

ロジスティック回帰による深発月震の 分類に寄与する周波数帯の可視化

中島康平¹, 山本幸生², 山田竜平³, 荒木徹也⁴, 廣田雅春⁵, 石川博⁶

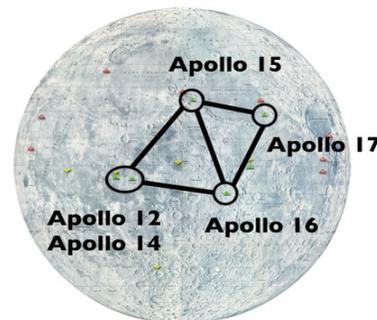
1. 東京都立大学修士課程
2. 宇宙航空開発機構宇宙科学研究所
3. 会津大学
4. 群馬大学
5. 岡山理科大学
6. 東京都立大学

- 研究背景・目的
- 特徴量, 分類器の月震分類への有効性の確認
- 分類に寄与している周波数帯の可視化
- まとめ

- **研究背景・目的**
- 特徴量, 分類器の月震分類への有効性の確認
- 分類に寄与している周波数帯の可視化
- まとめ

● 月震とは？

- ・ 月面でも地球の地震のような揺れが観測されている
- ・ NASAのアポロミッションで月に地震計を設置
- ・ 約7年半分のデータを取得 (1969 ~ 1977年)



月震の観測点

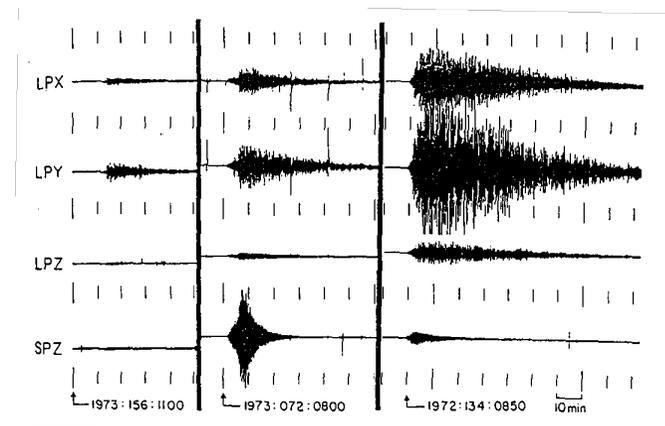
● 月震の種類

- ・ 深発月震, 浅発月震, 熱月震, 隕石衝突 など
- ・ 観測された月震の半数以上が深発月震

→ **本研究の対象も深発月震**

● 深発月震の特徴

- ・ 特定の震源から周期的に揺れが発生
- ・ 同一の震源の深発月震は波形が類似
- ・ ノイズが多く, 揺れが微弱



深発月震の波形

- **深発月震を解析する理由**

- ・ 月の内部構造の解明
- ・ 深発月震の発生メカニズムの理解

- **深発月震の解析に必要な情報**

- ・ 深発月震の震源など

- **深発月震の震源を特定する方法**

- ・ 3つの観測点で振動を観測することで震源を特定可能
- ・ **しかし、ノイズや振動の微弱さから3点で観測されていない深発月震が多数存在**

- **深発月震の波形から震源を推定する研究 (Nakamura et al. 2003)**
 - 深発月震の波形に対して相互相関関数を用いて震源を推定
 - 震源ごとにA1, A6... Axxと震源名が付けられ, 109個の震源に分類
 - **現在の深発月震の分類基準となっている**

上記の研究による分類結果を機械学習で再現することを試みる研究が近年行われている。

- **深発月震の分類に有効な特徴量・分類器の検討 (Kikuchi et al. 2017)**
 - **特徴量:** 月震波形, パワースペクトル密度
 - **分類器:** ランダムフォレスト, ロジスティック回帰, SVM, ニューラルネットワーク
 - 上記の特徴量と分類器を用いて最も高い精度で従来の分類を再現可能な組み合わせの検討を行った.
 - 研究の結果「**パワースペクトル密度 + ニューラルネットワーク**」の組み合わせが最も高い精度で従来の分類を再現可能であることを示した.
- **課題**
 - 特徴量のどのパラメータが分類に寄与するかを明らかにしていない.

- **惑星の位置関係・速度関係を特徴量とした月震の分類 (Kato et al. 2017)**
 - **特徴量:** 月震が発生した時刻の月, 太陽, 地球, 木星など天体の位置・速度
 - **分類器:** ランダムフォレスト
 - 上記の特徴量を用いて, 震源対ごとに2クラス分類を行った.
 - 高い精度で分類可能な震源対の存在を確認.
 - 月と地球の位置関係, 木星の速度が分類に寄与していることを確認.
- **課題**
 - 月と地球の位置関係, 木星の速度がなぜ月震分類に有効であることを解明することが困難.

- **機械学習を用いた先行研究の課題**

- 機械学習により従来の基準に近い分類を再現可能であることを示したが、分類の根拠の解析，因果関係の解明は行われていない。
- 機械学習により，震源が未知の深発月震の震源を推定しても，推定結果が正しそうかを検証することができない。

- **本研究行うこと**

1. 特徴量に周波数スペクトル, 分類器にロジスティック回帰を用いた深発月震の分類
2. 深発月震の分類に寄与している周波数帯を可視化する.

- **本研究の貢献**

機械学習により震源が未知である月震の分類を行う際に, 分類結果に加えて, 分類の根拠となっている周波数の妥当性の確認や, 震源ごとの特徴が出る周波数の確認ができる.

