

201324071A

厚生労働科学研究費補助金
難治性疾患等克服研究事業（難治性疾患克服研究事業）

遺伝性不整脈疾患の遺伝子基盤に基づいた
病態解明と診断・治療法の開発に関する研究

平成25年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 清水 渉

平成26（2014）年5月

I. 総括研究報告

遺伝性不整脈疾患の遺伝子基盤に基づいた病態解明と診断・治療法の開発に関する研究

日本医科大学内科学（循環器内科学）教授

清水 渉・・・・・・・・・・1

II. 分担研究報告

1. 遺伝性不整脈における L 型カルシウムチャネル α サブユニットをコードする *CACNA1C* 遺伝子の関与

滋賀医科大学内科学講座（循環器・呼吸器）教授

堀江 稔・・・・・・・・・・15

2. 不整脈疾患の遺伝子基盤に基づいた病態解明と診断・治療法の開発に関する研究

筑波大学医学医療系 循環器内科 教授

青沼 和隆・・・・・・・・・・21

3. 家族性洞不全症候群の遺伝子基盤に関する研究

長崎大学大学院医歯薬学総合研究科 分子遺伝学 教授

蒔田 直昌・・・・・・・・・・29

4. QT 延長症候群における不整脈器質に関する高分解能心電図を用いた研究

東京女子医科大学 循環器内科 教授

萩原 誠久・・・・・・・・・・33

5. 遺伝性不整脈疾患の遺伝子解析とその応用

慶應義塾大学 循環器内科 教授

福田 恵一・・・・・・・・・・35

6. 遺伝性不整脈の臨床診断・臨床症状

鹿児島医療センター 小児科 部長

吉永 正夫・・・・・・・・・・37

7. 胎児・新生児期・乳児期に診断される先天性 QT 延長症候群の
遺伝子型と臨床的特徴に関する研究～特に機能的 2:1 房室ブロックを伴う
症例の治療の現況と予後～
筑波大学医学医療系小児 教授
堀米 仁志・・・47
8. カテコラミン誘発多形性心室頻拍の遺伝学的特徴・予後に関する検討
日本大学医学部 小児科学系 准教授
住友 直方・・・53
9. QT 延長症候群のエクソームシーケンス解析
東京医科歯科大学 疾患バイオリソースセンター 教授
田中 敏博・・・58
10. 遺伝性不整脈の変異と臨床リスクの関連についての検討
岡山大学大学院医歯薬学総合研究科
先端循環器治療講座 教授
森田 宏・・・59
11. QT 延長症候群 1 型スプライシング異常症例におけるヒト iPS 細胞由来分化
心筋細胞を用いた解析
京都大学大学院医学研究科 循環器内科学 助教
牧山 武・・・62
12. 新たな不整脈の原因遺伝子としての *SCN5A* プロモーター領域の役割
新潟大学医歯学総合病院 循環器内科 助教
渡部 裕・・・65
13. 先天性 QT 延長症候群診断基準改定版の有用性に関する検討
金沢大学大学院医薬保健研究域医学系
循環器内科学 助教
林 研至・・・67
14. 早期再分極症候群と Brugada 症候群の病態と長期予後に関する研究
国立循環器病研究センター 臨床検査部 部門長
鎌倉 史郎・・・69

15. 小児期発症遺伝性不整脈 — 新生児期 QT 延長症候群に関する研究 —	
国立循環器病研究センター 小児循環器部 部長	
白石 公	73
16. 遺伝性不整脈の遺伝子解析に関する研究	
国立循環器病研究センター 予防健診部 部長	
宮本 恵宏	75
17. 多施設登録研究による先天性 QT 延長症候群の日本人の臨床ならびに遺伝子型のエビデンス	
国立循環器病研究センター 心臓血管内科 医長	
相庭 武司	77
18. 遺伝性不整脈のゲノム広域解析アプローチによる原因探索に関する研究	
国立循環器病研究センター ゲノム遺伝子学 客員部長	
関根 章博	80
19. セマフォリン 3A 遺伝子変異と関連する特発性心室細動発症の分子病態メカニズムの解明	
広島大学医歯薬学総合研究科 循環器内科 助教	
中野由紀子	83
20. 家族歴を有する心房細動症例における心房細動の電気生理学的機序に関する研究	
日本医科大学内科学 (循環器内科学) 准教授	
宮内 靖史	86
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	87
IV. 研究成果の刊行物・別刷り	106

遺伝性不整脈疾患の遺伝子基盤に基づいた病態解明と診断・治療法の開発に関する研究

研究代表者 清水 渉 日本医科大学内科学（循環器内科学）教授

研究要旨

遺伝性不整脈疾患の病因は、心筋の活動電位を形成するイオンチャネルとこれに関連する細胞膜蛋白、調節蛋白などをコードする遺伝子上の変異による機能障害であり、原因遺伝子や遺伝子多様性を包括的に解析・データベース化し、これらの遺伝的基盤に基づいた病態解明や診断・治療法を選択、開発することは、心臓突然死を未然に予防、治療する上で大変重要な課題である。

本研究の第一の目的は、各遺伝性不整脈疾患の遺伝子診断を施行し、遺伝子型、遺伝子変異、多型などの遺伝情報と臨床情報との関連を詳細に検討し、遺伝子基盤に基づいた患者管理と治療法を開発することである。H25年度は、先天性QT延長症候群(LQTS)では、さらに症例を追加し、1123例のデータベースとなった。また、各分担研究者により他の遺伝性不整脈疾患でも症例登録を追加し、Brugada症候群500例、胎児・新生児期・小児期の先天性LQTS(乳児突然死症候群も含む)221例、進行性心臓伝導障害(PCCD)78例、家族性徐脈症候群73例、カテコラミン誘発性多形性心室頻拍(CPVT)80例、QT短縮症候群(SQTS)12例、早期再分極症候群(ERS)54例、特発性心室細動(IVF)83例、心房細動(AF)120例のデータベースとなった。

第二の目的は、同定された変異の機能解析を行い、これを臨床にフィードバックしリスク層別化と個別化治療に応用することである。その方法として、iPS細胞由来心筋細胞を用いた機能解析があり、H25年度は、先天性LQTS7例、Brugada症候群1例、先天性LQTS/Brugada合併1例、PCCD2例、CPVT2例、ERS2名の計15例の患者からiPS細胞を作製し、分化誘導した心筋細胞の機能解析を行い、不整脈発生機序を解明した。

第三の目的は、新たな原因遺伝子や遺伝的修飾因子の同定であり、H25年度は、家族集積性を認めるが変異が同定されていない先天性LQTS、Brugada症候群、PCCD、ERS患者を対象として、次世代シーケンサを用いた全エクソン(Exome)解析を施行し、新規の原因遺伝子候補が同定された。またBrugada症候群では、ゲノムワイド関連解析(GWAS)を施行し、新規の原因遺伝子候補としてSCN10AとHEY2を同定した。

研究分担者		先端循環器治療講座 教授
堀江 稔	滋賀医科大学内科学講座 (循環器・呼吸器) 教授	牧山 武 京都大学大学院医学研究科 循環器内科学 助教
青沼和隆	筑波大学医学医療系 循環器内科 教授	渡部 裕 新潟大学医歯学総合研究科 循環器内科 助教
蒔田直昌	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科 分子遺伝学 教授	林 研至 金沢大学大学院医薬保健研究域 医学系 循環器内科学 助教
萩原誠久	東京女子医科大学 循環器内科 教授	鎌倉史郎 国立循環器病研究センター 臨床検査部 部門長
福田恵一	慶應義塾大学 循環器内科 教授	白石 公 国立循環器病研究センター 小児循環器部 部長
吉永正夫	鹿児島医療センター 小児科 部長	宮本恵宏 国立循環器病研究センター 予防健診部 部長
堀米仁志	筑波大学医学医療系小児 教授	相庭武司 国立循環器病研究センター 心臓血管内科 医長
住友直方	日本大学医学部 小児科学系 准教授	
田中敏博	東京医科歯科大学 疾患バイオリソースセンター 教授	
森田 宏	岡山大学大学院医歯薬学総合研究科	

関根章博 国立循環器病研究センター
ゲノム遺伝子学 客員部長
中野由紀子 広島大学医歯薬学総合研究科
循環器内科 助教
宮内靖史 日本医科大学内科学(循環器内科学)
准教授

