

AI搭載の学習者レベルに合わせた出題を可能にする デジタル教材に関する研究

The development of an AI-powered learning application that selects questions based on learner level

次世代教育学部教育経営学科

木戸 和彦

KIDO, Kazuhiko

Department of Management for Education
Faculty of Education for Future Generations

東海大学国際教育センター

橋本 信一

HASHIMOTO, Shinichi

Tokai University International Education Center

次世代教育学部教育経営学科（通信教育課程）

武田亜希子

TAKEDA, Akiko

Department of Management for Education
Faculty of Education for Future Generations
(Distance Education Division)

秋田県立大学総合科学教育研究センター

岡崎 弘信

OKAZAKI, Hironobu

Akita Prefectural University Research and
Education Center

キーワード：ニューラルネットワーク, AI, デジタル教材, ターケンスの埋め込み定理, e-ラーニング

Keywords : Neural Network, Artificial Intelligence, Digital learning materials, Takens' Embedding Theorem, e-Learning

Abstract : This paper introduces the development of a supplemental learning material application for a digital textbook which aims to increase the basic academic ability of a learner by fostering independent self-study skills. This application is powered by an AI (Artificial Intelligence) which utilizes Deep Learning to determine the academic level of the learner and automatically selects questions that are appropriate to that level.

1. はじめに

2020年初頭から流行し始めたコロナウイルスの影響により、学校教育現場においても多大な混乱が生じた。大学関連の機関においては、各大学で対応が異なるが、半年程度で、オンライン授業を展開できる状況となってきた。

しかし、小中高等学校においては、国が着手し始めたGIGAスクール構想の途中段階であり、一人1台のPCまたはタブレット、さらに校内のインターネットやWi-Fiの環境整備が整わない中でのオンライン化となり、混乱が生じている。

特に懸念されるのが、児童・生徒の「学びの質保証」の問題である。

学びの質保証については、平成20年に中央教育審議会から出された答申、「学士課程教育の構築に向けて」

では、「学習成果（ラーニング・アウトカム）」という言葉を使いながら「我が国の大きな問題の一つ」として「質の維持・向上」を求めている。「学習成果」とは、学習期間終了時に、学習者が知り、理解し、行い、実演できることを期待される内容を言明したものであるが、これは「対面授業」を想定した場合のことである。今後も対面授業が中心ではあるが、オンラインとの併用が予測される。

そこで、本論文では、コロナ終息後も加速されるであろう教科書や教材のデジタル化に注目し、デジタル教材の開発についての研究を進め、具体的なソフトウェアを提案し、その手法、有効性、必要性について教育的視点から論じる。

2. 先行研究

昨今、デジタル教科書の類は様々な出版社により、発行されている。開発速度や研究は目覚ましく、学習結果の統計処理も当たり前のように行われている。しかし、これまでは学習成果の妥当性や統計上の数値の捉え方などに焦点をあてたものが多く（清水2005）^[1]、（清水、他2003）^[2]、どれを取っても、“既存の紙媒体の教科書をデジタル化しただけ”であり、デジタル化のメリットを十分に取り入れられていない。そのことにより、使用する者にとってあまり興味を惹かれない作りとなっていることが多い。

一方、ニューラルネットワークやAIを用いたデジタル教材に関する研究は少なく。これから発展していくことが予想される。

我々もこれまでに、様々なデジタル教材を開発してきた^{[3][4][5][6]}。しかし、他の教材と同様に、予め用意したデータベースをもとに、乱数を生成しランダムに出題することまで留まっていた。

本研究では、我々がこれまでに開発してきたeラーニングプログラムをもとに、一般的に良く知られている誤差逆伝搬法（Back Propagation Method：以下、BP法と呼ぶ）を用いたニューラルネットワークを組み込んだ、Artificial Intelligence（人工知能：以下AIと呼ぶ）を使い、学生や学習者の学力等を判別し、それに見合った問題を自動生成・出題することを可能にしようとするものである。

本デジタル教材は、学力向上を促すのみならず、学習意欲の向上を求める教育界の要望にも合致するものであり、我が国の国際的競争力の増進にも波及するものと考えられる。このようなデジタル教科書補助アプリは国内外にはほとんど存在せず、非常に独創的であり、学術的に高い意味を持つであろう。

