

硬軟多層材料からなる下層材料の硬軟計測方法の試み

Proposal of Hardness Measurement Procedure of Lower Layer Material of Hard & Soft Multilayer Material

○長尾 光雄*, 横田 理*

○Mitsuo Nagao*, Osamu Yokota*

* 日本大学

* Nihon University

キーワード: 硬軟 (Hardness & Softness), 多層 (Multilayer), 材料 (Material), 下層 (Lower Layer)
試験装置 (Test Equipment), 生体組織 (Biotissue), 筋組織 (Muscular Tissue)

連絡先: 〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1 日本大学工学部 機械工学科 長尾光雄,
Tel.: (024)956-8760, Fax.: (024)956-8860, E-mail: nagao@mech.ce.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

弾性変形領域が大きいプラスチックや弾性変形領域が主であるゴムの硬さ試験^{1), 2)}に用いる材料は, 均質で大きさが定められた単一な材料である。これら試験方法は材料表面のくぼみと押込荷重などから直接硬さの情報を得る試験方法である。指で押して変形する弾性体の中にこれとは異なる弾性体が納められた多層構成弾性体において, 外側の弾性体を介して内部弾性体の弾性変化を定量的に捉える評価方法の提案^{3), 4)}とこれを計測する試験装置の開発を目指している。下層材料の硬軟の変化がなくても上層材料の厚薄や硬軟の大きさによりその硬軟は変化するが, 上層材料の硬軟特性が一定であれば下層材料の硬軟変化やその差は捉えることができる。

本報では多層材料に硬度が異なるスポンジゴムを用いて, 下層に存在する材料の硬軟変化が定量的に捉えられる評価方法について提案し, その妥当性と有効性について確かめられたのでその概要について報告する。

2. 硬軟の評価

2.1 W-x 線図と傾き角度

材料の弾性率は Fig.1 に示すように材料に与えた等速引張荷重により得られた応力-ひずみ線図から求める。σ-ε が直線的な関係にある(a)はその勾配から求められるが, ε が大きく曲線になる(b)では曲線上にある 1 点 (線図に付した○印) と原点を結ぶ直線の勾配 $\sigma/\varepsilon = \tan \phi$ や接線と横軸のなす角度 $\tan \theta = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ で表される。⁵⁾ 弾性率の変化は材料の硬軟変化に相当するため, 本試験では $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ により評価する方法を提案する。弾性体の硬さ測定に押込圧子を用いる場合は Fig.2 (押込設定荷重 W_0 —一定の例を示す。他に押込反力 W_1 —一定の例もある。) のように押込荷重 W - 押込深さ x 線図が得られる。例えば C 点 (W_{max} , x_{max}) において角度 $\tan \theta$ は $\Delta W/\Delta x$ に相当し式(1)より与える。

$$\tan \theta = \Delta W/\Delta x \quad (1)$$

$\Delta W/\Delta x$ は (W, x) の始点から (W_{max} , x_{max}) の間で任意に定められ係数 α を与えて式 (2) のよ

うに表し、どちらかを定めて与える。

$$\Delta W = \alpha W_{\max}$$

$$\Delta x = \alpha x_{\max} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (2)$$

W の縦軸は硬さの指標を表し、x の横軸は軟らかさの指標を表している。完全な剛体は縦軸と平行、完全な軟体は横軸と平行になり、弾性体はこの両軸内に存在する。提案する試験方法は粘弾性体の材料にも適用できる。3 種類の弾性体を取り上げた Fig.2 の測定点 (W_{\max} , x_{\max}) である A, B と C について評価すれば、W より硬さの評価は $A < B < C$, x より軟らかさの評価は $A > B > C$ となる。θ の有効性は、硬軟変化が測定点 (W_{\max} , x_{\max}) に表れない小さな変化が θ の変化に表れる点である。