- 研究背景・目的
- **特徴量, 分類器の月震分類への有効性の確認**
- 分類に寄与している周波数帯の可視化
- まとめ

周波数スペクトル・ロジスティック回帰について



特徴量・分類器の月震分類への有効性の検証方法

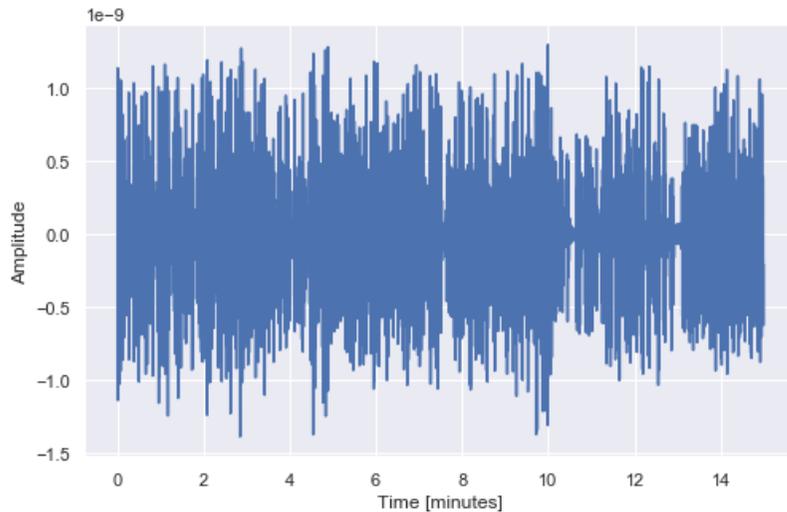


検証結果

周波数スペクトル・ロジスティック回帰について

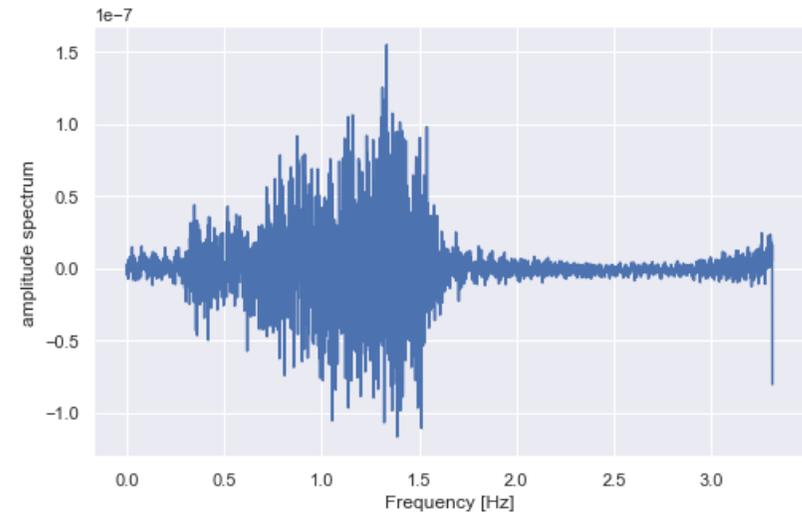
特徴量・分類器の月震分類への有効性の検証方法

検証結果



月震波形

FFT



周波数スペクトル

周波数スペクトル

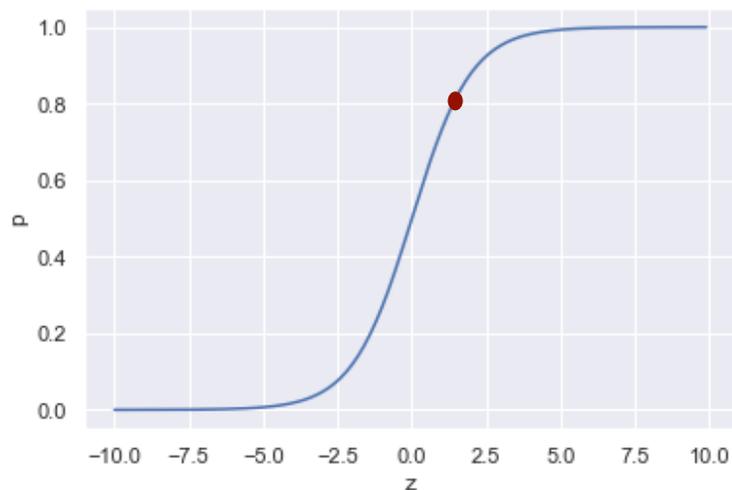
- 月震波形をフーリエ変換した結果の実数部分
- 月震波形の周波数成分ごとの振幅強度を算出
- 月震波形は実数データであるため、0Hz以上を特徴量として用いる。

特徴量: $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$

重み: $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$

$$\begin{aligned} z &= WX + b \\ &= w_1x_1 + \dots + w_nx_n + b \quad \text{--- ①} \end{aligned}$$

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{--- ②}$$



式②のzとpの関係

ロジスティック回帰

- シグモイド関数(式②)の値から、データが2クラスのどちらに分類されるかを確率で出力。
- クラス1に分類される確率は p 、クラス2に分類される確率は $1-p$ 。
- パラメータの重み W 、切片 b の値は、学習データから最尤推定により計算する。(分類器の学習)
- テストデータの特徴量を X として、 p の値が0.5以上であれば、テストデータはクラス1に分類され、0.5よりも小さい値であれば、クラス2に分類される。

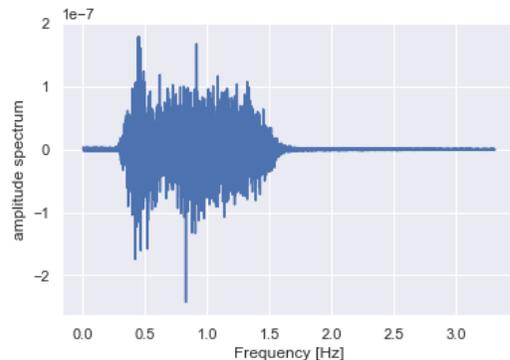
周波数スペクトル・ロジスティック回帰について



特徴量・分類器の月震分類への有効性の検証方法



検証結果



月震の周波数スペクトル



- A1震源の月震である
- A1震源の月震ではない

震源ごとに分類性能を確認(例: A1の場合)

月震分類への有効性の検証方法

- 震源ごとに二値分類を行う分類器を作成.
- 5交差検定による平均F1値により分類性能を確認する.
- 震源ごとの特徴を学習した分類器を作成できる.

周波数スペクトル・ロジスティック回帰について



特徴量・分類器の月震分類への有効性の検証方法



検証結果

- **実験に用いたデータ**

データ数が30件以上の8震源の月震イベントのP波到達から15分 (Z軸方向)

