

九州大学大学院理学府  
地球惑星科学専攻  
修士論文

# EE-index を用いた特異型 EEJ の発生特 性の解明

(宇宙天気データベースシステムの開発に向けて)

Elucidation of the occurrence characteristics of peculiar EEJ  
using the EE-index

Towards the Development of a Space Weather Database System

2SC24221P  
宇宙地球電磁気学研究分野  
菊池 裕夢

## 目次

1	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	特異型 EEJ 研究の現状と課題	4
1.3	本研究の目的	4
1.4	本論文の構成	4
2	導入	4
2.1	MAGDAS 観測網の概要	4
2.2	INTERMAGNET および TTB データ	4
2.3	地磁気日変化と $S_q$ 電流	6
2.4	赤道ジェット電流 (EEJ)	6
2.5	磁気赤道域における潮汐効果の関係	6
3	EE-index	6
3.1	EE-index の定義	6
3.2	EE-index 算出に用いるデータ	7
3.3	EE-index の算出方法	8
3.4	EE-index 精度向上方法	8
4	特異型 EEJ と自動判定の手法	9
4.1	特異型 EEJ とは	9
4.2	未発達型・突発型	9
4.3	特異型 EEJ の自動判定の手法	9
5	結果: 特異型 EEJ の発生特性	9
5.1	解析条件および対象期間	9
5.2	南米領域（ペルー・ブラジル）の解析結果	9
5.3	ブラジル領域における解析結果	10
6	考察	10
6.1	南米領域における特異型 EEJ 発生要因	10
6.2	季節依存性との関連性	10
6.3	潮汐効果との関連性	10
7	宇宙天気データベースシステムへの応用	10

## 目次

---

7.1	システム開発の目的 . . . . .	10
7.2	システム全体構成 . . . . .	10
7.3	開発手法 . . . . .	12
7.4	環境構築・ドキュメント . . . . .	12
7.5	今後の課題 . . . . .	13
8	<b>総括</b>	<b>14</b>

## 要旨

# 1 序論

## 1.1 研究背景

2008 年、九州大学国際宇宙天気科学・教育センター (ICSWSE) は、赤道ジェット電流 (Equatorial Electrojet: EEJ) をモニタリングするための指標として、MAGDAS/CPMN 観測網のデータを用いた EE-index を提案した [1]。EE-index は、赤道域の磁場変動を全球的な変動成分と局所的な変動成分に分離し、様々な電磁気現象を定量的にリアルタイムで監視することを目的としている。

EE-index は、EDst (Equatorial Disturbance storm time) 指数と EUEL (EE-index UEL) 指数の 2 つの部分から構成される。EDst は、赤道域における全球的な磁場変動を表しており、主に磁気嵐時のリングカレントや磁気圏界面電流の影響および磁気圏極域擾乱の一部を含む。一方、EUEL は観測点直上の EEJ や Sq 電流による局所的な磁場変動を表す。

Fujimoto et al. (2016) [2] により、観測点数の増加や緯度補正の導入といった改良が加えられ、長期的な解析が可能となった。本研究では、この改良された EE-index を用いて解析を行う。EE-index の具体的な定義や改良手法の詳細については、第 3 章で述べる。

## 1.2 特異型 EEJ 研究の現状と課題

## 1.3 本研究の目的

## 1.4 本論文の構成

# 2 導入

## 2.1 MAGDAS 観測網の概要

MAGDAS とは、九州大学国際宇宙惑星環境研究センターを中心に運用されている、世界最大規模の地上多点地磁気観測ネットワークである。磁気赤道および磁気子午線  $210^\circ$  に沿って南北半球に磁力計とデータ収集システムを高密度に配置し、観測された磁場データはリアルタイムで送信されている。これにより、地磁気主磁場とダイナモ作用に起因する Sq 場などの全球的磁場現象について、その緯度構造や長期・短期変動を解析することが可能である (図 1)。