次に Fig.2 の○印を付した押込による (W_{\max} , x_{\max}) から材料の圧縮変形をバネの弾性定数 κ とおいて式(3)を提案し、W や x と合わせて判断の資料に用いる。

$$\kappa = W/x \quad (3)$$

さらに、押込まれた材料の変形体積 (V) から式(4)に示す体積弾性率 E_v を提案し、W, x や κ と合わせて判断の資料に用いる。

$$E_v = W/V \quad (4)$$

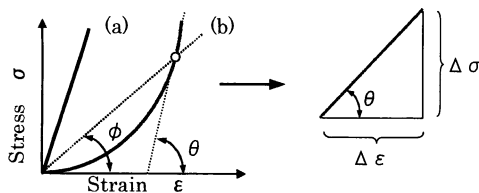


Fig.1 $\sigma - \epsilon$

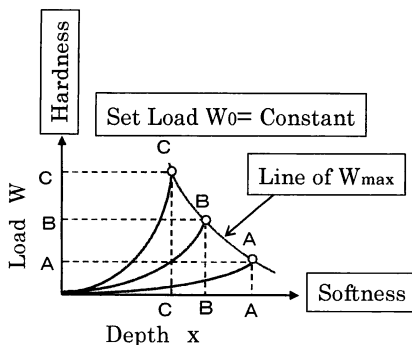


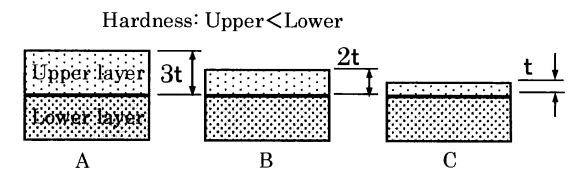
Fig.2 W - x

材料の硬軟は W - x 線図から W と x および κ, E_v と θ の数値として与えられる。κ と E_v の値から硬軟と序列の判別が可能なきには、θ はその確認に用いられるが、κ と E_v から硬軟の判別が困難または不明なきには θ の大きさから硬軟の判別が可能になる。θ に表れない場合は W_0 の大小を変えて探査することで θ の変化に表れるように調整する。このように θ から小さな弾性的変化やその差は検出できる。

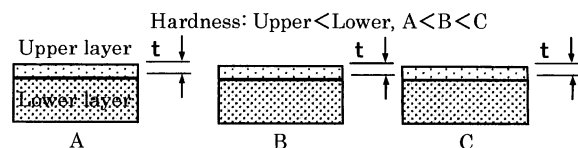
2.2 硬軟の変化

Fig.2 の A, B と C の W - x 線図の事例として 2 例を Fig.3 に示す。(a) は下層の硬さが上層より硬く一定なのに対して上層の厚さが $A > B > C$ と異なる例である。軟らかく厚さが大きい上層 A (3t) は W が小さく、厚さが小さい上層 C (t) は W が大きくなる。下層の硬軟は上層の厚さ特性に左右される。(b) は下層の硬さが上層より硬く硬さの序列が $A < B < C$ となり、上層の厚さが一定な例である。軟らかく厚さが一定な上層を介するため、下層の硬さ序列はそのまま W の序列となるが上層の厚さや硬軟の大きさに左右される。

上記の例で示したように、下層材料の硬軟を捉えるためには上層および下層の硬軟や厚さ、押込設定荷重の大きさなどの初期条件が事前に整理されている必要がある。一度その条件が判れば下層材料の硬軟変化は容易に捉えることができる。



(a) Thickness of the upper layer is different, and the hardness of the lower layer is constant.



(b) Thickness constancy of the upper layer is different from the hardness of the lower layer.

Fig.3 Case description of fig.2.

3. 試験装置

Fig.4 に試作した試験装置のセンサ部の概要を示し、 W と x のデータ処理はプログラムで処理表示される計測システムである。(a)はバネ κ_0 の調整により押込設定荷重 W_0 与えて、試料に加圧板を垂直に当てた状態である。バネ κ_1 は押込部の自重で押込圧子が押込まれないように押込部持ち上げ用であり、(b)の上端部から押込むと κ_1 がたわみ押込圧子が試料に押し付けられ、押込ストローク L だけ押込まれて静止する。このとき、試料の押込深さが x 、試料からの反力である押込荷重は W としてデータが取り込まれて $W-x$ 線図とそれぞれ W_{max} と x_{max} が測定される。式(1)の $\Delta W/\Delta x$ は近似式 $W-x$ 線図から与えて θ が算出され、試料ごとにモニターに表示される。

