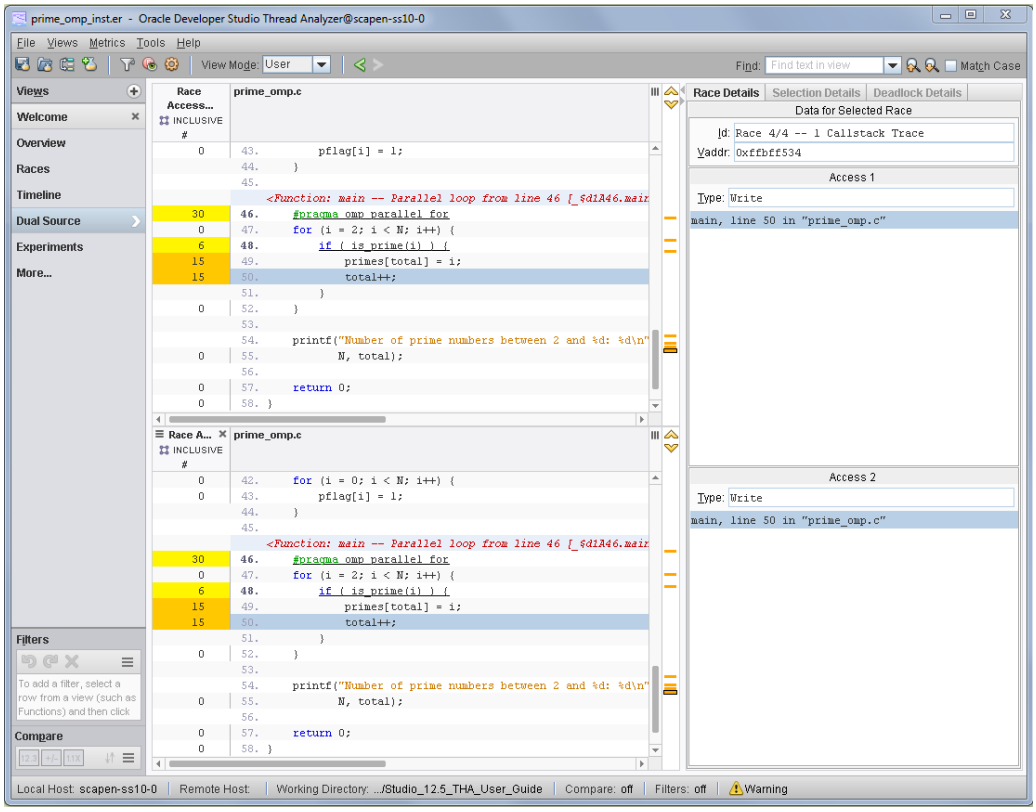
- Race #1 は、行 25 での関数 is_prime() の書き込みと、行 22 での同じ関数の読み取りとの競合を示しています。ソースコードを見ると、これらの行で pflag[ ] 配列がアクセスされていることがわかります。スレッドアナライザで「デュアルソース」ビューをクリックすると、両方の行番号でのソースコードとともに、コードの影響を受けた行での競合アクセス数を示すメトリックを簡単に確認できます。
- Race #2 は、main 関数の行 49 での 2 つの書き込み間の競合を示しています。「デュアルソース」ビューをクリックすると、primes [ ] 配列の要素へのアクセスが行 49 で複数回試みられたことがわかります。Race #2 は、配列 primes[ ] の異なる要素で発生したデータ競合のグループを表しています。これは、Multiple Addresses と指定された Vaddr で示されます。
- Race #3 は、行 50 での main 関数の書き込みと、行 49 での同じ関数の読み取りとの競合です。ソースコードを見ると、これらの行で変数 total がアクセスされていることがわかります。

- Race #4 は、main 関数内の行 50 での 2 つの書き込み間の競合を示しています。ソースコードを見ると、これらの行で変数 total が更新されていることがわかります。

  スレッドアナライザの「デュアルソース」ビューでは、データの競合に関連付けられた 2 つのソース位置を同時に確認できます。たとえば、「競合」ビューで prime_omp.c の Race #1 を選択してから、「デュアルソース」ビューをクリックします。次のように表示されます。

スレッドアナライザの「デュアルソース」ビューでは、データの競合に関連付けられた 2 つのソース位置を同時に確認できます。たとえば、「競合」ビューで prime_pthr.c の Race #3 を選択してから、「デュアルソース」ビューをクリックします。次のように表示されます。

図 2 prime_omp.c で検出されたデータの競合のソースコード



prime_pthr.c でのデータの競合

prime_pthr.c でのデータの競合を調べるには、23 ページの「データの競合の検出実験を作成する」で作成したいずれかの実験を使用できます。

er_print で prime_pthr_instr.er 実験のデータの競合情報を表示するには、次のコマンドを入力します。

```
% er_print prime_pthr_inst.er
```

(er_print) プロンプトで **races** と入力すると、次のような出力が表示されます。

```
(er_print) races

Total Races:  5 Experiment:  prime_pthr_inst.er

Race #1, Vaddr: (Multiple Addresses)
Access 1: Write, line 26 in "prime_pthr.c",
          is_prime + 0x00000234
Access 2: Write, line 26 in "prime_pthr.c",
          is_prime + 0x00000234
Total Callstack Traces: 2

Race #2, Vaddr: 0xffbff6dc
Access 1: Write, line 59 in "prime_pthr.c",
          main + 0x00000208
Access 2: Read, line 39 in "prime_pthr.c",
          work + 0x00000070
Total Callstack Traces: 1

Race #3, Vaddr: 0x21620
Access 1: Write, line 44 in "prime_pthr.c",
          work + 0x000001C0
Access 2: Read, line 43 in "prime_pthr.c",
          work + 0x0000011C
Total Callstack Traces: 2

Race #4, Vaddr: 0x21620
Access 1: Write, line 44 in "prime_pthr.c",
          work + 0x000001C0
Access 2: Write, line 44 in "prime_pthr.c",
          work + 0x000001C0
Total Callstack Traces: 2

Race #5, Vaddr: (Multiple Addresses)
Access 1: Write, line 43 in "prime_pthr.c",
          work + 0x00000174
Access 2: Write, line 43 in "prime_pthr.c",
          work + 0x00000174
Total Callstack Traces: 2
(er_print)
```

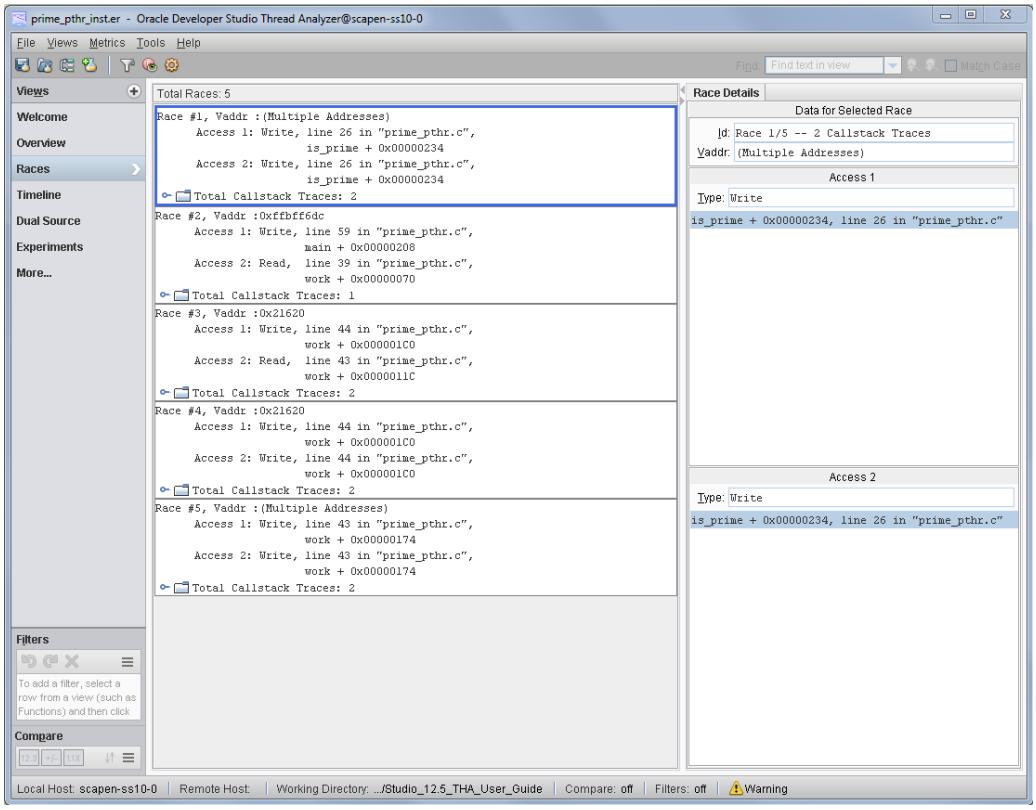
この特定のプログラム実行中に、5 つのデータの競合が生じました。

スレッドアナライザで prime_pthr_inst.er 実験結果を開くには、次のコマンドを入力します。

```
% tha prime_pthr_inst.er
```

次のスクリーンショットには、スレッドアナライザに表示された、prime_pthr.c で検出された競合が示されています。er_print で示された競合と同じであることに注意してください。

図 3 prime_pthr.c で検出されたデータの競合



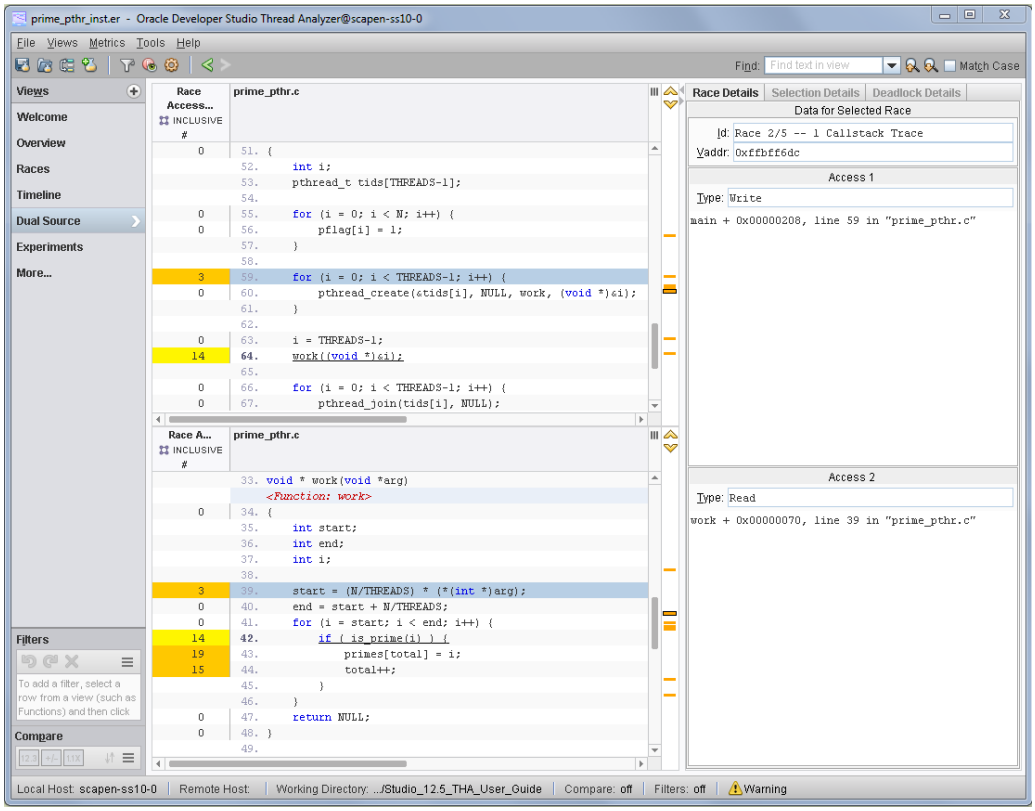
prime_pthr.c には、次の 5 つのデータの競合が示されています。

- Race #1 は、行 26 で発生した、関数 is_prime() での pflag[ ] 配列の要素への 2 つの書き込みの間のデータ競合です。
- Race #2 は、行 59 での main() における i というメモリー位置への書き込みと、行 39 での work() における *arg という同じメモリー位置の読み取りとのデータの競合です。
- Race #3 は、行 44 での total への書き込みと、行 43 での total の読み取りとの間のデータ競合です。

- Race #4 は、行 44 での total への書き込みと、同じ行での total への別の書き込みとのデータの競合です。
- Race #5 は、main() 関数内の行 43 での 2 つの書き込み間のデータ競合です。Race #5 は、配列 primes[ ] の異なる要素で生じたデータの競合のグループを表します。これは、Multiple Addresses と指定された Vaddr で示されます。

