

人工光型植物工場における葉物野菜の栽培技術

下山真人 溝田陽子

末田香恵 高橋真一

Cultivation Techniques for Leafy Vegetables in Artificial Light-Type Plant Factory

Masato Shimoyama Yoko Mizota

Kae Sueda Shinichi Takahashi

Abstract

Artificial light plant factories are part of the next generation of agriculture facilities because of their high level of safety and yield. Leafy vegetables are mainly cultivated in this system, but there is a common cultivation problem called tipburn that causes severe economic losses. We tried to establish a tipburn suppression method using Chinese cabbage. The results showed that large seedlings, no air layer, and controlled electrical conductivity (EC) accelerate the growth rate of Chinese cabbage in this system. In addition, the light period length, use of LED, and cultivar selection are important to suppressing tipburn. Antioxidants were increased when the products were cultivated in artificial light, which will enhance their commercial value.

概要

人工光型植物工場は高い安全性と成長速度の速さから従来の農業と異なる次世代型農業として注目を浴びている。一方、その速すぎる成長によって起こる葉先が黒くなり商品価値を損なう生理障害(チップバーン)が共通問題となっている。そこでチップバーンがより発生しやすいハクサイを研究材料として栽培試験を行い、高い生産性を維持しつつチップバーンを抑制する方法を検討した。その結果、大苗の使用、根圏部に空気層を設けない、培養液を電気伝導率(EC)管理することで高い生産性を得ることができた。また適度な明期の短縮、LED光源の使用、適切な品種の選定により、チップバーンが抑制できることが示された。さらに有用成分である抗酸化物質が露地産より増加し、生産物の価値を高められることも確認した。これら栽培管理技術は葉物野菜全般に展開できるといえる。

1. はじめに

人工光型植物工場は、安全性や生産性の高さの観点からこれまでの農業と異なる次世代型農業として注目を浴び、異業種の参入も相次いでいる。人工光型植物工場では人工的に制御した室内で作物を栽培するため、気候変動の影響や病害虫の存在が非常に少なく、結果的に農業を用いずに安全かつ安定的な生産が可能である。

また最近では、植物工場産野菜の栄養価の高さや独特の食感など、様々な嗜好への対応力も含めて多面的な展開が期待されている。現在の人工光型植物工場で主に栽培される野菜は葉物野菜であり、その生産量のほとんどをレタスが占めている。

レタスをはじめとする葉物野菜の栽培における共通問題として、葉先が黒くなる生理障害(チップバーン)が挙げられる。チップバーンは植物が急激に生育する際に発生し、葉先のカルシウム不足が原因の一つとされているが、葉の表面へのカルシウム散布や培養液の組成調整だけで完全に防ぐことはできない。黒くなった葉先は回復せず、商品価値を損なうため経済的に重大な損害をもたらす。レタスの栽培においては、最も生育が盛んな時期

に最も発生しやすいため、生産性を制限する重要な要因と考えられている。このことから、レタスを対象として発生メカニズムの解明や制御に関する多くの研究がなされてきた(Goto¹⁾, 大和²⁾)。一方で筆者らは、人工光型植物工場ではレタス以上にハクサイにおいてチップバーンが発生しやすいことを見出した。従来ハクサイは主に露地で栽培されており、人工光型植物工場での研究は世界的に見ても行われていなかった。そこで本論文では、チップバーンがより発生しやすいハクサイを研究材料としてレタス等の葉物野菜全般に展開できるチップバーン抑制方法の確立を試みるため、使用する苗の大きさ、培養液の供給方法、光源の条件などを検討した。また、収穫した生産物の品質を評価するため、人工光型植物工場産ハクサイと露地産ハクサイの成分を比較評価した。

2. 試験方法

2.1 実験目的

ハクサイの人工光型植物工場における栽培には前例がない。そこで、第一に生産物の重量である地上部生体重を指標として基本的な栽培方法を明らかにする。その上

で、急激な成長によって生じるチップバーン抑制技術を検討し、さらに生産物の品質面での評価を行うこととした。

2.2 試験装置, サプリング方法

実験施設の仕様をTable 1に、実験施設の主な環境条件をTable 2に示す。施設内部にはPhoto 1のような栽培棚からなる実験装置が6区画配置されている。各光源の特性はTable 3の通りである。ウレタン培地に播いたハクサイは育苗棚で育苗後(播種後14日間または28日間)、栽培棚へ定植して栽培した(3週間または4週間)。生育調査は株高, 株広, 生体重, チップバーン発生数について各区4個体行い、平均値を求めた(ただし、著しい生育不良個体が含まれた区については3個体の平均値とした)。

