Equilibrium Res Vol. 82(1) 34～42, 2023

原　著

視線追跡機能搭載型VRヘッドセットによる眼球運動検査装置の開発

堤　剛[1)]・水島　豪太[2)]・本田　圭司[1)]・山崎あやめ[1)]・大岡　知樹[1)]
青木　夏姫[1)]

Development of a New Video-Oculography Device Using a Commercially Available Virtual Reality Headset

Takeshi Tsutsumi[1)], Kota Mizushima[2)], Keiji Honda[1)], Ayame Yamazaki[1)], Tomoki Ooka[1)], Natsuki Aoki[1)]

[1)] *Department of Otolaryngology, Tokyo Medical and Dental University*
[2)] *Ichikawa Peace Clinic*

Recording eye movement at a patient's first visit to primary care is critical, because abnormal eye movement findings can disappear, accompanied by a lessening of symptoms. In addition, sharing such data with an expert institution can support a precise diagnosis. However, recording devices such as ENG and VOG are relatively expensive to introduce to private clinics. In addition, the series of eye movement examinations can take a relatively long time, potentially delaying other medical care. Recent advances in virtual reality (VR) technology have led to the development of VR goggles, which can project 3 D images and also record eye movements. This kind of device can be a useful tool for the development of a novel and affordable instrument for private clinics. We have been participating in the development of a VR goggle-based VOG. This device can record ordinary sequential examinations automatically, to save time. At the same time, we are also developing an advanced model for specialists. In this manuscript, we introduce our novel VOG equipment. In addition, we discuss the possibility of future applications.

Key words: VR goggle, eye movement, video oculogram

緒　言

総務省統計局によれば2021年12月1日時点での本邦における人口概算値では，男性の25.8%，女性の31.8%，全体で28.9%が65歳以上となる。さらにCOVID-19のパンデミックもあり，今後専門施設を受診しての診療から地元での診療や遠隔診療への移行を進めるため，診療所での正確な眼球運動記録とそのデータの施設間共有は喫緊の課題である。

また，めまいの診療において，めまい発作中は外来受診が難しく，専門施設への受診時にめまいに伴う異常眼球運動所見が確認できることは多くない。そのため，有症状時に受診する診療所などで眼球運動の記録を行い，これを専門施設と共有すること

1) 東京医科歯科大学耳鼻咽喉科
2) 市川ピースクリニック

は，診療の精度を上げるうえで極めて重要である。一方で，ENG や VOG 機器はまだ高価であり，その普及は専門施設や総合病院に限られ，診療所への導入はまだ一部であると思われる。また，キャリブレーションに続き注視眼振検査，指標追跡検査，視運動眼振検査，頭位眼振検査，頭位変換眼振検査，温度刺激検査など一通りの眼球運動検査を行うには，医師や臨床検査技師などの検者がついて一般に１時間以上を要する。これを診療所で外来診療の合間に行うのは難しく，一連の検査をできるだけ自動化した検査メニューの実装が望まれる。

近年ゲーム機器を中心とした virtual reality（VR）機器の普及が急速に進んでいる。Head Mount Display（HMD）の中にはゴーグル自体の空間内座標の計測や，視線追跡機能を備えたものも少なくなく，さらに眼球映像から回旋眼位の計測が可能なものもある。これらは医療用の機器と比べて非常に安価であり，また VR による安定した視標提示も可能となり，VOG 機器開発のプラットフォームとして極めて魅力的である[1)2)]。我々は民間企業（株式会社 Parafeed）における市販 HMD をベースとした安価な VOG 機器の開発に助言・協力している。本機器の特性と，将来的な可能性につき報告する。