Race #3 を選択したあとに「デュアルソース」ビューをクリックした場合、次のスクリーンショットのように、2 つのソース位置が表示されます。

図 4 データの競合のソースコード詳細

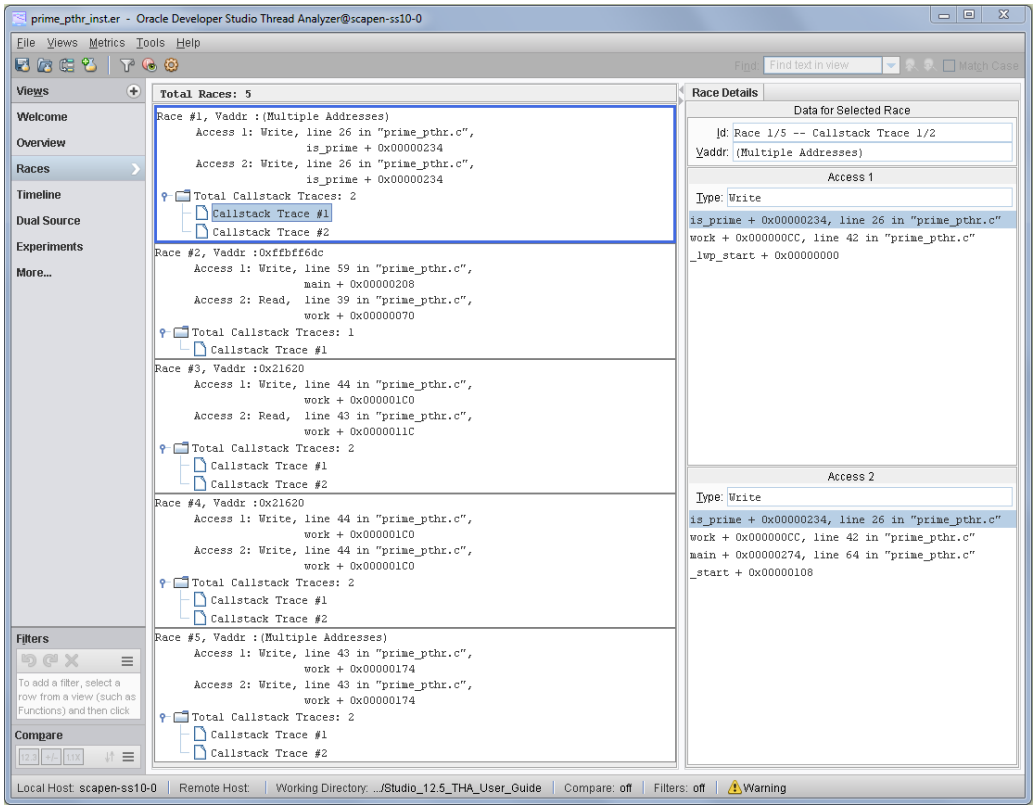


Race #2 の最初のアクセスは行 59 で行われ、上部のパネルに表示されます。2 番目のアクセスは行 39 で行われ、下部のパネルに表示されます。ソースコードの左側に「競合アクセス」メトリックが強調表示されます。このメトリックは、その行でデータの競合アクセスが報告された回数を示します。

データの競合の呼び出しスタックトレース

スレッドアナライザの「競合」ビューで一覧表示されたデータの競合ごとに、1 つまたは複数の呼び出しスタックトレースが関連付けられています。呼び出しスタックは、データの競合を招く、コード内の実行パスを表示します。呼び出しスタックトレースをクリックすると、右パネルの「競合の詳細」ウィンドウに、データの競合を引き起こした関数呼び出しが表示されます。

図 5 `prime_omp.c` の呼び出しスタックトレースを示した「競合」ビュー



データの競合の原因の診断

このセクションでは、データの競合の原因を診断する基本的な方法について説明します。

データの競合が誤検知であるかどうかをチェックする

誤検知のデータの競合は、スレッドアナライザで報告されるが、実際には起こっていないデータの競合です。つまり、「誤検出」です。スレッドアナライザは、報告する誤検知の数を減らそうと試みます。ただし、ツールが正確なジョブを行えずに、誤検知のデータの競合を報告する場合があります。

誤検知のデータの競合は本当のデータの競合ではなく、したがってプログラムの動作に影響しないので、このデータの競合は無視できます。

誤検知のデータの競合の例については、36 ページの「誤検知」を参照してください。レポートから誤検知のデータの競合を削除する方法については、71 ページの「スレッドアナライザ ユーザー API」を参照してください。

データの競合が影響のないものであるかどうかを確認する

影響のないデータの競合は、存在していてもプログラムの正確さには影響しない意図的なデータの競合です。

一部のマルチスレッドアプリケーションでは、データの競合を引き起こすコードを意図的に使用します。設計によってデータの競合が存在するので、修正は必要ありません。ただし、場合によっては、このようなコードを正しく実行させるには非常に慎重を要します。これらのデータの競合については注意深く調べてください。

影響のない競合については、36 ページの「誤検知」を参照してください。

データの競合ではなくバグを修正する

スレッドアナライザは、プログラム内でデータの競合を見つけるときに役立ちますが、プログラム内のバグを自動的に見つけることも、見つかったデータの競合の修正方法を提示することもできません。データの競合は、バグによって生じることもあります。バグを見つけて修正することが重要です。単にデータの競合を取り除くだけでは正しいアプローチにはならず、以降のデバッグがさらに困難になる可能性があります。

`prime_omp.c` でのバグの修正

このセクションでは、`prime_omp.c` でのバグを修正する方法について説明します。完全なファイルのリストについては、「18 ページの「`prime_omp.c` のソースコード」」を参照してください。

配列 primes[ ] の要素でのデータの競合を削除するために、行 49 および 50 を critical セクションに移します。

```
46      #pragma omp parallel for
47      for (i = 2; i < N; i++) {
48        if ( is_prime(i) ) {
             #pragma omp critical
            {
49             primes[total] = i;
50             total++;
               }
51           }
52      }
```

また、次のように行 49 および 50 を 2 つの critical セクションに移すこともできますが、この変更ではプログラムを修正できません。

```
46      #pragma omp parallel fo
47      for (i = 2; i < N; i++) {
48          if ( is_prime (i) ) {
                #pragma omp critical
                {
49                 primes [total] = i;
                }
                #pragma omp critical
                {
50                 total++;
                }
51          }
52     }
```

スレッドは、排他的ロックを使用して primes[ ] 配列へのアクセスを制御しているので、行 49 および 50 の critical セクションによってデータの競合が取り除かれます。ただし、プログラムはまだ正しくありません。2 つのスレッドは、同じ total 値を使用して primes[ ] の同じ要素を更新する可能性があり、primes[ ] の要素の中には、値がまったく割り当てられないものが生じる可能性があります。

行 22 での pflag[ ] からの読み取りと、行 25 での pflag[ ] への書き込みとの 2 番目のデータの競合は間違った結果を招かないので、実際には影響のない競合です。影響のないデータの競合の修正は必須ではありません。

prime_pthr.c でのバグの修正

このセクションでは、prime_pthr.c でのバグを修正する方法について説明します。完全なファイルのリストについては、19 ページの「prime_pthr.c のソースコード」を参照してください。

行 50 での prime[ ] のデータ競合と行 44 での total のデータ競合を取り除くには、これら 2 つの行の前後に相互排他ロック/ロック解除を追加することで、一度に prime[ ] や total を更新できるスレッドが 1 つだけになるようにします。

行 59 での i への書き込みと、行 39 での (*arg という) 同じメモリー位置の読み取りとのデータの競合では、別々のスレッドによる変数 i への共有アクセスに問題があることがわかります。prime_pthr.c の初期スレッドは、行 59-61 でループの子スレッドを作成し、関数 work() を実行するようにこれらをディスパッチします。ループ インデックス i は、アドレスで work() に渡されます。すべてのスレッドは i に対して同じメモリー位置にアクセスするので、各スレッドの i の値は一意のままではありませんが、初期スレッドがループ インデックスを増やすたびに変化します。別々のスレッドが同じ i の値を使用するので、データの競合が起こります。問題を修正する 1 つの方法は、i をアドレスではなく値で work() に渡すことです。

次のコードは、修正されたバージョンの prime_pthr.c です。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <stdio.h>
 6 #include <math.h>
 7 #include <pthread.h>
 8
 9 #define THREADS 4
10 #define N 10000
11
12 int primes[N];
13 int pflag[N];
14 int total = 0;
15 pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
16
17 int is_prime(int v)
18 {
19     int i;
20     int bound = floor(sqrt(v)) + 1;
21
22     for (i = 2; i < bound; i++) {
23         /* no need to check against known composites */
24         if (!pflag[i])
25             continue;
26         if (v % i == 0) {
27             pflag[v] = 0;
28             return 0;
29         }
30     }
31     return (v > 1);
32 }
33
34 void * work(void *arg)
35 {
36     int start;
37     int end;
38     int i;
39
40     start = (N/THREADS) * ((int)arg) ;
41     end = start + N/THREADS;
42     for (i = start; i < end; i++) {
```

```
43          if ( is_prime(i) ) {
44              pthread_mutex_lock(&mutex);
45              primes[total] = i;
46              total++;
47              pthread_mutex_unlock(&mutex);
48          }
49      }
50      return NULL;
51  }
52
53  int main(int argn, char **argv)
54  {
55      int i;
56      pthread_t tids[THREADS-1];
57
58      for (i = 0; i < N; i++) {
59          pflag[i] = 1;
60      }
61
62      for (i = 0; i < THREADS-1; i++) {
63          pthread_create(&tids[i], NULL, work, (void *)i);
64      }
65
66      i = THREADS-1;
67      work((void *)i);
68
69      for (i = 0; i < THREADS-1; i++) {
70          pthread_join(tids[i], NULL);
71      }
72
73      printf("Number of prime numbers between 2 and %d: %d\n",
74             N, total);
75
76      return 0;
77  }
```

誤検知

スレッドアナライザは、実際にはプログラム内で生じていないデータの競合を報告する場合があります。これらは誤検知と呼ばれます。ほとんどの場合、誤検知は、ユーザー定義の同期によって、またはさまざまなスレッドでリサイクルされるメモリーによって引き起こされます。詳しくは、36 ページの「ユーザー定義の同期」および38 ページの「さまざまなスレッドでリサイクルされるメモリー」を参照してください。

ユーザー定義の同期

スレッドアナライザは、OpenMP、POSIX スレッド、および Oracle Solaris スレッドで提供されるほとんどの標準同期 API と構文を認識できます。ただし、ツールはユーザー定義の同期を

認識できず、このような同期がコードに含まれる場合、誤検知のデータの競合を報告することがあります。

注記 - このような誤検知のデータの競合を報告しないようにするために、スレッドアナライザでは、ユーザー定義の同期が実行されたときにツールに通知するために使用できる一連の API を使用できます。詳しくは、71 ページの「スレッドアナライザユーザー API」を参照してください。

なぜ API を使用する必要があるかを説明するため、次のように考えてみましょう。スレッドアナライザは、CAS 命令を使用したロックの実装、ビジー待機を使用した送信および待機操作などを認識できません。次に、プログラムが POSIX スレッド状態変数の一般的な使用法を採用した、誤検知のクラスの一般的な例を示します。