A. 研究目的

本研究の第一の目的は、これまで蓄積された各遺伝性不整脈疾患データベースに加えて、さらに新規患者登録と遺伝子診断を施行し、遺伝子型、遺伝子変異、多型などの遺伝情報と臨床情報との関連を詳細に検討し、遺伝子基盤に基づいた患者管理と治療法を開発することである。申請者の清水、堀江、蒔田、萩原、福田、吉永、森田、牧山、渡部、林らは、H18年以來、厚生労働科学研究費補助金による先天性QT延長症候群(LQTS)の登録研究(H18-ゲノム-一般-002: 主任研究者・清水、H23-難治-一般-088: 主任研究者・堀江)により、先天性LQTS患者の遺伝情報と臨床情報を含む世界的にみても最大規模のデータベースを有し、これまで国内外の多施設共同研究により遺伝子型あるいは遺伝子変異部位別のリスク階層化および特異的治療法の可能性について報告してきた(Shimizu & Horie, *Circ Res* 2011, Shimizu et al. *J Am Coll Cardiol* 2009)。また清水は、Brugada症候群の登録研究(H18-ゲノム-一般-002)で、遺伝情報を含むデータベースを有している。さらに鎌倉、青沼らはBrugada症候群の調査研究(H22-難治-一般-144: 主任研究者・青沼)から、日本人のBrugada症候群は欧米人とは異なる予後を示すことを報告してきた(Kamakura, et al, *Circulation arrhythmia electrophysiol* 2009)。また、蒔田、鎌倉、堀米、吉永らはこれまで難治性疾患克服研究事業の主任研究者として進行性心臓伝導障害(PCCD)、早期再分極症候群(ERS)、小児科領域の先天性LQTS患者の遺伝情報を含んだデータベースを蓄積し(H22-難治-一般-145: 主任研究者・蒔田、H23-難治-一般-114: 主任研究者・鎌倉、H22-難治-一般-053: 主任研究者・堀米)、その成果を報告してきた(Horigome, et al, *Circulation arrhythmia electrophysiol* 2010)。本研究班は、これらのデータ

ベースをオールジャパン体制で共有しさらに発展させていくものとして開始された。

第二の目的は、同定された変異の機能解析を行い、これを臨床にフィードバックしリスク層別化と個別化治療に応用することである。これには従来、培養細胞を用いて遺伝子変異、多型の電気生理学的機能解析を施行し病態解明を行う方法と、遺伝子組み換え動物を用いて各疾患モデルを作製し、致死性不整脈の発生機序を検討する方法があった。一方、2007年に山中伸弥教授によって発見されたiPS細胞を活用した難治性疾患研究が世界的に急速な勢いで進んでいる。各遺伝性不整脈疾患患者の皮膚線維芽細胞や血液細胞よりiPS細胞を樹立し、これを心筋細胞に分化誘導し、直接この心筋細胞の機能解析を行うことにより、患者ごとのテーラーメイド治療や新たな病態解明が可能となった。これまでに、分担研究者の福田との共同研究により、先天性LQTS、Brugada症候群などの患者からiPS細胞由来心筋細胞を作製し、その成果を報告してきたが(Egashira, et al, *Cardiovasc Res* 2012)、本研究ではさらにこれを積極的に推進していくことを目的とした。

第三の目的は、新たな原因遺伝子の同定や各疾患の発症に関与する遺伝的修飾因子の同定である。これには、家族集積性を認めるが変異が同定されていない各疾患について、次世代シーケンサを用いた網羅的全ゲノム解析や全エクソン(Exome)解析、あるいはゲノムワイド関連解析(GWAS)などの最新のアプローチを用いて解析する方法がある。すでに田中、関根、蒔田との共同研究により、既報の原因遺伝子に変異の同定されない先天性LQTS患者でExome解析を開始していたが、本研究では積極的にこれを推進していくことを目的とした。

B. 研究方法

・対象疾患

臨床的に診断の確定した、(1)先天性LQTS、(2)Brugada症候群(3)PCCD、(4)家族性徐脈症候群、(5)カテコラミン誘発性多形性心室頻拍(CPVT)、(6)QT短縮症候群(SQTS)、(7)ERS、(8)特発性心室細動(IVF)、(9)心房細動(AF)を対象とした。臨

床診断は、清水、堀江、青沼、蒔田、萩原、福田、吉永、堀米、住友、森田、牧山、渡部、林、鎌倉、白石、相庭、中野、宮内が担当した

・研究計画

1. 遺伝子変異、多型の同定

患者から遺伝子検索に関する十分な説明を行い書面でインフォームド・コンセントを得た後に、約10mlの末梢血を採取し遠心分離にかけ、白血球から遺伝子を採取した。これらの遺伝子に対し目的とする部位の遺伝子増幅(PCR)をかけ、コントロールとともにスクリーニングにかけた。スクリーニングにはWAVE解析装置(Transgenomic社)を利用した変性高速液体クロマトグラフィー(DHPLC法)を用いた。さらに異常バンドが認められた場合、遺伝子異常同定法(direct sequence法)を用いて、異常塩基の同定を行いアミノ酸の変化を確認した。家族の協力が得られる場合は家族の遺伝子変異の有無も検討し、臨床病態との関係を検討した。

2. 電気生理学的機能解析、疾患モデル、iPS細胞由来心筋細胞を用いた致死性不整脈の発生機序解明

遺伝子変異の機能解析には、Xenopus卵母細胞発現系による二電極膜電位固定法(K^+ チャンネル)、またはリポフェクタミンを用いたHEK297あるいはCHO細胞への発現系によるwhole-cellパッチクランプ法(K^+ チャンネル、 Na^+ チャンネル)を用いて行い、電位依存性活性化、不活性化、脱活性化などを変異型と正常(野生型)の細胞で比較実験を行った。また、薬剤に対するIC50を正常チャンネルと比較し、薬剤によるチャンネルキネティクスの変化などを検討した。機能解析は、清水、相庭、堀江、蒔田、萩原、牧山、渡部、林、中野が担当した。また、同定された遺伝子基盤を背景に、清水、相庭、堀江、蒔田、牧山、渡部、萩原らの施設ですでに確立している動脈灌流心室筋切片標本や、遺伝子改変マウスを用いた遺伝性不整脈モデルを作成し、光マッピングなどを用いて致死性不整脈の発生機序を詳細に検討した。また、福田、牧山は、先天性LQTS、Brugada症候群、PCCD、CPVT、ERS患者の皮膚線維芽細胞や血液細胞よりiPS細胞由来心筋細胞を作製し、

これを心筋細胞に分化誘導し、直接この心筋細胞の機能解析を行った。

3. 次世代シーケンサを用いた新たな原因遺伝子と遺伝的修飾因子の同定

家族集積性を認めるが変異が同定されていない遺伝性不整脈疾患の家系について、次世代シーケンサを用いた網羅的全エクソン(Exome)解析により塩基配列を同定し、(1)未知の原因遺伝子、ならびに(2)各疾患の発症に関与する遺伝的修飾因子を探索した。全エクソン・シーケンスでは、1症例から膨大な数の変異・SNPの存在する遺伝子を同定できる。その中から本症候群の発症に関与する遺伝子を同定するには、同じ不整脈症状を有する一家系の複数症例におけるシーケンスの結果を比較検討した(田中、関根、蒔田)。また、遺伝性不整脈疾患群と対照群でGWASを施行し、未知の原因遺伝子を探索した(関根)。

(倫理面への配慮)

本研究は、ヘルシンキ宣言(世界医師会)・ヒトゲノム・遺伝子解析研究に関する倫理指針(平成16年文部科学省・厚生労働省・経済通産省告示第1号)に準拠して実施した。また本研究は、申請者・共同研究者がそれぞれの施設の倫理委員会の承認を得て行った。本研究では、インフォームド・コンセントの得られた患者から末梢血を採取し、ゲノムDNAを抽出する。患者の血液・ゲノムDNAなどのサンプルは、氏名、生年月日、住所などの個人を特定できる情報を取り除き、代わりに患者識別番号でコード化によって、試料や情報の由来する個人を特定できなくする「匿名化」を行った。提供者と新たにつける符号との対応表は個別識別情報管理者が厳重に管理し、個人が特定できない状態で解析を行った。また、患者に遺伝子異常が確認された場合には、患者の同胞についても遺伝子検索をする必要があることがある。その場合にでも十分な説明と同意を得て遺伝子カウンセリングを行った。

本研究に関する以下の研究計画については、国立循環器病研究センター倫理委員会審査にていずれも承認を得ている。

1. 遺伝性不整脈疾患の病因解明のための遺伝子解析と日本国内多施設登録 (H21年10月2日承認)
2. 難治性不整脈患者からの iPS 細胞の樹立とそれをを用いた疾患解析に関する研究 (H21年10月2日承認)
3. 遺伝性不整脈疾患の病因解明のための遺伝子解析と日本国内多施設登録 研究計画変更 (H23年5月27日承認)

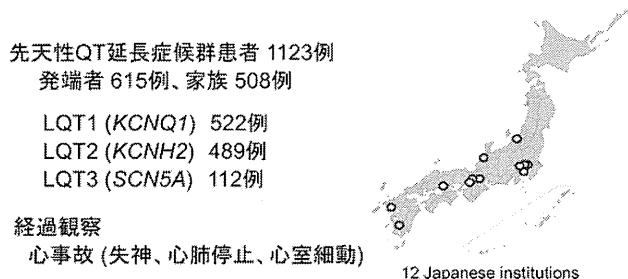
C. 研究成果

・研究班全体としての研究成果

1. 遺伝子変異、多型の同定と遺伝的基盤に基づいた病態解明や診断・治療法の開発

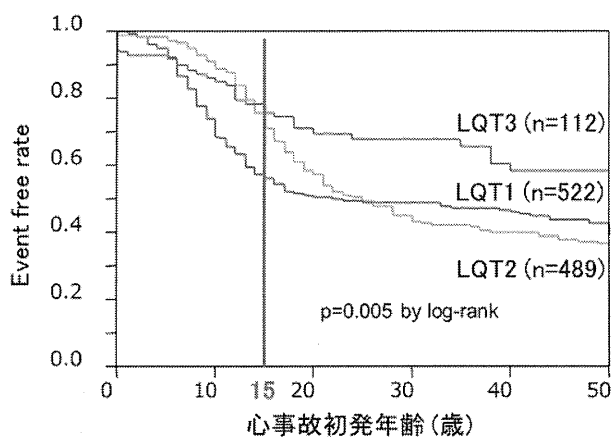
H25年度は、先天性LQTS患者では、さらに症例登録を追加し、1123例の世界的にも最大規模のデータベースとなった(図1)。

