

論 文

岐阜県下の素材生産事業体の伐出作業を事例とした
DEA(Data Envelopment Analysis)効率性評価に関する研究

芝 正己*

Dateneinhüllungsanalytische Anwendungsmöglichkeiten zur Bewertung der relativen
Leistungsfähigkeit von Holzerntemaßnahmen dargestellt am Beispiel des privaten
Holzproduktionskörpern in der Präfektur Gifu

Masami SHIBA*

DEA (Data Envelopment Analysis/ Dateneinhüllungsanalyse) は、多入力・多出力システムの相対的効率性測定のための数理モデルの一つであり、線形計画法に基づいて DMUs (Decision Making Units/ Entscheidungsindividuen) と呼ばれる一群の意思決定主体の評価を行う手法である。本研究では、この DEA の基本的な考え方についてまず紹介し、実際の応用に際しての問題点のいくつかについて検討した。岐阜県下の素材生産事業体の伐出作業を解析事例とした結果、効率的フロンティアの同定、異なる作業システム間の効率性比較、効率的フロンティアを基準とした非効率的 DMUs への改善案の提示等、DEA が各事業体の特徴や生産環境を考慮した実用的な評価を可能にすることが示された。DEA に関する文献は既にかかなりの量に上っているが、森林・林業を対象とする我が国の研究分野ではほとんど知られていない。本論では、近年の複雑な森林資源の利用状況の下、厳しい課題（生産活動の再構築と抜本的な生産効率性の改善）に直面している素材生産事業に対し、特に伐出作業における効率性の評価と改善の二面にスポットを当て、DEA による解析法の可能性を明らかにした。

キーワード：DEA、伐出方式、効率性、意思決定主体、目標設定

Die Dateneinhüllungsanalyse (Data Envelopment Analysis: DEA) ist eine lineare Programmierung, die auf der Systemtechnik für die Messung der relativen Leistungsfähigkeit in den mehrdimensionalen Aus- und Eingaben enthalten wird, die von den geleiteten Wesen d.h., sogenannte die Entscheidungsindividuen (Decision Making Units: DMUs) erzeugt werden, gegründet wird. Die vorliegende Arbeit gibt zunächst eine knappe Darstellung der Theoriebildungen und Bewertungsverfahren zum Verständnis der DEA und einzelne wichtigste Schwachstellen, die in praktischen Anwendungen einer DEA als Bestandteil von Planung- und Entscheidungsverfahren entstehen. Durch einige Illustrationen der Anwendungsergebnisse zur Bewertung der relativen Leistungsfähigkeit von Holzerntemaßnahmen, die von den privaten Produktionskörpern in der Präfektur Gifu durchgeführt werden, werden die Vorteil dieser Methode im Untersuchen von bestimmten Teilen der tüchtigen Produktionphase festgestellt. Es existiert bereits eine große Anzahl der Publikationen mit Einsatzmöglichkeiten von DEA, aber sie ist eine in dem forstwissenschaftlichen Fachberich wenig bekannte Bewertungstechnik. Durch demonstrieren der Beispielsstudie, stellt die vorliegende Arbeit eine umfassendes und praktisches Verfahren für die Verwendung von DEA in der Lösungen der wirklichen Problembereiches, die von den Produktionssektoren, insbesondere wie die Holzernunternehmer, begegnet werden; In letzten Jahren sind sie gezwungen worden, sich um größere Leistungsfähigkeit zu bemühen, und besser führende Kontrolle und Entscheidungen ins Angesicht zugenommener Konkurrenz und das Schwinden bei der Pflege und Nutzung des Waldes.

Schlagwörter: Dateneinhüllungsanalyse (DEA), Holzerntemaßnahmen, Leistungsfähigkeit, Entscheidungsindividuen, Zielsetzung

I. はじめに

森林に対する社会的要求や価値観の多様化は、“資源利用の効率性：投資効果としての費用（投入）・便益（産出）の整合性”という課題に対して、多次元的な尺度と相対的観点からの総合的な判断基準を要求してきている。「経営効率性の測定」というテーマは、あらゆる事

業体にとって重要な課題となりつつあるが、それは国有林、民有林を問わず林業の生産部門にとっても例外ではない。

DEA(Data Envelopment Analysis)は、多入力・多出力システムの経営効率性評価のための数理モデルの一つであり、線形計画法に基づいて経営事業体の効率性を「複数の入力変数の加重和に対する出力変数の加重和の比」

* 京都大学大学院農学研究科 森林情報学研究室

* Lehrstuhl für Forstliche Angewandte Informatik, Aufbauforschungsgebiet für Landwirtschaft der Universität Kyoto

によって多次的に定量評価するものである。DEAは、1978年に Charnes, Cooper, Rhodes等(7)によって開発されて以来、米国や英国を中心として、公共機関から民間企業におよぶ様々な事業体の効率性評価のために適用されている(1,4,5,6,15,17,19,24)。既に紹介してきたが、フィンランドの林業審議会(Forestry Board Districts:FBDs)も他国に先駆けて、州有林の非営利的活動部門(non-profit public activities)の機構・組織改革の一環として、また一方では、民有林に対する素材生産活動の振興策のための効率化プロジェクトとしてDEAの導入を検討してきた(12)。

DEAの基本的考え方や評価法の枠組みについては、滋賀県及び三重県の森林組合、素材生産事業体の活動実績、国有林の営林局単位の経営管理実績等を対象とした解析事例を示しながら既に紹介してきた(16,18,20,21,22)。

本報では、岐阜県下の素材生産事業体を対象とした1993年から1995年の三年間の伐出作業の解析事例により、DEAによる生産効率性評価法の総括的な定式化を目指した。

II. DEA 効率性と評価法の概観

1) 評価法の特徴

1978年にテキサス大学の Charnes, Cooper, Rhodes等によって開発されたDEAは、多入力・多出力システムの経営効率性評価のための数理モデルの一つであり、線形計画法に基づいて経営事業体の効率性を「複数の入力変数の加重和に対する出力変数の加重和の比」によって定量評価するものである(8)。この方法は、経営効率の評価を一律に行うのではなく、事業体の固有の特性に合わせて個々の立場での経営効率の評価を行うという意味で、刷新的な尺度である。そして現在までに、DEAの適用に際して生じる種々の問題点を克服し、かつ、その適用範囲を広めるために、20以上の改良モデルが提案されている(10)。

DEAにおいては、分析の対象となる事業体は複数個あり、“同じ環境(共通の入出力を持つ)の中で互いに評価できる”と仮定し、分析対象の事業体が全事業体の経営活動と比較して相対的にどのような活動状態にあるかを経営効率として算出し、各事業体ごとに評価を行う。換言すれば、DEAは分析対象の事業体に対し、実現可能と思われる最適な経営状態をすべての事業体の経営活動から算出し、当該事業体がそれをどのくらい達成しているかをもってその事業体の経営効率の評価とする。

2) 評価法の数学的記述

DEAでは、分析対象となる事業体をDMU(Decision Making Unit:意思決定主体)と呼び、これらは同種の複数の入出力を持つものとする。一般に、入出力値とも非負であり、少ない入力で多くの出力を生み出すものほど望ましいものとして扱う。 n 個のDMUを考え、記号を以下のように定義する。

X_{ij} : DMU $_j$ の入力 i の値 ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$)

Y_{rj} : DMU $_j$ の出力 r の値 ($r=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,n$)

V_i : 入力 i にかかるウェイト ($i=1,2,\dots,m$)

U_r : 出力 r にかかるウェイト ($r=1,2,\dots,k$)

分析対象となるDMUを $j=a$ とし、DMU $_a$ について次の分数計画問題を考える。

最大化

$$h_a = \sum_{r=1}^k Y_{ra} U_r / \sum_{i=1}^m X_{ia} V_i \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{r=1}^k Y_{rj} U_r / \sum_{i=1}^m X_{ij} V_i \leq 1 \quad (2a)$$

$$(j=1,2,\dots,n)$$

$$U_r > 0 \quad (r=1,2,\dots,k) \quad (2b)$$

$$V_i > 0 \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (2c)$$

この問題の最適解を U_r^* ($r=1,2,\dots,k$)、 V_i^* ($i=1,2,\dots,m$)、最適目的関数値を h_a^* とすると、 $h_a^*=1$ である場合はDMU $_a$ を効率的、 $h_a^*<1$ である場合は非効率的であると定義する。上記の分数計画問題は次のような線形計画問題に変換して考えることができる(1,7,10)。

最大化

$$Z_a = \sum_{r=1}^k Y_{ra} U_r \quad (3)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^m X_{ia} V_i = 1 \quad (4a)$$

$$\sum_{r=1}^k Y_{rj} U_r - \sum_{i=1}^m X_{ij} V_i \leq 0 \quad (4b)$$

$$(j=1,2,\dots,n)$$

$$U_r > 0 \quad (r=1,2,\dots,k) \quad (4c)$$

$$V_i > 0 \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4d)$$

この問題の最適目的関数値が $Z_a^* = 1$ ならば、DMU_a は効率的であり、 $Z_a^* < 1$ ならば非効率的である。実際に上式を解く場合、無限小正数 ϵ を用いて、 $U_r \geq \epsilon$ 、 $V_i \geq \epsilon$ として行う。なお、上式の定式化は一般に CCR モデルと呼ばれる (7, 8, 10)。

Ⅲ. 数値解析例による DEA 効率性評価

ここでは前述した DEA 評価法の考え方に基づいて、異なった 2 種類の生産システム (2 入力-1 出力系) を前提とした CCR モデルによる効率性評価法について数値解析例により検討する。

1) 共通した生産システムを前提とする DMUs

DMU として、2 入力値 (X1, X2)、1 出力値 (Y) をもつ A ~ F の 6 つの事業体の効率性を考える (表-1)。なお、表中の X1, X2 の 2 入力値は、単位出力 1 を産出するのに要する値として換算したものである。図-1 は入力 1 及び入力 2 を座標軸として DMU をプロットしたものであるが、図より、原点に近くなればなるほど高い効率性を示すことは明らかである。なるべく少ない入力で所与の出力を与えている DMU ほど優れている。この場合、効率的フロンティア (効率値 = 1) は、線分 AB、BC によって形成されるが、このフロンティア線をもとにすべての DMU の効率値を決定することができる。すなわち、非効率的な DMU である D の場合を例にとると、原点 O と点 D とを結ぶ線がフロンティア線 AB と交わる点を D' とすれば、

$$\theta = \frac{OD'}{OD} \quad (5)$$

として D についての CCR 効率値 θ を推定することができる。この時、A、B、は D に対する優位集合あるいは参照集合と呼ばれるが、これらは、D の経営改善目標事業体となることを示している。また、E、F の場合、原点 O と E、F を結ぶ各線分は共にフロンティア線 BC と交わることより、B、C をそれぞれの優位集

合としていることがわかる。この結果、現状で非効率と見なされる D、E、F に対して、優位集合としての出現頻度は、A : 1 回、B : 3 回、C : 2 回となり、全体的な経営改善目標事業体として B が最も好ましい状況を呈していることがわかる。ちなみに、非効率な事業体である D の場合、「入力 1、入力 2 のいずれかを減らして A、C に移すか、あるいは相互に減らして線分 AB、BC 上のいずれかに移動させる」かによって効率化が図られる：いずれの改善策を導入しても、D の現状の入力レベルを増加させることなく、しかも出力レベルを落とすことなく効率化が可能であることを示唆している。

2) 異なった生産システムを前提とする DMUs

異なった 2 種類の生産システム A 及び B を有する 2 入力 (X1, X2) - 1 出力 (Y) の場合を考える (表-2)。ただし、表中の A (A1 ~ A9)、B (B1 ~ B9) 両システムの出力値 (Y) は単位出力 1 とする。図-2 より、システムの区別を考慮しない場合、効率的フロンティアは A1, A4, A6, B4, B5, B7 を結ぶ線となるが、A6 と B4 を結ぶ線上の活動は存在しないので、図中の実線で示すよ

表-1 2 入力(X1,X2)-1 出力(Y)系の数値例；共通した生産システム環境

Tabelle 1 Beispieldaten zur Effizienzrechnung bei der DEA; nach zwei Eingaben und einzelne Ausgabe

DMUs	入力(X1)	入力(X2)	出力(Y)
A	0.5	1.5	1.0
B	1.0	0.7	1.0
C	1.5	0.5	1.0
D	1.5	1.5	1.0
E	2.5	1.5	1.0
F	2.0	1.0	1.0