```
/* Initially ready_flag is 0 */

/* Thread 1: Producer */
100   data = ...
101   pthread_mutex_lock (&mutex);
102   ready_flag = 1;
103   pthread_cond_signal (&cond);
104   pthread_mutex_unlock (&mutex);
...
/* Thread 2: Consumer */
200   pthread_mutex_lock (&mutex);
201   while (!ready_flag) {
202       pthread_cond_wait (&cond, &mutex);
203   }
204   pthread_mutex_unlock (&mutex);
205   ... = data;
```

`pthread_cond_wait()` 呼び出しは、通常、プログラムエラーと疑わしいウェイクアップから保護するために述語をテストするループ内で行われます。述語のテストおよび設定は、多くの場合、相互排他ロックによって保護されます。前述のコードでは、スレッド 1 は行 100 で変数 `data` の値を生成し、行 102 で `ready_flag` の値を 1 に設定してデータが生成されていることを示し、続いて `pthread_cond_signal()` を呼び出して、消費者スレッドであるスレッド 2 を呼び起こします。スレッド 2 はループ内の述語 (`!ready_flag`) をテストします。フラグが設定されていることを検出すると、行 205 でデータを消費します。

行 102 での `ready_flag` の書き込みと行 201 での `ready_flag` の読み取りは、同じ相互排他ロックで保護されているため、2 つのアクセス間にデータの競合はなく、ツールが正しく認識します。

行 100 での `data` の書き込みと、行 205 での `data` の読み取りは、相互排他ロックによって保護されません。ただし、プログラムロジックでは、フラグ変数 `ready_flag` のために行 205 での読み取りは常に、行 100 での書き込み後に行われます。この結果、データへのこれら 2 つのアクセス間にデータの競合は生じません。ただし、`pthread_cond_wait()` の呼び出し (行 202) が実際には実行時に呼び出されない場合、ツールは、2 つのアクセス間でデータの競合があると報告します。行 201 が実行される前に行 102 が実行された場合は、行

201 が実行されると、ループエントリテストは失敗し、行 202 はスキップされます。ツールは `pthread_cond_signal()` 呼び出しおよび `pthread_cond_wait()` 呼び出しをモニターし、それらを組み合わせて同期を派生できます。行 202 で `pthread_cond_wait()` が呼び出されない場合、行 100 での書き込みが常に行 205 の読み取り前に実行されることがツールにはわかりません。したがって、これらが同時に実行されていると見なし、これらの間でデータの競合が生じていると報告します。

`libtha`(3C) のマニュアルページと71 ページの「スレッドアナライザユーザー API」では、API を使用して、このような誤検知のデータの競合を報告しないようにする方法について説明しています。

さまざまなスレッドでリサイクルされるメモリー

一部のメモリー管理ルーチンは、あるスレッドが別のスレッドで使用できるように解放したメモリーをリサイクルします。スレッドアナライザは、別々のスレッドが使用する同じメモリー位置の寿命が重複していないことを認識できない場合があります。これが起きたときに、ツールは誤検知のデータの競合を報告することがあります。次の例は、この種の誤検知を示しています。

```
/*----------*/                    /*----------*/
/* Thread 1 */                    /* Thread 2 */
/*----------*/                    /*----------*/
 ptr1 = mymalloc(sizeof(data_t));
 ptr1->data = ...
 ...
 myfree(ptr1);

                                  ptr2 = mymalloc(sizeof(data_t));
                                  ptr2->data = ...
                                  ...
                                  myfree(ptr2);
```

スレッド 1 とスレッド 2 は同時に実行します。各スレッドは、プライベートメモリーに使用されるメモリーのチャンクを割り当てます。ルーチン `mymalloc()` は、`myfree()` の以前の呼び出しによって解放されたメモリーを提供できます。スレッド 1 が `myfree()` を呼び出す前に、スレッド 2 が `mymalloc()` を呼び出す場合、`ptr1` と `ptr2` は別々の値を取り、2 つのスレッド間でデータの競合は生じません。ただし、スレッド 1 が `myfree ()` を呼び出したあとにスレッド 2 が `mymalloc()` を呼び出した場合、`ptr1` と `ptr2` が同じ値を取ることがあります。スレッド 1 はこのメモリーにアクセスできなくなるので、データの競合は生じません。ただし、`mymalloc()` がメモリーをリサイクルしていることがわかっていない場合、ツールは、`ptr1` データの書き込みと `ptr2` データの書き込みとのデータの競合を報告します。この種の誤検知は、多くの場合、C++ アプリケーションで、C++ 実行時ライブラリがメモリーを一時変数用にリサイクルするときに起こりますまたしばしば、独自のメモリー管理ルーチンを実装したユーザーアプリケーションでも起こります。現在、スレッドアナライザは、標準の `malloc()`、`calloc()`、および `realloc()` インタフェースで実行されたメモリー割り当ておよび解放操作を認識できます。

影響のないデータの競合

マルチスレッドアプリケーションの中には、パフォーマンスを高めるためにデータの競合を意図的に許可する場合があります。影響のないデータの競合は、存在していてもプログラムの正確さには影響しない意図的なデータの競合です。次の例は、影響のないデータの競合を示します。

注記 - 影響のないデータの競合以外でも、大きなクラスのアプリケーションでは、正しく設計するのが困難なロックフリーおよびウェイトフリーアルゴリズムを使用しているので、データの競合を許可します。スレッドアナライザは、これらのアプリケーションでのデータの競合の位置を特定する場合に役立ちます。

素数検索用のプログラム

prime_omp.c 内のスレッドは、関数 is_prime() を実行することによって、整数が素数かどうかをチェックします。

```
15  int is_prime(int v)
16  {
17      int i;
18      int bound = floor(sqrt(v)) + 1;
19
20      for (i = 2; i < bound; i++) {
21          /* no need to check against known         composites
*/
22          if (!pflag[i])
23              continue;
24          if (v % i == 0) {
25              pflag[v] = 0;
26              return 0;
27          }
28      }
29      return (v > 1);
30  }
```

スレッドアナライザは、行 25 での pflag[ ] への書き込みと行 22 での pflag[ ] の読み取りとの間にデータの競合があることを報告します。ただし、このデータの競合は、最終的な結果の正確さには影響しないので影響のないものです。22 行で、スレッドは、所与の i の値で、pflag[i] が 0 に等しいかどうかをチェックします。pflag[i] が 0 に等しい場合、i が既知の合成数である (つまり、i は素数でないとわかっている) ことを意味します。この結果、v が i で割り切れるかどうかをチェックする必要がなくなります。v がいずれかの素数で割り切れるかどうかだけをチェックすればよくなります。したがって、pflag[i] が 0 に等しい場合、スレッドは i の次の値に進みます。pflag[i] が 0 に等しくなく、v が i で割り切れる場合、スレッドは 0 を pflag[v] に割り当てて、v が素数でないことを示します。

正確さの観点からは、複数のスレッドが同じ pflag[ ] 要素をチェックし、同時にそれに書き込むかどうかは重要ではありません。pflag[ ] 要素の初期値は 1 です。スレッドはこの要素

を更新するときに、0 の値を割り当てます。つまり、スレッドはその要素に対してメモリーの同じバイトの同じビットに 0 を格納します。現在のアーキテクチャーでは、このような格納は不可分であると想定することが安全です。つまり、その要素がスレッドによって読み取られるときに、読み取られる値は 1 か 0 のどちらかになります。スレッドは、0 の値を割り当てる前に所定の pflag[ ]要素をチェックする場合 (行 22)、行 24 から 26 を実行します。その間に別のスレッドがその同じ pflag[ ] 要素 (行 25) に 0 を割り当てた場合も、最終結果は変化しません。これは、基本的に、最初のスレッドが不必要に行 24 ～ 26 を実行したが、最終結果は同じであったことを意味します。

配列値の型を検証するプログラム

スレッドのグループが check_bad_array() を同時に呼び出して、配列 data_array の要素が「間違っている」かどうかをチェックします。各スレッドは配列の異なるセクションをチェックします。スレッドは、要素が間違っていることを検出した場合、グローバル共有変数 is_bad の値を true に設定します。

```
20  volatile int is_bad = 0;
 ...

100  /*
101   * Each thread checks its assigned portion of data_array, and sets
102   * the global flag is_bad to 1 once it finds a bad data element.
103   */
104  void check_bad_array(volatile data_t *data_array, unsigned int thread_id)
105  {
106     int i;
107     for (i=my_start(thread_id); i<my_end(thread_id); i++) {
108          if (is_bad)
109              return;
110          else {
111              if (is_bad_element(data_array[i])) {
112                  is_bad = 1;
113                  return;
114              }
115          }
116     }
117  }
```

行 108 での is_bad の読み取りと行 112 での is_bad への書き込みとの間にデータの競合があります。ただし、データの競合は最終結果の正確さに影響しません。

is_bad の初期値は 0 です。スレッドは is_bad を更新するときに、値 1 を割り当てます。つまり、スレッドは、is_bad に対してメモリーの同じバイトの同じビットに 1 を格納します。現在のアーキテクチャーでは、このような格納は不可分であると想定することが安全です。したがって、is_bad がスレッドで読み取られるときに、読み取られる値は 0 か 1 のどちらかになります。スレッドは、値 1 が割り当てられる前に is_bad をチェックする場合 (行 108)、for ループの実行を継続します。その間に別のスレッドが値 1 を is_bad に割り当てても (行 112)、最終結果は変化しません。スレッドが for ループを必要以上長時間実行したというだけのことです。

二重検査されたロックを使用したプログラム

シングルトンは、特定の種類のオブジェクトが、プログラム全体で 1 つしか存在しないようにします。二重検査されたロックは、マルチスレッドアプリケーションでシングルトンを初期化する一般的で効率的な方法です。次のコードは、この実装方法を示します。

```
100 class Singleton {
101     public:
102     static Singleton* instance();
103     ...
104     private:
105     static Singleton* ptr_instance;
106 };
107
108 Singleton* Singleton::ptr_instance = 0;
...

200 Singleton* Singleton::instance() {
201     Singleton *tmp;
202     if (ptr_instance == 0) {
203         Lock();
204         if (ptr_instance == 0) {
205             tmp = new Singleton;
206
207             /* Make sure that all writes used to construct new
208                Singleton have been completed. */
209             memory_barrier();
210
211             /* Update ptr_instance to point to new Singleton. */
212             ptr_instance = tmp;
213
214         }
215         Unlock();
216     }
217     return ptr_instance;
```

行 202 の `ptr_instance` の読み取りは、ロックによって意図的に保護されていません。このため、マルチスレッド環境で `Singleton` がすでにインスタンス化されているかどうかを判別するチェックが効率的になります。変数 `ptr_instance` の行 202 での読み取りと行 212 での書き込みとの間でデータの競合があるが、プログラムは正しく動作することに注意してください。ただし、データの競合を許可する正しいプログラムを作成すると、余分な注意が必要になります。たとえば、上記の二重検査されたロックのコードで、行 209 での `memory_barrier()` の呼び出しは、`Singleton` を構築するためのすべての書き込みが完了するまで、`ptr_instance` がスレッドによって非 NULL として認識されないようにするために使用されます。

♦ ♦ ♦ 第 3 章

3 デッドロックのチュートリアル

このチュートリアルでは、スレッドアナライザを使用して、マルチスレッドプログラム内の潜在的デッドロックおよび実デッドロックを検出する方法について説明します。

チュートリアルでは次のトピックを扱います。

デッドロックについて

*デッドロック*という用語は、2 つ以上のスレッドが互いを待機しているために処理がどこへも進まない状況を意味します。デッドロックの原因は、間違ったプログラムロジックや (ロックやバリアーなどの) 同期の不適切な使用など数多くあります。このチュートリアルでは、*相互排他ロック*の不適切な使用によって生じたデッドロックに焦点を当てます。この種のデッドロックは、マルチスレッドアプリケーションでよく生じます。

2 つ以上のスレッドを含むプロセスが次の 3 つの条件に当てはまるときに、デッドロックが発生する可能性があります。

- すでにロックを保持しているスレッドが新しいロックを要求する
- 新しいロックの要求が同時に行われる
- チェーン内の次のスレッドで保持されているロックを各スレッドが待機するという巡回チェーンを、2 つ以上のスレッドが形成する

デッドロック状況の簡単な例を次に示します。

- スレッド 1 はロック A を保持し、ロック B を要求する
- スレッド 2 はロック B を保持し、ロック A を要求する

デッドロックには、*潜在的*デッドロックと*実*デッドロックの 2 つの種類があり、次のような違いがあります。

- 潜在的デッドロックは、所定の実行で必ず起きるわけではありませんが、スレッドのスケジュールや、スレッドによって要求されたロックのタイミングに依存したプログラムの実行で起きる可能性があります。
- 実デッドロックは、プログラムの実行中に発生するものです。実デッドロックでは、関係するスレッドの実行がハングアップしますが、プロセス全体の実行がハングアップする可能性もあります。

デッドロックチュートリアルのソースファイルの入手

このチュートリアルで使用するソースファイルは、Oracle Developer Studio 開発者ポータルのダウンロードエリア (http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/solarisstudio/downloads/index.html)からダウンロードできます。

サンプルファイルをダウンロードして展開したあと、OracleDeveloperStudio12.5-Samples/ThreadAnalyzer ディレクトリからサンプルを見つけることができます。サンプルは din_philo サブディレクトリにあります。din_philo ディレクトリには、手順に関する DEMO ファイルと Makefile ファイルが 1 つずつありますが、このチュートリアルではそれらの手順に従わず、Makefile も使用しません。代わりに、コマンドを個別に実行していきます。

このチュートリアルに従うには、OracleDeveloperStudio12.5-Samples/ThreadAnalyzer/din_philo ディレクトリから din_philo.c ファイルを別のディレクトリにコピーするか、個々にファイルを作成し、次のコードリストからコードをコピーしてください。

食事する哲学者の問題をシミュレートする din_philo.c サンプルプログラムは、POSIX スレッドを使用する C プログラムです。このプログラムでは、潜在的デッドロックと実デッドロックの両方が示されます。

din_philo.c のソースコードリスト

din_philo.c のソースコードは次に示すとおりです。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <pthread.h>
 6 #include <stdio.h>
 7 #include <unistd.h>
 8 #include <stdlib.h>
 9 #include <errno.h>
10 #include <assert.h>
11
12 #define PHILOS 5
13 #define DELAY 5000
14 #define FOOD 100
```

