

NO_xの累積排出量が制約された場合の 火力発電機群起動停止問題 (第5報)*

— 揚水式発電所を系統に含む場合 —

中 村 陽 一**

山 城 迪**

(昭和55年4月30日受理)

Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units with Constrained Total Nitrogen Oxides Emissions (Part 5)

— The case of Including a pumping-up Power Station —

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

In this paper, our series of reports on the question of "Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units with Constrained Total Nitrogen Oxides Emissions" is expanded to cover the case of including a pumping-up power station, and we describe the calculating method used for this problem. We test our method by a model system, and consider its appropriateness. It is shown that when we simply apply the convenient rule of "generating operation at peak load, and pumping operation at base load", we fail to find the optimum operation. We show that the reason for this failure is the change of unit commitment and the value of the emission constraint. Using curves of the total cost versus total emission constraint for both the case of including a pumping-up power station and that of not including it, we show that the operation of a pumping-up power station is also useful under the total nitrogen oxides emission constraint for the thermal power plants.

1. ま え が き

火力発電所より排出される窒素酸化物(NO_x)の累積排出量が制約された場合、火力発電機群の運転パターンおよび発電機間の負荷配分を変更することにより、排出量制約を満足し、しかもできるだけ経済的な運転(最適運用)を決定できることを、筆者らは前報¹⁾までの一連の研究において示した。しかし、これまでの研究では火力発電機だけを最適運用の対象としていたが、揚水式発電所をも含む系統について最適運用を求めるならば、より最適な(より経済的な)

* 昭和55年電気学会全国大会で発表(1980-4)

** 北見工業大学電気工学科

運用が期待できる。その理由としては、1) 低効率の火力、および排出量過大な火力の運転を揚水式発電所で肩代りすることにより、全体の燃料費および排出量の軽減ができる。2) 低負荷時に揚水運転することにより、大容量火力の運転効率が向上し余剰電力の有効利用ができる。3) 低負荷時の揚水運転、高負荷時の発電機運転により火力発電機の起動停止回数を減少できる。4) 負荷の単位増分量に対する総排出量(全火力の排出量の合計)の増分量が小さいときに揚水運転、大きいときに発電機運転をすることにより、累積排出量の軽減ができる。などが考えられる。そこで本論では揚水式発電所を含む電力系統で、累積排出量制約に対する最適運用の決定手法について検討する。また、モデル系統を用いた試算結果により本手法の有効性を確認する。

2. 揚水式発電所入出力

揚水式発電所の入出力を P_P とし、 $P_P > 0$ は入力、 $P_P < 0$ は出力を表わすものとする。 q が正の値をとるときは揚水運転時の揚水量を表わし、負の値をとるときは発電機運転時の放水量を表わすものとする、 P_P は (1) 式により求めることができる^{2),3)}。ここで H_P は総揚程、 H_G は有効落差であり、貯水池の水位の変動を無視すれば (2), (3) 式で表わすことができる。

$$P_P = \begin{cases} 9.8 \times H_P \times q / \eta_P & (q > 0) \\ 9.8 \times H_G \times q \times \eta_G & (q < 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$H_P = (\text{総落差}) + (\text{揚水時の損失水頭}) \quad (2)$$

$$H_G = (\text{総落差}) - (\text{発電時の損失水頭}) \quad (3)$$

また、 η_P , η_G は (4), (5) 式により定められる発電機定数である。

$$\eta_P = (\text{電動機効率}) \times (\text{ポンプ効率}) \quad (4)$$

$$\eta_G = (\text{発電機効率}) \times (\text{水車効率}) \quad (5)$$

(1) 式より、本論では揚水式発電所入出力 P_P を (6) 式で扱うことにする。

$$P_P = \begin{cases} q/h_P & (q > 0, \text{揚水運転}) \\ q \times h_G & (q < 0, \text{発電機運転}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、

$$h_P = \eta_P / (9.8 \times H_P)$$

$$h_G = \eta_G \times 9.8 \times H_G$$

である。

3. 最適運用

系統負荷を P_L とし、火力発電機の第 m 号機の出力を G_m , G_m の 2 次式で表わされる燃料費を f_m , NO_x の排出量⁴⁾ を y_m , 排出量制約を Y とし、 λ , μ を Lagrange の未定乗数として (7)

