

厚生労働科学研究委託費（難治性疾患実用化研究事業）
委託業務成果報告（分担）

パーキンソン病患者由来 iPS 細胞を中心とする多面的疾患モデルに立脚した革新的医薬品
の開発に関する研究（遺伝性 PD の解析を中心に）

担当責任者 服部信孝（順天堂大学医学部 神経内科（教授））
岡野栄之（慶應義塾大学医学部 生理学（教授））
井本正哉（慶應義塾大学理工学部 生命情報学科（教授））
望月秀樹（大阪大学大学院 医学系研究科 神経内科学（教授））
青木正志（東北大学大学院 医学系研究科 神経内科学分野（教授））
戸田達史（神戸大学大学院 医学研究科 神経内科学（教授））
浅田隆太（名古屋医療センター 臨床研究センター
臨床研究事業部 研究開発推進室（室長））
田代 悦（慶應義塾大学理工学部 生命情報学科（専任講師））
赤松和土（順天堂大学 ゲノム再生医療センター（特任教授））
駒野 肇（慶應義塾大学医学部 生理学（特任講師））
山下博史（京都大学大学院医学研究科 臨床神経学（助教））
山門穂高（京都大学大学院医学研究科 臨床神経学（助教））

研究要旨：パーキンソン病（PD）は我が国で 2 番目に多い神経変性疾患であるが、治療は対症療法に留まり現在のところ根本的治療法はない。本研究では、樹立済み PD 患者由来 iPS 細胞を中心に、多彩な PD モデル動物（マウス・ラット・メダカ・ショウジョウバエ）や細胞モデルを含めた多面的疾患モデルを基礎として、創薬シーズの同定から進行抑制や先制医療に繋がる革新的医薬品を創り出すことを目標とする。なお、本報告書では、総括部分で最終的なターゲットである孤発性 PD に関する研究を記載し、業務項目部分で遺伝性 PD、あるいはデータベースを用いた創薬に関する研究を記載する。

A. 当研究班の研究目的と期待される成果

1) 研究目的

パーキンソン病 (PD) は我が国で 2 番目に多い神経変性疾患であるが、治療は対症療法に留まり根本的治療法はない。本研究では、PD 患者由来 iPS 細胞を中心に、多彩な PD モデル動物 (マウス・ラット・メダカ・ショウジョウバエ) を含めた多面的疾患モデルを基礎として、創薬シーズの同定から進行抑制や先制医療に繋がる革新的医薬品を創り出すことを目的とする。

当グループでは遺伝性 PD 責任遺伝子の同定・機能解析とともに、剖検脳での評価やモデル動物作製も行い (*Nature* 1998, *Science* 2001, *Cell* 2001, *Ann Neurol* 2008, *HMG* 2013)、近年ではドパミン細胞死に密接に関わるミトファジー (ミトコンドリア品質管理機構) や小胞輸送の分子機構解明を進めてきた (*JCB* 2010, *Nat Comm* 2013)。また、遺伝性 (PARK1,2,4,6,7,8,9, 未発表新規遺伝子)・孤発性 (GBA 変異含む) PD 患者由来の iPS 細胞樹立と解析を行っている。また臨床データベースの整備とバイオサンプルのバンク化も着手している。これらと神経変性疾患に関する調査研究班 (中野班) で培われた知見を基礎とし、遺伝性から孤発性 PD への応用、メカニズム解明から治療への発展をめざす。特に臨床サンプルの取得や臨床試験に関しては、主に日本神経学会の協力を得る。

具体的には、主に iPS 細胞モデルからパスウェイ解析を含めた発現蛋白・RNA の解析を行い、新規の創薬シーズを同定する (平成 26-7 年度)。特に GBA 変異をもつ孤発性 PD- iPS 細胞 (作製済み) の、ゲノム編集

を用いた解析は未報告であり新規性が高い。次年度に薬剤スクリーニング系を構築し、ヒット化合物を同定する (平成 27 年度)。さらに独自に開発した孤発性・遺伝性・ウイルスベクターを用いた PD マウスモデルや世界に先駆けて開発したメダカモデルなどモデル動物や生体材料での検証を行う (平成 28 年度)。