- **前処理**

1. オフセット処理
2. トレンド引き
3. 感度補正
4. バンドパスフィルタ (**0.3Hz~1.5Hz**)
5. デスパイキング処理
6. 標準化

震源	データ数
A1	163
A6	43
A8	35
A9	86
A10	75
A18	83
A20	75
A21	41
合計	596

震源ごとのデータ数

震源名	A1	A6	A8	A9	A10	A18	A20	A21
件数	163	43	35	86	75	83	75	41

震源ごとのデータ件数

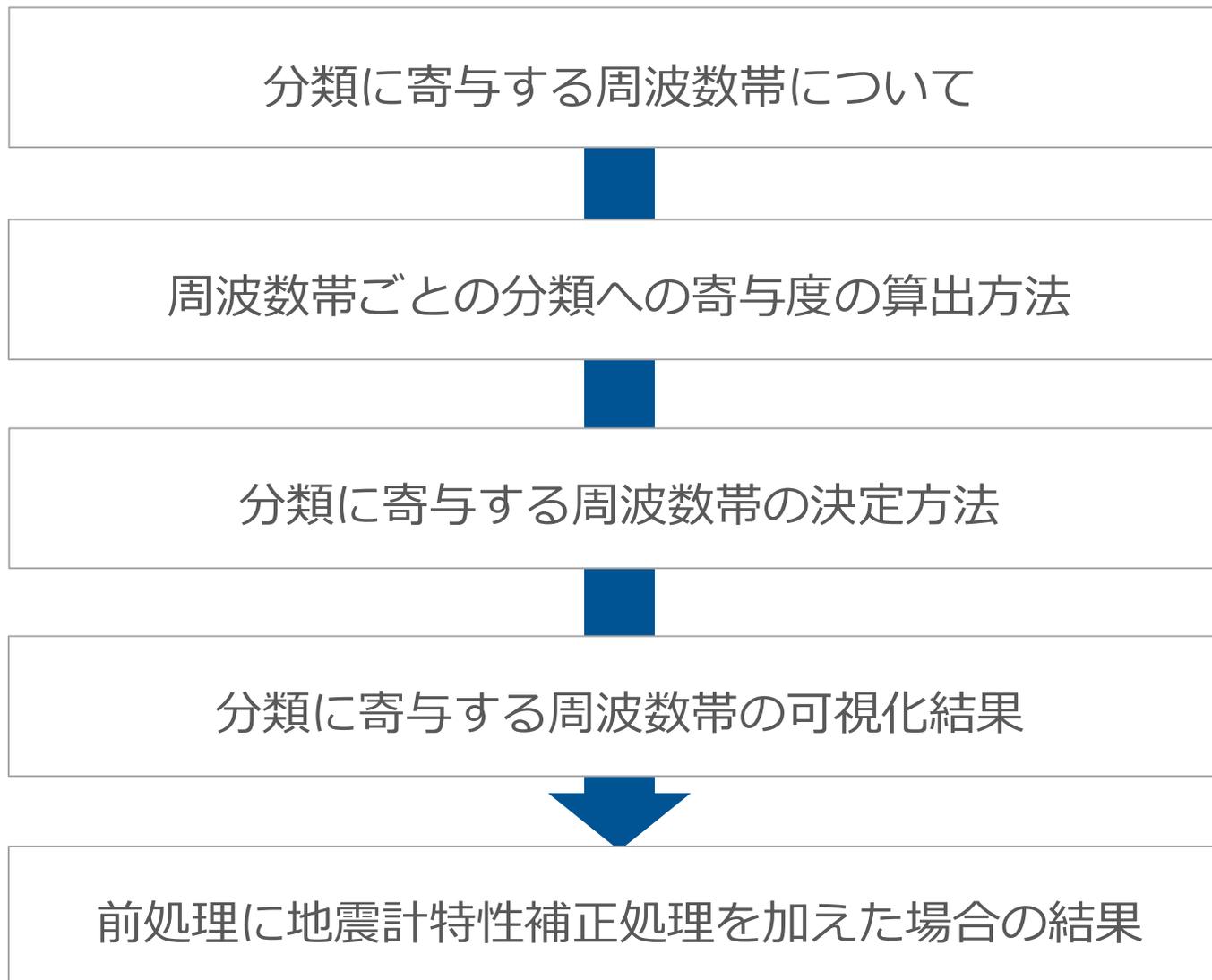
震源名	A1	A6	A8	A9	A10	A18	A20	A21
F1値	0.55	0.79	0.83	0.88	0.85	0.90	0.35	0.79

震源ごとの5交差検定の平均F1値

実験結果

- 実験に用いた8震源のうち, 6震源でF1値が0.79以上となり, 特徴量と分類器の月震分類への一定の有効性は確認することができた.

- 研究背景・目的
- 特徴量, 分類器の月震分類への有効性の確認
- **分類に寄与している周波数帯の可視化**
- まとめ



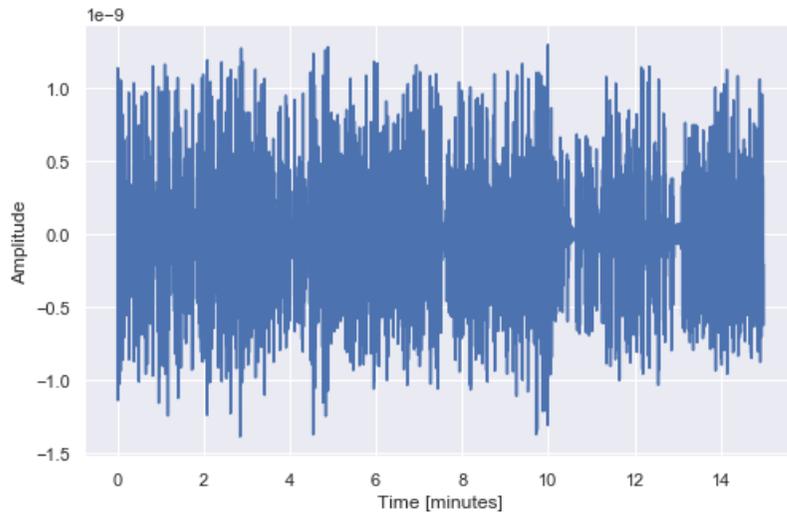
分類に寄与する周波数帯について

周波数帯ごとの分類への寄与度の算出方法

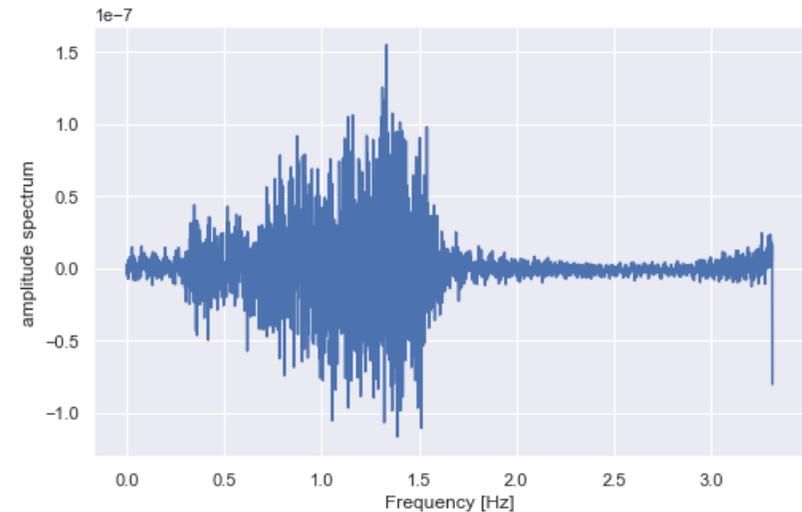
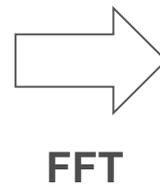
分類に寄与する周波数帯の決定方法