## 2.2 INTERMAGNET および TTB データ

INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) は、地球磁場の変動をリアルタイムかつ高精度に監視し、データを提供することを目的とした国際的な地磁気観測所ネットワークである。1980 年代後半に設立され、世界各国の研究機関や大学が参加している。INTERMAGNET に参加する観測所 (IMO: International Magnetic Observatory) は、測定機器やデータ処理に関して厳格な技術標準を遵守しており、これによりデータの品質と互換性が保た

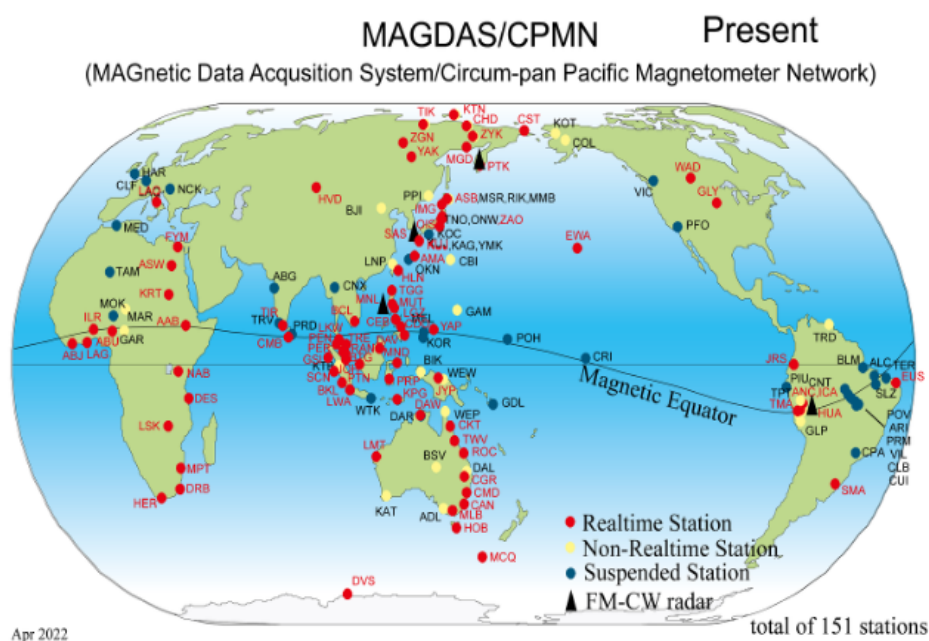


図1 MAGDAS 観測網

れている。観測データは、標準的なデータ交換フォーマットである IAGA-2002 形式などで記録され、地域の GIN (Geomagnetic Information Node) と呼ばれるデータセンターに集約された後、科学コミュニティや商業利用のために公開されている。

本研究において解析対象とする TTB データは、INTERMAGNET の観測所であるブラジルの Tatuoca 観測所 (IAGA コード: TTB) で取得されたものである。(表 1) この観測所は磁気赤道の非常に近くに位置しているため、昼側の磁気赤道上空の電離圏 E 層を流れる強力な電流系である赤道ジェット電流 (Equatorial Electrojet: EEJ) の影響を直接的に観測することができる。そのため、TTB データは EEJ の強度変動やその構造を研究する上で極めて重要な指標となる。INTERMAGNET の高品質なデータ標準により、微細な磁場変動の解析や長期的な傾向の把握が可能となっている。

表1 Tatuoca (TTB) 観測所の詳細

Code	Name	GG.Lat	GG.Lon	Dip.Lat
TTB	Tatuoca	-1.23	-48.51	-0.72

## 2.3 地磁気日変化と Sq 電流

## 2.4 赤道ジェット電流 (EEJ)

磁気赤道域で観測される地上磁場変動において、最も優勢な現象が赤道ジェット電流 (Equatorial ElectroJet: EEJ) によるものである。EEJ は昼側の磁気赤道電離圏を東向きに流れる電流で、それによる H 成分の磁場変動は最大で +200 nT 程度にもなる。一方、西向きのジェット電流によって H 成分が減少する変動も見られる。これは赤道カウンタージェット電流 (Equatorial Counter ElectroJet: CEJ) と呼ばれている。CEJ による磁場変動は明け方や夕方に見られることが多い。