また、PD で障害されるミトコンドリアや小胞輸送を標的とする薬剤開発は複数のリード化合物を同定するなど先行しており、初年度から分子薬理作用の解明を目指すと同時に、新たなライブラリースクリーニングを行い、孤発性 PD モデルにおいても有効な、さらなるヒット化合物の取得を試みる。

2) 期待される成果

孤発性神経変性疾患の原因究明と治療は、高齢化が進む 21 世紀において全世界的な課題である。その中において、PD は有病率が 130-150 人/10 万人 (発症率は 50-59 歳: 1.7 人/10,000 人、70-79 歳: 9.3 人/10,000 人) と高齢者ほど増加することから、今後患者人口の増大およびそれに伴う医療費・介護関連費用の増大が危惧される疾患である。さらに発症機序は完全には解明されておらず、治療は対症療法に限定されており、進行予防・抑制効果を持つ根本的治療法は存在しない。一方で、PD は診断方法が比較的確立されており、患者数も多く、適切な症例選択に基いた間断のない臨床試験への移行が可能である疾患でもある。孤発性神経変性疾患には共通のメカニズムが想定されており、PD 患者由来 iPS 細胞・動物モデルを相補的に用いて、さらに化合物スクリーニングシステムを組み合わせた本研究の

成果次第では、本研究終了時点において PD に対する革新的医薬品の臨床試験への基盤作りが達成され、長期的には他の孤発性神経変性疾患、ひいては難治性疾患の治療を一変させる可能性を秘めている。この点で、疾患 iPS という我が国発の技術を基にした革新的医薬品開発が成功すれば、新薬開発などの医薬品産業、及び社会福祉・医療介護を含めた医療・福祉行政に極めて大きなインパクトを持つと考えられる。

B. 研究方法

1) PD 患者由来 iPS 細胞を用いた創薬シードの同定と化合物スクリーニング

遺伝性 PD 患者由来の iPS 細胞を用いた研究 (服部、岡野、一部高橋)

主な遺伝性 PD (PARK1,2,4,6,8,9) 患者由来の iPS 細胞は既に確立されている。また、服部らは既に PD4 家系における新規原因遺伝子の患者由来 iPS 細胞も樹立した。複数の遺伝性 PD の原因がミトコンドリア機能障害に集約されつつあり、新規パスウェイの探索と遺伝性 PD の原因として集約されつつあるミトコンドリアや小胞輸送に焦点をあてた解析を行う。

新規創薬シード同定を目的とした PD 患者由来 iPS 細胞の解析 (高橋、服部、岡野、井本)

に対して、プロテオーム解析、マイクロアレイや次世代シーケンサーによるトランスクリプトーム解析などの網羅的解析を行う。同定された創薬シードに対して、既存薬や新規修飾型天然物などのオリジナ

ルの化合物ライブラリーを用いてスクリーニングを行い、リード化合物を同定する。また表現型解析に関して、膜電位や呼吸機能 (フラックスアナライザーで測定) でミトコンドリア機能を評価、細胞死に関しては PI 及び Annexin V 染色にて評価し、LC3 の定量やリソソーム酵素の活性測定・成熟障害 (蛍光色素による相対的酸性化障害を評価) などでオートファジー・リソソーム系の評価を行う。

2) ゲノム解析・データベースを用いた創薬アプローチ (戸田)

孤発性 PD のメタ・ゲノムワイド関連解析から疾患感受性遺伝子を抽出し、同遺伝子を標的とする薬剤や、疾患 iPS 細胞を用いてマイクロアレイ解析を行い、疾患と同じ遺伝子発現変動を示す薬剤を、種々のデータベースより解析し創薬へとつなげる。

3) 新たなモデル動物を用いた病態解明・評価系確立 (高橋、服部、望月、青木)

各遺伝性 PD モデル動物は作製・解析済みである。最近発見された小胞輸送関連 PD 遺伝子 (VPS35、RAB7L1、DNAJC13) についてはショウジョウバエおよびマウスを用いた病態解析を行う。服部らが見出した新規原因遺伝子に関してはマウス・ショウジョウバエモデルを作製する。また、1)

