

右室肥大の eigenvector analysis: 原発性肺高血圧症例による検討

Eigenvector analysis in body surface potential maps for evaluating right ventricular hypertrophy in primary pulmonary hypertension

渡部 真司
林 博史
石川 富久
山田 芳司
宮地 恭一
矢部誠太郎
外畑 巖

Shinji WATABE
Hiroshi HAYASHI
Tomihisa ISHIKAWA
Yoshiji YAMADA
Kyouichi MIYAJI
Seitaro YABE
Iwao SOTOBATA

Summary

This study related the eigenvectors derived from the QRS complex in body surface isopotential maps of normal subjects to regional myocardial excitation, with special emphasis on the right ventricle.

The subjects consisted of 120 normal healthy adults and eight patients with primary pulmonary hypertension and right ventricular hypertrophy (PPH).

According to the Karhunen-Loève theory, eigenvectors were derived from the normal group and the eigenvector coefficient of each subject was obtained against time for the first three components.

The cumulative proportion of the first three eigenvectors was 90.3% in normals and 80.2% in PPH.

The first eigenvector had a peak of eigenvector coefficients early in the QRS and had a bottom late in the QRS. The peak of the second was in the middle of the QRS. The coefficients of the third eigenvector were low compared to the former two eigenvectors, and had no characteristic time pattern.

PPH had a similar time pattern of coefficients in the first eigenvector, reduced coefficients in the second, and a definite peak in the mid-QRS in the third. The average eigenvector coefficient of the third eigenvector in PPH was significantly higher than those in normal subjects ($p < 0.01$).

We conclude that the third eigenvector derived from normal subjects strongly reflects right ventricular excitation.

Key words

Body surface map
hypertension

Right ventricular hypertrophy

Eigenvector analysis

Primary pulmonary

名古屋大学医学部 第一内科
名古屋市昭和区鶴舞町 65 (〒466)

The First Department of Internal Medicine, Nagoya
University School of Medicine, Tsurumai-65, Showa-
ku, Nagoya 466

Received for publication July 19, 1986; accepted September 2, 1986 (Ref. No. 32-PS6)

はじめに

体表面心臓電位図(電位図)は, 右胸部や背部を含む体表面上の多くの誘導点から記録された電位に基づいて作成され, 心筋興奮の電気現象の空間的な把握に有利と考えられる. しかし従来の等電位線表現では, 1心拍について, 非常に多くの瞬時の電位分布パターンを観察して判定する必要があり, 経時的变化の解釈が煩雑である. 電位図が有する多くの情報量に対して, それがもつ空間的パターンの有効成分を抽出すると, 情報の圧縮に有用なことが報告されている. それらの方法の一つとして, Karhunen-Loève 展開による電位図分析があり, 192 誘導電位図における 12 基底ベクトルの展開係数を経時的变化として表示する方法¹⁾, 192 誘導電位図における誘導数削減の研究²⁾などがある. しかしこれらの研究では, 独立した成分(固有ベクトル: eigenvector)を求めるための対象として, 健常人と心疾患患者をおおむね同数程度に用い, 純数学的に計算されている. それらから抽出された基底ベクトルについて, それぞれの生理学的意味づけは, 必ずしも十分になされてはいなかった. 我々は先に健常人 120 名について電位図の Karhunen-Loève 展開を行って基底ベクトルを求め, 第 1 基底ベクトルは心室中隔から左室前壁の興奮, 第 2 基底ベクトルは左室前壁の興奮と密接に関係し, 陳旧性前壁中隔梗塞では, これらの基底ベクトルの展開係数が減少することを報告した³⁾. 本研究では, これら基底ベクトルの生理学的意味づけに関する研究の一環として, 右室の興奮に関係する基底ベクトルについて検討した. この目的のために, 典型的な右室肥大を有する原発性肺高血圧症患者を対象とし, 各基底ベクトル展開係数の経時的变化を求め, 健常人と比較した.

方法と対象

対象は心疾患のない健常人 120 例(男子, 女子のおおの 60 例, 平均年齢 21.5±4.0 歳)(健常

群)および心臓カテーテル検査を含む各種臨床検査により診断された原発性肺高血圧症 8 例(男女各 4 例, 平均年齢 42.5±10.4 歳)(PPH 群)である. Table 1 に症例の年齢, 性別, 断層心エコー図長軸測定による右室径, および肺動脈圧を示す. これらの例において Wilson の中心端子を基準とした胸部 59 点, 背部 28 点, 計 87 の単極誘導心電図を記録し, これらの電位に基づいて 4 msec ごとに電位図を作成した. Karhunen-Loève 展開は Lux らの報告と同一であるが, 以下に求め方を簡単に述べる.