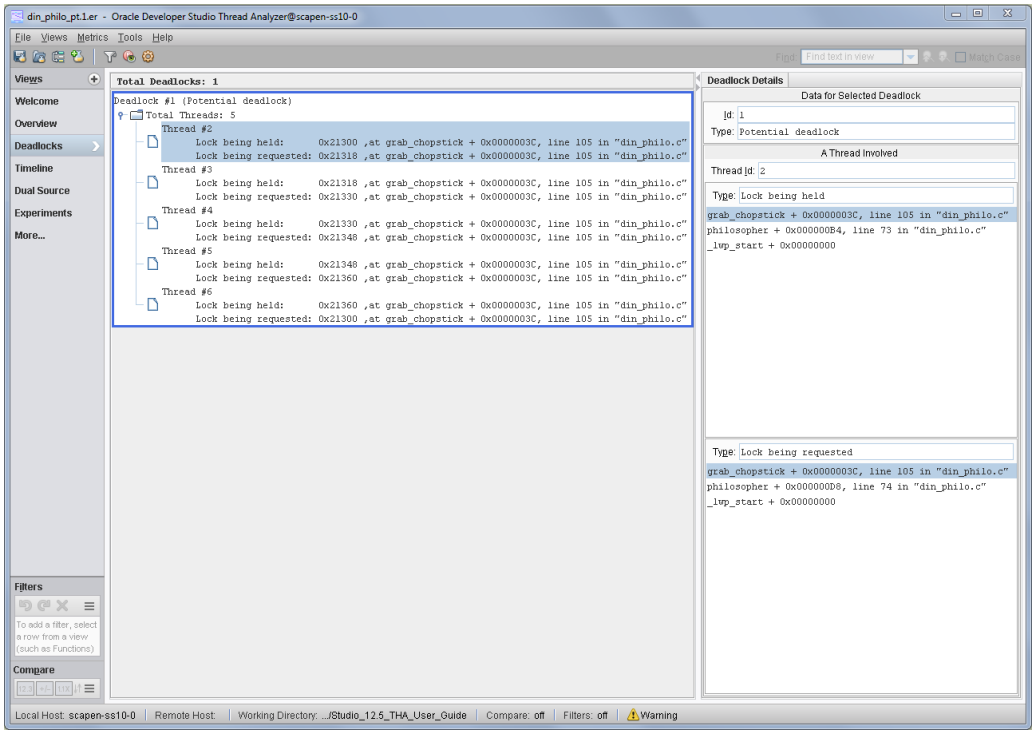
```
15
16 void *philosopher (void *id);
17 void grab_chopstick (int,
18                       int,
19                       char *);
20 void down_chopsticks (int,
21                        int);
22 int food_on_table ();
23
24 pthread_mutex_t chopstick[PHILOS];
25 pthread_t philo[PHILOS];
26 pthread_mutex_t food_lock;
27 int sleep_seconds = 0;
28
29
30 int
31 main (int argn,
32       char **argv)
33 {
34     int i;
35
36     if (argn == 2)
37         sleep_seconds = atoi (argv[1]);
38
39     pthread_mutex_init (&food_lock, NULL);
40     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
41         pthread_mutex_init (&chopstick[i], NULL);
42     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
43         pthread_create (&philo[i], NULL, philosopher, (void *)i);
44     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
45         pthread_join (philo[i], NULL);
46     return 0;
47 }
48
49 void *
50 philosopher (void *num)
51 {
52     int id;
53     int i, left_chopstick, right_chopstick, f;
54
55     id = (int)num;
56     printf ("Philosopher %d is done thinking and now ready to eat.\n", id);
57     right_chopstick = id;
58     left_chopstick = id + 1;
59
60     /* Wrap around the chopsticks. */
61     if (left_chopstick == PHILOS)
62         left_chopstick = 0;
63
64     while (f = food_on_table ()) {
65
66         /* Thanks to philosophers #1 who would like to take a nap
67          * before picking up the chopsticks, the other philosophers
68          * may be able to eat their dishes and not deadlock.
```

```
 69          */
 70         if (id == 1)
 71             sleep (sleep_seconds);
 72
 73         grab_chopstick (id, right_chopstick, "right ");
 74         grab_chopstick (id, left_chopstick, "left");
 75
 76         printf ("Philosopher %d: eating.\n", id);
 77         usleep (DELAY * (FOOD - f + 1));
 78         down_chopsticks (left_chopstick, right_chopstick);
 79     }
 80
 81     printf ("Philosopher %d is done eating.\n", id);
 82     return (NULL);
 83 }
 84
 85 int
 86 food_on_table ()
 87 {
 88     static int food = FOOD;
 89     int myfood;
 90
 91     pthread_mutex_lock (&food_lock);
 92     if (food > 0) {
 93         food--;
 94     }
 95     myfood = food;
 96     pthread_mutex_unlock (&food_lock);
 97     return myfood;
 98 }
 99
100 void
101 grab_chopstick (int phil,
102                 int c,
103                 char *hand)
104 {
105     pthread_mutex_lock (&chopstick[c]);
106     printf ("Philosopher %d: got %s chopstick %d\n", phil, hand, c);
107 }
108
109 void
110 down_chopsticks (int c1,
111                  int c2)
112 {
113     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c1]);
114     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c2]);
115 }
```

食事する哲学者の問題

食事する哲学者とは、昔からよく使われてきたシナリオで、仕組みは次のとおりです。0 から 4 の番号が付けられた 5 人の哲学者が、考えながら円卓に座っています。やがて、個々の哲学者は空腹になり食事しようと考えます。テーブルには麺を乗せた大皿がありますが、各哲学者は使用できる箸を 1 本しか持っていません。食事するには、箸を共有する必要があります。各哲学者の (テーブルに向かって) 右側の箸には、その哲学者と同じ番号が付けられています。

図 6 食事する哲学者



各哲学者は最初に、自分の番号の付いた自身の箸に手を伸ばします。哲学者は、自身に割り当てられた箸を手にすると、隣の哲学者に割り当てられた箸に手を伸ばします。両方の箸を手にすると、食事できます。食事が終わると、箸をテーブルの元の位置に、左右に 1 本ずつ戻します。このプロセスは、麺がなくなるまで繰り返されます。

哲学者がデッドロックに陥るしくみ

デッドロックが実際に起こるのは、哲学者全員が自身の箸を手に持ち、隣の哲学者の箸が使用できるようになるのを待機している、次のような状況です。

- 哲学者 0 は箸 0 を手に持って箸 1 を待機している
- 哲学者 1 は箸 1 を手に持って箸 2 を待機している
- 哲学者 2 は箸 2 を手に持って箸 3 を待機している
- 哲学者 3 は箸 3 を手に持って箸 4 を待機している
- 哲学者 4 は箸 4 を手に持って箸 0 を待機している

この状況では誰も食事できず、哲学者たちはデッドロック状態に陥ります。プログラムを何度も実行するとわかります。つまりこのプログラムは、ハングアップすることもあれば、最後まで実行できることもあるのです。次の実行例は、このプログラムがハングアップする様子を示しています。

```
prompt% cc din_philo.c
prompt% a.out
Philosopher 0 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 4 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 2: eating.
Philosopher 3 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 1 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 1: got right  chopstick 1
(hang)

Execution terminated by pressing CTRL-C
```

哲学者 1 の休眠時間の導入

デッドロックを回避する 1 つの方法は、哲学者 1 が自分の箸に手を伸ばす前に待機するというものです。コードの観点からは、自分の箸に手を伸ばす前に、指定した時間 (`sleep_seconds`)、哲学者 1 を休眠状態にすることができます。十分休眠した場合、プログラムは実デッドロックなしに終了できます。実行可能ファイルに対する引数として休眠する秒数を指定できます。引数を指定しない場合、哲学者は休眠しません。

次の擬似コードは各哲学者のロジックを示します。

```
  while (there is still food on the table)
     {
       if (sleep argument is specified and I am philosopher #1)
          {
            sleep specified amount of time
          }

       grab right chopstick
       grab left chopstick
       eat some food
       put down left chopstick
       put down right chopstick
     }
```

次のリストは、哲学者 1 が自分の箸に手を伸ばすまでに 30 秒間待機するようにしたプログラムを 1 回実行した様子を示しています。プログラムの実行は完了し、5 人の哲学者全員が食事し終わります。

```
% a.out 30
Philosopher 0 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 4 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 3 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 0: eating.
Philosopher 2 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 1 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
```

```
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
...
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0 is done eating.
Philosopher 4: got left chopstick 0
Philosopher 4: eating.
Philosopher 4 is done eating.
Philosopher 3: got left chopstick 4
Philosopher 3: eating.
Philosopher 3 is done eating.
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 2: eating.
Philosopher 2 is done eating.
Philosopher 1: got right  chopstick 1
Philosopher 1: got left chopstick 2
Philosopher 1: eating.
Philosopher 1 is done eating.
%
```

Execution terminated normally

プログラムを数回実行して異なる休眠引数を指定してみてください。哲学者 1 が箸を取る前に短時間しか待機しないとどうなるか、あるいは長い時間待機させたらどうなるかを観察するために、実行可能ファイル `a.out` にいろいろな休眠引数を指定してみます。そして、休眠引数を使用した状態と使用しない状態で複数回プログラムを再実行します。プログラムがハングアップする場合も、最後まで実行する場合もあります。プログラムがハングアップするかどうかは、スレッドのスケジュールと、スレッドによるロックの要求のタイミングによって異なります。

スレッドアナライザを使用したデッドロックの検出方法

スレッドアナライザを使用すると、プログラム内の潜在的デッドロックおよび実デッドロックを確認できます。スレッドアナライザは、Oracle Developer Studio パフォーマンスアナライザが使用するものと同じ収集-分析モデルに従います。

スレッドアナライザを使用するには、次の 3 つの手順を行います。

- ソースコードをコンパイルする。
- デッドロック検出実験を作成する。
- 実験結果を検する。

ソースコードをコンパイルする

コードをコンパイルし、必ず `-g` を指定します。高度な最適化では、行番号や呼び出しスタックなどの情報が間違って報告される場合があるので、高度な最適化は指定しないでください。`-g -xopenmp=noopt` を付けて OpenMP プログラムをコンパイルし、`-g -mt` だけを付けて POSIX スレッドプログラムをコンパイルします。

これらのコンパイラオプションについては、`cc`(1)、`CC`(1)、または `f95` (1) のマニュアルページを参照してください。

このチュートリアルの場合、次のコマンドを使用してコードをコンパイルします。

```
% cc -g -o din_philo din_philo.c
```

デッドロック検出実験を作成する

`-r deadlock` オプションを付けて `collect` コマンドを使用します。このオプションは、プログラムの実行中にデッドロック検出実験を作成します。

このチュートリアルの場合、次のコマンドを使用して、`din_philo.1.er` というデッドロック検出実験を作成します。

```
% collect -r deadlock -o din_philo.1.er din_philo
```

`collect -r` コマンドでは、デッドロック検出実験の作成時に役立つ次のオプションが受け入れられます。

`terminate`	回復不可能なエラーが検出された場合は、プログラムを終了します。
`abort`	回復不可能なエラーが検出された場合は、プログラムを終了してコアダンプを出力します。

continue	回復不可能なエラーが検出された場合も、プログラムの続行を許可します。

デフォルトの動作は terminate です。

必要な動作を実行するために、collect -r コマンドで前述のいずれかのオプションを使用できます。たとえば、実デッドロックが発生した場合にプログラムを終了してコアダンプを出力するには、次の collect -r コマンドを使用します。

```
% collect -r deadlock, abort -o din_philo.1.er din_philo
```

実デッドロックが発生した場合にプログラムをハングアップさせるには、次の collect -r コマンドを使用します。

```
% collect -r deadlock, continue -o din_philo.1.er din_philo
```

複数のデッドロック検出実験を作成することによって、デッドロックを検出する可能性を高められます。実験ごとに異なるスレッド数と異なる入力データを使用してください。たとえば、din_philo.c コードで、次の行の値を変更できます。

```
13  #define PHILOS 5
14  #define DELAY 5000
15  #define FOOD 100
```

続いて、前述のようにコンパイルして、別の実験結果を収集できます。

詳しくは、collect(1) および collector(1) のマニュアルページを参照してください。

デッドロック検出実験を検証する

スレッドアナライザ、パフォーマンスアナライザ、er_print ユーティリティーで、デッドロック検出実験を検証できます。スレッドアナライザおよびパフォーマンスアナライザはどちらも GUI インタフェースを表示します。スレッドアナライザはデフォルトビューの簡略セットを表示しますが、それ以外はパフォーマンスアナライザと同じです。