式に示す目的関数を考える。

$$\phi = \sum_m f_m + \lambda(P_L + P_P - \sum_m G_m) + \mu(Y - \sum_m y_m) \quad (7)$$

送電損失を無視し、系統に含まれる揚水式発電所が1カ所である場合、ある並列発電機群について(7)式を最小化するとき、ある使用水量 q 、排出量制約 Y に対する負荷配分が得られる。このときの燃料費と停止時間に比例する起動費⁵⁾の和を運転費とする。日間を N 等分し、第 n 時間帯の系統負荷に対しさまざまな並列発電機群⁶⁾について(7)式を最小化し、最適な運転費を求め、これを $\omega^n(q, Y)$ とする。ただし、経済運用($\mu=0$)を行ったときに必然的に排出される排出量より多い排出量制約に対しては、経済運用の運転費を与え、また、最小排出量運用(μ に充分小さな値を与えて(7)式を最小化する)⁷⁾のときの排出量より小さい排出量制約に対しては実現不可能なので、(8)式の充分大きなペナルティコストを与えることにする。

$$\omega^n(q, Y) = \infty \quad (8)$$

その他、揚水式発電所には揚水量および放水量にも上、下限制約があるので、これらを満足しない q についても実現不可能なので、(8)式の充分大きなペナルティコストを与えることにする。

さまざまな貯水池水量、累積排出量制約を考え、これらに番号を与え、 i 番目の貯水池水量を Q_i 、 j 番目の累積排出量制約を Y_j とする。第 n 時間帯に Q_i 、 Y_j を満足しているような最適運用 $\Omega^n(Q_i, Y_j)$ は、自然流量を含まない純揚水式発電所の場合、(9)、(10)式の漸化式を解くことにより求めることができる。

$$\Omega^1(Q_i, Y_j) = \omega^1(Q_i - Q_0, Y_j) \quad (9)$$

$$\Omega^n(Q_i, Y_j) = \min_{q_k, Y_l} \left\{ \omega^n(Q_i - Q_k, Y_j - Y_l) + \Omega^{n-1}(Q_k, Y_l) \right\} \quad (n \geq 2) \quad (10)$$

ここで、 Q_0 は第1時間帯開始時における初期貯水量である。また、揚水式発電所には一般に貯水量にも上、下限制約があるので、この制約を満足しない Q_i についても(11)式の充分大きなペナルティコストを与えることにする。

$$\Omega^n(Q_i, Y_j) = \infty \quad (n \geq 1) \quad (11)$$

4. モデル系統への適用

第1表に示すような特性を持つ揚水式発電所と第2表に示すような特性を持つ6台の火力発電機からなる系統を考える。第1図に実線で示すような負荷曲線において、第1時間帯では全ての発電機が系統に並列するものとして最適運用を求めた。最初に、揚水式発電所を含まず、火力発電機だけで系統負荷を分担した場合について試算した。累積排出量制約に25[t]を与えた場合の結果を第3表に示す。次に、同じ累積排出量制約25[t]に対し、揚水式発電所を含み、かつ第12時間帯終了時の貯水量が初期貯水量 $Q_0 (=1,000,000 \text{ m}^3)$ に一致するものとしたときの最適運用を第4表に示す。なお、このとき火力発電機が分担した負荷を第1図に点線で示す。