本研究が、今後のデジタル教材開発の分野の先駆けとなればと考えている。

3. 研究目的

本研究では、学生の自立学習を促し、基礎学力を含めた学力向上を目指すためのデジタル教材の開発である。本教材（以下、アプリと呼ぶ）は、AIのDeep Learning機能を搭載し、学生や学習者の学力等を判別し、それに見合った問題を自動生成・出題することを可能にするものである。

デジタル教科書については、文部科学省より2019年

4月1日付にて、「学習者用デジタル教科書」の文言にて定義がなされ、「学校教育法等の一部を改正する法律」についてのガイドラインと実践事例も報告されている。この中では、「教科書はあくまでこれまでの紙媒体の物をそのまま電子化したもの^{*}」とされている。

これによると、教科書自体は、紙媒体を電子媒体とするのみで、内容を変えてはいけなくなっていることから、補助教材に工夫をするしかない。その方法を考案することが問われている。※文部科学省HPより抜粋

先に述べた通り、デジタル教科書の類は様々な出版社により、発行されているが、どれを取っても、既存の紙媒体の教科書をただデジタル化しただけであり、デジタル化のメリットを十分に取り入れられていない。

そこで我々は、学習者の現状把握を行うために、過去に受験した「基礎学力調査試験」の結果を利用し、以下の点を明らかにしようとするものである。

（目的①）AIを搭載したプログラムにより、学習者の学力レベルを自動判定できること。

（目的②）学習者の学力レベルに合わせた、問題を自動生成し出題できること。

（目的③）学力向上に繋がったかどうかの効果測定と検証を行い、アプリの有効性を示すこと。

（目的④）デジタル教科書補助アプリとして実際の授業で使用できること。

その際、学力向上が、アプリを使用したことによるものか、他の要因かの判断をすることが困難であると予想されるが、同一学習者の期間別結果の比較、同等レベルの学習者間による結果の比較により、その有効性が検証できるものと考えている。

執筆者は、ある大学の基礎学力に関する調査試験の調査チームとして、プログラムの作成、データ収集や統計処理を担当する中で、如何にして学生の学力（ここでは、基礎学力を指す）を向上させるかを常に課題としてきた。

また、自身の研究分野が、ソフトコンピューティングであり、特に、カオス理論、ニューラルネットワークによる学習（現在のAIのベースとなる機械学習）の研究であること、更に、これらの研究を始め

た当初（約30年前）に比べ、コンピュータの性能が飛躍的に発展し、計算速度が向上したことによりDeep Learningができるようになり、これまでにアイデアはあったものの実現できなかったことが実現可能となってきたことから、本研究の着想に至ったわけである。

研究の準備として、過去10年分、延べ1万件以上の学力調査データを保持していること、また、執筆者はこれまでに、ニューラルネットワークのBP法に関する多数の論文や学会発表、独自に開発したプログラムの他、特許取得^{[7][8]}や出願を重ねてきた。

本研究では、ただデジタル化することだけが目的ではなく、例えば、動画を組み込んだ「動く教材」や学習者の個々の学力に合わせた練習問題が自動表示される仕組みを持った「個別教材」など、デジタル化のメリットを十分に取り入れたアプリの開発を目的とする。

本アプリと同等なものは、国内外においてこれまでにあまり存在せず、新しい試みとなる。

4. 提案

学習者の学力等を自動判別するには、受験者を含めた過去のデータから、学力の予測を行う必要がある。その方法の一つとして、ニューラルネットワークを用いたカオスの時系列の短期予測法がある。主な手法として、グラム・シュミットの直交化法 (J. Jimenez, et al. 1992)^[9]、(水上, 他1995)^[10] やテセレーション法などがあげられるが、その多くはパラメータの取り方によって予測不可能な状態に陥ったり、次元が高くなると計算時間が急激に増大するという現象も起こりうる。言語学の分野でも、例えば回帰分析による得点予測などの研究もあるが (渡部, 1983)^[11]、受験者全体を捉えたものであり、学習者個人に対する予測はできていないのが現状である。また、予測を行う際に様々な要因を含んだ多くのデータを必要とするという問題がある。

これらに対し、時系列データそのものの特性から予測を行う方法が考えられる。つまり、過去の時系列データのみを用いて行う決定論的予測手法である (G. Sugihara et al. 1990)^[12]。そこで我々は比較的問題が少なく、様々な予測分野で一般的によく用いられる、ニューラルネットワークを利用することにした。