磁気赤道域電離圏特有のカウリング効果 (Cowling Effect) がある。これは、赤道域では地球の磁力線が地平に対して水平になることから生まれる効果である。カウリング効果は磁気赤道を中心に非常に狭い緯度範囲でしか効かないため、EEJ や CEJ が流れるのも磁気緯度で  $\pm 3$  度以内の範囲だと言われている。

EEJ や CEJ が流れるためには電離圏電気伝導度が高いことに加え、外部から電場が印加される必要がある。太陽風と磁気圏の相互作用で生まれる電場 (太陽風中電場) の他にも、電離圏のプラズマと中性大気の相互作用によって大気が太陽によって温められて膨張し、最も温められる赤道正午付近から放射状に流れ出す際、プラズマを引きずりながら磁力線の間を移動することによって生じる。荷電粒子が磁場の中を移動することで起電力が生じ、この起電力によって北半球では反時計回り、南半球では時計回りの電流系 (Sq 電流系) が形成される。Sq 電流系は中緯度での磁場の日変化パターンを作る主要な要素である。ダイナモ電場によって朝側にはプラス、夕側にはマイナスのチャージが溜まる。このチャージによって東向きの電場が磁気赤道域に印加される。EEJ や CEJ の変動を注視することで、磁気赤道電離圏や電離圏・大気圏相互作用の状態を監視することが可能である。

## 2.5 磁気赤道域における潮汐効果の関係

# 3 EE-index

## 3.1 EE-index の定義

EE-index は、磁気赤道付近の短期的・長期的な変動をリアルタイムでモニターすることを目的として九州大学が提案した新しい地磁気指標である [1]。EE-index の算出には磁気赤道域 MAGDAS 観測点のデータが使用される。MAGDAS には、観測したデータをリアルタイムで転送するシステムが備わっているため、磁気赤道域で観測されたデータをすぐに解析指数化し、その時々宇宙の状態を速報することが可能である。EE-index は EDst と EUEL の 2 つの指数から構成される。EDst はグローバルな擾乱成分で Dst の代用として利用することが出来る。EUEL は特定の地点でのみ変動するローカルな擾乱成分を指す。EU は東向きのローカルな等価電流、EL は西向きの

ローカルな電流による変動に相当する。これらの指数を算出することで赤道域の磁気擾乱のスケールの定量化が可能になる。

### 3.2 EE-index 算出に用いるデータ

EE-index の算出には、九州大学が中心となって運用している MAGDAS プロジェクトの磁力計ネットワーク観測データを用いて行う。本研究で使用する観測点の一覧を表 2 に示す。

表 2: EE-index 算出に使用する観測点一覧

Code	Name	GG.Lat	GG.Lon	GM.Lat	GM.Lon	Dip.Lat
AAB	Addis Ababa	9.04	38.77	5.41	112.54	1.21
ABU	Abuja	8.99	7.39	-0.54	81.31	-3.36
AMA	Amami Oshima	28.17	129.33	21.11	200.88	23.39
ANC	Ancon	-11.77	-77.15	-2.11	355.57	0.13
BCL	Bac Lieu	9.32	105.71	-0.36	178.36	2.50
BKL	Bengkulu	-3.80	102.31	-15.13	173.60	-13.64
CDO	Cagayan De Oro	8.46	124.63	-0.80	197.06	1.41
CEB	Cebu	10.36	123.91	1.06	196.26	3.59
DAV	Davao	7.00	125.40	-2.22	197.90	-0.27
DAW	Darwin	-12.41	130.92	-21.91	202.81	-22.40
EUS	Eusebio	-3.88	-38.43	4.14	34.21	-9.41
EWA	Ewa Beach	21.32	-158.00	21.63	269.45	21.37
GSI	Gunung Sitoli	1.30	97.58	-8.25	170.10	-7.65
HLN	Hualien	23.90	121.55	16.86	193.05	19.37
HUA	Huancayo	-12.02	-75.29	-2.34	357.39	-0.17
ICA	Ica	-14.09	-75.74	-4.42	356.97	-2.07
ILR	Ilorin	8.50	4.68	10.50	78.90	-4.16
KRT	Khartoum	15.33	32.32	12.64	107.27	7.91
LAG	Lagos	6.48	3.27	-3.04	75.33	-6.93
LGZ	Legazpi	13.15	123.74	3.84	195.96	6.76
LKW	Langkawi	6.30	99.78	-3.30	172.44	-1.41
LWA	Liwa	-5.02	104.06	-16.19	175.33	-14.99
MND	Manado	1.44	124.84	-7.80	197.63	-6.50
MUT	Muntinlupa	14.37	121.02	4.95	193.26	8.32
NAB	Nairobi	-1.16	36.48	-10.65	108.18	-12.23
PRP	Pare Pare	-3.60	119.40	-12.38	190.75	-12.23