図1 厚生労働科学研究班 (2006~2013年)
Japanese Congenital LQTS Multicenter Registry



現在、遺伝子型あるいは遺伝子変異部位別のリスク階層化および最適な治療法について解析中である(清水、相庭、図2)。

図2 遺伝子型別の心事故初発年齢
- 厚生労働科学研究班 (2006~2013年) -



Brugada 症候群患者もさらに症例を追加し 500 例の登録数となり、SCN5A 変異の有無による重症度評

価・リスク階層化について解析中である(清水)。また、各分担研究者により他の遺伝性不整脈疾患でも症例登録を追加および開始し、胎児・新生児期・小児期の先天性 LQTS 患者(乳児突然死症候群も含む)221例(吉永、堀米、白石)、PCCD患者78例(蒔田)、家族性徐脈症候群患者73例(牧山、蒔田)、CPVT患者80例(住友)、SQTS患者12例(渡部、清水)、ERS患者54例(鎌倉、清水、渡部)、IVF患者83例(中野)、AF患者120例(林)のデータベースとなった。また、国内外の多施設共同研究により遺伝情報と臨床情報との関連を詳細に検討し、その成果を報告した(論文発表 3,5-7,11,12,14,16,18,27,29,34,45,49,57-59)。

以上の研究成果により、清水と堀江は、米国、欧州、アジアの3大陸の不整脈学会で合同作成する遺伝性不整脈の診断基準・治療のコンセンサスステートメント作成メンバーに選出された。清水は Brugada 症候群に関するコンセンサスステートメントを2013年5月10日に米国デンバーで開催された米国心調律学会(Heart Rhythm 2013)で発表し(学会発表 2)、またコンセンサスステートメントは3大陸の不整脈学会誌(Heart Rhythm、Europace、J of Arrhythmia)に掲載された(論文発表 8-10)。

さらに、清水、青沼、堀江、蒔田、萩原、吉永、堀米、住友、鎌倉は、班長・班員・協力員として、「日本循環器学会の「QT延長症候群(先天性・二次性)と Brugada 症候群の診療に関するガイドライン2013年度改訂版作成班」を作成し、2014年に公開予定である。

2. iPS 細胞由来心筋細胞を用いた致死性不整脈の病態解明と新しい治療法の開発

本研究の第二の目的は、同定された変異の機能解析を行い、これを臨床にフィードバックしリスク層別化と個別化治療に応用することである。その一つの方法として、iPS細胞を活用した難治性疾患研究が世界的に急速な勢いで進んでいる。本研究班では福田との共同研究により、すでに先天性LQTSなど遺伝性不整脈疾患患者からiPS細胞由来心筋細胞を作製し、その成果を報告してきた(Egashira, et al, Cardiovasc Res 2012)。H25年度は、先天性LQTS 7例、Brugada 症候群 1例、先天性LQTS/Brugada合

併 1 例、PCCD 2 例、CPVT 2 例、ERS 2 名の計 15 例の患者から iPS 細胞を作製した。さらに iPS 細胞から分化誘導した心筋細胞の機能解析を行い、不整脈発生機序を証明した (論文発表 31,44)。福田は 2 型先天性 LQTS 患者の iPS 細胞由来心筋細胞の機能解析を行った (論文発表 31)。また、牧山も CPVT 患者から iPS 細胞を作製し、分化誘導した心筋細胞の Ca 動態を解析しその成果を報告した (学会発表 21,51,52)。

本難治性疾患研究班は、H24 年度から文部科学省の再生医療実現化プロジェクト「疾患特異的 iPS 細胞を活用した難病研究」の共同研究拠点課題の一つである『iPS 細胞を用いた遺伝性心筋疾患の病態解明および治療法開発』(代表研究者・小室一成、遺伝性不整脈疾患担当分担研究者・福田)の協力研究機関に指定されており、同プロジェクトとの連携も取りながら活動した。

3. 新たな原因遺伝子と遺伝的修飾因子の同定

第三の目的は、新たな原因遺伝子や各疾患の発症に関与する遺伝的修飾因子の同定である。H25 年度は、田中、関根、蒔田との共同研究により、家族集積性を認めるが変異が同定されていない先天性 LQTS、Brugada 症候群、PCCD、ERS 患者において次世代シーケンサを用いた Exome 解析を施行した。この結果、PCCD の 2 家系で、原因遺伝子候補として結合織関連遺伝子 X,Y を同定した (蒔田) (論文発表 28)。遺伝子 Y では、刺激伝導系が緑色蛍光で光る *contactin2*-GFP 融合タンパクトランスジェニックマウスの心筋において、その発現局在を確認した。遺伝子 Y は胎生早期には心室筋全層に発現していたが、発育とともに次第に心内膜側に集中するようになり、生後は刺激伝導系に局在することが確認された。また、既報の原因遺伝子変異が同定されない先天性 LQTS 家系でも、新規の原因遺伝子候補が同定され、現在機能解析を施行し変異として妥当性を検討中である (関根、清水、相庭)。さらに、海外との Brugada 症候群における GWAS 共同研究で、新規の原因遺伝子候補として *SCN10A* と *HEY2* を同定した (論文発表 11)。

D. 考察

本研究の第一の目的である各遺伝性不整脈疾患の遺伝子変異・多型の同定と遺伝的基盤に基づいた病態解明、診断・治療法の開発については、H25 年度は、先天性 LQTS (胎児・新生児期・小児期を含む)、Brugada 症候群、PCCD、家族性徐脈症候群、CPVT、SQTS、ERS、IVF、AF 患者において、新規患者の遺伝子診断および多施設登録を行った。また国内外の多施設共同研究により遺伝情報と臨床情報との関連を検討し、その成果を報告した。特に先天性 LQTS のデータベースは、世界的にも最大規模のデータベースであり、今後も継続して症例登録を行い、日本人独自の遺伝的基盤に基づいた病態解明や診断・治療法の開発を進めていく必要があると考えられる。

第二の目的である致死性不整脈の病態解明と新しい治療法の開発については、H25 年度は、iPS 細胞を活用した研究に重点をおいて施行した。新たに遺伝性不整脈疾患患者 15 例の iPS 細胞由来心筋細胞を作製しその成果を報告した。本難治性疾患研究班は、文部科学省の再生医療実現化プロジェクト「疾患特異的 iPS 細胞を活用した難病研究」の共同研究拠点課題の一つである『iPS 細胞を用いた遺伝性心筋疾患の病態解明および治療法開発』の協力研究機関に指定されており、今後もこの文部科学省の再生医療実現化プロジェクトとの連携をとりつつ、中・長期的計画のもとに遺伝性不整脈疾患の iPS 細胞研究を進めていく。

第三の目的である新たな原因遺伝子と遺伝的修飾因子の同定については、次世代シーケンサを用いた Exome 解析と GWAS を施行した。Exome 解析により、PCCD 家系においては新規の原因遺伝子候補を同定した。また先天性 LQTS においても、原因遺伝子候補を同定し、その妥当性を検討中である。また、GWAS により、Brugada 症候群において、新規の原因遺伝子候補として *SCN10A* と *HEY2* を同定した。今後も引き続き Exome 解析あるいは全ゲノム解析、GWAS に特に重点を置き研究を進めていく。

E. 結論

各種遺伝性不整脈疾患の遺伝子診断を施行し、遺伝情報と臨床情報を含むデータベースを蓄積した。

先天性 LQTS 患者では 1123 例の世界的にも最大規模のデータベースとなった。その他の遺伝性不整脈疾患でも症例登録を追加した

先天性 LQTS、Brugada 症候群など遺伝性不整脈疾患患者から iPS 細胞由来心筋細胞を作製し、不整脈発生機序を証明した。

家族集積性を認めるが変異が同定されていない先天性 LQTS、Brugada 症候群、PCCD、ERS 患者を対象として、次世代シーケンサを用いた Exome 解析を施行し、新規の原因遺伝子候補が同定された。また、Brugada 症候群では、GWAS を施行し、新規の原因遺伝子候補として *SCN10A* と *HEY2* を同定した。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Shimizu W: Clinical features of Brugada syndrome. *J Arrhythmia* 29: 65-70, 2013
2. Shimizu W: Update of diagnosis and management in inherited cardiac arrhythmias. *Circ J* 77(12): 2867-2872, 2013
3. Nakashima K, Kusakawa I, Yamamoto T, Hirabayashi S, Hosoya R, Shimizu W, Sumitomo N. A left ventricular noncompaction in a patient with long QT syndrome caused by a *KCNQ1* mutation: a case report. *Heart Vessels* 28: 126-129, 2013
4. Iguchi K, Noda T, Kamakura S, Shimizu W: Beneficial effects of cilostazol in a patient with recurrent ventricular fibrillation associated with early repolarization syndrome. *Heart Rhythm* 10: 604-606, 2013
5. Watanabe H, Ohkubo K, Watanabe I, Matsuyama TA, Ishibashi-Ueda H, Yagihara N, Shimizu W, Horie M, Minamino T, Makita N: *SCN5A* mutation associated with ventricular fibrillation, early repolarization, and concealed myocardial abnormalities. *Int J Cardiol* 65: e21-e23, 2013
6. Mathias A, Moss AJ, Lopes CM, Barsheshet A,