スレッドアナライザを使用したデッドロック検出実験の表示

スレッドアナライザを開始して、din_philo.1.er 実験結果を開くには、次のコマンドを入力します。

```
% tha din_philo.1.er
```

スレッドアナライザには、メニューバー、ツールバー、左側にデータビューを選択できる垂直のナビゲーションバーが表示されます。

デッドロック検出用に収集された実験結果を開くと、デフォルトで、次のデータビューが表示されます。

- 「概要」画面には、ロードされた実験のメトリックの概要が表示されます。
- 「デッドロック」ビューには、スレッドアナライザがプログラム内で検出した潜在的デッドロックや実デッドロックの一覧が表示されます。`er_print din_philo.1.er` デッドロックごとに関連するスレッドが示されます。これらのスレッドは、各スレッドがロックを保持し、チェーン内の次のスレッドが保持している別のロックを要求するという巡回チェーンを形成しています。

  デッドロックを選択すると、関係するスレッドの詳細情報を示す「デッドロックの詳細」ウィンドウが右側のパネルに表示されます。
- 「デュアルソース」ビューには、スレッドがロックを保持したソース位置と、同じスレッドがロックを要求したソース位置が示されます。スレッドがロックを保持し要求したソース行が強調表示されます。このビューを表示するには、「デッドロック」ビューの円形のチェーン内のスレッドを選択して、「デュアルソース」ビューをクリックします。
- 「実験」ビューには、実験でのロードオブジェクトが表示され、すべてのエラーおよび警告メッセージが一覧表示されます。

「詳細ビュー」オプションメニューでほかのビューを表示できます。

`er_print` を使用したデッドロック検出実験結果の表示

`er_print` ユーティリティーは、コマンド行インタフェースを表示します。インタラクティブセッションで `er_print` ユーティリティーを使用して、セッション中にサブコマンドを指定します。コマンド行オプションを使用して、インタラクティブでない方法でもサブコマンドを指定できます。

次のサブコマンドは、 `er_print` ユーティリティーでデッドロックを調べるときに役立ちます。

- `-deadlocks`

  このオプションは、実験で検出された潜在的デッドロックおよび実デッドロックについて報告します。`(er_print)` プロンプトで `deadlocks` を指定するか、`er_print` コマンド行で `-deadlocks` を指定します。
- `-ddetail` *deadlock-ID*

  このオプションは、指定した *deadlock-ID* を持つデッドロックの詳細な情報を返します。`(er_print)` プロンプトで `ddetail` を指定するか、`er_print` コマンド行で `-ddetail` を指定します。指定された *deadlock-ID* が **`all`** の場合、すべてのデッドロックの詳細情報が表示されます。それ以外では、最初のデッドロックを表す **`1`** などの単一のデッドロック番号を指定します。
- `-header`

  このオプションは、実験に関する記述的情報を表示し、すべてのエラーまたは警告を報告します。`(er_print)` プロンプトで `header` と指定するか、コマンド行で `-header` と指定します。

詳細は、`collect`(1)、`tha`(1)、`analyzer`(1)、および `er_print`(1) のマニュアルページを参照してください。

デッドロックの実験結果について

このセクションでは、スレッドアナライザを使用して、食事する哲学者のプログラムでのデッドロックを調べる方法について説明します。

デッドロックが発生した実行の検証

次のリストには、実デッドロックになった食事する哲学者のプログラムの実行が示されています。

```
% cc -g -o din_philo din_philo.c
% collect -r deadlock -o din_philo.1.er din_philo
Creating experiment database din_philo.1.er ...
Philosopher 1 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 3 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 0 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 1: got right  chopstick 1
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 1: got left chopstick 2
Philosopher 3: got left chopstick 4
Philosopher 4 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 1: eating.
Philosopher 3: eating.
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 1: got right  chopstick 1
Philosopher 4: got left chopstick 0
Philosopher 4: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 3: got left chopstick 4
Philosopher 3: eating.
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 2: eating.
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 1: got left chopstick 2
Philosopher 1: eating.
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 1: got right  chopstick 1
Philosopher 4: got left chopstick 0
Philosopher 4: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 3: got left chopstick 4
```

```
Philosopher 3: eating.
...
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 2: eating.
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 3: got right  chopstick 3
(hang)
```

Execution terminated by pressing CTRL-C

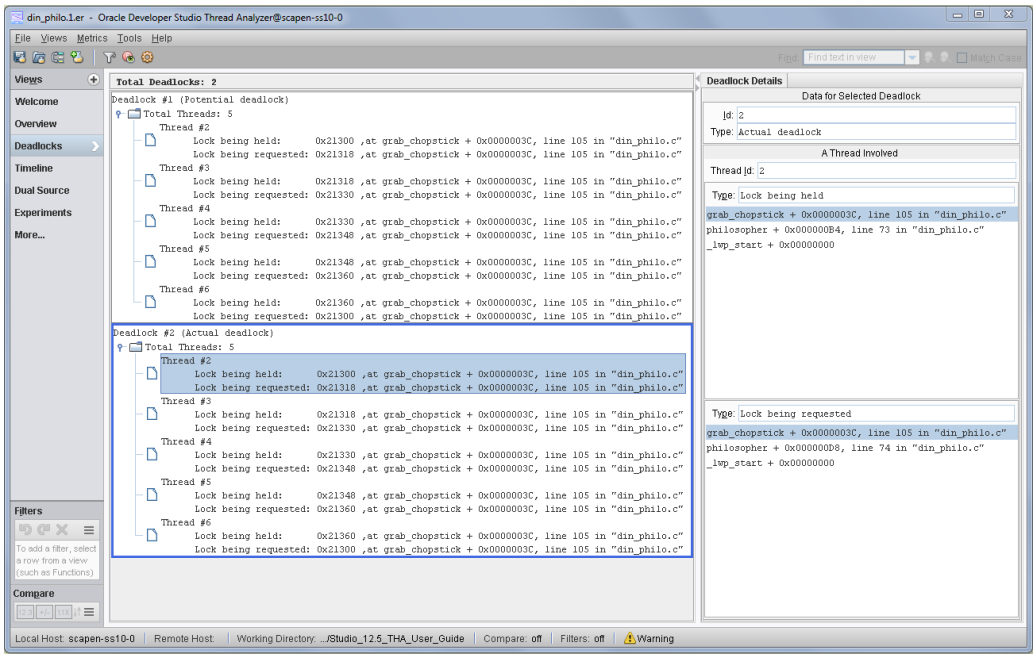
次のコマンドを入力して、er_print ユーティリティーで実験結果を検証します。

```
% er_print din_philo.1.er
(er_print) deadlocks

Deadlock #1, Potential deadlock
     Thread #2
          Lock being held: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #3
          Lock being held: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #4
          Lock being held: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #5
          Lock being held: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #6
          Lock being held: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"

Deadlock #2, Actual deadlock
     Thread #2
          Lock being held: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #3
          Lock being held: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #4
          Lock being held: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
     Thread #5
          Lock being held: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
          Lock being requested: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"
```

```
    Thread #6
         Lock being held: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
         Lock being requested: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in
 "din_philo.c"

Deadlocks List Summary: Experiment: din_philo.1.er
Total Deadlocks: 2
(er_print)
```

次のスクリーンショットは、スレッドアナライザで表示されたデッドロック情報を示します。

図 7 `din_philo.c` で検出されたデッドロック



スレッドアナライザは、`din_philo.c` の、潜在的デッドロックと実デッドロックの 2 つのデッドロックを報告します。より詳しく調べると、2 つのデッドロックは同一であるとわかります。

デッドロックに関する巡回チェーンは次のとおりです。

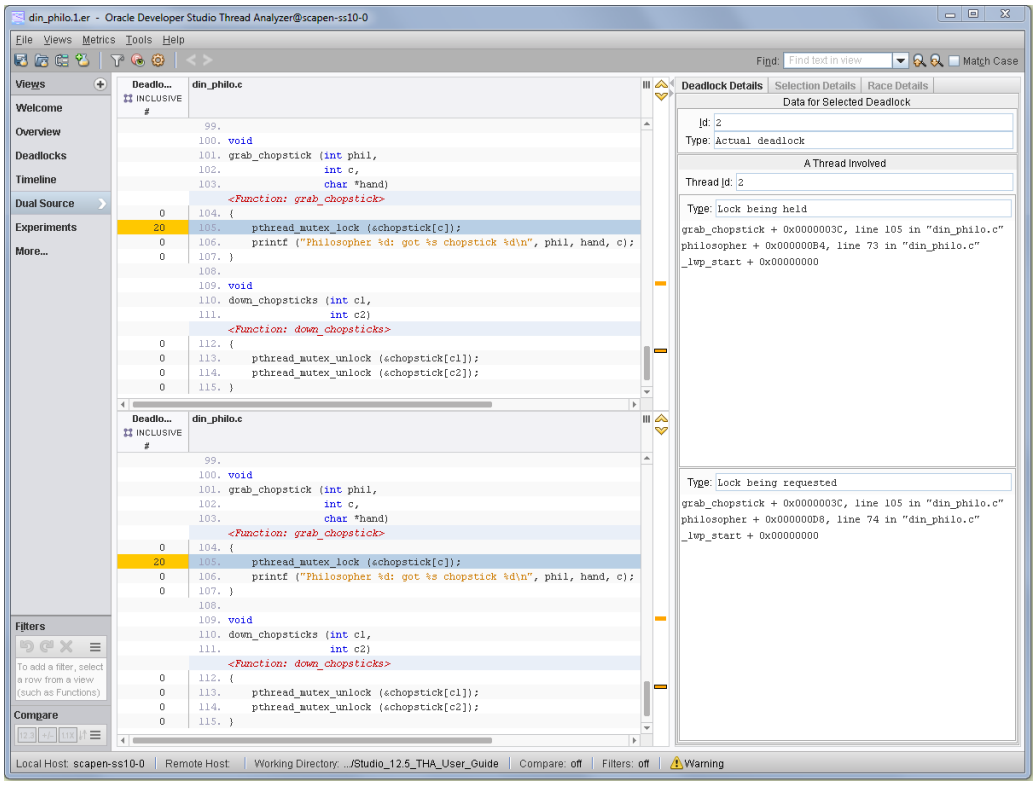
スレッド 2: アドレス `0x21300` でロックを保持し、アドレス `0x21318` でロックを要求
スレッド 3: アドレス `0x21318` でロックを保持し、アドレス `0x21330` でロックを要求
スレッド 4: アドレス `0x21330` でロックを保持し、アドレス `0x21348` でロックを要求
スレッド 5: アドレス `0x21348` でロックを保持し、アドレス `0x21360` でロックを要求
スレッド 6: アドレス `0x21360` でロックを保持し、アドレス `0x21300` でロックを要求

チェーンの最初のスレッド (スレッド #2) を選択し、「デュアルソース」ビューをクリックして、スレッド #2 がアドレス `0x21430` でロックを保持していたソースコード位置と、アドレス `0x21448` でロックを要求したソースコードでの位置を確認します。次の図には、スレッド #2 の「デュアルソース」ビューが示されています。

次のスクリーンショットには、スレッド #2 の「デュアルソース」ビューが示されています。スクリーンショットの上半分には、スレッド #2 が行 105 で `pthread_mutex_lock()` を呼び出すことによって、アドレス `0x21300` でロックを取得したことが表示されています。スクリーンショットの下半分には、同じスレッドが行 105 で `pthread_mutex_lock` を呼び出すことによって、アドレス `0x21318` でロックを要求したことが表示されています。`pthread_mutex_lock` への 2 つの呼び出しは、それぞれ別のロックを引数として使用しています。一般的に、ロック取得オペレーションとロック要求オペレーションは同じソース行に存在できません。

デフォルトのメトリック (排他的デッドロックメトリック) がスクリーンショットの各ソース行の左側に表示されます。このメトリックは、デッドロックに関与したロック取得またはロック要求オペレーションが、そのソース行で報告された回数を示します。デッドロックチェーンの一部となるソース行のみが、このメトリックについて 0 より大きい値を持ちます。

