温室設計への最適設計法の適用 (I) 設計法のアルゴリズムと計算例

蔵田 憲次*・立花 一雄**

(* ハノーバー大学気象気候研究室)
(** 東京大学農学部農業工学科)

Application of an Optimization Technique
to Greenhouse Structural Designs.
(I) The Algorithm of Design Technique and Some Results.

Kenji KURATA * and Kazuo TACHIBANA **

(* Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität
Hannover, Herrenhäuser Strasse 2, 3000 Hannover,
West Germany
** Department of Agricultural Engineering, University of
Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan)

1. はじめに

近年の温室は大型化、集団化、装置化の傾向をたどりその設計の重要性はますます増大しているが、構造設計、環境設計ともそれぞれの理論に基づいて行われ、両者を統括した設計指針はまだ得られていないのが現状である。すなわち温室の熱環境、光環境、構造強度など個々の側面について多くの研究がなされているが(たとえば、古在, 1974; 羽倉, 1975), それらの諸点を考慮した最適な温室設計はほとんど手がけられていない。これは両者の設計項目の関係が複雑にすぎると考えられる。例として温室の強度と光透過率を考えてみよう。温室の形状、柱やはりの断面、主架構の間隔(けた行方向スパン, 以下スパンとよぶ)などの各設計項目は力学的に互いに関連しており、一つの設計項目だけを他から切り離して設計することはできない。温室の形状は雪荷重、風荷重の大きさに関連し、各部材の長さや断面2次モーメントは応力配分に関係している。また光透過率に関しても、温室内日射量が棟方位、部材の大きさ、形状に関連することは明らかである(古在, 1974)。これらの設計項目が互いに関連し合いながら全体として温室の光透過率を形成している。ここに前述した統括的指針の難しさの根拠があると考えられる。

温室設計上考慮すべき主要な観点は、①風、積雪などの外力に耐える強度、②日射量、温度など内部環境の好適性とその制御性、③建設費、維持管理費などの経済性、の3者に整理されよう。本研究はこの三つの観点からの良好な温室の設計指針の提示を最終目的とし、その第1歩として内部環境については冬季の直達光透過率、経済性については地上部分の建設資材費を取り上げ、強度については「園芸施設安全構造基準(暫定基準)」(日本施設園芸協会, 1975, 以下「基準」と略す)および関連する日本建築学会の諸規定(藤本, 1972; 日本建築学会, 1974)を適用して最適設計を試みた。温室内日射量は冬季にしばしば作物生育の制限要因となり、地上部建設資材費は多くの場合建設費に比例するからである。ただし資材費は単位床面積当りの値とする。

以上の三つの観点を考慮して最適な温室の形状、部材断面等を決定するために最適設計の手法(長, 1971; 田中ら, 1973)を適用した。すなわち強度の面からの諸規程を制約条件にして、資材費を最小あるいは光透過率を最大にするように目的関数を設定した。最適設計の計算上目的関数を一つにする必要があり、資材費と直達光透過率の両者を同時に目的関数にすることはできない。そこで次の二つのステップを踏んだ。第1に資材費を目的関数として、それを最小にする設計変数の組み合わせを得る。その時の資材費を J_{sopt} とし、第2のステップでは次の資材費に関する条件を制約条件に加えて直達光透過

率を最大にする。

$$J_s \leq k J_{s opt} \quad (1)$$

ここで J_s は資材費、 k は係数 (以後、資材費制約条件係数と呼ぶ) で $k \geq 1.0$ である。

筆者らは施工、管理の容易さにより近年多く使用されつつある脚柱ピン結合の山形ラーメンの単棟温室を対象としたプログラムを開発した。本報告では主にそのアルゴリズムについて、次報では主に計算結果について報告する。

2. 最適設計法のアルゴリズム

温室の最適設計には、その制約条件や目的関数が非線形のため非線形計画法を用いる。非線形計画法にも種々の方法があるが、計算速度を考慮し Haug *et al.* (1972) の最急降下法を適用する。この方法は任意の出発点 (設計変数の任意の組み合わせ) を与えて、目的関数を最小にする方向 (目的関数を最大にする時は符号を逆にしたものを新たな目的関数とする) を計算し、その方向に新たな点を設置してその点よりまた目的関数を最小にする方向を算出する、というステップを繰り返して最適点を見い出そうとする方法である。ただし制約条件を犯した場合はそのつど修正する。

