

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656546

研究課題名(和文)GPU計算を用いた相似地震識別法によるアスペリティ構造の超高速時空間モニタリング

研究課題名(英文)High-speed monitoring of asperity structure by similar earthquake discrimination method using GPU computing

研究代表者

大久保 寛 (OKUBO, KAN)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：90336446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：日本列島は沈み込み帯に属しており、複数のプレートの衝突領域の上に国土を有している為、非有感地震を含めると常日頃から膨大な数の地震が発生している。地震は、日本はもとより世界の多くの地域において避ける事の出来ない自然現象である。プレート境界における地震のメカニズムにはアスペリティと呼ばれる固着域が大きく関与していると考えられている。本研究では相似地震の識別法として、直交3成分の地震波に対して振幅2乗コヒーレンス関数を適用し、検討をするとともに、GPUを用いた超並列計算によるハードウェア高速化の検討も併せて行った。

研究成果の概要(英文)：Repeating earthquakes are occurring on the similar asperity at the plate boundary. These earthquakes have an important property; the seismic waveforms observed at the identical observation site are very similar regardless of their occurrence time. The slip histories and characteristics of repeating earthquakes could reveal the existence of asperities. On the other hand, in order to process the enormous data (so-called big data) the speedup of the signal processing is an important issue. Recently, GPU (Graphic Processing Unit) is used as an acceleration tool for the signal processing in various study fields. In the last few years the performance of GPU keeps on improving rapidly. GPU computing gives us the high-performance computing environment at a lower cost than before. This study examines the high-speed signal processing of huge seismic data using the GPU architecture. It was found that the GPGPU-based acceleration for the temporal signal processing is useful.

研究分野：波動情報工学

キーワード：GPU計算 GPGPU 相似地震 アスペリティ 信号処理 コヒーレンス

1. 研究開始当初の背景

- (1) 日本列島付近は火山帯に属し、また複数のプレートの衝突領域であるため、プレート境界等において多く地震が発生する地域である。最近も、大きな地震が次々と発生し、多数の人的な被害が報告されている。
- (2) 地震は、日本はもちろん世界の多くの地域において避けられない自然現象であり、地震に関する探究は古くから盛んに行われてきている。これまでの知見より、地表面はいくつかのプレートに覆われており、そのプレートが沈み込むことで応力歪みが発生し、プレートの境界で大小様々な地震が発生することが知られている。
- (3) さらに近年の研究により、プレート境界における地震はそれぞれの場所で固有の規模の地震が繰り返し発生し、これらの地震は発生する場所と規模はあらかじめ決まっている、と考えられている。
- (4) すなわち、プレート境界において発生する地震は全くランダムに起こるのではなく、地震の発生場所や規模に法則性があり、これらを正確に解析することができれば、海溝型地震の中期的な予測が実現可能となる。さらには、これらの規則性を把握することで地震現象の解明にも寄与することができる。
- (5) 本研究では、海溝型地震予測のための地殻活動の高精度時空間モニタリング法として、超高速 GPU (Graphics Processing Unit) コンピューティングを利用した相似地震の高速かつ高精度な解析法を検討する。GPU は本来画像処理に特化したアーキテクチャとして生まれたものであるが、この GPU を画像処理以外の用途にも利用しようとする試みは GPGPU と呼ばれている。

2. 研究の目的

- (1) 日本列島は沈み込み帯に属しており、複数のプレートの衝突領域の上に国土を有している為、非有感地震を含めると常日頃から膨大な数の地震が発生している。地震は、日本はもとより世界の多くの地域において避ける事の出来ない自然現象である。
- (2) 近年の研究から、プレート境界における地震はそれぞれの場所で固有のすべりを繰り返し生じさせる為、これらの地震は発生する場所及び規模があらかじめ決定されているという説が有力となってきている。これはすなわち、プレート境界における地震はその発生場所や規模について或る法則性を有している事を意味している。従って、これらの法則性を正確に解析する事が出来れば、プレート境界における地震の中期的な