McNitt S, Zareba W, Robinson JL, Locati EH, Ackerman MJ, Benhorin J, Kaufman ES, Platonov PG, Qi M, Shimizu W, Towbin JA, Michael Vincent G, Wilde AA, Zhang L, Goldenberg I: Prognostic implications of mutation specific QTc standard deviation in congenital long QT syndrome. *Heart Rhythm* 10: 720-725, 2013

7. Villafañe J, Atallah J, Gollob MH, Maury P, Wolpert C, Gebauer R, Watanabe H, Horie M, Anttonen O, Kannankeril P, Faulkner B, Bleiz J, Makiyama T, Shimizu W, Hamilton R, Young ML: Long-term follow-up of a pediatric cohort with short QT syndrome. *J Am Coll Cardiol* 61: 1183-1191, 2013
8. Priori SG, Wilde AA, Horie M, Cho Y, Behr ER, Berul C, Blom N, Brugada J, Chiang CE, Huikuri H, Kannankeril P, Krahn A, Leenhardt A, Moss A, Schwartz PJ, Shimizu W, Tomaselli G, Tracy C: HRS/EHRA/APHRs Expert Consensus Statement on the Diagnosis and Management of Patients with Inherited Primary Arrhythmia Syndromes: Document endorsed by HRS, EHRA, and APhRS in May 2013 and by ACCF, AHA, PACES, and AEPC in June 2013. *Heart Rhythm* 10(12): 1932-1963, 2013
9. Priori SG, Wilde AA, Horie M, Cho Y, Behr ER, Berul C, Blom N, Brugada J, Chiang CE, Huikuri H, Kannankeril P, Krahn A, Leenhardt A, Moss A, Schwartz PJ, Shimizu W, Tomaselli G, Tracy C: Executive summary: HRS/EHRA/APHRs expert consensus statement on the diagnosis and management of patients with inherited primary arrhythmia syndromes. *Europace* 15(10): 1389-1406, 2013
10. Priori SG, Wilde AA, Horie M, Cho Y, Behr ER, Berul C, Blom N, Brugada J, Chiang CE, Huikuri H, Kannankeril P, Krahn A, Leenhardt A, Moss A, Schwartz PJ, Shimizu W, Tomaselli G, Tracy C: Executive summary: HRS/EHRA/APHRs expert consensus statement on the diagnosis and management of patients with inherited primary arrhythmia syndromes. *J Arrhythmia*: September 6, doi: 10.1016/j.joa.2013.07.002 [E-pub ahead of

- print]
11. Bezzina CR, Barc J, Mizusawa Y, Remme CA, Gourraud JB, Simonet F, Verkerk AO, Schwartz PJ, Crotti L, Dagradi F, Guicheney P, Fressart V, Leenhardt A, Antzelevitch C, Bartkowiak S, Schulze-Bahr E, Zumhagen S, Behr ER, Bastiaenen R, Tfelt-Hansen J, Olesen MS, Kääh S, Beckmann BM, Weeke P, Watanabe H, Endo N, Minamino T, Horie M, Ohno S, Hasegawa K, Makita N, Nogami A, Shimizu W, Aiba T, Froguel P, Balkau B, Lantieri O, Torchio M, Wiese C, Weber D, Wolswinkel R, Coronel R, Boukens BJ, Bézieau S, Charpentier E, Chatel S, Despres A, Gros F, Kyndt F, Lecointe S, Lindenbaum P, Portero V, Violleau J, Gessler M, Tan HL, Roden DM, Christoffels VM, Le Marec H, Wilde AA, Probst V, Schott JJ, Dina C, Redon R: Common variants at SCN5A-SCN10A and HEY2 are associated with Brugada syndrome, a rare disease with high risk of sudden cardiac death. *Nat Genet* 45:1044-1049, 2013
 12. Duchatelet S, Crotti L, Peat RA, Denjoy I, Itoh H, Berthet M, Ohno S, Fressart V, Monti MC, Crocamao C, Pedrazzini M, Dagradi F, Vicentini A, Klug D, Brink PA, Goosen A, Swan H, Toivonen L, Lahtinen AM, Kontula K, Shimizu W, Horie M, George AL, Tréguoët DA, Guicheney P, Schwartz PJ: Identification of a KCNQ1 Polymorphism Acting as a Protective Modifier against Arrhythmic Risk in Long QT Syndrome. *Circ Cardiovasc Genet* 6(4): 354-361, 2013
 13. Kamakura T, Kawata H, Nakajima I, Yamada Y, Miyamoto K, Okamura H, Noda T, Satomi K, Aiba T, Takaki H, Aihara N, Kamakura S, Kimura T, Shimizu W: Significance of Non-Type 1 Anterior Early Repolarization in Patients with Inferolateral Early Repolarization Syndrome. *J Am Coll Cardiol* 62(17): 1610-1618, 2013
 14. Nakano Y, Chayama K, Ochi H, Toshishige M, Hayashida Y, Miki D, Hayes CN, Suzuki H, Tokuyama T, Oda N, Suenari K, Uchimura-Makita Y, Kajihara K, Sairaku A, Motoda C, Fujiwara M, Watanabe Y, Yoshida Y, Ohkubo K, Watanabe I, Nogami A, Hasegawa K, Watanabe H, Endo N, Aiba T, Shimizu W, Ohno S, Horie M, Arihiro K, Tashiro S, Makita N, Kihara Y: A nonsynonymous polymorphism in semaphorin 3A as a risk factor for human unexplained cardiac arrest with documented ventricular fibrillation. *PLoS Genet* 9(4): e1003364, 2013
 15. Kawata H, Morita H, Yamada Y, Noda T, Satomi K, Aiba T, Isobe M, Nagase S, Nakamura K, Fukushima Kusano K, Ito H, Kamakura S, Shimizu W: Prognostic significance of early repolarization in inferolateral leads in Brugada patients with documented ventricular fibrillation: A novel risk factor for Brugada syndrome with ventricular fibrillation. *Heart Rhythm* 10: 1161-1168, 2013
 16. Kawakami H, Aiba T, Yamada T, Okayama H, Kazatani Y, Konishi K, Nakajima I, Miyamoto K, Yamada Y, Okamura H, Noda T, Satomi K, Kamakura S, Makita N, Shimizu W: Variable phenotype expression with a frameshift mutation of the cardiac sodium channel gene SCN5A. *J Arrhythmia* 29: 291-295, 2013
 17. Yoshinaga M, Ushinohama H, Sato S, Tauchi N, Horigome H, Takahashi H, Sumitomo N, Kucho Y, Shiraishi H, Nomura Y, Shimizu W, Nagashima M: Electrocardiographic screening of 1-month-old infants for identifying prolonged QT intervals. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 6(5): 932-938; 2013
 18. Ohno S, Nagaoka I, Fukuyama M, Kimura H, Itoh H, Makiyama T, Shimizu A, Horie M: Age-dependent clinical and genetic characteristics in Japanese patients with arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy/ dysplasia. *Circ J* 77: 1534-1542, 2013
 19. Dochi K, Watanabe H, Kawamura M, Miyamoto A, Ozawa T, Nakazawa Y, Ashihara T, Ohno S, Hayashi H, Ito M, Sakazaki H, Kawata H, Ushinohama H, Kaszynski RH, Minamino T, Sumitomo N, Shimizu W, Horie: Flecainide reduces ventricular arrhythmias via a mechanism that differs from that of β -blockers