2.3 実験内容

2.3.1 基本的な栽培方法の検討 生産物の重量である地上部生体重を指標として①使用する苗の大きさ, ②根圏部の空気層の有無, ③培養液の供給方法の3点を検討した。

2.3.2 チップバーン抑制方法に関する検討 前述した項目について地上部生体重が優れた条件を選び基本的な栽培方法とした。その上で商品価値に大きく影響するチップバーンを抑制する方法について①明期の長さ, ②光源の種類, ③品種の3点を検討した。

2.3.3 収穫物の品質評価 人工光型植物工場で栽培したハクサイの品質を評価するため、ビタミンA, E, C及び糖度, 硝酸態窒素を分析し、露地産ハクサイとの比較を行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 基本的な栽培方法の検討

3.1.1 使用する苗の大きさ 農業では「苗半作」という言葉が古くから伝えられている。これは苗の良否が最終的な生産量を左右することを意味している。そこで、播種後14日目の苗(小苗)と播種後28日目の苗(大苗)を用意し、定植後の生育に対する育苗期間の影響を検討した。

Fig.1に示す通り、定植4週目の地上部生体重を比較すると、大苗は生育が旺盛であり、小苗の2倍まで地上部生体重が増加した。目標を200gと仮定すると、大苗は定植後3週間の時点で平均195gとほぼ到達できたのに対し、小苗は定植後4週間かけても達成できなかった。従って、大苗を使用するとコストが高い人工光型植物工場の栽培棚での栽培期間を短縮でき、生産物当たりのランニングコストを削減することができる。また、大苗は育苗期間が長い、苗の時期は占有面積が小さく比較的生育苗すれば専用の育苗室を設ける必要もなく、イニシャルコスト削減効果もあると考えられる。

Table 1 実験施設の仕様
The Specifications of the Experiment Facility

規格	幅1.8m×長さ9m×高さ2.3m
制御系	培養液濃度・供給量, 温度 照明自動制御
空調機	2台
栽培棚	2段×3列
照明	蛍光灯2種, LED 3種

Table 2 実験施設の環境条件
The Environmental Condition of the Experiment Facility

項目	設定条件
温度	22℃または25℃
湿度	50%RH~85%RH
明期	16hまたは8h
CO ₂ 濃度	1000ppm
培養液	水耕栽培用培養液
培養液供給方法	EC管理または培養液の体積管理



Photo 1 栽培状況
The Cultivation conditions

Table 3 各種光源の特性
The Comparison of Light Conditions

試験区名	名称	波長特性	光子束密度 (μmol/m ² /s)
蛍光灯	通常蛍光灯	太陽光に近い波長特性	165.9
LED1	A社 LED (赤青系)	赤, 青, 白, 遠赤の幅広い波長	294.9
LED2	B社 LED (白)	白色光	161.3

3.1.2 根圏部における空気層 一般に、植物の根は呼吸を行うために適度な空気を必要とする。本システムのように根圏部が完全に培養液中に浸漬される場合、特に酸素不足の危険性が高い。従ってより旺盛な生育を目指して十分な空気を供給するため、培養液と栽培ベッドの間に空気層を設け生育を比較した(Fig.2)。

空気層の有無による定植3週目の地上部生体重の比較をFig.3に示す。予想とは異なり空気層のない区で地上部生体重が大きくなっており、ハクサイの水耕栽培においては根圏部の空気層は不要と結論した。

3.1.3 培養液の供給方法 植物工場においては生産性を維持したままコストを削減することが重要である。そこで、培養液の供給方法について検討した。一般に、水耕栽培の培養液供給方法は電気伝導度(EC)を一定に管理する方法と管理しない方法の2つに大別できる。ECを一定に管理する方法は、植物が吸収した分の栄養分を補給して常に一定のECを維持する方法である(以下「EC管理」と呼ぶ)。EC管理下では植物の生育を妨げる栄養不足を防ぐことができるが、そのための設備や電力が必要となる。一方ECを管理しない方法は、初期に所定の培養液を与えた後は収穫まで補給しない方法である。初期の培養液成分が十分であれば栽培期間中の管理が不要であり、設備費やランニングコストを抑えることができる。ハクサイの水耕栽培において、コストの掛かるEC管理が必要であるかを検討した。なお、本実験施設では培養液タンクが密閉式ではないため、空気中への蒸発の影響を排除するよう初期の培養液を補充して一定の容量を維持する「培養液の体積管理区」を比較対照とした。