方　法

開発機器は FOVE 0®（株式会社 FOVE）をベースに開発され，クラスⅡ医療機器として認証を得た。本機器は視線追跡機能とゴーグル自体の座標追跡機能を有する HMD であり，左右両眼の視線方向三次元ベクトルの追跡機能に加え，眼球映像から眼球回旋位の計測も可能となっている。FOVE 0 の計測は最大で 120 fps まで可能だが，本開発機器では安定性を担保するため 70 fps に抑えて計測を行っている。本機器はこの軽量な FOVE 0 とこれをコントロールするノート PC のみで構成される（図１）。視覚刺激は VR 上の光刺激，記録は PC 内ハードディスクおよび SSD に行う。ゴーグルへの入力電圧は＋5 V（USB バスパワー）で，平均視線追跡制度は1. 136° ±0. 058° となっている。HMD の本体重量は 520 g，附属ケーブルが 310 g で，本体寸法は W 182.7 mm×D 116.2 mm×H 118.8 mm，ケーブル長は USB 2.0：2.85 m，USB 3.0：2.9 m，HDMI：2.9 m である。セキュリティ仕様は HMD，PC 間のネットワーク接続において検査結果の暗号化を実行（AES：Advanced Encryption Standard 暗号アルゴリズム使用）している。診療所向けに短時間での記録を可能とするスタンダードモード（自発眼振検査，注視眼振検査，急速眼球運動検査，視標追跡検査，OKN/OKP 検査，頭位／頭位変換眼振検査，迷路瘻孔検査，回転検査，温度刺激検査），専門施設向けに特殊検査を組み込むことができ，各種パラメータを任意に設定できるアドバンストモードを用意している。本研究は東京医科歯科大学医学部倫理審査委員会の承認（M 2021-080）を得て行った。

結　果

スタンダードモードでは，検査メニューは自動化されたキャリブレーションの後，自発眼振検査，注視眼振検査，急速眼球運動検査，指標追跡検査，視運動眼振検査（OKN/OKP）までを自動化して連続施行可能になっている。また個々の検査を別に行いたい場合にも対応可能となっている。頭位眼振検