4.1 3層階層型ニューラルネットワーク

ここでは、本予測法に用いるニューラルネットワークの構造を示すとともに、3層階層型ニューラルネットワークを使う理由とその妥当性について述べる (図1)。

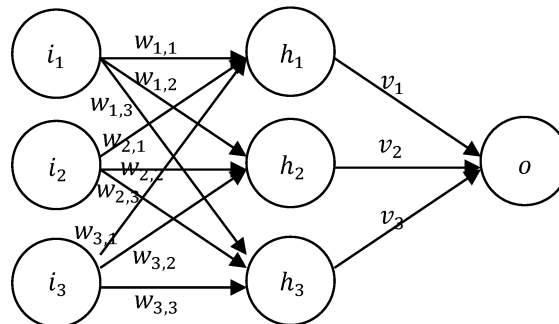


図1. 3層階層型ニューラルネットワーク

図中の i は入力層への入力値、 h は中間層からの出力値 (= 出力層への入力値)、 o は出力層からの出力値、 w は入力層と中間層の間の結合荷重、 v は中間層と出力層の間の結合荷重をそれぞれ示す。

このニューラルネットワークは、入力層と中間層のユニット数を3、出力層のユニット数を1とした、3層からなる階層型神経回路網であり、それぞれの層の入出力値の計算式は以下ようになる。

(入力層への入力値)

$$i_k = x_k \quad (k = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (1)$$

(中間層からの出力値)

$$h_k = f(\bar{h}_k)$$

$$\bar{h}_k = \sum_{j=1}^3 i_j w_{k,j} \quad (k, j = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(出力層からの出力値)

$$o = f(\bar{o})$$

$$\bar{o} = \sum_{k=1}^3 h_k v_k \quad (k = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、関数 f はシグモイド関数と呼ばれるもので、1次元の場合、式 (4) であらわされる。

(シグモイド関数)

$$f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、学習の際に用いる誤差関数は式 (5) で表現される。 t は教師信号である。

(誤差関数)

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 (t_k - o_k)^2 \quad (k = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (5)$$

階層型ニューラルネットワークは、提唱されて以来多くの分野に応用されてきた。その中で、中間層ユニット数の決定に問題を抱えていることも知られている。中間層ユニット数の決定に際して、少なすぎると学習が収束せず、多すぎると学習速度や汎用能力の低下に繋がってしまう恐れがある。しかし、ネットワーク構築時に初めから適切なユニット数を決定することもできなかった。

ところが、近年、パソコン単体の性能の向上、ICTの発展、さらにAIによるDeep Learningの実現などコンピュータ関連技術の急速な発展により、中間層ユニットを気にせず、短時間で計算結果が得られるようになってきた。そこで、本研究では、MatlabのDeep Learning機能を利用し研究を進めることにした。

4.2 ニューラルネットワークのBP法を利用した短期予測手法

ここで、ニューラルネットワークのBP法について、簡単に触れておく。

BP法は、階層型ニューラルネットワークの学習法の一つである。基本的にはパーセプトロン（入力層と中間層、中間層と出力層がそれぞれ接続されたニューラルネットワークの構造）の拡張で、出力層に正しい解答を教師信号として与えてやることで、その教師信号と出力との誤差を求めて重みを変更する。この働きが、出力層側から入力層側に向かうため、「Back～」と呼ばれている。また、学習アルゴリズムには最急降下法を用いる。以下に具体的な適用例を挙げる。

今、ある時系列データを x_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) とし、 x_i から x_{11} を予測する問題を考える。

まず次のパターンを（図1）に示したニューラルネットワークに学習をさせる（図2）。

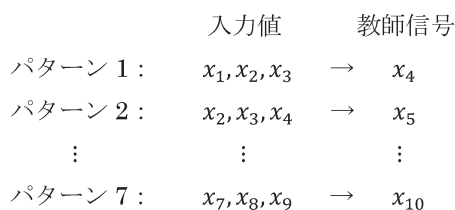


図2. 学習過程での入力パターン

ここで、全パターン学習後の結合荷重を保存しておく。そして、予測過程として入力値を x_8, x_9, x_{10} 、結

合荷重を今保存したものとし、同じニューラルネットワークに1度だけ計算をさせる。その結果を予測値 x_{11} とする（図3）。

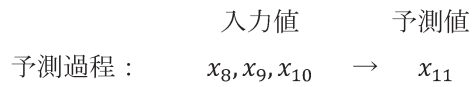


図3. 予測過程

以上がニューラルネットワークのBP法を利用した短期予測手法である。

4.3 カオスの時系列の判断基準

本研究での前提条件は、予測の対象とする「元の時系列データがカオスの振る舞いをしている」ことである。元の時系列データが、カオスの振る舞いを示すかどうかの判断基準は、(K. Kido, et al 2016)^[3] にも示した通り様々な存在するが、一般的によく知られている最大リアプノフ指数による判断と相関関数による判断を利用した。