Code	Name	GG.Lat	GG.Lon	GM.Lat	GM.Lon	Dip.Lat
SCN	Sicincin	-0.55	100.30	-10.16	172.81	-9.78
TGG	Tuguegarao	17.66	121.76	10.26	193.05	12.06
TIR	Tirunelveli	8.70	77.80	0.25	150.80	1.74
YAP	Yap Island	9.50	138.08	1.14	210.25	1.97

### 3.3 EE-index の算出方法

EE-index の算出には、磁気赤道域に設置された観測点で得られた地磁気水平成分（H 成分）のデータを用いる。まず、各観測点  $s$  における H 成分  $B_{H,s}$  について、1 日間のデータの中央値を基準値（ゼロレベル）として定義し、その基準値からの偏差を  $ER_s$  とする。 $ER_s$  は以下の式で表される。

$$ER_s(t) = B_{H,s}(t) - \text{median}(B_{H,s})_{1\text{day}} \quad (1)$$

ここで、 $t$  は時刻を表す。次に、全球的な擾乱成分である EDst (Equatorial Disturbance storm time) を算出する。赤道域の夜側（一般に 18:00 - 06:00 LT）では、電離圏の電気伝導度が昼側に比べて著しく低下するため、電離圏起源の局所的な電流系による磁場変動は無視できる程度となる。したがって、夜側に位置する観測点の磁場変動は、主にリングカレントや磁気圏界面電流といった全球的な磁気圏起源の変動を反映していると考えられる。そこで、夜側（18:00 - 06:00 LT）に位置する全観測点の  $ER_s$  の平均値をとり、これを EDst と定義する。

$$EDst(t) = \frac{1}{N_{\text{night}}} \sum_{s \in \text{Night}} ER_s(t) \quad (2)$$

ここで、 $N_{\text{night}}$  は当該時刻において夜側に位置する観測点の総数である。

最後に、各観測点の  $ER_s$  からこの EDst を差し引くことで、全球的な変動成分を除去し、局所的な変動成分（主に EEJ や Sq 電流に起因するもの）を抽出する。

$$EUEL_s(t) = ER_s(t) - EDst(t) \quad (3)$$

これにより、観測点直上の電離圏電流に起因する磁場変動成分を定量的に評価することが可能となる。

### 3.4 EE-index 精度向上方法

Uozumi et al. (2008) [1] は、MAGDAS/CPMN 観測網のリアルタイムデータを用いて、赤道ジェット電流（EEJ）の短期的および長期的な変動を監視するための新しい指標として EE-index

## 5 結果: 特異型 EEJ の発生特性

---

を提案した。この初期の手法では、磁気赤道域の夜側（18-06 LT）にある観測点の水平成分磁場変動の平均値を EDst（Equatorial Disturbance in Storm Time）として定義していた。EDst は Dst 指数の代替として機能し、各観測点の H 成分から EDst を差し引くことで、局所的な EEJ 成分（EU）およびカウンターエレクトロジェット（CEJ）成分（EL）を抽出することが可能である。しかし、初期の研究段階では利用可能な夜側観測点の数が限られており、EDst の算出精度が観測点配置の制約を受けるという課題があった。