図１　機器外観

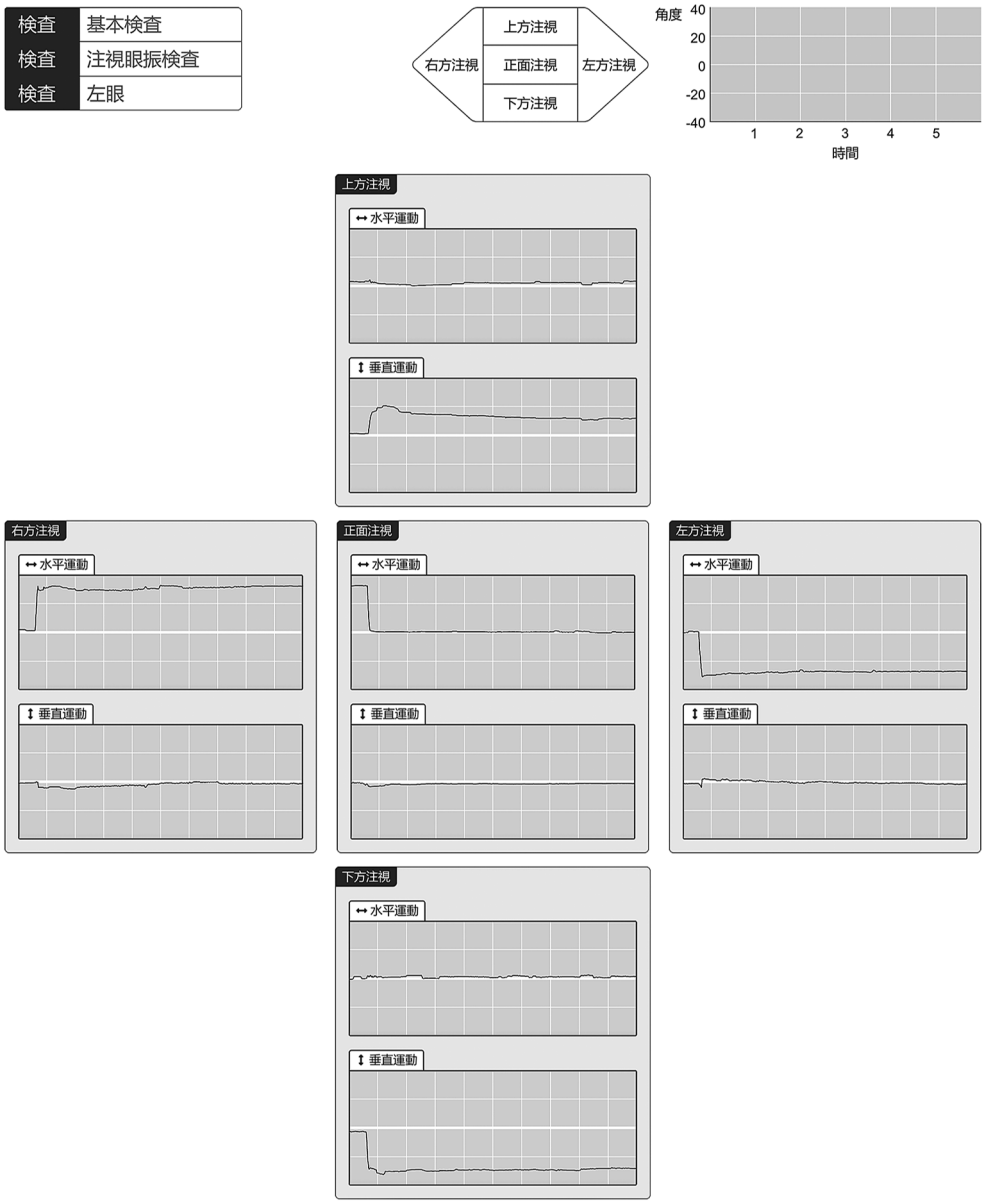

図２　注視眼振検査
VR スクリーン上に注視点が提示される。視標までの距離は１m，それぞれの視標の注視時間は10秒間に設定されている。

査，頭位変換眼振検査と温度刺激検査は検者が開始のタイミングを決められるように別個に検査を開始する設定となっている。この市販用の検査メニューに加えて，回旋眼位の利用などによるマニュアルでの様々な検査設定の可能な研究用機器の開発も並行して進めている。

計測した眼球運動映像はリアルタイムで数値データへ変換され表示・保存される。さらにその数値データはサーバへ転送・保存され，多施設間でのデータの共有が可能となる。眼球運動映像については虹彩紋理が個人情報となるためサーバには転送されないが，PC 自体には保存するかどうかを検者が選択できる。

自発眼振検査は注視点なしの状態で，20秒間記録を行う。

注視眼振検査は VR スクリーン上で正面から左右および上下30度方向に注視点が移動する。視標までの距離は１m，それぞれの視標の注視時間は10秒間

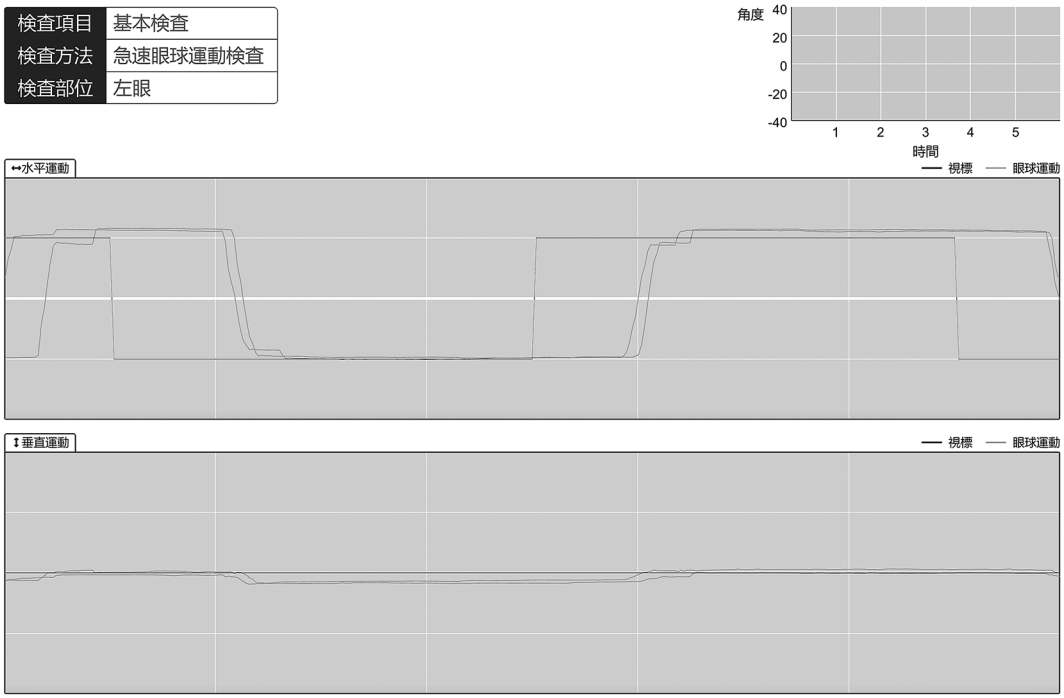

図３　急速眼球運動検査
左右上下とも20度，２秒周期の矩形波状の刺激視標を使用し，２周期分の波形を１周期ごとに重ねる形で刺激波形とともに水平・垂直方向の眼球運動を表示