押込設定荷重 W_0 の範囲は 3N~40N, 押込ストローク L は 9 mm と 13 mm, 加圧板は当り面が平坦な樹脂製で径 ϕ 40, 押込圧子も樹脂製で外径と先端は ϕ 8 と SR4 (球状), センサ部全長 150 mm, 重量約 300g, 押込時間 s は 1 秒~30 秒以内で任意に設定可能でモニターにはその押込状態が確認できる。

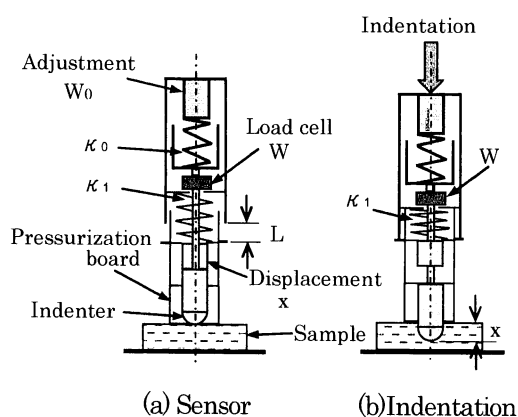


Fig.4 Description of the test equipment.

4. 試験

4.1 多層材料

硬軟多層材料からなる試験の構成図は Fig.5 に示す上層, 下層と測定盤 (SUS 盤) の 3 層構成で

ある。試験は上層を介して下層の硬軟変化が捉えられるのか、さらに下層を介して測定盤の硬さも確かめる試験である。用いた材料は Table1 に示す硬度が異なる 5 種類のスポンジゴムで、表より試料記号 B と C の硬度差が小さい。用いた硬度値はデュロメータタイプ E で測定している。

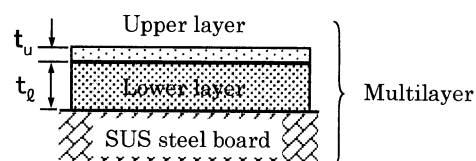


Fig.5 Configuration of the multilayer material.

Table1 Sample name and symbol and hardness.

Sample symbol	Name	Hardness ¹⁾ [degree]
A	CR sponge Most soft	E7 ± 1/5
B	CR sponge Soft	E21 ± 2/5
C	CR sponge Hard	E23 ± 2/5
D	Silicon sponge	E38 ± 2/5
E	CR sponge Hard most	E47 ± 2/5

1) Durometer Type E, dimension : t10 × L100 × W50mm.

4.2 多層材料の構成

基本構成は Fig.5 に示す 3 層構成となるが、下層材料の硬軟の変化や違いは 2 層の材料を対象にしている。具体的には Table2 に示す①と②の構成である。Fig.3(a)に示す上層の厚さは 6 種類、硬度の異なる材料 B と C の 2 種類、下層は(b)に示す厚さを 10mm 一定とした硬度の異なる材料 B, C, D と E の 4 種類である。このように材料の厚さと硬度が異なる上層と硬度の異なる下層材料を組合せた多層構成になっている。単層の③は①と②の下層材料の硬軟の大きさを検討する参照資料に用いる。また、センサの W_0 は多層構成に適応した硬軟変化を検出するために重要な要素になっているため、変化の度合いが探查できる値を設定している。

Table 2 Composition of the multilayer sample.

Composition		Combination of sample	
①	Upper layer	Symbol	B
		Thickness	1, 2, 3, 5, 7, 10 mm
	Lower layer	Symbol	B, C, D, E
		Thickness	10 mm
②	Upper layer	Symbol	C
		Thickness	1, 2, 3, 5, 7, 10 mm
	Lower layer	Symbol	C, D, E
		Thickness	10 mm
③	Monolayer	Symbol	A, B, C, D, E
		Thickness	10 mm
Indentation load W_0		4, 8, 12, 20, 24, 28, 32, 36 N	

4.3 試験方法

Table2 の①において Fig.5 の SUS 鋼盤の上に下層 B と上層に $t=1\text{mm}$ の B を重ね、 $W_0=4\text{N}$ 、Fig.4(a)(b)の手順で押込ストローク $L=9\text{mm}$ 、押込開始から終了するまでの押込設定時間 $S=5$ 秒により、材料に押込圧子を当てる位置を変えて 10 回測定した平均値から求める。同じく下層 B から C に置き換え、または上層の B から C に各々の厚さに置き換える。