図 8　　din_philo.c での潜在的デッドロック



潜在的デッドロックがあるにもかかわらず完了した実行の検証

十分に大きな休眠引数を指定した場合、食事する哲学者プログラムは、実デッドロックを回避でき、通常どおりに終了します。ただし、通常どおりに終了したからといって、プログラムにデッドロックがないことを意味するわけではありません。単に、保持されたロックと要求されたロックが、所与の実行中にデッドロックチェーンを形成しなかったことを意味するだけです。他の実行でタイミングが変更すれば、実デッドロックが生じる可能性があります。次のリストは、(実行可能ファイルへの引数として指定された) 40 秒の休眠時間によって通常どおりに終了する、食事する哲学者プログラムの実行を示しています。

```
% cc -g -o din_philo_pt din_philo.c
% collect -r deadlock -o din_philo_pt.1.er din_philo_pt 40
Creating experiment database tha.2.er ...
```

```
Philosopher 0 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 1 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 3 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 4 is done thinking and now ready to eat.
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 3: got left chopstick 4
Philosopher 3: eating.
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 2: eating.
...
Philosopher 4: got right  chopstick 4
Philosopher 3: got right  chopstick 3
Philosopher 2: got right  chopstick 2
Philosopher 4: got left chopstick 0
Philosopher 4: eating.
Philosopher 4 is done eating.
Philosopher 3: got left chopstick 4
Philosopher 3: eating.
Philosopher 0: got right  chopstick 0
Philosopher 0: got left chopstick 1
Philosopher 0: eating.
Philosopher 3 is done eating.
Philosopher 2: got left chopstick 3
Philosopher 2: eating.
Philosopher 0 is done eating.
Philosopher 2 is done eating.
Philosopher 1: got right  chopstick 1
Philosopher 1: got left chopstick 2
Philosopher 1: eating.
Philosopher 1 is done eating.
%
```

Execution terminated normally

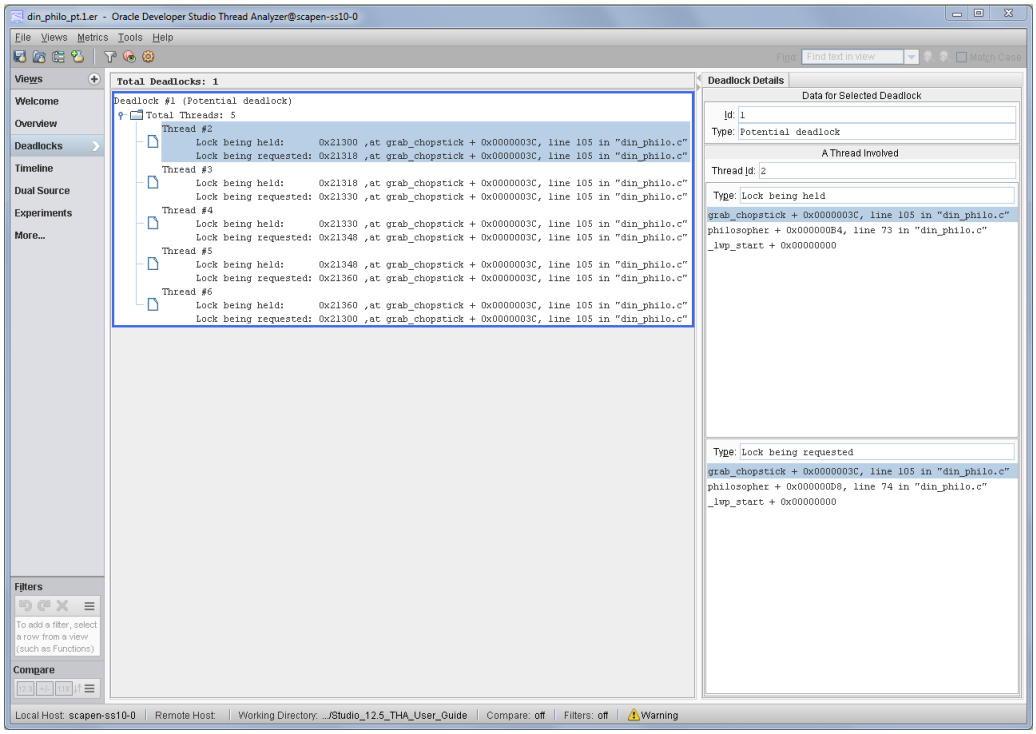
プロンプトで次のコマンドを入力して、`er_print` ユーティリティーで実験結果を検証します。

```
% er_print din_philo_pt.1.er
(er_print) deadlocks
Deadlock #1, Potential deadlock

Thread #2
     Lock being held: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
     Lock being requested: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
Thread #3
     Lock being held: 0x21318, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
     Lock being requested: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
```

```
Thread #4
     Lock being held: 0x21330, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
     Lock being requested: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
Thread #5
     Lock being held: 0x21348, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
     Lock being requested: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
Thread #6
     Lock being held: 0x21360, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"
     Lock being requested: 0x21300, at: grab_chopstick + 0x0000003C, line 105 in "din_philo.c"

Deadlocks List Summary: Experiment: din_philo_pt.1.er/ Total Deadlocks: 1
(er_print)
```

次のスクリーンショットには、スレッドアナライザでの潜在的デッドロック情報が示されています。

図 9 `din_philo.c` での潜在的デッドロック



デッドロックの修正と誤検知について

潜在的デッドロックと実デッドロックを取り除くには、哲学者は食事しようとする前にトークンを受け取る必要があるとするトークンのシステムを使用した方法があります。使用可能なトークンの数は、テーブルの哲学者の人数より少なくする必要があります。哲学者はトークンを受け取ると、テーブルのルールに従って食事できます。それぞれの哲学者は食事が終わればトークンを返し、プロセスを繰り返します。次の擬似コードは、トークンシステムを使用したときの、各哲学者のロジックを示します。

```
while (there is still food on the table)
   {
     get token
     grab right fork
     grab left fork
     eat some food
     put down left fork
     put down right fork
     return token
   }
```

以降のセクションでは、トークンのシステムの 2 つの異なる実装について詳しく説明します。

トークンを使用した哲学者の規制

次のリストは、トークンシステムを使用する修正バージョンの食事する哲学者プログラムを示します。このソリューションには 4 つのトークン (食事する人数より 1 少ない) が組み入れられ、したがって同時に 4 人の哲学者しか食事できません。このバージョンのプログラムは `din_philo_fix1.c` と呼ばれます。

ヒント - サンプルアプリケーションをダウンロードした場合、`din_philo_fix1.c` ファイルを `OracleDeveloperStudio12.5-Samples/ThreadAnalyzer/din_philo` ディレクトリからコピーできます。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <pthread.h>
 6 #include <stdio.h>
 7 #include <unistd.h>
 8 #include <stdlib.h>
 9 #include <errno.h>
10 #include <assert.h>
11
12 #ifdef __linux__
13 #include <stdint.h>
14 #endif
15
```

```
16 #define PHILOS 5
17 #define DELAY 5000
18 #define FOOD 100
19
20 void *philosopher (void *id);
21 void grab_chopstick (int,
22                       int,
23                       char *);
24 void down_chopsticks (int,
25                        int);
26 int food_on_table ();
27 int get_token ();
28 void return_token ();
29
30 pthread_mutex_t chopstick[PHILOS];
31 pthread_t philo[PHILOS];
32 pthread_mutex_t food_lock;
33 pthread_mutex_t num_can_eat_lock;
34 int sleep_seconds = 0;
35 uint32_t num_can_eat = PHILOS - 1;
36
37
38 int
39 main (int argn,
40       char **argv)
41 {
42     int i;
43
44     pthread_mutex_init (&food_lock, NULL);
45     pthread_mutex_init (&num_can_eat_lock, NULL);
46     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
47         pthread_mutex_init (&chopstick[i], NULL);
48     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
49         pthread_create (&philo[i], NULL, philosopher, (void *)i);
50     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
51         pthread_join (philo[i], NULL);
52     return 0;
53 }
54
55 void *
56 philosopher (void *num)
57 {
58     int id;
59     int i, left_chopstick, right_chopstick, f;
60
61     id = (int)num;
62     printf ("Philosopher %d is done thinking and now ready to eat.\n", id);
63     right_chopstick = id;
64     left_chopstick = id + 1;
65
66     /* Wrap around the chopsticks. */
67     if (left_chopstick == PHILOS)
68         left_chopstick = 0;
69
```

```
 70     while (f = food_on_table ()) {
 71         get_token ();
 72
 73         grab_chopstick (id, right_chopstick, "right ");
 74         grab_chopstick (id, left_chopstick, "left");
 75
 76         printf ("Philosopher %d: eating.\n", id);
 77         usleep (DELAY * (FOOD - f + 1));
 78         down_chopsticks (left_chopstick, right_chopstick);
 79
 80         return_token ();
 81     }
 82
 83     printf ("Philosopher %d is done eating.\n", id);
 84     return (NULL);
 85 }
 86
 87 int
 88 food_on_table ()
 89 {
 90     static int food = FOOD;
 91     int myfood;
 92
 93     pthread_mutex_lock (&food_lock);
 94     if (food > 0) {
 95         food--;
 96     }
 97     myfood = food;
 98     pthread_mutex_unlock (&food_lock);
 99     return myfood;
100 }
101
102 void
103 grab_chopstick (int phil,
104                 int c,
105                 char *hand)
106 {
107     pthread_mutex_lock (&chopstick[c]);
108     printf ("Philosopher %d: got %s chopstick %d\n", phil, hand, c);
109 }
110
111
112
113 void
114 down_chopsticks (int c1,
115                  int c2)
116 {
117     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c1]);
118     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c2]);
119 }
120
121
122 int
123 get_token ()
```

```
124 {
125     int successful = 0;
126
127     while (!successful) {
128         pthread_mutex_lock (&num_can_eat_lock);
129         if (num_can_eat > 0) {
130             num_can_eat--;
131             successful = 1;
132         }
133         else {
134             successful = 0;
135         }
136         pthread_mutex_unlock (&num_can_eat_lock);
137     }
138 }
139
140 void
141 return_token ()
142 {
143     pthread_mutex_lock (&num_can_eat_lock);
144     num_can_eat++;
145     pthread_mutex_unlock (&num_can_eat_lock);
146 }
```

この修正バージョンの食事する哲学者プログラムをコンパイルし、複数回それを実行してみます。トークンのシステムは、箸を使用して食事しようとする人の人数を制限し、これによって実デッドロックおよび潜在的デッドロックを回避します。

コンパイルするには、次のコマンドを使用します。

```
% cc -g -o din_philo_fix1 din_philo_fix1.c
```

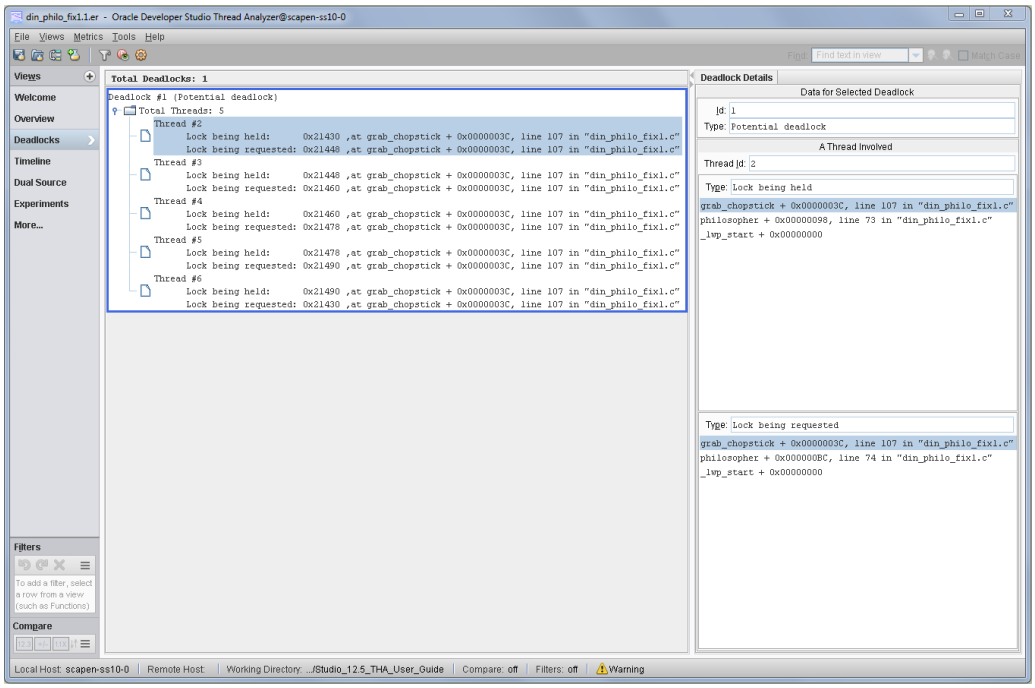
実験結果を収集する