これに対し、Fujimoto et al. (2016) [2] では、長期的な EEJ 変動解析に耐えうるよう、EE-index に更なる改良が加えられた。主な改良点は、EDst の算出に使用する観測点数の増加（4 観測点から 30 観測点へ）と、緯度補正の導入である。

改良版では、全経度をカバーする観測点を使用することで、より高精度に全球的な変動を見積もることが可能となった。また、太平洋地域など赤道直下に観測点が存在しない経度帯における精度向上のため、低緯度観測点（磁気緯度  $\pm 25^\circ$  以内）のデータを用いて赤道上の磁場強度を推定する手法が導入された。具体的には、観測された水平成分磁場  $H_{obs}$  と磁気緯度  $\Phi$  を用いて、赤道上の磁場強度  $H_{dip}$  を以下の式で推定する。

$$H_{dip} = \frac{H_{obs}}{\cos \Phi} \quad (4)$$

この補正により、赤道直下に観測点がない経度でも、近隣の低緯度観測点から EDst の算出に必要なデータを補完することが可能となり、EDst の算出精度が向上した。これらの改良により、EE-index は地磁気静穏時だけでなく、磁気嵐時などの地磁気擾乱時においても、赤道域の磁場変動を定量的に評価できる指標となっている。

## 4 特異型 EEJ と自動判定の手法

### 4.1 特異型 EEJ とは

### 4.2 未発達型・突発型

### 4.3 特異型 EEJ の自動判定の手法

ここに結果 1 を書く。

## 5 結果: 特異型 EEJ の発生特性

### 5.1 解析条件および対象期間

### 5.2 南米領域（ペルー・ブラジル）の解析結果

ここに結果 2 を書く。

### 5.3 ブラジル領域における解析結果

## 6 考察

### 6.1 南米領域における特異型 EEJ 発生要因

### 6.2 季節依存性との関連性

### 6.3 潮汐効果との関連性

## 7 宇宙天気データベースシステムへの応用

### 7.1 システム開発の目的

本章では、宇宙天気データベースシステムの開発について述べる。システム開発の主な目的は、以下の3点である。第一に、近年高まりを見せる宇宙天気のリアルタイム監視への需要に応えることである。第二に、本研究で算出される EE-index を広く研究者コミュニティ等へ公開することである。そして第三に、本研究で構築した手法を用いて特異型 EEJ をリアルタイムで検知する機能を実装することである。迅速な状況把握とデータ共有は、宇宙天気予報の精度向上や関連研究の発展に寄与するものであり、本システムはその基盤を提供するものである。

### 7.2 システム全体構成

本章では、本システムの全体構成および採用した技術スタックについて述べる。

#### 7.2.1 全体構成とリポジトリ運用の工夫

本システムの開発プロジェクトは、フロントエンドとバックエンドを単一のリポジトリで管理するモノレポ（Monorepo）構成を採用している。図2にシステムの全体構成図を示す。ユーザーはWebブラウザを通じてシステムにアクセスし、フロントエンドがバックエンドのAPIを利用してMAGDAS観測データを取得・表示する構成となっている。

