

八郎潟干拓地に湧出する高リン酸地下水の資源化

－「八郎太郎のお宝」物語－

(社) 地域資源開発研究所、秋田県立大学名誉教授

佐藤 敦

1. はじめに

八郎湖は飲料原水、農業用水および内水面漁業など多方面に利用されており八郎潟流域住民の貴重な淡水資源である。しかし、八郎湖は2009年に環境省の指定湖沼に認定されているが、夏季にアオコが異常発生するなど深刻な水質汚濁に悩まされている。

八郎潟干拓地の方上地区には、リン濃度（以下、P濃度）で23~40 mg/Lという高P地下水が常に湧出しており小排水路、LD-G₁およびLD-G₁₋₁支線排水路を経て最終的に南部排水機場から八郎湖に流出している。高P地下水由来のPは八郎湖のリン負荷の約25%を占めており、八郎湖にアオコが大量に発生し慢性的な水質汚濁を招く大きな原因の一つになっている。そのため、八郎湖の水質保全にとって天然由来の高P地下水の削減が大きな課題の一つになっている^{1~5)}。

本研究の目的は、八郎湖に流入する高P地下水をリン酸肥料として回収・資源化し、八郎湖に流入する天然由来のリン負荷を削減することによって、八郎湖の水質改善に寄与することにある。将来的には高P地下水の回収・資源化事業が起業化できれば、放置しておけば八郎湖の水質汚濁の原因になっている未利用資源のリンを有効利用すると共に、雇用の場を創出し地域経済の発展にも繋がると考えている。

本報では秋田県八郎湖環境対策室の委託事業「ふるさと雇用基金事業」(2009~2011年)で行った八郎潟干拓地の方上地区に湧出する高P地下水をリン酸肥料として回収・資源化する実証試験の結果を中心に、1)高P地下水の回収・資源化装置および要素技術、2)資源化したリン酸肥料の肥効試験および3)高P地下水の賦存量を調べる基礎調査等について報告する^{6~7)}。なお、世界のリン資源はアメリカ、中国、中近東地域（特にヨルダン）等に偏在しており、近年の貿易自由化を巡る世界経済情勢下にあっても、リン資源は戦略物資の一としてアメリカや中国はリン鉱石の輸出を事実上封鎖している。一方、我が国ではリン資源は無く、リン欠乏になり易い酸性土壌が多く、リン資源(=リン酸肥料)は正常な作物の生育・収量を確保するためには欠くことのできない肥料三要素の一つになっている。このようなリン資源をとりまく内外の厳しい状況に鑑み、放置しておけば八郎湖の水質汚濁の原因になっている高P地下水を回収・資源化し農地に還元するという本研究は、八郎湖の水質保全ばかりでなく地域資源の有効利用を目指した公益的研究としての意義があると考えている。

2. 材料および方法

1) 高P地下水の回収・資源化装置および要素技術

実証試験においては、HAP法で高P地下水（以下、原水）のPをヒドロキシアパタイト（以下、CaAP）として回収・資源化する基本的な要素技術のフローチャートを図1、P回収・資源化装置を図2にそれぞれ示した。HAP法・流動床は高P地下水と消石灰を攪拌槽で逐次反応させCaAP・リン酸肥料を効率的に生産する手法である。実証試験に用いた高P地下水、攪拌槽、沈澱槽および排水処理槽における3カ年のP濃度の推移を図3に示した。原水P濃度は、図3に示したように、23~25 mg L⁻¹（93B井戸、-7m深度）、とほぼ一定であった（2010年12月~2012年10月）。攪拌槽および沈澱槽における3カ年