としている。PC の画面表示はリアルタイムで眼球運動波形が表示され，結果の出力は日本めまい平衡医学会における注視眼振検査の表示形式に沿って配置され，水平方向および垂直方向がそれぞれ表示される（図２）。配置の説明およびスケールは右上に表示されている。

急速眼球運動検査は左右上下とも20度，２秒周期の矩形波状の刺激視標を使用している。結果の出力は２周期分の波形を１周期ごとに重ねる形で刺激波形とともに水平・垂直方向の眼球運動を表示している（図３）。

指標追跡検査は左右上下とも60度幅で６秒周期（60°/s）の正弦波刺激を使用している。結果の出力は６周期分の波形を３重にトレースする形で刺激波形とともに水平・垂直方向の眼球運動を表示している（図４）。

視運動眼振検査（OKN）は半径１m の円柱内面に配置した垂直方向の縦方向の線条（白黒それぞれ幅22.5度）を左右方向へ 60°/s で回転させ，右回り／左回りそれぞれ10秒間記録，急速眼球運動を自動検出する（図５）。視運動眼振検査（OKP）は０から 160°/s まで 4°/s^2 で視運動刺激映像の加速，減速を行い速度波形を記録する（図６）。刺激映像のがたつきをなくしかつ追視成分を除去するため，線条の辺縁をぼかしてある。

頭位眼振検査は座位で正面・後屈・前屈・右下・左下頭位，仰臥位で正面・右下・左下・懸垂頭位正面・懸垂右下・懸垂左下での眼球運動をそれぞれ最大30秒間記録する。HMD の角度センサによって当該頭位がとられた時点で自動的に計測が開始され，頭位が外れた時点で記録を終了する。また，検者が任意に頭位を選択して記録することもできる。出力表示は水平・垂直眼球運動が日本めまい平衡医学会の定める表示形式に沿って配置される。

頭位変換眼振検査については検者が任意のタイミングで開始できるように完全自動化はしていない。Stenger 法，Dix-Hallpike 法が施行可能で，当該頭位がとられたことは頭位眼振検査と同様に HMD の角度センサで判定し，計測が開始される。頭位眼振検査と同様に，検者による手動での検査頭位選択も

