

◆ 特集：新しい時代に向けた下水道技術 ◆

## 消化ガスで走る自動車

牧 孝憲\* 尾崎正明\*\*

### 1. はじめに

下水処理場では、発生した下水汚泥の減容化および安定化を図る目的で嫌気性消化（以下、汚泥消化と呼ぶ）の処理工程を経ることがある。汚泥消化とは、嫌気性微生物の作用により汚泥中の有機物を分解する工程をいい、現在約17%の下水処理場にて導入されている。有機物は汚泥消化によって最終的にメタンおよび二酸化炭素などに分解され、汚泥体積は約2割減容化される。発生した気体、すなわち消化ガスの組成はメタン6割、二酸化炭素4割、少量の硫化水素となっている<sup>1)</sup>。現在、多くの処理場では発生した消化ガスは消化タンクの加温と燃焼することで処理している。

1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3：京都会議）は、米国の不参加によりその意義を失いかけたが、ロシアの批准によって2005年2月の発効が決定した。わが国では温室効果ガス排出削減義務を達成すべく、地球温暖化対策推進大綱が決定され、それを踏まえバイオマス・ニッポン総合戦略等が制定さ

れた。COP3では、わが国は1990年比6%の温室効果ガス削減を義務付けられているが現在、国内だけでの達成は困難であると予想されている。その一方で、全国の下水処理場で消費されている電力は、わが国の総電力消費量の約1%を占めるに至り、そのエネルギー消費量は電力に限らず年々増加の一途をたどっている。また、下水道事業からの排出も含む全国の廃棄物部門からの温室効果ガス排出量は、総排出量の約2%を占めるに過ぎないが、その増加率は著しい。1999年において、全排出量の1/3以上を占める産業部門は1990年比で2%削減されたが、廃棄物部門は40%を超える増加率を示した<sup>2)</sup>。1999年に廃棄物部門から排出された約2,400万トン（二酸化炭素換算）のうち、下水道事業からは約460万トン、約2割を占めた（図-1）<sup>3)</sup>。ある都道府県では、都道府県事務事業活動より発生する温室効果ガスの半分近くを下水道事業より排出している。