分類に寄与する周波数帯の可視化結果

前処理に地震計特性補正処理を加えた場合の結果



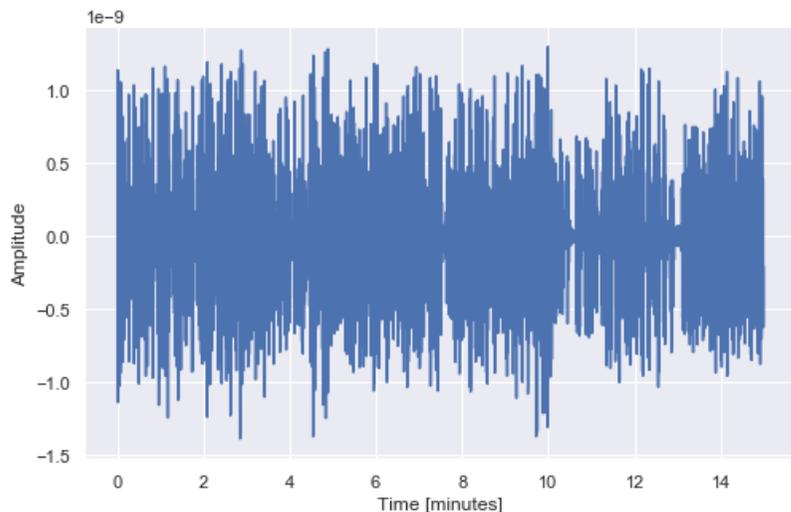
月震波形



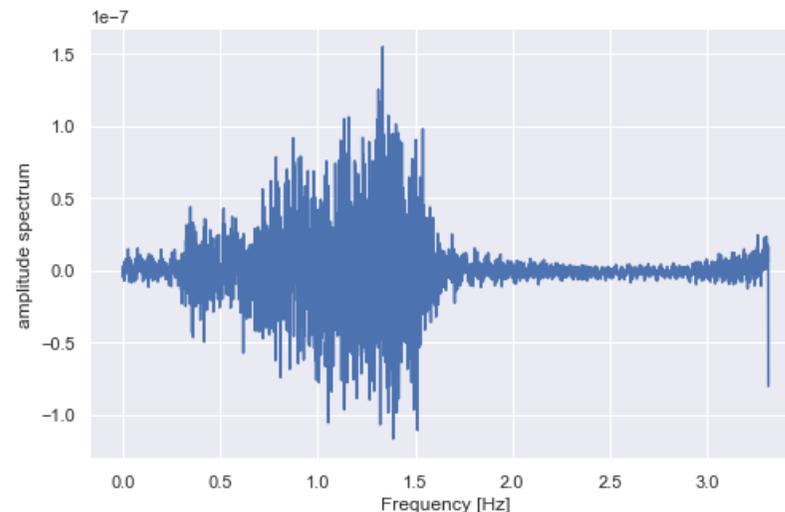
周波数スペクトル

周波数スペクトル

- 月震波形をフーリエ変換した結果の実数部分
- 周波数成分ごとの振幅強度を算出
- 月震波形は実数データであるため、0Hz以上を特徴量として用いる。



月震波形



周波数スペクトル

2982点

どの点の値 (周波数)

が分類に寄与しているか？

分類に寄与する周波数帯について

周波数帯ごとの分類への寄与度の算出方法

分類に寄与する周波数帯の決定方法

分類に寄与する周波数帯の可視化結果

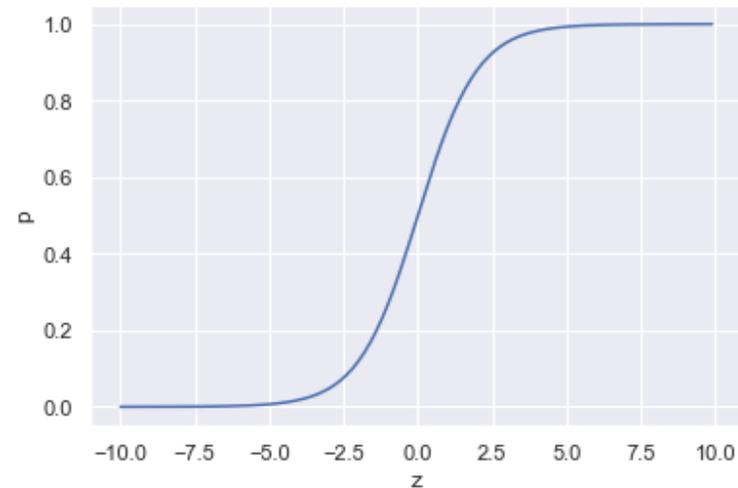
前処理に地震計特性補正処理を加えた場合の結果

特徴量: $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$

重み: $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$

$$\begin{aligned} z &= WX + b \\ &= w_1x_1 + \dots + w_nx_n + b \quad \text{--- ①} \end{aligned}$$

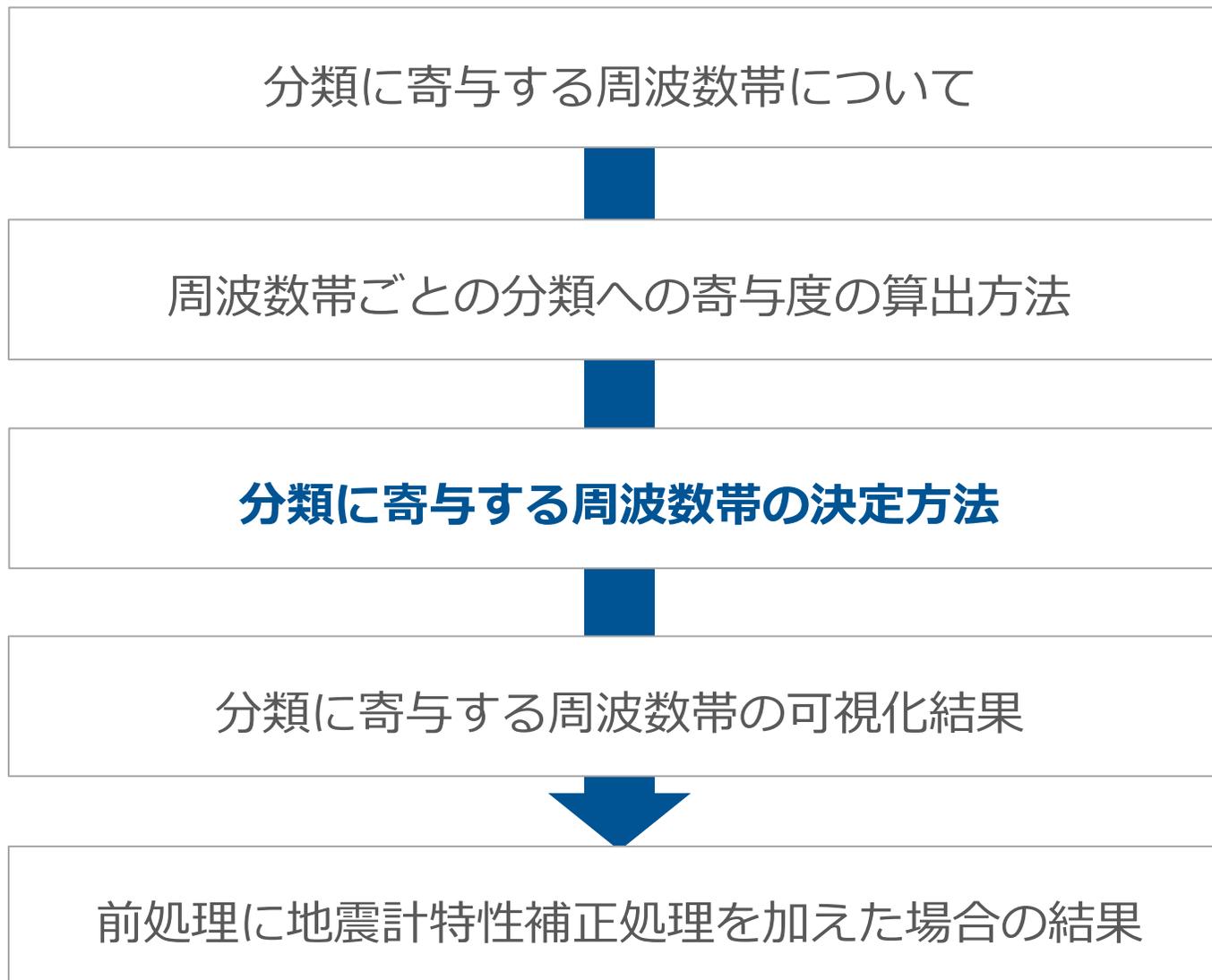
$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{--- ②}$$