症例 i の時刻 t における電位図を, 次式のようにベクトル表現する.

$$P_i(t)=[P_{i1}(t), P_{i2}(t), \dots, P_{i87}(t)]$$

健常人 120 名の電位図の QRS 期 (3000 フレーム)について, 次式により共分散行列を求め, その固有値 λ_j と固有ベクトル E_j を算出した. ただし, ここでは, 電位分布パターンに着目した固有ベクトルを求めるため, 電位を瞬時ごとの空間マゲニチュードで正規化し, 共分散行列を計算した.

$$R=[r_{jk}]$$

$$r_{jk}=\frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{T} \sum_t P_{ij}(t)P_{jk}(t)/|P(t)|^2$$

次に任意の体表面電位ベクトルが, 次式のように基底ベクトル e_j の線型結合で表現されるとす

Table 1. Physical, echocardiographic and catheter findings of patients with primary pulmonary hypertension

Patients	Age	Sex	RVDd (mm)	PA (mmHg)
1	56	M	20	84/19
2	36	F	24	89/35
3	56	M	25	75/14
4	44	M	32	70/30
5	49	F	38	90/35
6	37	F	35	88/35
7	28	M	36	94/36
8	34	F	34	88/35

RVDd=right ventricular end-diastolic dimension; PA=pulmonary artery pressure.

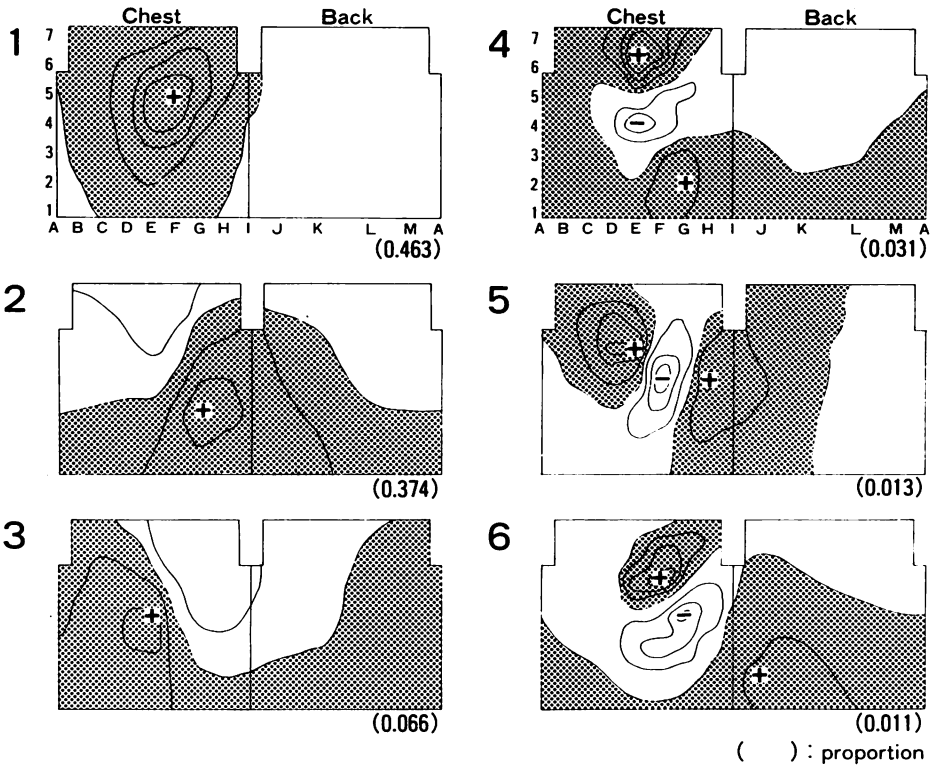


Fig. 1. First six eigenvectors of normal subjects.
The first 6 QRS-derived eigenvectors are shown.