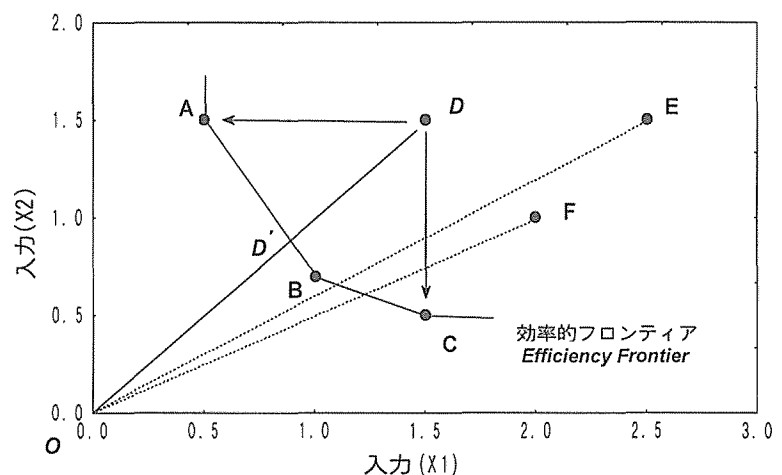


図-1 2 入力-1 出力系の CCR モデル効率性の図解

Abb. 1 Graphische Darstellung zur Herleitung des CCR-Wertes für jede DMU in der gleichgearteten Systemanlage mit zwei Eingaben und einzelne Ausgabe

表-2 2入力(X1,X2)-1出力(Y)系の数値例；異なる生産システム環境

Tabelle 2 Beispieldaten zur Effizienzrechnung bei der DEA; nach zwei Eingaben und einzelne Ausgabe unter verschiedenen Ausführungssystemen

システム A				システム B			
DMUs	入力(X1)	入力(X2)	出力(Y)	DMUs	入力(X1)	入力(X2)	出力(Y)
A1	1.0	4.0	1.0	B1	4.0	4.0	1.0
A2	2.0	4.5	1.0	B2	4.0	3.5	1.0
A3	2.0	3.5	1.0	B3	4.5	2.0	1.0
A4	2.0	2.5	1.0	B4	6.0	1.0	1.0
A5	3.5	3.5	1.0	B5	7.0	0.5	1.0
A6	3.5	2.0	1.0	B6	8.0	1.0	1.0
A7	4.5	2.5	1.0	B7	8.5	0.5	1.0
A8	6.0	1.5	1.0	B8	6.0	3.0	1.0
A9	8.5	1.5	1.0	B9	8.0	3.0	1.0

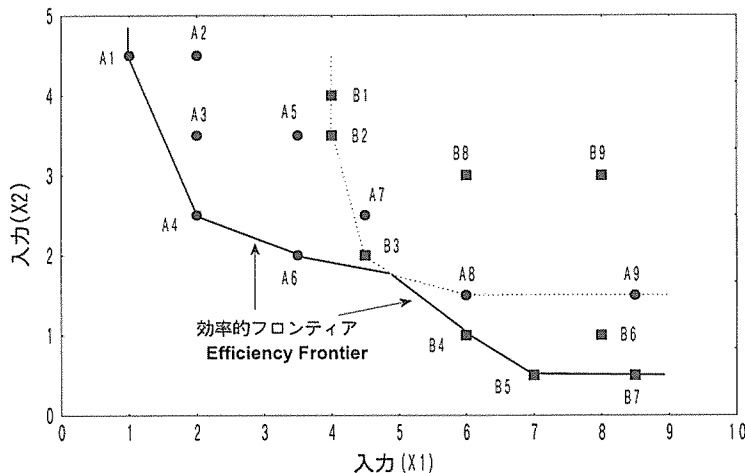


図-2 異なる生産システム環境下(A:B)の2入力-1出力系のCCRモデル効率性の図解

Abb. 2 Graphische Darstellung zur Herleitung des CCR-Wertes für jede DMU in den unterschiedlichen Systemanlagen (System A und B) mit zwei Eingaben und einzelne Ausgabe

うな効率的フロンティアが形成される。この場合、システムAのみの効率的フロンティアは、A1, A4, A6, A8, A9であり、システムBのみの効率的フロンティアはB1, B2, B3, B4, B5, B7であるが、両者の交点はそれぞれの分岐点とみなすことができ、両システム間の差は、システムAは入力1の点で優越しており、逆にシステムBは入力2で優れていることがわかる(9, 23, 25, 26)。

IV. 伐出作業の解析事例

1) 調査法及び解析データ

岐阜県木材組合連合会に加入している133の素材生産業者(1996年4月現在)を対象として、アンケート方式による素材生産活動実績調査を行い、DEA解析用の基礎データを得た(11)。一ヶ月の回収期間を設定して送付した全アンケートの内、何らかの回答が得られたも

の総数は40件(30.1%)であったが、これらの中には欠損値を含む回答が6件あり、最終的にはこれらを除く34事業体(25.6%)が解析対象となった。

調査項目の内訳については、当該事業体の過去の生産活動実績の把握を目的とした「基礎調査部分」と、伐出事例単位ごとのDEA効率比較のための「細部調査部分」の2構成とした。基礎調査部分の主要項目は、事業主体、雇用形態、過去3年間(1993年～1995年)の主間伐別の素材生産量、集材面積・箇所数、樹種・林齢、地形条件、集材方式等とし、伐出事例単位ごとの細部調査項目については、上記の基礎調査項目に加えて、造材方式、集材距離(最大・最小、平均)、使用機械(機種・定格出力、使用年数、機械経費等)、作業員数(作業種・男女別)、作業日数、作業賃金等、併せて30項目を取り上げた。

2) アンケート集計結果からの素材生産活動実態：基礎調査部分

図-3に、過去3年間において主伐による素材生産を実行した34素材業者についての主要調査項目別の集計結果を、ヒストグラムと基本統計量(平均: Durchschnittswert/ DW、最小値: Minimum/ Min、最大値: Maximum/ Max、標準偏差: Normalabweichung/ NA)で示す。経営主体別では法人が24と最も多く、次いで個人が9で、その他に分類されるものが1事業体(素材生産協業組合)あった。年間素材生産量は平均で約3000m³程度となっているが、その規模は最小10m³から最大18500m³と大きくばらついており、図から明らかなように、年間2000m³以下の比較的小規模の事業体が全体のほぼ半数以上を占めている。単位面積当たりの集材材積は、作業種、林齢、造材歩留まり等によって異なってくるが、ヒストグラムの分布やその統計量より、本主伐事例においては皆伐及び択伐方式の実行割合がほぼ同程度であったことが類推される。なお、一箇所当たりの集材面積については、100haを超える大規模な実行事例4件も報告されているが、全体の7～8割は20ha以下であり、3カ年の平均は15ha程度となっている。

次に図-4は、間伐による素材生産実行事例の集計結果を示している。ここでは17の事業体を対象としているが、過去3年間に継続的な素材生産を行わなかった事業体、伐出面積や間伐率・回数等の記録が不備な事業体等については一応除外した。なお、この17の事業体はいずれも主伐での実行実績も有している。図より、年間の素材生産量の平均は300m³程度となっており、この値

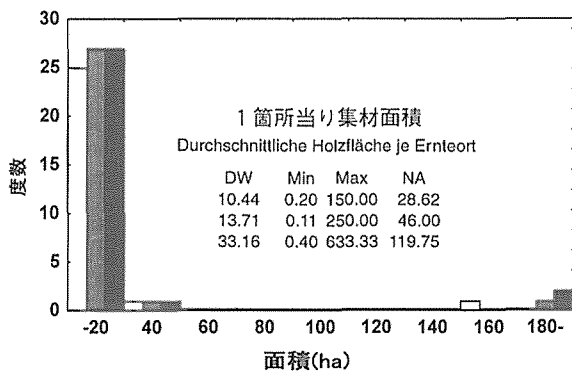
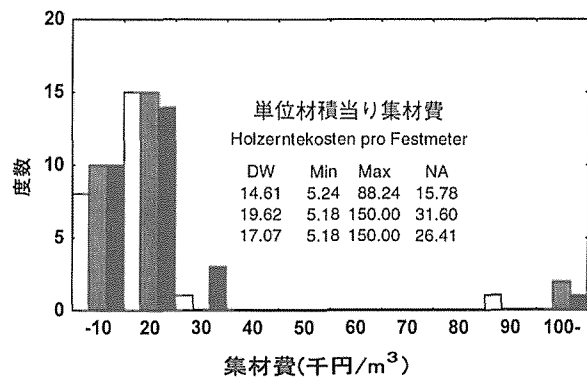
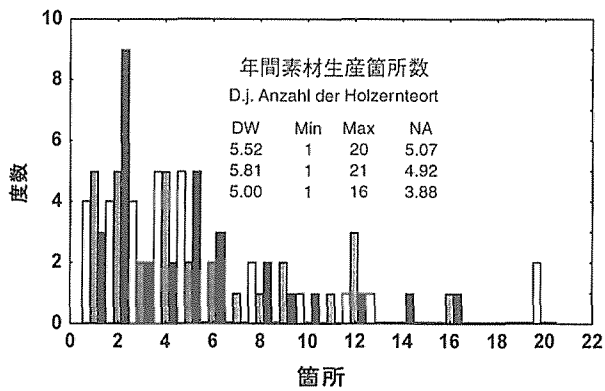
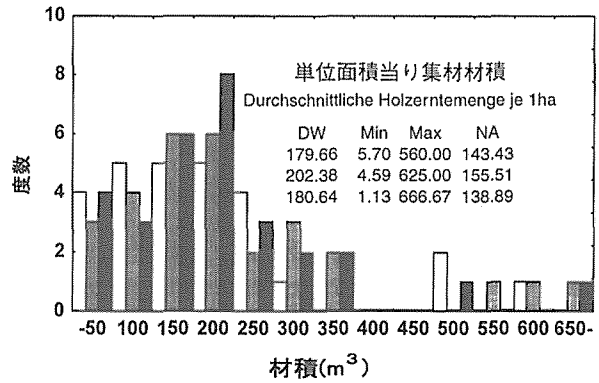
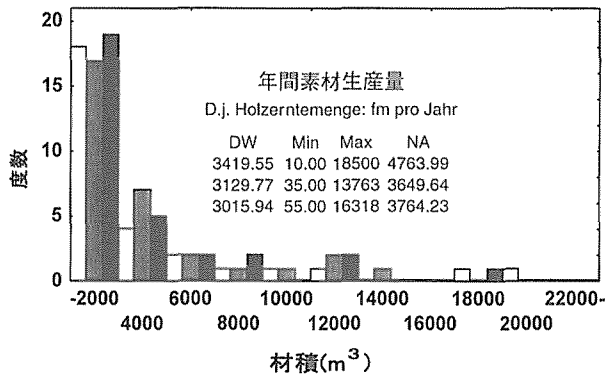
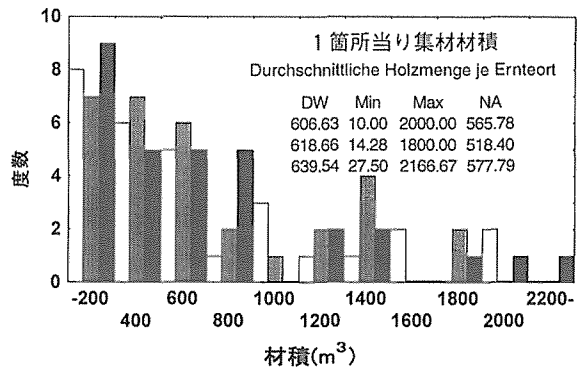
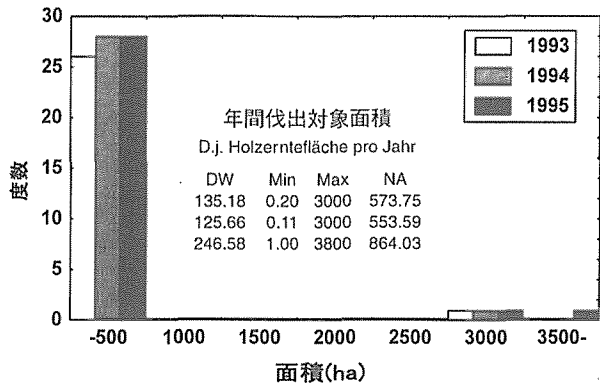


図-3 素材生産業者の生産活動実績に関する統計数値；1993-1995年／主伐

Abb. 3 Erhebungserfolg über die Produktionsdurchführungen bei den Holzernteunternehmer in der Präfektur Gifu mit Anzahl auswertbarer Fragebögen, die stammen aus den Jahren 1993-1995; Altdurchforstungen (AD) und regelmäßig Endnutzungen (EN)