このような状況であるため、消化ガスの有効利用を促進する必要がある。

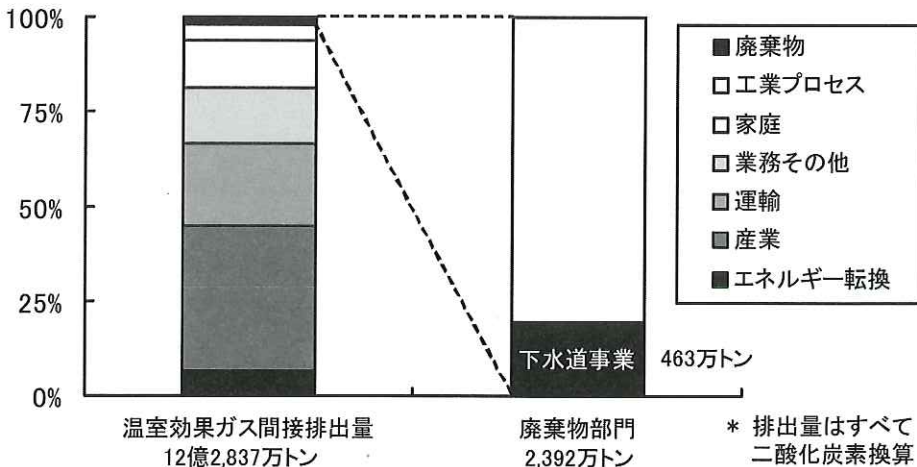


図-1 わが国の1999年における温室効果ガス間接排出量

## 2. 消化ガス有効利用の事例

いくつかの下水処理場では、発生した消化ガスの有効利用が図られている。消化タンクの加温、下水汚泥などの焼却・溶融用の燃料などに全国で年間約1.4億m<sup>3</sup>、消化ガス発電用に約0.4億m<sup>3</sup>が利用され、その総発電量は8,700万kWhにのぼる<sup>4)</sup>。たとえば、東京都森ヶ崎水再生センターでは2004年4月より下水道事業としては国内初となるPFI(民間資金を活用した社会資本整備)を導入して、余剰消化ガスを利用した常用発電事業を開始した<sup>5)</sup>。1年間に発生する約1,100万m<sup>3</sup>の消化ガスを発電用に供給し、また大規模電力貯蔵設備(NaS電池)を併用することで、夜間の安価な電力を利用し、年間約6億円の電力コストを削減できると試算している。横浜市では、発生した下水汚泥を集約処理し、卵形消化タンクを用いた高濃度一段消化を実施することで年間約2,800万m<sup>3</sup>もの大量の消化ガスが発生している<sup>6)</sup>。その大半は、消化ガス発電や燃料電池へ供給することで有効利用され、年間約3,700万kWhにのぼる電力が発生している。両処理場ともに、消化タンクの加温は

消化ガスの直接利用によってではなく、発電によって発生した廃熱を回収して加温に用いるため、いっそうの有効利用が図られている。

このように、大規模な下水処理場では発生した消化ガスを有効利用するケースがみられるが、小規模な場合ではその利用先や用途が限られるため燃焼処理されるケースが多い。

本報告では、発生した消化ガスの有効利用法の一つとして、すでに確立された技術を活用したバイオガス自動車の燃料としての利用を提案する。

## 3. 消化ガスを利用したバイオガス自動車とは

消化ガスをはじめ、食品廃棄物や家畜ふん尿、廃木材なども含めた有機性資源(バイオマス)を嫌気性発酵(メタン発酵など)させることで発生する気体をバイオガスといい、現在環境への負荷が少ない燃料として盛んに研究・開発がされている。すなわち、バイオガスはもともと大気中の二酸化炭素が有機物として固定されたものであるため、燃焼しても大気中の二酸化炭素量は増加せず地球温暖化に寄与しない(いわゆるカーボンニュー