5. 教育学的データへの適用とアプリの概要

ここでは、これまでに述べてきた手法を適用する具体的な実データについて説明する。ただし、（表1）（表2）（表3）は、データ数が膨大なため、後に示すリンク先から閲覧可能とした^[13]。

使用するデータは、2014年～2019年に行われた基礎学力に関する調査試験（英語、数学、国語：1科目100点満点）の受験者1081名分の結果である（表1）。

準備したデータがカオスの振る舞いを示すかどうかの判断を最大リアプノフ指数の算出、相関関数の算出により行った。

表1. 基礎学力に関する調査試験の結果（一部抜粋）

	A	B	C	D	E	F	G
1		NO	1回目	2回目	3回目	4回目	
2		1	21	30	46	24	
3		2	42	54	52	50	
4		3	51	44	40	42	
5		4	35	34	26	36	
6		5	53	14	26	36	
7		6	29	28	38	30	
8		7	62	70	60	58	
9		8	37	40	44	46	
10		9	37	38	46	42	
11		10	37	34	52	42	
12		11	56	50	48	38	
13		12	55	60	58	46	
14		13	41	44	54	48	
15		14	56	72	50	48	
16		15	74	76	68	64	
17		16	50	50	48	52	
18		17	27	14	34	20	
19		18	46	50	64	42	
20		19	47	36	44	36	
21		20	68	60	56	52	
22		21	30	37	78	36	

5.1 最大リアプノフ指数の算出結果

表2. 最大リアプノフ指数 (一部抜粋)

	A	B	C	D
1		NO	最大リアプノフ指数	
2		1	0.2979	
3		2	-0.5973	
4		3	-0.4176	
5		4	0.7675	
6		5	-0.4537	
7		6	0.6931	
8		7	-0.4621	
9		8	-0.1352	
10		9	0.4621	
11		10	0.4013	
12		11	0.1703	
13		12	0.2918	
14		13	0.231	
15		14	-0.6931	
16		15	0.231	
17		16	0.231	
18		17	0.0247	

(表2)は、最大リアプノフ指数の算出結果の一部である。このように、全体の62.2%の最大リアプノフ指数が正值であることが分かる。この結果は本研究で使用したデータがカオス的振る舞いを示すと判断するための指標の一つとなる。

5.2 相関関数の算出結果

(表3)は、相関関数の算出結果の一部である。全てのデータにおいて、相関関数値が-1と1の間に収まっていることから、本研究で使用したデータ全てがカオス的振る舞いを示すと判断することができる。

表3. 相関関数値 (一部抜粋)

	A	B	C	D
1		NO	相関関数値	
2		1	-0.4143	
3		2	-0.7777	
4		3	0.6286	
5		4	-0.5747	
6		5	-0.7135	
7		6	-0.4118	
8		7	-0.1763	
9		8	0.9631	
10		9	0.1014	
11		10	-0.2185	
12		11	0.797	
13		12	-0.2449	
14		13	0.107	
15		14	-0.1805	
16		15	0.5766	
17		16	-0.8662	
18		17	-0.7968	

5.3 アプリの概要

今回作成したアプリは、国語(特に、小学校6年間で習得する漢字)に焦点を当てて試作し、実現後、残りの科目の作成に入る予定である。

以下に示す、図4、図5は、小学校6年間で学ぶ、

全ての漢字とその使用例文をデータベース化したものの一部である^{[14][15]}。

	A	B
1		愛
2		業
3		以
4		衣
5		位
6		茨
7		印
8		英
9		栄
10		媛
11		塩
12		岡
13		億
14		加
15		果
16		貸