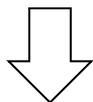
式②のzとpの関係

ロジスティック回帰による特徴量の各次元の分類への寄与度の求め方

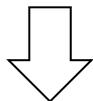
- 分類結果 p の値は、式②の z の値によって決定される。そのため、式①で、重み w_i の絶対値が大きいほど、重み w_i に対応した特徴量の x_i が分類結果への影響が大きく寄与度が高いと考えられる。
- 学習を終えた後の重み w_i の絶対値を特徴量次元 x_i の分類への寄与度とする。



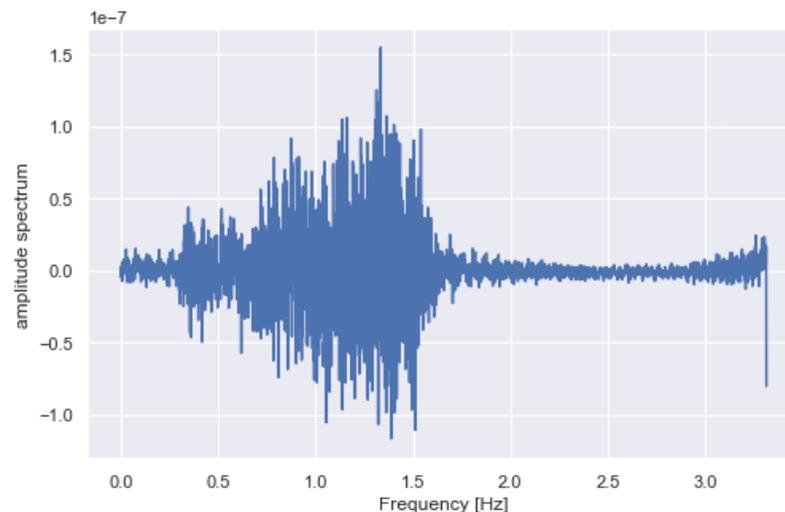
どの点の値 (周波数)
が分類に寄与しているか？



ロジスティック回帰により
周波数ごとの寄与度を算出



**寄与度上位の何点までが
分類に寄与しているか？**



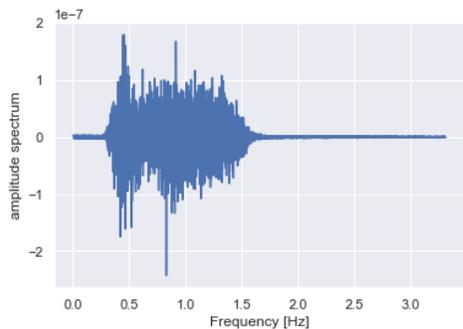
周波数スペクトル

2982点

**どの点の値 (周波数)
が分類に寄与しているか？**

分類に寄与する次元数の決め方

1. 全ての月震データを用いて震源ごとにロジスティック回帰の学習を行い、周波数帯ごとの寄与度を求める。
 2. 寄与度上位 N 点を特徴量として5交差検定を行い、各震源の平均F1値を計算する。
 3. N の値を増やしていき、各震源の平均F1値の8震源での平均値を確認する。
- F1値が上昇しなくなった時の N の値が、分類に寄与する特徴量の次元数と考える。



月震の周波数スペクトル



入力

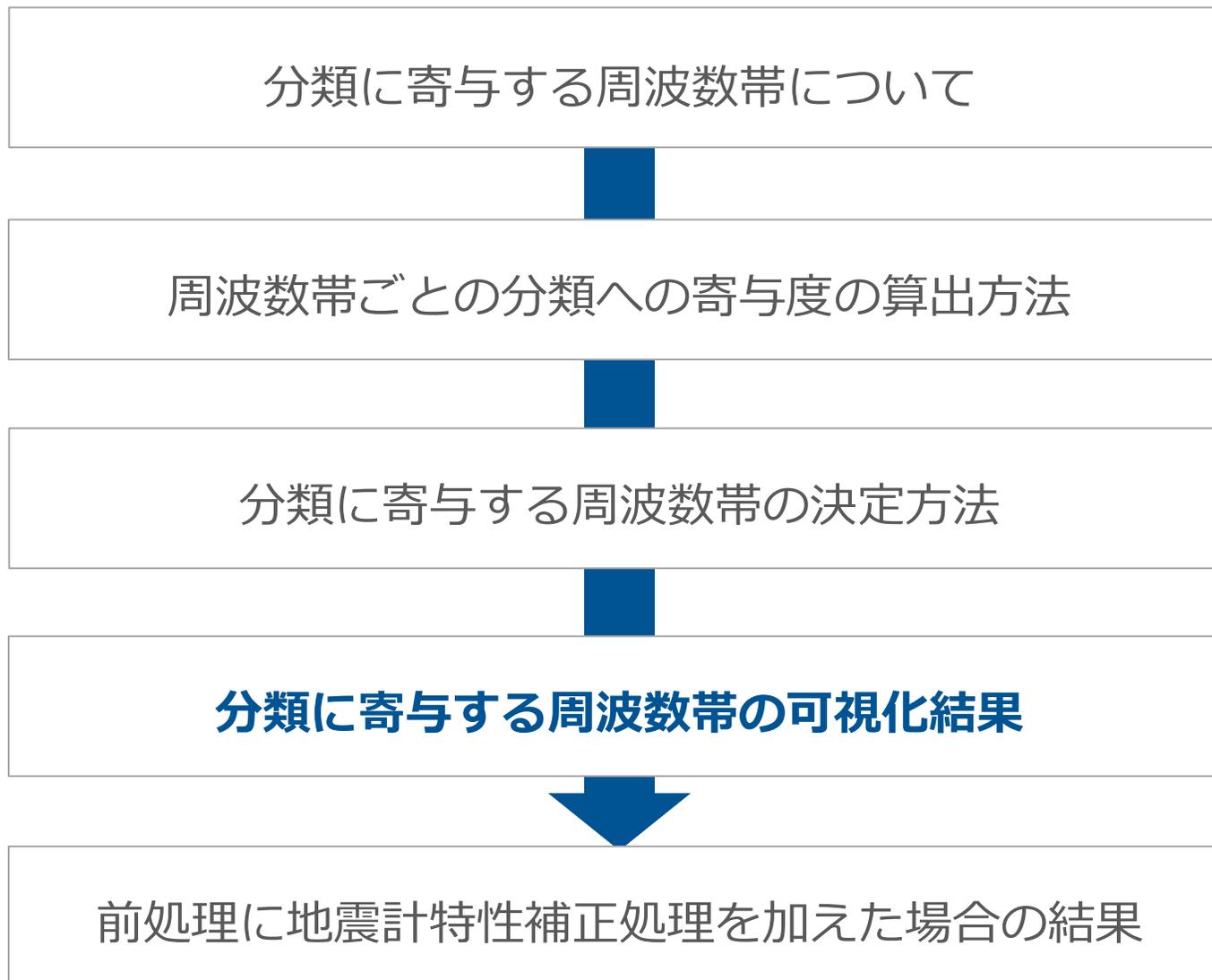


分類器



出力

- A1震源の月震である
- A1震源の月震ではない



- **実験に用いたデータ**

データ数が30件以上の8震源の月震イベントのP波到達から15分(Z軸方向)

