

電力抑制を目的とした列車群の知的運行管理方式の提案

Proposition of the intellectual train service management system aiming at electricity restraint

○ 氏家 義弘¹, 安信 誠二¹
○ Yoshihiro Ujiie¹, Seiji Yasunobu¹
¹ 筑波大学 システム情報工学研究科

¹Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

Abstract: Movement aiming at restraint of the peak electricity becomes active in Japan, and the service that took electricity into account is demanded from the railroad now. As one of the methods to reduce electricity, it is curtailed service. However, there is the difficult point that a transport service decreases by stopping a part of the train. It is necessary to think about the method that can travel smoothly to solve this fault. However, it is necessary to think about the situation of the whole train group if driver reduce peak electricity only by driving. Therefore it is very difficult to reduce electricity only by experience and the knowledge of the driver. Therefore I decide a service method by using run information of the run train group and build a system ordering a driver using it. This system hold down total electricity of the train group and intended to perform smoother service. In this paper, it explains details of the proposed system, and the effectiveness is evaluated by the experiment.

1 はじめに

現在日本全国で電力削減を目指す動きが活発になっている。電力削減でも最も重視されているのはピーク電力の削減であり、ピーク時の電力需要を抑え、電力を抑制させる事が重要になっている。こうした背景から元々輸送量の高さからエネルギー効率がよく、省エネルギーな乗り物とされている鉄道も、さらなる電力考慮が課題となっている。

電力を削減する方法の1つとして、同じ時間帯に運行している列車の本数を減らす、いわゆる間引き運転という方策がある。しかしこの方法は輸送サービスの低下と、運行本数減少が起因による混雑によって大きな遅延が生じる [1] という欠点がある。

そのため、列車群の運行を管理する事で電力を抑制させたい。従来手法では、回生電力量が大きくなるようにダイヤを構成し、電力抑制を図るという手法 [2] が存在する。しかし回生電力は、「列車が高速走行している際に、ブレーキを掛けて減速を行う」という限られた条件でしか発生しない。さらに加速をしている列車が近くにいないと回生電力を活用する事ができない。よって、加速している列車と回生電力を発生させている列車を同時刻に近い場所に存在させなければならぬため、列車群の総電力を常に抑制させるには至らないと考えられる。

そこで本論文では、走行列車群の走行状況から運行方式を決定し、その方式を用いて運転士へ指令を行うシステムを構築する。このシステムを用いる事によっ

て列車群の総電力を常に抑え、かつ輸送サービスが落ちない運行を行う事を目指す。

2 電力抑制を目的とした運行方式

2.1 列車の電力特性

列車は加速を行う際に電力を消費する乗り物である。また列車が使用する電力は、列車の電動機の出力の総和である「編成出力」で表す事ができる。そこで、加速時の列車の電力特性を導出するために、編成出力と加速度の関係式 [3] を示す。

列車がけん引力を $F[kg]$ 、速度を $V[km/h]$ で運転されている時、列車の編成出力 $P_t[kW]$ は (1) 式のように求まる。

$$P_t = \frac{FV}{367} \quad (1)$$

ここで、走る路線が平坦 (勾配も曲線もない直線) ならば、けん引力 F は、

$$F = (R_r + F_a)W \quad (2)$$

となる。 R_r は走行抵抗 $[kg/t]$ 、 F_a は加速力 $[kg/t]$ を表しており、車両数を n 両、車両重量を $W[t]$ 、列車の加速度を $\alpha[km/h/s]$ とすると、 R_r と F_a はそれぞれ (3) 式、(4) 式のようにして求める事ができる。

$$R_r = 1.32 + 0.0164V + \frac{\{0.0280 + 0.0078(n-1)\} V^2}{W} \quad (3)$$

$$F_a = 31\alpha \quad (4)$$

よって、(2)～(4)式を用いる事によって、(1)式は最終的に(5)式で表す事ができる。

$$P_t = \frac{(R_r + 31\alpha)}{367} WV \quad (5)$$

(5)式より、編成出力は加速度に依存し、加速度を抑えれば列車単体の電力は抑制できる事がわかる。

2.2 運行管理員の知識

電力抑制のための運行方式を行うためには、列車群全体の運行状況を考慮する必要がある。よって、運転士の経験・知識 [4] だけで行うのは困難である。そのため、運行管理員から列車の運行に関して指令を行う必要がある [5]。