*D.j.=Durchschnittliche jährliche

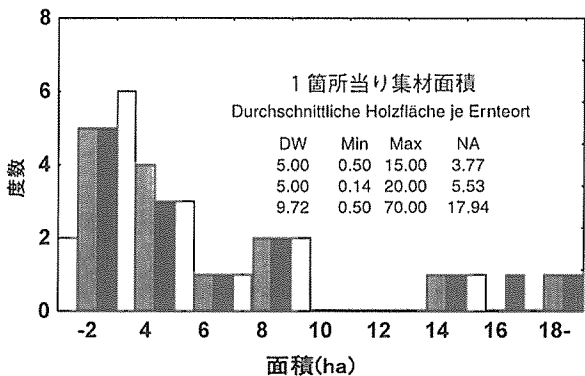
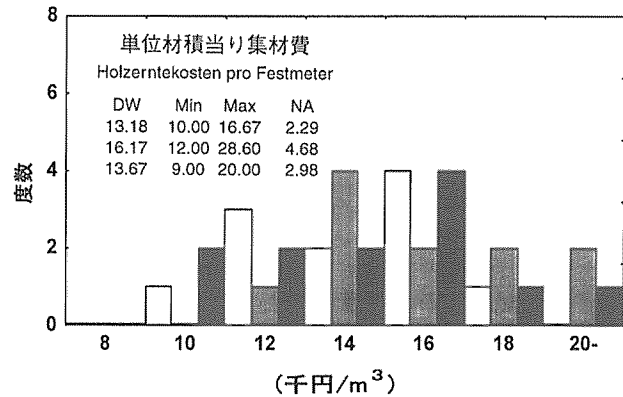
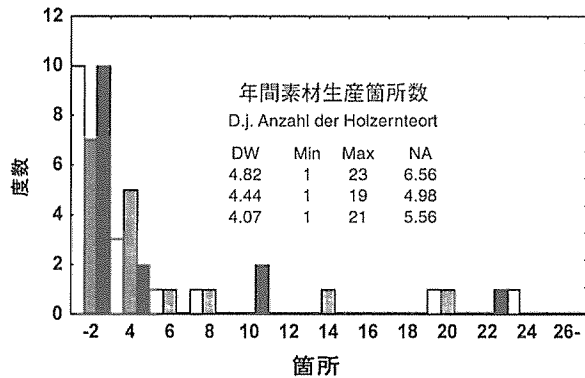
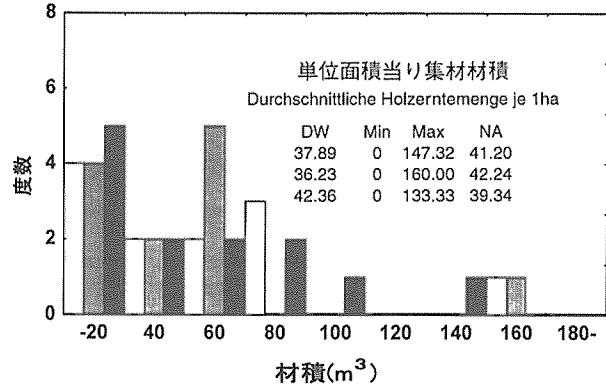
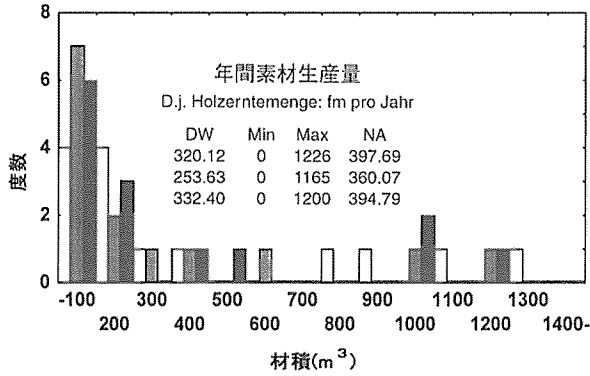
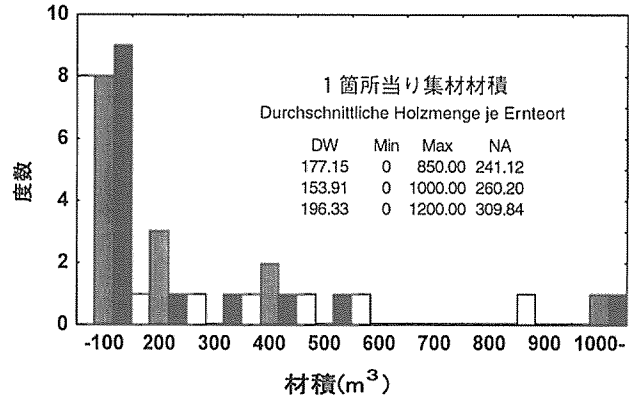
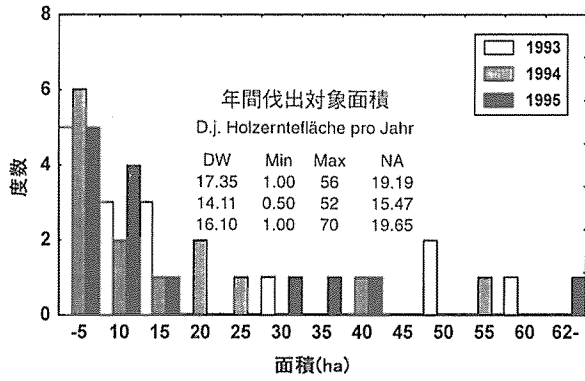


図-4 素材生産業者の生産活動実績に関する統計数値；1993-1995年／間伐

Abb. 4 Erhebungserfolg über die Produktionsdurchführungen bei den Holzernteunternehmer in der Präfektur Gifu mit Anzahl auswertbarer Fragebögen, die stammen aus den Jahren 1993-1995; Durchforstungen (Erst- und Zweitnutzungen : JD)

は主伐生産量のほぼ1割に匹敵している。ヒストグラムは比較的小規模の素材生産を行っている事業者が多いことを示しているが、ちなみに200m³以下の割合が全体のほぼ半数を占めている。年間の素材生産個所数の平均4.44は、主伐の5.44と大差はないが、対象面積は主伐の場合に比べてほぼ1/10、一箇所当たりの集材材積は175.80m³と主伐の28.3%に過ぎず、生産条件としての伐採規模（面積・集材量）の違いが明確に現れている。

3) アンケート集計結果からの素材生産活動実態：細部調査部分

ここでは、伐出事例単位ごとに集計した細部調査項目の主要部分について検討する。まず図-5は主伐68事例の結果である。集材面積及び一箇所当たりの集材材積のヒストグラムより、相当大きな伐採を実行している事例も認められるが、平均集材面積7.26ha、集材材積923.81m³（1000 m³以下が約80%）の両数字から比較的标准的な規模の作業が実行されたことがわかる。次に作業条件としての林地傾斜についてみると、ヒストグラムの分布から明らかなように45%以上や15%以下での実行事例も若干みられるが、全体的にはばらつきは小さく、ほぼ平均傾斜（28.24%）を代表値とする範囲に集中していることがわかる。作業機械や集材距離はこのような地形条件に大きく影響されると考えられるが、図中に示した投入作業機械種や平均集材距離の分布はこれらの傾向を良く表している。すなわち、投入機械の約80%は集材機であり、しかも平均集材距離452.4mの数値は、中距離架線による一段集材の標準的な作業距離にほぼ匹敵している。平均作業数（4.6人/日）や労働生産性（2.405m³/人・日）の統計数字からも、上述の作業方式の一般的特徴がうかがわれる。

次に図-6は、間伐19事例の結果を示している。主伐の結果に比べて項目によってはその分布や統計量にか

りの違いをみせているものもある。平均集材面積及び集材材積から換算したha当たりの集材量は58.06m³であり、主伐のほぼ27%を示している。地形条件としての林地傾斜は平均26.46%と、主伐の事例（28.24%）と大差はない。集材面積や集材材積で示される伐採規模の違いを反映するように、平均集材距離、投入作業機械種等に関しては若干違いが認められる。すなわち、平均集材距離（308.1m）は主伐の7割程度の距離となっているが、この差は作業機械の種類、特にクレーン車や林内作業車のような短距離作業型の車両系機械の導入割合（16.7%）が比較的高くなっていることに起因しているものと考えられる。最後に労働生産性についてみると、平均2.654m³/人・日の数字は主伐の2.405m³/人・日に比べて若干大きい値を示しているが、事例数の違い、分布のばらつきや標準偏差の大きさを勘案すれば、主間伐別の労働生産性には大差はなかったと言える。

V. DEAによる効率性の評価結果

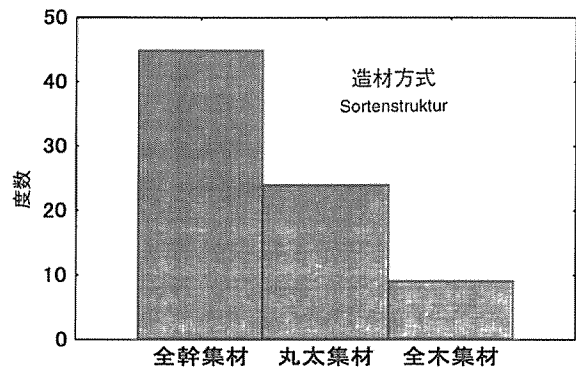
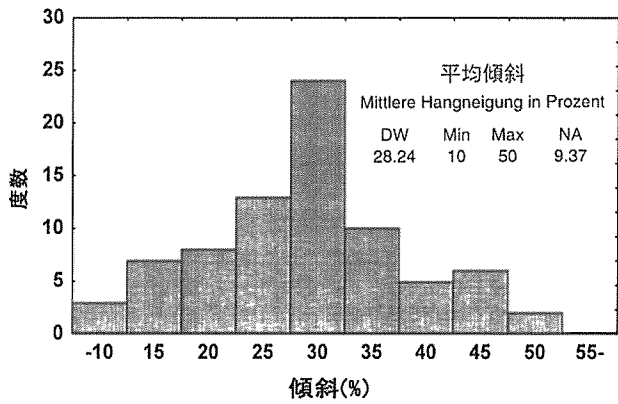
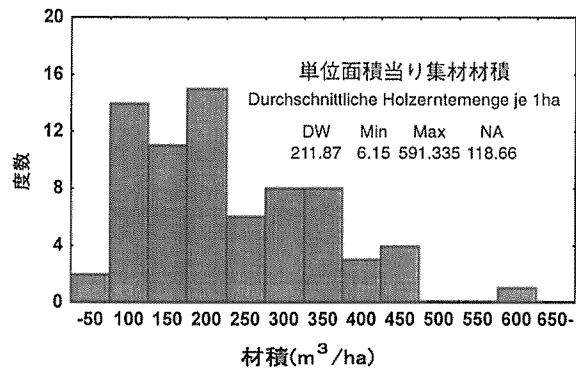
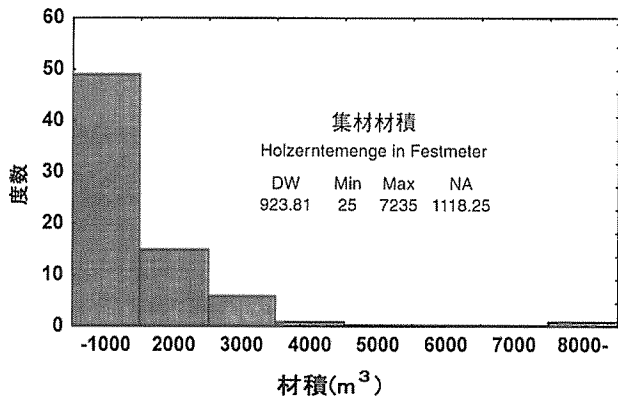
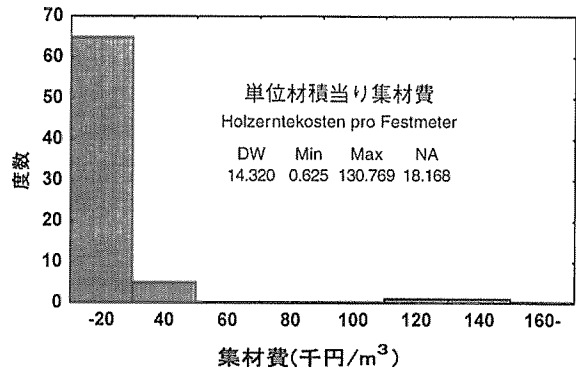
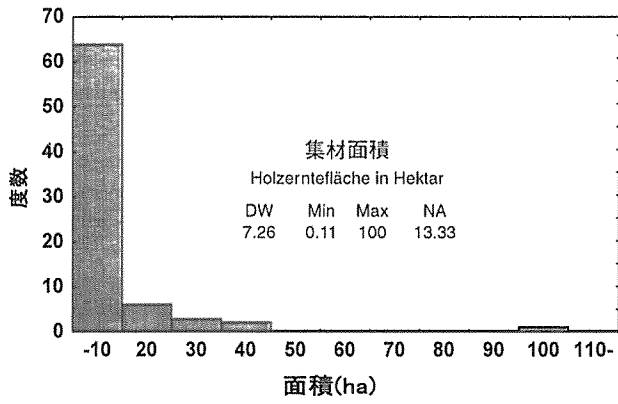
1) 入出力変数とCCRモデルの決定