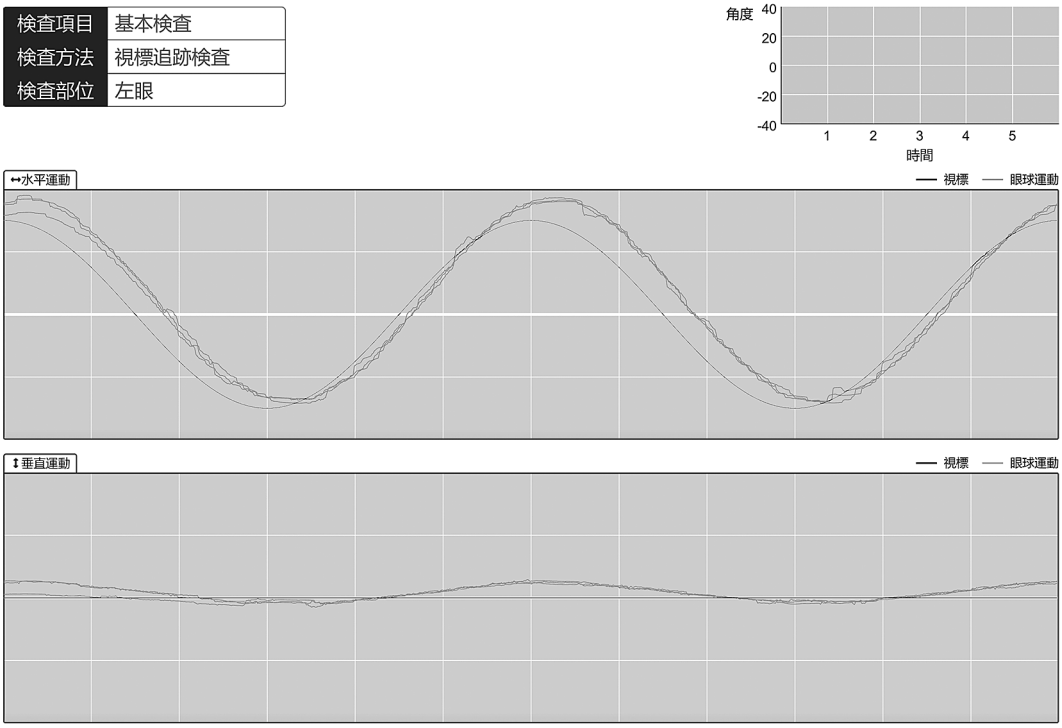

図４　指標追跡検査

左右上下とも60度幅で６秒周期（60°/s）の正弦波刺激を視標として使用している。結果の出力は６周期分の波形を３重にトレースする形で表示する。

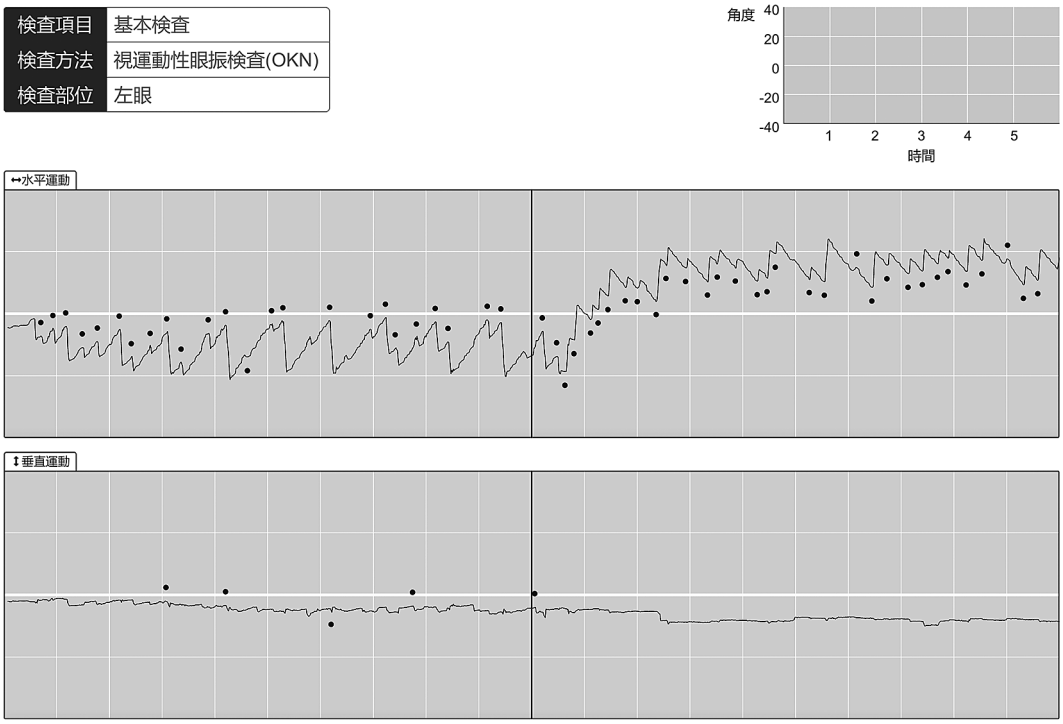

図５　視運動眼振検査（OKN）

VR 上で半径１m の円柱内面に配置した垂直方向の縦方向の線条（白黒それぞれ幅22.5度）を左右方向へ 60°/s で回転させ，右回り/左回りそれぞれ 10 秒間記録する。