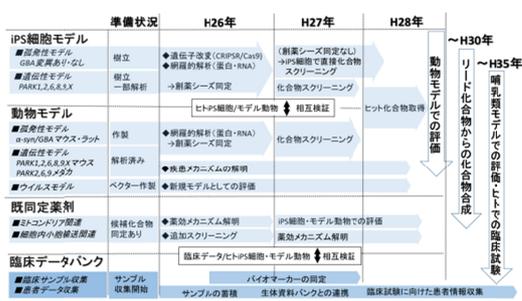
と同様の網羅的解析も行い、iPS 細胞との相互検証を行う。MPTP 腹腔内投与マウスをドパミン神経細胞死モデルとして、ウイルスベクターを用いて黒質に Syn を導入したマウスは Syn 蓄積・ドパミン細胞死モデルとして使用する。リード化合物をこれらのモデルに投与し、*in vivo* における

効果を検証するが、既にミトコンドリア障害を標的として同定された化合物の投与を先行させる。

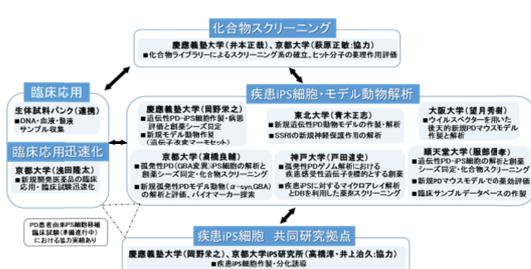
4) 臨床データベース整備、臨床応用迅速化プロジェクト(服部、浅田)

重症度等の患者情報を包括したデータベース(約200名)を作成済みであり、平成28年度までに2,000名の登録を目指し、将来的な臨床試験への迅速化を図る。臨床サンプルの保存も進めており、重症度と関連するバイオマーカーの同定、創薬シーズとの相互検証を行う。

(研究計画)



(研究体制)



5) 倫理面への配慮

ヒト由来末梢血液・脳脊髄液・剖検脳の取り扱いについて

ヒト由来各種末梢血液成分(核酸、蛋白質、血球成分)並びに脳脊髄液・剖検脳の解析については既に各大学倫理委員会の承認を得ている。

また研究に用いるヒト細胞に関しては、被験者に対する口頭および書面によるインフォームドコンセントをはじめ、実施計画省など倫理面において十分な配慮を以て作成している。個人の検体採取の取り扱い(遺伝情報を含む各種検査・測定項目)に関しては、各試料は無作為に割り付けし、個人を特定不能にする。

iPS細胞樹立・使用について

ヒトiPS細胞を使用する研究(ゲノム研究、病態解明研究並びに薬効評価研究)に関しては、平成18年9月1日に施行された厚生科学審議会科学技術部会「ヒト幹細胞を用いる臨床研究に関する指針」および平成22年11月1日に告示・施行された改正指針に則り、準拠した研究計画となっている。また京都大学・順天堂大学・慶應義塾大学内の倫理委員会の承認も得ている。

疾患動物モデルの取り扱いについて

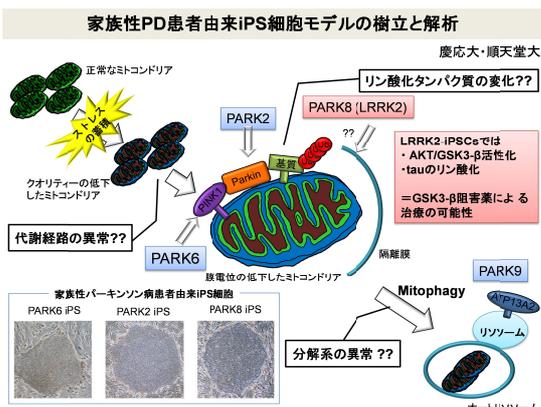
動物実験は全て、動物愛護法・日本学術会議による「動物実験の適正な実施に向けたガイドライン」、各大学の動物実験に関する指針にのっとり行う。