ここで、列車の運行管理を行う運行管理員はどのような考えの元、運行方式を決定しているのかを考える。運行管理員は、各列車にどのような指示を与えれば電力上限内に総電力を抑えられるかを考えている。本研究で検討する運行方式では、「電力抑制」と「輸送サービス」という2つの指標のトレードオフ問題を考える必要がある。運行管理員はこれら2つの問題を考え、最適な運行方法を考え、決定した運行方式を実行するために、運転士に運転指令・支援を行っている。

運行方式は、列車群中の総電力や列車速度といった走行状況から、総電力が「少し高い」や「かなり低い」といったような曖昧な表現によって現在の状況を把握し、リアルタイムで複雑に変わる運行状況からトレードオフ問題を考えている。

本研究では、このような運行管理員の知識をメンバーシップ関数を用いることによって表現する。

2.3 評価指標

前項で運行管理員は各列車の走行状況を用いて運行方式を決定しており、それぞれの指標に関して曖昧な表現で評価をしているという事を述べた。運行方式を決める評価指標として、「総電力」、「速度偏差」、「指令間隔」の3つを用いている。

(1) 総電力

同時に加速を行う列車の数が多いと、その分総電力が増加してしまう。そのため、同時に加速する列車の本数を減らしたり、列車の加速度を制限させる事によって、総電力が上限電力内に収まるようにしている。運行管理員は総電力と上限電力との差を見る事によって、電力状況を把握し、「総電力が「少し高い」のなら、列車の加速度を「少し抑える」といった判断を行っている。

(2) 走行速度

前項で列車の加速度を制限すると述べたが、加速度制限を速度が遅い列車、またはこれから発車・加速を行う列車に適用してしまうと、その列

車が次駅に到着する時間が遅くなり、遅延の原因となってしまふ。そのため、「列車1の速度が「少し遅い」ので、速度が「少し速い」列車2の加速度を「少し低く」し、列車1の加速度を「少し高く」といった判断を行い、遅い列車を優先的に加速させるようにしている。

(3) 指令間隔

運転士に指令する際、指令時間の間隔が短いと指令が短時間で頻繁に変わってしまい、運転士が把握しづらくなる。加速度が頻繁に変わると乗り心地も悪くなり、乗客にも影響が出てしまう。そのため指令時間の間隔を空ける事によって、この問題を解決している。

これら3つの指標を用いる事により、総電力の抑制と輸送サービスとのトレードオフを考え、最適な運行方式を決定している。

2.4 運転士への指令方法

運行方式を決めたら、その運行をさせるために運転士に指令を行う必要があるが、運転指令は運転士が把握しやすくする必要がある。そこで、運転士が運転を行う際に操作するノッチの操作量に着目する。ノッチとは、列車の速度を制御する装置の事である。本論文では、ノッチを-7～0～+7の15段階に設定し、+は加速、0は惰行、-は減速と定義した。このノッチ操作量の最大稼働可能値を指令として送る事によって、運転を行わせる。

3 運転指令システム

構築した運転指令システムの全体構成は図1のようになっている。状況把握部と指令決定部の2つから構成されている。運行管理員の知識に基づいて最適な運行方式を決定し、運転士へ指令を行う。

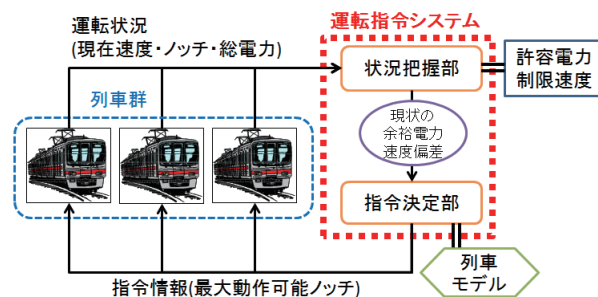


図1: 運転指令システムの全体構成

3.1 状況把握部

状況把握部では、列車群のそれぞれの列車の現在速度、ノッチ、そして列車群全体の総電力を情報として把握する。その情報から現状における許容電力と速度

を求める。求めた2つの情報を指令決定部へ出力する。現状の許容電力と速度に関して以下に示す。

(1) 現状の許容電力

余裕電力は、路線に設定された電力上限と、列車群の総電力の差から求まるものである。余裕電力を $P_r[kW]$ 、路線の上限電力を $P_p[kW]$ 、総電力を $P_{all}[kW]$ とすると、許容電力は(6)式で表す事ができる。