押込設定荷重 W_0 とは、Fig.4 のセンサを Fig.5 の SUS 鋼盤（厚さ 10mm）上に垂直に押込時間とストロークで押込んだときのロードセルの値である。設定方法は Fig.4 の κ_0 のバネたわみ量を調整することで可能にしている。

同時にモニターには $W-x$ 線図および W と x の時系列が表示され、 W の変化は縦軸と平行になり角度 $\theta \approx 87^\circ \sim 89^\circ$ となれば計測システムが測定可能な状態にあり、モニターには W と x の時系列が表示され押込設定時間内に押込む速度のバラツキ（早押し、遅押し）が判るため再測定が容易に行え、センサ操作による人為的な間違いは排除される。

5. 試験結果

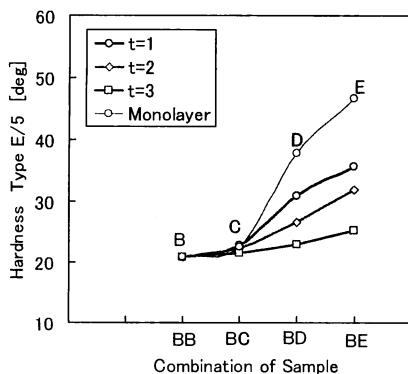
5.1 デュロメータと試験機

5.1.1 デュロメータの測定

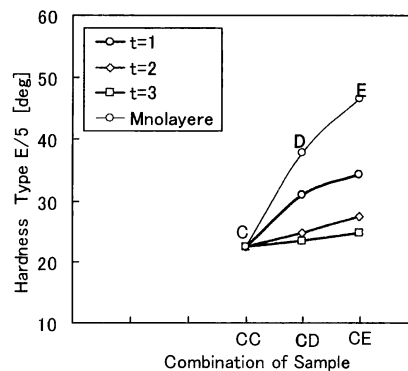
Table2 の①と②における上層厚さ 1, 2 と 3mm および③の B, C, D と E において、デュロメータタイプ E で試験した結果が Fig.6 である。③は材料に測定圧子が直接当るため Table1 の値になるが、同図(a)のように上層 B が厚くなると下層材料の硬軟判別は 3mm 以上では難しいようである。B より硬い C を用いた(b)からも 2mm 以上では難しく、1mm の場合でも D と E の差が小さい。このように JIS に準拠する硬度計は単層の硬さを測定する目的で製作されていることが確認できる。

5.1.2 試験機の測定

$W_0=4\text{N}$ におけるデュロメータタイプ E の測定条件と同じ試験機の結果が Fig.7 である。押込荷重 W の結果（右縦軸、下方）からは、単層の場合でも(a)(b)に見られるように相対的な差が小さい

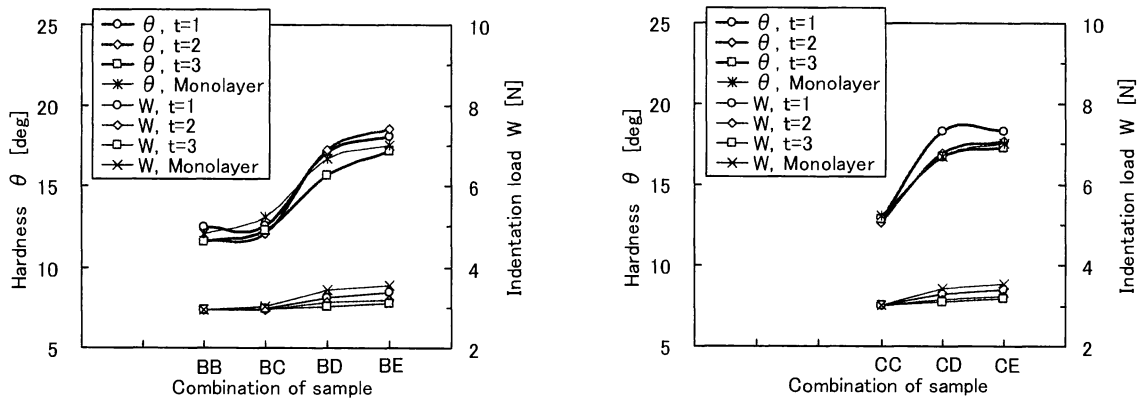


(a) Thickness $t=1, 2$ and 3mm of composition ①.