D. 研究結果

1) PD患者由来iPS細胞の解析

iPS細胞からの創薬シーズ同定のためにPD患者由来iPS細胞の解析を行った。LRRK2遺伝子変異(I2020T、相模原家系)を有するPARK8患者よりiPS細胞を樹立し、神経細胞へ分化させた所、神経伝達物質ドパミンの放出能の低下とAKT/GSK-3の亢進によるTauのリン酸化が誘導された。患者剖

検脳における神経原性線維変化からも GSK-3 阻害薬による治療の可能性が示唆された。



また、同一の家系（相模原家系）における別の患者から作製した iPS 細胞においては、-syn の蓄積あるいはオートファジーの flux の低下を示唆する結果を得ている。この患者の剖検脳においてはリン酸化タウの蓄積は認めず、-syn の蓄積を認めていた。

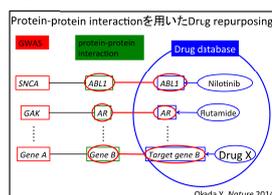
2) ゲノム解析・データベースを用いた創薬アプローチ

ゲノム解析・データベースを用いた創薬アプローチとして、ゲノムワイド関連解析から同定された孤発性 PD リスク遺伝子やそれら遺伝子と蛋白間相互作用がある遺伝子を標的とする薬剤を、データベースから検索し (*in silico* screening), 細胞実験でドパミン神経毒 (ロテノン) に対して神経保護効果を持つ可能性のある薬剤 *in vitro* で確認したところ、神経保護効果を持つ化合物を新たに同定することが可能であった。

既存薬剤を用いた *in silico* スクリーニングによる抗PD薬の開発

神戸大

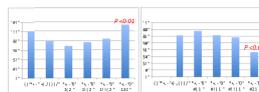
① *in silico* スクリーニング



② 候補薬剤を *In vitro* で検討

LDH assay, MTS assay

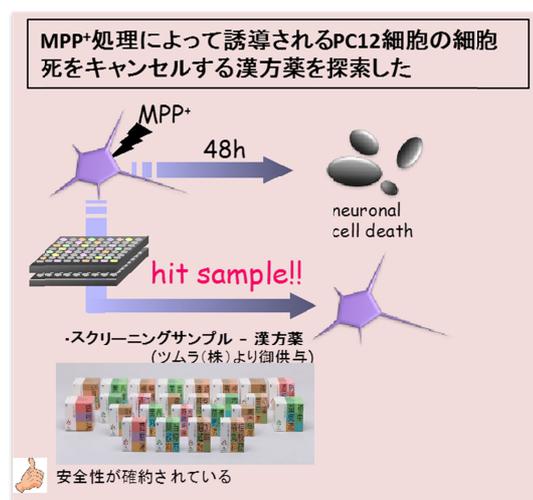
③ 神経保護効果を持つ薬剤Aを新たに同定



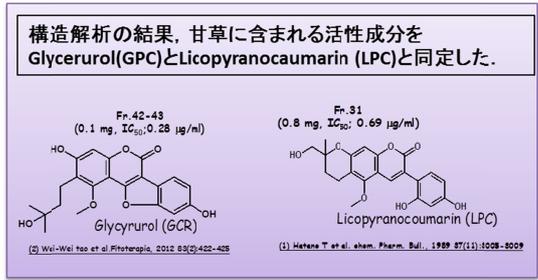
3) 新たなモデルを用いた病態解明・評価系確立・創薬

細胞モデル

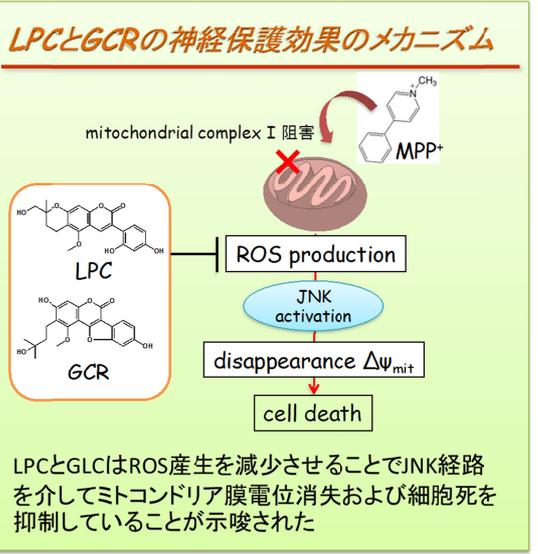
a) MPP+処理によって誘導される PC12 細胞の細胞死をキャンセルする漢方薬を探索した。