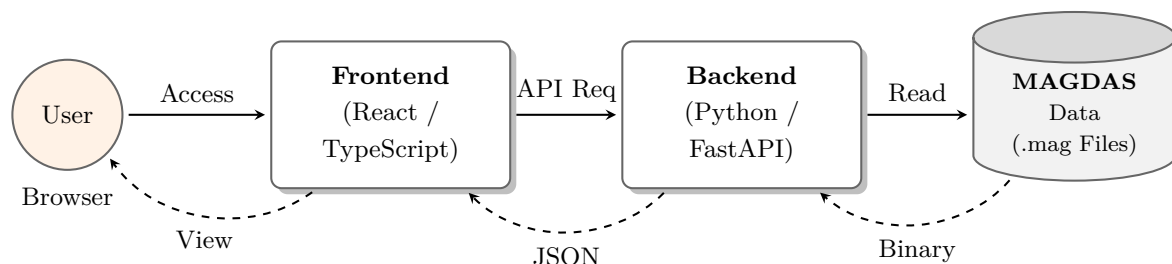


図2 システム全体構成図

また、本研究ではシステム開発としての品質維持と、研究活動としての柔軟な試行錯誤を両立させる必要がある。そのため、プロジェクト内に‘dev’ディレクトリを設け、研究目的の実験的なコードや解析アルゴリズムのプロトタイプ実装はここに配置する運用とした。これにより、研究開発のスピードを落とすことなく、本番稼働システムのコードベースをクリーンに保つことが可能となっている。

### 7.2.2 バックエンド設計

バックエンドの実装においては、保守性と拡張性を高めるため、レイヤードアーキテクチャを採用し、責務を以下の4層に分離している。

- **Handler 層:** クライアントからの HTTP リクエストを受け付け、Usecase 層へ処理を委譲し、その結果をレスポンスとして返却する。
- **Usecase 層:** アプリケーション固有のビジネスロジックを実装し、具体的な処理の流れを制御する。
- **Service 層:** 数値計算やデータ加工などのドメイン固有の計算処理（ビジネスロジック）を担当する。本層で実装されたロジックは、本番稼働システムだけでなく、前述の‘dev’層での統計解析においても共通して利用される。これにより、研究成果をスムーズにシステムへ反映することが可能となっている。
- **Repository 層:** データソース（ファイルシステム上の.mag ファイル）へのアクセスを抽象化し、データの取得処理を一元管理する。

### 7.2.3 技術スタック

本システムの開発および運用環境として、以下の技術スタックを選定した。

- **バックエンド:** Python, FastAPI
- **フロントエンド:** TypeScript, React, Tailwind CSS
- **データベース (データソース):** 研究室サーバー上の.mag ファイル (独自フォーマット)
- **実行環境:** オンプレミスサーバー

バックエンドに Python (FastAPI) を採用した主な理由は、数値計算ライブラリが充実しており、システム開発と並行してデータ解析を効率的に行える点にある。Python は科学技術計算の分野で広く利用されており、本研究においてもデータの一次処理や解析アルゴリズムの実装に適している。また、Matplotlib 等の描画ライブラリが豊富であるため、解析結果の可視化や検証も円滑に行うことができ、研究活動とシステム開発の相互運用性を高める上で最適な選択であるといえる。

### 7.3 開発手法

本研究におけるシステム開発では、効率性と品質を担保するために、モダンな開発フローとツールチェーンを採用している。具体的には、バージョン管理システムによるソースコード管理、パッケージマネージャーによる依存関係の解決、そして Makefile によるタスクの自動化を行っている。また、開発環境と本番環境の乖離を防ぐため、Docker コンテナ技術を積極的に活用している。詳細な環境構築手順および運用方法については、次節「7.4 環境構築・ドキュメント」にて詳述する。

### 7.4 環境構築・ドキュメント

本プロジェクトでは、macOS 環境での開発を前提とし、以下の手順で開発環境を構築する。なお、本節に記載する情報は 2026 年 2 月時点のものである。macOS におけるパッケージ管理を簡便に行うため、各種開発ツールのインストールには Homebrew の利用を推奨する。

#### 7.4.1 必要なツールのインストール

まず、以下の開発ツールを導入する。

- **Homebrew:** macOS のパッケージ管理ツール。
- **Git:** ソースコード管理ツール。
- **Docker:** コンテナ仮想化プラットフォーム。
- **uv:** 高速な Python パッケージマネージャー（バックエンド用）。
- **Node.js:** JavaScript 実行環境（フロントエンド用）。