各事例をDMUとするDEA効率性評価を目的として、主間伐別の細部調査項目を入出力変数とするCCRモデルをまず決定した。入出力項目の選定に当たっては、相関分析及びクラスター分析（測定距離：ユークリッド距離、結合方法：最近隣法）を用い、変数間の相関構造から表-3に示す6つのCCRモデル（Model 0- Model 5）を決定した。各モデルの特徴については以下に説明を加えるが、Model 0-Model 2は、伐出作業の労働集約的・技術的生産効率性の比較を主眼とした基本モデルであり、Model 3-Model 5は、これらの基本モデルに集材費用を含めてコスト面からの効率性評価も試みようとした二次的なモデルである。

表-3 DEA効率性評価のための入出力項目数の異なる6つのCCRモデル

Tabelle 3 Ein- und Ausgabekriterium zur Beschreibung der Struktur und Charakteristika von 6 CCR- Modelle (Modell 0- Modell 6)

	Model 0 6	Model 1 6	Model 2 8	Model 3 6	Model 4 6	Model 5 8
入力項目数	6	6	8	6	6	8
入力(1)	平均傾斜	集材面積	集材面積	平均傾斜	集材材積	集材材積
入力(2)	林齢	平均傾斜	平均傾斜	林齢	集材面積	集材面積
入力(3)	集材材積	集材材積	林齢	集材材積	平均傾斜	平均傾斜
入力(4)	平均集材距離	平均集材距離	集材材積	平均集材距離	平均集材距離	林齢
入力(5)	集材延べ人数	集材延べ人数	集材延べ作業日数	集材延べ人数	集材延べ人数	平均集材距離
入力(6)	単位面積当り集材材積	単位面積当り集材材積	集材延べ人数	総集材費	総集材費	集材延べ人数
入力(7)			平均集材距離			集材延べ作業日数
入力(8)			単位面積当り集材材積			総集材費
出力項目数	1	1	2	1	2	4
出力(1)	集材材積/単位作業者	要作業者数/単位材積・距離	要作業者数/単位材積	集材材積/単位作業者	要作業者数/単位材積・距離	要作業者数/単位材積
出力(2)			集材材積/単位距離		集材費/単位材積・距離	集材材積/単位距離
出力(3)						集材費/単位材積
出力(4)						集材費/単位距離



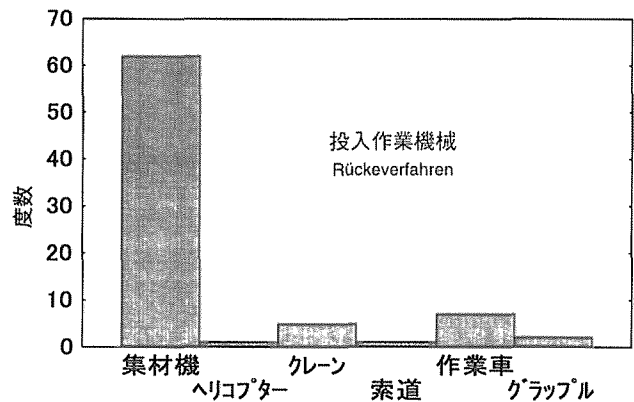
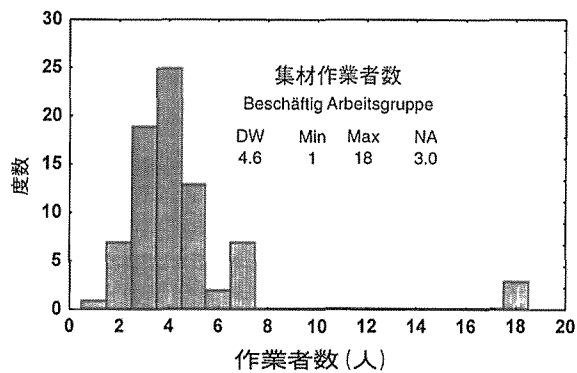
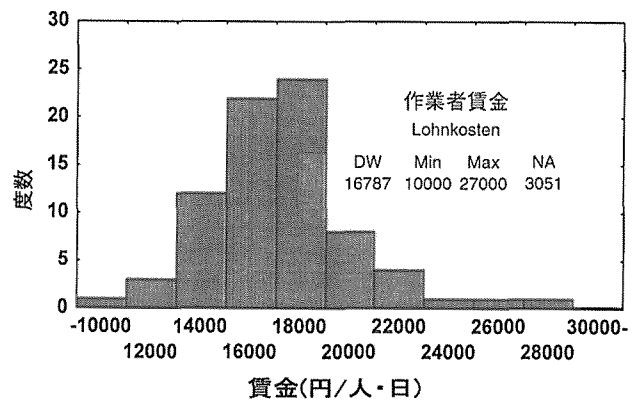
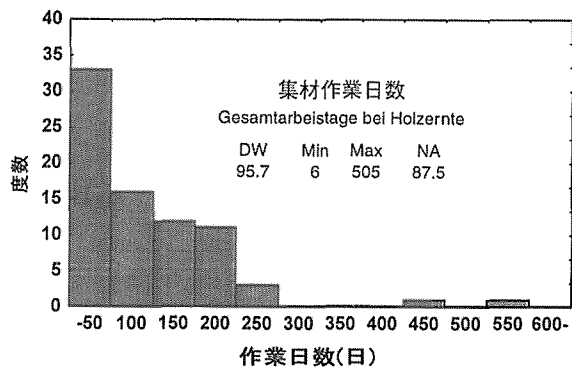
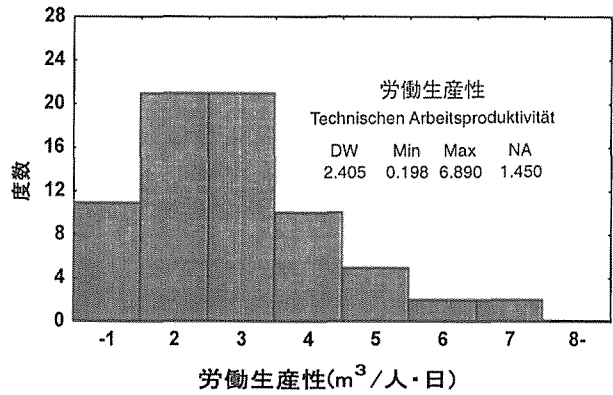
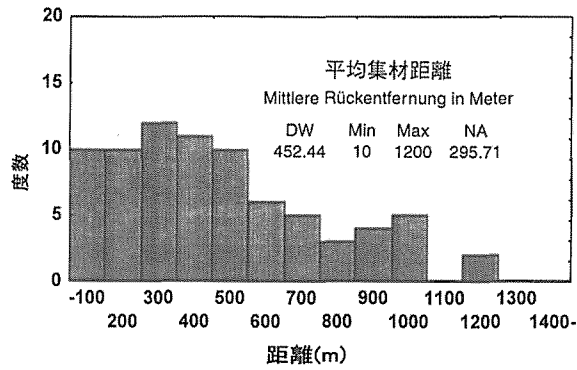
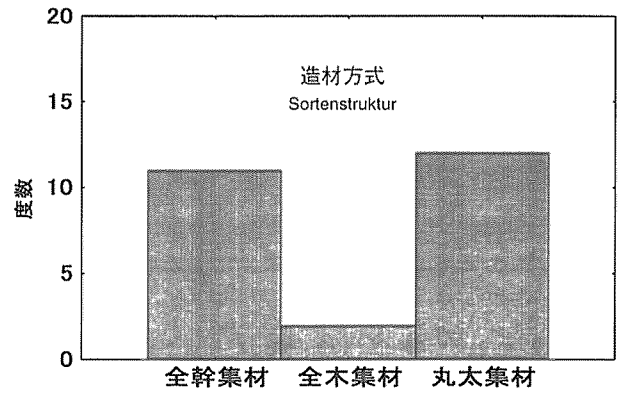
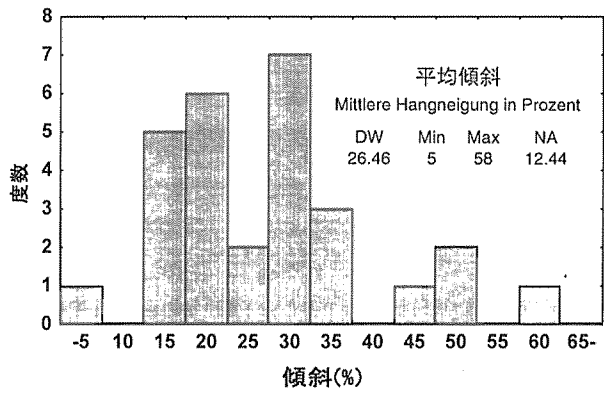
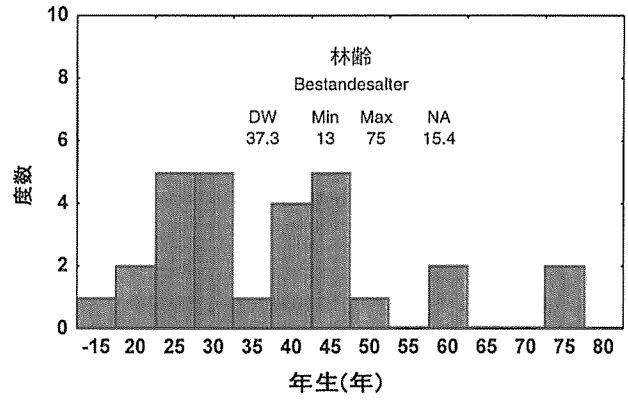
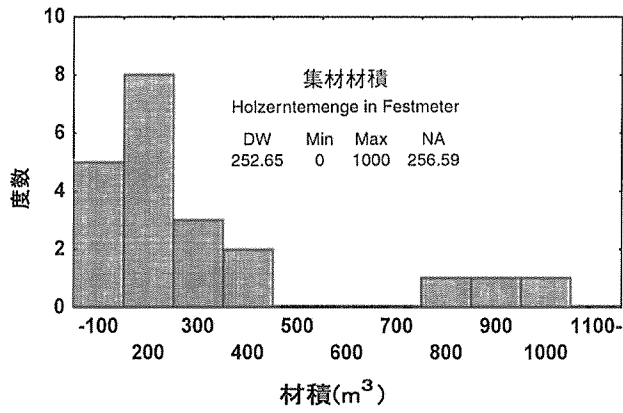
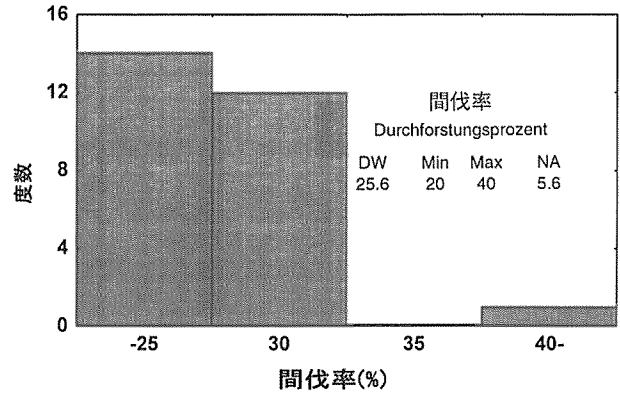
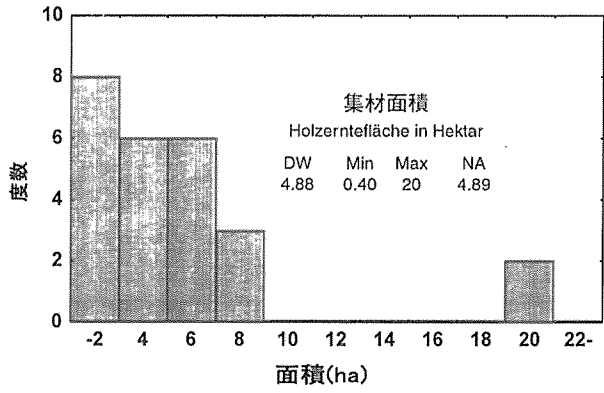