- in catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia. *J Arrhythmia* 29(5): 255-260, 2013
20. Wang Q, Ohno S, Kato K, Fukuyama M, Makiyama T, Kimura H, Naiki N, Kawamura M, Hayashi H, Horie M. Genetic Screening of KCNJ8 in Japanese Patients with J-wave Syndromes or Idiopathic Ventricular Fibrillation. *J Arrhythmia* 29: 261-264, 2013
 21. Horie M, Ohno S. Genetic basis of Brugada syndrome. *J Arrhythmia* 29: 71-76, 2013
 22. Hayashi H, Murakami Y, Horie M. Pitfall of the meta-analysis regarding early repolarization pattern. *J Am Coll Cardiol* 62: 86, 2013
 23. Murakoshi N, Aonuma K: Epidemiology of arrhythmias and sudden cardiac death in Asia. *Circ J* 77(10): 2419- 2431, 2013
 24. Hiraoka M, Takagi M, Yokoyama Y, Sekiguchi Y, Aihara N, Aonuma K: Japan Idiopathic Ventricular Fibrillation Study Investigators. Prognosis and risk stratification of young adults with Brugada syndrome. *J Electrocardiol* 6(4): 279-283, 2013
 25. Sekiguchi Y, Aonuma K, Takagi M, Aihara N, Yokoyama Y, Hiraoka M: Japan Idiopathic Ventricular Fibrillation Study (J-IVFS) Investigators. New clinical and electrocardiographic classification in patients with idiopathic ventricular fibrillation. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 24(8): 902-908, 2013.
 26. Doki K, Homma M, Kuga K, Aonuma K, Kohda Y. SCN5A promoter haplotype affects the therapeutic range for serum flecainide concentration in Asian patients. *Pharmacogenet Genomics*. 23(7): 349-354, 2013.
 27. Takagi M, Aonuma K, Sekiguchi Y, Yokoyama Y, Aihara N, Hiraoka M; Japan Idiopathic Ventricular Fibrillation Study (J-IVFS) Investigators. The prognostic value of early repolarization (J wave) and ST-segment morphology after J wave in Brugada syndrome: multicenter study in Japan. *Heart Rhythm*. 10(4): 533-539, 2013
 28. Makita N: Paradigm shifts in the genetics of inherited arrhythmias: Using next-generation sequencing technologies to uncover hidden etiologies. *J Arrhythmia* 29: 305-307, 2013
 29. Ishikawa T, Takahashi N, Ohno S, Sakurada H, Nakamura K, On YK, Park JE, Makiyama T, Horie M, Arimura T, Makita N, Kimura A: Novel SCN3B mutation associated with Brugada syndrome affects intracellular trafficking and function of Nav1.5. *Circ J* 77: 959-967, 2013
 30. Chen IP, Fukuda K, Fusaki N, Iida A, Hasegawa M, Lichtler A, Reichenberger EJ. Induced pluripotent stem cell reprogramming by integration-free sendai virus vectors from peripheral blood of patients with craniometaphyseal dysplasia. *Cell Reprogram*. 15(6): 503-513, 2013
 31. Okata S, Yuasa S, Yamane T, Furukawa T, Fukuda K. The generation of induced pluripotent stem cells from a patient with KCNH2 G603D, without LQT2 disease associated symptom. *J Med Dent Sci*. 60(1): 17-22, 2013
 32. Wada R, Muraoka N, Inagawa K, Yamakawa H, Miyamoto K, Sadahiro T, Umei T, Kaneda R, Suzuki T, Kamiya K, Tohyama S, Yuasa S, Kokaji K, Aeba R, Yozu R, Yamagishi H, Kitamura T, Fukuda K, Ieda M. Induction of human cardiomyocyte-like cells from fibroblasts by defined factors. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 110(31): 12667-12672, 2013.
 33. Egashira T, Yuasa S, Fukuda K. Novel insights into disease modeling using induced pluripotent stem cells. *Biol Pharm Bull*. 36(2): 182-188, 2013
 34. Yoshikane Y, Yoshinaga M, Hamamoto K, Hirose S: A case of long QT syndrome with triple gene abnormalities: Digenic mutations in KCNH2 and SCN5A and gene variant in KCNE1. *Heart Rhythm* 10:600-603, 2013
 35. Ninomiya Y, Yoshinaga M, Kucho Y, Tanaka Y: Risk factors for symptoms in long QT syndrome in a single pediatric center. *Peadiatr Int* 55:277-282, 2013
 36. Yoshinaga M: Prevalence of sudden death and out-of-hospital cardiac arrest in infants, children, and adolescents; what does it imply? *Circ J* 77; 2475-2476, 2013

37. Cuneo BF, Etheridge SP, Horigome H, Sallee D, Moon-Grady A, Weng HY, Ackerman MJ, Benson DW: Arrhythmia phenotype during fetal life suggests long-QT syndrome genotype: Risk stratification of perinatal long-QT syndrome. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 6(5): 946-951, 2013
38. Cuneo BF, Strasburger JF, Yu S, Horigome H, Hosono T, Kandori A, Wakai RT: In utero diagnosis of long QT syndrome by magnetocardiography. *Circulation.* 128(20): 2183-2191, 2013
39. Roden D, Behr ER, Ritchie MD, Tanaka T, Kääh S, Crawford DC, Nicoletti P, Floratos A, Sinner MF, Kannankeril PJ, AA. M. Wilde, Bezzina CR, Schulze-Bahr E, Zumhagen S, Guicheney P, Bishopric NH, Marshall V, Shakir S, Dalageorgou C, Bevan S, Jamshidi Y, Bastiaenen R, Myerberg RJ, Schott J-J, Camm AJ, Steinbeck G, Norris K, Altman RB, Tatonetti N, Jeffery S, Kubo M, Nakamura Y, Shen Y, George, Jr. AL: Genome wide analysis of drug-induced Torsades de Pointes: lack of common variants with large effect sizes. *PLoSOne* 13:08180R2, 2013
40. Morita H, Zipes DP, Wu J. Experimental Mechanisms of Arrhythmias in Brugada Syndrome. in Wu J and Wu J (ed): Sudden Death: Causes, Risk Factors and Prevention. pp 39-59, Nova Science Publishers, NY. 2013
41. Wada T, Morita H. Clinical outcome and risk stratification in Brugada syndrome. *J Arrhythmia* 29:100-109, 2013
42. Morita H. Ion channel complex disease in long QT syndrome. *Heart Rhythm* 10: 738-739, 2013
43. Kato K, Makiyama T, Wu J, Ding WG, Kimura H, Naiki N, Ohno S, Itoh H, Nakanishi T, Matsuura H, Horie M: Cardiac channelopathies associated with infantile fatal ventricular arrhythmias: From the cradle to the bench. *J Cardiovasc Electrophysiol* 25(1): 66-73, 2014
44. Kamakura T, Makiyama T, Sasaki K, Yoshida Y, Wuriyanghai Y, Chen J, Hattori T, Ohno S, Kita T, Horie M, Yamanaka S, Kimura T. Ultrastructural maturation of human-induced pluripotent stem cell-derived cardiomyocytes in a long-term culture. *Circ J* 77(5): 1307-1314, 2013
45. Nakajima S, Makiyama T, Hanazawa K, Kaitani K, Amano M, Hayama Y, Onishi N, Tamaki Y, Miyake M, Tamura T, Kondo H, Motooka M, Izumi C, Nakagawa Y, Horie M: A novel SCN5A mutation demonstrating a variety of clinical phenotypes in familial sick sinus syndrome. *Intern Med* 52(16): 1805-1808, 2013
46. Watanabe H, van der Werf C, Roses-Noguer F, Adler A, Sumitomo N, Veltmann C, Rosso R, Bhuiyan ZA, Bikker H, Kannankeril PJ, Horie M, Minamino T, Viskin S, Knollmann BC, Till J, Wilde AA. Effects of flecainide on exercise-induced ventricular arrhythmias and recurrences in genotype-negative patients with catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia. *Heart Rhythm* 10: 542-547, 2013
47. Watanabe H, Minamino T. Role of mutations in I-type calcium channel genes in brugada syndrome, early repolarization syndrome, and idiopathic ventricular fibrillation associated with right bundle branch block. *Circ J* 77: 1689-1690, 2013
48. Watanabe H, Minamino T. Similarities and differences of clinical characteristics between brugada syndrome and early repolarization syndrome. *Journal of Arrhythmia* 29: 134-137, 2013
49. Liu L, Hayashi K, Kaneda T, Ino H, Fujino N, Uchiyama K, Konno T, Tsuda T, Yamagishi M, Kawashiri MA, Ueda K, Higashikata T, Shuai W, Kupersmidt S, Higashida H, Yamagishi M: A novel mutation in the transmembrane nonpore region of the KCNH2 gene causes severe clinical manifestations of long QT syndrome. *Heart Rhythm* 10: 61-67, 2013
50. Kamakura S: Epidemiology of Brugada syndrome in Japan and rest of the world. *J Arrhythmia* 29: 52-55, 2013
51. Kamakura S: Two decades of progress in the understanding of Brugada syndrome. *J Arrhythmia* 29: 51, 2013