$$P_r = P_p - P_{all} \quad (6)$$

(2) 現状の速度

速度は、加速優先度を定めるために用いる。速度が遅い列車とそうでない列車を判別し、速度が遅い車両を優先的に加速させる事ができる。列車 i の現在速度を $V_i[km/h]$ とする。

3.2 指令決定部

指令決定部では、状況把握部から出力された情報を入力とし、現在の状態からノッチを操作した際の予測値を、それぞれの列車に関して求める。それを指標として予見ファジィ制御 [6] を用いて評価をし、操作指令(最大動作可能ノッチ)を決定する。

具体的には、状況把握部にて求めた現状における許容電力と速度に、ノッチ操作をした際に予想される状態変化量を足す事によって将来状態(1秒後)における許容電力、速度を求める。また、前の時間にノッチを操作した時との時間を指令間隔時間として用いる。その3つを評価要素として用い、ファジィ多目的評価を行う事によって最適な操作量を決定する。評価には運行管理員の知識を再現したメンバーシップ関数を用いる。将来の余裕電力、速度、指令間隔の導出及びメンバーシップ関数は以下の通りである。

(1) 将来の許容電力

将来状態の許容電力を $P_{rN}[kW]$ 、現状の許容電力を $P_r[kW]$ 、 7 ノッチ時の電力を $P_7[kW]$ 、列車 i の現在状況からのノッチ変化量を ΔN_i とすると、将来状態における許容電力は式(7)のようになる。

$$P_{rN} = P_r + P_7 \cdot \frac{\Delta N_i}{7} \quad (7)$$

許容電力に関するメンバーシップ関数は図2のように設定した。横軸が許容電力、縦軸がその許容電力に対するファジィ評価値となっている。このメンバーシップ関数に基づいて、 P_{rN} に関する評価値を求める。

(2) 将来の速度

列車 i の将来状態の速度を $v_{N_i}[km/h]$ 、現状の速度を $v_i[km/h]$ 、 7 ノッチ時の加速度を $\alpha_7[km/h/s]$ 、現在状況からのノッチ変化量を

ΔN_i とすると、将来状態における速度は式(8)のようになる。

$$v_{N_i} = v_i + \alpha_7 \cdot \frac{\Delta N_i}{7} \quad (8)$$

速度に関するメンバーシップ関数は図3のように設定した。横軸が列車速度、縦軸がその列車速度に対するファジィ評価値となっている。このメンバーシップ関数に基づいて、 v_{N_i} に関する評価値を求める。

(3) 指令間隔

操作指令間隔時間を $t_s[s]$ 前の指令時間を $t_p[s]$ 、現在の時間を $t_n[s]$ とすると、操作指令間隔時間は式(9)のようになる。

$$t_s = t_n - t_p \quad (9)$$

指令間隔に関するメンバーシップ関数は図4のように設定した。横軸が前回と今回とのノッチ操作の時間間隔であり、縦軸がその操作時間に対するファジィ評価値となっている。このメンバーシップ関数に基づいて、 t_s に関する評価値を求める。



図 2: 許容電力に関するメンバーシップ関数

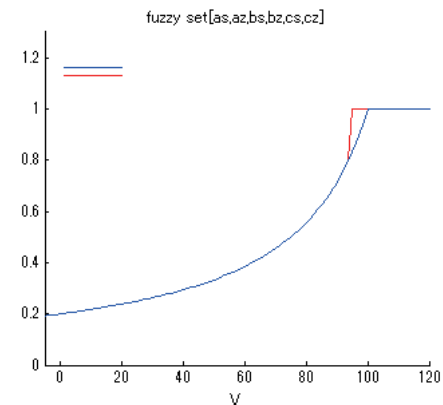


図 3: 速度に関するメンバーシップ関数



図 4: 指令間隔に関するメンバーシップ関数

以上より，メンバーシップ関数に基づいて各指標を評価し，評価値の最小値を各操作候補の評価値として出力する．評価は予見ファジィ制御則に基づき，「もし，操作可能最大ノッチ U_i を N とした時，余裕電力が Good，速度が Good，指令間隔が Good ならば，操作可能最大ノッチ U_i を N にする．」といったような If-Then ルールを用いる．そして最終的に，各操作候補値の評価値の最も高い物を操作可能最大ノッチとして出力し，運転士に指令命令として送る．図 5 に，上記の各指標に基づいた操作量の決定方法を示す．