予測を実現できる可能性が高まる。

- (3) プレート境界における地震のメカニズムにはアスペリティと呼ばれる固着域が大きく関与していると考えられている。アスペリティモデルと呼ばれる地震発生モデルによれば、プレート境界面にはアスペリティと準静的すべり域が存在し、地球の運動によりプレートが沈み込む事によってプレートとプレートとを固着させているアスペリティに対して徐々にエネルギーが蓄積されてゆき、やがてアスペリティがそのエネルギーに耐えられなくなり元の状態に戻ろうとする際に地震が発生するとされている。
- (4) 地震の発生予測にはこのアスペリティと準静的すべり域における応力集中とエネルギー蓄積メカニズムの解明が必要不可欠となる。近年では GPS 観測網の発達により準静的すべり域の特徴が徐々に解明されつつあるが、海域の地下深部におけるその構造を検討するには不十分な場合がある。
- (5) そこで、海底域におけるアスペリティと準静的すべり域における応力集中及びエネルギー蓄積メカニズムの挙動を観測する手法として、相似地震(小繰り返し地震)を用いたモニタリング法が提唱され、これまでにいくつかの地域に対して検討が実施されている。相似地震を調査・解析することで個々の地震を誘発させるアスペリティやプレート境界面における準静的すべりの特性を解明することが可能となる。
- (6) 先行研究により、アスペリティ及び相似地震の存在やアスペリティと準静的すべり域の関係性の多くが明らかになってきているが、相似地震を安定かつ高速に検出・解析する手法は確立されているとは言えない。現在でも相似地震に関する情報が公開されているが、これは実時間的な情報ではない。相似地震の検出・解析方法の高速化を実現出来れば、地震発生時にその地震に対して即時的に検出及び解析処理を施し、准リアルタイムに相似地震情報を提供することが可能となると考えている。
- (7) 本研究では相似地震の識別法として、新たな手法を適用し、その有効性及び計算時間について比較・検討を実施した。また、GPU (Graphics Processing Unit) を用いた超並列計算によるコヒーレンス演算の並列計算によるハードウェア高速化の検討も併せて行った。従来、GPU は主に 3D 描画等の画像処理演算に利用されるデバイスであったが、近年ではプロセッサ・コアの多さによる高い演算処理能力に関心が集まっており、いわゆる GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing

Units) と呼ばれる GPU を用いた汎目的計算が一般的に行われるようになってきている。この GPGPU を用いる事により演算処理の高速化を見込むことが可能である。

3. 研究の方法

(1) 相似地震

図1にプレート境界におけるアスペリティモデルを示す。同図のように、プレート境界面上には通常時は恒常的にゆっくりとすべっている準静的すべり域と呼ばれる領域と、ほぼ固着しているアスペリティと呼ばれる領域の2つが存在する。平常時のアスペリティはプレートとプレートとを接着しているが、外部の変位による歪みが一定以上を超えるとそれに耐えられなくなる。すると、その時に固着していた部分が乖離してプレートがすべる。これがプレート境界における地震の発生メカニズムであると考えられている。

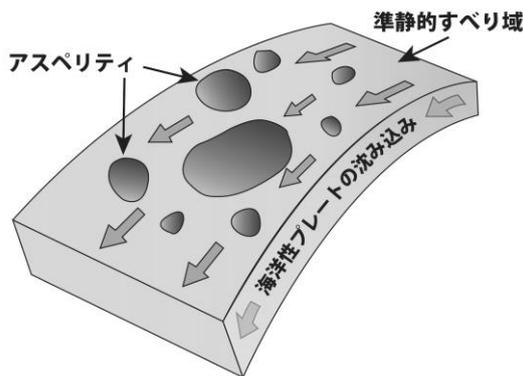


図1 アスペリティモデル

アスペリティには大小様々な形・大きさが存在すると考えられている。一般にアスペリティの大きさと地震の大きさには関連性があり、大きなアスペリティの破壊は地震モーメントの大きな地震を発生させるとされている。

アスペリティが孤立している場合、そのアスペリティは単体ですべり、地震を発生させる事になる。孤立したアスペリティによる地震は固有の規模の地震を繰り返し発生させる為、固有の規則性を持つ可能性が高いと考えられる。