各試験区の定植4週目の地上部生体重をFig.4に示す。地上部生体重は、培養液の体積管理区でEC管理区の73%まで減少した。従って、ハクサイ水耕栽培の培養液の供給法としてはEC管理が適すると結論した。

3.2 チップバーン抑制方法の検討

既に3.1節で述べたように、人工光型植物工場におけるハクサイの基本的な栽培方法として、大苗を使用すること、根圏部に空気層を設けないこと、培養液をEC管理することとした。しかしながら、このような条件下で栽培されたハクサイには、急激な生育に伴いチップバーンが発生していた。そこで、以降は商品価値に大きく影響するチップバーンの抑制方法を検討した。

3.2.1 明期の長さ チップバーン抑制方法として、光合成を行う明期時間そのものを短縮して、チップバーンが起きない程度に成長速度を低下させることが考えられる。そこで明期を16hから8hに短縮し比較試験を行った。Fig.5のとおり、定植4週目では蛍光灯区でもLED1区でも明期を8hに短縮することでチップバーンは発生しなくなった。しかしながら、地上部生体重は明期16hに対して蛍光灯区で65%、LED1区で36%まで減少した。

人工光型植物工場において、栽培棚への定植後の栽培期間の延長はランニングコストの増加と生産性の低下を意味する。チップバーン抑制のためには明期の短縮は効果的ではあるが、生産性を維持するために必要以上に生育を抑制しない成長速度に管理することが重要であるといえる。

3.2.2 光源の種類 前述のとおり、チップバーンは生育が盛んな場合、すなわち成長速度が速い場合に発生する。また、共同研究を行った大塩³⁾は、フィリップス社製LED(赤白)において、地上部生体重が1日に13.7g以上増