図-5 伐出事例単位ごとの主要項目別統計量比較；主伐68事例

Abb. 5 Erhebungserfolg der wichtigen Verhaltensvariablen über Produktivität, Kosten, Geländebedingungen und Arbeitkräfteeinsätze bei der Holzernte in Endnutzbeständen mit Anzahl auswertbarer Fragebögen (68)



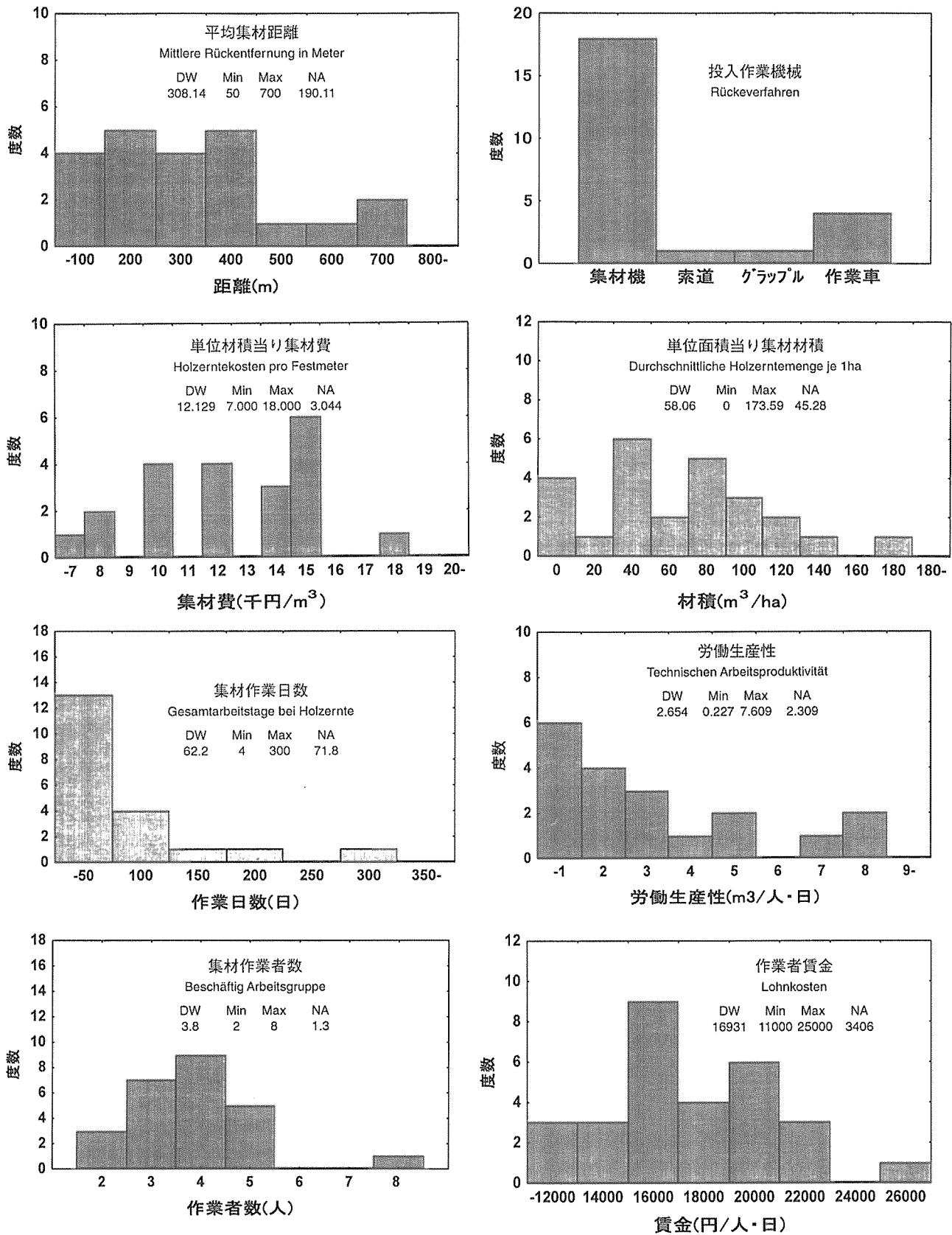


図-6 伐出事例単位ごとの主要項目別統計量比較；間伐19事例

Abb. 6 Erhebungserfolg der wichtigen Verhaltensvariablen über Produktivität, Kosten, Geländebedingungen und Arbeitkräfteeinsatz bei der Holzernte in Durchforstungsbeständen mit Anzahl auswertbarer Fragebögen (19)

[Model 0 : 6入力-1出力系]

伐出作業における労働集約的な効率性の評価に主眼を置いたモデルで、労働生産性 (m³/人・日) のみを出力変数として、平均傾斜、林齢、集材材積、平均集材距離、集材延べ人数、単位面積当り集材材積の6項目を入力変数とする。このモデルの場合、生産システムとしての作業方式や投入機械に影響される技術的効率性の部分は、入力変数によって間接的・潜在的に反映されていると仮定している。

[Model 1 : 6入力-1出力系]

伐出作業の労働集約的な生産効率性と、作業方式や投入機械の違いによる技術的生産効率性の双方を包含したモデルで、単位材積・距離当たりの要作業数を入力変数として、集材面積、平均傾斜、集材材積、平均集材距離、集材延べ人数、単位面積当り集材材積の6項目を入力変数とする。このモデルの場合、Model 0が技術的生産環境条件の違いを入力変数に間接的に反映させているのに対し、技術的効率性を出力変数で直接的に評価する点でModel 0と大きく異なっている。

[Model 2 : 8入力-2出力系]

集材面積、平均傾斜、林齢、集材材積、集材延べ作業日数、集材延べ人数、平均集材距離、単位面積当り集材材積の8項目の入力変数に対し、単位材積当り要作業数、単位距離当り集材材積の2出力変数からなり、設定した基本モデルの中で最も多くの入出力変数を含むCCRモデルである。このモデルの特徴は、入出力変数を増やすことにより各DMUのもつ個々の作業特性や環境を広義的に加味した、いわゆる「長所誘導型」のDEA効率性評価を行うことであり(2, 25, 26)、Model 0とModel 1の中間型の評価モデルである。

[Model 3 - Model 5]

Model 0- Model 2の各入出力項目に集材費用を組み込んだモデルで、労働集約的な生産効率性、作業方式や投入機械の違いによる技術的生産効率性に加えて、経営面からの効率性を考慮した包括的な評価モデルである。

2) CCR 効率値の算定結果

主伐68事例及び間伐19事例をDMUとするDEA効率性の評価結果を図-7と図-8に示す。まず主伐の場合についてみると、効率的(CCR効率値=1)と判定されたDMUの割合は、Model 0 (19.1%)、Model 1 (10.3%)、Model 2 (25.0%)、Model 3 (17.6%)、Model 4 (10.3%)、Model 5 (32.4%)となり、モデルによってDEAの評価

に違いがあることがわかる。Model 0、Model 1、Model 2の3基本モデル間の評価結果に有意な差が見られたこと、コスト因子を含めたモデルにおいて基本モデルの評価結果に対する追従性が保たれていること等から、比較代案としてのCCRモデルの官能性(sensibility)は十分に反映されていることが類推される。一方、図中に示したモデル別のCCR効率値の平均はこれらの効率的と判定されたDMUの割合とよく対応している。前述したDEAの評価方式から明らかなように、一般に入出力数が増えれば増えるほど、DMUは効率的であると評価される傾向が強くなり(9, 20, 23)、本解析結果もこの特徴を良く表している：入出力数の多いModel 2やModel 5において、効率的なDMUの割合、CCR効率値の平均とも他モデルに比べて大きくなっている。一方、入出力数でModel 0、Model 3を上回っているModel 4による評価は最も厳しいCCR効率値を与えているが、これはDEA効率性の判定が出力指向に重きを置いて行っていることに起因している。

次に間伐19事例の場合、効率的と判定されたDMUの割合は、Model 0 (26.3%)、Model 1 (26.3%)、Model 2 (36.8%)、Model 3 (15.8%)、Model 4 (36.8%)、Model 5 (36.8%)と、主伐の場合に比べてモデル間でのDEAの評価結果の違いは少なくなっている。さらに、コスト因子を含む各モデルの追従性や序列変化も主伐のそれとは異なった結果を与えている。これは、DEAの評価対象となったDMUの総数の違いに大きく影響されたものと考えられ、間伐の事例数がモデル間の評価特性を表出するのに必ずしも十分でなかったことに起因していると言える。この点に関して、CCR効率値の分布特性から類推されるモデル間の評価特性の違いについて基本3モデルを例にとって若干の説明を加える。図-9及び図-10は、主間伐別に算定された各モデルごとのCCR効率値をヒストグラムとして表したものである。DMUの総数に違いがあるので、両者の分布傾向を直接比較することには若干の問題があるが、主伐に関して言えば、モデル間の一般的評価特性として、(1) Model 1による評価が最も厳しいこと、(2) Model 2による評価は逆に最も甘くなっていること、(3) Model 0は効率性上位及び下位のDMUの検出に特徴があり、中位グループに対しては総じて鈍感であること、等がわかる。

3) CCR 効率値、労働生産性、集材費の関係

CCR効率値、労働生産性、集材費の相互関係を検討するために、主伐事例を対象とした相関分析を行った(表-4)。表より、Model 0-Model 3、Model 1-Model 4の相互対のモデル間で高い相関が認められており、コスト

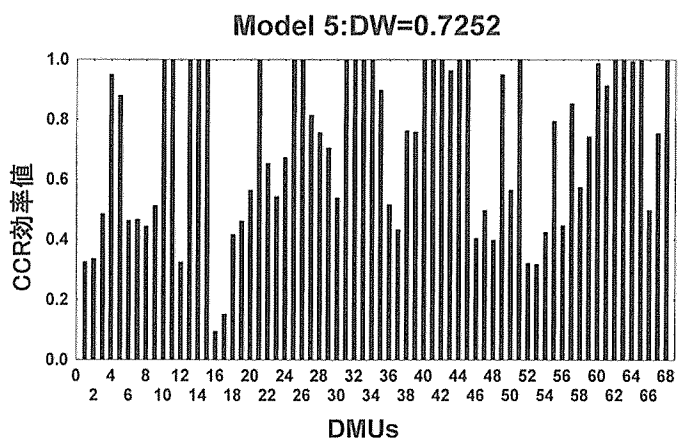
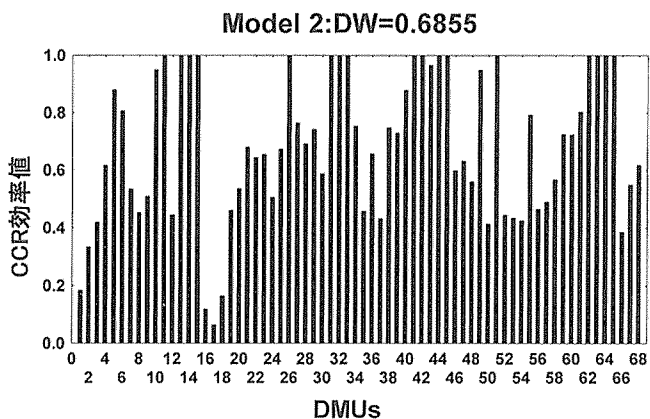
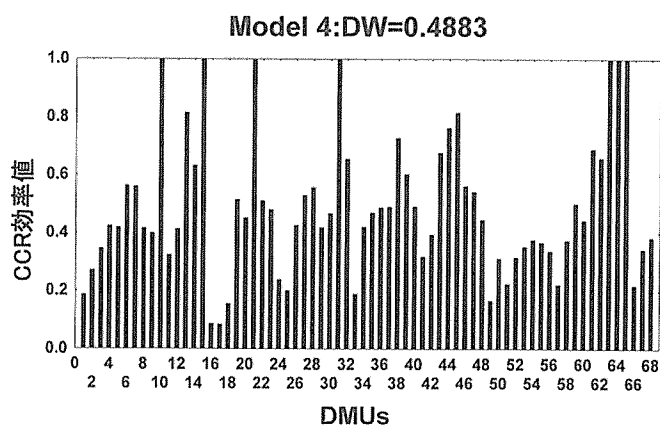
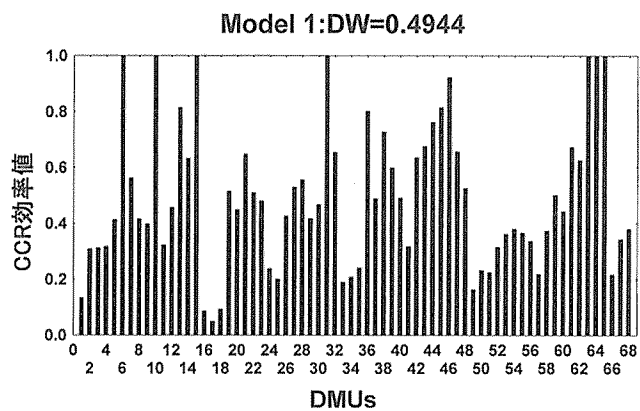
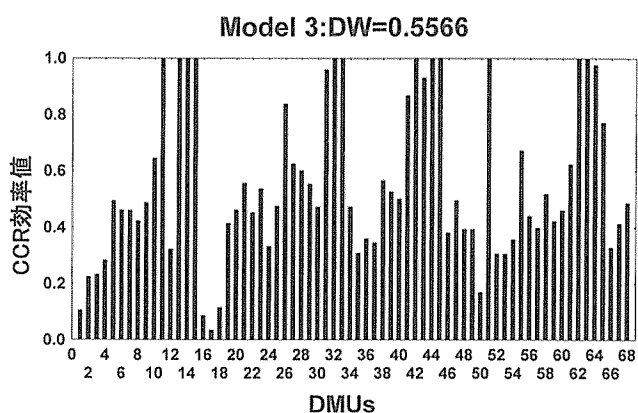
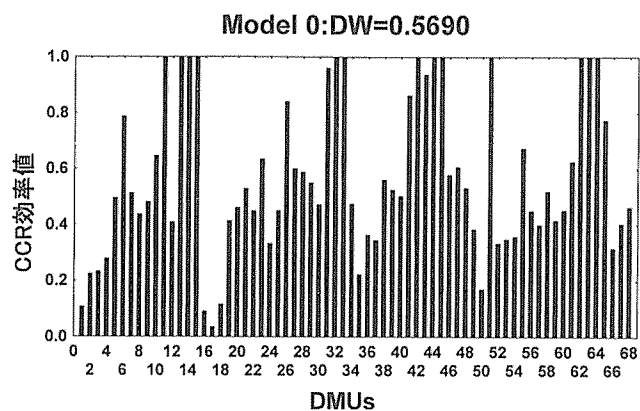