る。

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^{87} \alpha_{ij}(t) e_j$$

ただし基底ベクトル e_j は固有ベクトルの大きさを正規化したものであり、 $e_j = E_j / |E_j|$ と表わされる。

この展開係数 $\alpha_{ij}(t)$ は、基底ベクトル e_j への射影の時間的変化を表わし、これを両群で経時的に求めた。

さらに、この展開係数 $\alpha_{ij}(t)$ のパワー百分率 $\beta_{ij}(t)$ を、次式により算出した。

$$\beta_{ij}(t) = \text{sgn} [\alpha_{ij}(t)] \alpha_{ij}^2(t) / |P_i(t)|^2$$

このパワー百分率 $\beta_{ij}(t)$ は、時刻 t における基底ベクトル e_j への射影成分の相対百分率を表わしている。

基底ベクトルのパターンがどのくらい健常群の電位図に寄与しているかは、次式で示す固有値の百分率で規定される。

$$\text{第 } i \text{ 基底ベクトルとその寄与率} = \lambda_i / \sum_{j=1}^{87} \lambda_j$$

両群における各基底ベクトルの母集団に対する寄与の程度の比較は、両群においてパワー百分率の絶対値をとり、その QRS 開始後 100 msec までの平均により行った。

結 果

1. 基底ベクトルとその寄与率

Karhunen-Loève 展開により、健常群より得られた電位図における基底ベクトルの、最初の 6 パターンを Fig. 1 に示す。第 1 基底ベクトルは

Table 2. Comparison of contributing rates of the first three eigenvectors of normal adults and patients with PPH

	I	II	III	I+II+III
Normal	46.3	37.4	6.6	90.3 (%)
PPH	35.2	27.3	17.7	80.2

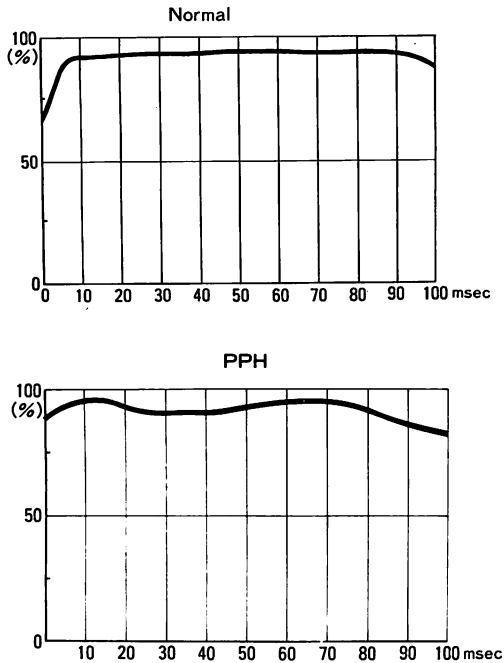


Fig. 2. Cumulated percentages of the first three eigenvectors.

Cumulated percentages of the first three eigenvectors are plotted against time from the beginning of the QRS complex.

Normal=normal adults; PPH=primary pulmonary hypertension.

胸部が正領域, 背部が負領域で, 後から前に向う起電力を示唆するパターンを示し, その寄与率は 46.3% であった. 第 2 基底ベクトルは左胸部下方が正領域, 右胸部上方が負領域で, 右肩から左胸部下方に向う起電力を示唆するパターンを示し, 寄与率は 37.4% であった. 第 3 基底ベクトルは右胸部が正領域, 左肩が負領域で, 左肩から

右下方へ向かう起電力を示唆するパターンを示し, 寄与率は 6.6% であった. 第 3 基底ベクトルまでの累積寄与率は 90.3% で, 第 4 基底ベクトル以降は極大, 極小が複数に存在し, 複雑なパターンを持っており, その寄与率はいずれも 5% 以下であった. **Table 2** に健常群と PPH 群の比較のために, 各基底ベクトルのパワー百分率より求めた寄与率を両群について示す. 第 1, 第 2 基底ベクトルは PPH 群で健常群より寄与率が低く, 第 3 基底ベクトルは 6.6% より 17.7% と有意に上昇していた. **Fig. 2** に健常群と PPH 群について, 第 3 基底ベクトルまでの寄与率の和を経時的に示した. 健常群では QRS のごく初期を除いて, 90% 以上, PPH 群も又 80% 以上の寄与率を占めていた.