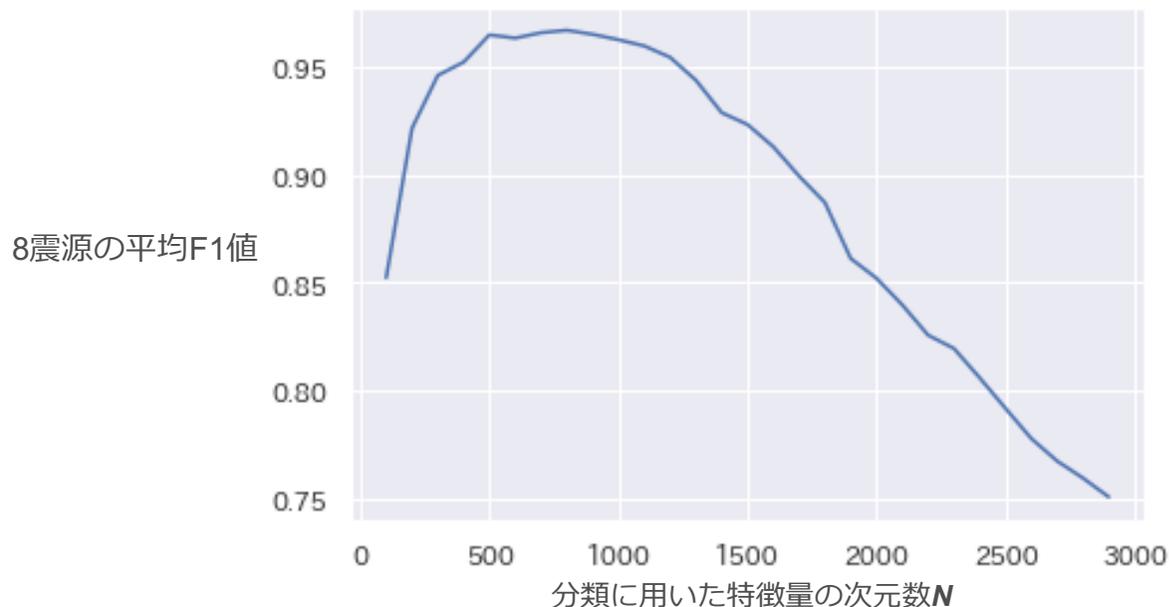
- **前処理**

1. オフセット処理
2. トレンド引き
3. 感度補正
4. バンドパスフィルタ (**0.3Hz~1.5Hz**)
5. デスパイキング処理
6. 標準化

震源	データ数
A1	163
A6	43
A8	35
A9	86
A10	75
A18	83
A20	75
A21	41
合計	596

震源ごとのデータ数

- **特徴量**
 - 周波数スペクトル (2982点)
- **特徴量次元数 N**
 - 寄与度上位100点から2900点まで
 - 100点ずつ増加
 - 特徴量次元数 N に対応した8震源の平均F1値を確認



特徴量次元数Nと平均F1値

実験結果

- 特徴量次元数500点までは、次元数を増やすほど分類性能が向上している。
- 500点以上では、特徴量次元数を増やしていくほど分類性能は低下。
→ 寄与度上位500点までが分類に寄与していると考えられる。

可視化結果

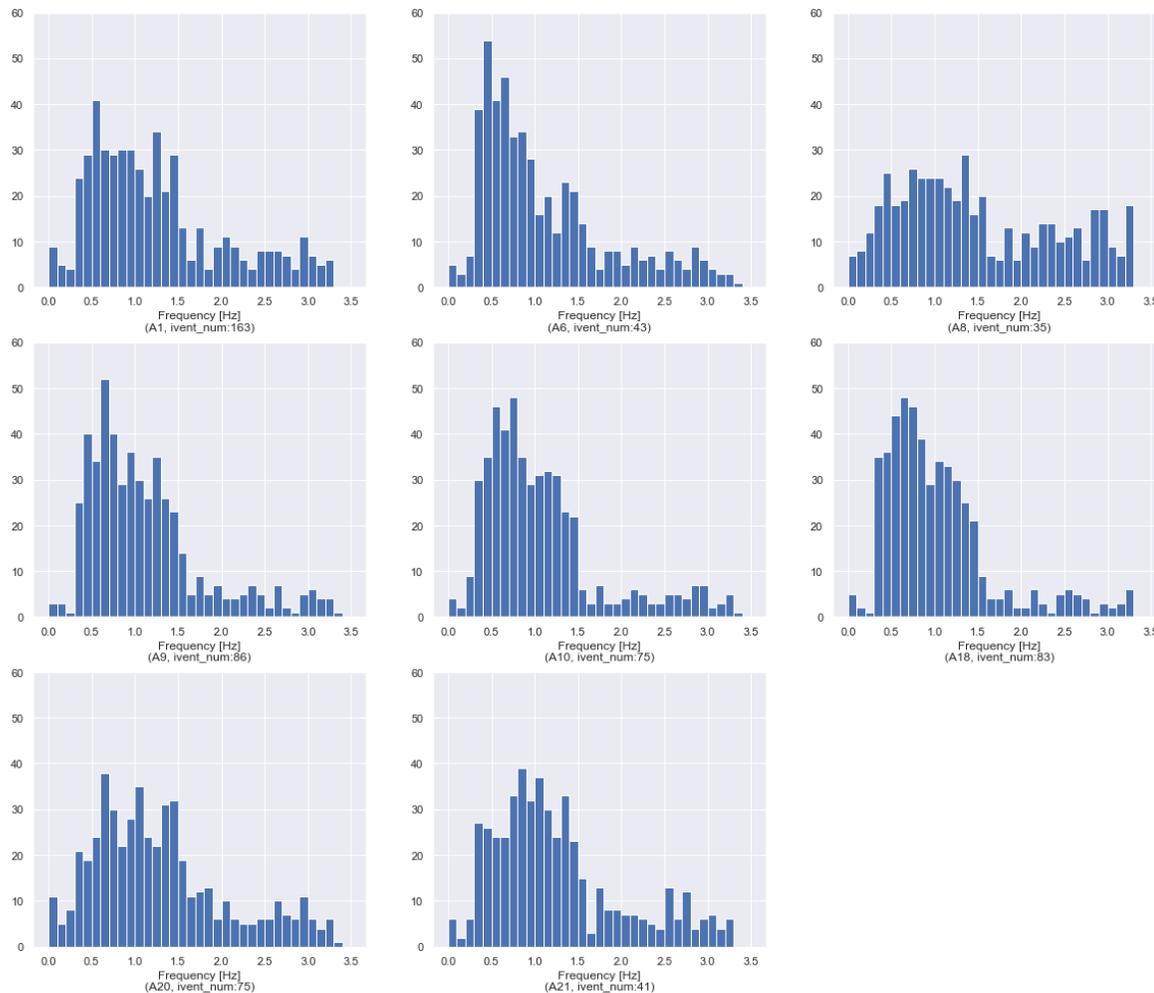
多くの震源で、0.4Hz~0.7Hzに分類に寄与する周波数が存在している。



地震計の周波数特性から、0.4Hz~0.7Hzが高い感度で取得されるためであると考えられる。



地震計の周波数特性の補正を行う処理を前処理で行って可視化する。



震源ごとの分類に寄与する周波数帯の分布
寄与度上位500点 (階級幅0.1Hz)