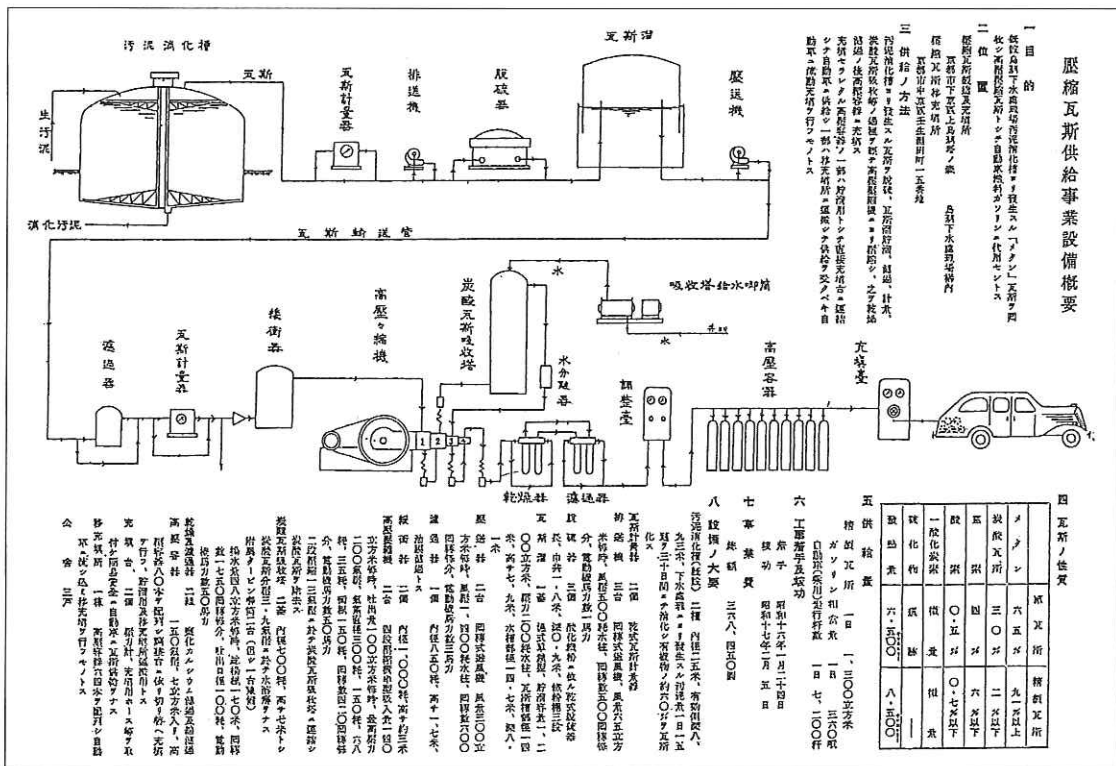


図-2 京都市「圧縮瓦斯供給事業」概要



トラル)。

一方、現在天然ガス自動車は世界で約300万台、わが国では2万台以上が普及している。従来からのガソリン・軽油自動車と比較して、窒素酸化物などの排出が抑制され、環境への負荷を低減できる自動車として、政府は広く普及させることを目指している。天然ガス自動車に使用される「天然ガス」とは、法律上「メタンを主成分としたガス」と定義され、広く都市ガス(13A都市ガスなど)として市民生活に利用されている。

つまり、消化ガス(バイオガス)は精製することで天然ガスと同等の燃料(資源)と考えることができ事実、普及している天然ガス自動車に、精製した消化ガスを充填すれば問題なく走行することができる(ここでは、消化ガス(バイオガス)を燃料とした天然ガス自動車をバイオガス自動車と呼ぶ)。

消化ガスを燃料として自動車を走行させる試みは古く、戦時中の1942年に京都市において「壓縮瓦斯(圧縮ガス)供給事業」として事業化されていた(図-2)<sup>7)</sup>。一時は100台ものバイオガス自動車が走行したが、流入下水の濃度低下により消化ガス発生量が減少したため1950年に中止された。

天然ガスは化石燃料であるため、燃焼によって発生した二酸化炭素は地球温暖化に寄与するが、

カーボンニュートラルであるバイオガスを利用するバイオガス自動車は、天然ガス自動車のメリットに加え、温暖化への影響をも配慮することができる。これらにより、バイオガス自動車は資源循環型社会の構築に貢献できる画期的な輸送システムといえる。

#### 4. 消化ガス供給可能量

汚泥消化を実施している下水処理場は全国で約350箇所のにほり、年間約2.8億m<sup>3</sup>の消化ガスが発生している。そのうち約1.8億m<sup>3</sup>が発電や消化タンク加温用の燃料として利用されているが、残りの約1億m<sup>3</sup>は余剰消化ガスとして燃焼処理されている。燃料として利用できる消化ガス量を現状に加え、仮想条件を設定したときの発生量もあわせて表-1に示す<sup>8)</sup>。現在の余剰消化ガスを全量バイオガス自動車(普通自動車タイプ)で有効利用した場合、13,000台以上が走行可能である。また、現状では投入固形物量、消化タンクの利用率、消化日数など処理能力に余裕がある下水処理場が多いため、それぞれ3.0%以上、85%、20日に設定し、消化ガスを用いて消化タンクを35℃に加温した場合を想定したところ、31,000台以上が走行可能となる。さらに、現在発生している下水汚泥の全量を汚泥消化した場合で試算すると、38,000台

表-1 全処理場における消化ガス発生量

汚泥消化処理条件*1	余剰消化ガス量(m <sup>3</sup> )	精製ガス量(m <sup>3</sup> )	バイオガス自動車走行可能台数*2			精製ガスの価値*3(天然ガス換算)(円)	二酸化炭素削減量(トン)
			普通自動車	2トン塵芥車	大型バス		
現在の余剰消化ガス	107,200,000	53,600,000	13,400	10,700	2,100	3,752,000,000	199,400
処理の効率化	251,300,000	125,600,000	31,400	25,100	5,000	8,792,000,000	467,500
全汚泥で汚泥消化を実施	310,800,000	155,400,000	38,800	31,000	6,200	10,878,000,000	578,200

\*1 消化ガス発生条件は2002年時点のデータで検討

\*2 バイオガス自動車の年間走行距離および燃費はそれぞれ普通自動車：60,000km、15km/m<sup>3</sup>、2トン塵芥車：20,000km、4km/m<sup>3</sup>、大型バス：50,000km、2km/m<sup>3</sup>とする