2. 健常人の展開係数の経時変化

健常群の第 1, 第 2 および第 3 基底ベクトルについて, 代表的な展開係数の経時変化を **Fig. 3** に示す. QRS 開始後 20 msec では, 等電位図では右胸部を除き胸部全体が正領域で占められ, 極大は左鎖骨中線上にあり, 背部が負領域で占められたが, 展開係数では第 1 基底ベクトルが 2.0, 第 2 基底ベクトルが 0.5, 第 3 基底ベクトルが 0.5 の割合で構成された. QRS 開始後 40 msec では, 等電位図では左胸部はほぼ標準 12 誘導心電図 V_4 の位置に極大, 正中線上 V_1 と V_2 の中間点に極小を有しており, 展開係数では第 1 基底ベクトルが 0 に減少, 第 2 基底ベクトルが 7.0 と最大となり, 第 3 基底ベクトルが 1.0 となっている. QRS 開始後 60 msec の等電位図では胸部全体が負領域となり, 胸骨中央部に極小がみられ, 展開係数では第 1 基底ベクトルは -2.0 と負になり, 第 2 基底ベクトルは 1.0, 第 3 基底ベクトルは 0 であった.

3. PPH の展開係数の経時変化

Fig. 4 に PPH 患者の 1 例における map および展開係数を示す. QRS 開始後 20 msec では, 等電位図では健常人と異なって右胸部も正領域となり, 極大が右上方へ偏位している. この瞬時の

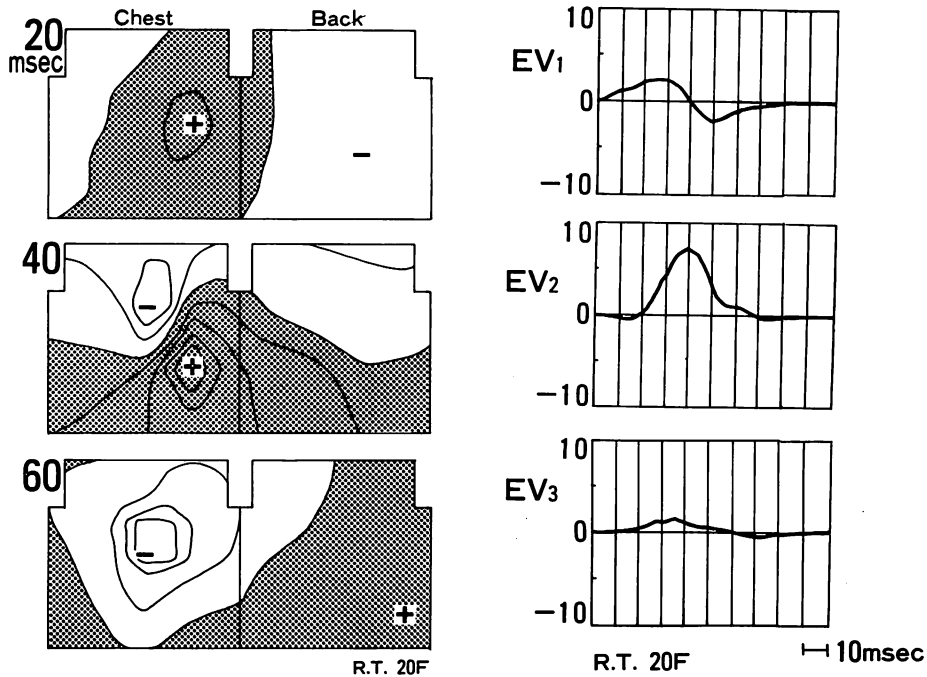


Fig. 3. Maps and eigenvector coefficients of a normal adult.

Three isopotential maps of a normal subject are shown at the points 20, 40 and 60 msec after the beginning of the QRS complex in the left panel. The first 3 eigenvectors' coefficients of the map from the same subject are plotted against time in the right panel.

展開係数は第1基底ベクトル 1.0, 第2基底ベクトル 1.5, 第3基底ベクトル -0.5であった。

QRS 開始後 40 msec では胸部上方に正領域をみ、極大の位置も健常人より上方にあった。展開係数では第1基底ベクトルは -1.0, 第2基底ベクトルは -3.0 と共に負となり、第3基底ベクトルは 3.5 と増加していた。QRS 開始後 60 msec では、等電位図で健常人より左上方の左鎖骨中線上方で極小をみたが、展開係数は第1基底ベクトル -1.0, 第2基底ベクトル -1.0, 第3基底ベクトル 0.5 となっている。Fig. 3 の健常例と比較すると、展開係数においては、第1基底ベクトルは QRS 前半に正、後半に負となって健常例と大差なく、健常例の第2基底ベクトルは QRS 中期に大きなピークを有していたのに対し、PPH 例では逆に QRS 中期に大きな負の値を示した。第3