図4. 小学校6年間で学ぶ漢字一覧表

図6は、学習者のレベルをAIにより自動判別し、出題した際の出題例である。

また、図7は、学習履歴を表示したものである。

	A	B
1		
2		・愛情が伝わる
3		・愛が芽生える
4		・部屋に案内する
5		・遊園地の案内をしてもらう
6		・これ以上の言葉は出ない
7		・魚以外なら食べられる
8		・衣装を選ぶ
9		・衣替えをする
10		・1位になった
11		・1の位を四捨五入する
12		・茨城県に行く
13		・茨城県は納豆が有名だ
14		・印鑑登録をする
15		・矢印の方へ行く
16		・英語を学ぶ
17		・英会話教室に通う
18		・栄光を掴む
19		・駅前には栄えている
20		・才能が優れた女性のアトモナ絶叫という

図5. 小学校6年間で学ぶ漢字を使った例文

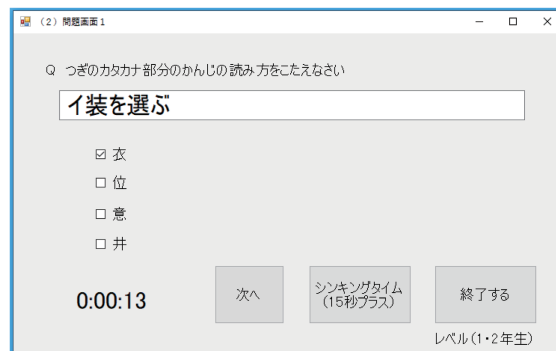


図6. 学習者のレベルを自動判別し出題した際の出題例

<学習した日付>	<正解数>	<正答率>
2021/01/08 15:16:03	3	
2021/01/08 15:16:36	1	
2021/01/08 15:19:06	2	
2021/01/08 15:19:42	1	
2021/01/08 15:41:23	0	
2021/01/08 15:41:31	0	
2021/01/08 15:44:00	1	
2021/01/08 16:15:38	0	
2021/01/09 10:10:20	2	
2021/01/09 16:57:42	0	

図7. 学習履歴

6. 結果と分析

最大リアプノフ指数が正值（表2）でかつ相関関数の計算結果（表3）から、（表1）に示すデータがカオスの振る舞いを示すことが判明した。

そこで、本アプリにより、学習者の学力レベルを自動判定するシミュレーションを行った。なお、今回のシミュレーションでは、実際の児童・生徒、学生に実施することが困難であったため、一人4回受験したうちの3回目までのデータから4回目のデータを予測し、その予測値と4回目の実測値とを比較することでその有効性を確認した。

分析は、実測値と予測値との間で単回帰分析を行い、その有意性を示す。

（図8）は、実測値と予測値との間の相関係数と回帰直線を示したものである。

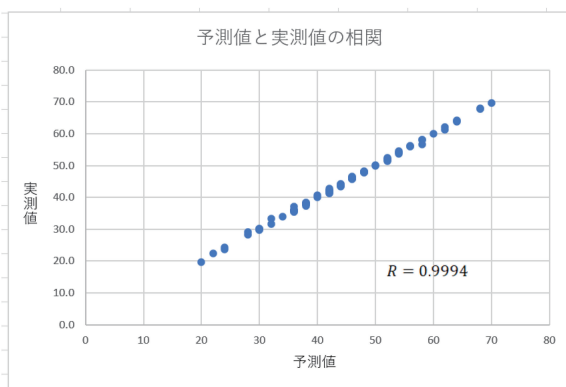


図8. 予測値と実測値の相関

実測値と予測値の間の相関係数が $R=0.9994$ であり、一般的な統計学的水準（標本数による限界値（KogoLab 2004）^[14]）に照らし合わせると、実測値と予測値の間には、強い相関があることが分かる。

7. 結論

本研究では、AIを搭載したアプリの開発について過去のデータによる机上の実験を行った。その結果、次のような事が明らかになった。

今回用いた基礎学力データが、最大リアプノフ指数と相関関数の値を調べることにより、カオスの振る舞いを示すことが判明した。また、実測値と予測値の間に強い相関があったことから、今回用いた基礎学力データの短期予測が可能と言えそうである。そのことにより、「（目的①）AIを搭載したプログラムにより、学習者の学力レベルを自動判定できること」が明らかになった。また、「（目的②）学習者の学力レベルに合わせた問題を自動生成し出題できること」も可能となった。