分類に寄与する周波数帯について

周波数帯ごとの分類への寄与度の算出方法

分類に寄与する周波数帯の決定方法

分類に寄与する周波数帯の可視化結果

前処理に地震計特性補正処理を加えた場合の結果

- **実験に用いたデータ**

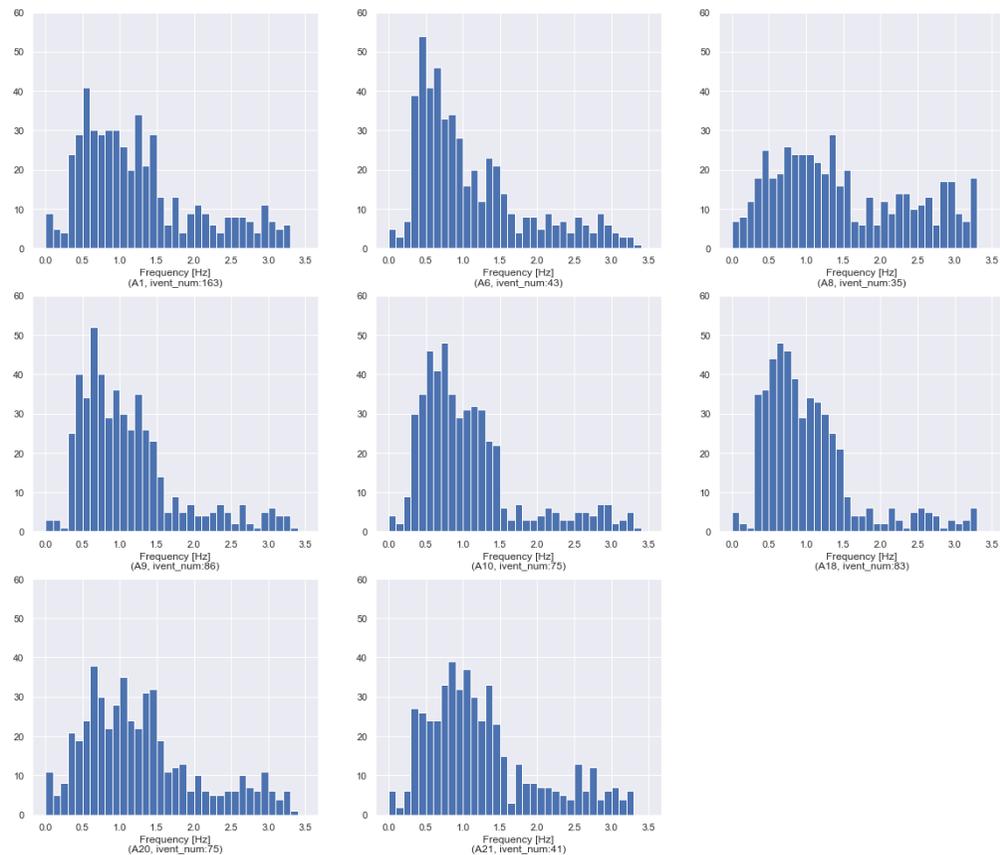
データ数が30件以上の8震源の月震イベントのP波到達から15分(Z軸方向)

- **前処理**

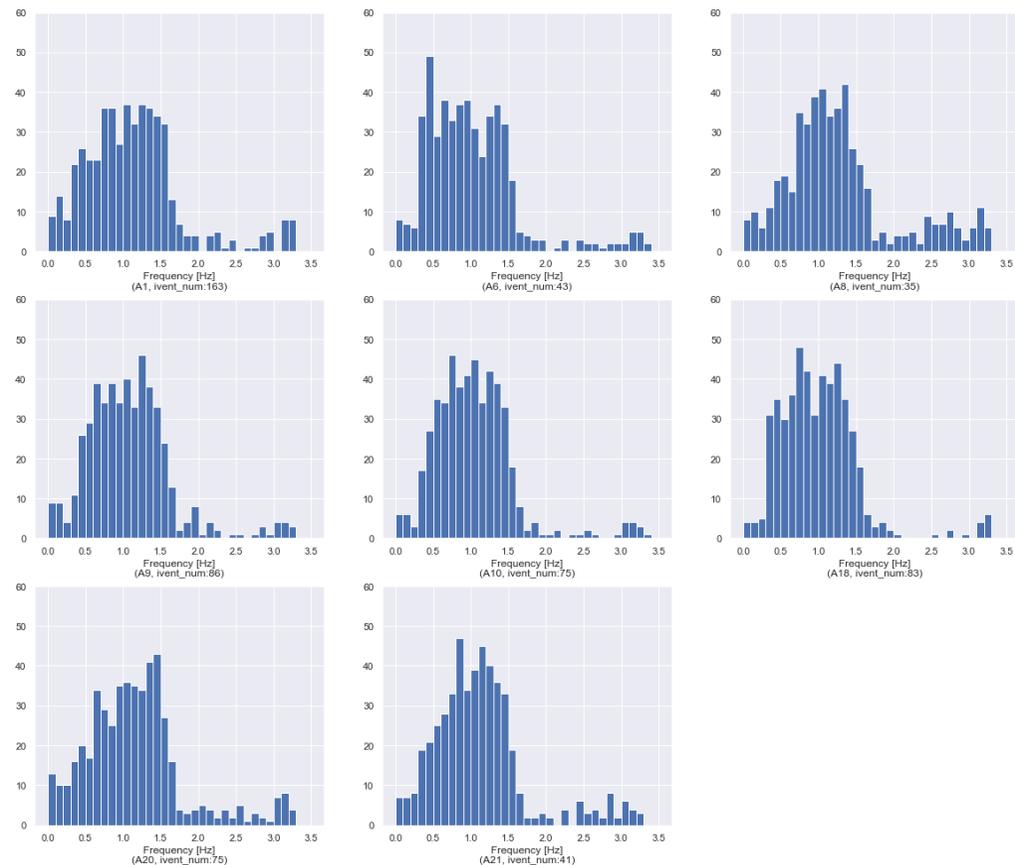
1. オフセット処理
2. トレンド引き
3. 感度補正
4. **(地震計特性補正)**
5. バンドパスフィルタ (**0.3Hz~1.5Hz**)
6. デスパイキング処理
7. 標準化

震源	データ数
A1	163
A6	43
A8	35
A9	86
A10	75
A18	83
A20	75
A21	41
合計	596

震源ごとのデータ数



震源ごとの分類に寄与する周波数帯の分布
地震計特性補正処理なし(階級幅0.1Hz)