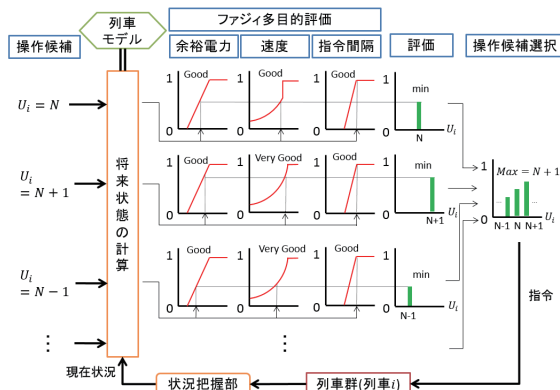


図 5: 指令決定部のフuzzy評価

4 シミュレーション

4.1 列車の概要

本研究のシミュレーションで用いる列車モデルについて説明する．列車モデルの仕様は表 1 のようになっている．

4.1.1 加速度

ノッチ操作量に対する起動加速度と電動機出力の関係を表 2 のように設定した．

列車は，ある程度の速度までは起動加速度で加速を行うが，速度が上がるにつれて加速度は減少する．加速度の減少具合は列車の重量，電動機の出力，現在速度によって変わる．その加速度は，(5) 式を用いる事

表 1: 列車モデルの仕様

車両数	5 両
車両重量	180[t]
主電動機出力	150[kW]
電動機数	12 個
編成出力	1,800[kW]
電気方式	直流 1,500[V]
最大起動加速度	3.6[km/h/s]
最大減速度	3.0[km/h/s]
一両あたりの定員	140[人]

によって (10) 式で表す事ができる．

$$\alpha = \frac{367P_t}{31VW} - \frac{R_r}{31} \quad (10)$$

(10) 式の加速度が，起動加速度以下になった場合は，電車はこの加速度で走行を続ける．なお，ノッチによる加速度の変化は，表 2 の最大編成出力の値を (10) 式に代入すれば求まる．

表 2: ノッチ操作量と各数値の関係

操作量	起動加速度 [km/h/s]	最大編成出力 [kW]
7	3.60	1,800
6	3.09	1,543
5	2.57	1,286
4	2.06	1,029
3	1.54	771
2	1.03	514
1	0.51	257
0	0.00	0

4.1.2 惰性走行

惰性走行時は，列車自体の加減速度は 0[km/h/s] であるが，走行時の抵抗によって徐々に減速する．その際の減速度を D [km/h/s] とすると，(11) 式によって求める事ができる．

$$D = \frac{R_r}{31} \quad (11)$$

4.1.3 減速度

減速度に関しては，ノッチの操作量に対して一定の減速度になるように設定した．各操作ノッチの状態量による減速度は，表 3 のように設定した．

表 3: ノッチ操作量と減速度の関係

操作量	減速度 [$km/h/s$]
7	3.00
6	2.57
5	2.14
4	1.71
3	1.29
2	0.86
1	0.43
0	0.00

4.2 シミュレーション条件

シミュレーションを行う環境として、図 6 の様な路線を想定した。

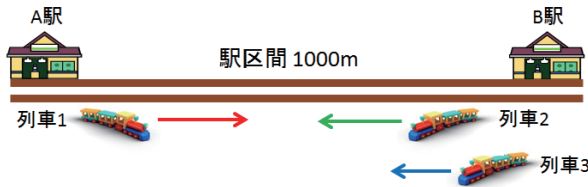


図 6: シミュレーション路線

平坦な路線中に A 駅と B 駅の 2 つの駅を設置する。2 駅の駅間距離は、1,000[m]、路線の制限速度は 72[km/h]、路線の電力上限値は 2,500[kW] に設定した。この路線に、列車 1,2,3 の 3 つの列車が列車群として配置する。列車群は A 駅には列車 1、B 駅に列車 2,3 が初期位置として停車している。列車群は、