しかし、コロナ禍にある現状から、実際の教育現場での使用実験や調査ができていないこともあり、今回の研究では、「（目的③）学力向上に繋がったかどうかの効果測定と検証を行い、アプリの有効性を示すこと」、「（目的④）デジタル教科書補助アプリとして実際の授業で使用できること」の検証にまでは至らなかった。

8. 今後の課題と展望

今回は、基礎学力データのうち、国語の漢字に特化してシミュレーションを行ったが、英語や数学についても同様の結果が得られるかの検証が必要である。

また、本研究により明らかになった課題として、（目的③）（目的④）を達成することが挙げられる。特に、e-ラーニング用ソフトは、実際の教育現場で利用できなければ意味が無いものである。

その他、教育学的観点からの課題として、カオスの振る舞いを示さないデータをどのように扱うかという問題が挙げられる。学習者全員の学力レベルの判定が出来なければ、実際の現場では使えない。この問題に関して、カオスの振る舞いを示さないデータはごく少数であるので、そのデータのみ他の手法で予測を試みるなどの解決策が考えられるだろう。

また、学習者に学習成果を可視化して示すことで、学習意欲を向上させるような工夫が必要である。更に、見た目のデザインや操作性においても学習意欲の向上を大きく影響するので、今後改善する必要がある。

いずれにせよ、本研究により明確になってきた課題

を解決できるように、今後も継続して研究を続けていく。

参考文献

- [1] 清水裕子, 「測定における妥当性の理解のために一言語テストの基本概念として」, 立命館言語文化研究16巻4号, pp.241-254, 2005.
- [2] 清水裕子・木村真治・杉野直樹・山川健一・大場浩正・中野美知子, 「英語文法能力標準テストの妥当性・信頼性の検証と新英語文法能力テスト Measure of English Grammar (MEG)」, 政策科学10巻3号, pp.59-68, 2003.
- [3] K. Kido, E. Fukuda, S. Hashimoto, H. Okazaki, “Short-term Chaotic Time-Series Prediction of Language Test Scores Adopting the Backpropagation Algorithm”, *日本 e-Learning 学会誌*, Vol.16, pp.65-72, 2016.
- [4] 「Short-term Prediction of a Test Score Using the BP Method with Takens' Embedding Theorem in a Neural Network」, 木戸・福田・橋本・岡崎, 環太平洋大学研究紀要, 第14号, pp.25-33, 2019.
- [5] 「ターケンスの埋め込み定理を組み込んだNeural NetworkのBP法を用いたテストスコアの短期予測」, 木戸・橋本・福田・岡崎, 日本知能情報ファジィ学会第33回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, CD論文, pp.63-68, 2017.
- [6] 「Windows開発環境における切替可能な多読練習用e-ラーニング・ツールの開発」, 木戸・福田・橋本・岡崎, 環太平洋大学研究紀要, 第8号, pp.99-104, 2014.
- [7] 国内特許, 「多読・速読学習システム, 多読・速読学習装置, 多読・速読学習プログラム」, 特許第5369463号, 岡崎・新田・木戸・他3名, 2013.
- [8] 国内特許, 「外国語の難易度判定装置」, 特許第6468584号, 岡崎・福田・木戸・他3名, 2019.
- [9] Jimenez, J., Moreno, J. A., & Ruggeri, G. J., “Forecasting on chaotic time series: A local optimal linear-reconstruction method”, *Phys. Rev. A*, 45 (6), pp.3553-3558, 1992.
- [10] 水上雄一・西森壽郎・岡本順子・合原一幸, 「グラムシュミット直交化法を用いた決定論的予測手法に基づく翌日最大電力予測」, 電気学会論文誌C電子・情報・システム部門誌115-C巻6号, pp.792-797, 1995.
- [11] 渡部 洋, 「小標本における得点予測のための回帰技術の比較」, 独立行政法人大学入試センター研究紀要4, pp.1-17, 1983.
- [12] Sugihara, G., & May, M. R., Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series, *Nature*, 344, pp.734-741, 1990.
- [13] 「基礎学力に関する調査試験(国語)の結果」, 「最大リアプノフ指数の算出結果」, 「相関関数値の算出結果」
【<https://drive.google.com/file/d/1P9TbpfONNB3QwsjSxivF61Fk2j4YY4uW/view?usp=sharing>】
(参照2021-1-10), 2020.
- [14] KogoLab, 「標本数による限界値」, 【<http://kogolab.chillout.jp/elearn/icecream/chap3/sec4.html>】
(参照2021-1-10), 2004.