基底ベクトルは、健常例では QRS 全体において前2ベクトルに比し、小さな展開係数で明らかな増減傾向を認めなかった。一方、PPH 例では QRS 中期に明らかに大きな係数を示した。

4. 健常人と PPH の比較

PPH 群における展開係数の平均と、健常例の展開係数から求めた正常域 (健常群の平均展開係数 ± 標準偏差 × 2) を Fig. 5 に経時的に示した。PPH 群での第1基底ベクトルは QRS の開始直後に大きく、第2基底ベクトルは QRS 中期に有意に小さく、第3基底ベクトルは中期に有意に大であった。Table 3 に両群における第1から第3基底ベクトルの展開係数の優位順を、QRS 開始後 10 msec ごとに示した。QRS 開始後 30~50 msec で最大の展開係数を持つベクトルは、健常人では第2基底ベクトルであったが、PPH 群では第3

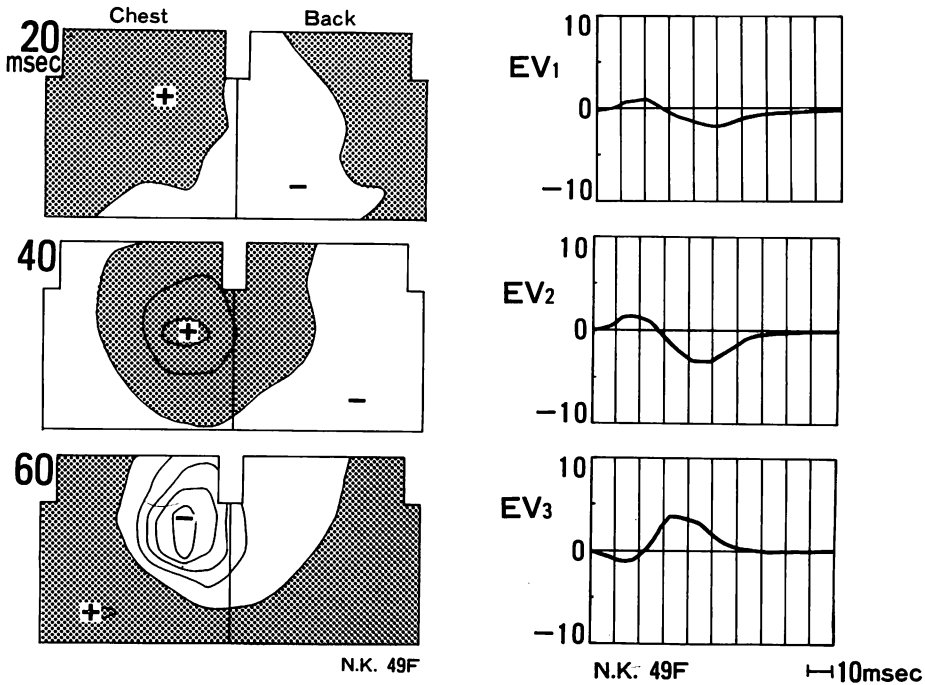


Fig. 4. Maps and eigenvector coefficients in a case with primary pulmonary hypertension.
 Three isopotential maps of a patient with primary pulmonary hypertension are shown at the points 20, 40 and 60 msec after the beginning of the QRS complex in the left panel and the first 3 eigenvectors' coefficients of the map from the same subject are plotted against time in the right panel.

基底ベクトルが最大であった ($p < 0.01$).

考 察

本研究では、電位図の分析を健常例電位図の基底ベクトルを抽出することより始め、その基底ベクトルに対する臨床的意味づけを、今回はとくに右室に関し、右室肥大を有する PPH 患者を用いて検討した。PPH 群ではパワー百分率より求めた第3基底ベクトルまでの累積寄与率が、QRS 全期を通じおおむね 80% 以上であり、したがって最初の3つの基底ベクトルを採用することにより、PPH 群の電位図も又、健常群の基底ベクトルを用いて説明可能であると考えられた。その結果、健常人では展開係数が小さく、又その時間的経過にも明らかな傾向を認めたい第3基底ベクトルが、PPH 群では QRS 中期に健常群よりも