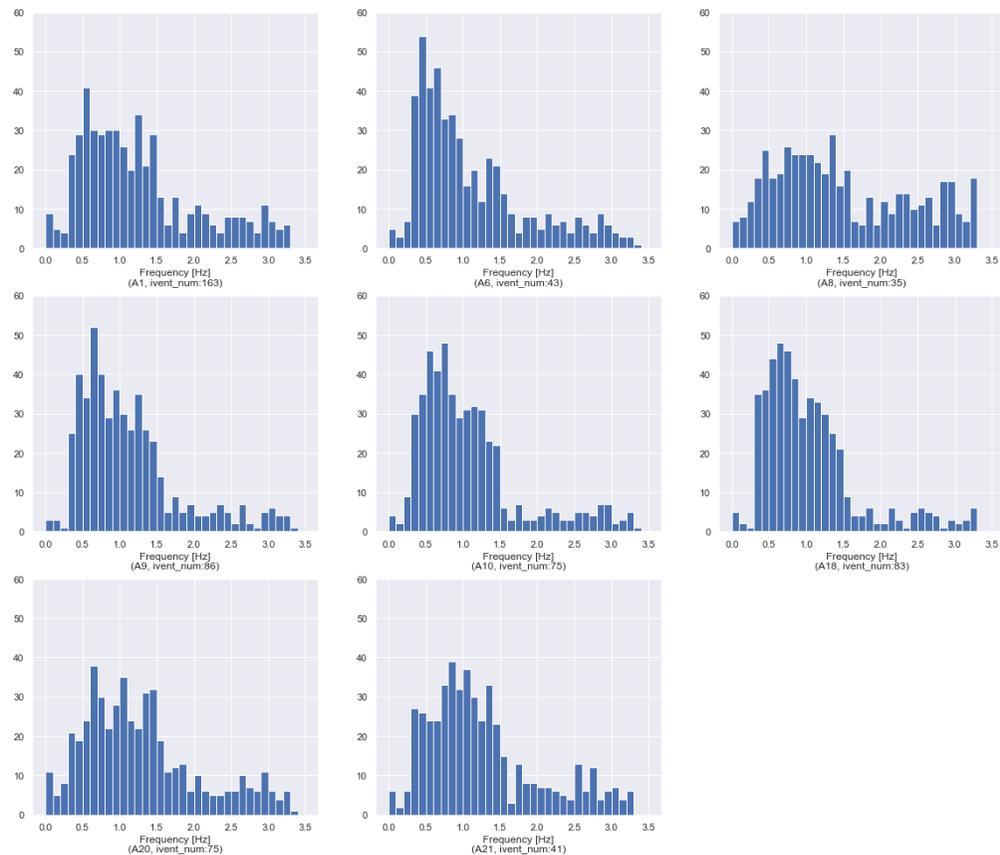


震源ごとの分類に寄与する周波数帯の分布
地震計特性補正処理あり(階級幅0.1Hz)

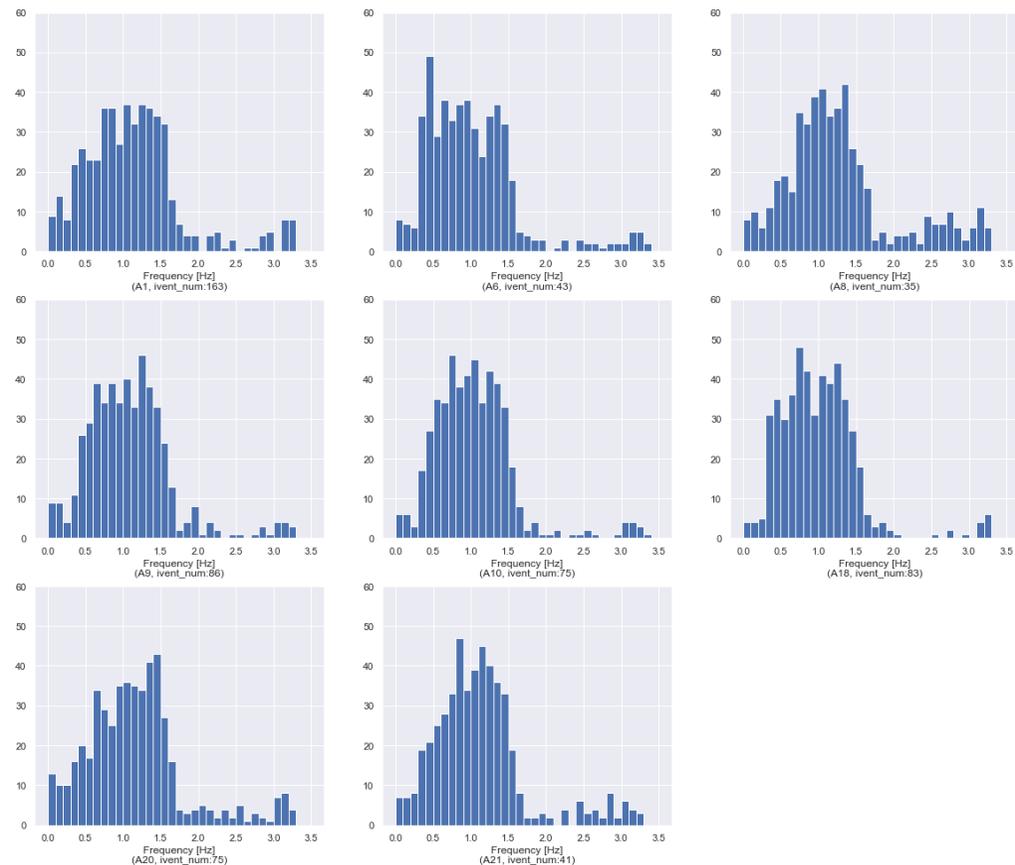
実験結果・考察 ①

地震計特性補正処理を行った場合, 分類に寄与する周波数帯は, 0.3Hz~1.5Hzに多く存在している.

→ 前処理に0.3Hz~1.5Hzのバンドパスフィルタを用いているため, 寄与している周波数帯の妥当性は, 地震計特性補正処理を行った場合の方が高い.



震源ごとの分類に寄与する周波数帯の分布
地震計特性補正処理なし(階級幅0.1Hz)



震源ごとの分類に寄与する周波数帯の分布
地震計特性補正処理あり(階級幅0.1Hz)

実験結果・考察 ②

地震計特性補正処理を行った場合、分類に寄与する周波数帯の分布は、震源ごとにそれぞれ傾向が見られる。しかし、今回の実験結果では、震源ごとの特徴が微弱であり、分布を一般化することは困難。

- 研究背景・目的
- 特徴量, 分類器の月震分類への有効性の確認
- 分類に寄与している周波数帯の可視化
- **まとめ**

- **本発表で行ったこと**

- 周波数スペクトル, ロジスティック回帰の深発月震分類への有効性の検証
- 深発月震の分類に寄与する周波数帯を震源ごとに可視化

- **実験結果**

- 周波数スペクトル, ロジスティック回帰は深発月震の分類に一定の有効性がある.
- 分類に寄与する周波数帯の分布は, 震源ごとにそれぞれ特徴があることを確認.

- **今後の展望**

- データ数の増加や前処理の改良などにより, 分類性能を向上させることで, 分類に寄与する周波数の分布の震源ごとの特徴がより顕著になる可能性がある.