\*3 天然ガス価格は70円/m<sup>3</sup>とする

表-2 各処理場における消化ガス発生量

下水処理場	余剰消化ガス量(m <sup>3</sup> )	精製ガス量(m <sup>3</sup> )	バイオガス自動車走行可能台数			精製ガスの価値(天然ガス換算)(円)	二酸化炭素削減量(トン)
			普通自動車	2トン塵芥車	大型バス		
大規模	2,500,000	1,250,000	310	250	50	87,500,000	4,650
中規模	500,000	250,000	60	50	10	17,500,000	930
小規模	100,000	50,000	10	10	2	3,500,000	180

\*各条件は表-1と同じ

以上が走行可能となる。また、二酸化炭素削減量は、現在の余剰消化ガスを全量有効利用するだけで20万トン近くになる。これは60,000haの天然林が1年間に吸収する量に相当する<sup>9)</sup>。

次に、個別の下水処理場での消化ガス供給可能量を処理場の規模別に表-2に示す。余剰消化ガス発生量が年間10万m<sup>3</sup>規模の下水処理場では10台、50万m<sup>3</sup>、250万m<sup>3</sup>ではそれぞれ60台、310台のバイオガス自動車の走行が可能である。大規模処理場の場合、4,500トン以上もの二酸化炭素を削減できる。また現在、燃焼処理されている余剰消化ガスの経済価値は37億円以上となる(表-1)。個別の下水処理場について経済価値を試算すると、年間発生量が10万m<sup>3</sup>規模の下水処理場では約350万円、50万m<sup>3</sup>、250万m<sup>3</sup>ではそれぞれ1,700万円、8,700万円に達する(表-2)。

以上のことから、消化ガスは省資源・環境負荷の低減につながる上、高度な経済的価値も有した資源であるといえる。さらに、下水処理場はエネルギー需要地域である都心に多く整備されているため、他の資源と異なりトラック輸送などの水平移動によるエネルギー・経済損失を極力低く抑えることが可能である。

### 5. バイオガス自動車システム

バイオガス自動車で消化ガスを利用するためには、メタン濃度を高めなければならないため、精製する必要がある(一例を図-3に示す)。脱硫後、消化ガス中の二酸化炭素を除去するには、膜分離等の多くの技術があるが、下水処理場の特性を生かした処理水を使う吸着除去が有効な方法であると考えられる。また、シャンプーなどに由来するシロキサンと呼ばれるケイ素化合物が消化ガスに微量

表-3 精製ガス充填方式

適用例	小型充填設備	急速充填設備
	家庭用 小規模事業所	ガスステーション 大規模事業所
充填圧力	20 MPa	25 MPa
車両タンク内圧力	20 MPa	20 MPa
充填時間 (普通自動車)	2~4 時間	3~5 分
(大型バス)	12~24 時間	20~30 分
責任者	必要なし	常駐

含まれており、バイオガス自動車の燃焼系統に重大な影響を及ぼす恐れがある。さらに水分も影響を与えるため、これらの物質を除去する。次に、精製ガスには法律上、臭いを付ける必要があり、付臭および熱量調整のためプロパンガスを一定量混合する。これらの処理によって精製されたガスは、発生した消化ガスより体積比で約半減する。最後に、自動車への充填のために昇圧する必要があるため、家庭用や小規模充填施設では20MPa、事業用では25MPaまで昇圧する。後者の場合、急速充填が可能であり、ガスステーション等への適用ができる一方、責任者を常駐させなければならない(表-3)。

### 6. 今後の課題

天然ガス自動車の標準燃料には、「天然ガス」として13A都市ガスなどを指定している。現時点では、精製ガスが「天然ガス」と同等であることを確認するため、排ガス組成やエンジン出力等を個別に検査する必要がある。また、バイオガス(消化ガス)の基本組成は地域やバイオマスによって大きく異なる。このため、精製システムの基準化を実施することでバイオガス自動車を容易に