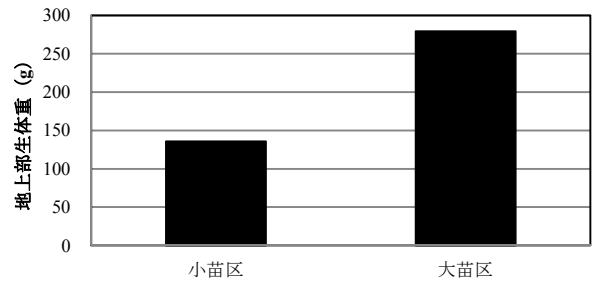


Fig. 1 使用苗の定植後の生育に対する影響
The Effect of the Seedling Size on Growth

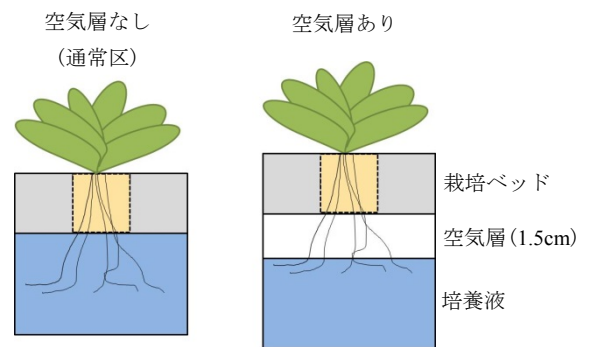


Fig. 2 空気層の断面図
Cross Section of Air Layer

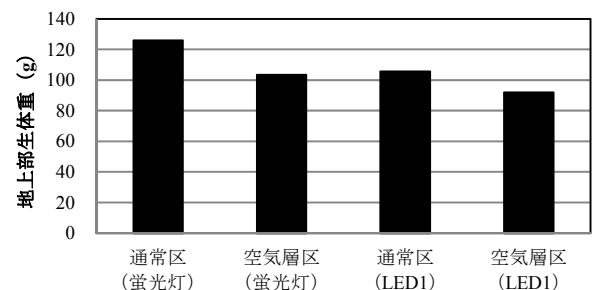


Fig. 3 空気層の有無の生育に対する影響
The Effect of the Air Layer on Growth

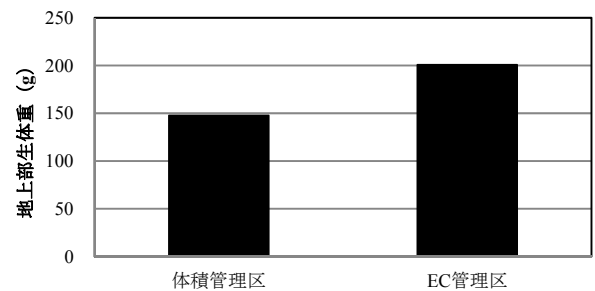


Fig. 4 培養液供給方法の生育に対する影響
The Effect of the Culture Supply Method on Growth

加するような成長速度でチップバーンの発生が予測されると報告している。そこで、より早い成長速度でもチップバーンを発生させない光源があるかを検討した。

各光源下における成長速度をTable 4に示す。いずれの試験区でも定植3週目にチップバーン発生を確認した。すなわち、LED1区とLED2区では1日に13.5gまたは15.2gの増加で、蛍光灯区では1日にわずか7.1gの増加でチップバーンが発生した。従って、比較した中にはより早い成長速度でもチップバーンを発生させない光源はなく、蛍光灯はチップバーン抑制に対してLED以上に検討が必要である可能性が示唆された。

3.2.3 栽培するハクサイの品種 チップバーンを抑制する方法として、よりチップバーンの発生しにくい品種を選定する方法も考えられる。これまでの実験では、大きな栽培空間を占有する点、栽培期間が長くなる点などから大型の野菜は人工光型植物工場には不適であると考へ、通常よりも小さなミニハクサイである品種Aを研究材料としてきた。しかしながら、チップバーンが起きにくいという点で、他により優れた品種がある可能性も否定できない。そこで品種A~Jの10品種について、蛍光灯とLED1の2種類の光源下で比較試験を行った。

全10品種のうち、品種H, I, Jについては苗の生育や定植後の生育が著しく不良であったため、生育調査を行わなかった。他の7品種の定植3週目の結果をFig.6とFig.7に示す。蛍光灯区ではチップバーン発生葉数が品種Aより増加したものの、品種Fと品種Gの地上部生体重が著しく増加した。さらに、LED1区では品種E、品種Fで品種Aと同程度または増加した地上部生体重でありながらチップバーン発生葉数が減少した。また、品種Gはチップバーン発生葉数が品種Aより増加したものの、地上部生体重が著しく増加した。

品種Aと同程度の地上部生体重でありながらチップバーン発生葉数が減少していた品種は、品種Aよりもチップバーンが発生しにくく抑制がより容易な品種と言える。また、チップバーン発生葉数が増加したものの、地上部生体重が著しく増加した品種については、品種Aより短い栽培期間で収穫することでチップバーンを回避できる可能性があると考えられる。

3.3 成分分析による比較評価

石川⁴⁾によると人体中の過剰な活性酸素は生活習慣病の発症や老化の促進をもたらすとされる。野菜の中にはこれらの活性酸素に対抗する抗酸化物質が多く含まれており、社会的な関心が高まっている。また、野菜のおいしさを決定する大きな要因の一つに甘味がある。これらの成分の向上は、植物工場産野菜に対して高い付加価値を与えるものである。そこで市販品(露地産)と人工光型植物工場産(蛍光灯区、LED1区)のハクサイにおいて、3種類の抗酸化物質(ビタミンA, ビタミンE, ビタミンC)

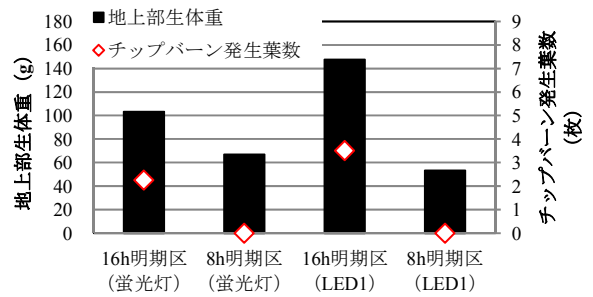


Fig. 5 明期の長さの生育に対する影響
The Effect of the Day Length on Growth

Table 4 光源別の成長速度
The Growth Rate on Each Light Condition

試験区名	成長速度 (一日当たりの生育量)		
	定植時 ~定植1週目	定植1週目 ~定植2週目	定植2週目 ~定植3週目
蛍光灯	1.4g	6.7g	7.1g
LED1	3.0g	4.9g	13.5g
LED2	2.2g	4.6g	15.2g