結果、漢方薬ライブラリー（ツムラ）から神経細胞死を抑制する化合物として調胃承気湯および大黃甘草湯を見出した。さらに活性を示す生薬成分は甘草であったことから、甘草から活性成分の単離精製を行い、神経保護活性物質として Ilicopyranocoumarin (LPC) と glycyrurol (GLC) を同定した。

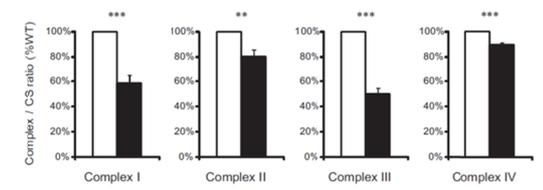


LPC と GLC は ROS 産生を減少させることで JNK 経路を介してミトコンドリア膜電位消失および細胞死を抑制していることが示唆された(文献 2)



b) PINK1 ノックアウト線維芽細胞の呼吸機能を詳細に検証し PD モデル細胞としての有用性を確認した(文献 14)

PINK1 KO MEFではミトコンドリア活性は低下する



c) PD 原因遺伝子 DNAJC13 の病態への関与を明らかにする目的で、野生型および N855S 変異型ヒト DNAJC13 の COS7 細胞における過剰発現実験を実施した。

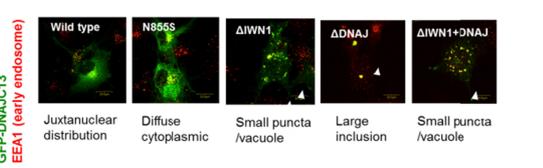
DNAJC13 遺伝子変異による家族性PDの病態解析

優性遺伝形式、Dopa反応性、高齢発症、レビー小体陽性のPD
→孤発性PDの発症メカニズム解明への貢献が期待できる

- 変異DNAJC13発現細胞、患者由来iPS細胞を用いた小胞輸送障害経路の確認
- α -シヌクレイン吸収・分解・分泌への影響の確認
- ショウジョウバエ・マウスモデルを用いた表現型確認
- 細胞および動物モデルを用いた治療薬スクリーニング