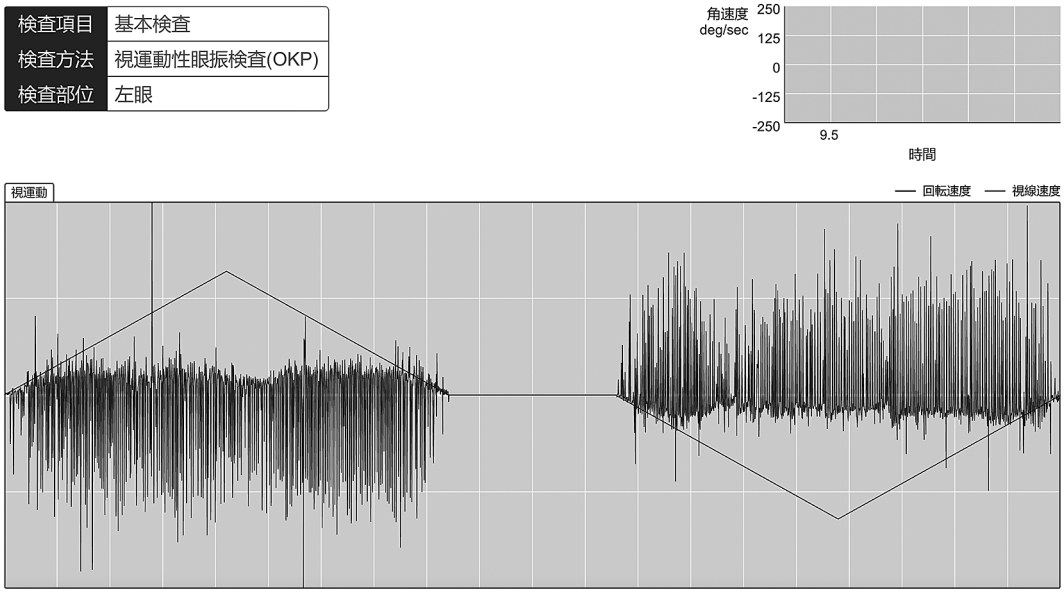

図６　視運動眼振検査（OKP）
0 から 160°/s まで 4°/s^2 で視運動刺激映像の加速，減速を行い記録する。

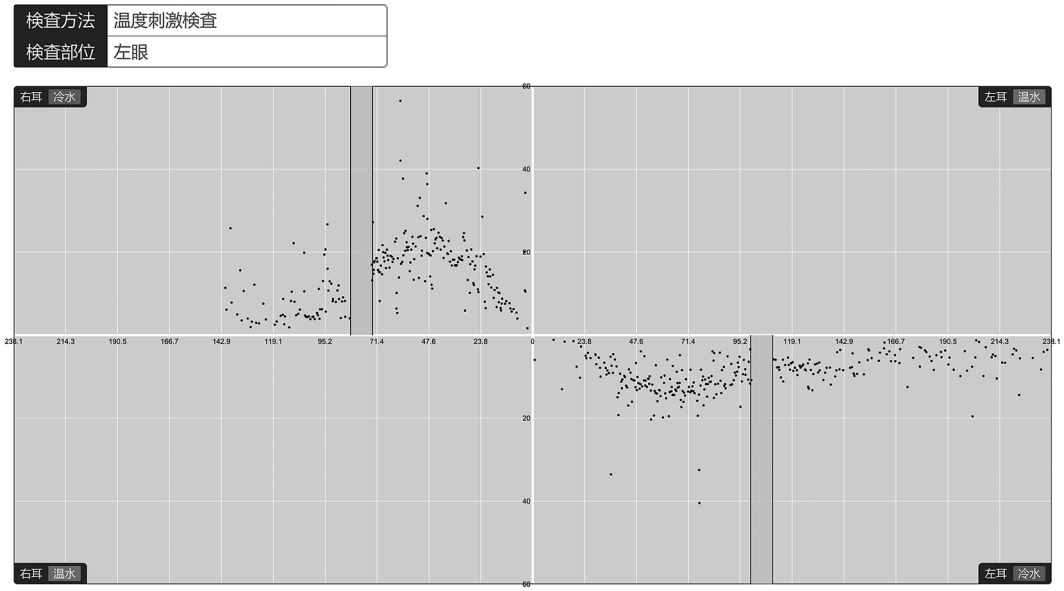

図７　温度刺激検査（左半規管麻痺例：20度 20 ml 注水）
左耳冷水，左耳温水，右耳冷水，右耳温水の注入開始ボタンがある。Visual suppression のボタンを押すと，VR 上に注視点が５秒間呈示される。検査データは緩徐相速度のグラフで表示。

可能となっている。出力表示は同様に日本めまい平衡医学会の定める表示形式による。

温度刺激検査も同様に検者のタイミングでスタートできるように設定した。左耳冷水，左耳温水，右耳冷水，右耳温水の注入開始ボタンがある。Visual suppression のボタンを押すと，VR 上に注視点が５秒間呈示される。緩徐相速度を自動計算し，時間軸上にプロットする。検査データは緩徐相速度のグラフで表示される（図７）。