52. Hotta K, Kitamoto A, Kitamoto T, Mizusawa S, Teranishi H, So R, Matsuo T., Nakata Y, Hyogo H, Ochi H, Nakamura T, Kamohara S, Miyatake N, Kotani K, Itoh N, Mineo I, Wada J, Yoneda M, Nakajima A, Funahashi T, Miyazaki S, Tokunaga K, Masuzaki H, Ueno T, Chayama K, Hamaguchi K, Yamada K, Hanafusa T, Oikawa S, Sakata T, Tanaka K, Matsuzawa Y, Nakao K, Sekine A: Replication study of 15 recently published Loci for body fat distribution in the Japanese population. *J Atheroscler Thromb* 20: 336-350, 2013
53. 清水 渉: 5. 循環器系の疾患. 5.4 循環器疾患と遺伝子異常. 3) 遺伝性不整脈. (分担), 朝倉『内科学』(矢崎義雄総編集): p.424-428, 朝倉書店, 2013
54. Shimizu W: Editorial comment. Importance of clinical analysis in this era of new technology of molecular genetic screening. *J Am Coll Cardiol* 2014 (in press)
55. Shimizu W, Ackerman MJ: Chapter 50, Provocative (drug) testing in inherited arrhythmias. in Gussak I, Antzelevitch C, Wilde A, Powell B, Ackerman MJ, Shen WK (eds): *Electrical Diseases of the Heart (Second edition): Genetics, Mechanisms, Treatment, Prevention, Part IV. Clinical rhythmology: Diagnostic methods and tools*, p. -, Springer, Oxford, UK, 2014 (in press)
56. Shimizu W: Chapter 40, Acquired form of Brugada syndrome. in Gussak I, Antzelevitch C, Wilde A, Powell B, Ackerman MJ, Shen WK (eds): *Electrical Diseases of the Heart (Second edition): Genetics, Mechanisms, Treatment, Prevention, Part III. Secondary Hereditary and Acquired Cardiac Channelopathies, and Sudden Cardiac Death*, p. -, Springer, UK, Oxford, 2014 (in press)
57. Yoshinaga M, Kucho Y, Sarantuya J, Ninomiya Y, Horigome H, Ushinohama H, Shimizu W, Horie M: Genetic characteristics of children and adolescents with long-QT syndrome diagnosed by school-based electrocardiographic screening programs. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 7(1): 107-112, 2014
58. Kokunai Y, Nakata T, Furuta M, Sakata S, Kimura H, Aiba T, Yoshinaga M, Osaki Y, Nakamori M, Itoh H, Sato T, Kubota T, Kadota K, Shindo K, Mochizuki H, Shimizu W, Horie M, Okamura Y, Ohno K, Takahashi MP: A Kir3.4 mutation causes Andersen-Tawil syndrome by an inhibitory effect on Kir2.1. *Neurology* 82(3): 1058-1064, 2014
59. Bando S, Soeki T, Matsuura T, Niki T, Ise T, Yamaguchi K, Taketani Y, Iwase T, Yamada H, Wakatsuki T, Akaike M, Aiba T, Shimizu W, Sata M: Congenital long QT syndrome with compound mutations in the KCNH2 gene. *Heart Vessels* 2014 (in press)
60. Wu J, Naiki N, Ding WG, Ohno S, Kato K, Zang WJ, Delisle BP, Matsuura H, Horie M. A molecular mechanism for adrenergic-induced long QT Syndrome. *J Am Coll Cardiol* 2014 (in press)
61. Lubitz SA, Lunetta KL, Lin H, Arking DE, Trompet S, Li G, Krijthe BP, Chasman DI, Barnard J, Kleber ME, Dörr M, Ozaki K, Smith AV, Müller M, Walter S, Agarwal SK, Bis JC, Brody JA, Chen LY, Everett BM, Ford I, Franco OH, Harris TB, Hofman A, Kääh S, Mahida S, Kathiresan S, Kubo M, Launer LJ, MacFarlane PW, Magnani JW, McKnight B, McManus DD, Peters A, Psaty BM, Rose LM, Rotter JI, Silbernagel G, Smith JD, Sotoodehnia N, Stott DJ, Taylor K, Tomaschitz A, Tsunoda T, Uitterlinden AG, VanWagoner DR, Völker U, Völzke H, Murabito JM, Sinner MF, Gudnason V, Felix SB, März W, Chung M, Albert CM, Stricker BH, Tanaka T, Heckbert SR, Jukema JW, Alonso A, Benjamin EJ, Ellinor PT: Novel Genetic Markers Associate with Atrial Fibrillation Risk in Europeans and Japanese. *J Am Coll Cardiol* 2014 (in press)
62. Nakagawa K, Nagase S, Morita H, Ito H. Left ventricular epicardial electrogram recordings in idiopathic ventricular fibrillation with inferior and lateral early repolarization. *Heart Rhythm* 2014 (in press)
63. Kawashiri MA, Hayashi K, Konno T, Fujino N, Ino H, Yamagishi M: Current perspectives in genetic cardiovascular disorders: from basic to clinical

- aspects. Heart Vessels. 2014 (in press)
64. 清水 渉: QT延長症候群 (分担), 『今日の治療指針』2014年版 (山口 徹、北原光夫、福井次矢編集): p.374-375, 医学書院, 2014
 65. 清水 渉: X 不整脈. 11. QT延長症候群. (分担), 循環器疾患最新の治療2014-2015 (堀 正二、永井良三編集): p. 305-308, 南江堂, 2014
2. 学会発表
 1. Shimizu W: Genetic Mutation of Brugada Syndrome. In relation to Early Repolarization Syndrome. HRS-JHRS Joint Session. Revisit of Brugada Syndrome: From Basic Mechanism to Catheter Ablation. Heart Rhythm Society 2013. Denver, USA. 2013. 5. 9.
 2. Shimizu W: Recommendations on the Diagnosis and Management of Brugada Syndrome. Special Session. The 2013 Expert Consensus Statement on the Diagnosis and Management of Inherited Arrhythmias. Heart Rhythm Society 2013. Denver, USA. 2013. 5. 10.
 3. Shimizu W: Let's discuss my most difficult clinical case. EHRA Europace 2013. Athens, Greece, 2013. 6. 23.
 4. Shimizu W: Brugada syndrome. Sudden Cardiac Death Session 2 Reduction of SCD in Inherited Cardiac Disorders. 6th APHRS CARDIO RHYTHM 2013, Hong Kong, China, 2013. 10. 4.
 5. Adler A, Olde Nordkamp L, Crotti L, Schwartz P, Castelletti S, Rudic B, Schimpf R, Veltmann C, Shimizu W, Antzelevitch C, Belhassen B, Tan H, Wide A, Viskin S: Empiric quinidine for asymptomatic Brugada syndrome-preliminary result of an international registry. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, Colorado, USA, 2013.5.8.
 6. Sumitomo N, Shimizu W, Aragaki Y, Horigome H, Aonuma K, Sakurada H, Watanabe H, Nishizaki M, Kamakura S, Hiraoka M: Advancement of treatment in catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia –multicenter study in Japan. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, Colorado, USA, 2013.5.8.
 7. Funasako M, Nakajima I, Miyamoto K, Yamada Y, Okamura H, Noda T, Satomi K, Aiba T, Kamakura S, Anzai T, Isihara M, Yasuda S, Ogawa H, Miyamoto Y, Shimizu W: Diagnostic value of mexiletine infusion test for detecting type3 congenital long QT syndrome (LQT3). The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, Colorado, USA, 2013.5.8.
 8. Kawakami H, Aiba T, Okayama H, Kazatani Y, Nakajima I, Miyamoto K, Yamada Y, Okamura H, Noda T, Satomi K, Kamakura S, Makita N, Shimizu W: Variable expressivity of phenotype in the V1764FSX1786 mutation of cardiac sodium channel SCN5A. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, Colorado, USA, 2013.5.8.
 9. Ohno S, Hasegawa K, Makiyama T, Doi S, Horie M: Different regulation of IKs channels by two KCNE1 C-terminus variants predicts the QTc response to the exercise stress. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, USA. 2013. 5. 8-11.
 10. Horigome H, Kato Y, Yoshinaga M, Sumitomo N, Ushinohama H, Iwamoto M, Takahashi K, Shiono J, Tauchi N, Izumida N, Nagashima M: A nationwide questionnaire survey on clinical characteristics and genetic background of congenital long-QT syndrome diagnosed in fetal and neonatal life. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, USA. 2013. 5. 10.
 11. Morita H, Wada T, Miyaji K, Nakagawa K, Tanaka M, Nishii N, Nagase S, Nakamura K, Kusano K, Ito H: Fever not only unmasks Brugada-type ECG but also exaggerates depolarization abnormality. The Heart Rhythm Society's 34th Annual Scientific Sessions 2013, Denver, USA. 2013. 5. 9.
 12. Ohno S, Omura M, Kawamura M, Kimura H, Itoh H, Makiyama T, Ushinohama H, Makita N, Horie M: Exon-3 deletion of RyR2 encoding cardiac ryanodine