#### 7.4.2 プロジェクトのセットアップ

リポジトリをクローンした後、プロジェクトルートで以下のコマンドを実行することで、初期セットアップが完了する。

```
git clone https://github.com/kikudesuyo/magdas
cd magdas
make init
```

`make init` コマンドにより、バックエンドの依存ライブラリ (`uv sync`) およびフロントエンドの依存ライブラリ (`npm install`) が一括でインストールされる。

#### 7.4.3 データ管理

解析用の観測データ (`.mgd` ファイル等) はリポジトリには含めず、ローカル環境の `backend/Storage` ディレクトリに個別に配置する運用としている。これにより、機密性の高い

## 7 宇宙天気データベースシステムへの応用

---

データや容量の大きなデータを Git 管理から除外しつつ、開発環境で本番同様の解析フローを再現することを可能にしている。

### 7.4.4 アプリケーションの起動

開発時のアプリケーション起動方法は、以下の 2 パターンを用意している。

#### 1. Docker での一括起動（推奨）：

make up コマンドを実行することで、バックエンドとフロントエンドをコンテナとして一括起動する。実環境との差異が少なく、手軽に動作確認を行うことが可能である。コンテナ起動後は、以下の URL でアクセス可能となる。

- フロントエンド: <http://localhost:5173>
- バックエンド API: <http://localhost:8000>

#### 2. ローカルでの個別起動:

デバッグ等の目的で、各サービスを個別に起動する場合に使用する。

**バックエンド起動:**

```
make be-dev
```

**フロントエンド起動:**

```
make fe-dev
```

## 7.5 今後の課題

2026 年 2 月現在、本システムにはパフォーマンスおよびスケーラビリティ、開発プロセスの観点でいくつかの課題が残されている。主な課題は以下の 3 点である。

#### 1. EE-index 算出処理の効率化

EE-index の算出結果は入力データが同一であれば常に同じ値となる（冪等性を持つ）にもかかわらず、本システムではリクエストの度に毎回算出処理を行っている。これにより、レスポンスタイムが著しく遅延する原因となっているため、計算結果の再利用が求められる。

#### 2. データ管理とキャッシュ機構の導入

現状ではデータベースマネジメントシステムを使用せず、ファイルシステム上のデータを直接読み込んで処理を行っている。また、頻繁にアクセスされるデータに対するキャッシュ機構も導入されていない。今後トラフィックが増加した場合、サーバー負荷の増大や応答速度の低下が懸念されるため、効率的なデータ管理基盤の構築が必要である。

#### 3. CI/CD 環境の整備

現状、オンプレミス環境へのデプロイ作業は手動で行われており、更新のたびに手間とリス

クが伴う。システムの安定稼働と迅速な機能改善を実現するためには、コードの変更を検知し、自動でビルド・テスト・デプロイを行う CI/CD（継続的インテグレーション・継続的デリバリー）環境の構築が不可欠である。

## 8 総括

ここに総括を書く。

## 参考文献

- [1] Teiji Uozumi, Kiyohumi Yumoto, Kentarou Kitamura, Shuji Abe, Yoshihiro Kakinami, Manabu Shinohara, Akimasa Yoshikawa, Hideki Kawano, T. Ueno, T. Tokunaga, D. McNamara, Jose K. Ishituka, S. L. G. Dutra, B. Damtie, V. Doumbia, O. Obrou, A. B. Rabiou, I. A. Adimula, M. Othman, M. Fairos, R. E. S. Otadoy, and MAGDAS Group. A new index to monitor temporal and long-term variations of the equatorial electrojet by magdas/cpmn real-time data: Ee-index. *Earth, Planets and Space*, 60:785–790, 2008.
- [2] Akiko Fujimoto, Teiji Uozumi, Shuji Abe, Hiroki Matsushita, Shun Imajo, Jose K. Ishituka, and Akimasa Yoshikawa. Long-term eej variations by using the improved ee-index. *Sun and Geosphere*, 11(1):37–47, 2016.