ここで設計変数マトリックスを $\mathbf{b}$ とし、ある点より次の点へのステップを $\delta \mathbf{b}$ とすると、 $\delta \mathbf{b}$ は次の式で与えられる。

$$\delta \mathbf{b} = -\eta \delta \mathbf{b}_1 + \delta \mathbf{b}_2 \quad (2)$$

ここで、 $-\delta \mathbf{b}_1$ は目的関数を最小にする方向を、 η はステップ幅を、 $\delta \mathbf{b}_2$ は不満足な制約条件を修正するためのベクトルを意味する。

2 次元 (設計変数が二つ) の場合の最急降下法を Fig. 1 に示した。出発点を点 1 とすると、点 1 ではすべての制約条件が満足されている ($\phi_1 < 0$, $\phi_2 < 0$) ので $\delta \mathbf{b}_2 = 0$ となり、次の点は目的関数 J を最も減少させる方向、 $\mathbf{P} = -\partial J / \partial \mathbf{b}$ 上にとられることとなる。すなわち、 $\delta \mathbf{b} = -\eta \delta \mathbf{b}_1 = \eta \mathbf{P}$ となる。点 2 では制約条件 $\phi_1 \leq 0$ が不満足である。ここで次のステップの $-\delta \mathbf{b}_1$ に $\mathbf{P} = -\partial J / \partial \mathbf{b}$ をとると、 $\mathbf{P}$ は $\phi_1 = 0$ から遠ざかる方向を指しているの、いかに $\delta \mathbf{b}_2$ で修正しても次のステップで $\phi_1 \leq 0$ は満足されない。そこで次のように考える。前回のステップ幅が大きすぎないとすれば、点 2 は $\phi_1 = 0$ の曲線の近傍に位置している。すなわち、 $\phi_1 = 0$ の曲線と点 2 を通る $\phi_1 =$ 一定の曲線は点 2 の近傍で平行とみなしてよい。点 2 における $\phi_1 =$ 一定の接線を l とすると、点 2 の近傍で l は $\phi_1 = 0$ と平行である。そこで $-\delta \mathbf{b}_1$ として $\mathbf{P}$ の l 上への射影をとると、 $-\delta \mathbf{b}_1$ は点 2 の近傍で ϕ_1 の値を変化させないという制限内で目的関数を最も減少させる方向を示

Fig. 1. A schematic illustration of the steepest descent method in two dimensions. J : objective function, b_1, b_2 : design variables, $\phi_1 \leq 0$ and $\phi_2 \leq 0$: restrictions, $\mathbf{P} = -\partial J / \partial \mathbf{b}$, and l : a tangent of $\phi_1 = \text{const.}$ at the point 2. The point 1 is the initial point and the point 6 is the optimal point. Each step is calculated by Eq. (2).

す。このように定められた $\delta \mathbf{b}_1$ と修正ベクトル $\delta \mathbf{b}_2$ より (2) 式で計算されるステップは次の点 3 を与える。制約条件が線形の場合、点 3 では $\phi_1 \leq 0$ は満足されるはずである。実際は制約条件は非線形なので、 $\phi_1 \leq 0$ は依然として不満足の場合もありうるが、ステップを繰り返すうちに満足される。

上述のアルゴリズムは最適点 6 (正確にはその近傍) に到るまで繰り返される。最適点の近傍に達したか否かは次の二つの条件より判定される。

- ① すべての制約条件が満足されているか。
- ② $\delta \mathbf{b}_1$ の絶対値が十分小さいか。

実際の最適化では Fig. 1 に示したような 2 次元空間ではなく高次元空間 (本研究の場合 25 次元) になる。制約条件も複数になるのが普通であり、その場合上述の説明での「接線」は「接空間」となる。

$\delta \mathbf{b}_1, \delta \mathbf{b}_2$ の計算式は実際には次のようになる。後述のように本計算では構造解析は剛性法によるので次の関係式が成立する。

$$\mathbf{A}(\mathbf{b})\mathbf{Z} = \mathbf{F}(\mathbf{b})$$

ここで $\mathbf{A}(\mathbf{b}) = [a_{ij}(\mathbf{b})]_{n \times n}$ 剛性マトリックス

$\mathbf{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]^T$ 変位マトリックス

$\mathbf{F}(\mathbf{b}) = [F_1(\mathbf{b}), F_2(\mathbf{b}), \dots, F_n(\mathbf{b})]^T$