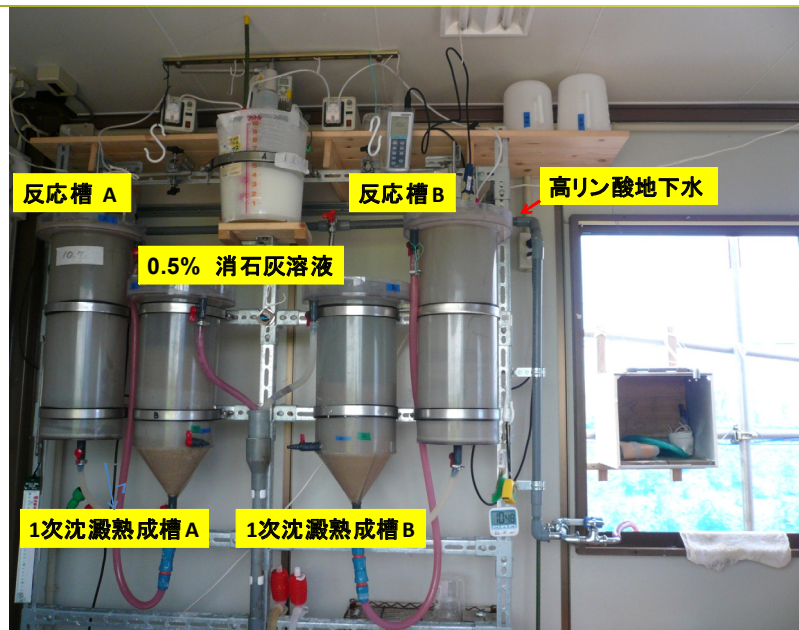
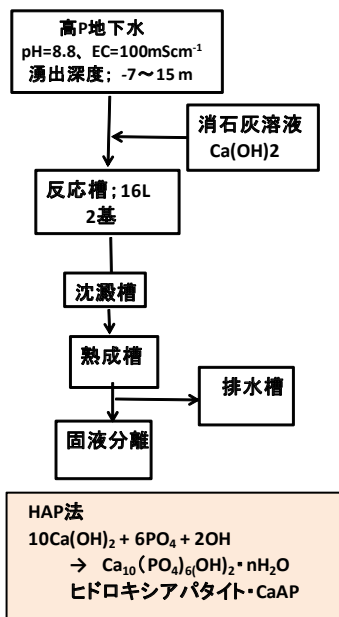


図1 高P地下水の回収・資源化フローチャート 図2 高P地下水の回収・資源化装置

のP濃度は 1 mg L^{-1} 前後で推移しており、この段階におけるP回収率は、図4に示したように、平均96%前後であった。最終排水処理槽ではP濃度は $0.2\sim 0.3\text{ mg L}^{-1}$ 以下、pHは8.5以下を目標に排水処理を行い、この段階で原水のP濃度は99%以上除去してから排水している。なお、最近93B井戸近傍の-15m深度にP濃度 40 mg L^{-1} 前後のP濃度の高い地下水が湧出(2012-11井戸)していることがわかり、2011年11月からP濃度 40 mg L^{-1} 前後の原水に切り替えてCaAPを生産している。参考までに、本実証試験で用いた93B井戸、-7m深度の原水および排水の化学組成を表1に示した。