日常診療の合間に温度刺激検査を行うのは，他の

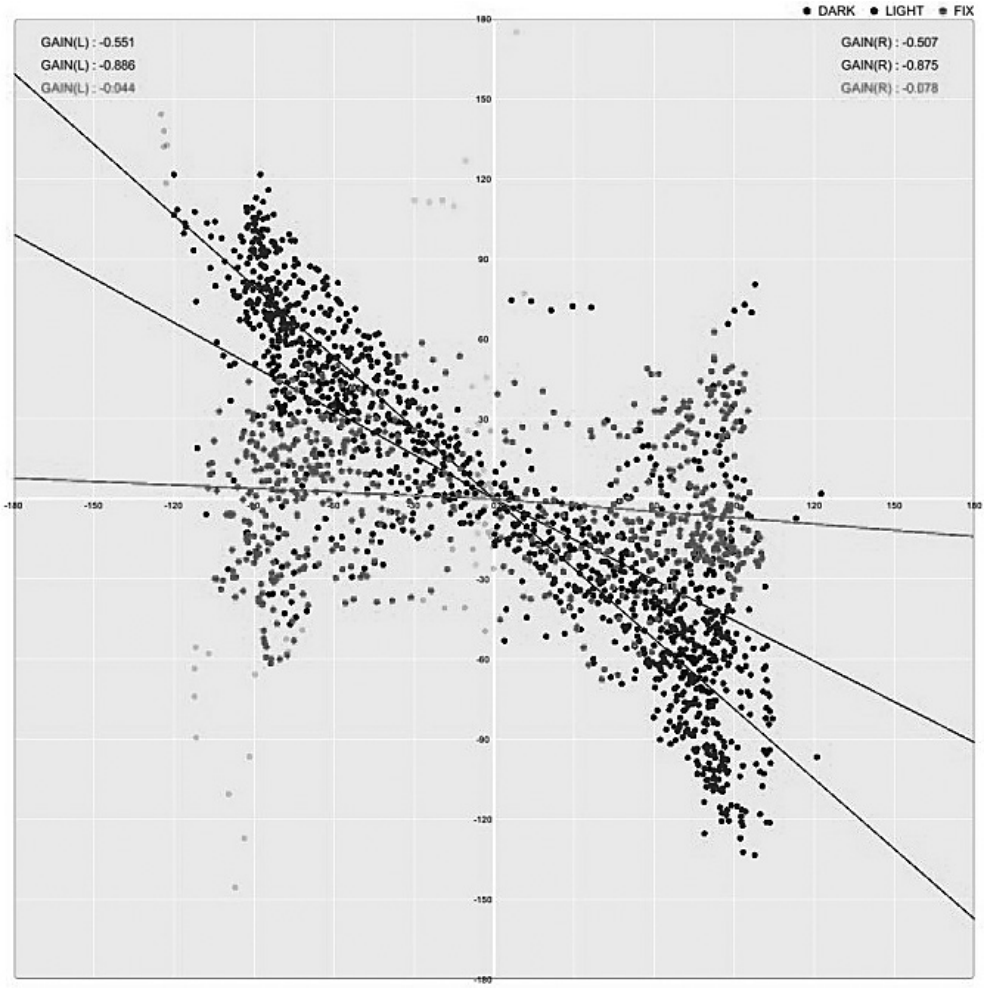

図８　VOR 検査

VR での視標提示は DARK（視標なし），LIGHT（空間固定注視視標），FIX（HMD 固定注視視標）の３種類の条件下での計測を行う。それぞれの VOR ゲインが重ねて表示される。

診療への時間的負荷が大きい。このため，温度刺激検査の代用として VOR 検査も組み込んでいる。頭部を左右に振る，もしくは回転する椅子に被検者を座らせて手動で検者が左右に振って計測を行う。頭部を振るタイミングは電子音（0.8秒間隔）で提示される。検査時間はそれぞれ10秒間で，VR 上に頭位の参考画像が－30～30度の頭振として表示される。VR での視標提示は DARK（視標なし），LIGHT（空間固定注視視標），FIX（HMD 固定注視視標）の３種類の条件下での計測を行う。それぞれの VOR ゲインが重ねて表示され出力される（図８）。ただし，温度刺激検査と頭振による VOR 検査は片側／両側刺激の違いだけでなく，刺激周波数や惹起される半規管内のリンパ流の性質の相違など，全く異なる検査であると認識しておく必要がある。

迷路瘻孔症状検査は注視視標なしの条件下で眼球運動を記録し，ポリッツェル球や指で外耳道を加圧した際の眼球運動変化を記録する。

キャリブレーションから頭位眼振検査までの一連の検査は連続して10分弱で行うことができる。被検者への指示はすべて音声と VR 上の文字の両方で提示される。

スタンダードモードでは，各検査における刺激映像やパラメータは初期値に固定されているが，同時に開発を行っているアドバンストモードではこれらは自由に設定できる。VR での視覚刺激のパラメー