図-7 モデル別の CCR 効率値算定結果；主伐

Abb. 7 Berechnung des CCR-Wertes für DMUs bei der Holzernte in Endnutzungsbeständen

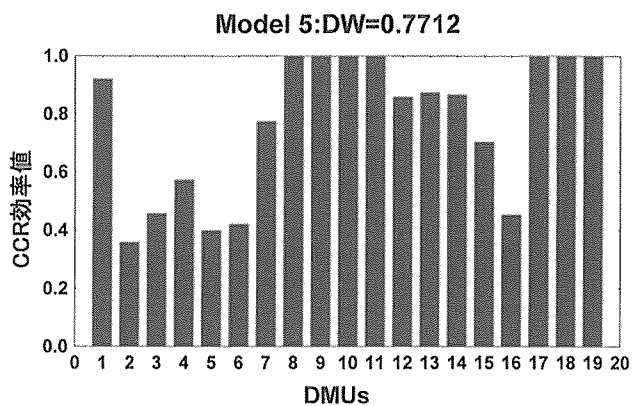
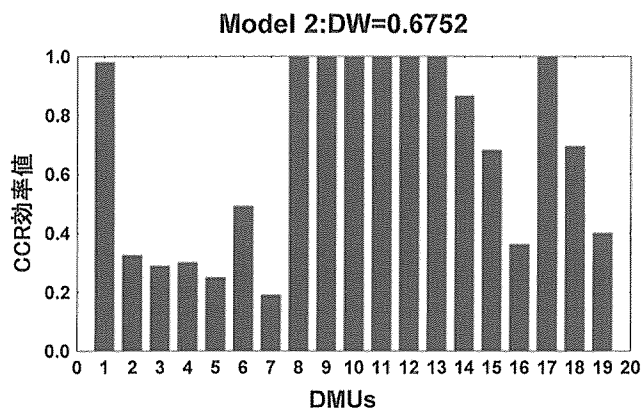
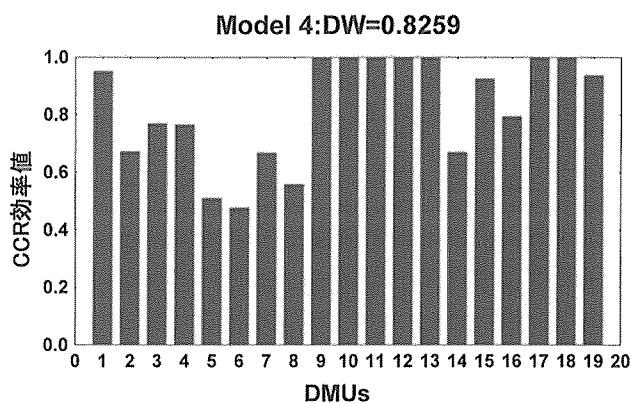
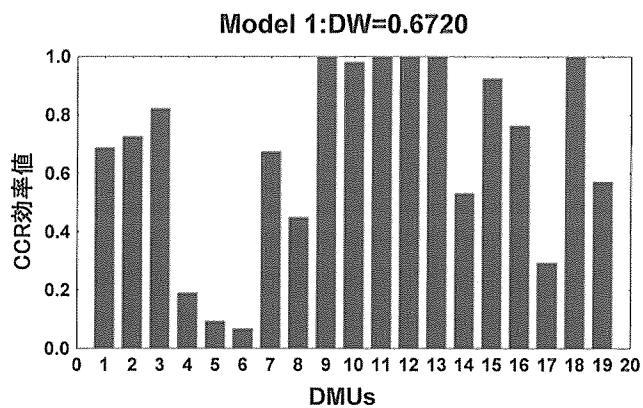
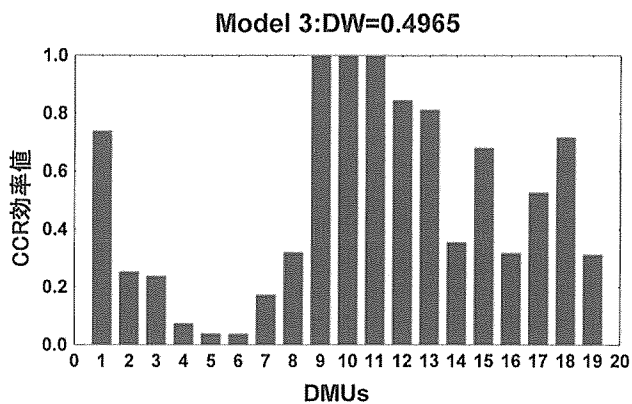
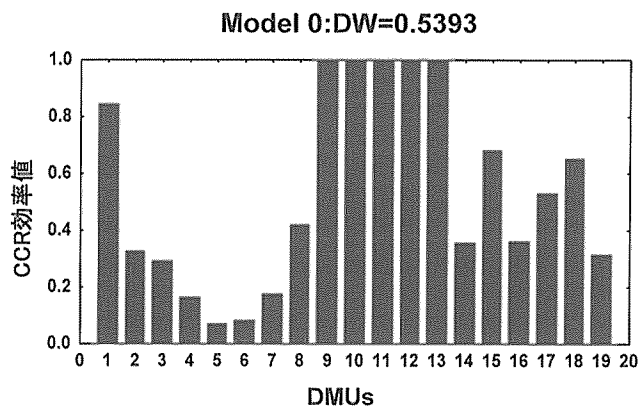


図-8 モデル別の CCR 効率値算定結果；間伐

Abb. 8 Berechnung des CCR - Wertes für DMUs bei der Holzernte in Durchforstungsbeständen

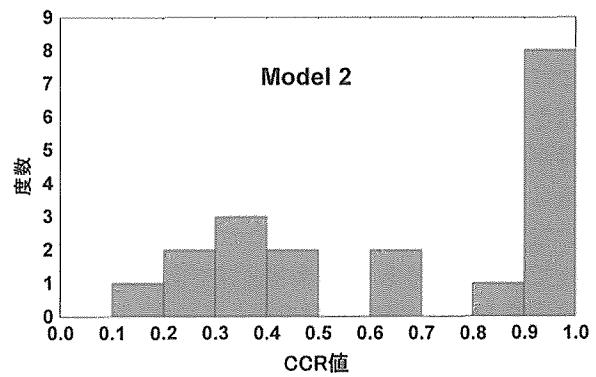
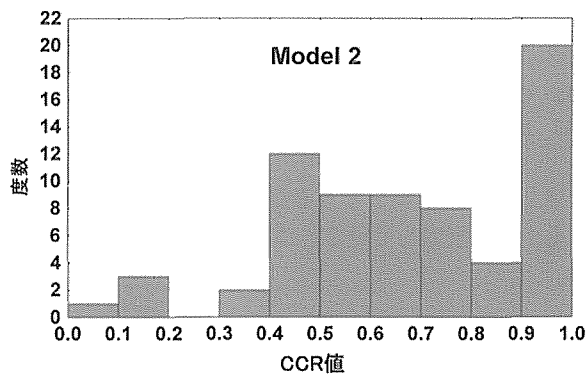
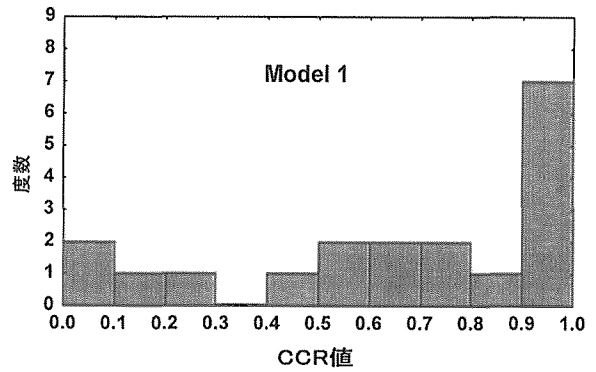
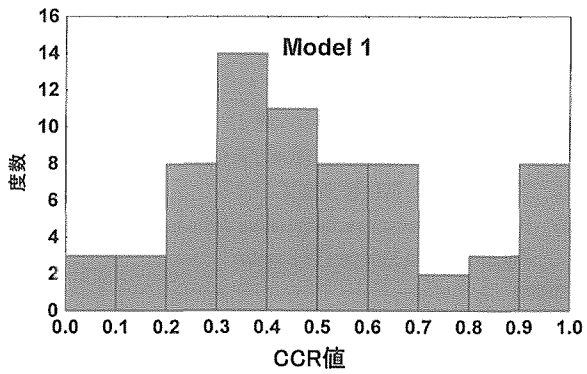
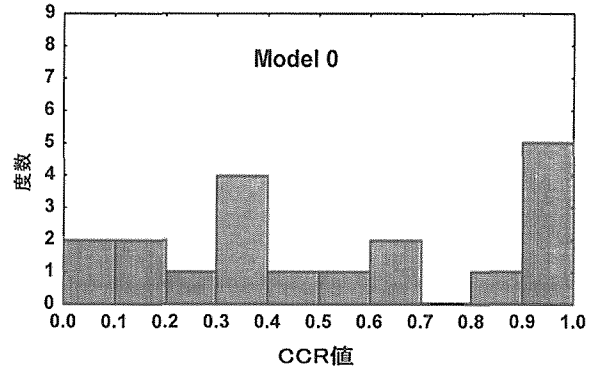
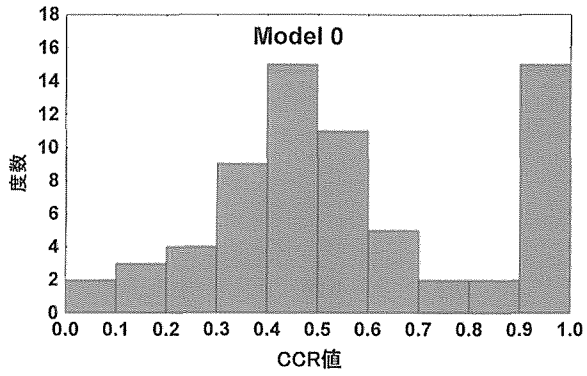


図-9 CCR 効率値のヒストグラム；主伐モデル
 Abb. 9 CCR-Wert-Häufigkeit bei der Endnutzung nach Modell 0, Modell 1 und Modell 2

図-10 CCR 効率値のヒストグラム；間伐モデル
 Abb. 10 CCR-Wert-Häufigkeit bei der Durchforstung nach Modell 0, Modell 1 und Modell 2

表-4 モデル別のCCR効率値、労働生産性及び集材費の相関構造

Tabelle 4 Korrelationskoeffizienten zwischen den Indizes, CCR-Werte der Modelle, technischen Arbeitsproduktivität (TAP) und Holzrntekosten