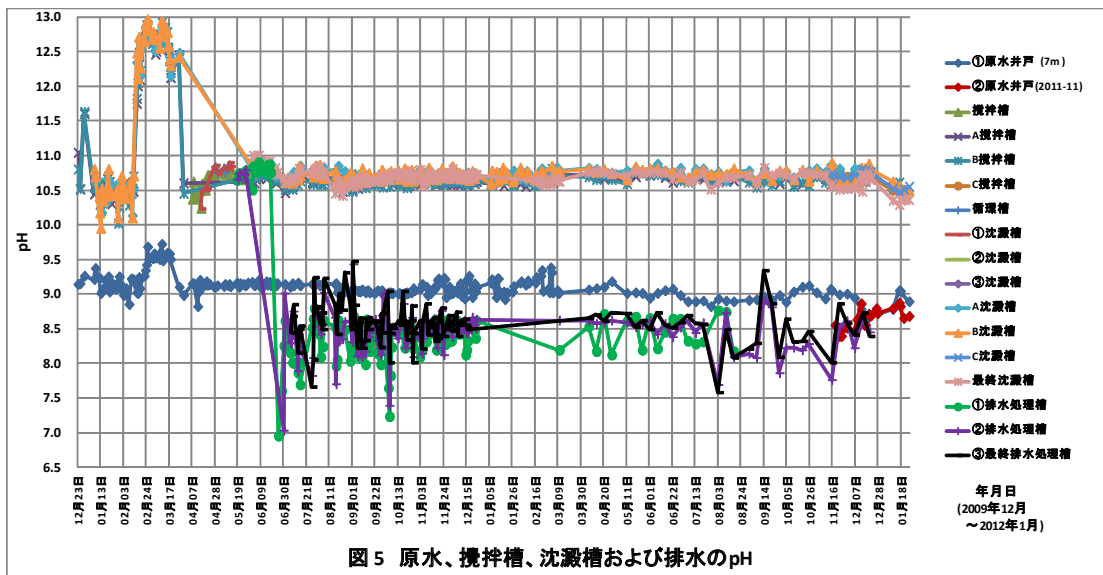
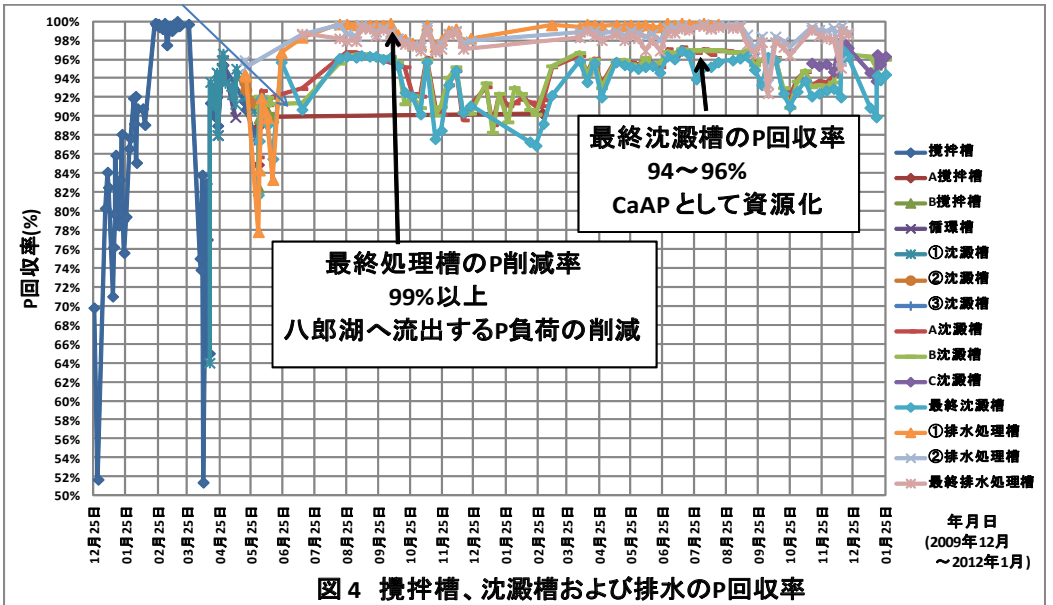
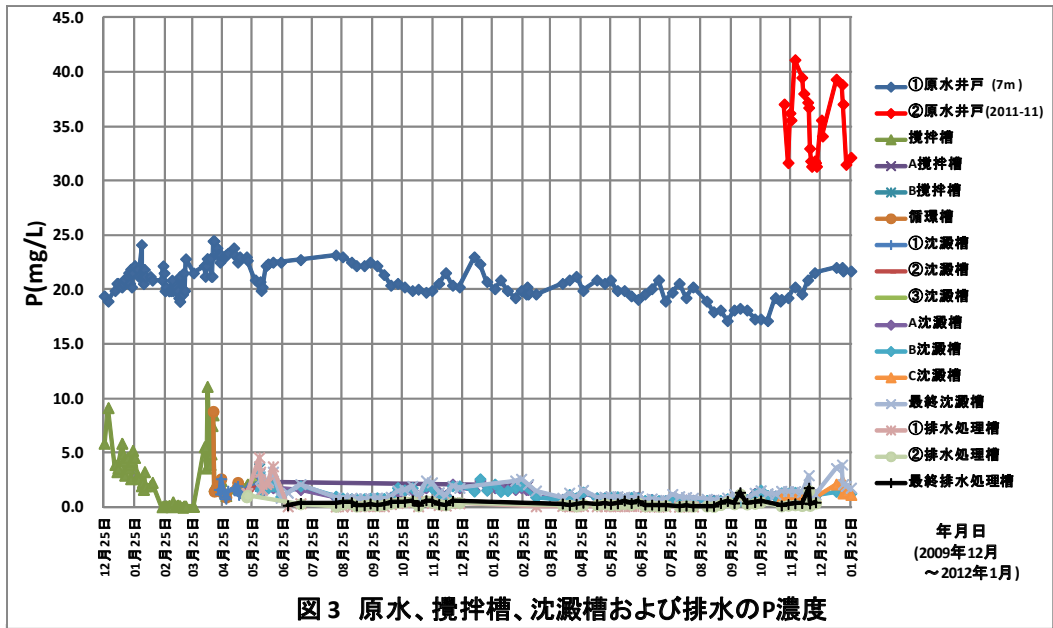
表1 高P地下水(原水)および排水処理後の水質組成(2010 0906)