有意に大であった。またその平均寄与率も 17.7% と、健常群の 6.6% より有意に大であった。このことから、第3基底ベクトルは PPH の特徴的の病変である右室肥大と強い関連性があると思われた。左肩に負領域を示し、前胸部正中に正領域の極大を持って、右前方に向う興奮を示唆する第3基底ベクトルのパターンも、右室の興奮前面と合致するものと考えられた。

我々は先に、陳旧性前壁中隔梗塞では第1基底ベクトルが失われることを報告した³⁾。第1基底ベクトルと第2基底ベクトルは展開係数の大きな成分で、各々 QRS 初期および中期にそのピークを示した。Durrer ら⁴⁾により報告されたヒト心の心室興奮伝播過程を考慮すると、第1基底ベクトルは最初に興奮する心室中隔の、第2基底ベクトルは左室自由壁の興奮と、強い関連を有すること

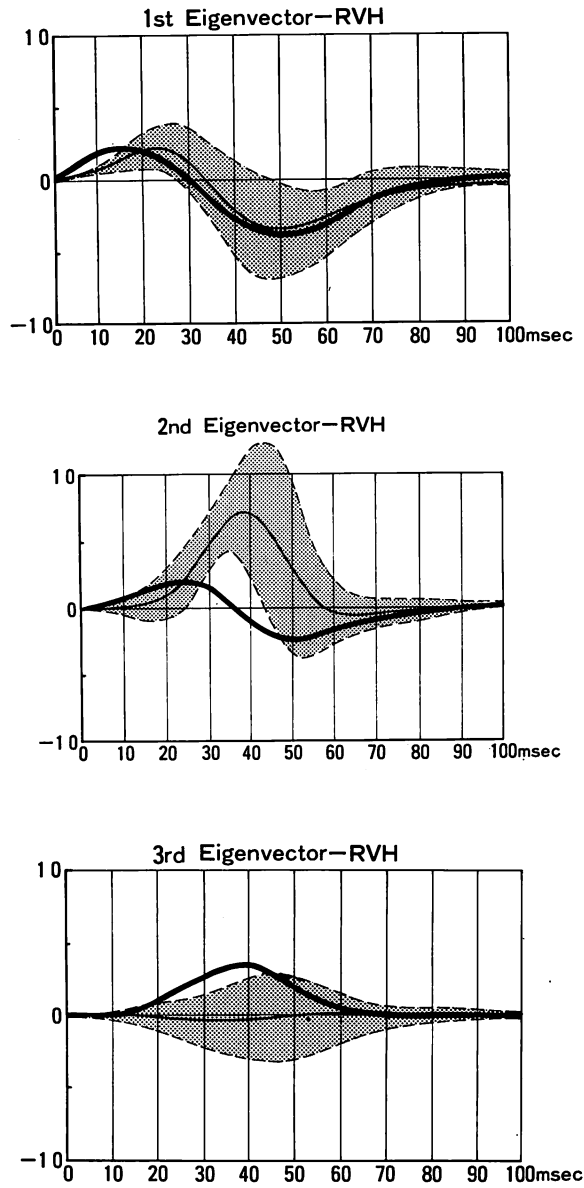


Fig. 5. First three eigenvector coefficients.

Averages of the first three eigenvectors' coefficients of 8 patients with primary pulmonary hypertension are plotted against time (thick solid line). Shaded area is the normal range (mean \pm 2SD).

Table 3. Order of contribution of eigenvectors by time

Order\time		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100 (msec)
Normal	1	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II
	2	II	II	I	III	III	III	III	III	III	III
	3	III	III	III	I	I	I	I	I	I	I
PPH	1	I	I	III	III	III	III	III	III	III	III
	2	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
	3	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I

Note the difference in the largest eigenvector coefficient at 30–50 msec.