	Model 0	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	労働生産性	集材費
Model 0	1							
Model 1	0.63	1						
Model 2	0.90	0.59	1					
Model 3	0.98	0.56	0.91	1				
Model 4	0.59	0.91	0.59	0.58	1			
Model 5	0.69	0.34	0.86	0.76	0.48	1		
労働生産性	0.66	0.84	0.53	0.62	0.82	0.28	1	
集材費	-0.17	-0.19	-0.10	-0.16	-0.20	-0.07	-0.37	1

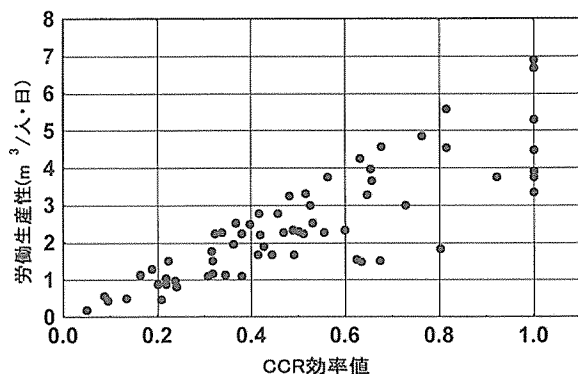


図-11 労働生産性とCCR効率値(Model 1)の関係；主伐
Abb. 11 Beziehung zwischen CCR-Werte von Modell 1 und technische Arbeitsproduktivität (TAP) im Festmeter pro Mann und Tag beim Rücken in Endnutzungsbestand

因子を含めたモデルの追従性が相関係数の大きさからも確認される。労働生産性と強い相関を示しているのがModel 1 (図-11)とModel 4であるが (Model 0の場合、出力項目として労働生産性を組み込んでいる)、両モデルはいずれも出力項目として「単位材積・距離当り要作業人数」を含んでおり、評価主体が労働集約的部分 (同種の作業方式・投入機械を前提とした場合、当該項目は、労働生産性の逆数で近似される) に相当部分依存しているためである。集材費と労働生産性の負の相関はうなずける結果であるが、両者の関係は必ずしも強いものではない。ちなみに図-12から明らかなように、労働生産性が 2m^3 (人・日) 水準以上になっても集材費の削減効果は少なく、 10000 円/ m^3 前後で推移している。これは、主伐事例の相当数が従来型の架線集材作業方式を取っているためであり、労働生産性や伐出費用に関する当該作業方式の一般的特徴を表している (22)。次に、各モデルのCCR効率値と集材費との関係については、いずれも負の弱い相関しか認められないが、相対的に高い値を示しているModel 4の場合を例にとっても (図-13)、両者の関係は必ずしも顕著でないことがわかる。

これらの結果から、導入したCCRモデルは労働集約的・技術的生産効率性に依拠した部分については、一定

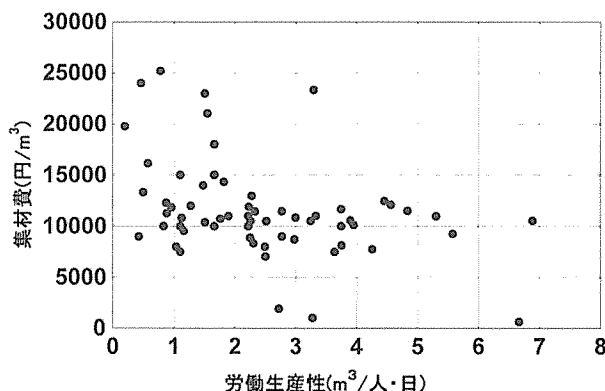


図-12 労働生産性と集材費の関係
Abb. 12 Beziehung zwischen technische Arbeitsproduktivität und Rückkosten in Yen pro Festmeter

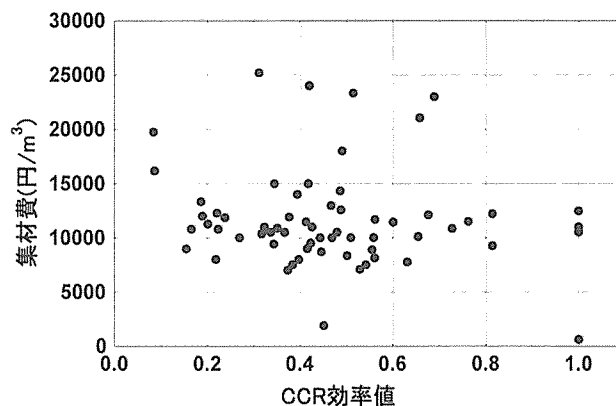


図-13 CCR効率値(Model 4)と集材費の関係
Abb. 13 Beziehung zwischen Rückkosten und CCR-Werte von Modell 4

の安定した評価結果を与えるが、コスト面に関しては必ずしも十分に反応しているとは言いがたいことが考察される。

4) 異なった生産システム間のDEA効率性比較

前述してきた主間伐別の作業事例からも明らかなように、実際の伐出作業現場においては、生産規模や作業条件、造材法や投入機械等によって様々な形態の作業方式が展開されるのが一般的である。このような異なった作業方式下での効率性評価の問題は、いわば「異なる生産

システム環境下での効率性比較の問題」として捉えることが出来るので、II章の数値解析事例で示した考え方を導入することによって相互の比較検討が可能となる。

DEAによるこのようなアプローチは前章でも若干触れたが、伐出作業における生産効率性の一元的評価の問題点、すなわち、「労働生産性 (m³/人・日) を効率性の尺度とする場合、出力単位から明らかなように、その効率性評価の主体は労働集約的部分に置かれており、技術的効率性に依拠する部分については、生産システムの制御条件である入力因子に間接的に包含されている、あるいは反映されているものと仮定する」に対しても、一つの解決法を提示しうるものである (3,26,28)。ここでは、投入機械種によって異なった作業方式がとられるものと仮定して、前述の調査事例から大別分類された主伐：4、間伐：3の作業システムを例にとり検討した。なお導入するCCRモデルについては、伐出作業の技術的効率性評価に主眼を置いたものとするため、Model 2 (8入力-2出力系)を採用した。表-5に投入機械種によって分類した主間伐別の作業システムを示す。

主間伐別に算定されたCCR効率値の統計量を表-6に示す。主伐についてみると、集材機による作業システム1が最も高い効率値 (平均0.5917) を与えており、次いでシステム3 (ウインチ付きクレーン車：0.4392)、システム2 (林内作業車：0.4061) の順で、車両搭載型グラップルによるシステム4 (平均：0.1949) が最も非効率であるという結果になった。ただし、システム間のDMU総数に違いがあるためこの値のみから判断するに

表-5 主間伐別・投入機械別の作業システム及びCCRモデル
Tabelle 5 Bewertungsalternativen des Verfahrenssystems nach Kombination von verschiedenen Rückemaschinen für die Holzernte bei Durchforstungen- und regelmäßigen Endnutzungen

	主伐	間伐
システム1	集材機	集材機
システム2	林内作業車	林内作業車
システム3	クレーン車 (ウインチ装備)	グラップル
システム4	グラップル	

Model 2 (8入力-2出力系)	
入力項目数	8
入力(1)	集材面積
入力(2)	平均傾斜
入力(3)	林齢
入力(4)	集材材積
入力(5)	集材延べ作業日数
入力(6)	集材延べ人数
入力(7)	平均集材距離
入力(8)	単位面積当り集材材積
出力項目数	2
出力(1)	要作業者数/単位材積
出力(2)	集材材積/単位距離

は若干問題も残るが、全体的傾向として、システム間の効率性の差は明確であり、特に興味深い点は、システム1やシステム3のように架線系の作業機械 (林道・作業上での駐車タイプ) による方式が、車両系単独の作業方式 (システム2) よりも効率的であるということである。

次に間伐の場合についてみると、最も効率的であると判定されたのはシステム2 (平均：1.0000) であり、次いでシステム1 (平均：0.8137)、システム3 (平均：0.6083) の順となっている。全体的にシステム間の効率性の差は主伐の場合に比べて顕著であり、間伐の場合、車両系機械の優位性が認められる。この結果は、小面積・分散伐採等の間伐材の生産状況に対する作業機の機動性が反映しているためであると考察される。

以上、ここでは異なった作業機械を前提とする作業システム間の効率性の比較を試みた。各システム間のDMU総数の違い等の問題はあがるが、伐出作業における生産技術的部分に依拠する効率性の輪郭を明確にする上で、本結果は多くの有効な情報を提供していると言える。

5) 入出力項目に対する最適ウェイトと効率性の改善策

DEAの算定式から明らかなように、各DMUに対する最適解として与えられる入出力項目のウェイト値 (V, U) は、当該DMUにとって効率性の比率尺度を最大化するという目的のために最も好意的なウェイト付けの値である。すなわち、(1) 式のVは入力項目に対する最適ウェイトであり、その大小によってDMUのどの入力項目が高く評価されているかがわかり、同様に、Uは出力項目に対する最適ウェイトであり、その大小によって出力のどの項目が高く評価されているかがわかる。したがって、これらの入出力項目のウェイト値から、現状の効率性を改善するための一つの対策法をDMUごとに提

表-6 主間伐別に算定されたシステム間のCCR効率値の統計量比較

Tabelle 6 Übersicht über Bewertungsergebnisse der CCR-Werte für vorgestellten Varianten der Rückeverfahrenssysteme

	主伐			
	システム1	システム2	システム3	システム4
DW	0.5917	0.4061	0.4392	0.1949
NA	0.2442	0.1105	0.1835	0.0291
Max	1	0.5701	0.7003	0.2240
Min	0.0844	0.2555	0.1895	0.1658

	間伐		
	システム1	システム2	システム3
DW	0.8137	1	0.6083
NA	0.1755	0	0
Max	1	1	0.6083
Min	0.4762	1	0.6083

示することが可能となる(8,23,24)。従来、このようなシステムの最適化の問題を考える場合、多変量解析や重回帰分析にみられるように、「入出力に関するデータを全部使って関数(モデル)やパラメータを決定する方法:入出力関係の基本に“真”のモデルが存在するものと仮定して、その関数型やパラメータを統計的な方法で推定し、その有効性を検定する」が一般的であるが、DEA 評価法ではこのようなモデルの存在を前提条件とはせず、効率的なフロンティアを検出することで、非効率なDMUをそのフロンティアからの偏差によって相対的に評価するものである。この点が、従来のシステム評価法の考え方と全く異なる点であり、上述してきたように、「効率性の評価と改善策の提示が個々のデータ単位で、しかもその特徴を生かしながら行える」ことである。

ここでは、主間伐事例を対象として3基本モデル(Model 0-Model 2)によるDEA 評価結果を用いて具体的に検討する。

(1) ~ (4d) 式を解いて得られた入出力項目別の最適ウェイトから、主間伐別・モデル別に効率性改善のための入出力項目間の内部構造を決定したものが図-14及び図-15である。なお、この階層化は全てのDMUから算定された最適ウェイトについて、ウェイト値の大きいものから順にその出現頻度に準拠して決定したものである。

まず主伐の場合についてみると、モデル間でその階層

構造に違いがあることがわかる。効率化のための改善条件として、Model 0では「平均傾斜」や「林齢」のように非制御的(uncontrollable)な入力項目が上位に位置しているのに対し、Model 1やModel 2では「平均集材距離」や「集材面積」のように、生産規模の指標となる項目が主要な改善因子となっていることを示している。この場合、労働集約性の指標となる「集材延べ人数」は、必ずしも効率改善に効果的に作用しないという結果を与えている。

次に間伐の場合をみてみると、モデルごとの階層構造は水平・垂直方向とも主伐のそれと若干異なった形態を示しているが、主要な入力項目の相互の位置関係はほぼ類似したものとなっている。いずれのモデルも、非制御的な条件である「平均傾斜」の影響が大きいこと、技術的な制御条件と考えられる「平均集材距離」や「集材延べ人数」の関与が顕著ではないこと等がわかる。ただし、Model 0やModel 2については、「単位面積当り集材材積」や「集材材積」のような生産規模に関わる項目も比較的上位に位置している。いずれにせよ、このような結果が前述した間伐作業における「作業機の機動性の自由度」に少なからず関係していることは明らかである。