分析項目	T-P (mg/l)	Cd (mg/l)	Pd (mg/l)	Cr ⁶⁺ (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)	Se (mg/l)	CN (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)
原水	24	<0.005	<0.01	<0.05	0.18	<0.0005	<0.01	<0.1	<0.01	0.02
排水	0.27	<0.005	<0.01	<0.05	0.05	<0.0005	<0.01	<0.1	<0.01	0.01

分析項目	T-N (mg/l)	TOC (mg/l)	H ⁺	水温 °C	COO (mg/l)	EC (ms/m)	SS (mg/l)
原水	1.2	5.4	8.8	25	8.0	100	<5
排水	2.2	2.2	8.0	26	4.4	110	9

2) 高P地下水の回収・資源化工程におけるpH、EC変化

HAP法による高P地下水の回収・資源化工程では反応系のpHは図5に示したように大きく変化する。原水のpHは9.0前後に対して、P回収率を高めるとともに、回収・資源化したCaAPのリン酸含有率(肥料表示・ P_2O_5 含量)を最大にするため、反応槽のpHは10.5~10.7を目標に消石灰の濃度および流量を制御する必要がある。排水槽のpHは、排水の環境基準pH8.5を目標に0.02M塩酸-塩化第1鉄溶液の点滴処理を行いpH調整および沈澱槽で回収できなかったPをほぼ完全に除去してから排水している。最終排水処理に0.02M塩酸-塩化第1鉄溶液を添加するのはPを除去するばかりでなく、原水に含まれている砒素・Asを最終排水処理槽で排水環境基準以下に抑える効果も狙ったものである。高P地下水の回収・資源化工程では反応系のEC(塩分濃度)も変化する(data省略)。原水のECは 100 mScm^{-1} 前後、反応槽および沈澱槽のECは $110\sim 118\text{ mScm}^{-1}$ 、最終排水処理槽のECは 120 mScm^{-1} に高まる。