変異型 DNAJC13 は初期エンドソーム外に異常分布し、エンドソームの形態・分布異常を引き起こす可能性を確認した。

変異DNAJC13分子は細胞内異常局在を呈し、初期エンドソームの形態変化を誘導する

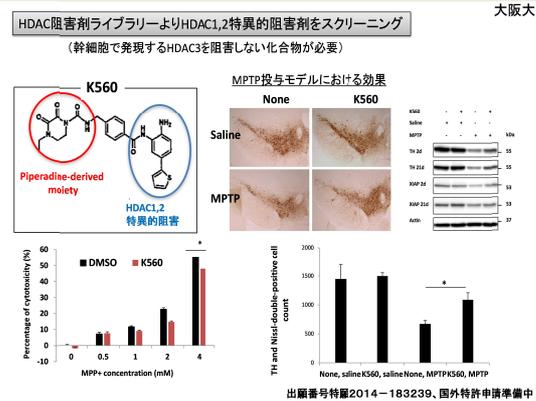


小胞輸送系レファレンス分子の細胞内挙動をモニターすることで、DNAJC13遺伝子異常による輸送障害部位を同定中

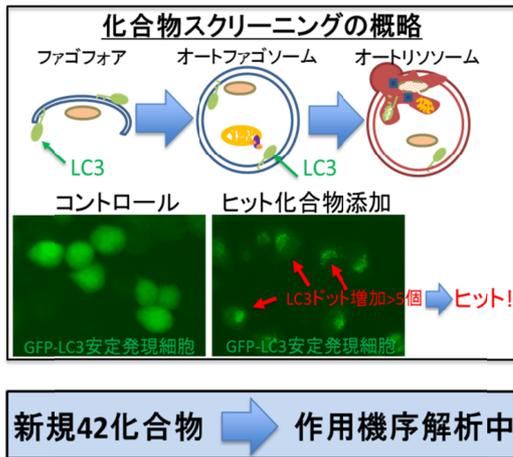
d) HDAC 阻害剤が PD を含めた様々な神経変性疾患に対して保護的に働くことは知られていたが、幹細胞で発現する HDAC3 を阻害しない化合物が必要とされていた。HDAC 阻害剤ライブラリーより HDAC1,2 特異的阻害

剤をスクリーニングし、化合物 K560 を取得した。K560 は in vitro、in vivo において MPTP に対して保護的に働き、特に MPTP 投与マウスにおいては、ドパミン神経保護的に働くことが示された。

HDAC 1, 2 特異的阻害剤K560はMPTP 毒性に対して神経保護的に働く



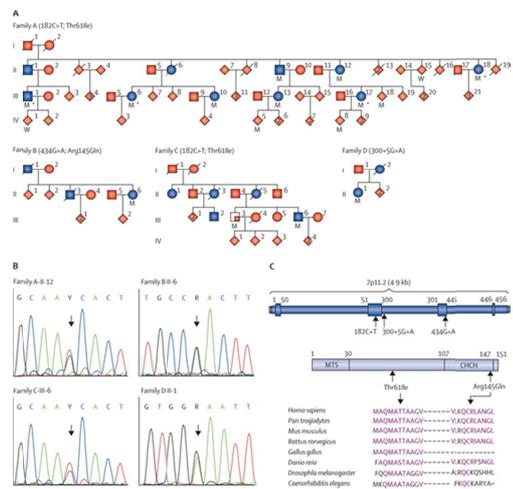
e) オートファジーを標的とした既存薬ライブラリーによる薬剤スクリーニングを施行した。様々な遺伝性 PD において、その原因はミトコンドリアやリソソームの障害に集約されつつある。349 化合物からなる既存薬ライブラリーを用いて、GFP-LC3 安定発現細胞における LC3 陽性のドットを指標としたスクリーニングを施行した。現在新規 42 化合物についてその作用機序を解析中である。



動物モデル

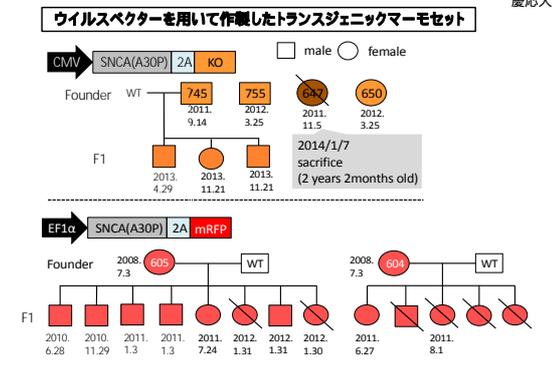
a) PD における環境因子として、MPTP 投与による長期・超長期投与モデルを樹立し、LPS・ロテノン黒質内投与による選択的ドパミン神経細胞脱落モデルも樹立した。

b) 新規 PD 遺伝子として CHCHD2 を同定し (文献 13)、同遺伝子ノックアウト・トランスジェニックマウスを樹立し解析中である



c) 変異型 -syn (A30P) を強制発現した遺伝子改変マウスモデルの病理学的解析から脳内にリン酸化 -syn の蓄積と PET イメージングによる DAT の減少が観察された。今後 PD の早期症状の解析と in vivo での治療薬開発モデルになると期待される。