荷重マトリックス

また制約条件を、 $\phi_i(\mathbf{b}, \mathbf{Z}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q$ とする。

$\delta \mathbf{b}_1, \delta \mathbf{b}_2$ は Haug *et al.* (1972) によればそれぞれ次の

ようになる。

$$\delta \mathbf{b}_1 = \mathbf{W}^{-1} \left\{ \frac{\partial J^T}{\partial \mathbf{b}} - \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial J^T}{\partial \mathbf{b}} \right\},$$

$$\delta \mathbf{b}_2 = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \phi^*$$

ここで、

$\mathbf{W}$ ：任意の正値行列、

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \phi^{*T}}{\partial \mathbf{b}} (\mathbf{b}, \mathbf{Z}) + \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{b}} (\mathbf{b}) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{b}} \mathbf{A} (\mathbf{b}, \mathbf{Z}) \right]^T \lambda \phi^*,$$

$$\mathbf{A} \phi^* = -\phi^*,$$

$\phi^* = [\phi_i(\mathbf{b}, \mathbf{Z})]$ ：不満足な、あるいは境界上の制約条件のマトリックス。すなわち、 $\phi_i(\mathbf{b}, \mathbf{Z}) \geq 0$
 $\lambda \phi^*$ は次の式により定義される。

$$\mathbf{A}^T (\mathbf{b}) \lambda \phi^* = \frac{\partial \phi^{*T}}{\partial \mathbf{b}} (\mathbf{b}, \mathbf{Z})$$

本計算ではHaug *et al.*の式で、座屈長さを部材長と仮定して弾性解析の部分を省略し、 J は $\mathbf{b}$ だけの関数なので、 J の $\mathbf{Z}$ に依存する部分も省略した。

以上の計算式から明らかのように、 $\delta \mathbf{b}_1$ 、 $\delta \mathbf{b}_2$ の算出には、 $\mathbf{b}$ による J 、 $\mathbf{F}$ 、 ϕ_i 、 $\mathbf{AZ}$ の微分、および $\mathbf{Z}$ による ϕ_i の微分が必要である。これらの微分は、一つの例外を除き理論的に算出できる。一つの例外とは、直達光透過率を目的関数としたときの設計変数による微分で、これは数値微分した。

3. 荷重と許容応力度

(1) 荷 重

「基準」では、考慮すべき荷重の組み合わせが規定されているが、本研究では作物荷重やクレーンなどによる特殊な荷重は取扱わない。また一般に温室は軽量の構造物であるので地震力は無視する。したがってここでは長期の荷重として固定荷重(自重)を、短期の荷重として固定荷重+雪荷重、固定荷重+風荷重を考えた。非対称温室をも対象とするので、結局考慮する荷重はFig. 2に示した6通りである。

Fig. 2. Six combinations of loads taken into consideration in this study. G: fixed load, S: snow load, W: wind load.

Fig. 3. Wind force coefficients used in this study.

固定荷重ははり、もや、胴ぶち、たるき、被覆材の自重より計算した。雪荷重、風荷重の計算方法は「基準」にしたがった。ただし非対称温室の風力係数はFig. 3に示した値を使った。なお妻面からの風荷重は主にすじかいの問題となるのでここでは取扱わない。また以後、もやというとき胴ぶちをも含むものとする。

(2) 許容応力度

構造解析は有限要素法で通常骨組構造に用いられる剛性法を使用した。主架構の構造解析は2次元で行いもやは連続ばりとして取扱った。剛性法により算出された各部材の最大曲げモーメント、最大軸力は、圧縮縁曲げ応力度 σ_b あるいは引張縁曲げ応力度 σ_t 、平均圧縮応力度 σ_c あるいは平均引張応力度 σ_t 等に変換され、許容応力度を満足するか否かが検討される。柱は軸力と曲げモーメントを受ける部材である。はりには主に曲げモーメントを受ける部材で通常は軸力の計算を省略するが、本計算では非対称温室の場合、はりの傾斜が急になって大きな軸力の加わる可能性もあるので軸力の計算も行った。柱、はりの許容応力度の検定式は、通常自動的に満足されるせん断力に対する検定や対称断面部材の場合の不要な検定を省略すると次のようになる。