- (i) 列車 1 が A 駅を、列車 2 が B 駅を同時刻に発車する。
- (ii) 列車 2 が 500[m] 走行したら、列車 3 が B 駅を発車する。

というダイヤで運行するものとする。

いずれの列車の乗客率も 100% (700 人) とする。なお、乗客 1 人あたりの重さは 60[kg] とする。

また、前章の運転指令システムは、列車 1,3 に適用するものとする。この理由としては、運行ダイヤの最初の部分である列車 1,2 が同時刻に発車する段階において、最優先で加速を行って運行する列車 (列車 2) が存在するときに、その他の車両 (列車 1,3) に対して運転指令システムがどのような判断を行い、どのような指令を列車群の各列車に送るのかを検証するためである。

4.3 結果と考察

構築した運転指令システムが有効であることを示すために、システム適用前 (電力抑制を考慮に入れて運

行) と適用後 (電力抑制を考慮に入れて運行) の結果を示す。

まず、列車群の総電力の結果について考察する。図 7 は、運転指令システムを適用する前の列車群の総電力のグラフである。この場合列車群は、電力上限を考慮せずに運行しているため、総電力が電力上限を超えてしまっている。図 8 は、運転指令システムを適用した際の列車群の総電力のグラフである。グラフの通り、指令システムを適用する事によって総電力が電力上限内に収まっている事がわかる。

次に、列車群の運行状況 (距離-時間グラフ) について考察する。図 9 が運転指令システムを適用する前の運行状況、図 10 が適用した後の運行状況である。2 つのグラフを比較してみると、システム適用後の列車 1 の運行時間が適用前に比べてわずかに伸びているものの、全体的な運転曲線に大差はなく、運転指令システムを適用しても、比較的円滑に運行が行えている事がわかる。

以上の結果より、本研究で構築した運転支援システムは、電力抑制を行いつつ輸送サービスが極端に落ちない列車群の運行を行える事を示した。

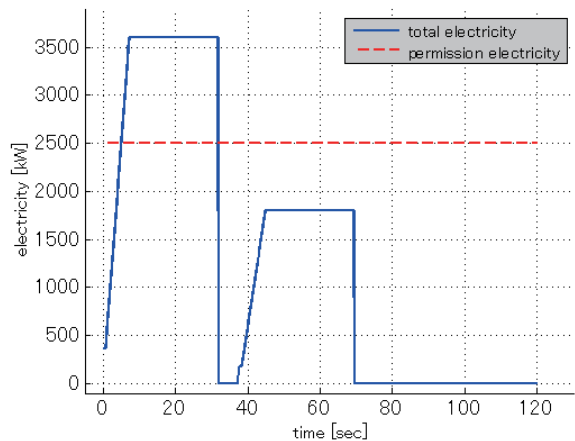


図 7: 列車群の総電力 (運転指令システム適用前)

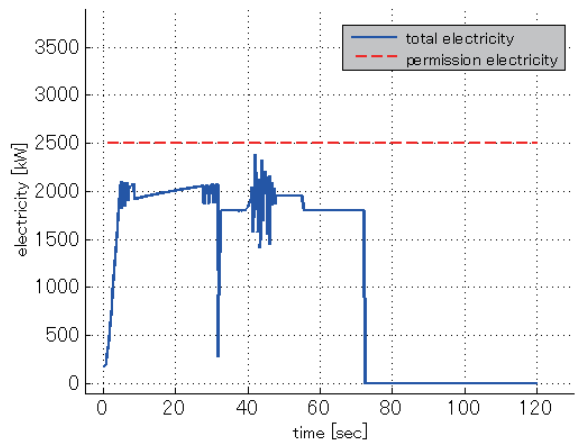


図 8: 列車群の総電力 (運転指令システム適用後)