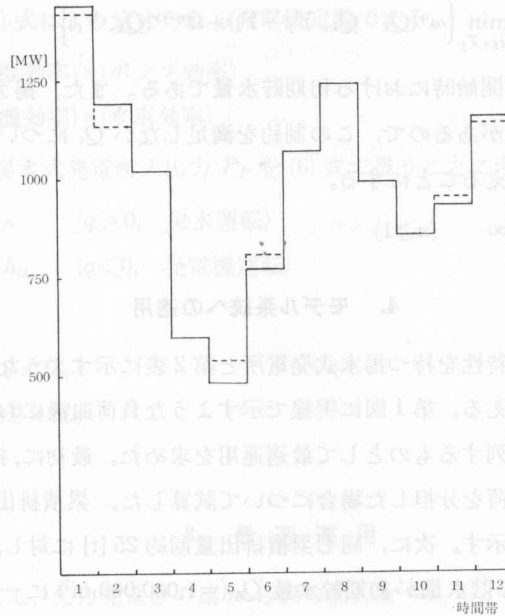
第1表 揚水式発電所特性

| | | 揚 水 運 転 | 発 電 機 運 転 |
|-------------|------------------------|---------------|---------------|
| 総 落 差 [m] | | 120 | 120 |
| 損 失 水 頭 [m] | | 2.76 | 2.61 |
| 運 転 可 能 水 量 | 下限 [m ³ /s] | 10 | 10 |
| | 上限 [m ³ /s] | 140 | 140 |
| η | | $\eta_P=0.89$ | $\eta_G=0.92$ |
| h | | $h_P=0.7398$ | $h_G=1.0584$ |
| 可 能 貯 水 量 | 下限 [m ³] | 200,000 | |
| | 上限 [m ³] | 2,000,000 | |

第2表 火力発電機特性

| 発電機 | 燃料費 $f=a+bG+cG^2$ [千円/時] | | | G_{min} [MW] | G_{max} [MW] | 排出量 $y=\alpha+\beta G+\gamma G^2$ [kg/h] | | | 起 動 費 [千円/時] |
|-----|--------------------------|--------|----------------------|----------------|----------------|--|---------|---------------------------|--------------|
| | a | b | $c [\times 10^{-3}]$ | | | α | β | $\gamma [\times 10^{-3}]$ | |
| 1 | 15.652 | 0.7971 | 3.153 | 27 | 101 | 164.98 | 0.3652 | 3.479 | 2.0 |
| 2 | 21.715 | 0.8355 | 0.588 | 37 | 220 | 62.31 | -0.5655 | 6.251 | 3.9 |
| 3 | 22.094 | 0.6806 | 0.630 | 37 | 222 | 40.91 | -0.5643 | 6.940 | 5.2 |
| 4 | 18.656 | 0.7177 | 0.504 | 37 | 236 | 40.91 | -0.5643 | 6.940 | 5.2 |
| 5 | 29.469 | 0.6455 | 0.375 | 144 | 344 | 43.58 | -0.5194 | 4.686 | — |
| 6 | 24.104 | 0.6800 | 0.318 | 144 | 344 | 43.58 | -0.5194 | 4.686 | — |

注) 5, 6号機はベース火力として常に系統へ並列する。



第1図 負荷曲線 (点線は火力分担負荷)

第3表 揚水式発電所を含まない場合の最適運用

×: 解列, 累積排出量制約: 25 [t], 累積運転費: 21,012 [千円]

| 発 電 機 | 時 間 帯 | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 2 | | | × | × | × | × | × | | × | × | × | |
| 3 | | | | × | × | × | | | | | | |
| 4 | | | | × | × | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 排 出 量 [t] | 3.75 | 2.75 | 2.25 | 1.00 | 0.75 | 1.50 | 2.50 | 2.75 | 2.25 | 1.25 | 1.75 | 2.50 |