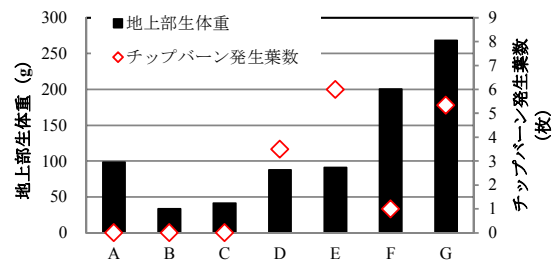


Fig. 6 栽培する品種の生育に対する影響 (蛍光灯区)
The Effect of Cultivars on Growth (fluorescent light)

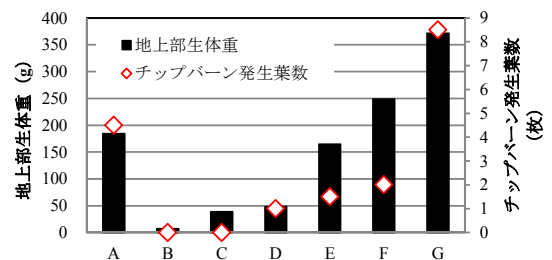


Fig. 7 栽培する品種の生育に対する影響 (LED1区)
The Effect of Cultivars on Growth (LED1)

と糖度の分析を行った。さらに、人体に摂取された場合の有害性が指摘される硝酸態窒素も分析した。野菜の硝酸態窒素量に関して国内に規制はないが、EUでは2000~7000ppmの基準値が設けられている。

ビタミンAとビタミンEは人工光型植物工場産ハクサイで増加し、なかでも蛍光灯区において明らかに含有量が増加した(Fig.8, Fig.9)。総ビタミンCは、蛍光灯区において増加したが、LED1区では露地産と同程度であった(Fig.10)。糖度はLED1区で露地産と同程度であったが、蛍光灯区では減少した(Fig.11)。硝酸態窒素については人