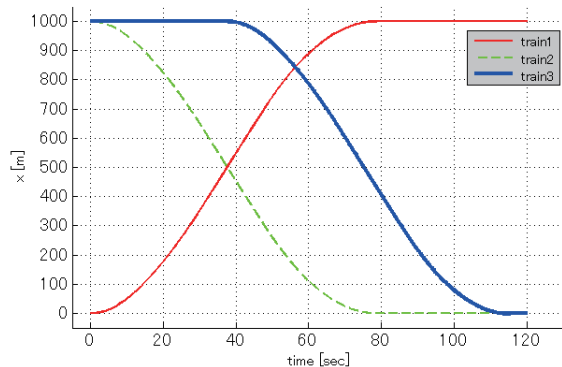


図 9: 距離-時間グラフ (運転指令システム適用前)

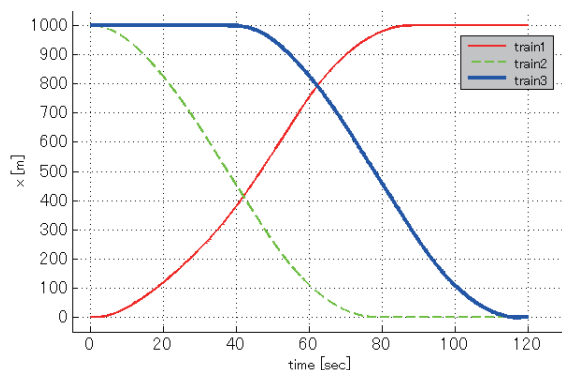


図 10: 距離-時間グラフ (運転指令システム適用後)

5 おわりに

本研究では、列車群に電力の常時抑制と顕著な輸送サービスの低下防止を目的とした運行方式を提案し、その運行方式を実現させるために運転士に指令を行う運転指令システムを構築した。構築した運転指令システムを用いて列車群の運行シミュレーションを行い、シミュレーションの結果、電力抑制を行っても輸送サービスはあまり低下せず、目的の運行が行える事を確認する事が出来た。これにより、本研究で提案した運行方式と運転指令システムは有用である事を示した。

今後は、乗客数の変化や路線・列車群の状況など、様々な環境変化に対応できるように、システムを再構築していく方針である。また現在、既存の運転シミュレータ [4] を用い、シミュレーション環境の可視化を行い、運転士側の視点でシミュレーションを行えるようにシミュレータを改良・構築中である。これを用いて運転シミュレータを作成し、被験者に指令指示に従った操作を行わせる事によって、運転士へ運転指令を送る事は効果的なのかを検証していく予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 24500272 の助成を受けたものです。

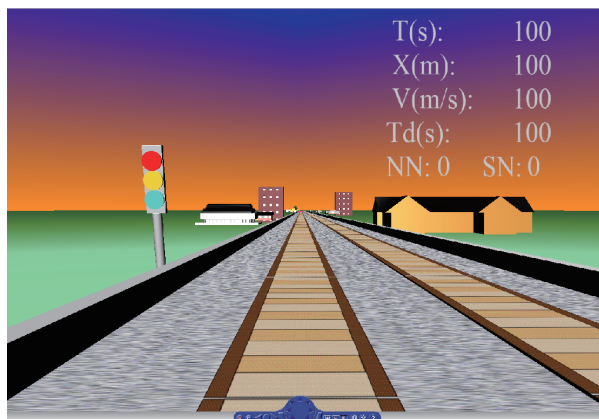


図 11: 構築中の運転シミュレータの画面

参考文献

- [1] 田口東：「東日本大震災による電力供給不足に対応した首都圏鉄道網運転調整の影響と分散乗車」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.4-5, 2011
- [2] 郭海蛟, 大橋祐則, 一ノ倉理：「省エネルギーを指向する直流電鉄ダイヤ作成手法」, 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, pp.1337-1344, 1999
- [3] 飯田真, 『電気鉄道』, 電気書院, 1973
- [4] 佐藤勝太, 安信誠二：「所定時刻に定位置停止を実現する運転支援システムの構築」, 第 37 回知能システムシンポジウム, pp.231-234, 2010
- [5] 氏家義弘, 安信誠二：「列車群の許容電力を考慮した運行方式の提案」, 第 39 回ファジィ・ワークショップ講演論文集, pp.57-60, 2013
- [6] 安信誠二, 『ファジィ工学』, 昭晃堂, 1991

連絡先

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
 知的制御システム研究室 氏家義弘
 E-mail: ujjie@fz.iit.tsukuba.ac.jp