圧縮力を受ける場合：

$$P_1 = \sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b - 1 \leq 0$$

$$P_2 = \lambda / 200 - 1 \leq 0$$

引張力を受ける場合：

$$P_3 = (\sigma_t + \sigma_b) / f_t - 1 \leq 0$$

$$P_4 = (\sigma_b - \sigma_t) / f_b - 1 \leq 0$$

ここで f_c 、 f_b 、 f_t 、 λ はそれぞれ許容圧縮応力度、許容曲げ応力度、許容引張応力度、細長比を意味する。

もやは2軸曲げを受ける部材である。たるきなどによって横方向(屋根傾斜に沿った方向)への移動が固定されているとすると許容応力度検定式は次のようになる。

$$P_5 = (\sigma_{bx} + \sigma_{by}) / f_t - 1 \leq 0$$

$$P_6 = 150 \delta / L - 1 \leq 0$$

ここで δ はたわみを、 L はスパンを意味し、 $\sigma_{bx} = \sigma_{bx} = t \sigma_{bx}$ 、 $\sigma_{by} = \max(\sigma_{bx}, \sigma_{by})$ である。添字 x 、 y は、そ

れぞれ x 軸まわり, y 軸まわりの曲げ応力度を表わす。
 なお, f_t, f_c, f_b 等の計算式は, 例えば藤本(1972)に
 解説されている。

4. 最急降下法の温室設計への適用

(1) 適用に関する諸仮定

第2章で展開した最急降下法を温室の設計に適用する
 場合に, 最急降下法自体の持つ制限から種々の問題点が
 生ずる。最急降下法はすべての変数を連続変数と仮定し
 ている。しかし温室の設計では, もやの本数や, 部材の
 諸特性のようにこの仮定を満足しない要素が混入する。
 そこで次の仮定のもとにこれらの問題を処理するが, 多
 少「基準」あるいは現実からのずれが生ずる。本研究の
 目的は温室設計のプログラム開発ではなく, 設計指針の
 提示であるからこのずれは許容されるものと考えられる。

① 固定荷重, 雪荷重, 風荷重をすべて主架構に対し
 て等分布荷重として扱う。厳密にはこれらの荷重はもや
 を通して集中荷重として作用する。この仮定は, もやの
 本数が少ないときに問題となるが, 本計算ではあらゆる
 場合に分布荷重とした。

② もやの本数は, (はりの長さ)/(もや間隔)とする。
 この数値は必ずしも整数とはならないが, 連続変数を扱
 う上で避けられない仮定である。

③ 「基準」は, 積雪の単位体積重量を積雪深の関数
 とし, さらに積雪深の低減率を屋根勾配の関数として段
 階的に表示している。この段階的表示を最適設計にその
 まま適用すると, 微分計算ができない。これはプログラ
 ム内部ではどの方向に進めば積雪深低減率が減少するの
 かは識別できないことを意味する。そこでこれらの関数
 を勾配を持った折れ線で近似した。

④ 資材費, 直達光透過率, 応力, 許容応力度の算出
 には部材断面の諸特性(断面2次モーメント, 断面積,
 断面2次半径等)の数値が必要である。部材断面の各長
 さを設計変数にしそれより各断面特性を算出すればよい
 が, この方法は独立変数の数を増し, プログラムを複雑
 化するばかりである。そこで市販の鋼材の諸特性を断面
 2次モーメントで無次元化しグラフ上にプロットして,
 できるだけ少ない数の独立変数で他の諸特性を表示す
 るようにした。市販の鋼材としては非対称断面を持つ部材
 はねじれやすさから, また閉鎖空間を持つ部材は防錆上
 から取り上げず, 柱, はりの鋼材としてH形鋼(300×
 300 mm以下)とリップみぞ形鋼つづり合せI断面材を用
 いた。そのため次の三つの独立変数でその他の各部材断
 面特性を表示できる。

$$I_x \text{ (断面2次モーメント)}, \\ R_1 = A/I_x^{1/2}, \quad R_2 = i_y/I_x^{1/4}$$

ここで, A は断面積, i_y は y 軸まわりの断面2次半径で
 ある。 R_1, R_2 の値はそれぞれ次の範囲に分布した。

$$0.6 \leq R_1 \leq 1.0, \quad 0.3 \leq R_2 \leq 0.7$$

もや材としては, リップみぞ形鋼を使用する。独立変
 数を断面2次モーメント一つとすると他の諸特性の算出
 にある程度の誤差を生ずるが, もや材は2次部材であり,
 独立変数を増すことはアルゴリズムを複雑化するので,
 断面2次モーメントだけを独立変数とした。