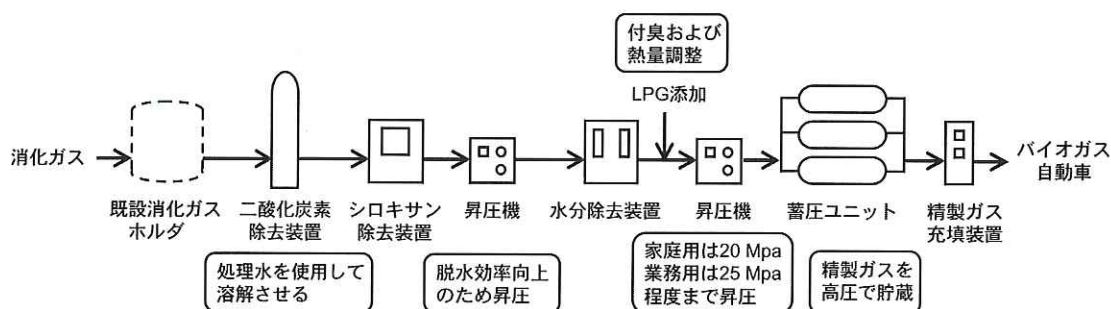


図-3 消化ガス精製・充填フロー



導入できるようになると考えられる。

一方で、経済性の問題も考えられる。全国には消化ガス発生量が10万m<sup>3</sup>に満たない下水処理場が数多くある。そのような処理場で消化ガスの有効利用を図るために、たとえばコジェネレーションを採用した場合、消化ガス精製設備以外に発電設備等を建設・維持しなければならず、経済的に非効率な場合が多い。一方、バイオガス自動車の燃料として有効利用を検討する場合、既存の天然ガス自動車をそのまま利用できるメリットを生かせるため、コジェネレーションと比べ費用を低く抑えることができる。

また、2004年時点では天然ガス利用関連の補助事業がいくつか存在する。たとえば、ガスステーションに関しては、誰にでも供給できるパブリックな施設および立地条件のもとで建設すれば、(財)エコ・ステーション推進協会の補助事業により最大9,000万円の補助金が交付される<sup>10)</sup>。また、天然ガス自動車はガソリン自動車と比較すると、改造が必要なため高額となるが、各種補助を利用することで価格上昇を抑えることができる。さらに、自動車取得税の低減など税制優遇措置もとられている<sup>11)</sup>。これらの点については関係省庁に協力を求めていくことになる。

消化ガスを有効利用するためには、その安定供給が必要である。しかし、消化ガスは消化タンクの加温に用いられことで、余剰消化ガス発生量が季節変動が生じる。これを解消するためには、消化ガスの大量貯蔵が考えられるが、そのためには貯蔵タンクの大型化が避けられない。落らは活性炭を吸着剤に用いた貯蔵タンクを開発し、従来型に比べ約1/20まで減容化することが可能となった<sup>12)</sup>。

以上述べた補助制度等を活用することで、消化ガス精製設備の建設および天然ガス自動車の購入による経済的負担は軽減できる。また、新たな技術を導入することで消化ガスを有効利用する上での障害も解消できる。市民の環境問題への意識の高まりや、下水道事業の社会的役割などを踏まえると、消化ガスの有効利用を推進するには今において他にないと考えられる。

## 7. エネルギー生産に向けた取組み

神戸市では現在、年間300万m<sup>3</sup>以上の余剰消化

ガスが発生し、施設の増改築によって今後その発生量はさらに増加すると見込まれている。今後は消化ガスを精製し、有効利用を図ることを検討している。バイオガス自動車の他に、コジェネレーションに供給することで電力・熱利用を実施し、消化ガスの100%利用を目標としている。環境保全や経済効果に加え、下水処理施設が現在有す「水再生循環機能」に「エネルギー再生循環機能」を付加した施設として位置付けることにより、市民への還元を図ることを目指している。