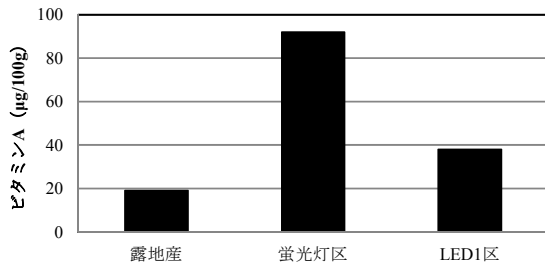


Fig. 8 ビタミンA含有量の比較
The Comparison of Vitamin A Content

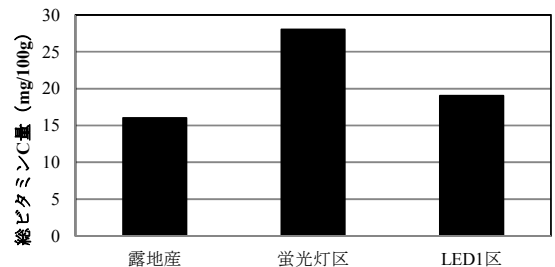


Fig. 10 総ビタミンC含有量の比較
The Comparison of Vitamin C Content

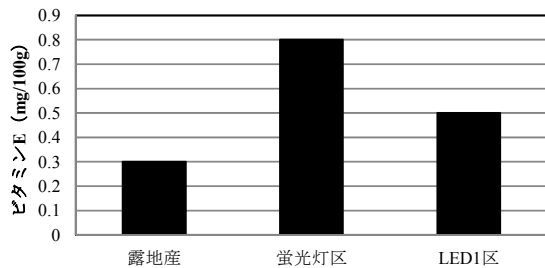


Fig. 9 ビタミンE含有量の比較
The Comparison of Vitamin E Content

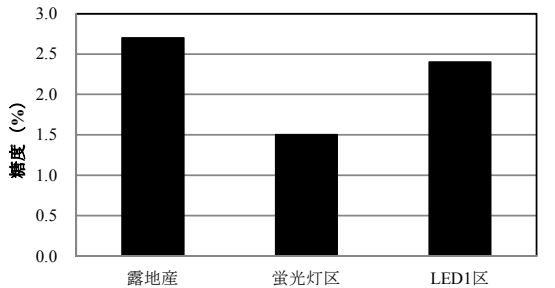


Fig. 11 糖度の比較
The Comparison of Sugar Content

人工光型植物工場産ハクサイで露地産よりも増加した (Fig.12)。従って、人工光型植物工場産ハクサイについては、栽培方法によって抗酸化物質を増加させて価値を高めることができるが、硝酸態窒素の低減が課題と言える。安田⁵⁾はホウレンソウの太陽光型水耕栽培において、生育時期に応じて培養液の供給方法と組成を変えることにより硝酸態窒素含有量を40%以下に低減させた。人工光型植物工場産ハクサイにおいても同様の検討により硝酸態窒素の低減を図ることが期待できる。

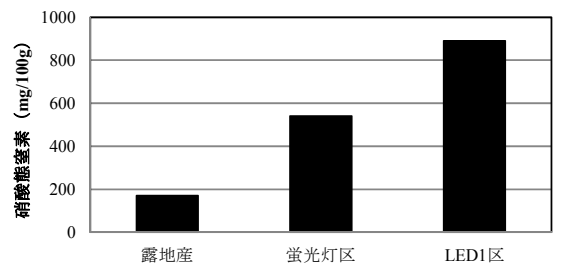


Fig. 12 硝酸態窒素含有量の比較
The Comparison of NO₃⁻ content

4. まとめ

人工光型植物工場において、チップバーンがより発生しやすいハクサイを研究材料として、レタス等の葉物野菜全般に展開できるチップバーン抑制方法の確立を試みた。

4.1 ハクサイの栽培技術

- ・人工光型植物工場におけるハクサイの基本的な栽培方法として、大苗を使用すること、根圏部に空気層を設けないこと、培養液をEC管理することが、地上部生体重の増加に有利であり、高い生産性を確保できることを明らかにした。
- ・商品価値に大きく影響するチップバーンの抑制方法として、適度な明期短縮、LED光源の使用、よりチップバーンの発生しにくい品種の選定が重要であることが示された。

- ・露地産に比べると人工光型植物工場産ハクサイでは有用成分である抗酸化物質が増加し、生産物の価値を高めることができた。
- ・更なる品質向上には、有害性が指摘される硝酸態窒素の低減とハクサイのおいしさの一つである糖度の増加が課題となる。

4.2 葉物野菜への展開

- ・ハクサイで明らかにした高い生産性を維持しつつチップバーンを抑制する方法は、他の人工光型植物工場産の葉物野菜に展開できる。
- ・人工光型植物工場産の葉物野菜は、ハクサイと同様に有用成分である抗酸化物質を増加させ、生産物の価値を高めることができる。一方で硝酸態窒素の低減は共通の課題になると言える。

謝辞

人工光型植物工場の栽培技術指導において、千葉大学古在豊樹名誉教授、千葉大学大学院 園芸学研究科 丸尾達教授のご協力を得たことに感謝いたします。

参考文献

- 1) Eiji Goto and Tadashi Takakura : Reduction of Lettuce Tipburn by Shorting Day/night Cycle , J. Agric. Meteorol., Vol.59, No.3, pp.219-225, 2003.9
- 2) 大和陽一, 他 : 環境制御下におけるレタスのチップバーンの発生に及ぼす液肥濃度およびK添加の影響, 園芸学会雑誌 別冊, Vol.75, No.1, p.501, 2006.3
- 3) 大塩貴寛, 他 : 人工光型植物工場におけるハクサイのチップバーン発生時期, 園芸学研究 別冊, Vol.13, No.1, p.164, 2014.3
- 4) 石川祐子, 他 : 平成20年度「農水産物機能性活用推進事業」報告書, 財団法人食品産業センター, Vol.39, No.11, pp.19-58, 2009.3
- 5) 安田雅晴, 他 : 水耕栽培ホウレンソウの内容成分改善に関する研究, 岐阜県農業技術研究所研究報告, Vol.4, pp.5-13, 2004.3