なお, I_x, R_1, R_2 はすべて連続変数として取扱う。

(2) 設計変数, 制約条件, 目的関数

設計変数は温室の形状を規定する変数(棟高, 棟の位
 置, 軒高), スパン, 主架構各部材の I_x, R_1, R_2 , 各面
 上のもやの I_x および間隔である。制約条件は各設計変数
 に特有な条件(例えば断面2次モーメントは負にならない),
 各部材の許容応力度の検定式($P_1 \sim P_6$)および目的
 関数を直達光透過率にした場合の資材費の制約条件[不
 等式(1)]である。目的関数は既述のように単位床面積当
 り資材費あるいは直達光透過率 J_l である。資材費は各設
 計変数から鋼材重量と被覆面積を算出し, 両者の単位価
 格の比を後者に乗じて前者との和を求めて決定する。そ
 の最小値が J_{sopt} である。したがって鋼材重量当り, 被覆
 材面積当り(ガラスのほか付帯部分を含む)の単位価格比
 によって最適設計値が異なる可能性があるので検討を加
 えたが, 通常範囲ではほとんど差異はなかった。

J_l は冬至の温室内水平面平均積算直達日射量 Q_o の屋
 外水平面積算直達日射量 Q_h に対する比で表わす。

$$\left. \begin{aligned} J_l &= Q_o / Q_h, \\ Q_h &= \int_{\tau_1}^{\tau_2} J_h d\tau, \quad Q_o = \int_{\tau_1}^{\tau_2} J_o d\tau \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで J_h, J_o はそれぞれある時刻の屋外および温室内床
 面平均直達日射量を, τ_1, τ_2 はそれぞれ日出, 日没時間
 を表わす。古在(1973)は部材のせいの直達光透過率に
 およぼす解析の中で, 各ガラス面の床面上への投影図を
 利用する方法を提示したが, 各ガラス面ごとに計算する
 方法は計算時間が長くなるので本計算には適さない。そ
 こで部材の幅, せいの影響は各壁面, 屋根面の透過率の
 計算に包括し, 各屋根面, 壁面ごとの投影図を利用した。
 なお「せい」とは部材断面の高さを表わす建築用語であ
 る。 J_o は次式で表わされる。

$$J_o = \frac{J_h}{FL} \sum_i^n (T_{oi} \cdot A_{ri})$$

ここで, FL は温室床面積を, T_{oi}, A_{ri} はそれぞれ面 i
 の直達光透過率, 温室床面への投影面積を, n は温室床
 面に投影している面の総数を意味する。温室内の反射は
 無視した。

各面の直達光透過率 T_{oi} は次の式より算出される。

$$T_{oi} = R_{pi} \cdot S_{fi} \cdot (1 - R_{si})$$

ここで、 R_{pi} はガラスの透過率を、 S_{fi} は部材の影を考慮した透過率を、 R_{si} はたるきの占める面積の割合を表わす。 S_{fi} は次のようになる。

$$S_{fi} = (Y_l - b_b - K_y)(F_m - b_m - K_f) / (Y_l \cdot F_m)$$

$$K_y = \min(|h_b \cot h' \sin A'|, Y_l - b_b)$$

$$K_f = \min(|h_m \cot h' \cos A'|, F_m - b_m)$$

ここで、 h' 、 A' は面の法線方向を天頂としたときの太陽高度および方位を、 Y_l は面の最大傾斜方向に設けられた部材の間隔を、 h_b 、 b_b はそれぞれ同部材のせい、幅を、 F_m は面の最大傾斜方向と直角の方向に設けられた部材の間隔を、 h_m 、 b_m はそれぞれ同部材のせい、幅を表わす。

Fig. 4に温室の最適設計法アルゴリズムの大略のフローチャートを示した。

Fig. 4. Flow chart of the optimization. b : design variables, J : objective function, δb : step.

5. 計算例

Fig. 5に間口を9 mに固定した場合の最適設計温室の形状を示した。設計荷重は積雪深30 cm、風速50 m/sで、直達光透過率を目的関数とした時の計算では北緯34°を対象とし、資材費制約条件係数 k は1.10とした。比較のためある市販温室（間口9 m）の直達光透過率を（3）式より、資材費を鋼材重量と被覆面積より計算し、最適設計の結果と対比しTable 1に示した。ただしTable 1で資材費は市販温室のそれを1とし相対値で示してある。

同表より次のことがわかる。資材費を目的関数とすると最適設計では資材費を30%近く節約できる。さらに直

Fig. 5. Shapes of the optimal greenhouses. The optimizations are carried out under the conditions of a snow load of 30 cm and a wind speed of 50 m/s. The spans are fixed at 9 m. By the optimization of the light transmission, the latitude and the coefficient of construction cost allowance [k in the inequality (1)] are 34°N and 1.10, respectively. a: the result of the optimization of the construction cost, and b and c: the results of the optimizations of the light transmission of the E-W and N-S oriented greenhouses, respectively.