(b) Thickness $t=1, 2$ and 3mm of composition ②.

Fig.6 Hardness of the multilayer sponge rubber by Durometer type E.



(a) Indentation load and hardness of composition ①. (b) Indentation load and hardness of composition ②.

Fig.7 Measurement by Test-Equipment equal to Fig.6.

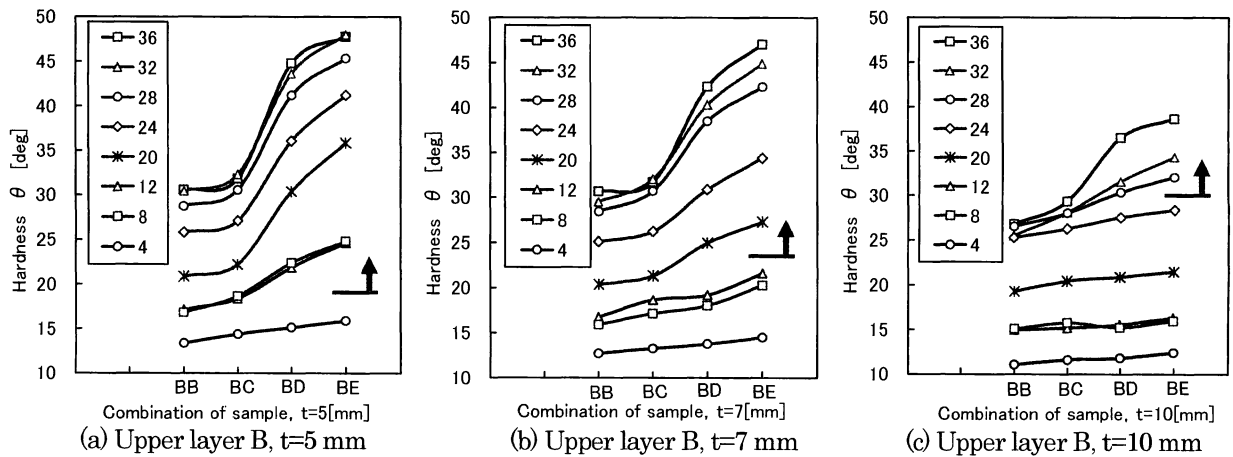


Fig.8 Hardness measurement of lower layer of composition ① by Test-Equipment.

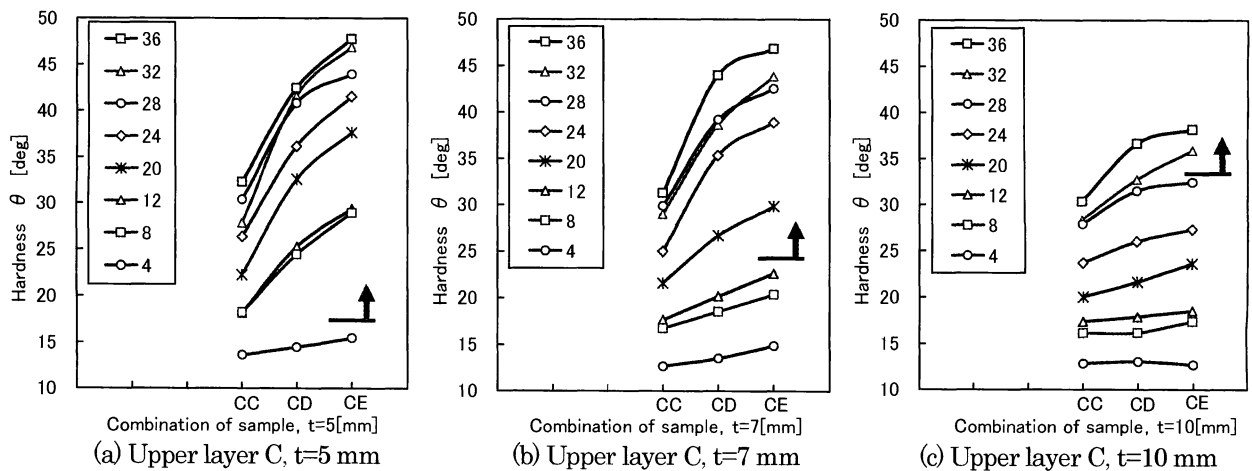


Fig.9 Hardness measurement of lower layer of composition ② by Test-Equipment.