3) CaAP の P₂O₅ 含有率および化学組成

CaAP 肥料は 1 次および 2 次沈澱槽を経て最終沈澱槽で熟成した懸濁態・CaAP を乾燥して製品化している。懸濁態・CaAP(含水比 1620%)の化学組成は、表 2 に示したように、T-P は 5400 mgL⁻¹、乾物当りに換算した P₂O₅ 濃度は 20.52% で市販の粒状・過リン酸石灰肥料と同等あるいはそれ以上のリン酸成分が得られている。CaAP のリン酸の大部分はク溶性リン酸で占められており、CaAP は土壤中で持続的に維持され生育期間の長い作物に対する P 供給効果が期待される。また、CaAP は 0.1N 可溶 Ca が 28000 mg Kg⁻¹ (乾物換算の交換性 Ca = 35%) 含まれており、酸性土壌ではリン酸の肥効の他にカルシウムの補給や酸性矯正効果もあると考えている。さらに、CaAP の砒素・As 含量は P₂O₅ 1% 当たり 0.0003% で、肥料取締法の P₂O₅ 1% 当たり As 含有率 0.004% 以下という基準に比べて 1 桁少ない品質が得られている。なお、CaAP は「八郎太郎のお宝」という商標登録(特許庁登録 第 5342774 号、平成 22 年 8 月 6 日)を既に取得している。

表 2 懸濁態 CaAP の P 濃度および化学的性質 (2010 0906)

分析項目	T-N (mg L ⁻¹)	TOC (mg L ⁻¹)	C/N比	T-P (mg L ⁻¹)	P2O5* (%乾物)	ク溶性P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	T-K (mg L ⁻¹)	T-Ca (mg L ⁻¹)	T-Mg (mg L ⁻¹)	Zn (mg L ⁻¹)	Cu (mg L ⁻¹)
CaAP	78	190	2.4	5400	20.52	12000	12	28000	390	0.7	0.2

分析項目	Pd (mg L ⁻¹)	As (mg L ⁻¹)	Cd (mg L ⁻¹)	Hg (mg L ⁻¹)	Ni (mg L ⁻¹)	Cr (mg L ⁻¹)	H ⁺	EC (ms/m)	含水率 (%)	含水比 (%)	比重
CaAP	<0.2	5.7	0.08	<0.0005	<0.5	11	10.3	87	94.2	1620	1.039

注1) 分析値は懸濁態・CaAP(含水比 1620%) 当たりの数値である。Ca は N/10 HCl 可溶性 (= 交換性 Ca)

注2) P2O5*) は乾物当りに換算した数値である

2. CaAP の肥効果試験

CaAP 肥料の大部分・97% は前述のように作物にゆっくり吸収されるク溶性リン酸 (= 緩効性リン酸) であることから、生育期間が長くリン酸成分を特異的に吸収するニンニク、玉葱などの果実形成や品質向上に適している。また、作物が吸収し易い交換性 Ca (= 1/10 HCl 可溶 Ca) が 35% と多いことから土壌酸性の矯正とともに作物の細胞形成に必要な Ca 成分が多い。そのため、作物の光合成を担う葉や茎は丈夫になり、病虫害抵抗力が強くなるため減農薬栽培にも適していると考えられた。下記に紹介したニンニクおよび玉葱の肥効果試験では無農薬栽培でも病気や害虫に侵されることはなかった。



図 6 ニンニク CaAP 肥効果試験

表3A ニンニク収量調査(Kg/a)2011 1018播種
2012 0705 収穫

	CaAP区	過石区	標準区
A 区	44.3	45.4	40.2
B 区	45.9	40.4	40.8
平均	45.1	42.9	40.5

表3B ニンニク個体調査(g/個体)

	CaAP 区	過石 区	標準区
平均	98.10	93.35	88.13
最大値	136.1	132.4	130.2
最小値	42.7	17.2	49.3
標準偏差	20.78	23.49	15.96

ニンニクの CaAP 肥効果試験の結果は図 6 および表 3A, B に示したように、収量および平均個体重とも CaAP 区 > 過石区 > 標準区の順に優っており、CaAP が生育期間の長いニンニク栽培に適していることを示していた。玉葱の CaAP 肥効果試験の結果は図 7 および表 4A に示したように、赤玉葱収量は CaAP 区が標準区および過石区より優っていたが、白玉葱収量は標準区および過石区の方が優っていた。