- receptor related to left ventricular non-compaction (LVNC) with ventricular arrhythmia and bradycardia. EHRA Europace 2013. Athens, Greece. 2013.6. 23-26.
13. Ohno S, Fukuyama M, Itoh H, Makiyama T, Horie M: Copy number variation in KCNQ1 gene were frequently identified in the pediatric patients of long QT syndrome and caused exercise related QT prolongation. ESC Congress 2013. Amsterdam, The Netherlands. 2013. 8. 31-9. 4.
 14. Yoshinaga M, Kucho Y, Sarantuya J, Ninomiya Y, Horigome H, Ushinohama H, Shimizu W: Genetic characteristics of children and adolescents with long QT syndrome diagnosed by school-based electrocardiographic screening programs. ESC Congress 2013, Amsterdam, The Netherlands. 2013. 9. 1.
 15. Horie M: Genetic Testing in ARVC. Genetic and Inherited Syndrome 1-Update on Clinical Applications of Genetic Testing. 6th APHRS & CardioRhythm 2013. Hong Kong, China. 2013. 10. 3-6.
 16. Kamakura T, Ishibashi K, Nakajima I, Miyamoto K, Yamada Y, Okamura H, Noda T, Satomi K, Aiba T, Shimizu W, Takaki H, Anzai T, Ishihara M, Yasuda S, Ogawa H, Kamakura S, Kusano K: Clinical aspects and prognosis of elderly patients with Brugada syndrome. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013.11.20
 17. Iwakami N, Aiba T, Kamakura S, Takaki H, Ishibashi K, Nakajima I, Yamada Y, Miyamoto K, Okamura H, Noda T, Satomi K, Kusano K, Shimizu W, Sugimachi M: Noninvasive evaluation of benign and malignant early repolarization with a new concept of late potentials in the high resolution magnetocardiography. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013.11.19
 18. Hasegawa K, Watanabe H, Ohno S, Itoh H, Makiyama T, Ashihara T, Hayashi H, Horie M: The High Prevalence of Early Repolarization in Genotyped Long QT Syndrome. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013.11.16-20
 19. Yoshinaga M. ECG screening program for prevention of sudden cardiac death: Benefits, Risks, and Costs. The Japanese experience. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013. 11. 20.
 20. Ayusawa M, Sumitomo N: Risk index of sudden death by long QT syndrome and Wolff-Parkinson-White syndrome in school, Resuscitation Science Symposium 2013, American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013. 11. 17.
 21. Sasaki K, Makiyama T: Modeling catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia using human induced pluripotent stem cells: A promising tool for drug discovery. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013. 11. 16-20.
 22. Haayshi K, Fujino N, Konno T, Tsuda T, Imi (Hashida) Y, Saito T, Ohta K, Ino, H, Kawashiri M, Yamagishi M: Impact of new LQTS diagnostic criteria on detection of long QT syndrome with carrying gene mutations. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013. 11. 16-20.
 23. Nakano Y: Nonsynonymous polymorphism in Semaphorin 3A as a risk factor for human unexplained cardiac arrest with documented ventricular fibrillation. American Heart Association (AHA), Dallas, Texas, USA, 2013.11. 18.
 24. 清水 渉: Genotype-Phenotype Correlation in Inherited Cardiac Arrhythmias from Japanese Multicenter Registry of Congenital Long QT Syndrome and Brugada Syndrome. Meet the Expert 2 「ゲノム研究最前線：循環器領域でのオーダーメイド医療は可能か?」 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜), 2013. 3. 15. Circulation Journal 77 (Suppl I), 2013.
 25. 清水 渉: Drug-Induced Lethal Ventricular Tachyarrhythmias – Acquired Form of Congenital Long QT Syndrome and Brugada Syndrome. Morning Lecture 08 「薬剤性不整脈の診断と対処」 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜), 2013. 3. 16. Circulation Journal 77 (Suppl I), 2013.
 26. 清水 渉: Role of Provocative Testing in Inherited

- Cardiac Arrhythmia Syndromes - Congenital Long QT Syndrome and Brugada Syndrome -. Meet the Expert 12 「非侵襲的検査による心臓突然死予測」第77回日本循環器学会学術集会 (横浜), 2013. 3. 15. *Circulation Journal* 77 (Suppl I), 2013.
27. 清水 渉: 心房細動治療としてのβ遮断薬療法 循環器疾患治療におけるβ遮断薬の位置づけ ファイアーサイド: 第61回日本心臓病学会学術集会 (熊本) 2013. 9. 21
 28. 清水 渉: 遺伝性不整脈の遺伝子検査の進歩 循環器領域における遺伝子検査と看護 日本循環器学会共催セッション: 第10回日本循環器看護学会学術集会 (東京) 2013. 9. 29
 29. 清水 渉: 心房細動治療としてのβ遮断薬療法 ランチョンセミナー 第30回日本心電学会学術集会 (青森), 2013. 10. 11.
 30. 清水 渉: 心房細動治療における抗凝固療法-抗凝固薬の使い分け- ランチョンセミナー 第50回記念日本臨床生理学会総会 (東京) 2013. 11. 9.
 31. Hasegawa K, Ohno S, Itoh H, Hattori T, Makiyama T, Toyoda F, Ding WG, Chinushi M, Matsuura H, Horie M: A Novel KCNQ1 missense mutation identified in a patient with juvenile-onset atrial fibrillation causes constitutive open IKs channel. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013.3.15-17.
 32. Horie M, Ohno S, Itoh H, Hayashi H, Kimura H, Hattori T, Kawamura M, Naiki N, Dochi K, Hasegawa K, Makiyama T: Genetic and acquired background of fatal arrhythmias. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013.3.15-17.
 33. Wang Q, Ohno S, Miyamoto A, Itoh H, Ding WG, Wu Jie, Kimura H, Makiyama T, Matsuura H, Horie M: Gain of function in IKr channels caused by three novel KCNH2 mutations which were identified in patients with Brugada-like ECG. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013.3.15-17.
 34. Kato K, Makiyama T, Kimura H, Naiki N, Itoh H, Ohno S, Horie M: Sick sinus syndrome prevalence in Japanese sodium channelopathy. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013.3.15-17.
 35. Sekiguchi Y, Takagi M, Aihara N, Yokoyama Y, Aonuma K, Hiraoka M: New mechanism of ventricular arrhythmias in the patients with idiopathic ventricular fibrillation; from the J-IVFS database. 第77回日本循環器学会学術集会(横浜), 2013. 3. 15.
 36. Kaneshiro T, Kato Y, Sekiguchi Y, Tada H, Nogami A, Goya M, Takagi M, Horigome H, Aonuma K: Prognostic effects of catheter ablation targeting the triggering arrhythmia in inherited catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia and Brugada syndrome. 第77回日本循環器学会学術集会(横浜), 2013. 3. 15.
 37. 蒔田直昌. 第18回日本小児心電学会特別講演「致死性不整脈の遺伝子基盤に関する新展開」(宮崎) 2013. 11. 30
 38. 福田恵一. 山田和生招聘講演: iPS細胞およびGWAS研究から見えてくる遺伝性QT延長症候群を巡る諸問題の現状と将来展望. 第30回日本心電学会学術集会. (弘前) 2013. 10. 11.
 39. 吉永正夫、九町木綿、牛ノ濱大也、堀米仁志、清水 渉、堀江 稔. 学校心臓検診で抽出されたQT延長症候群患児の遺伝学的特徴. 第61回日本心臓病学会学術集会 (熊本) 2013. 9. 22.
 40. 吉永正夫、佐藤誠一、牛ノ濱大也、住友直方、堀米仁志、岩本眞理、田内宣生、長嶋正實. 心臓検診で抽出されるQT延長症候群 (LQTS) 患児の症状出現予測に関する研究. 第30回日本心電学会学術集会 (弘前) 2013. 10. 12.
 41. 加藤 愛章, 高橋 実穂, 林立申, 中村 昭宏, 石川 伸行, 今川 和生, 野崎 良寛, 関口 幸夫, 青沼 和隆, 堀米 仁志: カテコラミン誘発多形性心室頻拍に対する非薬物治療. 第49回日本小児循環器学会総会・学術集会 (東京) 2013. 7. 11.
 42. 二宮由美子、九町木綿、田中裕治、吉永正夫、岩本眞理、牛ノ濱大也、住友直方、堀米仁志、長嶋正實: 学校心臓検診で抽出されたQT延長症候群の遺伝学的特徴の検討、シンポジウム I Chanelopathyの管理-そのエビデンス、第49回日本小児循環器学会 (東京) 2013. 7. 12.
 43. Harrell DT, Tominaga I, Abe K, Watabe T, Oginosawa Y, Okishige K, Abe H, Sumitomo N, Uno K, Takano M, Makita N: Clinical and genetic characteristics of