遺伝子改変マウスモデルの作製



D,E 考察・結論

PD 患者由来 iPS 細胞の解析においては、本年度は LRRK2 変異をもつ PD 患者由来の iPS 細胞を中心に報告した。興味深いことに、同じ家系(相模原家系)においても、病理所見が患者ごとに異なっており、リン酸化タウの蓄積を認めるもの、リン酸化シヌクレインの蓄積を認めるものなどさまざまである。しかしながら、それぞれの患者由来の iPS 細胞から分化させた神経細胞においては、剖検における病理所見を反映した結果が示唆されており、このことから iPS 細胞から分化させた神経細胞はある程度病態を反映している可能性を示唆している。今後は、GBA 変異 PD などの結果とあわせて、ドパミン神経細胞死に共通する細胞メカニズムを検証していく予定である。

培養細胞レベルの実験では、多面的な細胞モデルから、神経保護作用が期待できる薬剤が複数スクリーニングされている。BBB の通過の問題、他の細胞モデルでの検証、 α -syn 毒性への効果などが今後の課題であり、化合物展開も必要と考えられる。厳選された化合物に関して、in vivo モデルでの効果を検証予定である。現時点で in vivo モデルとして多用されているものは MPTP モデル動物であるが、病態を反映していないという批判がある。並行して開発している孤発性 PD のマウスモデル、あるいは α -syn の injection モデルはよりよい in vivo モデルとなる可能性がある。

また、新規に同定され解析が不十分な DNAJC13 遺伝子などの解析、あるいは新規に同定した CHCHD2 などの遺伝子の解析

も進めており、ドパミン神経細胞死に共通するメカニズム解明への貢献が期待できる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. Kiga M, Nakayama A, Shikata Y, Sasazawa Y, Murakami R, Nakanishi T, \circ Tashiro E, \circ Imoto M. SMK-17, a MEK1/2-specific inhibitor, selectively induces apoptosis in β -catenin-mutated tumors. **Scientific Report**, in press
2. Fujimaki T, \circ Saiki S, Tashiro E, Yamada D, Kitagawa M, \circ Hattori N, \circ Imoto M. Identification of Licopyranocoumarin and Glycyrurol from Herbal Medicines as Neuroprotective Compounds for Parkinson's Disease. **PLoS ONE** 2014; 9: e100395
3. Yoshimaru T, Komatsu M, \circ Tashiro E, \circ Imoto M, Osada H, Miyoshi Y, Honda J, Sasa M, Katagiri T. Xanthohumol suppresses oestrogen-signaling in breast cancer through the inhibition of BIG3-PHB2 interactions. **Scientific Report** 2014; 4: 7355
4. Magi S, \circ Saeki Y, Kasamatsu M, \circ Tashiro E and \circ Imoto M. Chemical genomic-based pathway analyses for epidermal growth factor-mediated signaling in migrating cancer cells. **PLoS One** 2014; 9: e96776