表4A 玉葱収量 (Kg/a) 苗移植2011 1028
収穫 2012 0707

CaAP区		過石区		標準区	
赤玉葱	白玉葱	赤玉葱	白玉葱	赤玉葱	白玉葱
248.8	302.0	72.2	362.3	245.7	407.4

図7 玉葱の CaAP 肥効試験 (左)

3. 高P地下水の賦存量を調べる基礎調査

高P地下水の賦存量は、将来的に CaAP 生産規模を拡大し起業化する際の CaAP の日生産量、設備・備品規模等の諸元を決定する要素として把握する必要がある。一方、八郎湖の水質改善にとっては高P地下水の削減目標を定量的に推定 (= シミュレーション) する基礎資料として重要な要因である。このような背景を踏まえて、実証試験で稼働している 93B 井戸を中心に LD-G₁ および LD-G₁₋₁ 支線排水路系の自然放任地において高P地下水の賦存量を調べるボーリング調査を行った。ボーリング井戸は 2010 井戸 (深度-13m)、2011-03 井戸 (深度-13m)、2011-05 井戸 (深度-17m)、2011-06 井戸 (深度-15m) および 2011-11 井戸 (深度-15m) の 5 本掘削し、地下水の深度別 P 濃度、pH および EC (データ省略) 調査を行った。ボーリング井戸の P 濃度はいずれも深度が深くなるにつれて増大しており、2011-11 井戸の-15 深度では P 濃度は最大 40 mgL⁻¹ であった。ボーリング井戸の深度別 pH は調査井戸によって多少異なるが、表層地下水の影響下にある 0~-5m 付近では 7.0~8.5 前後、それ以深で pH は 9.0~9.5 に高まり、P 濃度が高い-13~-15m 付近では再び pH8.5 前後に低下する傾向にあった。ボーリング井戸における P 濃度の追跡調査の結果、この地域一帯には図 8 に示したように高P地下水が広範囲に安定的に滞留していることがわかった。