IV. あとがき

DEA は、複数個の入力と出力にそれぞれウェイトを掛けて和を作り、「出力/入力」という比率で効率性を

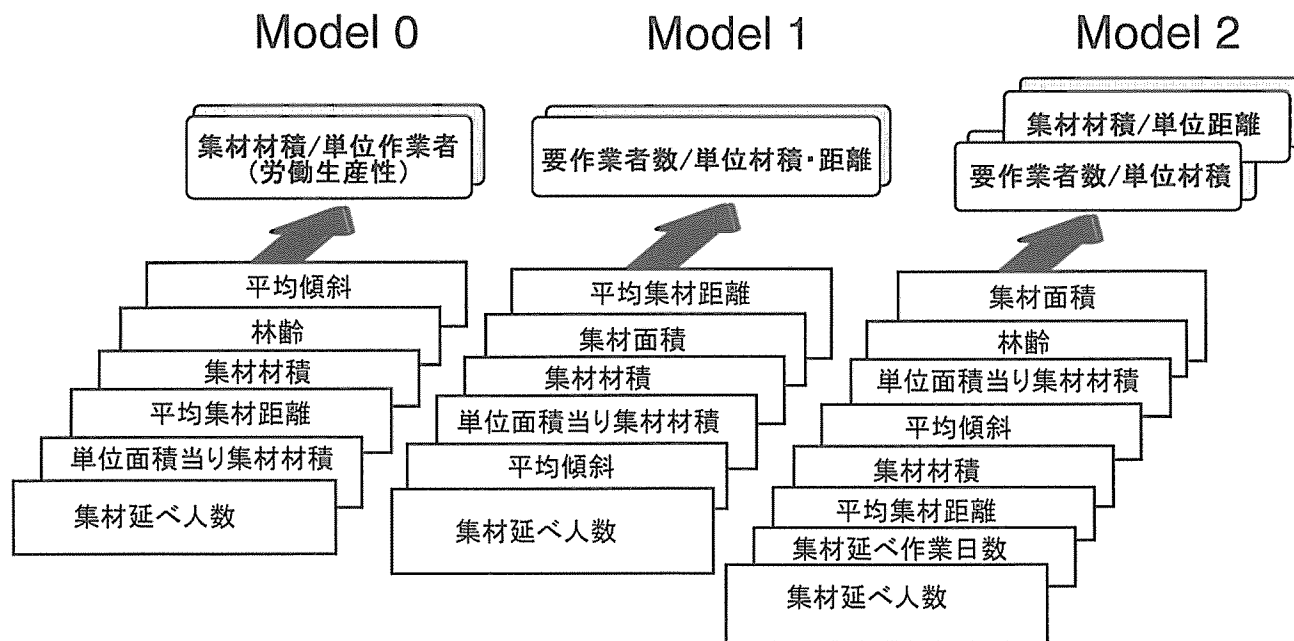


図-14 効率性改善のための最適ウェイト値に基づく入出力項目間の階層構造;主伐

Abb. 14 Beispiel zur Hierarchiestruktur der Bewertungskriterien für die Auswertung der möglichen Rationalisierungsmaßnahmen mit Hilfe der DEA beim Rücken in Endnutzungsbestand

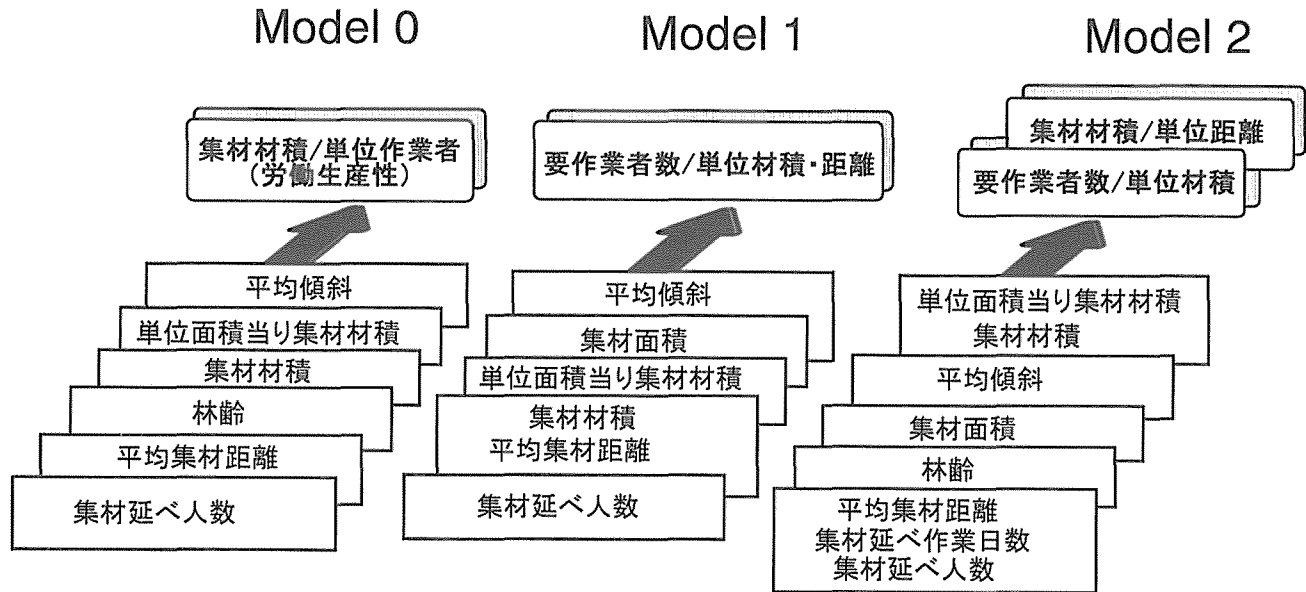


図-15 効率性改善のための最適ウェイト値に基づく入出力項目間の階層構造；間伐

Abb. 15 Beispiel zur Hierarchiestruktur der Bewertungskriterien für die Auswertung der möglichen Rationalisierungsmaßnahmen mit Hilfe der DEA beim Rücken in Durchforstungsbestand

評価しようとするものである。そのウェイト値について、従来、人間の勘や経験に頼っていたものを“データ自身に決めさせる”という所に大きな特徴がある。しかもそのウェイトを対象とするDMU（意思決定主体・単位）ごとに可変とし、最も好ましいウェイト付けを行った上で効率性を判定する。その結果、DEAで非効率的と判定されたDMUは、他のどのような組み合わせのウェイト付けによっても非効率的であると結論される。この方法によれば、効率的フィロントニアを検出することによって、フィロントニアに達していない非効率的な事業体の改善策を具体的に提示することもできる。

DEAは、公共機関から民間企業におよぶ様々な分野の事業体の効率性評価のために、主に米国や英国を中心として広く適用され、多くの成果を上げている。森林資源の経営管理計画、関連事業体のインフラ・基盤整備計画等をテーマとして、Kao等(13,14)、Hänninen等(12)、芝(16,18,20,21,22)等によって、ようやく我々の分野においても研究が進められようとしている。森林資源利用の問題は、内外問わず近年益々複雑化し、特に、素材生産事業を取り巻く我が国の状況は、材価の低迷、労働力の減少と高齢化など構造的な問題に加え、資源保全の面からも一層厳しさを加えている。効率的な生産・作業システムの確立とともに、個々の事業体の効率性の向上は、限られた資源（原材料、資本、労働力）の効率的な活用のための必須条件でもあると言える。本研究がこれらの問題解決の一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究を行うにあたって多くの方々のお力を頂いた。まず、煩雑なアンケートへの回答や現地調査の機会等に多くの助言と激励を頂戴した岐阜県下の素材生産業者の皆様は心よりお礼申し上げます。県下の素材生産実態に関する資料提供や調査依頼等に関してご配慮頂いた岐阜県林政部の関係各位に深謝致します。

本論に引用した貴重な文献の多くを提供して下さいました埼玉大学大学院政策研究科刀根 薫教授研究室、ならびに、本論中にも紹介したフィンランド林業試験場Hänninen, Viitala両氏には文献交換や文通を通して多くの有益な情報を頂いた。ここに深くお礼申し上げます。

最後に、本研究の一部を三重大学生物資源学部の卒業論文として取り組み、最後まで奮闘努力してくれた藤井孝行君（現：日本製紙株式会社勤務）に心からの感謝を送ります。

引用文献

- (1) Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W. (1984): Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 30: 1079-1092.
- (2) Banker, R.D. and Morey, R.C. (1986): The use of categorical variables in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 32: 1613-1626.
- (3) Banker, R.D. and Thrall, R.M. (1992): Estimation of returns to scale using Data Envelopment Analysis. *European Journal of*

- Operational Research. 62: 74-84.
- (4) Bessent, A.M., Bessent E.W., Cooper, W.W. and Thorogoo, N.C. (1983): Evaluation of educational program proposals by means of DEA. *Educational Administration Quarterly*. 19: 82-107.
- (5) Boyd G. and Fare, R. (1984): Measuring the efficiency of decision making units: A comment. *European Journal of Operational Research*. 15: 331-332.
- (6) Charnes, A., Clark, C.T., Cooper, W.W. and Golany, B. (1985): A development study of Data Envelopment Analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. Air Forces. *Annals of Operations Research*. 2: 95-112.
- (7) Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. (1978): Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*. 2: 429-444.
- (8) Charnes, A., Cooper, W.W. and Thrall, R.M. (1991): A structure for classifying and characterizing efficiency and inefficiency in Data Envelopment Analysis. *Journal of Productivity Analysis*. 2:197-237.
- (9) Charnes, A., Haag, S., Jaska, P. and Semple, J. (1992): Sensitivity of efficiency classification in the additive model of Data Envelopment Analysis. *International Journal of Systems Science*. 23: 789-798.
- (10) Cooper, W.W.・刀根 薫・高森 寛・末吉俊幸 (1994):DEAの解釈と展望 -その1-. オペレーションズ・リサーチ. 420. 31-37.
- (11) 藤井孝行 (1996): DEAモデルを用いた伐出生産活動の効率性評価-岐阜県下の素材生産業者の解析事例-. 三重大学生物資源学部卒業論文. 90 pp.
- (12) Hänninen, H. and Viitala, E.J. (1995): Assessing the relative efficiency of forestry promotion units in Finland:An application of Data Envelopment Analysis. Abstracts of invited papers IUFRO XX World Congress Tampere, Finland. 458 pp.
- (13) Kao, C. and Yang, Y.C. (1991): Measuring the efficiency of forest management. *Forest Science*. 37(5):1239-1252.
- (14) Kao, C., Chang, P. and Hwang, S.N. (1993): Data Envelopment Analysis in measuring the efficiency of forest management. *Journal of Environmental Management*. 38:73-83.
- (15) Lewin, A.Y. and Morey, R.C. (1981): Measuring the relative efficiency and output potential of public sector organizations: an application of Data Envelopment Analysis. *International Journal of Policy and Information Systems*. 5: 267-285
- (16) 太田照久・芝 正己 (1998): DEAを用いた国有林における施業効率性評価. *森林研究*. 70. 1-8.
- (17) Rousseau, J. and Semple, J., (1993): Notes: Categorical outputs in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 39: 384-386.
- (18) 佐々木浩司 (1994): 三重県下の素材生産事業体における生産事業実績の現状と DEA モデルによる生産効率性の評価. 三重大学生物資源学部卒業論文. 140pp.
- (19) Sherman, H.D. (1984): Data Envelopment Analysis as a new managerial audit methodology - Test evaluation, auditing: *Journal of Practice and Theory*. 4: 35-53.
- (20) Shiba, M. (1995): Measuring the efficiency of managerial and technical performances in harvesting operations by means of Data Envelopment Analysis(DEA). Abstracts of invited papers IUFRO XX World Congress Tampere, Finland. .213pp.
- (21) Shiba, M. (1997): Measuring the efficiency of managerial and technical performances in forestry activities by means of Data Envelopment Analysis(DEA). *Journal of Forest Engineering*. 8 (1): 7-19.
- (22) 芝 正己 (1997) :DEA(Data Envelopment Analysis)を導入した伐出生産効率性の多次元評価法に関する研究. 三重大学生物資源学部演習林報告. 21. 63-100.
- (23) 末吉俊幸 (1990): DEAによる効率性分析に関する一考察. オペレーションズ・リサーチ. 167. 33-39.
- (24) Thanassoulis, E. and Dyson, R.G. (1992): Estimating preferred target input-output levels using DEA. *European Journal of Operational Research*. 56: 80-97.
- (25) 刀根 薫・阿蘇品 圭之・山本康弘 (1992): DEA事例集92. 75pp, 埼玉大学大学院政策研究科, 埼玉.
- (26) 刀根 薫 (1993): 経営効率性の測定と改善. 176pp, 日科技連, 東京.
- (27) 山口俊和・清水康之・福川忠昭 (1991):DEAモデルにもとづく新規出店問題への多目的計画法への応用. オペレーションズ・リサーチ. 456. 25-31
- (28) 吉井邦恒 (1992): 農業共済団体の事業の効率性に関する研究. オペレーションズ・リサーチ. 437.18-24.