Table 1. Comparison of the results of the optimization with an example of commercial greenhouses. o: an example of commercial greenhouses. The conditions of the calculation are the same as Fig. 5, and a, b and c correspond to those of the same figure.

	Construction cost (relative value)	Direct light transmission	
		E-W orientation (%)	N-S orientation (%)
o	1.0	67.2	58.3
a	0.72	—	—
b	0.79	71.0	—
c	0.78	—	62.5

達光透過率を目的関数とすると、東西棟で資材費は21%節約でき透過率は3.8%向上する。南北棟では資材費は22%節約でき透過率は4.2%向上する。前述のごとく最適設計はいくつかの仮定に基づいており、上述の数字はそのまま実現可能ではない。しかし最適設計の結果は資材費、直達光透過率両面において改善の方向を示してい

ると考えられる。次にそれぞれの最適設計の結果を考察しよう。

(1) 資材費を目的関数にした場合

資材費を目的関数とすると結果は左右対称形となり、左右対称形が資材費を最も節約できる形状であることを示している。棟高は低く 257 cm である。最適な棟高は積雪深および間口の長さによって変わるがこれに関しては次報で述べる予定である。30 cm 程度の積雪深では棟高を低くし、被覆面積を小さく、はりの長さを短くした方が有利である。このことは屋根勾配を小とすべきことを示しているので、雨水の流下と併せて考慮する必要がある。はりの断面 2 次モーメントは 288 cm^4 で、柱のそれ (245 cm^4) よりわずかに大きい。はりに加わる最大曲げモーメントは積雪荷重の場合 (はりの断面 2 次モーメント)/(柱の断面 2 次モーメント) の比が大きい程小さくなる。しかしはりの断面 2 次モーメントが大きくなるとそれだけ資材費が増すという不利な面をもつ。与えられた荷重の下での両者の均衡点が本計算の結果である。柱の長さは 180 cm で、これは柱の長さに与えた制約条件の最低値である。もやの断面 2 次モーメントは 60 cm^4 と大きい。もや間隔の決定にはガラスおよびそれを支えるたすきの強度も考慮に入れなければならないが、本最適設計ではガラスの強度を計算に取り入れなかったので広いもや間隔が結果として得られた (360 cm)。このことから少なくとも骨組の強度の面からは、もやの本数を少なくし大きな断面の部材を使った方が有利であると結論できる。スパンは 376 cm と広い。通常の温室では 2~3 m である。現存の温室のスパンは再考の余地を残しているように思われる。部材断面を特徴付ける R_1 、 R_2 の値はすべての部材でそれぞれ 0.6、0.7 となった。これはそれぞれの変数の許容範囲の最低値および最高値である。 R_1 が最低値であるとは同じ断面 2 次モーメントを持つ鋼材でも可能なかぎり断面積の小さな鋼材を意味する。また部材断面のせい、幅と R_1 、 R_2 との回帰直線より、小さい R_1 値ほど同じ断面 2 次モーメントをもつ鋼材でもせいの高い鋼材を、大きい R_2 値ほど幅の広い鋼材を意味する。なお、本計算の結果の部材断面の (せい/幅) 比は、約 1.2 である。

(2) 直達光透過率を目的関数にした場合 (東西棟)

Fig. 5 に示したように、東西棟と南北棟では最適設計は異なった結果を与える。東西棟の場合左右非対称で、棟は中央より、わずかに南側に位置する。南側屋根面は直達光透過率に大きな役割を果たす。南側屋根面勾配は他の条件が許すなら南中時における直達光方向に垂直が望ましい。これは部材のつくる影とガラスの透過率の点から屋根面に垂直に光が入射するのが有利であること、および積雪荷重が支配的のときは屋根面が急になると荷重