5. Magi S, Takemoto Y, Kobayashi H, Kasamatsu M, Akita T, Tanaka A, Takano K, Tashiro E, Igarashi Y, Imoto M. 5-lipoxygenase and cysteinyl leukotriene receptor 1 regulate epidermal growth factor-induced cell migration through Tiam1 upregulation and Rac1 activation. **Cancer Science**, 2014; 105: 290-296
6. Hikishima K, Okano H. Detection of nigrostriatal pathway loss in the Parkinson's disease model using diffusion MRI: Preliminary results in the MPTP-treated marmoset. **Radiology** 2015. In Press
7. Imaizumi Y, Okano H. Modeling human neurological disorders with induced pluripotent stem cells. **J Neurochem**. 2014; 129:388-399
8. Zhou Z, Kohda K, Ibata K, Kohyama J, Akamatsu W, Yuzaki M, Okano HJ, Sasaki E, Okano H. Reprogramming non-human primate somatic cells into functional neuronal cells by defined factors. **Mol Brain**. 2014; 7(1):24
9. Okano H and Yamanaka S: iPS Cell Technologies: Significance and Applications to CNS Regeneration and Disease Research. **Mol Brain**. 2014; 7:22
10. Shoji Y, Nishio Y, Baba T, Uchiyama M, Yokoi K, Ishioka T, Hosokai Y, Hirayama K, Fukuda H, Aoki M, Hasegawa T, Takeda A, Mori E., Neural Substrates of Cognitive Subtypes in Parkinson's Disease: A 3-Year Longitudinal Study. **PLoS One** 2014; 9(10), e110547.
11. Miura E, Hasegawa T, Konno M, Suzuki M, Sugeno N, Fujikake N, Geisler S, Tabuchi M, Oshima R, Kikuchi A, Baba T, Wada K, Nagai Y, Takeda A, Aoki M. VPS35 dysfunction impairs lysosomal degradation of α -synuclein and exacerbates neurotoxicity in a Drosophila model of Parkinson's disease. **Neurobiol. Dis.** 2014; 71:1-13.
12. Sugeno N, Hasegawa T, Tanaka N, Fukuda M, Wakabayashi K, Oshima R, Konno M, Miura E, Kikuchi A, Baba T, Anan T, Nakao M, Geisler S, Aoki M, Takeda A. Lys-63-linked Ubiquitination by E3 Ubiquitin Ligase Nedd4-1 Facilitates Endosomal Sequestration of Internalized α -Synuclein. **J Biol. Chem**. 2014; 289:18137-51.
13. Funayama M, Ohe K, Amo T, Furuya N, Yamaguchi J, Saiki S, Li Y, Ogaki K, Ando M, Yoshino H, Tomiyama H, Nishioka K, Hasegawa K, Saiki H, Satake W, Mogushi K, Sasaki R, Kokubo Y, Kuzuhara S, Toda T, Mizuno Y, Uchiyama Y, Ohno K, Hattori N. CHCHD2 mutations in autosomal dominant late-onset Parkinson's disease: a genome-wide linkage and sequencing study..

- Lancet Neurol** 2015; 3:274-282
14. Amo T, Saiki S, Sawayama T, Sato S, Hattori N. Detailed analysis of mitochondrial respiratory chain defects caused by loss of PINK1. **Neurosci Lett** 2014; 580C:37-40
 15. Fujimaki T, Saiki S, Tashiro E, Yamada D, Kitagawa M, Hattori N, Imoto M. Identification of licopyranocoumarin and glycyrruol from herbal medicines as neuroprotective compounds for Parkinson's disease. **PLOS ONE** 2014; 9:e100395
 16. Hattori N, Mochizuki H, Choong CJ, Yasuda T. The promises of stem cells: stem cell therapy for movement disorders. **Parkinsonism Relat Disord.** 2014 Suppl 1: S128-131.
 17. Kashiwara K, Kondo T, Mizuno Y, Kikuchi S, Kuno S, Hasegawa K, Hattori N, Mochizuki H, Mori H, Murata M, Nomoto M, Takahashi R, Takeda A, Tsuboi Y, Ugawa Y, Yamamoto M, Yokochi F, Yoshii F, Stebbins GT, Tilley BC, Luo S, Wang L, LaPelle NR, Goetz CG; MDS-UPDRS Japanese Validation Study Group. Official Japanese Version of the Movement Disorder Society-Unified Parkinson's Disease Rating Scale: validation against the original English version. **Mov Disord Clin Pract (Hoboken).** 2014; 1:200-212.
 18. Heckman MG, et al. Genetic Epidemiology Of Parkinson's Disease (GEO-PD) Consortium. The protective effect of LRRK2 p.R1398H on risk of Parkinson's disease is independent of MAPT and SNCA variants. **Neurobiol Aging.** 2014; 35:266.e5-14. (上記 Genetic Epidemiology Of Parkinson's Disease (GEO-PD) Consortium.に戸田が参画)
 19. Shirafuji T, Ueyama T, Yoshino K, Takahashi H, Adachi N, Ago Y, Koda K, Nashida T, Hiramatsu N, Matsuda T, Toda T, Sakai N, Saito N. The role of Pak-interacting exchange factor-β phosphorylation at serines 340 and 583 by PKCγ in dopamine release. **J Neurosci.** 2014; 34:9268-9280.

H. 知的財産権の出願・登録状況

K560: 出願番号特願 2014 - 18323
9、海外特許申請中