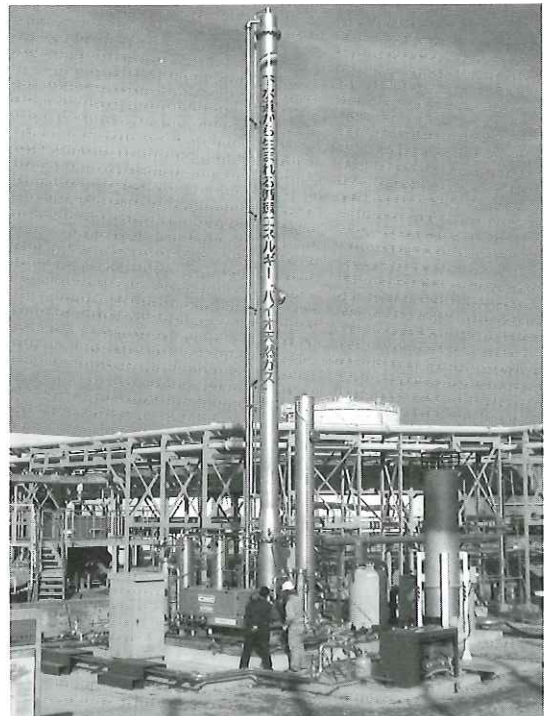


写真-1 消化ガス精製パイロットプラント



写真-2 「バイオ天然ガス」充填状況

2004年11月より、同市東灘処理場において消化ガス精製パイロットプラントが設置され、その性能確認をおこなっている。あわせて「バイオ天然ガス」と称する精製ガスを天然ガス自動車に充填して試験走行を実施している(写真-1および2)。2004年12月には、「下水汚泥から自動車燃料」という見出しでその事業内容が全国紙で紹介された。阪神淡路大震災より10年を迎える2005年1月の震災復興記念事業には、バイオガス自動車を公道走行させる予定となっている。

## 8. おわりに

これまで汚泥消化は、下水汚泥の減容化・安定化を最たる目的としておこなわれていたが、今後は下水汚泥を「資源」としてとらえ、消化ガスの回収を目的とした汚泥消化を実施する必要がある。また、木質バイオマスの有効利用は現在各方面で実施されているが、汚泥消化に適用することも可能である<sup>13)</sup>。たとえば、現在発生している下水汚泥の全量を汚泥消化し、さらにその投入固形物量の80%相当の木質バイオマスを同時に投入すれば、年間7億m<sup>3</sup>の余剰消化ガスが発生すると想定される。

下水処理場は、汚泥消化のみならず、処理の効率化や経済性も考慮した有用資源の回収等も積極的におこない、資源循環型社会の構築への一歩となる努力を継続的に実施しなければならない。汚水を浄化して放流するだけの施設という時代は終わりつつある。都心にも整備されている立地条件を十分生かした資源・エネルギー生産・供給施設へと転換するべきであろう。

## 謝辞

本報告を執筆するに当たり、京都市の事例を紹介して頂いた水谷晴記氏、神戸市の事例を紹介して頂いた河田義則氏、瀧村豪氏、バイオガス自動車についての情報提供を頂いた坂上正美氏、新町裕幸氏、千歳昭博氏、落修一氏には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 落 修一、鈴木 穰：消化ガス貯蔵施設の稼働実績調査報告書、土木研究所資料、第3939号、平成16年3月
- 2) 独立行政法人 国立環境研究所 地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィスホームページ <http://www-gio.nies.go.jp/>
- 3) 社団法人 日本下水道協会：下水道における地球温暖化防止実行計画策定の手引き、平成11年8月
- 4) 社団法人 日本下水道協会：平成14年度版 下水道統計行政編、平成16年3月
- 5) 片岡正造：森ヶ崎水再生センターにおける消化ガス発電のPFI事業について、再生と利用、27巻105号、pp.111-113、平成16年9月
- 6) 深町政晴：横浜市における汚泥集約処理と消化ガスの有効利用、再生と利用、25巻94号、pp.37-46、平成14年1月
- 7) 京都市下水道局：京都市下水道史、pp.432、平成13年3月
- 8) 落 修一：消化ガス(バイオガス)生産・利用促進のための技術、再生と利用、25巻94号、pp.18-24、平成14年1月
- 9) 林野庁ホームページ <http://www.rinya.maff.go.jp/>
- 10) 財団法人 エコ・ステーション協会ホームページ <http://www.eco-station.or.jp/>
- 11) 社団法人 日本ガス協会ホームページ <http://www.gas.or.jp/>
- 12) 落 修一、丸山勝美、金森聖一：消化ガスの吸着貯蔵法、土木技術、58巻11号、pp.93-102、平成15年11月
- 13) 落 修一、南山瑞彦、長沢英和、鈴木 穰、越智 崇：木質系廃棄物の爆砕による下水汚泥との混合・メタン発酵技術、土木技術資料、46巻1号、pp.56-61、平成16年1月

牧 孝憲\*



独立行政法人土木研究所  
材料地盤研究グループ  
プリアイクルチーム交  
流研究員  
Takanori MAKI

尾崎 正明\*\*



独立行政法人土木研究所  
材料地盤研究グループ  
プリアイクルチーム上  
席研究員  
Masaaki OZAKI