```
% collect -r deadlock -o din_philo_fix1.1.er din_philo_fix1
```

誤検知レポート

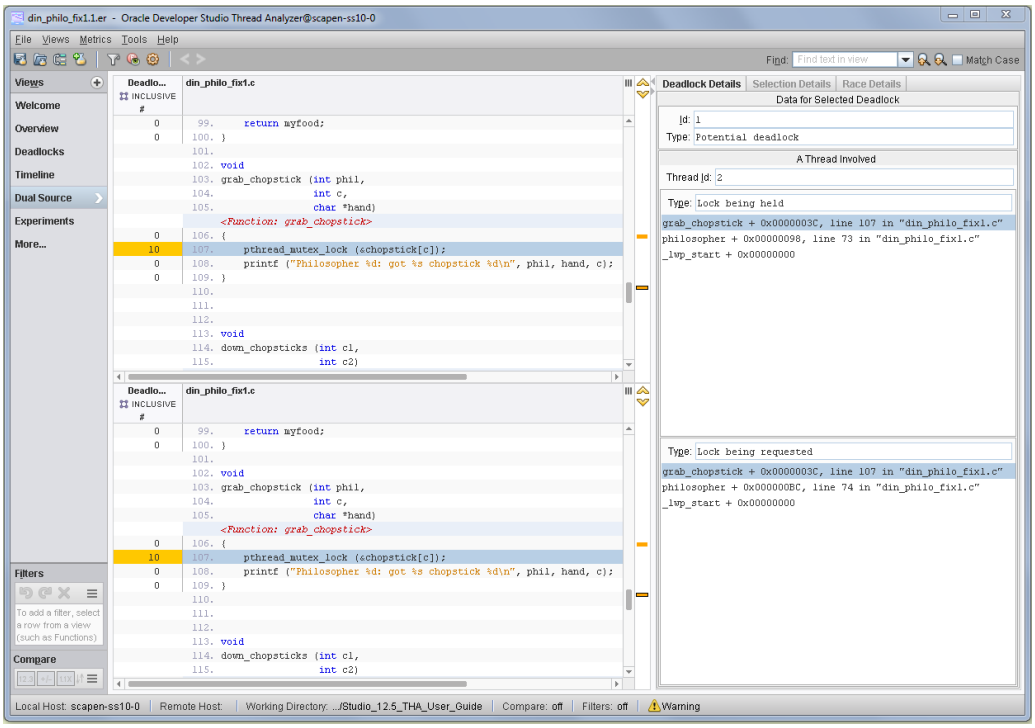
トークンのシステムを使用するときでも、スレッドアナライザは、まったく存在していない場合にもこの実装の潜在的デッドロックを報告します。これが誤検知です。潜在的デッドロックについて詳しく説明した次のスクリーンショットを見てください。

図 10 潜在的デッドロックの誤検知レポート



チェーンの最初のスレッド (スレッド #2) を選択し、「デュアルソース」ビューをクリックして、スレッド #2 がアドレス `0x216a8` でロックを保持していたソースコード位置と、アドレス `0x216c0` でロックを要求したソースコードでの位置を確認します。次の図には、スレッド #2 の「デュアルソース」ビューが示されています。

図 11 誤検知の潜在的デッドロックのソース



`din_philo_fix1.c` の `get_token()` 関数は、`while` ループを使用してスレッドを同期します。スレッドは、トークンの取得に成功するまで、`while` ループ外に出ません (これは、`num_can_eat` が 0 より大きいときに起こります)。`while` ループは同時に食事する人を 4 人に制限します。ただし、`while` ループによって実装された同期は、スレッドアナライザには認識されません。スレッドアナライザは、5 人の哲学者全員が同時に箸を掴んで食事しようとしていると想定しているので、潜在的デッドロックを報告します。次のセクションでは、スレッドアナライザが認識する同期を使用することによって、同時に食事する人の人数を制限する方法について詳しく説明します。

トークンの代替システム

次のリストには、トークンのシステムを実装する代替方法が示されています。この実装方法でも 4 つのトークンを使用するので、同時に 4 人しか食事しようとしません。ただし、この実装方法は、`sem_wait()` と `sem_post()` セマフォールーチンを使用して、食事する哲学者の人数を制限します。このバージョンのソースファイルは `din_philo_fix2.c` と呼ばれます。

ヒント - サンプルアプリケーションをダウンロードした場合、din_philo_fix2.c ファイルを OracleDeveloperStudio12.5-Samples/ThreadAnalyzer/din_philo ディレクトリからコピーできます。

次のリストでは、din_philo_fix2.c について詳しく説明します。

```
 1 /*
 2  * Copyright (c) 2006, 2011, Oracle and/or its affiliates. All Rights Reserved.
 3  */
 4
 5 #include <pthread.h>
 6 #include <stdio.h>
 7 #include <unistd.h>
 8 #include <stdlib.h>
 9 #include <errno.h>
10 #include <assert.h>
11 #include <semaphore.h>
12
13 #define PHILOS 5
14 #define DELAY 5000
15 #define FOOD 100
16
17 void *philosopher (void *id);
18 void grab_chopstick (int,
19                      int,
20                      char *);
21 void down_chopsticks (int,
22                       int);
23 int food_on_table ();
24 int get_token ();
25 void return_token ();
26
27 pthread_mutex_t chopstick[PHILOS];
28 pthread_t philo[PHILOS];
29 pthread_mutex_t food_lock;
30 int sleep_seconds = 0;
31 sem_t num_can_eat_sem;
32
33
34 int
35 main (int argn,
36       char **argv)
37 {
38     int i;
39
40     pthread_mutex_init (&food_lock, NULL);
41     sem_init(&num_can_eat_sem, 0, PHILOS - 1);
42     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
43         pthread_mutex_init (&chopstick[i], NULL);
44     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
45         pthread_create (&philo[i], NULL, philosopher, (void *)i);
46     for (i = 0; i < PHILOS; i++)
47         pthread_join (philo[i], NULL);
```

```
 48     return 0;
 49 }
 50
 51 void *
 52 philosopher (void *num)
 53 {
 54     int id;
 55     int i, left_chopstick, right_chopstick, f;
 56
 57     id = (int)num;
 58     printf ("Philosopher %d is done thinking and now ready to eat.\n", id);
 59     right_chopstick = id;
 60     left_chopstick = id + 1;
 61
 62     /* Wrap around the chopsticks. */
 63     if (left_chopstick == PHILOS)
 64         left_chopstick = 0;
 65
 66     while (f = food_on_table ()) {
 67         get_token ();
 68
 69         grab_chopstick (id, right_chopstick, "right ");
 70         grab_chopstick (id, left_chopstick, "left");
 71
 72         printf ("Philosopher %d: eating.\n", id);
 73         usleep (DELAY * (FOOD - f + 1));
 74         down_chopsticks (left_chopstick, right_chopstick);
 75
 76         return_token ();
 77     }
 78
 79     printf ("Philosopher %d is done eating.\n", id);
 80     return (NULL);
 81 }
 82
 83 int
 84 food_on_table ()
 85 {
 86     static int food = FOOD;
 87     int myfood;
 88
 89     pthread_mutex_lock (&food_lock);
 90     if (food > 0) {
 91         food--;
 92     }
 93     myfood = food;
 94     pthread_mutex_unlock (&food_lock);
 95     return myfood;
 96 }
 97
 98 void
 99 grab_chopstick (int phil,
100                 int c,
101                 char *hand)
```

```
102 {
103     pthread_mutex_lock (&chopstick[c]);
104     printf ("Philosopher %d: got %s chopstick %d\n", phil, hand, c);
105 }
106
107 void
108 down_chopsticks (int c1,
109                  int c2)
110 {
111     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c1]);
112     pthread_mutex_unlock (&chopstick[c2]);
113 }
114
115
116 int
117 get_token ()
118 {
119     sem_wait(&num_can_eat_sem);
120 }
121
122 void
123 return_token ()
124 {
125     sem_post(&num_can_eat_sem);
126 }
```

この新しい実装方法は、セマフォー num_can_eat_sem を使用して、同時に食事できる哲学者の人数を制限します。セマフォー num_can_eat_sem は、哲学者の人数より 1 少ない 4 に初期化されます。食事しようとする前に、哲学者は get_token() を呼び出し、続いてこれが sem_wait (&num_can_eat_sem) を呼び出します。sem_wait() の呼び出しは、呼び出した哲学者をセマフォーの値が正になるまで待機させ、続いてセマフォーの値を 1 を引いて変更します。哲学者は食事を終えると、return_token() を呼び出し、続いてこれが sem_post(&num_can_eat_sem) を呼び出します。sem_post() は 1 を追加してセマフォーの値を変更します。スレッドアナライザは、sem_wait() および sem_post() の呼び出しを認識し、哲学者全員が同時に食事しようとしているわけではないと判断します。

注記 - 適切なセマフォールーチンとリンクするように、-lrt を付けて din_philo_fix2.c をコンパイルする必要があります。

---

din_philo_fix2.c をコンパイルするには、次のコマンドを使用します。

```
% cc -g -lrt -o din_philo_fix2 din_philo_fix2.c
```

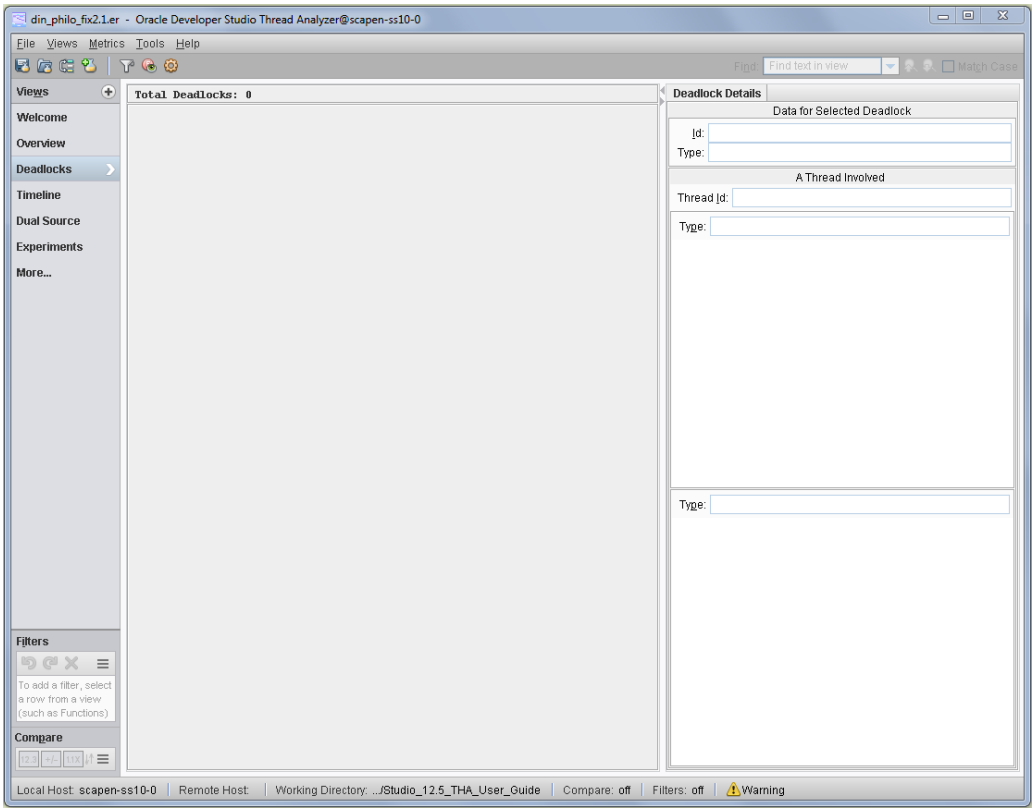
プログラム din_philo_fix2 のこの新しい実装方法を複数回実行すると、どの場合も通常どおり終了し、ハングアップしないことがわかります。

この新しいバイナリで実験を作成する