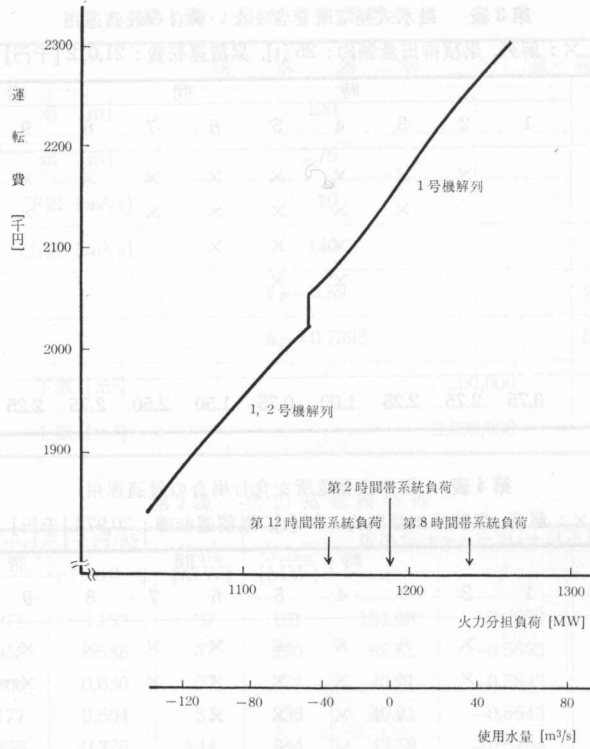
第4表 揚水式発電所を含む場合の最適運用

×: 解列, 累積排出量制約: 25 [t], 累積運転費: 20,974 [千円]

| 発 電 機 | 時 間 帯 | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 2 | | × | × | × | × | × | × | | × | × | × | × |
| 3 | | | | × | × | × | | | | | | |
| 4 | | | | × | × | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 排 出 量 [t] | 3.75 | 2.50 | 2.25 | 1.00 | 0.75 | 1.50 | 2.50 | 2.75 | 2.25 | 1.25 | 1.75 | 2.75 |
| 使用水量 [m ³ /s] | -20 | -50 | | | 40 | 30 | | | | | 10 | -10 |

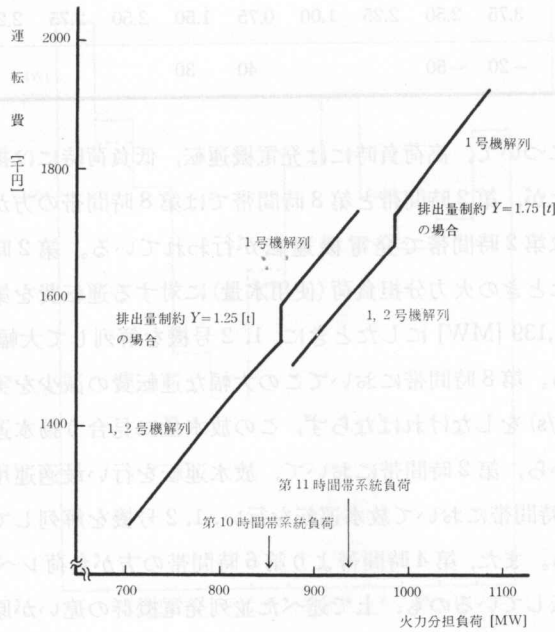
従来, 揚水式発電所について, 高荷負時には発電機運転, 低荷負時には揚水運転をすることが常識的に言われていたが, 第2時間帯と第8時間帯では第8時間帯の方が負荷レベルが高いにも拘らず, 第4表では第2時間帯で発電機運転が行われている。第2時間帯における排出量 25 [t] を制約量としたときの火力分担負荷(使用水量)に対する運転費を第2図に示す。第2図から火力分担負荷を 1,139 [MW] にしたときに, 1, 2号機を解列して大幅な運転費の減少が実現できることがわかる。第8時間帯においてこの大幅な運転費の減少を実現するためには, より多くの放水 (92.6 m³/s) をしなければならず, この放水量に見合う揚水運転にまた多くの運転費を必要とすることから, 第2時間帯において, 放水運転を行い最適運用を得ていることになる。このことは第12時間帯において放水運転を行い, 1, 2号機を解列して最適運用を得ていることから確認できる。また, 第4時間帯より第6時間帯の方が負荷レベルが高いにも拘らず, 第6時間帯で揚水運転しているのも, 上で述べた並列発電機群の違いが原因となっている。