タの設定に加えて，計測時間も任意に設定可能である。

考　察

本機器は診療所における眼球運動記録の促進を目的として開発した。従来のENG/VOGと比べて安価に提供が可能となるとともに，専門施設へのコンサルトを想定して匿名化データのサーバへの保存と共有を可能とした。wifi環境のある場合は，インターネットを介して機器の遠隔保守・更新など，電子機器にあまり詳しくないユーザーへのサポートやアップデートも可能となっている。また回旋眼位の計測の可能なFOVE 0®をベース機器として選択しており，将来的に回旋眼位をパラメータとして用いる新たな各種検査の実装・提供も可能であり，その開発も並行して進めている。その他，vHITの実装に向けての開発も進行中である。

現在VOGとして国内で販売されているものとしてはInteracoustics社製のものや第一医科株式会社／株式会社YOODS製のものがあるが，現時点でVRでの視標提示には対応していない。VRに対応したものとしてはパナソニックヘルスケア社製のものがあるが，サーバを介したデータ共有には対応していない。VRを利用した省スペース性は小規模の診療所等への普及に適したものであり，またデータ共有の機能により専門施設へのコンサルトが容易となるだけでなく，検査結果の解析サービスの提供なども可能となる。耳鼻咽喉科だけでなく内科や救急診療科など，眼球運動評価を専門としない施設での使用につながる可能性があり，急性期の眼振の記録が広がればより正確な診断へとつながる。

近年高齢者や慢性めまい症例に対する前庭リハビリテーションが注目されている[3)~9)]。その重要性については論を俟たないが，本邦ではまだ保険点数化されておらず，時間的にもこれを外来診療の合間に頻繁に行うのは難しい。また理学療法士等による前庭リハビリテーションもまだごく一部の施設でのみ行われているのが現状である。成書や外来で配布した指導用プリントなどを参照して自宅で行われていることが多いと思われるが，正確にできているかを確認するのは難しい。また，近年のCOVID-19によるパンデミックで，遠隔診療の必要性も広く認識されつつある。本機器は医療施設での検査機器としてだけでなく，自宅でのリハビリテーションとその効果の記録・解析による遠隔診療のプラットフォームとしても，きわめて魅力的なものである。基本となる計測性能が豊富であり，ソフトウェアの開発と実装によって新たな機能を追加することが容易であるため，今後様々な検査項目の追加や用途の拡張が期待できる。

文　献

1）Imaoka Y, Flury A, de Bruin ED: Assessing saccadic eye movements with head-mounted display virtual reality technology. Front Psychiatry 11: 572938, 2020

2）Lee Y, Kumar YS, Lee D, et al.: An extended method for saccadic eye movement measurements using a head-mounted display. Healthcare (Basel) 8: 104, 2020

3）Hall CD, Herdman SJ, Whitney SL, et al.: Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hypofunction : an updated clinical practice guideline from the academy of neurologic physical therapy of the American Physical Therapy Association. JNPT 2021 online ahead of print, doi: 10.1097/NPT.0000000000000382.

4）Tokle G, Morkved S, Brathen G, et al.: Efficacy of vestibular rehabilitation following acute vestibular neuritis: a randomized controlled trial. Otol Neurotol 41: 78-85, 2020

5）Meldrum D, Jahn K: Gaze stabilization exercises in vestibular rehabilitation: review of the evidence and recent clinical advances. J Neurol 266 (Suppl 1): 511-518, 2019

6）Dunlap PM, Holmberg JM, Whitney SL: Vestibular rehabilitation: advances in peripheral and central vestibular disorders. Curr Opin Neurol 32: 137-144, 2019

7）Viziano A, Micarelli A, Augimeri I, et al.: Long-term effects of vestibular rehabilitation and head-mounted gaming task procedure in unilateral vestibular hypofunction: a 12-month follow-up of a randomized controlled trial. Clin Rehab 33: 24-33, 2019

8）Crane BT, Schubert MC: An adaptive vestibular

rehabilitation technique. Laryngoscope 128: 713–718, 2018

9）Hall CD, Herdman SJ, Whitney SL, et al.: Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hypofunction: an evidence-based clinical practice guideline. JNPT 40: 124–154, 2016

本研究は，開発は発案含め株式会社 Parafeed で行い，それを東京医科歯科大学にて借用し助言をする形で施行している。
著者の水島豪太は株式会社 Parafeed の株式を５％以上保有している。