が示唆される。PPH 群において、左室自由壁の興奮を反映する第 2 基底ベクトルの展開係数が QRS 中期に低くなるのは、左室が右室に比して相対的に小さくなることを意味すると考えられる。また PPH 群で、第 1 基底ベクトルのごく初期の展開係数が高い理由は不明であるが、中隔には右室の興奮分も含まれるという推測も可能である。

体表面電位図の有効成分を抽出する試みとして、Lux らによる、同じ Karhunen-Loève 展開を用いた情報圧縮に関する記述がある。この QRS より求められた成分は、Lux らが 124 例の健常人と種々の疾患を有する 97 症例から求めた基底ベクトルのパターンと比べると、その第 1 基底ベクトルは、我々が健常例からより求めた第 2 基底ベクトルに、彼らの第 2 基底ベクトルは我々の第 1 基底ベクトルに類似し、第 3 基底ベクトルは互いに非常によく似たパターンであった。田中ら²⁾が健常例 12 例、心疾患症例 38 例、計 50 例の QRS-T 期より抽出した基底ベクトルのパターンは、第 1、第 2 基底ベクトルは我々のものとよく類似し、田中らの第 3 基底ベクトルは鉛直方向の双極子をもっていた。選んだ症例により、基底ベクトルが異なるが、上記 3 つの基底ベクトルに関しては、いずれも一つの双極子が作るパターンであり、Lux らと我々のものはベクトルの寄与率の順位が変わっただけで、パターンは大差なかった。田中らのものは QRS-T 期より抽出されたにもかかわらず、第 2 基底ベクトルまでは大差ないパター

ンとなっている。このように基底ベクトルにはある程度の普遍性が考えられ、各基底ベクトルに局所心筋の興奮というような変量を割りつけることに対しては、統計的意味が整えば、可能であると考えられる。もし、各基底ベクトルが、多少なりとも局所心筋興奮と対応を有していれば、展開係数の時間的経過をみることは、局所心筋の状態、例えば肥大、梗塞、萎縮、障害等の判定に有用であると思われる。本研究では基底ベクトルの求め方はあくまで純数学的に行われたが、第 3 基底ベクトルは右室興奮との関連が強いと考えられた。このような各基底ベクトルの局所心筋興奮への割付はある程度まで可能と考えられ、その展開係数の時間的経過を観察することにより、局所心筋の病態を推定することが可能と考えられた。今後、後壁梗塞、下壁梗塞、左室肥大等で検討を加え、各基底ベクトルの意味づけを深め、この分析の診断的有用性について検討する必要があると考えられた。

要 約

体表面電位図の分析を Karhunen-Loève 展開により行い、右室と関連の深い基底ベクトルの検討を行った。

対象は健常成人 120 例(健常群)および右室肥大のある原発性肺高血圧症患者 8 名 (PPH 群)である。始めに健常群で基底ベクトルを求め、寄与率の大きい最初の 3 つの基底ベクトルに対し、電位図の展開係数の時間的推移を検討した。第 1 基底ベ

クトルは後から前へ向った心起電力を示唆し、展開係数は健常群で QRS 初期に高く、PPH 群でも同様であった。第 2 基底ベクトルは右肩から左下方へ向う心起電力を示唆し、展開係数は健常群で QRS 中期に高く、PPH 群ではこの時期に低値を示した。第 3 基底ベクトルは左肩から右下方へ向った心起電力を示唆し、展開係数は健常群で QRS 全期を通じて低く、時間的推移も傾向に乏しかったが、PPH 群では QRS 中期に有意に増加した。

PPH 群において、QRS 中期の展開係数が最大の基底ベクトルは、第 3 基底ベクトルであった。

健常群より抽出された第 3 基底ベクトルは、右室興奮を強く反映するものと示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、eigenvectors の計算に御協力をいただいた名古屋工業大学電気情報工学科 山本順三、

岩田 彰、鈴木宣夫先生に感謝の意を表する。

文 献

- 1) Lux RL, Evans AK, Bourges MJ, Wyatt RF, Abildskov JA: Redundancy reduction for improved display and analysis of body surface potential maps. *Circ Res* **49**: 186-196, 1981
- 2) Tanaka H, Hirayanagi K, Yajima K, Furukawa T: Information structure analysis of body surface potential maps. *Med Electr & Biol Architect* **21**: 106-148, 1983 (in Japanese)
- 3) Ishikawa T, Hayashi H, Watabe S, Yamada Y, Miyachi K, Yabe S, Sotobata I, Iwata A, Suzumura N: Clinical implication of eigenvector analysis in body surface potential maps; Diagnosis of old anteroseptal myocardial infarction. *Jpn J Electrocardiol* **7**: 57-63, 1987 (in Japanese)
- 4) Durrer D, van Dam RT, Freud GE, Janse MJ, Meijler FL, Arzbaecher RC: Total excitation of the isolated human heart. *Circulation* **41**: 899-912, 1970