一方, 第10および11時間帯では, 並列発電機群が同じであるにも拘らず負荷レベルの高

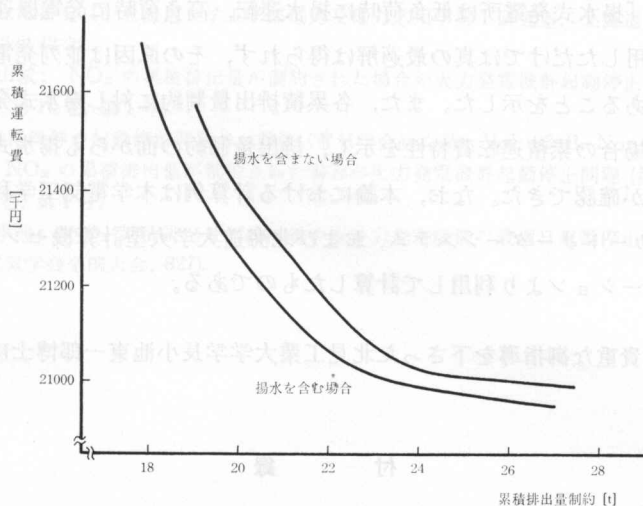


第2図 火力分担負荷に対する運転費特性

(排出量制約: 2.5 [t] の場合, 使用水量は第2時間帯の系統負荷を基準にしている。)



第3図 火力分担負荷に対する運転費特性 (排出量制約: 1.25 [t], 1.75 [t] の場合)



第4図 累積排出量制約に対する累積運転費特性

い第11時間帯で揚水運転が行われている。各火力分担負荷において、排出量制約1.25 [t] および1.75 [t] に対する運転費を第3図に示す。第3表の揚水を含まない場合の結果から、第10時間帯では $Y=1.25$ [t]、第11時間帯では $Y=1.75$ [t] の運用が行われていたことがわかるが、揚水運転を行い火力分担負荷を増加した場合、第10時間帯ではすぐに並列発電機群が変更になり大きな運転費の増加が起きるのに対し、第11時間帯では10 [m³/s] (=13.52 [MW]) 程度の揚水運転ではそれほど大きな運転費の増大は起こらないことがわかる。これは排出量制約の違いが原因となっているためである。以上のことから、並列発電機群の違いによっても、また排出量制約の値によっても、従来常識的に言われていた「低負荷時に揚水運転、高負荷時に発電機運転」ということを単純に揚水式発電所に対して適用しただけでは真の最適解は得られないことが確認できた。

次に、各累積排出量制約に対する累積運転費特性を、揚水式発電所を含む場合と含まない場合について第4図に示す。図から、経済運用では揚水式発電所を含む方が累積運転費が小さく、しかも必然的に排出されるNO_xも少ないことがわかる。また、各排出量制約について、常に揚水式発電所を含む運用の方が小さな累積運転費で実現されていることもわかる。さらに、最小排出量運用では揚水式発電所を含む方がより小さな排出量を実現していることがわかり、排出量制約の面からも揚水式発電所の運転効果を得られることが確認できた。

5. む す び

筆者らが報告してきた一連の「NO_x の累積排出量が制約された場合の火力発電機群起動停止問題」に関する研究を揚水式発電所をも系統に含む場合へ拡張し、その計算手法について述べた。また、本計算手法をモデル系統へ適用し、その有効性を確認するとともに、従来常識

的に言われていた「揚水式発電所は低負荷時に揚水運転、高負荷時に発電機運転をする」ということを単純に適用しただけでは真の最適解は得られず、その原因は並列発電機群の変化、および排出量制約にあることを示した。また、各累積排出量制約に対し揚水式発電所を系統へ含む場合と含まない場合の累積運転費特性を示し、排出量制約の面からも揚水式発電所の運転効果が得られることが確認できた。なお、本論における計算例は本学電気工学科データ処理室の HITAC-10II カードリーダーシステム、および北海道大学大型計算機センターの M-180 を本学データステーションより利用して計算したものである。

終りに、終始貴重な御指導を下さった北見工業大学学長小池東一郎博士に深く感謝申し上げます。

付 録

最小排出量運用を行うためには(A-1)式を最小にすれば良く、そのためには(A-2)式を解けば良い。

$$\phi' = \sum_m y_m + \lambda(P_L + P_P - \sum_m G_m) \quad (\text{A-1})$$

$$\lambda = \beta_m + 2\gamma_m G_m \quad (\text{A-2})$$

$$G_m = \frac{2(P_L + P_P) + \sum_m \frac{\beta_m}{\gamma_m}}{2\gamma_m \sum_m \frac{1}{\gamma_m}} - \frac{\beta_m}{2\gamma_m} \quad (\text{A-3})$$