一般に相似地震と呼ばれるものは、このプレート境界の同一箇所が繰り返すすべる事により、極めてよく似た波形が生成される地震群の事を指している。

4. 研究成果

(1) コヒーレンス計算と GPU による高速化

信号間のコヒーレンスを計算することで、2つの事象間の相似度合を周波数

毎に解析することが可能となる。相似度は0から1の間の値で示される、相似度が1の場合は2つの波形は一致しているという事になる。以下に概略を示す。

2つの信号長 N の1次元離散信号を $f(n)$ 、及び $g(n)$ (ただし、 $n = 1, \dots, N$) とし、それぞれの信号に対して離散フーリエ変換を行ったもの(複素フーリエ成分)を $F(k)$ および $G(k)$ (ただし、 $k = 1, \dots, N$) とする。また、 $F(k)$ の複素共役を $\overline{F(k)}$ 、 $G(k)$ の複素共役を $\overline{G(k)}$ とすると、コヒーレンス $Coh_{FG(k)}$ は次式で求めることができる。

$$Coh_{FG(k)} = \frac{|E[F(k)\overline{G(k)}]|^2}{E[F(k)\overline{F(k)}] \cdot E[G(k)\overline{G(k)}]}$$

ただし、 $E[\cdot]$ はアンサンブル平均を示している。

さて、地震という現象についてみると、ひとつの地震に対してひとつの震源過程(破壊伝播の様子)が定義され、ある地震についてデータを取得できる機会はただ1回である。また、全国、全世界での地震観測の観測点で、同様の系でマルチ観測している例はほとんどない。したがって、地震波データを用いてコヒーレンスを求める場合、このアンサンブル平均をどのように求めるかが重要となる。

そこで本研究では、コヒーレンスによる相似地震解析のために、この式に対して、各観測点で観測された直交3成分の地震波形を用いたコヒーレンス計算を検討した。

多くの観測点では地震波の速度信号として東西(EW)・南北(NS)・鉛直(UD)の3方向分の振幅波形が記録されており、これら全てを組み合わせる事でコヒーレンスを求めることが可能であると考えた。以下、直交3成分コヒーレンスとする。

(2) 解析結果

図2は地震の分布図及び地震波形である。同図に示されている地震波形は FUDAI 観測点：以下 FD2 にて観測された地震波形である。実際には各地震に対して、図4のように東西(EW)、

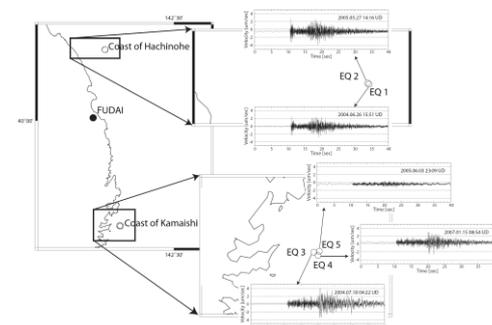


図2 地震分布と地震波形

南北 (NS), 及び鉛直 (UD) 方向の 3 成分が記録されているが, UD 波形のみを示す.

EQ 1 と EQ 2 の組み合わせに対して直交 3 成分コヒーレンス相関計算を適用した結果を図 3 (a) に示す. 同図から読み取れるように, ほとんどの周波数帯域で相関結果の値が 1 に漸近しているため, 同じアスペリティ由来かつ同規模の相似地震である可能性が高い.

EQ 3 と EQ 4 の組み合わせに対して直交 3 成分コヒーレンス相関計算を適用した結果を図 3 (b) に示す.

EQ 4 と EQ 5 の組み合わせに対して直交 3 成分コヒーレンス相関計算を適用した結果を図 3 (c) に示す. ほとんどの周波数帯域において計算結果の値が小さいため, この 2 つの地震は全く関係のない別のアスペリティ由来の地震であると言える.

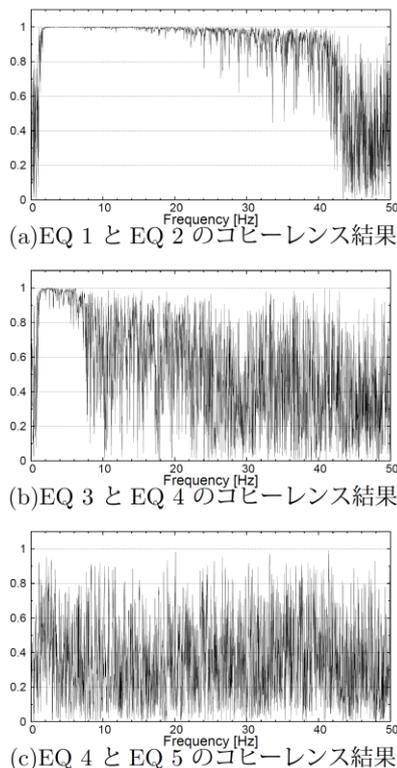


図 3 コヒーレンス計算結果

次に, GPU による直交 3 成分コヒーレンス相関計算の高速化の検討を行う. 比較検討を行うにあたり, CPU は intel 社 core i7 930 を用い, Turbo Boost Technology を有効にして使用している. GPU は GeForce GTX 580 を用いている. CPU による計算は C 言語 (OpenMP 適用により 8 thread 並列化) で行い, GPU による計算は CUDA により実装している.