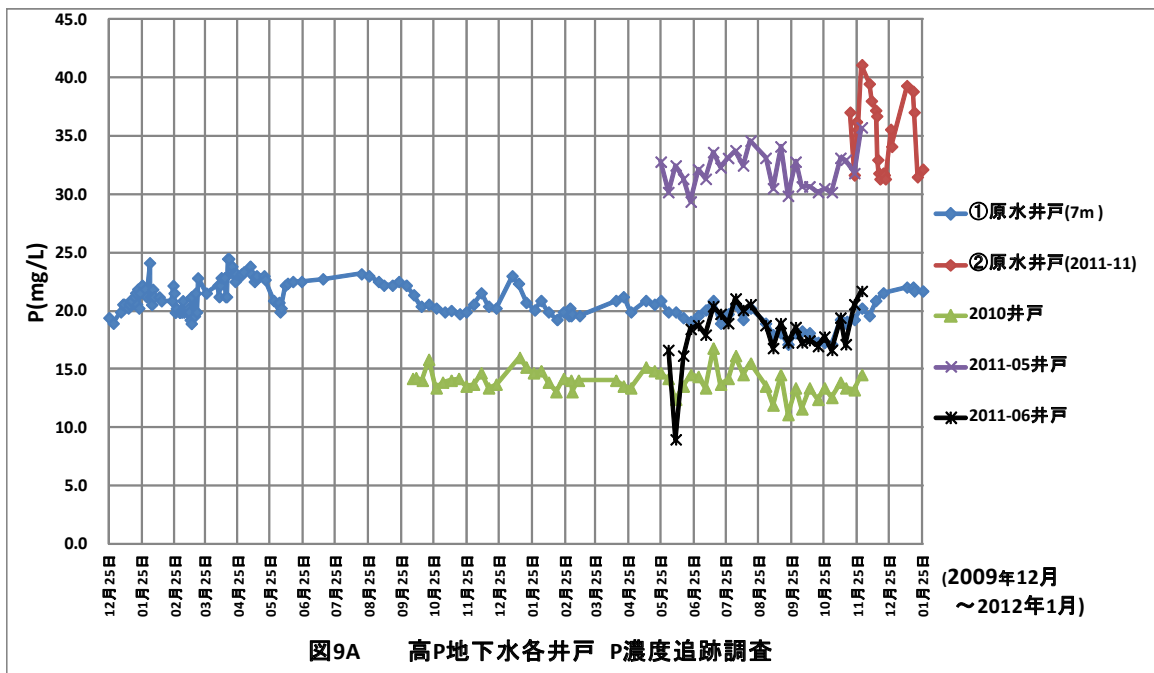


図8 方上地区における高P地下水井戸の P 濃度の追跡調査

4. まとめ

- 1) 八郎潟干拓地に湧出する P 濃度 23~25 mg L⁻¹ の高 P 地下水の回収・資源化に関する実証試験において、HAP 法（流動床）で高 P 地下水をヒドロキシアパタイト・CaAP（リン酸肥料）として平均 96 % 回収・資源化する要素技術および装置を開発した。本装置では最終排水処理槽で高 P 地下水の P を 99% 以上削減してから排水しており、八郎湖へ流出する天然由来 P 負荷量をほぼ完全に削減できることがわかった。
- 2) 高 P 地下水から回収・資源化した CaAP の乾物当たりの P₂O₅ 濃度（肥料表示）は 20 %前後で、市販の炭酸カルシウム肥料（粒状）と同等かそれ以上のリン酸成分が含まれていた。その大部分はク溶性リン酸であった。また、CaAP は交換性 Ca を 35% 前後含んでおりリン酸資材の他に酸性矯正効果も期待された。
- 3) ニンニクおよび玉葱を用いた CaAP の肥効試験（露地栽培）の結果、CaAP 区のニンニクおよび玉葱の生育・収量は対照区（過石区）と同等かそれを上回ることが実証された。これらのことから、CaAP 肥料の肥効は緩効的で生育期間の長い作物のリン酸資材として有望であると考えられた。
- 4) 八郎潟干拓地の方上地区における高 P 地下水の賦存量を探るボーリング調査の結果、LD-G₁ および LD-G₁₋₁ 支線排水路系の自然放任地には P 濃度が 15 mg L⁻¹ 前後から最大 40 mg L⁻¹ 前後の高 P 地下水が広い範囲に安定的に滞留していることがわかった。このことから、高 P 地下を地域資源として回収・資源化し八郎湖の水質保全を図るには P 地下水の賦存量を定量的に把握することが重要であると考えられた。

参考文献

- 1) 秋田県生活環境部環境保全課、秋田県環境技術センター（1985）；八郎湖水質汚濁機構解明調査総合報告書
- 2) 佐藤敦、片野登、加藤潤、小林裕、高橋正（1990~1993）；八郎潟残存湖・高リン酸負荷流出の機構解明調査報告書、日本水環境学会年会講演集・2 報（1992）
- 3) Atsushi Sato, Noboru Katano, Kazunari Tutiya, Tadashi Takahashi, Yoshihiro Kaneta ; Characteristics of pollutant Load and it' s Runoff Mechanisms in the Hachirogata 第 6 回 世界湖沼会議論文集 Vol 2 ; 669-672 (1995)
- 4) 八郎湖技術検討委員会（2000 年、7-1）八郎湖水質保全対策のあり方について（報告）
7-2）八郎湖水質保全対策（検討資料編）
- 5) 佐藤敦（2000）；八郎潟の現況,「日本の水環境」東北編、p 92-101、日本水環境学会編、技報堂出版
- 6) 平成 21 年度 地域資源開発研究所 実績報告書(2010 年 3 月)
- 7) 平成 22 年度 地域資源開発研究所 実績報告書(2011 年 3 月)