```
% collect -r deadlock -o din_philo_fix2.1.er din_philo_fix2
```

次の図に示すように、din_philo_fix2.1.er の実験から、スレッドアナライザが実デッドロックも潜在的デッドロックも報告していないことがわかります。

図 12 din_philo_fix2.c で報告されないデッドロック



スレッドアナライザが認識するスレッドおよびメモリー割り当て API のリストについては、付録A スレッドアナライザで認識される APIを参照してください。

♦ ♦ ♦ 付 録 A

A スレッドアナライザで認識される API

スレッドアナライザは、OpenMP、POSIX スレッド、および Oracle Solaris スレッドで提供されるほとんどの標準同期 API と構文を認識できます。ただし、このツールはユーザー定義の同期を認識できないため、このような同期を採用した場合、誤検知のデータ競合が報告される場合があります。たとえば、アセンブリ言語でコードを直接書いて実装したスピンロックは、このツールでは認識できません。

スレッドアナライザユーザー API

コードにユーザー定義の同期が含まれる場合、この同期を識別するために、スレッドアナライザがサポートするユーザー API をプログラムに挿入します。このように識別することによって、スレッドアナライザは同期を認識でき、誤検知の数を減らすことができます。スレッドアナライザのユーザー API は `libtha.so` に定義され、その一覧を次の表に示します。

表 1 スレッドアナライザユーザー API

ルーチン名	説明
`tha_notify_acquire_lock()`	プログラムがユーザー定義のロックを取得しようとする直前に呼び出せます。
`tha_notify_lock_acquired()`	ユーザー定義のロックが正しく取得された直後に呼び出せます。
`tha_notify_acquire_writelock()`	プログラムが書き込みモードでユーザー定義の読み取り/書き込みロックを取得しようとする直前に呼び出せます。
`tha_notify_writelock_acquired()`	書き込みモードでユーザー定義の読み取り/書き込みロックが正しく取得された直後に呼び出せます。
`tha_notify_acquire_readlock()`	プログラムが読み取りモードでユーザー定義の読み取り/書き込みロックを取得しようとする直前に呼び出せます。
`tha_notify_readlock_acquired()`	読み取りモードでユーザー定義の読み取り/書き込みロックが正しく取得された直後に呼び出せます。
`tha_notify_release_lock()`	ユーザー定義のロックまたは読み取り/書き込みロックが解除される直前に呼び出せます。
`tha_notify_lock_released()`	ユーザー定義のロックまたは読み取り/書き込みロックが正しく解除された直後に呼び出せます。
`tha_notify_sync_post_begin()`	ユーザー定義の送信同期が実行される直前に呼び出せます。
`tha_notify_sync_post_end()`	ユーザー定義の送信同期が実行された直後に呼び出せます。

ルーチン名	説明
tha_notify_sync_wait_begin()	ユーザー定義の待機同期が実行される直前に呼び出せます。
tha_notify_sync_wait_end()	ユーザー定義の待機同期が実行された直後に呼び出せます。
tha_check_datarace_mem()	このルーチンは、データの競合の検出の実行中に、指定されたメモリーブロックへのアクセスをモニターまたは無視するようスレッドアナライザに指示します。
tha_check_datarace_thr()	このルーチンは、データの競合の検出の実行中に、1 つ以上のスレッドによるメモリーアクセスをモニターまたは無視するようスレッドアナライザに指示します。

C/C++ バージョンと Fortran バージョンの API が用意されています。それぞれの API 呼び出しは単一の引数 ID を取り、その値は同期オブジェクトを一意に識別します。

C/C++ バージョンの API では、引数の型は `uintptr_t` であり、これは 32 ビットモードでは 4 バイト長、64 ビットモードでは 8 バイト長になります。この API を呼び出すときには、`#include <tha_interface.h>` を C/C++ ソースファイルに追加する必要があります。

Fortran バージョンの API では、引数の型は `tha_sobj_kind` の整数であり、これは 32 ビットおよび 64 ビットモードで 8 バイト長になります。このバージョンの API を呼び出すときには、`#include "tha_finterface.h"` を Fortran ソースファイルに追加する必要があります。

同期オブジェクトが一意に識別されるよう、引数の ID には同期オブジェクトごとに異なる値を割り当てる必要があります。これを行う 1 つの方法は、同期オブジェクトのアドレスの値を ID として使用することです。次のコード例では、API を使用して誤検出データ競合を回避する方法を示しています。

例 1 スレッドアナライザ API を使用して誤検知のデータの競合を回避する例

```
# include <tha_interface.h>
...
/* Initially, the ready_flag value is zero */
...
/* Thread 1: Producer */
100   data = ...
101   pthread_mutex_lock (&mutex);
      tha_notify_sync_post_begin ((uintptr_t) &ready_flag);
102   ready_flag = 1;
      tha_notify_sync_post_end ((uintptr_t) &ready_flag);

103   pthread_cond_signal (&cond);
104   pthread_mutex_unlock (&mutex);


/* Thread 2: Consumer */
200   pthread_mutex_lock (&mutex);
      tha_notify_sync_wait_begin ((uintptr_t) &ready_flag);
201   while (!ready_flag) {
202       pthread_cond_wait (&cond, &mutex);
203   }
```

```
     tha_notify_sync_wait_end ((uintptr_t) &ready_flag);
204  pthread_mutex_unlock (&mutex);
205  ... = data;
```

ユーザー API については、libtha(3) のマニュアルページを参照してください。

認識されるその他の API

以降のセクションでは、スレッドアナライザが認識するスレッド API について詳しく説明します。

POSIX スレッド API

これらの API については、Oracle Solaris ドキュメントの『マルチスレッドのプログラミング』を参照してください。

```
pthread_detach()
pthread_mutex_init()
pthread_mutex_lock()
pthread_mutex_timedlock()
pthread_mutex_reltimedlock_np()
pthread_mutex_timedlock()
pthread_mutex_trylock()
pthread_mutex_unlock()
pthread_rwlock_rdlock()
pthread_rwlock_tryrdlock()
pthread_rwlock_wrlock()
pthread_rwlock_trywrlock()
pthread_rwlock_unlock()
pthread_create()
pthread_join()
pthread_cond_signal()
pthread_cond_broadcast()
pthread_cond_wait()
pthread_cond_timedwait()
pthread_cond_reltimedwait_np()
pthread_barrier_init()
pthread_barrier_wait()
pthread_spin_lock()
pthread_spin_unlock()
pthread_spin_trylock()
pthread_rwlock_init()
```

```
pthread_rwlock_timedrdlock()
pthread_rwlock_reltimedrdlock_np()
pthread_rwlock_timedwrlock()
pthread_rwlock_reltimedwrlock_np()
sem_post()
sem_wait()
sem_trywait()
sem_timedwait()
sem_reltimedwait_np()
```

Oracle Solaris スレッド API

これらの API については、Oracle Solaris ドキュメントの『マルチスレッドのプログラミング』を参照してください。

```
mutex_init()
mutex_lock()
mutex_trylock()
mutex_unlock()
rw_rdlock()
rw_tryrdlock()
rw_wrlock()
rw_trywrlock()
rw_unlock()
rwlock_init()
thr_create()
thr_join()
cond_signal()
cond_broadcast()
cond_wait()
cond_timedwait()
cond_reltimedwait()
sema_post()
sema_wait()
sema_trywait()
```

メモリー割り当て API

```
calloc()
malloc()
realloc()
```

```
valloc()
memalign()
free()
```

メモリー割り当て API については、`malloc`(3C) のマニュアルページを参照してください。

メモリー操作 API

```
memcpy()
memccpy()
memmove()
memchr()
memcmp()
memset()
```

メモリー操作 API については、`memcpy`(3C) のマニュアルページを参照してください。

文字列操作 API

```
strcat()
strncat()
strlcat()
strcasecmp()
strncasecmp()
strchr()
strrchr()
strcmp()
strncmp()
strcpy()
strncpy()
strlcpy()
strcspn()
strspn()
strdup()
strlen()
strpbrk()
strstr()
strtok()
```

文字列操作 API については、`strcat`(3C) のマニュアルページを参照してください。

リアルタイムライブラリ API

```
sem_post()
sem_wait()
sem_trywait()
sem_timedwait()
```

不可分動作 (`atomic_ops`) API

```
atomic_add()
atomic_and()
atomic_cas()
atomic_dec()
atomic_inc()
atomic_or()
atomic_swap()
```

OpenMP API

スレッドアナライザは、バリアー、ロック、クリティカル領域、不可分 (アトミック) 領域、taskwait などの OpenMP 同期を認識します。

詳細は、『Oracle Developer Studio 12.5: OpenMP API ユーザーズガイド』を参照してください。

♦ ♦ ♦ 付 録 B

スレッドアナライザの使用に関するヒント

この付録には、スレッドアナライザを使用するときのヒントが記されています。

アプリケーションのコンパイル

実験結果の収集前にアプリケーションをコンパイルするためのヒント

- アプリケーションバイナリを構築するときに -g コンパイラオプションを使用します。これにより、スレッドアナライザはデータの競合とデッドロックに関する行番号情報を報告できます。
- アプリケーションバイナリを構築するときに、-xO3 より低い最適化レベルでコンパイルします。コンパイラの変換は、行番号情報を歪め、結果をわかりにくくさせることがあります。
- スレッドアナライザは、74 ページの「メモリー割り当て API」に示すルーチンで割り込み処理をします。アーカイブバージョンのメモリー割り当てライブラリにリンクすると、誤検知のデータ競合が報告される場合があります。

データ競合検出用アプリケーションの計測

実験結果を収集する前に、データの競合検出用アプリケーションを計測するためのヒント

- 次に示すように、データの競合の検出用にバイナリが計測されていない場合、collect -r race コマンドは、警告を発行します。

```
% collect -r race a.out
  WARNING: Target `a.out' is not instrumented for datarace
  detection; reported datarace data may be misleading
```

- nm コマンドを使用して、tha ルーチンの呼び出しを検索することにより、データの競合の検出用にバイナリが計測されているかどうかを判断できます。名前が __tha_ で始まるルーチンが表示されたら、バイナリは計測されています。例出力は次のとおりです。

  ソースレベルの計測:

```
% cc -xopenmp -g -xinstrument=datarace source.c
% nm a.out | grep __tha_
```

```
  [71] | 135408| 0|FUNC |GLOB |0 |UNDEF |__tha_get_stack_id
  [53] | 135468| 0|FUNC |GLOB |0 |UNDEF |__tha_src_read_w_frame
  [61] | 135444| 0|FUNC |GLOB |0 |UNDEF |__tha_src_write_w_frame
```

バイナリレベルの計測:

```
% cc -xopenmp -g source.c
% discover -i datarace -o a.out.i a.out
% nm a.out.i | grep __tha_
  [88] | 0| 0|NOTY |GLOB |0 |UNDEF |__tha_read_w_pc_frame
  [49] | 0| 0|NOTY |GLOB |0 |UNDEF |__tha_write_w_pc_frame
```

collect を使用したアプリケーションの実行

データの競合およびデッドロックを検出するために、計測したアプリケーションを実行するためのヒント。

- Oracle Solaris システムにすべての必須パッチがインストールされていることを確認します。`collect` コマンドは、見つからない必須パッチを一覧表示します。OpenMP アプリケーションの場合、`libmtsk.so` の最新バージョンが必要です。
- 計測は、実行時間の大幅な減速 (50 倍以上) と、メモリー消費量の増大を引き起こす可能性があります。より小さなデータセットを使用することにより、実行時間を減らそうと試みることができます。また、スレッド数を増やすことによって、実行時間を減らそうと試みることもできます。
- データ競合を検出するには、アプリケーションが複数のスレッドを使用していることを確認します。OpenMP の場合、スレッド数は、環境変数 `OMP_NUM_THREADS` を、目的のスレッド数に設定し、環境変数 `OMP_DYNAMIC` を `FALSE` に設定することによって指定できます。

データの競合の報告

データの競合の報告のヒント

- スレッドアナライザは、実行時にデータの競合を検出します。アプリケーションの実行時の動作は、使用される入力データセットとオペレーティングシステムのスケジュールによって異なります。異なるスレッド数と、異なる入力データセットで `collect` 下でアプリケーションを実行します。また、ルールがデータの競合を検出するチャンスを最大にするために、単一のデータセットでの実験を繰り返します。
- スレッドアナライザは、単一のプロセスから生じた異なるスレッド間でのデータの競合を検出します。異なるプロセス間でのデータの競合は検出しません。
- スレッドアナライザは、データの競合でアクセスされた変数の名前を報告しません。ただし、2 つのデータの競合アクセスが行われたソース行を調べ、このソース行で変数が書き込まれ、読み取られたかを判断することによって、変数の名前を判別できます。

- 場合によっては、スレッドアナライザは、プログラムで実際には起きなかったデータの競合を報告することがあります。これらのデータの競合は誤検知と呼ばれます。これは通常、ユーザーが実装した同期が使用される場合や、メモリーがスレッド間でリサイクルされる場合に起こります。たとえば、スピンロックを実装するハンドコーディングされたアセンブリがコードに含まれる場合、スレッドアナライザはこれらの同期ポイントを認識しません。スレッドアナライザのユーザー API に対する呼び出しをソースコードに挿入して、ユーザー定義の同期についてスレッドアナライザに通知します。詳細については、36 ページの「誤検知」および付録A スレッドアナライザで認識される APIを参照してください。
- ソースレベルの計測を使用して報告されたデータの競合とバイナリレベルの計測を使用して報告されたデータの競合は、同じでない場合があります。バイナリレベルの計測の場合、それらがプログラム内で静的にリンクされているか、`dlopen()` によって動的に開かれているかにかかわらず、共有ライブラリは開いているときに、デフォルトで計測されます。ソースレベルの計測の場合、ライブラリは、そのソースが `-xinstrument=datarace` でコンパイルされている場合にのみ計測されます。