図 6 に計算対象とするデータ数を変化させることによってコヒーレンス計算の実行回数を変動させて演算した場

合の処理時間の比較結果を示す.

同図より, CPU による場合も GPU による場合も計算時間が線形に増加している事がわかる. GPU による加速化に関しては, 同図よりデータ数 1000 個 (実行回数にして 500500 回) に対して計算を実行した場合において, 約 12.7 倍だけ高速であることがわかる.

ただし, これはデータ I/O を除外した場合の結果である. 実際にデータ I/O を追加すると, CPU による計算と GPU による計算のいずれの場合もそのための処理時間が増加する. GPU 計算の場合はその処理時間の増大が顕著であるため, 先に挙げた加速性能は減少する. 今後の大きな課題としては, このデータ I/O による低速化の解決が挙げられる. この解決方法として, ホスト-デバイス間のメモリ転送の回数を減らすことやファイル I/O を並列的に実行することを検討している.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 小泉貴広, 大久保寛, 内田直希, 竹内伸直, 松澤暢, 多点地震波データを用いたコヒーレンス解析による相似地震識別法の比較評価, 信号処理研究会, ミヤヒラ (沖縄), 2015 年 3 月 3 日.
- ② 川上大喜, 大久保寛, 内田直希, 竹内伸直, 松澤暢, マルチ GPU コンピューティングによる並列信号処理を用いた微小繰り返し地震識別法の高速化の一検討, 信号処理研究会, ミヤヒラ (沖縄), 2015 年 3 月 3 日.
- ③ 小泉貴広, 大久保寛, 内田直希, 竹内伸直, 松澤暢, 地震波データのコヒーレンス解析を用いた相似地震識別法の比較評価, 29th 信号処理シンポジウム, ビナリオ嵯峨嵐山 (京都), 2014 年 11 月 13 日
- ④ 川上大喜・大久保寛・内田直希・竹内伸直・松澤暢, メニーコア信号処理に基づく微小繰り返し地震識別法の高速化, 計算工学会, 東京大学 (東京), 2013 年 6 月 20 日
- ⑤ 川上大喜・大久保寛・内田直希・竹内伸直・松澤暢, GPGPU 超並列信号処理による相似地震検出及び解析の高速化, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ (千葉) 2013 年 5 月 19 日.
- ⑥ Taiki Kawakami, Kan Okubo, Naoki Uchida, Nobunao Takeuchi, and Toru Matsuzawa, High-Speed Digital Signal Processing Method for Detection of Repeating Earthquakes Using GPGPU-Acceleration, EGU

General Assembly 2013,
EGU2013-6904, Wien(Austria), April
2013

- ⑦ 川上大喜・大久保寛・内田直希・竹内伸直・松澤暢, 直交3成分地震波データに用いたコヒーレンス関数による相似地震解析法と GPGPU 高速化, 第 27 回 信号処理シンポジウム, ANA インターコンチネンタル石垣 (沖縄), 2012 年 11 月 29 日
- ⑧ 大久保寛・川上大喜・宮本祐子・内田直希・竹内伸直・松澤暢, 直交3成分地震波データを用いたコヒーレンス関数による相似地震解析, 日本地震学会 2012 年秋季大会, 函館市民会館 (函館), 2012 年 10 月 17 日
- ⑨ 川上大喜・大久保寛・内田直希・竹内伸直・松澤暢, GPGPU 超並列処理を用いた相似地震の高速識別法—アスペリティ構造の超高速時空間モニタリングを目指して—, GTC Japan 2012 テクニカル・セッション, 東京ミッドタウンホール & カンファレンス (東京), 2012 年 7 月 26 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 寛 (Kan OKUBO) ・ 首都大学東京 ・ システムデザイン研究科 ・ 准教授

研究者番号 : 90336446