- short QT syndrome in Japan. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜), 2013. 3. 16.
44. 牛ノ濱大也、石川友一、中村 真、佐川浩一、石川央朗、住友直方: Catecholaminergic-induced VT(CPVVT)に対する新しい薬物治療. 第49回日本小児循環器学会 (東京) 2013. 7. 12.
45. 小森暁子、住友直方、加藤雅崇、趙 麻未、渡辺拓史、大熊洋美、阿部百合子、市川理恵、福原淳示、松村昌治、神山 浩、鮎沢 衛、高橋昌里: 当院管理中のQT延長症候群の特徴. 第30回日本心電学会 (青森) 2013. 10. 12.
46. 森田 宏. Back to the history -Importance of family history of sudden death in Brugada syndrome-. シンポジウム5 「New Insights: from Diagnosis to Treatment in Patients with Ventricular Fibrillation without Structural Heart Disease」第28回日本不整脈学会学術大会 (東京)、2013. 7.5.
47. Wada T, Morita H, Kubo M, Nakagawa J, Tanaka M, Nishii N, Nagase N, Nakamura K, Kono K, Kusano K, Ito H. The Investigation about the Indication of Implantable Cardioverter Defibrillator Implantation in Patients with Brugada Syndrome for Primary Prevention. シンポジウム7 「Novel Strategy: Dealing with Sudden Cardiac Death」. 第28回日本不整脈学会学術大会 (東京) 2013. 7. 6.
48. Morita H, Miyaji K, Take Y, Nakagawa K, Tanaka M, Nishii N, Nagase S, Kusano K, Ito H. Fever Not Only Unmasks Brugada-Type ECG but Also Exaggerates Depolarization Parameters. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013.3.17.
49. Tokioka K, Kusano K, Morita H, Miyoshi T, Nishii N, Hashimoto K, Nagase S, Nakamura K, Kohno K, Itoh H. Depolarization and Repolarization Abnormalities are Independently Associated with Ventricular Fibrillation Episodes in Brugada Syndrome. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013. 3. 17.
50. 牧山 武: Disease Modeling in Human Induced Pluripotent Stem Cells -Catecholaminergic Polymorphic Ventricular Tachycardia-, 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 3.15-17, 2013
51. 佐々木健一, 牧山 武: O Ca²⁺ Imaging of cardiomyocytes differentiated from human induced pluripotent stem cells in catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia, 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 3. 15-17, 2013
52. 佐々木健一, 牧山 武: One year assessment of ion channel gene expression in cardiomyocytes derived from human induced pluripotent stem cells, 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 3. 15-17, 2013
53. Yimin W, 牧山 武: Identification of cardiomyocytes derived from human induced pluripotent stem cells using a cardiac specific lentiviral vector, 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 3. 15-17, 2013
54. 牧山 武: iPS細胞由来の不整脈疾患モデル心筋細胞. 学術委員会指定トピックス「iPS細胞の臨床応用—現状と展望—」第30回日本心電学会学術集会(弘前), 10. 11-13, 2013
55. 渡部 裕: Variants in SCN5A promoter and regulatory regions associated with various arrhythmias. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013. 3. 15.
56. 中野由紀子: 1141-3C>A Polymorphism is linked to H558R polymorphism: Genetic modulators of Brugada syndrome. 第77回日本循環器学会学術集会 (横浜) 2013. 3. 17.
- H. 知的財産権の出願・登録情報 (予定を含む)
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし

遺伝性不整脈における L 型カルシウムチャネル α サブユニットをコードする *CACNA1C* 遺伝子の関与

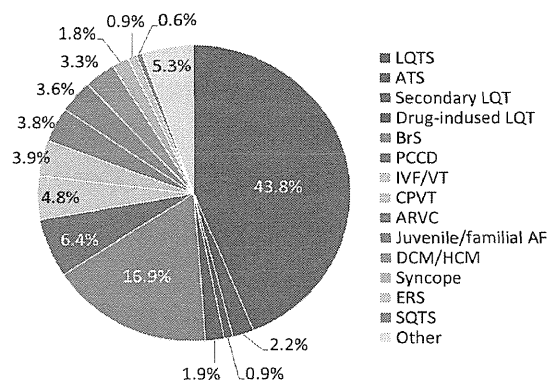
研究分担者 堀江 稔 滋賀医科大学 内科学講座 (循環器・呼吸器) 教授

研究要旨：滋賀医科大学・京都大学に遺伝子解析目的にて登録された約 1300 家系より、BrS・ERS・SQTS・IVF と診断された 312 名の発端者および LQTS を疑われた 278 名の発端者を抽出し、*CACNA1C* 遺伝子を解析した。結果、6 名の BrS 家系に 5 種の変異、7 名の LQTS 家系に 5 種の変異を同定した。BrS 家系に同定された 5 変異のうち 1 変異(*CACNA1C*-R632R)は塩基置換部位が *CACNA1C*-exon14 の 1 塩基目に存在しており、スプライシングエラーを生じるものと考えられた。*CACNA1C*-R632R 保有者家系の mRNA 定量解析を行い、NMD により mRNA 発現量の低下を引き起こし、機能低下を呈することを確認した。LQTS 家系に同定された 5 変異については、パッチクランプ法を用いた機能解析を行い、2 変異については明らかな機能亢進が示され、Timothy 症候群の心臓外兆候を呈さない変異保有者が存在することを発見した。本研究は、遺伝性不整脈を有する日本人コホートにおける *CACNA1C* 変異の関与を明らかにしたものである。

A. 研究目的

遺伝性不整脈は、心臓の興奮・伝導・収縮に関わる蛋白群をコードする遺伝子の異常により、蛋白の機能が障害され、結果として多様な不整脈を起こす病気である。当初より調べられたのは QT 延長症候群である。QT 延長症候群は、心電図上 QT 間隔の延長、意識消失発作、torsade de pointes、心臓突然死を特徴とする遺伝性不整脈である。原因遺伝子は現在のところ 16 種類報告されている。さらに、特異な胸部誘導 V1-3 における ST 上昇と心室細動を特徴とする Brugada 症候群やカテコラミン感受性多型性心室頻拍など、10 近い不整脈の原因遺伝子が同定されている。われわれは、1996 年から、家族性不整脈症候群に注目し、表 1 (次ページ)のような疾患について詳しい病像とゲノムを集積している。また、そのうち現時点で、遺伝子診断されたコホートについて、内訳を右の図 1 に示す。

L 型心筋カルシウムチャネル(L-type Calcium Channel: LTCC) α サブユニットをコードする *CACNA1C* 遺伝子変異が引き起こす遺伝性不整脈疾患の代表



的なものとして、チャネル機能亢進による Timothy 症候群(8 型 QT 延長症候群:LQT8)¹とチャネル機能低下による 3 型 Brugada 症候群(BrS3)²が挙げられる。近年では、QT 短縮症候群(SQTS)³や早期再分極症候群(early repolarization syndrome: ERS)⁴、特発性心室細動との関与も指摘されている。LTCC は 4 つのサブユニットから構成される巨大タンパクであり⁵、その遺伝子解析及び遺伝子変異から生じる異常タンパクの解析は非常に困難なため、他のイオンチャネル異常と比較して、報告されている遺伝子異常も少ない。いずれも欧米からの報告であり、日本人を始めとするアジア人種での報告はなかった。

図 1：遺伝子診断例の内訳

今回、我々は遺伝性不整脈を有する日本人コホートにおける *CACNA1C* 変異を同定し、変異保持者の表現型、及び遺伝子変異によるチャンネルの機能変化について比較検討した。

B. 研究方法

原因遺伝子の検索目的にて滋賀医科大学循環器内科および京都大学大学院循環器内科学講座に登録された約 1800 家系(表 1)より、BrS・ERS・SQTS・IVFと診断された 312 名の発端者(家系)、および臨床的に QT 延長症候群が疑われ、かつ他の原因遺伝子が同定されていない 278 名の発端者をそれぞれ抽出し、*CACNA1C* 遺伝子を解析した。

LTCC は遺伝子量が多いため、検索ではまず高解像度融解(High Resolution Melting: HRM)曲線分析でスクリーニングを実施し、遺伝子変異の可能性が指摘される発端者を抽出したのち、DNA ポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 法で遺伝子配列を読んで詳細を確認した。

同定された変異のうち、スプライシング変異については、発端者および家族より新たに新鮮末梢血を採取し、mRNA を抽出した。RT-PCR により mRNA から cDNA 合成を行い、direct sequence 法による配列確認および LightCycler®を用いて、advanced relative quantification 法による定量解析を行った。

また、LQTS 患者に同定された *CACNA1C* 変異については、whole-cell patch-clamp 法を用いて、同定した遺伝子変異がチャンネルに及ぼす機能変化を確認した。

(表 1 : 症例コホートの内訳)

(倫理面への配慮)

本研究は、ヘルシンキ宣言 (世界医師会) ヒトゲノム・遺伝子解析研究に関する倫理指針 (平成 16 年文部科学省・厚生労働省・経済通産省告示第 1 号) に準拠して実施する。また本研究は、所属施

LQTS	773	
ATS	39	
Secondary	16	(hypo-K, hypo-Mg, anorexia, SAH, etc...)
Drug-induced LQT	34	
BrS	298	
PCCD	113	(Juvenile PMI, familial PMI, A-V block)
IVF/VT	84	
CPVT	69	
ARVC	67	
Juvenile/familial AF	64	
DCM/HCM	58	(HCM;16)
Syncope	31	
ERS	16	
SQTS	10	
Other	93	MuPVCs, family history of Sudden death, Fabry

設の倫理委員会の承認を得ている。

倫理委員会での承認状況：

滋賀医科大学：

家族性不整脈症候群における遺伝子解析

(H21 年 9 月 29 日更新) 承認番号: 21-50)

C. 研究結果

Brugada 症候群における *CACNA1C* 変異

我々のコホートにおいては、BrS の 6 家系(2.2%)から 5 種の *CACNA1C* 変異(N547S, R632Rspl, R1780H, C1855Y and R1910Q(2 家系))が確認された。うち 2 例は、有症候性であった。注目したのは、安静時心電図では異常を認めなかったが失神を繰り返し、ピルシカイニド投与下で著明な coved 型の ST 上昇が確認された女性患者と、無症状であったが安静時に saddleback 型の ST 上昇を認め、ピルシカイニド投与下で coved 型の ST 上昇が認められた男性患者であった。図 2 に 2 名の心電図を示す。彼らは同じ R1910Q 変異を保持していた。これは、Brugada 症候群は圧倒的に男性患者が多いとされているが、遺伝子変異の保持率は男女で変わらないことを裏付ける結果であった。⁶