が軽減されて部材を細くする事が可能となり、それだけ影が小さくなることによるものである。本計算条件下の南中時太陽高度は 32.7° で最適設計南側屋根面への入射は垂直ではない。それは資材費制約条件および許容応力度制約条件のため南側屋根面をさらに急にはできないからである。資材費制約条件を緩める ($k \geq 1.2$) と棟の位置はさらに南側に移動し、南側屋根面は急になり直達光透過率は増加する。 $k=1.10$ の段階では棟の位置は北風、南風の両荷重によって規制されている。断面 2 次モーメントは、北側はりが 215 cm^4 で他の 3 部材 ($150 \sim 175 \text{ cm}^4$) に比べて大きい。スパンは 4 m で資材費を目的関数とした時と同じく市販温室に比べて広い。 R_1 は南側はりの 0.77 を除いて最低値 0.6 に近い値となる。 R_2 は南側柱の 0.43 を除いて最高値 0.7 にとどまっている。すなわち直達光透過率に関係のうすい北側の両部材には、資材費を目的関数とした時と同様断面積が小で、せい、幅共に大きな鋼材が適している。直達光透過率に大きな役割を果たす南側はりには、同じ断面 2 次モーメントを持つ鋼材でもせいの低い断面積の大きな鋼材が、南側柱には同じ断面 2 次モーメントを持つ鋼材でもはりの狭い鋼材が適している。各部材の (せい/幅) 比は、北側両部材で 1.2、南側はりで 1.0、南側柱で 1.7 である。もや間隔は資材費を目的関数とした場合と同様大きな値となった。

(3) 直達光透過率を目的関数にした場合 (南北棟)

南北棟の結果は Fig. 5 に見られるように左右対称形で資材費を目的関数とした場合と大きく変らない。資材費を目的関数とした時との主な違いの一つは屋根面勾配の増加である。南北棟屋根面への直達光入射角は屋根面が急な程南中時にやや小さくなるが、午前および午後の大半の時間には大きくなる。したがって採光の点からは屋根面勾配が大きいほど有利である。柱の長さは資材費を目的関数にした場合や東西棟温室を対象にした場合には最低値 180 cm にとどまっていたが、南北棟の場合 193 cm とわずかに高くなる。はりの R_1 は 0.72、 R_2 は 0.6 とそれぞれ最低値、最高値よりわずかに大きく、あるいは小さくなっている。柱の R_1 、 R_2 はそれぞれ最低値、最高値に近い値となっている。これは柱には資材費を目的関数とした時のように、同じ断面 2 次モーメントを持つ鋼材でもせい、幅の大きな鋼材が、はりにはせい、幅共に少し小さい鋼材が適していることを意味している。(せい/幅) 比ははり、柱ともに 1.2 である。その他の設計変数は資材費を目的関数とした時と比べて大きく変らない。

6. 結 論

温室設計の指針を呈示する目的で、資材費および直達

光透過率を目的関数とした最適設計プログラムを開発した。本報告では主にそのアルゴリズムと計算例について報告した。その結果次の諸点が明らかとなった。

① 本研究で使用した最急降下法は温室設計に適用可能である。

② 市販の温室は資材費、直達光透過率の両面で改善の余地を残している。

③ 資材費を目的関数にした場合および直達光透過率を目的関数とした南北棟の場合左右対称形となったが、東西棟を対象とした場合非対称となり棟が中央より南側に位置した。

④ 積雪深 30 cm, 風速 50 cm/s の設計荷重での最適設計から市販温室より長いスパン(約 4 m)がよいという結果が得られた。

⑤ 断面 2 次モーメントは 150~290 cm⁴ の範囲で、左右対称形の場合ははりの断面 2 次モーメントは柱のそれより大きくなった。東西棟温室の場合、北側はり以外の 3 部材に比べて大きな断面 2 次モーメントとなった。

⑥ 資材費を目的関数とした場合、同じ断面 2 次モーメントを持つ鋼材でもせい、幅共に大きな鋼材が適している。東西棟温室の北側の部材および南北棟温室の柱の場合も同様である。東西棟温室の南側はりにはせいが低く断面積の大きな鋼材が、南側柱には幅の狭い鋼材が適している。