$\sum G_m = P_L + P_P$ を利用すると G_m は(A-3)式となる。一方(7)式を最小にするためには(A-4)式を解けば良く、 $\sum G_m = P_L + P_P$ より G_m は(A-5)式となる。

$$\lambda = b_m + 2c_m G_m - \mu(\beta_m + 2\gamma_m G_m) \quad (\text{A-4})$$

$$G_m = \frac{2(P_L + P_P) + \sum_m \frac{b_m - \mu\beta_m}{c_m - \mu\gamma_m}}{2(c_m - \mu\gamma_m) \sum_m \frac{1}{c_m - \mu\gamma_m}} - \frac{b_m - \mu\beta_m}{2(c_m - \mu\gamma_m)} \quad (\text{A-5})$$

$$\rightarrow \frac{2(P_L + P_P) + \sum_m \frac{\beta_m}{\gamma_m}}{2\gamma_m \sum_m \frac{1}{\gamma_m}} - \frac{\beta_m}{2\gamma_m} \quad (\mu \rightarrow -\infty)$$

$\mu \rightarrow -\infty$ とすると G_m は(A-3)式と一致し最小排出量運用が得られる。

文 献

- 1) 中村・山城：NO_xの累積排出量が制約された場合の火力発電機群起動停止問題(第4報),(北見工大研報,第11巻,第2号)。
- 2) 千葉：水力発電所,最新高級電験講座第11巻,電気書院,昭和51年。

- 3) 自動給電に関する研究 (I), 北海道大学工学部電力及電力応用学第1研究室, 北海道電力株式会社営業部需給課, 昭和42年.
- 4) 中村・奈良・山城: NO_x の累積排出量が制約された場合の火力発電機群起動停止問題 (第1報), (北見工大研報, 第10巻, 第1号).
- 5) 山城: 火力発電機群の起動停止問題の一解法 (電気学会論文誌; Vol. 93-B, No. 9, 昭和48年9月).
- 6) 中村・山城: NO_x の累積排出量が制約された場合の火力発電機群起動停止問題 (第3報), (北見工大研報, 第11巻, 第1号).
- 7) 中村・山城・小池: NO_x 累積排出量制約に対する火力発電機群の最適日起動停止計画法 (第5報), (昭和55年電気学会全国大会, 827).

(Received April 25, 1980)

Abstract

Resistive and structural properties of chromium and chromium-copper alloy films were found to vary significantly with changes in substrate temperature and deposition rate, and with heat treatment.

Properties such as resistance, temperature coefficient of resistance, and Hall coefficient differ considerably from the corrected bulk values.

In an investigation of the structural properties of films, it was found that the constants of the as-deposited chromium and copper films were somewhat different from the ASTM value.

Heat treatment in air at 200°C for 3 hrs has improved the resistive properties of films deposited on 500 Å thick films containing a copper content lower than 60 wt. %.

1. Introduction

The physical properties of vacuum deposited films depend primarily on the following factors: composition and impurity content of evaporant, source temperature, residual gas composition and pressure, deposition rate, and temperature, substrate structure, bonding forces and cleanliness of the substrate surface.^{1,2,3,4,5}

The present study is concerned with the three parameters of substrate temperature, deposition rate and heat treatment for evaporated chromium and chromium-copper alloy thin films. Since these films are of practical importance as conductor films and adhesion-increasing underlayers for other metal depositions, depositions were performed in a high vacuum of 1×10^{-7} torr. The films were deposited on the frosted soda glass at the temperature of 200 or 300°C and at a deposition rate ranging from 3 to 18 angstrom per second from the electron beam.

The study shows that consistent electric properties can be obtained if both substrate temperature and deposition rate are closely controlled, and also shows that heat treatment in air at 200 or 300°C changes the electrical properties of the films, but is useful for the stabilization.

A part of this paper was presented at the annual meeting of the institute of electronics and communication engineers of Japan.

^{1,2} Department of Electronic Engineering, Khari Institute of Technology.

^{3,4,5} The Faculty of Dental Surgery, Hokkaido University.