ため序列の判断は難しく、これに上層を重ねた (a)(b)からは単層との区別がさらに困難である。式 (1)の傾き角度で表した硬さ θ は同図 W の上方に

示す。単層の場合は Fig.6(a)の単層に見られたように序列の判断が可能である。さらに、上層の厚さが 1, 2 と 3mm に変化しても単層との区別が困

難であるため、分散分析法⁶⁾を用いて「厚さ t の違いが θ の変化に表れる。」と仮定して有意水準 5%で判定したところ、①の(a)では「有意差なし」となり 95%以上の確かさで同じである。②の(b)では組合せ CD のみが有意水準 5%で「有意差あり」となり他は(a)同様厚さの因子が認められない判定であった。この例のように、押込荷重から下層の硬軟判別が困難な場合でも $W-x$ 線図の傾き角度からは捉えられるため、下層材料の小さな硬軟変化が上層を介して定量化できる可能性について確認した。なお、式(2)の ΔW に与えた係数 α は 0.8~0.95 である。

5.2 試験機の性能

Fig.8 と Fig.9 は上層の厚さ 5, 7 と 10mm, 材料 B と C を介して下層の硬軟判別と序列について、 W_0 を 4N~36N, 係数 α が 0.8~0.95 として θ を求めている。この試験の目的は、上層の厚さが変われば下層の硬軟を捉える適正な W_0 が存在することは容易に推測できるため、上層の厚さと硬さが判れば適正な W_0 を設定すれば下層材料の硬軟判別ができる点、またこれらが不明な場合には W_0 を任意に与えて下層の硬軟判別や序列が予測できる点について確かめる試験である。

①と②から上層の厚さに対して下層の判別も可能にする W_0 は、各々以下のように見積もられ、これを Fig.8 と Fig.9 中に上向き↑で表す。

①上層 B では、5mm ($W_0 > 8N$)、7mm ($W_0 > 20N$)、10mm ($W_0 > 28N$)

②上層 C では、5mm ($W_0 > 8N$)、7mm ($W_0 > 20N$)、10mm ($W_0 > 32N$)

上層の厚さが厚くなると下層の硬軟を判別する W_0 の大きさは大きくなり、また上層が硬くなると W_0 はさらに大きくなる。

6. おわりに

硬軟多層材料からなる下層材料の硬軟変化やその序列が定量的に捉える計測方法と試験装置について提案し、その試みにスポンジゴムを用いて試

験した。以下に得られた試験結果の要約を示す。

(1) 指で押して変形する材料の硬軟を定量化するために、 $W-x$ 線図から式(1)と式(2)より与えた角度が硬さの指標にする方法を提案し、式(3)と式(4)もその指標の判断に加えることも提案した。

(2) 硬軟が異なる材料を用い (1) で提案した方法で試験したところ、硬軟の違いは計測できことが確認できた。

(3) 押込荷重や変位の変化に表れない小さな硬軟の変化も提案した方法で捉えられる。

(4) 下層材料の硬軟判別またはその序列を与えるには、上層材料の厚さと硬さに応じた適正な押込設定荷重が存在する。

(5) (2) から (4) で確認したセンサを含む計測装置の基本的な設計が完成した。

(6) 今後は測定対象物に応じたセンサや計測処理システムなどの改良や対象物の構成条件に応じた押込設定荷重やセンサ先端部分の形状など適正な資料の準備を進める。

(7) 対象とする候補は、シリコーンやスポンジゴムによる複合製品、生体部位、生鮮食品などの硬軟判別を可能にしたい。

最後に、本研究は平成 19 年度日本大学学術研究助成金一般研究により助成されて実施したものである。

参考文献

- 1) JIS K 7215 プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法。
- 2) JIS K 6253 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法。
- 3) 長尾・横田：設計工学, Vol.41-No5 (2006), pp267/272
- 4) 長尾・横田：設計工学, Vol.41-No11 (2006), pp583/588
- 5) 貝原眞, 坂西明朗：バイオレオロジー, 産業図書 (1999), pp.42/46.
- 6) 石川馨, 米山高範：分散分析法入門, 日科技連出版社 (1985). 暖房用