⑦ ガラスあるいはガラスを支えるたきの強度の制約条件を取入れなかったために、もや間隔は実現化には

疑問の残る広い値となった。しかし少なくとも骨組の強度の面からは、もやの断面 2 次モーメントを大きくして間隔を広くした方が有利であることが示された。

次報では本報告で固定したパラメーター(間口, 設計荷重等)による最適設計の変動解析について報告する予定である。

引用文献

- 1) 藤本盛久編, 1972: 鉄筋の構造設計, 技報堂, 東京, 682 p.
- 2) 羽倉弘人, 1975: 施設構造設計, 施設園芸における環境制御技術, ソフトサイエンス社, 138-184.
- 3) Haug, E. J. Jr., Pan, K. C. and Streeter, T. D., 1972: A computational method for optimal structural design I. Piecewise uniform structures. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, **5**, 171-184.
- 4) 古在豊樹, 1973: 温室の光透過に関する数値実験(第 1 報), 農業気象, **29**, 179-187.
- 5) 古在豊樹, 1974: 単棟温室の構造と日射透過について, 農水産分野における環境工学, 杉二郎教授還暦記念事業会, 91-134.
- 6) 日本建築学会, 1974: 軽量形鋼構造設計施工指針, 同解説, 丸善, 東京, 323 p.
- 7) 日本施設園芸協会, 1975: 園芸用施設安全構造基準(暫定基準), 3-7.
- 8) 長 尚, 1971: 構造物の最適設計, 朝倉書店, 東京, 187 p.
- 9) 田中 尚, 中村雄治, 1970: 建築構造物の自動設計と最適設計, 培風館, 東京, 177 p.

Summary

Greenhouses should be designed to meet requirements of construction costs, durability against loads and the possibility of providing suitable environment to plant growth. To get guides to design an optimal greenhouse from the above-mentioned three viewpoints, one of the optimization techniques, which is called the steepest descent method, is applied in this study. The direct light transmission into the greenhouse in winter is regarded as one of the most important environmental factors.

The steepest descent method gives the combination of the design variables which constitute the optimal (minimum or maximum) value in the objective function under some constraints. In this study the design variables were, for example, the shape of the house, the moment of inertia and crosssection features of each member and the ratch measure. The allowable stress or deflection of each member played a role of constraints in the course of the optimization. The objective function was the construction cost or the direct light transmission. In the steepest descent method, however, only one objective function is allowed. For this reason the following two steps were used. First the construction cost (J_s) is chosen as the objective function and is minimized. Then the inequality (1) is added to the constraints and the light transmission is maximized, where k is the coefficient of construction cost allowance and larger than 1.0, and J_{sopr} is the minimum construction cost.

Because in the steepest descent method all variables should be continuous and differentiable, some discontinuous variables, e.g. the number of purlins, were approximated with appropriate continuous functions. For the same reason any size and shape of steel member were assumed to exist.

The crosssection features of the member are expressed with three independent variables on the basis of the empirical relations.

The optimizations were carried out under the conditions of a snow load of 30 cm and a wind speed of 50 m/s. The span was fixed at 9 m. The latitude and the coefficient of construction cost allowance in the optimization of the light transmission were 34°N and 1.10, respectively. The following points became clear by the optimizations.

- 1) The steepest descent method can be applied to greenhouse design and the results show appreciable improvement both in the construction cost and in the light transmission in comparison with an example of commercial greenhouses.
- 2) The results of the optimization of the construction cost (cost optimization, hereafter) and the light transmission of the N-S oriented greenhouse (N-S optimization, hereafter) show a symmetric shape, whereas the optimal E-W oriented greenhouse has a ridge nearer to the south wall, so that the south roof slope becomes steeper.
- 3) Every optimization results in a ratch measuer of about 4 m, which is wider than that of commercial greenhouses.
- 4) The moment of inertia of the rafters and the posts ranges from 150 to 290 cm⁴. In the cases of the cost and N-S optimizations, the rafters have a larger moment of inertia than the posts. In the E-W optimization, the north rafter has an appreciably larger moment of inertia than the three others.
- 5) The cost optimization shows that members of the crosssection with larger depth and width are more suitable for the rafters and the posts, if the moment of inertia is the same. This holds true for the north members in the E-W optimization and for the posts in the N-S optimization. In the E-W oriented greenhouse, a member with shorter depth and larger section area and a member with shorter width are more suitable for the south rafter and for the south post, respectively.
- 6) In this study the strength of the glass was not taken into consideration. This resulted in very wide purlin intervals, which seem to be unrealistic, but this still proves that larger purlins with wider intervals are more suitable than smaller ones with shorter intervals from the viewpoint of the framework strength alone.

In the next paper, the dependence of the optimal designs on the parameters which are fixed in this study will be reported.